

Käytännön kokemuksia kiinteistömuuntamoiden magneettikenttien pienentämisestä



Tommi Keikko, Sampsa Kuusiluoma, Pertti Menonen, [Leena Korpinen](#)
[Tampereen teknillinen korkeakoulu](#)

Tutkimus on tehty Teknologian kehittämiskeskuksen ja alan yritysten: ABB Transmit Oy (Keskijännitekojeet ja -kojeistot sekä Jakelumuuntajat), Fingrid Oyj, Helsingin Energia, Sähköenergialiitto ry ja Energia-alan keskusliitto ry tuella.

Julkaistu 31.12.2000

[Palaute](#)

1 JOHDANTO

2 MAGNEETTIKENTÄT

2.1 Sähköjärjestelmien magneettikentät

2.2 Muuntamojen magneettikentät

2.3 Magneettikentät huomioon ottava tehdasvalmisteinen kiinteistömuuntamo

2.4 Rakennusten sähköjärjestelmien magneettikentät

2.5 Muuntajan magneettikentät

3 KIINTEISTÖMUUNTAMON MAGNEETTIKENTTIEN LASKENTA

3.1 Analyttinen laskenta

3.2 Numeerinen laskenta

3.3 Kiinteistömuuntamon magneettikenttien laskennan toteutus TTKK:ssa

4 KIINTEISTÖMUUNTAMOIDEN KENTTIEN MITTAAMINEN

4.1 Kiinteistömuuntamon aiheuttaman magneettikentän mittaaminen yläpuolisessa (tai alapuolisessa) tilassa

4.2 Kiinteistömuuntamon aiheuttaman kentän mittaaminen viereisessä tilassa

4.3 Kiinteistömuuntamoa lähellä olevan tilan kentän mittaaminen

4.4 Virran mittaaminen

4.5 Muuntamotilan kenttien mittaaminen

4.6 Muuntajan ja pienjännitekeskuksen kenttien mittaaminen

5 KIINTEISTÖMUUNTAMOITA KOSKEVA PUHELINKYSELY

5.1 Kyselyn toteutus

5.2 Kyselyn tulokset

5.3 Johtopäätökset kyselystä

6 KIINTEISTÖMUUNTAMOESIMERKIT

6.1 Esimerkkimuuntamo T290

6.2 Esimerkkimuuntamo L254

6.3 Esimerkkimuuntamo T1387

6.4 Esimerkkimuuntamo H2453

6.5 Esimerkkimuuntamo T573

6.6 Esimerkkimuuntamo H302

6.7 Esimerkkimuuntamo H2605

6.8 Esimerkkimuuntamo H279

6.9 Esimerkkimuuntamo H276

6.10 Esimerkkimuuntamo Tu96-011

6.11 Esimerkkimuuntamo T53

6.12 Esimerkkimuuntamo H447

6.13 Esimerkkimuuntamo T567

6.14 Esimerkkimuuntamo H37

6.15 Esimerkkimuuntamo T1217

6.16 Esimerkkimuuntamo T994

6.17 Esimerkkimuuntamo T486

6.18 Esimerkkimuuntamo K60

6.19 Esimerkkimuuntamo K38

6.20 Esimerkkimuuntamo T1369

7 MAGNEETTIKENTÄN VÄHENTÄMINEN ESIMERKKIMUUNTAMOISSA

7.1 Muuntamon rakenteen muuttaminen esimerkkimuuntamoissa

7.2 Muuntamon pienjännitesillan suojaaminen esimerkkimuuntamoissa

7.3 Muuntamossa useita muutosvaiheita

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

8.1 Muuntamon kenttien vähennyskeinojen vertailu

8.2 Laskenta- ja mittaustulosten vertailu

LÄHTEET

Tutkimus -etusivulle

1 JOHDANTO

Vuoden 1997 tietojen mukaan Suomessa on 121 830 jakelumuuntamoita, joista kiinteistömuuntamoita on 8 799. Sähköyhtiöiden kiinteistömuuntamoista on 6 074 taajamissa olevien jakeluyhtiöiden omistuksessa, 1 252 maaseudulla olevien jakeluyhtiöiden omistuksessa ja 169 muiden sähköyhtiöiden omistuksessa. Teollisuuslaitosten omistuksessa on 1 227 kiinteistömuuntamoita /14/.

Kiinteistömuuntamo on rinnastettavissa mihin tahansa laitteeseen rakennuksen sähköjärjestelmässä. Kiinteistömuuntamot ovat aikaisempien tutkimusten perusteella osoittautuneet jakeluverkossa keskeiseksi magneettikentälähteeksi ja niiden on huomattu aiheuttavan jonkin verran laitehäiriöitä esimerkiksi muuntamon yläpuolisessa tilassa. Tämän tähden on katsottu tarpeelliseksi tutkia mahdollisuuksia pienentää ja arvioida jo olemassa olevien kiinteistömuuntamojen magneettikenttiä. Aihe on valittu yhdeksi tutkimuskohteeksi Tampereen teknillisessä korkeakoulussa (TTKK) käynnissä olevassa projektissa ”Teknologian kehittäminen pientaajujen magneettikenttien vähentämiseksi sähkönsiirrossa ja jakelussa”.

Tutkimusprojektista on aikaisemmin kirjoitettu raportti ”Kiinteistömuuntamoiden magneettikentät”, jossa on esitetty tuloksia siitä, miten olemassa olevia kiinteistömuuntamoja voidaan ryhmitellä rakenteen mukaan. /9/

Aikaisemmassa raportissa käsiteltiin tietoja 200 muuntamosta (Helsingin Energialta, Tampereen kaupungin sähkölaitokselta ja Kuopion Energialta). Näiden perusteella suunniteltiin ryhmittely. Kiinteistömuuntamot jaettiin 18 ryhmään. Ensimmäinen jako tehtiin kisko- ja kaapelisillalla toteutettujen muuntamojen välillä. Ryhmittelyn eteneminen poikkesi hieman toisistaan näillä kahdella haaralla. Kiskollisilla muuntamoilla ryhmittely jatkui jaolla lappeellaan ja pystyssä olevien kiskojen mukaan sekä erikoistapauksiin. Kiskojen asennon jälkeen ryhmät jaettiin lähellä kattoa tai muualla kulkeviin. Viimeinen jako tehtiin kiskosillan pituuden mukaan lyhyisiin ja pitkiin. Kaapeleilla ryhmittely jatkui ensimmäisen jaon jälkeen jakoon lähellä kattoa ja muualla kulkeviin sekä erikoistapauksiin. Kulkureitin jälkeen kaapelit jaettiin symmetrisoituihin ja symmetrisoimattomiin. Kaapeleilla kuten kiskoillakin viimeinen jako oli pituuden mukaan lyhyisiin ja pitkiin.

Suurimpaan ryhmään (kaapelit lähellä kattoa, ei symmetrisoitu, pitkä) tuli 41 muuntamoita. Suurimpia ja siten keskeisimpiä ryhmiä tämän tutkimuksen perusteella ovat: kaapelit lähellä kattoa sekä vaihejärjestystä ei symmetrisoitu ja pitkä, kiskot pystyssä sekä kiinnitetty lähelle kattoa ja pitkät, kiskot lappeellaan sekä kiinnitetty muualle kuin kattoon ja lyhyet ja kaapelit lattialla sekä vaihejärjestystä ei symmetrisoitu ja pitkä

Ryhmittelyn perusteella valittiin esimerkkimuuntamoja, joiden magneettikentät sekä mitattiin että laskettiin. Laskenta ja mittaustulokset eivät kaikkien muuntamotyyppien osalta olleet täysin yhteneväisiä.

Magneettikentät ovat yleensä suurempia kiskoilla varustetuissa muuntamoissa kuin kaapeleilla varustetuissa. Suuri merkitys magneettikenttien suuruuteen on sillä, mihin siltä on kiinnitetty. Lähelle kattoa kiinnitetyillä kiskostoilla magneettivuon tiheys saattaa olla useita kymmeniä mikrotuloja. Myös lähelle kattoa kiinnitetyillä kaapelisilloilla magneettivuon tiheys voi olla merkittävästi suurempi kuin lattialle kiinnitetyillä kaapelisilloilla. Magneettikenttä on selvästi pienempi niissä tapauksissa, joissa kisko- tai kaapelisilta on kiinnitetty muualle kuin lähelle kattoa.

Tutkimuksen seuraavassa vaiheessa on keskitytty tutkimaan tarkemmin esimerkkimuuntamoja ja niiden magneettikenttien vähentämistä muuntamon yläpuolisessa tai viereisessä tilassa. Magneettikenttien aiheuttamien häiriöiden käytännön teknisistä ratkaisuista on tehty kartoitus puhelinkyselynä. Tässä raportissa esitellään puhelinkyselyn tulokset, tutkitut kiinteistömuuntamot sekä niihin tehdyt muutostyöt. Eri vaiheista on mitattu ja laskettu magneettikentät ja tulosten perusteella on pyritty arvioimaan magneettikenttien vähentämismenetelmiä.

Sähköyhtiöt ja muuntamoita valmistava teollisuus saavat muuntamoiden magneettikenttien vähentämiseen suunnitteluapua raportissa esitetyistä vähentämismenetelmistä. Valmistavassa teollisuudessa menetelmien soveltamisella voidaan saavuttaa myös vientituotteille kilpailuetua. Magneettikenttien suuruus voi vaikuttaa kuluttajien ostopäätöksiin, sillä pienikenttäinen tuote saattaa kiinnostaa asiakasta.

2 MAGNEETTIKENTÄT

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 Sähköjärjestelmien magneettikentät

Suomen sähköjärjestelmä koostuu kantaverkosta, alueverkoista ja jakeluverkoista. Kantaverkossa sähkön siirtoon käytetään 400 kV, 220 kV ja 110 kV siirtojohtoja. Alueverkoissa käytetään pääasiassa 20 kV ja 10 kV keskijännitejohtoja. Sähköjakeluun pienkuluttajille käytetään 400 V jännitettä.

Kantaverkkoa käytetään suurten tehojen siirtoon, joten suuresta jännitteestä huolimatta myös virrat ovat suuria. Tämän vuoksi siirtojohdot aiheuttavat ympäristöönsä huomattavan magneettikentän. Vuonna 1989 tehdyssä selvityksessä oli keskimääräinen magneettivuon tiheys 90%:lla 400 kV johdoilla maksimissaan alle 6,5 μT ja 110 kV johdoilla vastaavasti alle 2,5 μT . /3,16/

Keskijännitejohdoilla virrat ovat yleensä pienempiä kuin siirtojohdoilla ja johdinten vaihevälit ovat huomattavasti pienemmät. Näistä syistä keskijännitejohtojen magneettikentät ovat maanpinnan tasolla yleensä alle 3 μT . /10/

400 V jännitteellä tapahtuvassa jakelussa käytetään yleensä taajama-alueella kaapeleita, joilla vaihejohtimet ovat mahdollisimman lähellä toisiaan. Tämän vuoksi niiden magneettikentät rajoittuvat vain lähelle johtoja. /7/

2.2 Muuntamojen magneettikentät

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 muuntamon yläpuolisessa tilassa yhden metrin korkeudella lattiasta alle 12 μT . /2,17/

Muuntamoiden osalta aikaisempia tutkimuksia on tehty ensisijaisesti kiinteistömuuntamoihin liittyen, koska lähinnä niiden yläpuolella olevissa huoneistoissa on todettu erilaisia laitehäiriöitä. Uusien kiinteistömuuntamoiden suunnittelussa magneettikentät on jo jonkin aikaa otettu huomioon. Markkinoille on tuotu esimerkiksi kiinteistömuuntamoja, joiden ympärillä magneettikentät ovat perinteisiä huomattavasti pienempiä. Magneettikenttien pienentäminen muuntamoissa perustuu magneettikenttiä aiheuttavien komponenttien keskinäiseen sijoitteluun ja suojaukseen. Myös vanhoissa muuntamoissa on tehty saneerauksia magneettikenttien aiheuttamien häiriöiden vähentämiseksi. Tätä on tutkittu erityisesti Ruotsissa ja kotimaisetkin jakeluyhtiöt ovat tehneet joitakin kokeiluja.

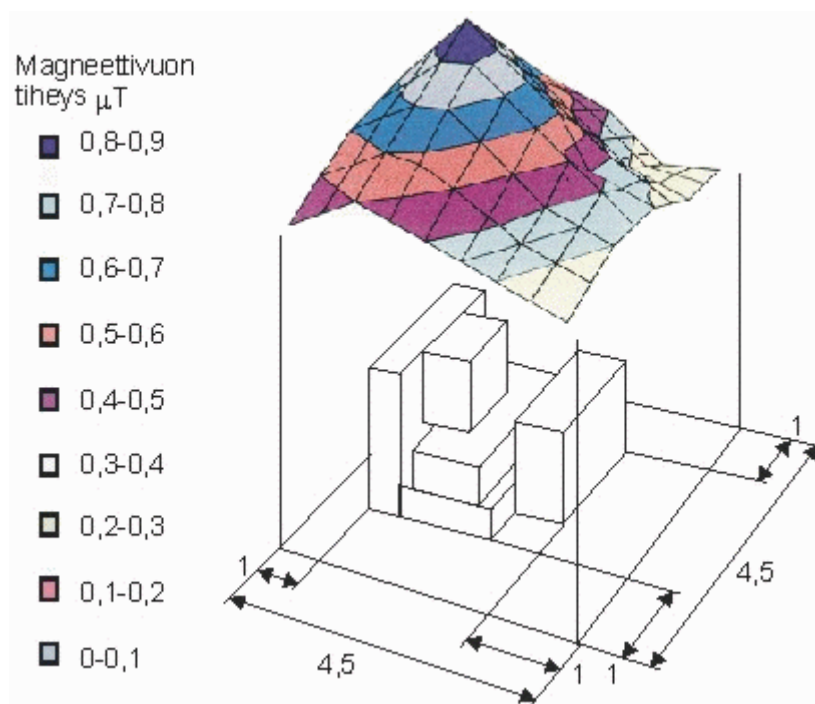
Aikaisemmissa tutkimuksissa esiteltyjen erilaisten esimerkkitapausten perusteella tiedetään myös joitakin keinoja vanhojen muuntamoiden kenttien pienentämiseksi. Kolmivaihekaapelin käyttö

pienjännitekojeiston ja muuntajan välillä yksivaihekaapelin tai kiskosillan sijasta pienentää vaihejohdinten välin pieneksi ja siten pienentää kenttiä. Kolmivaihejärjestelmän vaiheiden jakaminen kahteen osaan ja asetteleminen symmetrisesti pienentää myös kenttiä. Muuntajan ja pienjännitekojeiston yhdistäminen lattian kautta, katon sijasta, pienentää erityisesti muuntamon yläpuolisen tilan kenttiä. Syntyvä kenttä on myös sitä pienempi, mitä lyhyempi johdinyhteys on. /14/

2.3 Magneettikentät huomioon ottava tehdasvalmisteinen kiinteistömuuntamo

Magneettikenttien pienentäminen on jo huomioitu valmistajien toiminnassa. Kiinteistömuuntamon suunnittelua, hankintaa ja asennusta helpottamaan on kehitetty esimerkiksi Teslasafe-muuntamo. Muuntamo suunnitellaan valmiille alustalle, johon valitaan sähkötekniisin perustein suurjännitekojeisto, muuntaja, kiskosilta ja tarpeita vastaava pienjännitekeskus. Alustaan kuuluu myös öljynkeräyskaukalo.

Muuntamon ympäristössä normaalisti esiintyviä magneettikenttiä voidaan pienentää tällä muuntamoratkaisulla. Magneettikenttien pienentäminen muuntamossa perustuu magneettikenttiä aiheuttavien komponenttien keskinäiseen sijoitteluun ja suojaukseen. Kuvassa 2.1 on esimerkki Teslasafe -muuntamon magneettivuon tiheydestä 750 A virralla 2 m etäisyydellä (yläpuolella). Virta vastaa noin 500 kW kuormitusta.



Kuva 2.1. Teslasafe-muuntamon magneettivuon tiheys 2 metriä muuntamokojeiston yläpuolella. Mitat ovat kuvassa metreinä. /1/

Kuvan 2.1 magneettikenttä vastaa kenttää muuntamon yläpuolella sijaitsevassa tilassa. Suurin arvo muuntamokojeiston yläpuolella on $0,9 \mu\text{T}$. Sivusuunnassa pienjännitekojeiston kohdalla kenttä on 2 metrin etäisyydellä $1,0 \mu\text{T}$ ja muissa suunnissa $0,7 \mu\text{T}$. /1/

TTKK:n tutkimusten perusteella yleensä kiinteistömuuntamoiden magneettikentät 1 metrin korkeudella yläpuolisen tilan lattiasta ovat muutamasta mikrotelasta joihinkin kymmeneen mikroteloihin. /5/

2.4 Rakennusten sähköjärjestelmien magneettikentät

Rakennuksen sähköjärjestelmien aiheuttamat magneettikentät riippuvat kuormitusvirrasta ja tarkasteluetaisyydestä. Yleensä rakennusten magneettikentät ovat suuruusluokkaa $0,01 - 1 \mu\text{T}$. /7/ Kenttien suuruuteen vaikuttavat muun muassa virran kulkureittien geometria, mitat sekä kotelointi. Symmetrisesti kuormitetussa kolmivaihejärjestelmässä 50 Hz vaihevirtojen summa on nolla, jolloin

vaihevirtojen synnyttämät magneettikentät kumoavat toisiaan. Käytännössä kuormitus ei kuitenkaan ole symmetrinen ja vaihejohtimien välillä on merkittävä etäisyys, jolloin kentät eivät kumo toisiaan täysin. Epäsymmetrisesti kuormitetussa kolmivaihejärjestelmässä vaihevirtojen summa ei ole nolla. Pääosa summavirtana esiintyvistä paluuvirrasta kulkee nollajohtimessa.

rakennuksen sähköjärjestelmä on tehty TN-S -järjestelmäksi, eli viisijohdinjärjestelmäksi, summavirta kulkee yhden muuntajan järjestelmässä ainoastaan nollajohtimessa. Jos rakennuksen sähköjärjestelmässä on käytetty TN-C - tai TN-S-C -järjestelmää, eli nelijohdin- tai sekajärjestelmää, summavirta saattaa kulkea osittain järjestelmän maadoitettujen johtavien rakenteiden kautta. Tällaista maadoitettujen johtavien rakenteiden kautta kulkevaa virtaa kutsutaan harhavirraksi.

Magneettikenttiä voidaan vähentää useilla eri keinoilla. Keinoja ovat mm. etäisyyden kasvattaminen lähteeseen, johtimien väijälin pienentäminen, johtimien vaihesymmetrisointi, johdinten suojaus, kojeistojen suojaus ja kolmannen yliaallon suodattaminen verkosta.

2.5 Muuntajan magneettikentät

Muuntajan käämit tuottavat voimakkaan magneettikentän muuntajan rautasydämeen. Tämä magneettikenttä kuitenkin sulkeutuu pääosin rautasydämessä. Lisäksi pienjännitekäämeille kulkevat läpiviennit ovat toinen merkittävä tekijä, mikä aiheuttaa magneettikenttää muuntajan ulkopuolelle. Osa muuntajan sisällä olevasta kentästä kuitenkin vaimenee öljytäytteisellä muuntajalla muuntajan säiliöön. Osa käämien vuosta kulkee kuitenkin sydämen ulkopuolella hajavuona. /15/

öljytäytteisten muuntajien magneettikenttä 1 m etäisyydellä sivusuunnassa muuntajasta voi olla suurimmillaan esimerkiksi 3150 kVA muuntajalla noin 50 μT ja 800 kVA muuntajalla noin 20 μT . Esimerkiksi 500 kVA valuhartsieristeisillä muuntajilla kentät voivat olla noin 25 μT (1 m etäisyydellä).

Kuivamuuntajan nimellistehoon nähden suhteellisesti suurempi magneettikenttä johtuu käämien erilaisesta rakenteen eristyksestä ja siitä, että niillä ei käytetä vahvaa kotelointia kuten öljymuuntajilla. Muuntajan magneettikenttä vaimenee kuitenkin erittäin nopeasti. Edellä mainituilla muuntajilla suurimmat kentät 2 m päässä sivusuunnassa muuntajista ovat 3150 kVA muuntajalla noin 9 μT , 800 kVA muuntajalla noin 4 μT ja 500 kVA kuivamuuntajalla noin 3 μT . /15/

3 KIINTEISTÖMUUNTAMON MAGNEETTIKENTTIEN LASKENTA

Sähkö- ja magneettikenttiä lasketaan sekä analyyttisesti että numeerisesti (esimerkiksi FEM -menetelmällä). Kiinteistömuuntamojen kenttien laskentaan soveltuu analyyttinen laskenta. Erilaisten vaimentavien materiaalien tutkimisessa tarvitaan numeerista laskentaa.

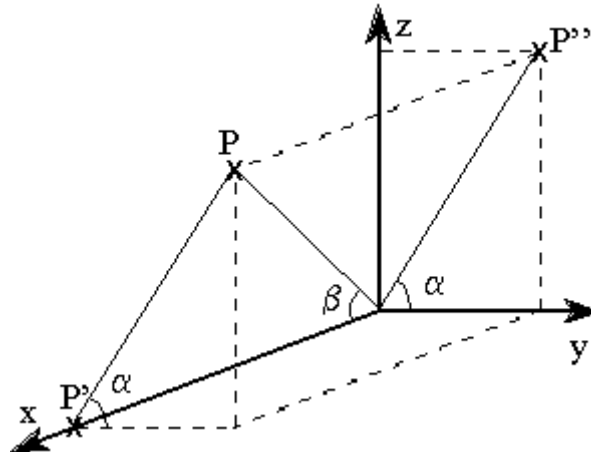
3.1 Analyyttinen laskenta

Magneettikentän analyyttisessä laskennassa käytetään Biot-Savartin lakia, jolla voidaan laskea suorassa johtimessa kulkevan virran ympärilleen aiheuttama magneettikenttä. Kun halutaan laskea mutkittävän johdon magneettikenttä, johto kuvataan suorilla osuuksilla, jotka lasketaan erikseen. Näillä johdinosuuksilla kulkee kaikilla kuitenkin samassa vaihejohtimessa sama virta. Koko johdon magneettikenttä saadaan laskemalla osajohdinten aiheuttamat magneettikenttävektorit yhteen.

Kun halutaan laskea magneettivuon tiheys tietyssä tarkastelupisteessä, se tehdään 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. /12/

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 muunnosmatriisiin 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.

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

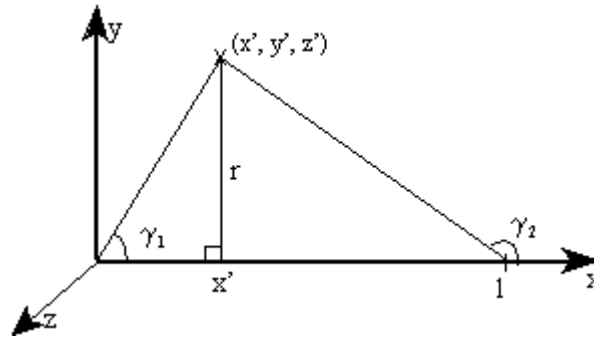
Muunnokset voidaan myös yhdistää, jolloin molemmat koordinaatistokierrot saadaan yhdellä matriisitulolla. Yhdistettyä muunnosta varten tarvittava muunnosmatriisi saadaan matriisitulon avulla, kertomalla T_x vasemmalta matriisilla T_z . Yhdistettyyn muunnokseen tarvittava muunnosmatriisi on yhtälön 3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

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

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.

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

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.

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

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

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

missä n on solmuvälien lukumäärä ja

B_i solmuvälin i aiheuttama magneettivuon tiheys.

Laskennassa on kuitenkin huomioitava, että magneettivuon tiheys 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 siniaallostaa poikkeavan kentän vaihtelun. Kolmeakselisella magneettikenttämittarilla saadaan määritettyä suoraan magneettivuon tiheyden resultantti. Yksiakselisella mittarilla resultantti saadaan laskettua mitatuista arvoista. Laskettuja hetkellisarvoja ei voida verrata mittauksiin.

3.2 Numeerinen laskenta

Elementtimenetelmä (FEM) on muodostunut magneettikenttien ratkaisemisen vakiomenetelmäksi, kun halutaan ratkaista magneettikenttä johtavien tai magneettisten materiaalien lähellä. Sen perusideana on ratkaista osittaisdifferentiaaliyhtälö variaatiotehtävän avulla. Tutkittava alue jaetaan pieniin osa-alueisiin eli elementteihin, joissa kaikissa on oma kenttäsuureta kuvaava elementaarinen funktionsa. Kun funktioiden kertoimet valitaan oikein, on ratkaisu hyvä approksimaatio oikeasta. Tarkkuutta voidaan parantaa tihentämällä elementtiverkkoa tai nostamalla ratkaistavien funktioiden astelukua.

FEM-ohjelmien käyttökelpoisuus perustuu paljolti sen joustavuuteen geometrian kuvaamisessa. Elementeillä voidaan käsitellä alueita, joiden reunat voidaan riittävällä tarkkuudella esittää tasoista tai kaarevista pinnoista koostuvilla osilla. Myöskään tehtäväalueen sisäosan mallintamiseen käytetyn elementtiverkon ei tarvitse olla säännöllinen. Elementit saavat olla eri kokoisia ja muotoisia.

FEM-ohjelmistot koostuvat yleensä kolmesta osasta: esikäsitteijästä, ratkaisijasta ja jälkikäsitteijästä. Esikäsitteijällä muodostetaan tarvittava geometria ja siihen elementtiverkko. Esikäsitteijät perustuvat useimmiten graafisen päätteen tai työaseman käyttöön. Ne mahdollistavat geometrian ja elementtiverkon interaktiivisen luomisen ja muokkaamisen. Ratkaisijalla suoritetaan numeerinen laskenta. Jälkikäsitteijää käytetään kenttäkuvien erilaisten käyrämuotojen ja numeroarvojen katselemiseen ja tulostamiseen.

Magneettikentän ratkaisemiseen voidaan vaikuttaa suoraan lähteiden ja reuna-arvojen avulla. Laskenta-alueella olevalle lähdevirrälle annetaan suuruus ja vaihekulma. Tehtäväalueen reunalle asetetaan tarvittavat reunaehdot, jotka ratkaisu toteuttaa. Tulosten tarkastelu on lähes jokaisessa ohjelmassa erilainen.

Sellaisissa esimerkkimuuntamoissa, joissa muuntajan ja pienjännitekeskuksen välisessä kisko- tai kaapelisillassa oli suojakotelo, -kouru tai suojalevy tai muuntamon seinään oli asennettu suojalevy, myös suojan suojausvaikutus piti ottaa huomioon laskennassa.

Pienjännitesilta mallinnettiin ensin ilman magneettikenttäsuojan vaimennusmateriaalin vaikutusta. Suojan kohdalla materiaaliksi valittiin ensin ilma. Suojan rakenne otettiin malliin mukaan, koska sen geometrian lisääminen myöhemmässä vaiheessa aiheuttaisi virhettä tuloksiin. Magneettikentän tulokset tallennettiin samalta etäisyydeltä kuin magneettikentän analyttinen laskenta tehtiin. Seuraavaksi suojan ominaisuudet vaihdettiin esimerkissä käytetyn materiaalin ominaisuuksiksi.

Myös tästä laskennasta tallennettiin magneettikentän tulokset samalta etäisyydeltä. Tämän jälkeen magneettikenttäsuojan suojausvaikutus (SE) saadaan laskemalla ennen suojausta laskettujen magneettikenttätulosten suhde suojauksen jälkeen laskettuihin magneettikenttätuloksiin yhtälön 12 mukaisesti.

$$SE = 20 \log_{10} \frac{B_0}{B_{suoja}} \quad (12)$$

missä B_0 on magneettivuon tiheys ilman suojaa ja

B_{suoja} on magneettivuon tiheys suojan kanssa.

Analyttisessä menetelmässä voidaankin käyttää kaksiulotteisen FEM-ohjelman avulla laskettuja suojausvaikutuksen 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 suojausvaikutukseen.

Suojausvaikutus otetaan huomioon laskennassa niissä pienjännitesillan osissa, jotka jäävät suojan sisään. Magneettikenttäsuojan vaikutus muuntamon magneettikenttään lasketaan analyttisesti. Suojausvaikutusta käytetään yhtälön 13 mukaisesti kertoimena analyttisessä laskennassa suojan sisällä olevien pienjännitesillan osien tuottamissa magneettikenttäkomponenteissa.

$$B_i = 10^{-\frac{SE}{20}} B_{i,0} \quad (13)$$

missä B_i on suojan sisällä olevan pienjännitesillan osan i magneettivuon tiheys, kun suojausvaikutus otetaan huomioon ja

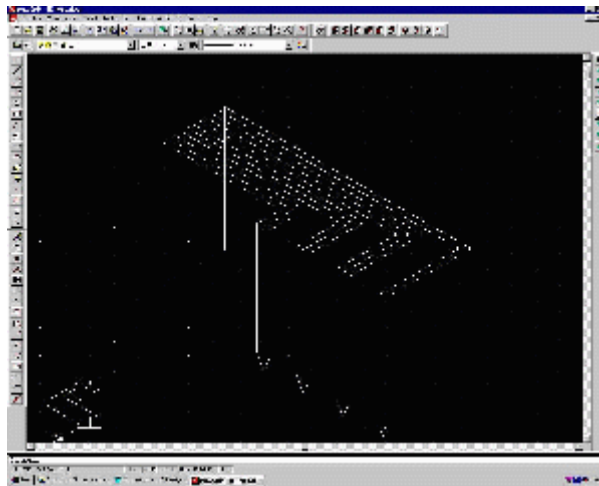
$B_{i,0}$ on suojan sisällä olevan pienjännitesillan osan i analyttisesti laskettu magneettivuon tiheys.

Suojausvaikutuksen laskenta tehtiin kaksidimensioista FEM-ohjelmaa käyttäen. Kaksidimensioinen geometrian mallintaminen on yleensä riittävän tarkka suojauslaskentaan. Laskentaan käytettiin MagNet 5.1 -ohjelmaa.

3.3 Kiinteistömuuntamon magneettikenttien laskennan toteutus TTKK:ssa

Johdinjärjestelmän aiheuttaman magneettikentän laskentaan on TTKK:ssa kehitetty analyttiseen laskentaan perustuva ohjelmistosovellutus. Johdinjärjestelmän kulmapisteiden syöttäminen tehdään antamalla jokaisen johtimen kulmapisteen koordinaatit tietokoneelle CAD-ohjelmaan.

Kuvassa 3.3 on esimerkki johdinjärjestelmästä CAD-ohjelman näytöllä. Koordinaattien syöttäminen suoraan laskentaohjelmistoon (Matlab) on hidasta ja etenkin monimutkaisemman kolmiulotteisen kuvion hahmottaminen on hankalaa. Tähän kulmapisteiden syöttövaiheeseen päätettiin ottaa avuksi CAD-ohjelmisto, jolla myös johdinjärjestelmän visuaalinen kolmiulotteinen hahmottaminen on havainnollisempaa kuin koordinaattien syöttö komentoriville laskentaohjelmistossa.



Kuva 3.3. Esimerkki johdinjärjestelmästä CAD -ohjelman näytöllä.

CAD:ssä johdinjärjestelmää voidaan tarkastella mistä tahansa kulmasta, joten piirtäminen helpottuu. CAD:n käytöstä on lisäksi hyötyä, kun johdinjärjestelmän geometriaa halutaan muuttaa. Johtimia voidaan helposti siirtää tai venyttää, eikä geometriapisteitä tarvitse syöttää joka kerta uudelleen siirryttäessä analyttiseen laskentaan. Matlab -ohjelma, jossa laskenta tehdään, ei kuitenkaan suoraan ymmärrä CAD-ohjelman tiedostoja. Tähän tarkoitukseen on käytetty Excel-taulukkolaskentaohjelmaa, johon on tehty makro-ohjelmia Visual Basic-ohjelmointikielen avulla. Visual Basic-makrolla on toteutettu CAD-tiedoston muunto Matlab:n ymmärtämäksi tekstitiedostoksi.

Lähtötietojen muunto laskentaohjelmalla

Muunnosvaihe jakaantuu kolmeen osaan: piirtämiseen, makro-ohjelman ajoon ja laskentaan. Erityisesti piirrosvaiheessa on oltava huolellinen, jotta johdinjärjestelmä siirtyisi oikein laskentaohjelmistoon. Matlab-laskentaohjelmistossa laskenta suoritetaan muuttamalla johdinjärjestelmä lukuisiksi suoriksi johtimiksi. Jokaisessa suorassa johtimessa kulkevan virran aiheuttama magneettikenttä lasketaan lopuksi yhteen analyttisellä menetelmällä Biot-Savart:n lain mukaan ja näin saadaan ympäristöön vaikuttava magneettikenttä tietyssä tarkastelupisteessä. Laskentaohjelmisto siis käsittää kaikki samankin vaiheen johdinpätkät eri johtimiksi, vaikka ne oikeasti ovatkin samaa johdinta.

Piirtäminen

CAD-piirustusohjelma tallentaa jokaisen viivanpätkän alku- ja loppukoordinaatit nimeten ne sen mukaan millä piirtokäskyllä viiva on piirretty. Makro-ohjelma poimii johtimien koordinaatit CAD-tiedostosta piirtokäskyn mukaan. Viivojen koordinaatit kootaan $[3 \times N]$ -matriisimuotoon Excel työkirjaan, jossa ne sitten tallennetaan tekstitiedostoksi (N on viivan kulmapisteiden lukumäärä). Pisteet määrittävät koordinaatit ovat x-, y- ja z-sarakkeissa ja viivojen pisteet ovat peräkkäin rivissä.

Piirtäminen on suoritettava oikealla tavalla, koska johtimet tallentuvat tiedostoon aikajärjestyksessä eli ensimmäisenä piirretty johdin ja sen kulmapisteet tallennetaan tiedostoon ensin, sitten toinen jne. Jos piirtämisessä tehdään virheitä ei muunnos CAD:stä Matlab:in tapahdu oikein. Jokainen yhden tai useamman kulman omaava johdin kannattaa piirtää ensin kokonaan ja sitten siirtyä seuraavan kaapelin tai kiskon piirtoon. Piirtämisen aikana pidetään kirjaa johdinpätkien piirtojärjestyksestä, vaihejärjestyksestä ja kulmapisteiden lukumäärästä kussakin johtimessa. Jos johtimien keskinäinen järjestys ei ole tiedossa, voi johtimelle tulla virta-arvoja syöttäessä annettua väärä virta-arvo. Mikäli solmupisteiden määrä ei täsmää, ei johdinjärjestelmä siirry oikein laskentaohjelmistoon. Kun johdinjärjestelmä on piirretty, se tallennetaan yleiseen CAD-tiedostomuotoon (DXF).

Makro-ohjelman ajaminen on yksinkertainen toimenpide. Avataan Excel ja ajetaan makro-ohjelma. Ohjelma tallentaa kulmapisteet tekstitiedostoksi.

Matlab-laskentasovellutus

Magneettikentälaskenta suoritetaan Matlab-laskentaohjelmistolla. Laskentaohjelmisto on kolmiosainen. Ensimmäisessä määritetään johdinjärjestelmien geometria ja virta-arvot. Toisessa osassa määritetään johdinjärjestelmän sijainti huoneessa, mikä käytännössä tarkoittaa laskenta-alueen pinta-alan laajuutta järjestelmän ympärillä. Laskenta-alue voi olla esimerkiksi muuntamotilan lattia.

Laskentakorkeudella valitaan tarkastelukorkeus, esimerkiksi järjestelmän alapuolella tai muuntamotilan yläpuolisessa tilassa. Syötettäessä laskentakorkeutta täytyy tietää, että onko kaapelit valmiiksi piirretty jollekin korkeudelle. Piirtäjä voi esimerkiksi ajatella johdinjärjestelmän lähtevän muuntajasta, jolloin johdinjärjestelmällä siis on valmiiksi jokin korkeus. Toinen mahdollisuus on, että johdinjärjestelmä on piirretty sellaisenaan, jolloin johdinjärjestelmän koordinaattipisteet lähtevät esimerkiksi origosta.

Kolmannessa osassa suoritetaan varsinainen laskenta geometrian ja alueen määrittelyn jälkeen, jonka jälkeen saadaan tuloksena magneettivuon tiheys kyseisellä korkeudella ja laskenta-alueella. Usein esimerkiksi alue voi olla jo ennestään määritetty, jolloin sitä ei tarvitse joka kerta erikseen määrittellä kokeiltaessa erilaisia johdinjärjestelmiä. Lisäksi on vielä neljäs ohjelma, joka piirtää johdinjärjestelmän kolmiulotteeseen koordinaatistoon ja siitä voidaan helposti tarkastaa muunnoksen onnistuminen.

4 KIINTEISTÖMUUNTAMOIDEN KENTTIEN MITTAAMINEN

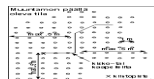
Kiinteistömuuntamon magneettikenttien mittaukset on toteutettu aikaisemmin julkaistulla tavalla. / 8/ Tässä raportissa esitetään lyhyesti mittausten toteutusta.

Mittauskohteeseen perehtymisen jälkeen käytännön mittaukset on aloitettu määrittelemällä kiintopiste, jonka avulla mittauspisteet määritellään. Muuntamossa kiintopisteeksi valitaan esimerkiksi muuntajan kannelta keskimmäinen pienjännitteen vaihe. Kiintopisteen avulla voidaan määrittellä myös esimerkiksi muuntamon yläpuolisen tilan mittauspisteet.

4.1 Kiinteistömuuntamon aiheuttaman magneettikentän mittaaminen yläpuolisessa (tai alapuolisessa) tilassa

Sen jälkeen kun keskimmäisen vaiheen sijainti on paikannettu mittaamalla muuntamon seiniä apuna käyttäen, voidaan määrittää muuntamon yläpuolella tai (mahdollisesti myös alapuolella) olevan huoneen magneettikenttämittausten kiintopiste. Muiden mittauspisteiden määrittäminen aloitetaan tästä pisteestä.

Tilan pohjapiirrokseseen tai lattiaan merkitään kiintopisteen lisäksi myös muuntajan ja pääkeskuksen välisen pienjännitekiskon tai -kaapelin sijainti tilan alapuolella. Seuraavaksi pohjapiirrokseseen tai lattiaan merkitään yhden metrin mittausvälillä ruudukko, joka lähtee liikkeelle kiintopisteestä. Ruudukon suunta noudattaa tilan seinien suuntaa, jos seinät ovat kohtisuorassa toisiinsa nähden. Jos seinät eivät ole kohtisuorassa toisiinsa nähden, käytetään ruudukon suunnan määrittämiseen lähimpänä muuntamon kattoa olevan pienjännitekiskon tai -kaapelin osan suuntaa. Pienjännitekiskon tai -kaapelin suunta valitaan ruudukon toiseksi suunnaksi. Toinen suunta on kohtisuorassa pienjännitekiskon tai -kaapelin suuntaan nähden. Esimerkki ruudukosta on esitetty kuvassa 4.1.



Kuva 4.1. Esimerkki mittauspisteistä muuntamon yläpuolisessa tilassa kenttien mittaamisessa (× on kiintopiste, o on mittauspiste).

Ruudukko on kooltaan sellainen, että se peittää koko alapuolisen muuntajan ja pienjännitekojeiston välisen yhteyden. Joissakin tiloissa seinät rajoittavat ruudukon kokoa. Ruudukon kokoa määrittelee se, miten pitkälle katsotaan aiheelliseksi mitata. Ruudukon kokoa määritettäessä voidaan myös tehdä katselmusmittaus, jossa kävellään mittarin kanssa mitattavassa tilassa ja seurataan kentän tasoa. Tämän mittauksen tulosten avulla saadaan selville, miten suureksi ruudukko kannattaa

määrittää.

Kun ruudukko on saatu määritetyksi mitattavaan tilaan, mitataan muuntajan ja pääkeskuksen välisen pienjännitekiskon tai -kaapelin virta. Mittaukseen voidaan käyttää esimerkiksi pihiampeerimittaria, jolla virran saa mitata vain kyseisiin jännitetöihin oikeutettu henkilö.

Kentät voidaan mitata määritetyn ruudukon pisteistä 0 m, 1 m ja 2 m korkeudella, mutta yleensä kaksi mittauskorkeutta 0 m ja 1 m ovat riittävät. Tulokset merkitään mittauspöytäkirjaan.

Mittaus aloitetaan kiintopisteestä. Mittaus etenee kiintopisteestä lähtien johonkin määritetystä neljästä suunnasta niin pitkälle kun on katsottu aiheelliseksi. Kun kaikki tarvittavat pisteet on saatu mitattua, voidaan mitata kentän spektri. Varsinkin magneettikentän spektri on hyödyllistä mitata kiinteistömuuntamon magneettikenttien mittauksen yhteydessä. Koska kaupunkialueilla käytettävä kuormitus vaihtelee varsin paljon, voivat kuormitukset sisältää huomattavan määrän yliaaltoja. Magneettikentän taajuusspektrin mittaamisella voidaan selvittää yliaaltojen osuus magneettikentässä. Yliaaltojen mittaukseen on hyvä sisällyttää yliaaltotaajuuDET, esimerkiksi 1000 Hz asti.

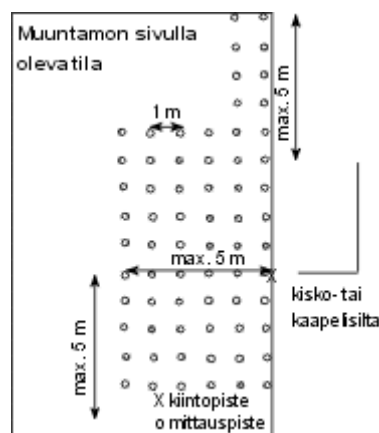
Spektri voidaan mitata esimerkiksi mittauksen kiintopisteestä tai pisteestä, jossa on mitattu suurin magneettikentän arvo. Jos spektrin arvoissa havaitaan jotain erikoista, esimerkiksi 50 Hz arvo ei ole spektrissä suurin arvo, on mittauksen paikkaa syytä vaihtaa. Merkittävimmän taajuuden poikkeaminen 50 Hz:stä tarkoittaa yleensä, että magneettikenttä ei aiheudu muuntamosta, vaan jostakin muusta lähellä olevasta laitteesta. Spektrin mittauspaikka ja -korkeus merkitään mittauspöytäkirjaan. Mittaus voidaan tehdä esimerkiksi 1 m korkeudelta.

Kun magneettikenttä ja sen spektri on saatu mitattua, mitataan muuntajan ja pääkeskuksen välisen pienjännitekiskon tai -kaapelin virta uudestaan. Virta mitataan samalla tavalla kuin ennen magneettikenttämittauksen aloittamista.

Mikäli muuntamo on tilan yläpuolella, voidaan mittaus tehdä kuten muuntamon yläpuolisen tilan mittauksissa, mutta mittauskorkeudeksi sopii parhaiten 1 m.

4.2 Kiinteistömuuntamon aiheuttaman kentän mittaaminen viereisessä tilassa

Kiinteistömuuntamon viereisessä tilassa mittaaminen aloitetaan määrittämällä mittauksen kiintopiste, joka on muuntamon viereisen tilan seinässä, muuntajan keskimmäisen pienjännitevaiheen läpivientiä vastaavalla kohdalla. Tässäkin tapauksessa tilan pohjapiirroksen tai lattiaan merkitään mittauksen kiintopisteen paikka. Seuraavaksi pohjapiirroksen tai lattiaan merkitään yhden metrin mittausvälillä ruudukko, joka aloitetaan mittauksen kiintopisteestä. Esimerkki ruudukosta on esitetty kuvassa 4.2.



Kuva 4.2. Esimerkki mittauspisteistä muuntamon viereisessä tilassa kenttien mittaamisessa (× on kiintopiste, o on mittauspiste).

Ruudukko tehdään 5 m etäisyydelle muuntajan ja tilan välisestä seinästä lähtien. Seinän suunnassa ruudukkoa jatketaan 5 m muuntajan ja pienjännitekojeiston välisen kisko- tai kaapelisillan

ulkopuolelle molempiin suuntiin.

Ruudukon suunta noudattaa tilan ja muuntamon välisen seinän suuntaa, jos tilan seinät ovat kohtisuorassa toisiinsa nähden. Jos seinät eivät ole kohtisuorassa toisiinsa nähden, käytetään ruudukon suunnan määrittämiseen lähimpänä muuntamon seinää olevaa pienjännitekiskon tai -kaapelin osaa.

Virran, magneettikentän ja spektrin mittaukset tehdään samoin kuin muuntamon yläpuolella olevan tilan mittauksissa. Kaikki tulokset merkitään mittauspöytäkirjaan.

4.3 Kiinteistömuuntamoa lähellä olevan tilan kentän mittaaminen

Kiinteistömuuntamon rakenteista ei ole edellä kuvattuja mittauksia varten aina riittävän tarkkoja tietoja. Mittaajilla ei myöskään aina ole mahdollisuutta mitata virtaa. Näissä tilanteissa voidaan mitata muuntamon läheisyydessä sijaitsevan tilan magneettikentät samalla tavalla kuin mikä tahansa työtila voidaan mitata.

Tilan mittaukset suoritetaan määritellyistä mittauspisteistä, joita on tilan kokoon nähden riittävästi. Mittauspisteet voidaan valita esimerkiksi siten, että mitataan kenttä jokaisen huoneen tai tilan keskipisteestä, sekä diagonaalien neljänneksiltä, jolloin mittauspisteitä on kaikkiaan viisi.

Jos kuitenkin kentässä on paikallista vaihtelua, kenttä voidaan kartoittaa laajemmin mittaamalla useammasta pisteestä. Tällöin merkitään pohjapiirrokseseen tai suoraan lattiaan ruudukko, ja suoritetaan mittaukset sen mukaisissa pisteissä. Sopiva mittausväli mitattavien pisteiden välillä on esimerkiksi 1 m. Mittauskorkeutena voidaan käyttää edellä esitettyjä 0 m ja 1 m.

4.4 Virran mittaaminen

Virrassa pitää ottaa huomioon muuntajan maadoituksen vaikutus, koska vanhoissa muuntamoissa muuntajan maadoitus saattaa mennä suoraan nollaliittimeen. Uudet muuntajat maadoitetaan maadoituskiskoon. Maadoitus vaikuttaa virtojen vaihekulmiin ja jos virta mitataan muuntajan liittimistä ennen muuntajan maajohtimen haaroittumista, virran suuruus saattaa poiketa todellisesta.

Virrasta pyritään mittaamaan tehollisarvo jokaisesta vaihejohtimesta ja nollajohtimesta. Jos virran mittaamiseen käytetään muuntamon omia analogisia virtamittareita, on hyvä harkita mittareiden mittausalueiden sopivuutta ennen magneettikenttämittauksia. Usein mittareiden alueet on valittu huippukuormien mukaan, jolloin mittareista on vaikea lukea sellaiset virrat, joita mittauksien yhteydessä yleensä esiintyy. Tätä ongelmaa ei nykyään ole, koska useissa asennettavissa mittareissa on digitaalinen näyttö.

Pihtiampeerimittareilla mitattaessa tai pihtiantureita käytettäessä on oltava erityisen varovainen, koska mittari joudutaan käytännössä asentamaan jännitteeseen kiskoon tai kaapeliin. Vaarana on paitsi pienjännitteiset muuntamon osat, joista virta mitataan, myös muuntajan suurjänniteliittimet ja kaapelit.

Virran pysyvyyden avulla voidaan päätellä magneettikentän mittaustulosten ajallista vaihtelua, joten virtaa kannattaa rekisteröidä vähän aikaa, jos se on mahdollista. Virran muutosten avulla pystytään päättämään, onko magneettikenttämittauksen aikainen virta ollut keskimääräistä kuormitusta suurempi vai pienempi. Myös kuormitusvirran yliaallot voi olla hyvä mitata, jos niiden epäillään olevan merkittävän suuria ja sitä varten tarvittava mittauskalusto on saatavilla. Mittaamalla yliaaltojen osuus virrasta voidaan arvioida myös yliaaltojen osuutta magneettikentässä.

4.5 Muuntamotilan kenttien mittaaminen

Muuntamon kenttien mittaus on hyvä tehdä siellä, missä työntekijät voivat altistua, ellei ole erityistä häiriöongelmaa ratkaistavana. Tällöin muuntamotilan mittaus tehdään muuntamon sisältä hoitokäytävältä muutamassa pisteessä. Mittaukset voidaan tehdä korkeuksilta 0 m, 1 m, ja mahdollisesti korkeudelta 2 m. Muuntamon sisältä mitattaessa voidaan mitata sekä kentän että virran spektri. Magneettivuon tiheyden spektri on hyvä mitata kiskon tai kaapelin lähellä olevasta mittauspisteestä. Mittauksen tulokset tallennetaan tarpeelliseksi katsotulta taajuuskaistalta.

4.6 Muuntajan ja pienjännitekeskuksen kenttien mittaaminen

Muuntajan tai pienjännitekeskuksen aiheuttamat kentät voidaan mitata kuten esimerkiksi laitteen kentät käyttöympäristössä edestä, sivuilta, takaa ja kulmista, mikäli se on mahdollista.

Käytännössä seinät estävät usein kaikkien suuntien mittaamisen. Muuntajan kentän mittaus tehdään muuntajan suoja-aidan takaa, kuitenkin selvästi irti aidasta. Suoja-aita vaikuttaa muuntamon sähköasennuksista aiheutuvaan magneettikenttään. Mitattu kenttä on tästä huolimatta kyseisessä kohdassa vaikuttava magneettikenttä.

Pienjännitekeskuksen kentän mittaus tehdään käyttö- tai työskentelyetäisyydeltä. Magneettikentän mittaamisen jälkeen tai mittauksen aikana mitataan muuntajan tai keskuksen virta. Sähkökentät ovat yleensä niin pieniä, ettei niitä ole mielekäästä mitata.

5 KIINTEISTÖMUUNTAMOITA KOSKEVA PUHELINKYSELY

Tutkittavan aineiston kartoittamiseksi tehtiin puhelinkysely sähköyhtiöiden kiinteistömuuntamoihin liittyvistä kenttähäiriöistä.

5.1 Kyselyn toteutus

Kyselyn tarkoituksena oli saada selville, miten paljon sähköyhtiöt ovat tehneet muutostöitä kiinteistömuuntamoissa magneettikenttien vähentämiseksi. Tämän lisäksi haluttiin erityisesti selvittää käytettyjä kenttien vähennyskeinoja, niiden tehokkuutta ja kustannuksia. Kysely suoritettiin pääasiassa puhelimitse, ja ensimmäinen yhteydenotto suoritettiin aina puhelimitse. Myöhemmässä kanssakäymisessä käytettiin muitakin yhteydenpitokeinoja, kuten esimerkiksi sähköpostia ja telefaxia.

Kyselyssä kartoitettiin aakkosjärjestyksessä sähköyhtiöitä ympäri Suomea. Kyselyssä keskityttiin asutuskeskuksissa toimiviin sähköyhtiöihin.

Ennen ensimmäistä yhteydenottoa yritettiin ottaa selville muuntamoista vastaava henkilö esimerkiksi puhelinluettelosta tai yhtiön internet -sivuilta. Jos tämä ei tuottanut tulosta, yleensä soitettiin yrityksen puhelinkeskukseen ja kysyttiin muuntamoista vastaavaa henkilöä puhelimeen.

Keskustelun aluksi muuntamovastaavalle kerrottiin meneillä olevasta projektista ”Teknologian kehittäminen pientaajuisten magneettikenttien vähentämiseksi sähkön siirrossa ja jakelussa” ja annettiin yleistietoa siitä, mitä oli jo saatu aikaan ja mitä projektin edetessä tullaan vielä tekemään. Tämän jälkeen kysyttiin, onko yhtiössä tehty kiinteistömuuntamoissa muutostöitä magneettikenttien vähentämiseksi. Jos yhtiössä oli suoritettu muuntamoissa magneettikenttien vähentämistöitä, kysyttiin olisiko yhtiöllä tarjota tietoja tuloksista, menetelmistä ja kustannuksista. Keskustelun edetessä selvitettiin vastaajan kokemuksia magneettikenttähäiriöistä, niiden poistosta, ja myöskin kokemuksia tarjolla olevan tiedon määrästä. Keskustelun päätteeksi sovittiin tulevasta yhteydenpidosta sekä siitä, miten yhtiöt toimittavat tietoja mahdollisista muutostöistä.

5.2 Kyselyn tulokset

Yhteensä 31 sähköyhtiöön otettiin yhteyttä kyselyn muodossa. Aikaisemmin tietoja oli jo 3 yhtiöltä. Näistä yhtiöistä aikaisemmin saadut tiedot ovat mukana tuloksissa. Kolmesta yhtiöstä ei saatu kiinni henkilöä, joka olisi osannut vastata kysymyksiin tai yhtiöistä ei soittopyyntöihin sekä sähköpostiin vastattu.

Kyselyn perusteella harvoilla yhtiöillä oli ollut ongelmia muuntamojen magneettikentistä. Muutamat yhtiöt olivat varautuneet ongelmiin jo etukäteen tekemällä uusista muuntamoista puistomuuntamoita. Muutamilla yhtiöillä oli pari häiriötapausta. Yhteensä kiinteistömuuntamoita, joissa on jo tehty muutostöitä häiriöiden tähden oli noin 30. Tämän kyselyn perusteella yleisemmin kiinteistömuuntamoihin on liittynyt meluhäiriöitä. Neljän yhtiön joissakin muuntamoissa esiintyi jonkinlaisia häiriöitä. Suunnitteilla on kolme muuntamon muutostyötä, joihin TTKK:n tutkimusryhmä voi tutustua etukäteen.

Kysely ei tietenkään sisällä kaikkia mahdollisia kiinteistömuuntamo-ongelmia, sillä kaikki yhtiöt eivät anna mielellään tietoja ulkopuolisille. Vastaanotto oli kuitenkin yleisesti positiivista ja yhtiöt ovat kiinnostuneita tutkimusten tuloksista. Seuraavassa taulukossa 5.1 on esitetty yhteenveto kyselyn tuloksista.

Taulukko 5.1. Yhteenveto kyselyn tuloksista. /11/

Sähkøyhtiöt	Ei muutostöitä	Muutostöitä	Piirustukset	Mitattu	Tulokset	Kustannukset
Elnova (Nummela)	x					
Espoon Sähkö Oyj	x					
Etelä-Suomen Energia Oy	x					
Forssan Energia Oy	x					
Heinola Energia Oy	x					
Helsingin energia Oy		x	x	x	x	x
Hämeenlinnan Energia Oy	x					
Haminan Energia Oy	x					
Haukiputaan Sähköosuuskunta	x					
Imatran Seudun Sähkö Oy	x					
Isommus-energia Oy	x					
Pietarsaaren Energialaitos (Jakobstad Energiverk)	x					
Jyväskylän energia		x			x	x
Kaakon Energia Oy	x					
Kainuun Sähkö Oyj	x					
Keravan Energia Oy	x					
Keski-Suomen Valo Oy	x					
Keuruun Sähkö Oy	x					
Kuopion Energia Oy		x	x	x	x	
Kokemäen Sähkö Oy	x					
Lahti Energia Oy		x	x	x	x	x

Länsivoima Oyj, Alavus		x				
Länsivoima Oyj, Paimio	x					
Pori Energia Oy		x				
Porvoon Energia Oy	x					
Tampereen Sähkölaitos		x	x			
Turku Energia Oy - Åbo Energi Ab		x	x		x	x
Tuusulanjärven Energia Oy		x				
Oulun Energia Oy		x				
Vaasan Sähkö Oy	x					
Valkeakosken Energia Oy		x				

5.3 Johtopäätökset kyselystä

Yleisesti ottaen voidaan kyselyn perusteella päätellä, että ainakaan vielä kiinteistömuuntamoiden magneettikentät eivät ole olleet suuri ongelma suomalaisille sähköyhtiöille. Magneettikenttiä yleisempi häiriölähde on monessa yhtiössä ollut muuntamoista aiheutuneet meluhäiriöt. Keskusteluissa kävi kuitenkin selvästi ilmi, että sähköyhtiöt ovat tietoisia ihmisten huolesta magneettikenttien suhteen ja monet kyselyyn vastanneista ovatkin kertoneet yhtiönsä rakentavan uudet muuntamot ulkotiloihin välttääkseen jo etukäteen kiinteistömuuntamoista mahdollisesti aiheutuvat terveysvaikutukset, ja etenkin erilaisissa laitteissa aiheutuneet häiriöt.

Kyselyssä yleisimmin esille tulleita vähentämistapoja olivat: pienjännitesillan siirtäminen kauemmaksi häiriintyvistä kohteesta, kiskojen muuttaminen kaapeleiksi, muuntajan vaihtaminen kahteen pienempään, rakennuksen harhavirtojen vähentäminen, suojaus metallikourun, -kotelon tai -levyn avulla sekä eri keinojen yhdistäminen.

Eri keinojen yhdistäminen on näistä suosituin. Parhaan mahdollisen tuloksen aikaansaamiseksi erilaisia tapoja yhdistellään suuremman yhteisvaikutuksen saavuttamiseksi.

Jo suhteellisen pienellä panostuksella on päästy hyviin lopputuloksiin, kun toteutettu vähennysmenetelmä on mietitty tarkkaan etukäteen, sekä toteutettu hyvin. Väärin tai huonosti toteutetut ratkaisut voivat johtaa jopa toimenpiteitä edeltävää tilannetta huonompaan tulokseen. Yleispätevää oikeata tapaa kenttien vähentämiseen ei ole, vaan kuhunkin muuntamoon on erikseen tutkittava ja mietittävä paras ratkaisu.

Suurin osa kyselyyn vastanneista, jotka olivat tehneet muutostöitä, olivat pystyneet vähentämään magneettikenttien voimakkuudet puoleen alkuperäisestä tilanteesta. Tässäkin täytyy ottaa huomioon se, että suurin osa mittauksista oli sähköyhtiöiden itsensä tekemiä ja mittauskäytännöt eivät olleet täysin yhteneväisiä. Myöskään mittareista ja niiden ominaisuuksista (esimerkiksi tarkkuudesta) ei monestikaan saatu tietoa.

Erilaisten menetelmien kustannukset olivat odotettua vaikeampaa arvioida. Materiaalikustannukset on yleensä ottaen helppo laskea, mutta suunnittelu- ja työkuustannukset on vaikea erottaa muista työtehtävistä. Myös keskeytyksestä aiheutuneita kustannuksia on vaikea arvioida. Usein magneettikenttiä vähentäviä muutostöitä tehdään samanaikaisesti muuntamoon tehtävien muiden muutostöiden kanssa. Tällöin magneettikenttien vähentämisestä aiheutuneet kustannukset on entistä

vaikeampi arvioida.

1 JOHDANTO

Vuoden 1997 tietojen mukaan Suomessa on 121 830 jakelumuuntamoita, joista kiinteistömuuntamoita on 8 799. Sähköyhtiöiden kiinteistömuuntamoista on 6 074 taajamissa olevien jakeluyhtiöiden omistuksessa, 1 252 maaseudulla olevien jakeluyhtiöiden omistuksessa ja 169 muiden sähköyhtiöiden omistuksessa. Teollisuuslaitosten omistuksessa on 1 227 kiinteistömuuntamoita /14/.

Kiinteistömuuntamo on rinnastettavissa mihin tahansa laitteeseen rakennuksen sähköjärjestelmässä. Kiinteistömuuntamot ovat aikaisempien tutkimusten perusteella osoittautuneet jakeluverkossa keskeiseksi magneettikenttälähteeksi ja niiden on huomattu aiheuttavan jonkin verran laitehäiriötä esimerkiksi muuntamon yläpuolisessa tilassa. Tämän tähden on katsottu tarpeelliseksi tutkia mahdollisuuksia pienentää ja arvioida jo olemassa olevien kiinteistömuuntamojen magneettikenttiä. Aihe on valittu yhdeksi tutkimuskohteeksi Tampereen teknillisessä korkeakoulussa (TTKK) käynnissä olevassa projektissa ”Teknologian kehittäminen pientaajujen magneettikenttien vähentämiseksi sähkönsiirrossa ja jakelussa”.

Tutkimusprojektista on aikaisemmin kirjoitettu raportti ”Kiinteistömuuntamoiden magneettikentät”, jossa on esitetty tuloksia siitä, miten olemassa olevia kiinteistömuuntamoja voidaan ryhmitellä rakenteen mukaan. /9/

Aikaisemmassa raportissa käsiteltiin tietoja 200 muuntamosta (Helsingin Energialta, Tampereen kaupungin sähkölaitokselta ja Kuopion Energialta). Näiden perusteella suunniteltiin ryhmittely. Kiinteistömuuntamot jaettiin 18 ryhmään. Ensimmäinen jako tehtiin kisko- ja kaapelisillalla toteutettujen muuntamojen välillä. Ryhmittelyn eteneminen poikkesi hieman toisistaan näillä kahdella haaralla. Kiskollisilla muuntamoilla ryhmittely jatkui jaolla lappeellaan ja pystyssä olevien kiskojen mukaan sekä erikoistapauksiin. Kiskojen asennon jälkeen ryhmät jaettiin lähellä kattoa tai muualla kulkeviin. Viimeinen jako tehtiin kiskosillan pituuden mukaan lyhyisiin ja pitkiin. Kaapeleilla ryhmittely jatkui ensimmäisen jaon jälkeen jakoon lähellä kattoa ja muualla kulkeviin sekä erikoistapauksiin. Kulkureitin jälkeen kaapelit jaettiin symmetrisoituihin ja symmetrisoimattomiin. Kaapeleilla kuten kiskoillakin viimeinen jako oli pituuden mukaan lyhyisiin ja pitkiin.

Suurimpaan ryhmään (kaapelit lähellä kattoa, ei symmetrisoitu, pitkä) tuli 41 muuntamoita. Suurimpia ja siten keskeisimpiä ryhmiä tämän tutkimuksen perusteella ovat: kaapelit lähellä kattoa sekä vaihejärjestystä ei symmetrisoitu ja pitkä, kiskot pystyssä sekä kiinnitetty lähelle kattoa ja pitkät, kiskot lappeellaan sekä kiinnitetty muualle kuin kattoon ja lyhyet ja kaapelit lattialla sekä vaihejärjestystä ei symmetrisoitu ja pitkä

Ryhmittelyn perusteella valittiin esimerkkimuuntamoja, joiden magneettikentät sekä mitattiin että laskettiin. Laskenta ja mittaustulokset eivät kaikkien muuntamotyyppien osalta olleet täysin yhteneväisiä.

Magneettikentät ovat yleensä suurempia kiskoilla varustetuissa muuntamoissa kuin kaapeleilla varustetuissa. Suuri merkitys magneettikenttien suuruuteen on sillä, mihin silta on kiinnitetty. Lähelle kattoa kiinnitetyillä kiskostoilla magneettivuon tiheys saattaa olla useita kymmeniä mikrotessloja. Myös lähelle kattoa kiinnitetyillä kaapelisilloilla magneettivuon tiheys voi olla merkittävästi suurempi kuin lattialle kiinnitetyillä kaapelisilloilla. Magneettikenttä on selvästi pienempi niissä tapauksissa, joissa kisko- tai kaapelisilta on kiinnitetty muualle kuin lähelle kattoa.

Tutkimuksen seuraavassa vaiheessa on keskitytty tutkimaan tarkemmin esimerkkimuuntamoja ja niiden magneettikenttien vähentämistä muuntamon yläpuolisessa tai viereisessä tilassa. Magneettikenttien aiheuttamien häiriöiden käytännön teknisistä ratkaisuista on tehty kartoitus puhelinkyselynä. Tässä raportissa esitellään puhelinkyselyn tulokset, tutkitut kiinteistömuuntamot sekä niihin tehdyt muutostyöt. Eri vaiheista on mitattu ja laskettu magneettikentät ja tulosten

perusteella on pyritty arvioimaan magneettikenttien vähentämismenetelmiä.

Sähköyhtiöt ja muuntamoita valmistava teollisuus saavat muuntamoiden magneettikenttien vähentämiseen suunnitteluapua raportissa esitetyistä vähentämismenetelmistä. Valmistavassa teollisuudessa menetelmien soveltamisella voidaan saavuttaa myös vientituotteille kilpailuetua. Magneettikenttien suuruus voi vaikuttaa kuluttajien ostopäätöksiin, sillä pienikenttäinen tuote saattaa kiinnostaa asiakasta.

2 MAGNEETTIKENTÄT

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 Sähköjärjestelmien magneettikentät

Suomen sähköjärjestelmä koostuu kantaverkosta, alueverkoista ja jakeluverkoista. Kantaverkossa sähkön siirtoon käytetään 400 kV, 220 kV ja 110 kV siirtojohtoja. Alueverkoissa käytetään pääasiassa 20 kV ja 10 kV keskijännitejohtoja. Sähköjakeluun pienkuluttajille käytetään 400 V jännitettä.

Kantaverkkoa käytetään suurten tehojen siirtoon, joten suuresta jännitteestä huolimatta myös virrat ovat suuria. Tämän vuoksi siirtojohdot aiheuttavat ympäristöönsä huomattavan magneettikentän. Vuonna 1989 tehdyssä selvityksessä oli keskimääräinen magneettivuon tiheys 90%:lla 400 kV johdoilla maksimissaan alle 6,5 μT ja 110 kV johdoilla vastaavasti alle 2,5 μT . /3,16/

Keskijännitejohdoilla virrat ovat yleensä pienempiä kuin siirtojohdoilla ja johdinten vaihevälit ovat huomattavasti pienemmät. Näistä syistä keskijännitejohtojen magneettikentät ovat maanpinnan tasolla yleensä alle 3 μT . /10/

400 V jännitteellä tapahtuvassa jakelussa käytetään yleensä taajama-alueella kaapeleita, joilla vaihejohtimet ovat mahdollisimman lähellä toisiaan. Tämän vuoksi niiden magneettikentät rajoittuvat vain lähelle johtoja. /7/

2.2 Muuntamojen magneettikentät

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 muuntamon yläpuolisessa tilassa yhden metrin korkeudella lattiasta alle 12 μT . /2,17/

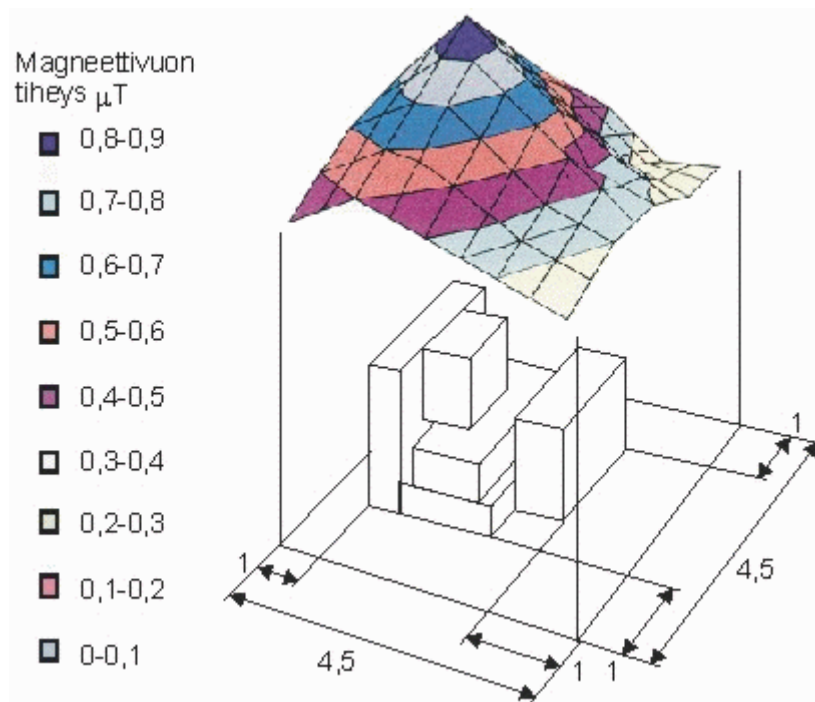
Muuntamoiden osalta aikaisempia tutkimuksia on tehty ensisijaisesti kiinteistömuuntamoihin liittyen, koska lähinnä niiden yläpuolella olevissa huoneistoissa on todettu erilaisia laitehäiriöitä. Uusien kiinteistömuuntamoiden suunnittelussa magneettikentät on jo jonkin aikaa otettu huomioon. Markkinoille on tuotu esimerkiksi kiinteistömuuntamoja, joiden ympärillä magneettikentät ovat perinteisiä huomattavasti pienempiä. Magneettikenttien pienentäminen muuntamoissa perustuu magneettikenttiä aiheuttavien komponenttien keskinäiseen sijoitteluun ja suojaukseen. Myös vanhoissa muuntamoissa on tehty saneerauksia magneettikenttien aiheuttamien häiriöiden vähentämiseksi. Tätä on tutkittu erityisesti Ruotsissa ja kotimaisetkin jakeluyhtiöt ovat tehneet joitakin kokeiluja.

Aikaisemmissa tutkimuksissa esiteltyjen erilaisten esimerkkitapausten perusteella tiedetään myös joitakin keinoja vanhojen muuntamoiden kenttien pienentämiseksi. Kolmivaihekaapelin käyttö pienjännitekojeiston ja muuntajan välillä yksivaihekaapelin tai kiskosillan sijasta pienentää vaihejohdinten välin pieneksi ja siten pienentää kenttiä. Kolmivaihejärjestelmän vaiheiden jakaminen kahteen osaan ja asetteleminen symmetrisesti pienentää myös kenttiä. Muuntajan ja pienjännitekojeiston yhdistäminen lattian kautta, katon sijasta, pienentää erityisesti muuntamon yläpuolisen tilan kenttiä. Syntyvä kenttä on myös sitä pienempi, mitä lyhyempi johdinyhteys on. /[14/](#)

2.3 Magneettikentät huomioon ottava tehdasvalmisteinen kiinteistömuuntamo

Magneettikenttien pienentäminen on jo huomioitu valmistajien toiminnassa. Kiinteistömuuntamon suunnittelua, hankintaa ja asennusta helpottamaan on kehitetty esimerkiksi Teslasafe-muuntamo. Muuntamo suunnitellaan valmiille alustalle, johon valitaan sähkötekniisin perustein suurjännitekojeisto, muuntaja, kiskosilta ja tarpeita vastaava pienjännitekeskus. Alustaan kuuluu myös öljynkeräyskaukalo.

Muuntamon ympäristössä normaalisti esiintyviä magneettikenttiä voidaan pienentää tällä muuntamoratkaisulla. Magneettikenttien pienentäminen muuntamossa perustuu magneettikenttiä aiheuttavien komponenttien keskinäiseen sijoitteluun ja suojaukseen. Kuvassa 2.1 on esimerkki Teslasafe -muuntamon magneettivuon tiheydestä 750 A virralla 2 m etäisyydellä (yläpuolella). Virta vastaa noin 500 kW kuormitusta.



Kuva 2.1. Teslasafe-muuntamon magneettivuon tiheys 2 metriä muuntamokojeiston yläpuolella. Mitat ovat kuvassa metreinä. /[1/](#)

Kuvan 2.1 magneettikenttä vastaa kenttää muuntamon yläpuolella sijaitsevassa tilassa. Suurin arvo muuntamokojeiston yläpuolella on $0,9 \mu\text{T}$. Sivusuunnassa pienjännitekojeiston kohdalla kenttä on 2 metrin etäisyydellä $1,0 \mu\text{T}$ ja muissa suunnissa $0,7 \mu\text{T}$. /[1/](#)

TTKK:n tutkimusten perusteella yleensä kiinteistömuuntamoiden magneettikentät 1 metrin korkeudella yläpuolisen tilan lattiasta ovat muutamasta mikrotoslasta joihinkin kymmeneen mikrotoslaihin. /[5/](#)

2.4 Rakennusten sähköjärjestelmien magneettikentät

Rakennuksen sähköjärjestelmien aiheuttamat magneettikentät riippuvat kuormitusvirrasta ja tarkasteluetaisyydestä. Yleensä rakennusten magneettikentät ovat suuruusluokkaa $0,01 - 1 \mu\text{T}$. /[7/](#)

Kenttien suuruuteen vaikuttavat muun muassa virran kulkureittien geometria, mitat sekä kotelointi. Symmetrisesti kuormitetussa kolmivaihejärjestelmässä 50 Hz vaihevirtojen summa on nolla, jolloin vaihevirtojen synnyttämät magneettikentät kumoavat toisiaan. Käytännössä kuormitus ei kuitenkaan ole symmetrinen ja vaihejohtimien välillä on merkittävä etäisyys, jolloin kentät eivät kumoa toisiaan täysin. Epäsymmetrisesti kuormitetussa kolmivaihejärjestelmässä vaihevirtojen summa ei ole nolla. Pääosa summavirtana esiintyvistä paluuvirrasta kulkee nollajohtimessa.

rakennuksen sähköjärjestelmä on tehty TN-S –järjestelmäksi, eli viisijohdinjärjestelmäksi, summavirta kulkee yhden muuntajan järjestelmässä ainoastaan nollajohtimessa. Jos rakennuksen sähköjärjestelmässä on käytetty TN-C - tai TN-S-C -järjestelmää, eli nelijohdin- tai sekajärjestelmää, summavirta saattaa kulkea osittain järjestelmän maadoitettujen johtavien rakenteiden kautta. Tällaista maadoitettujen johtavien rakenteiden kautta kulkevaa virtaa kutsutaan harhavirraksi.

Magneettikenttiä voidaan vähentää useilla eri keinoilla. Keinoja ovat mm. etäisyyden kasvattaminen lähteeseen, johtimien väliin pienentäminen, johtimien vaihesymmetrisointi, johdinten suojaus, kojeistojen suojaus ja kolmannen yliaallon suodattaminen verkosta.

2.5 Muuntajan magneettikentät

Muuntajan käämit tuottavat voimakkaan magneettikentän muuntajan rautasydämeen. Tämä magneettikenttä kuitenkin sulkeutuu pääosin rautasydämessä. Lisäksi pienjännitekäämeille kulkevat läpiviennit ovat toinen merkittävä tekijä, mikä aiheuttaa magneettikenttää muuntajan ulkopuolelle. Osa muuntajan sisällä olevasta kentästä kuitenkin vaimenee öljytäytteisellä muuntajalla muuntajan säiliöön. Osa käämien vuosta kulkee kuitenkin sydämen ulkopuolella hajavuona. /15/

öljytäytteisten muuntajien magneettikenttä 1 m etäisyydellä sivusuunnassa muuntajasta voi olla suurimmillaan esimerkiksi 3150 kVA muuntajalla noin 50 μT ja 800 kVA muuntajalla noin 20 μT . Esimerkiksi 500 kVA valuhartsieristeisillä muuntajilla kentät voivat olla noin 25 μT (1 m etäisyydellä).

Kuivamuuntajan nimellistehoon nähden suhteellisesti suurempi magneettikenttä johtuu käämien erilaisesta rakenteen eristyksestä ja siitä, että niillä ei käytetä vahvaa koteloitua kuten öljymuuntajilla. Muuntajan magneettikenttä vaimenee kuitenkin erittäin nopeasti. Edellä mainituilla muuntajilla suurimmat kentät 2 m päässä sivusuunnassa muuntajista ovat 3150 kVA muuntajalla noin 9 μT , 800 kVA muuntajalla noin 4 μT ja 500 kVA kuivamuuntajalla noin 3 μT . /15/

3 KIINTEISTÖMUUNTAMON MAGNEETTIKENTTIEN LASKENTA

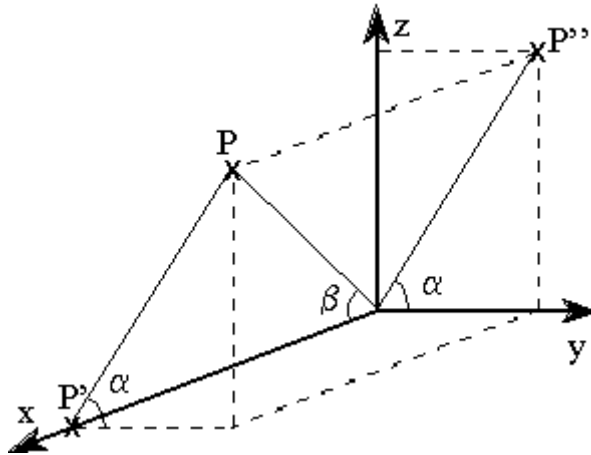
Sähkö- ja magneettikenttiä lasketaan sekä analyyttisesti että numeerisesti (esimerkiksi FEM -menetelmällä). Kiinteistömuuntamojen kenttien laskentaan soveltuu analyyttinen laskenta. Erilaisten vaimentavien materiaalien tutkimisessa tarvitaan numeerista laskentaa.

3.1 Analyttinen laskenta

Magneettikentän analyyttisessä laskennassa käytetään Biot-Savartin lakia, jolla voidaan laskea suorassa johtimessa kulkevan virran ympärilleen aiheuttama magneettikenttä. Kun halutaan laskea mutkittelevan johdon magneettikenttä, johto kuvataan suorilla osuuksilla, jotka lasketaan erikseen. Näillä johdinosuuksilla kulkee kaikilla kuitenkin samassa vaihejohtimessa sama virta. Koko johdon magneettikenttä saadaan laskemalla osajohdinten aiheuttamat magneettikenttävektorit yhteen.

Kun halutaan laskea magneettivuon tiheys tietyssä tarkastelupisteessä, se tehdään 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. /12/

Muunnosmatriisiin 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 muunnosmatriisiin 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 kierroksessa 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 kierroksessa z-koordinaatit eivät muutu. Muunnokseen tarvittava muunnosmatriisi on yhtälön 2 mukainen.

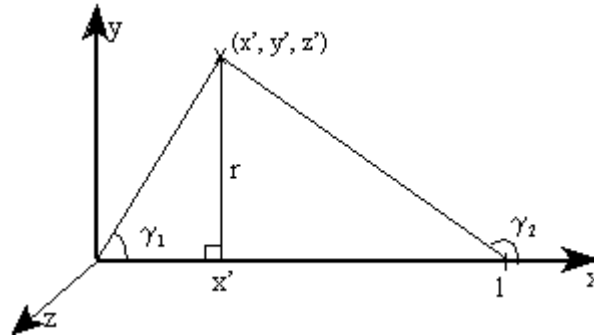
$$T_z = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

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.

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

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.

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

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.

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

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

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

missä n on solmuvälien lukumäärä ja

B_i solmuvälin i aiheuttama magneettivuon tiheys.

Laskennassa on kuitenkin huomioitava, että magneettivuon tiheys 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 siniaallosa poikkeavan kentän vaihtelun. Kolmeakselisella magneettikenttämittarilla saadaan määritettyä suoraan magneettivuon tiheyden resultantti. Yksiakselisella mittarilla resultantti saadaan laskettua mitatuista arvoista. Laskettuja hetkellisarvoja ei voida verrata mittauksiin.

3.2 Numeerinen laskenta

Elementtimenetelmä (FEM) on muodostunut magneettikenttien ratkaisemisen vakiomenetelmäksi, kun halutaan ratkaista magneettikenttä johtavien tai magneettisten materiaalien lähellä. Sen perusideana on ratkaista osittaisdifferentiaaliyhtälö variaatiotehtävän avulla. Tutkittava alue jaetaan pieniin osa-alueisiin eli elementteihin, joissa kaikissa on oma kenttäsuureta kuvaava elementaarinen funktionsa. Kun funktioiden kertoimet valitaan oikein, on ratkaisu hyvä approksimaatio oikeasta. Tarkkuutta voidaan parantaa tihentämällä elementtiverkkoa tai nostamalla ratkaistavien funktioiden astelukua.

FEM-ohjelmien käyttökelpoisuus perustuu paljolti sen joustavuuteen geometrian kuvaamisessa. Elementeillä voidaan käsitellä alueita, joiden reunat voidaan riittävällä tarkkuudella esittää tasoista tai kaarevista pinnoista koostuvilla osilla. Myöskään tehtäväalueen sisäosan mallintamiseen käytetyn elementtiverkon ei tarvitse olla säännöllinen. Elementit saavat olla eri kokoisia ja muotoisia.

FEM-ohjelmistot koostuvat yleensä kolmesta osasta: esikäsitteijästä, ratkaisijasta ja jälkikäsitteijästä. Esikäsitteijällä muodostetaan tarvittava geometria ja siihen elementtiverkko. Esikäsitteijät perustuvat useimmiten graafisen päätteen tai työaseman käyttöön. Ne mahdollistavat geometrian ja elementtiverkon interaktiivisen luomisen ja muokkaamisen. Ratkaisijalla suoritetaan numeerinen laskenta. Jälkikäsitteijää käytetään kenttäkuvien erilaisten käyrämuotojen ja numeroarvojen katselemiseen ja tulostamiseen.

Magneettikentän ratkaisemiseen voidaan vaikuttaa suoraan lähteiden ja reuna-arvojen avulla. Laskenta-alueella olevalle lähdevirrälle annetaan suuruus ja vaihekulma. Tehtäväalueen reunalle asetetaan tarvittavat reunaehdot, jotka ratkaisu toteuttaa. Tulosten tarkastelu on lähes jokaisessa ohjelmassa erilainen.

Sellaisissa esimerkkimuuntamoissa, joissa muuntajan ja pienjännitekeskuksen välisessä kisko- tai kaapelisillassa oli suojakotelo, -kouru tai suojalevy tai muuntamon seinään oli asennettu suojalevy, myös suojan suojausvaikutus piti ottaa huomioon laskennassa.

Pienjännitesilta mallinnettiin ensin ilman magneettikenttäsuojan vaimennusmateriaalin vaikutusta. Suojan kohdalla materiaaliksi valittiin ensin ilma. Suojan rakenne otettiin malliin mukaan, koska sen geometrian lisääminen myöhemmässä vaiheessa aiheuttaisi virhettä tuloksiin. Magneettikentän tulokset tallennettiin samalta etäisyydeltä kuin magneettikentän analyttinen laskenta tehtiin. Seuraavaksi suojan ominaisuudet vaihdettiin esimerkissä käytetyn materiaalin ominaisuuksiksi.

Myös tästä laskennasta tallennettiin magneettikentän tulokset samalta etäisyydeltä. Tämän jälkeen magneettikenttäsuojan suojausvaikutus (SE) saadaan laskemalla ennen suojausta laskettujen magneettikenttätulosten suhde suojauksen jälkeen laskettuihin magneettikenttätuloksiin yhtälön 12 mukaisesti.

$$SE = 20 \log_{10} \frac{B_0}{B_{suoja}} \quad (12)$$

missä B_0 on magneettivuon tiheys ilman suojaa ja

B_{suoja} on magneettivuon tiheys suojan kanssa.

Analyttisessä menetelmässä voidaankin käyttää kaksiulotteisen FEM-ohjelman avulla laskettuja suojausvaikutuksen 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 suojausvaikutukseen.

Suojausvaikutus otetaan huomioon laskennassa niissä pienjännitesillan osissa, jotka jäävät suojan sisään. Magneettikenttäsuojan vaikutus muuntamon magneettikenttään lasketaan analyttisesti. Suojausvaikutusta käytetään yhtälön 13 mukaisesti kertoimena analyttisessä laskennassa suojan sisällä olevien pienjännitesillan osien tuottamissa magneettikenttäkomponenteissa.

$$B_i = 10^{-\frac{SE}{20}} B_{i,0} \quad (13)$$

missä B_i on suojan sisällä olevan pienjännitesillan osan i magneettivuon tiheys, kun suojausvaikutus otetaan huomioon ja

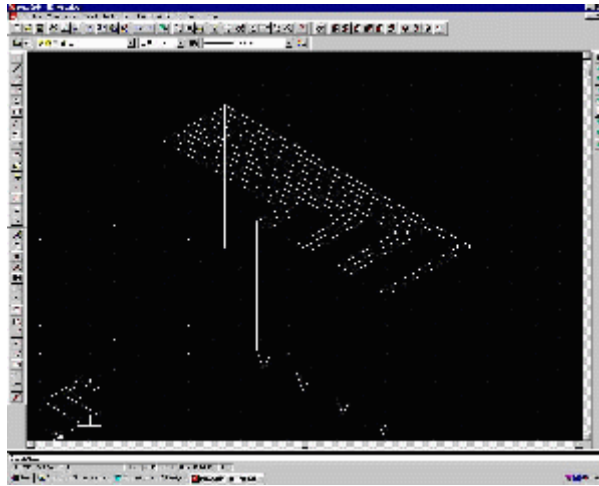
$B_{i,0}$ on suojan sisällä olevan pienjännitesillan osan i analyttisesti laskettu magneettivuon tiheys.

Suojausvaikutuksen laskenta tehtiin kaksidimensioista FEM-ohjelmaa käyttäen. Kaksidimensioinen geometrian mallintaminen on yleensä riittävän tarkka suojauslaskentaan. Laskentaan käytettiin MagNet 5.1 -ohjelmaa.

3.3 Kiinteistömuuntamon magneettikenttien laskennan toteutus TTKK:ssa

Johdinjärjestelmän aiheuttaman magneettikentän laskentaan on TTKK:ssa kehitetty analyttiseen laskentaan perustuva ohjelmistosovellutus. Johdinjärjestelmän kulmapisteiden syöttäminen tehdään antamalla jokaisen johtimen kulmapisteen koordinaatit tietokoneelle CAD-ohjelmaan.

Kuvassa 3.3 on esimerkki johdinjärjestelmästä CAD-ohjelman näytöllä. Koordinaattien syöttäminen suoraan laskentaohjelmistoon (Matlab) on hidasta ja etenkin monimutkaisemman kolmiulotteisen kuvion hahmottaminen on hankalaa. Tähän kulmapisteiden syöttövaiheeseen päätettiin ottaa avuksi CAD-ohjelmisto, jolla myös johdinjärjestelmän visuaalinen kolmiulotteinen hahmottaminen on havainnollisempaa kuin koordinaattien syöttö komentoriville laskentaohjelmistossa.



Kuva 3.3. Esimerkki johdinjärjestelmästä CAD -ohjelman näytöllä.

CAD:ssä johdinjärjestelmää voidaan tarkastella mistä tahansa kulmasta, joten piirtäminen helpottuu. CAD:n käytöstä on lisäksi hyötyä, kun johdinjärjestelmän geometriaa halutaan muuttaa. Johtimia voidaan helposti siirtää tai venyttää, eikä geometriapisteitä tarvitse syöttää joka kerta uudelleen siirryttäessä analyttiseen laskentaan. Matlab -ohjelma, jossa laskenta tehdään, ei kuitenkaan suoraan ymmärrä CAD-ohjelman tiedostoja. Tähän tarkoitukseen on käytetty Excel-taulukkolaskentaohjelmaa, johon on tehty makro-ohjelmia Visual Basic-ohjelmointikielen avulla. Visual Basic-makrolla on toteutettu CAD-tiedoston muunto Matlab:n ymmärtämäksi tekstitiedostoksi.

Lähtötietojen muunto laskentaohjelmalla

Muunnosvaihe jakaantuu kolmeen osaan: piirtämiseen, makro-ohjelman ajoon ja laskentaan. Erityisesti piirrosvaiheessa on oltava huolellinen, jotta johdinjärjestelmä siirtyisi oikein laskentaohjelmistoon. Matlab-laskentaohjelmistossa laskenta suoritetaan muuttamalla johdinjärjestelmä lukuisiksi suoriksi johtimiksi. Jokaisessa suorassa johtimessa kulkevan virran aiheuttama magneettikenttä lasketaan lopuksi yhteen analyttisellä menetelmällä Biot-Savart:n lain mukaan ja näin saadaan ympäristöön vaikuttava magneettikenttä tietyssä tarkastelupisteessä. Laskentaohjelmisto siis käsittää kaikki samankin vaiheen johdinpätkät eri johtimiksi, vaikka ne oikeasti ovatkin samaa johdinta.

Piirtäminen

CAD-piirustusohjelma tallentaa jokaisen viivanpätkän alku- ja loppukoordinaatit nimeten ne sen mukaan millä piirtokäskyllä viiva on piirretty. Makro-ohjelma poimii johtimien koordinaatit CAD-tiedostosta piirtokäskyn mukaan. Viivojen koordinaatit kootaan $[3 \times N]$ -matriisimuotoon Excel työkirjaan, jossa ne sitten tallennetaan tekstitiedostoksi (N on viivan kulmapisteiden lukumäärä). Pisteet määrittävät koordinaatit ovat x-, y- ja z-sarakkeissa ja viivojen pisteet ovat peräkkäin rivissä.

Piirtäminen on suoritettava oikealla tavalla, koska johtimet tallentuvat tiedostoon aikajärjestyksessä eli ensimmäisenä piirretty johdin ja sen kulmapisteet tallennetaan tiedostoon ensin, sitten toinen jne. Jos piirtämisessä tehdään virheitä ei muunnos CAD:stä Matlab:in tapahdu oikein. Jokainen yhden tai useamman kulman omaava johdin kannattaa piirtää ensin kokonaan ja sitten siirtyä seuraavan kaapelin tai kiskon piirtoon. Piirtämisen aikana pidetään kirjaa johdinpätkien piirtojärjestyksestä, vaihejärjestyksestä ja kulmapisteiden lukumäärästä kussakin johtimessa. Jos johtimien keskinäinen järjestys ei ole tiedossa, voi johtimelle tulla virta-arvoja syöttäessä annettua väärä virta-arvo. Mikäli solmupisteiden määrä ei täsmää, ei johdinjärjestelmä siirry oikein laskentaohjelmistoon. Kun johdinjärjestelmä on piirretty, se tallennetaan yleiseen CAD-tiedostomuotoon (DXF).

Makro-ohjelman ajaminen on yksinkertainen toimenpide. Avataan Excel ja ajetaan makro-ohjelma. Ohjelma tallentaa kulmapisteet tekstitiedostoksi.

Matlab-laskentasovellutus

Magneettikentälaskenta suoritetaan Matlab-laskentaohjelmistolla. Laskentaohjelmisto on kolmiosainen. Ensimmäisessä määritetään johdinjärjestelmien geometria ja virta-arvot. Toisessa osassa määritetään johdinjärjestelmän sijainti huoneessa, mikä käytännössä tarkoittaa laskenta-alueen pinta-alan laajuutta järjestelmän ympärillä. Laskenta-alue voi olla esimerkiksi muuntamotilan lattia.

Laskentakorkeudella valitaan tarkastelukorkeus, esimerkiksi järjestelmän alapuolella tai muuntamotilan yläpuolisessa tilassa. Syötettäessä laskentakorkeutta täytyy tietää, että onko kaapelit valmiiksi piirretty jollekin korkeudelle. Piirtäjä voi esimerkiksi ajatella johdinjärjestelmän lähtevän muuntajasta, jolloin johdinjärjestelmällä siis on valmiiksi jokin korkeus. Toinen mahdollisuus on, että johdinjärjestelmä on piirretty sellaisenaan, jolloin johdinjärjestelmän koordinaattipisteet lähtevät esimerkiksi origosta.

Kolmannessa osassa suoritetaan varsinainen laskenta geometrian ja alueen määrittelyn jälkeen, jonka jälkeen saadaan tuloksena magneettivuon tiheys kyseisellä korkeudella ja laskenta-alueella. Usein esimerkiksi alue voi olla jo ennestään määritetty, jolloin sitä ei tarvitse joka kerta erikseen määrittellä kokeiltaessa erilaisia johdinjärjestelmiä. Lisäksi on vielä neljäs ohjelma, joka piirtää johdinjärjestelmän kolmiulotteeseen koordinaatistoon ja siitä voidaan helposti tarkastaa muunnoksen onnistuminen.

4 KIINTEISTÖMUUNTAMOIDEN KENTTIEN MITTAAMINEN

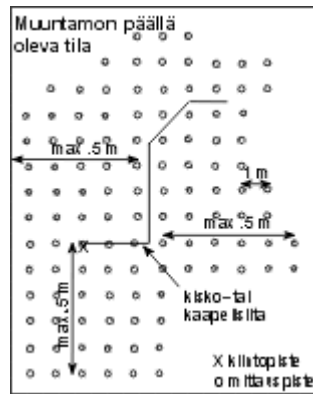
Kiinteistömuuntamon magneettikenttien mittaukset on toteutettu aikaisemmin julkaistulla tavalla. / [8/](#) Tässä raportissa esitetään lyhyesti mittausten toteutusta.

Mittauskohteeseen perehtymisen jälkeen käytännön mittaukset on aloitettu määrittelemällä kiintopiste, jonka avulla mittauspisteet määritellään. Muuntamossa kiintopisteeksi valitaan esimerkiksi muuntajan kannelta keskimmäinen pienjännitteen vaihe. Kiintopisteen avulla voidaan määrittellä myös esimerkiksi muuntamon yläpuolisen tilan mittauspisteet.

4.1 Kiinteistömuuntamon aiheuttaman magneettikentän mittaaminen yläpuolisessa (tai alapuolisessa) tilassa

Sen jälkeen kun keskimmäisen vaiheen sijainti on paikannettu mittaamalla muuntamon seiniä apuna käyttäen, voidaan määrittää muuntamon yläpuolella tai (mahdollisesti myös alapuolella) olevan huoneen magneettikenttämittausten kiintopiste. Muiden mittauspisteiden määrittäminen aloitetaan tästä pisteestä.

Tilan pohjapiirrokseseen tai lattiaan merkitään kiintopisteen lisäksi myös muuntajan ja pääkeskuksen välisen pienjännitekiskon tai -kaapelin sijainti tilan alapuolella. Seuraavaksi pohjapiirrokseseen tai lattiaan merkitään yhden metrin mittausvälillä ruudukko, joka lähtee liikkeelle kiintopisteestä. Ruudukon suunta noudattaa tilan seinien suuntia, jos seinät ovat kohtisuorassa toisiinsa nähden. Jos seinät eivät ole kohtisuorassa toisiinsa nähden, käytetään ruudukon suunnan määrittämiseen lähimpänä muuntamon kattoa olevan pienjännitekiskon tai -kaapelin osan suuntaa. Pienjännitekiskon tai -kaapelin suunta valitaan ruudukon toiseksi suunnaksi. Toinen suunta on kohtisuorassa pienjännitekiskon tai -kaapelin suuntaan nähden. Esimerkki ruudukosta on esitetty kuvassa 4.1.



Kuva 4.1. Esimerkki mittauspisteistä muuntamon yläpuolisessa tilassa kenttien mittaamisessa (× on kiintopiste, o on mittauspiste).

Ruudukko on kooltaan sellainen, että se peittää koko alapuolisen muuntajan ja pienjännitekojeiston välisen yhteyden. Joissakin tiloissa seinät rajoittavat ruudukon kokoa. Ruudukon kokoa määrittelee se, miten pitkälle katsotaan aiheelliseksi mitata. Ruudukon kokoa määritettäessä voidaan myös tehdä katselmusmittaus, jossa kävellään mittarin kanssa mitattavassa tilassa ja seurataan kentän tasoa. Tämän mittauksen tulosten avulla saadaan selville, miten suureksi ruudukko kannattaa määrittää.

Kun ruudukko on saatu määritetyksi mitattavaan tilaan, mitataan muuntajan ja pääkeskuksen välisen pienjännitekiskon tai -kaapelin virta. Mittaukseen voidaan käyttää esimerkiksi pihtiampeerimittaria, jolla virran saa mitata vain kyseisiin jännitetöihin oikeutettu henkilö.

Kentät voidaan mitata määritetyn ruudukon pisteistä 0 m, 1 m ja 2 m korkeudella, mutta yleensä kaksi mittauskorkeutta 0 m ja 1 m ovat riittävät. Tulokset merkitään mittauspöytäkirjaan.

Mittaus aloitetaan kiintopisteestä. Mittaus etenee kiintopisteestä lähtien johonkin määritetystä neljästä suunnasta niin pitkälle kun on katsottu aiheelliseksi. Kun kaikki tarvittavat pisteet on saatu mitattua, voidaan mitata kentän spektri. Varsinkin magneettikentän spektri on hyödyllistä mitata kiinteistömuuntamon magneettikenttien mittauksen yhteydessä. Koska kaupunkialueilla käytettävä kuormitus vaihtelee varsin paljon, voivat kuormitukset sisältää huomattavan määrän yliaaltoja. Magneettikentän taajuusspektrin mittaamisella voidaan selvittää yliaaltojen osuus magneettikentässä. Yliaaltojen mittaukseen on hyvä sisällyttää yliaaltotaajuudet, esimerkiksi 1000 Hz asti.

Spektri voidaan mitata esimerkiksi mittauksen kiintopisteestä tai pisteestä, jossa on mitattu suurin magneettikentän arvo. Jos spektrin arvoissa havaitaan jotain erikoista, esimerkiksi 50 Hz arvo ei ole spektrissä suurin arvo, on mittauksen paikkaa syytä vaihtaa. Merkittävimmän taajuuden poikkeaminen 50 Hz:stä tarkoittaa yleensä, että magneettikenttä ei aiheudu muuntamosta, vaan jostakin muusta lähellä olevasta laitteesta. Spektrin mittauspaikka ja -korkeus merkitään mittauspöytäkirjaan. Mittaus voidaan tehdä esimerkiksi 1 m korkeudelta.

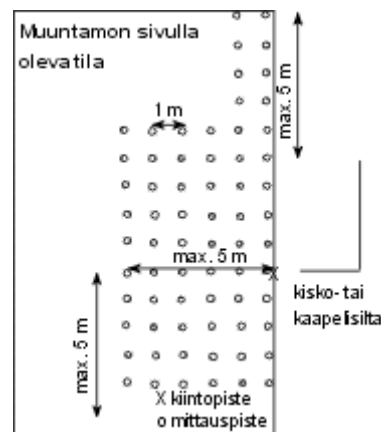
Kun magneettikenttä ja sen spektri on saatu mitattua, mitataan muuntajan ja pääkeskuksen välisen pienjännitekiskon tai -kaapelin virta uudestaan. Virta mitataan samalla tavalla kuin ennen magneettikenttämittauksen aloittamista.

Mikäli muuntamo on tilan yläpuolella, voidaan mittaus tehdä kuten muuntamon yläpuolisen tilan mittauksissa, mutta mittauskorkeudeksi sopii parhaiten 1 m.

4.2 Kiinteistömuuntamon aiheuttaman kentän mittaaminen viereisessä tilassa

Kiinteistömuuntamon viereisessä tilassa mittaaminen aloitetaan määrittämällä mittauksen kiintopiste, joka on muuntamon viereisen tilan seinässä, muuntajan keskimmäisen pienjännitevaiheen läpivientiä vastaavalla kohdalla. Tässäkin tapauksessa tilan pohjapiirroksen tai lattiaan merkitään mittauksen kiintopisteen paikka. Seuraavaksi pohjapiirroksen tai lattiaan

merkitään yhden metrin mittausvälillä ruudukko, joka aloitetaan mittausten kiintopisteestä. Esimerkki ruudukosta on esitetty kuvassa 4.2.



Kuva 4.2. Esimerkki mittauspisteistä muuntamon viereisessä tilassa kenttien mittaamisessa (X on kiintopiste, O on mittauspiste).

Ruudukko tehdään 5 m etäisyydelle muuntajan ja tilan välisestä seinästä lähtien. Seinän suunnassa ruudukkoa jatketaan 5 m muuntajan ja pienjännitekojeiston välisen kisko- tai kaapelisillan ulkopuolelle molempiin suuntiin.

Ruudukon suunta noudattaa tilan ja muuntamon välisen seinän suuntaa, jos tilan seinät ovat kohtisuorassa toisiinsa nähden. Jos seinät eivät ole kohtisuorassa toisiinsa nähden, käytetään ruudukon suunnan määrittämiseen lähimpänä muuntamon seinää olevaa pienjännitekiskon tai -kaapelin osaa.

Virran, magneettikentän ja spektrin mittaukset tehdään samoin kuin muuntamon yläpuolella olevan tilan mittauksissa. Kaikki tulokset merkitään mittauspöytäkirjaan.

4.3 Kiinteistömuuntamoa lähellä olevan tilan kentän mittaaminen

Kiinteistömuuntamon rakenteista ei ole edellä kuvattuja mittauksia varten aina riittävän tarkkoja tietoja. Mittaajilla ei myöskään aina ole mahdollisuutta mitata virtaa. Näissä tilanteissa voidaan mitata muuntamon läheisyydessä sijaitsevan tilan magneettikentät samalla tavalla kuin mikä tahansa työtila voidaan mitata.

Tilan mittaukset suoritetaan määritellyistä mittauspisteistä, joita on tilan kokoon nähden riittävästi. Mittauspisteet voidaan valita esimerkiksi siten, että mitataan kenttä jokaisen huoneen tai tilan keskipisteestä, sekä diagonaalien neljänneksiltä, jolloin mittauspisteitä on kaikkiaan viisi.

Jos kuitenkin kentässä on paikallista vaihtelua, kenttä voidaan kartoittaa laajemmin mittaamalla useammasta pisteestä. Tällöin merkitään pohjapiirrookseen tai suoraan lattiaan ruudukko, ja suoritetaan mittaukset sen mukaisissa pisteissä. Sopiva mittausväli mitattavien pisteiden välillä on esimerkiksi 1 m. Mittauskorkeutena voidaan käyttää edellä esitettyjä 0 m ja 1 m.

4.4 Virran mittaaminen

Virrassa pitää ottaa huomioon muuntajan maadoituksen vaikutus, koska vanhoissa muuntamoissa muuntajan maadoitus saattaa mennä suoraan nollaliittimeen. Uudet muuntajat maadoitetaan maadoituskiskoon. Maadoitus vaikuttaa virtojen vaihekulmiin ja jos virta mitataan muuntajan liittimistä ennen muuntajan maajohtimen haaroittumista, virran suuruus saattaa poiketa todellisesta.

Virrasta pyritään mittaamaan tehollisarvo jokaisesta vaihejohtimesta ja nollajohtimesta. Jos virran mittaamiseen käytetään muuntamon omia analogisia virtamittareita, on hyvä harkita mittareiden mittausalueiden sopivuutta ennen magneettikenttämittauksia. Usein mittareiden alueet on valittu huippukuormien mukaan, jolloin mittareista on vaikea lukea sellaiset virrat, joita mittausten yhteydessä yleensä esiintyy. Tätä ongelmaa ei nykyään ole, koska useissa asennettavissa mittareissa on digitaalinen näyttö.

Pihtiampeerimittareilla mitattaessa tai pihtiantureita käytettäessä on oltava erityisen varovainen, koska mittari joudutaan käytännössä asentamaan jännitteiseen kiskoon tai kaapeliin. Vaarana on paitsi pienjännitteiset muuntamon osat, joista virta mitataan, myös muuntajan suurjänniteliittimet ja kaapelit.

Virran pysyvyyden avulla voidaan päätellä magneettikentän mittaustulosten ajallista vaihtelua, joten virtaa kannattaa rekisteröidä vähän aikaa, jos se on mahdollista. Virran muutosten avulla pystytään päättämään, onko magneettikenttämittauksen aikainen virta ollut keskimääräistä kuormitusta suurempi vai pienempi. Myös kuormitusvirran yliaallot voi olla hyvä mitata, jos niiden epäillään olevan merkittävän suuria ja sitä varten tarvittava mittauskalusto on saatavilla. Mittaamalla yliaaltojen osuus virrasta voidaan arvioida myös yliaaltojen osuutta magneettikentässä.

4.5 Muuntamotilan kenttien mittaaminen

Muuntamon kenttien mittaaminen on hyvä tehdä siellä, missä työntekijät voivat altistua, ellei ole erityistä häiriöongelmaa ratkaistavana. Tällöin muuntamotilan mittaaminen tehdään muuntamon sisältä hoitokäytävältä muutamassa pisteessä. Mittaukset voidaan tehdä korkeuksilta 0 m, 1 m, ja mahdollisesti korkeudelta 2 m. Muuntamon sisältä mitattaessa voidaan mitata sekä kentän että virran spektri. Magneettivuon tiheyden spektri on hyvä mitata kiskon tai kaapelin lähellä olevasta mittauspisteestä. Mittauksen tulokset tallennetaan tarpeelliseksi katsotulta taajuuskaistalta.

4.6 Muuntajan ja pienjännitekeskuksen kenttien mittaaminen

Muuntajan tai pienjännitekeskuksen aiheuttamat kentät voidaan mitata kuten esimerkiksi laitteen kentät käyttöympäristössä edestä, sivuilta, takaa ja kulmista, mikäli se on mahdollista.

Käytännössä seinät estävät usein kaikkien suuntien mittaamisen. Muuntajan kentän mittaaminen tehdään muuntajan suoja-aidan takaa, kuitenkin selvästi irti aidasta. Suoja-aita vaikuttaa muuntamon sähköasennuksista aiheutuvaan magneettikenttään. Mitattu kenttä on tästä huolimatta kyseisessä kohdassa vaikuttava magneettikenttä.

Pienjännitekeskuksen kentän mittaaminen tehdään käyttö- tai työskentelyetäisyydeltä. Magneettikentän mittaamisen jälkeen tai mittauksen aikana mitataan muuntajan tai keskuksen virta. Sähkökentät ovat yleensä niin pieniä, ettei niitä ole mielekäästi mitata.

5 KIINTEISTÖMUUNTAMOITA KOSKEVA PUHELINKYSELY

Tutkittavan aineiston kartoittamiseksi tehtiin puhelinkysely sähköyhtiöiden kiinteistömuuntamoihin liittyvistä kenttähäiriöistä.

5.1 Kyselyn toteutus

Kyselyn tarkoituksena oli saada selville, miten paljon sähköyhtiöt ovat tehneet muutostöitä kiinteistömuuntamoissa magneettikenttien vähentämiseksi. Tämän lisäksi haluttiin erityisesti selvittää käytettyjä kenttien vähennyskeinoja, niiden tehokkuutta ja kustannuksia. Kysely suoritettiin pääasiassa puhelimitse, ja ensimmäinen yhteydenotto suoritettiin aina puhelimitse. Myöhemmässä kanssakäymisessä käytettiin muitakin yhteydenpitokeinoja, kuten esimerkiksi sähköpostia ja telefaxia.

Kyselyssä kartoitettiin aakkosjärjestyksessä sähköyhtiöitä ympäri Suomea. Kyselyssä keskityttiin asutuskeskuksissa toimiviin sähköyhtiöihin.

Ennen ensimmäistä yhteydenottoa yritettiin ottaa selville muuntamoista vastaava henkilö esimerkiksi puhelinluettelosta tai yhtiön internet -sivuilta. Jos tämä ei tuottanut tulosta, yleensä soitettiin yrityksen puhelinkeskukseen ja kysyttiin muuntamoista vastaavaa henkilöä puhelimeen.

Keskustelun aluksi muuntamovastaavalle kerrottiin meneillä olevasta projektista ”Teknologian kehittäminen pientaajuisten magneettikenttien vähentämiseksi sähkön siirrossa ja jakelussa” ja annettiin yleistietoa siitä, mitä oli jo saatu aikaan ja mitä projektin edetessä tullaan vielä tekemään. Tämän jälkeen kysyttiin, onko yhtiössä tehty kiinteistömuuntamoissa muutostöitä magneettikenttien

vähentämiseksi. Jos yhtiössä oli suoritettu muuntamoissa magneettikenttien vähentämistöitä, kysyttiin olisiko yhtiöllä tarjota tietoja tuloksista, menetelmistä ja kustannuksista. Keskustelun edetessä selvitettiin vastaajan kokemuksia magneettikenttähäiriöistä, niiden poistosta, ja myöskin kokemuksia tarjolla olevan tiedon määrästä. Keskustelun päätteeksi sovittiin tulevasta yhteydenpidosta sekä siitä, miten yhtiöt toimittavat tietoja mahdollisista muutostöistä.

5.2 Kyselyn tulokset

Yhteensä 31 sähköyhtiöön otettiin yhteyttä kyselyn muodossa. Aikaisemmin tietoja oli jo 3 yhtiöltä. Näistä yhtiöistä aikaisemmin saadut tiedot ovat mukana tuloksissa. Kolmesta yhtiöstä ei saatu kiinni henkilöä, joka olisi osannut vastata kysymyksiin tai yhtiöistä ei soittopyyntöihin sekä sähköpostiin vastattu.

Kyselyn perusteella harvoilla yhtiöillä oli ollut ongelmia muuntamojen magneettikentistä. Muutamia yhtiöitä olivat varautuneet ongelmiin jo etukäteen tekemällä uusista muuntamoista puistomuuntamoita. Muutamilla yhtiöillä oli pari häiriötapausta. Yhteensä kiinteistömuuntamoita, joissa on jo tehty muutostöitä häiriöiden tähden oli noin 30. Tämän kyselyn perusteella yleisemmin kiinteistömuuntamoihin on liittynyt meluhäiriöitä. Neljän yhtiön joissakin muuntamoissa esiintyi jonkinlaisia häiriöitä. Suunnitteilla on kolme muuntamon muutostyötä, joihin TTKK:n tutkimusryhmä voi tutustua etukäteen.

Kysely ei tietenkään sisällä kaikkia mahdollisia kiinteistömuuntamo-ongelmia, sillä kaikki yhtiöt eivät anna mielellään tietoja ulkopuolisille. Vastaanotto oli kuitenkin yleisesti positiivista ja yhtiöt ovat kiinnostuneita tutkimusten tuloksista. Seuraavassa taulukossa 5.1 on esitetty yhteenvedo kyselyn tuloksista.

Taulukko 5.1. Yhteenvedo kyselyn tuloksista. /11/

Sähköyhtiöt	Ei muutostöitä	Muutostöitä	Piirustukset	Mitattu	Tulokset	Kustannukset
Elnova (Nummela)	x					
Espoon Sähkö Oyj	x					
Etelä-Suomen Energia Oy	x					
Forssan Energia Oy	x					
Heinola Energia Oy	x					
Helsingin energia Oy		x	x	x	x	x
Hämeenlinnan Energia Oy	x					
Haminan Energia Oy	x					
Haukiputaan Sähköosuuskunta	x					
Imatran Seudun Sähkö Oy	x					
Isommus-energia Oy	x					
Pietarsaaren Energialaitos	x					

(Jakobstad Energiverk)						
Jyväskylän energia		x			x	x
Kaakon Energia Oy	x					
Kainuun Sähkö Oyj	x					
Keravan Energia Oy	x					
Keski-Suomen Valo Oy	x					
Keuruun Sähkö Oy	x					
Kuopion Energia Oy		x	x	x	x	
Kokemäen Sähkö Oy	x					
Lahti Energia Oy		x	x	x	x	x
Länsivoima Oyj, Alavus		x				
Länsivoima Oyj, Paimio	x					
Pori Energia Oy		x				
Porvoon Energia Oy	x					
Tampereen Sähkölaitos		x	x			
Turku Energia Oy - Åbo Energi Ab		x	x		x	x
Tuusulanjärven Energia Oy		x				
Oulun Energia Oy		x				
Vaasan Sähkö Oy	x					
Valkeakosken Energia Oy		x				

5.3 Johtopäätökset kyselystä

Yleisesti ottaen voidaan kyselyn perusteella päätellä, että ainakaan vielä kiinteistömuuntamoiden magneettikentät eivät ole olleet suuri ongelma suomalaisille sähköyhtiöille. Magneettikenttiä yleisempi häiriölähde on monessa yhtiössä ollut muuntamoista aiheutuneet meluhäiriöt. Keskusteluissa kävi kuitenkin selvästi ilmi, että sähköyhtiöt ovat tietoisia ihmisten huolesta magneettikenttien suhteen ja monet kyselyyn vastanneista ovatkin kertoneet yhtiönsä rakentavan uudet muuntamot ulkotiloihin välttääkseen jo etukäteen kiinteistömuuntamoista mahdollisesti aiheutuvat terveysvaikutukset, ja etenkin erilaisissa laitteissa aiheutuneet häiriöt.

Kyselyssä yleisimmin esille tulleita vähentämistapoja olivat: pienjännitesillan siirtäminen kauemmaksi häiriintyvistä kohteesta, kiskojen muuttaminen kaapeleiksi, muuntajan vaihtaminen kahteen pienempään, rakennuksen harhavirtojen vähentäminen, suojaus metallikourun, -kotelon tai

–levyn avulla sekä eri keinojen yhdistäminen.

Eri keinojen yhdistäminen on näistä suosituin. Parhaan mahdollisen tuloksen aikaansaamiseksi erilaisia tapoja yhdistellään suuremman yhteisvaikutuksen saavuttamiseksi.

Jo suhteellisen pienellä panostuksella on päästy hyviin lopputuloksiin, kun toteutettu vähennysmenetelmä on mietitty tarkkaan etukäteen, sekä toteutettu hyvin. Väärin tai huonosti toteutetut ratkaisut voivat johtaa jopa toimenpiteitä edeltävää tilannetta huonompaan tulokseen. Yleispätevää oikeata tapaa kenttien vähentämiseen ei ole, vaan kuhunkin muuntamoon on erikseen tutkittava ja mietittävä paras ratkaisu.

Suurin osa kyselyyn vastanneista, jotka olivat tehneet muutostöitä, olivat pystyneet vähentämään magneettikenttien voimakkuudet puoleen alkuperäisestä tilanteesta. Tässäkin täytyy ottaa huomioon se, että suurin osa mittauksista oli sähköyhtiöiden itsensä tekemiä ja mittauskäytännöt eivät olleet täysin yhteneväisiä. Myöskään mittareista ja niiden ominaisuuksista (esimerkiksi tarkkuudesta) ei monestikaan saatu tietoja.

Erialaisten menetelmien kustannukset olivat odotettua vaikeampaa arvioida. Materiaalikustannukset on yleensä ottaen helppo laskea, mutta suunnittelu- ja työkustannukset on vaikea erottaa muista työtehtävistä. Myös keskeytyksestä aiheutuneita kustannuksia on vaikea arvioida. Usein magneettikenttiä vähentäviä muutostöitä tehdään samanaikaisesti muuntamoon tehtävien muiden muutostöiden kanssa. Tällöin magneettikenttien vähentämisestä aiheutuneet kustannukset on entistä vaikeampi arvioida.

1 JOHDANTO

Vuoden 1997 tietojen mukaan Suomessa on 121 830 jakelumuuntamoita, joista kiinteistömuuntamoita on 8 799. Sähköyhtiöiden kiinteistömuuntamoista on 6 074 taajamissa olevien jakeluyhtiöiden omistuksessa, 1 252 maaseudulla olevien jakeluyhtiöiden omistuksessa ja 169 muiden sähköyhtiöiden omistuksessa. Teollisuuslaitosten omistuksessa on 1 227 kiinteistömuuntamoita /14/.

Kiinteistömuuntamo on rinnastettavissa mihin tahansa laitteeseen rakennuksen sähköjärjestelmässä. Kiinteistömuuntamot ovat aikaisempien tutkimusten perusteella osoittautuneet jakeluverkossa keskeiseksi magneettikenttälähteeksi ja niiden on huomattu aiheuttavan jonkin verran laitehäiriöitä esimerkiksi muuntamon yläpuolisessa tilassa. Tämän tähden on katsottu tarpeelliseksi tutkia mahdollisuuksia pienentää ja arvioida jo olemassa olevien kiinteistömuuntamojen magneettikenttiä. Aihe on valittu yhdeksi tutkimuskohteeksi Tampereen teknillisessä korkeakoulussa (TTKK) käynnissä olevassa projektissa ”Teknologian kehittäminen pientaajujen magneettikenttien vähentämiseksi sähkönsiirrossa ja jakelussa”.

Tutkimusprojektista on aikaisemmin kirjoitettu raportti ”Kiinteistömuuntamoiden magneettikentät”, jossa on esitetty tuloksia siitä, miten olemassa olevia kiinteistömuuntamoja voidaan ryhmitellä rakenteen mukaan. /9/

Aikaisemmassa raportissa käsiteltiin tietoja 200 muuntamosta (Helsingin Energialta, Tampereen kaupungin sähkölaitokselta ja Kuopion Energialta). Näiden perusteella suunniteltiin ryhmittely. Kiinteistömuuntamot jaettiin 18 ryhmään. Ensimmäinen jako tehtiin kisko- ja kaapelisillalla toteutettujen muuntamojen välillä. Ryhmittelyn eteneminen poikkesi hieman toisistaan näillä kahdella haaralla. Kiskollisilla muuntamoilla ryhmittely jatkui jaolla lappeellaan ja pystyssä olevien kiskojen mukaan sekä erikoistapauksiin. Kiskojen asennon jälkeen ryhmät jaettiin lähellä kattoa tai muualla kulkeviin. Viimeinen jako tehtiin kiskosillan pituuden mukaan lyhyisiin ja pitkiin. Kaapeleilla ryhmittely jatkui ensimmäisen jaon jälkeen jakoon lähellä kattoa ja muualla kulkeviin sekä erikoistapauksiin. Kulkureitin jälkeen kaapelit jaettiin symmetrisoituihin ja symmetrisoimattomiin. Kaapeleilla kuten kiskoillakin viimeinen jako oli pituuden mukaan lyhyisiin ja pitkiin.

Suurimpaan ryhmään (kaapelit lähellä kattoa, ei symmetrisoitu, pitkä) tuli 41 muuntamoita. Suurimpia ja siten keskeisimpiä ryhmiä tämän tutkimuksen perusteella ovat: kaapelit lähellä kattoa sekä vaihejärjestystä ei symmetrisoitu ja pitkä, kiskot pystyssä sekä kiinnitetty lähelle kattoa ja pitkät, kiskot lappeellaan sekä kiinnitetty muualle kuin kattoon ja lyhyet ja kaapelit lattialla sekä vaihejärjestystä ei symmetrisoitu ja pitkä

Ryhmittelyn perusteella valittiin esimerkkimuuntamoja, joiden magneettikentät sekä mitattiin että laskettiin. Laskenta ja mittaustulokset eivät kaikkien muuntamotyyppien osalta olleet täysin yhteneväisiä.

Magneettikentät ovat yleensä suurempia kiskoilla varustetuissa muuntamoissa kuin kaapeleilla varustetuissa. Suuri merkitys magneettikenttien suuruuteen on sillä, mihin silta on kiinnitetty. Lähelle kattoa kiinnitetyillä kiskostoilla magneettivuon tiheys saattaa olla useita kymmeniä mikrottesloja. Myös lähelle kattoa kiinnitetyillä kaapelisilloilla magneettivuon tiheys voi olla merkittävästi suurempi kuin lattialle kiinnitetyillä kaapelisilloilla. Magneettikenttä on selvästi pienempi niissä tapauksissa, joissa kisko- tai kaapelisilta on kiinnitetty muualle kuin lähelle kattoa.

Tutkimuksen seuraavassa vaiheessa on keskitytty tutkimaan tarkemmin esimerkkimuuntamoja ja niiden magneettikenttien vähentämistä muuntamon yläpuolisessa tai viereisessä tilassa. Magneettikenttien aiheuttamien häiriöiden käytännön teknisistä ratkaisuista on tehty kartoitus puhelinkyselynä. Tässä raportissa esitellään puhelinkyselyn tulokset, tutkitut kiinteistömuuntamot sekä niihin tehdyt muutostyöt. Eri vaiheista on mitattu ja laskettu magneettikentät ja tulosten perusteella on pyritty arvioimaan magneettikenttien vähentämismenetelmiä.

Sähköyhtiöt ja muuntamoita valmistava teollisuus saavat muuntamoiden magneettikenttien vähentämiseen suunnitteluapua raportissa esitetyistä vähentämismenetelmistä. Valmistavassa teollisuudessa menetelmien soveltamisella voidaan saavuttaa myös vientituotteille kilpailuetua. Magneettikenttien suuruus voi vaikuttaa kuluttajien ostopäätöksiin, sillä pienikenttäinen tuote saattaa kiinnostaa asiakasta.

2 MAGNEETTIKENTÄT

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 Sähköjärjestelmien magneettikentät

Suomen sähköjärjestelmä koostuu kantaverkosta, alueverkoista ja jakeluverkoista. Kantaverkossa sähkön siirtoon käytetään 400 kV, 220 kV ja 110 kV siirtojohtoja. Alueverkoissa käytetään pääasiassa 20 kV ja 10 kV keskijännitejohtoja. Sähkönjakeluun pienkuluttajille käytetään 400 V jännitettä.

Kantaverkkoa käytetään suurten tehojen siirtoon, joten suuresta jännitteestä huolimatta myös virrat ovat suuria. Tämän vuoksi siirtojohdot aiheuttavat ympäristöönsä huomattavan magneettikentän. Vuonna 1989 tehdyssä selvityksessä oli keskimääräinen magneettivuon tiheys 90%:lla 400 kV johdoilla maksimissaan alle 6,5 μT ja 110 kV johdoilla vastaavasti alle 2,5 μT . /3,16/

Keskijännitejohdoilla virrat ovat yleensä pienempiä kuin siirtojohdoilla ja johdinten vaihevälit ovat huomattavasti pienemmät. Näistä syistä keskijännitejohtojen magneettikentät ovat maanpinnan tasolla yleensä alle 3 μT . /10/

400 V jännitteellä tapahtuvassa jakelussa käytetään yleensä taajama-alueella kaapeleita, joilla vaihejohtimet ovat mahdollisimman lähellä toisiaan. Tämän vuoksi niiden magneettikentät rajoittuvat vain lähelle johtoja. /7/

2.2 Muuntamojen magneettikentät

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 muuntamon yläpuolisessa tilassa yhden metrin korkeudella lattiasta alle 12 μT . /2,17/

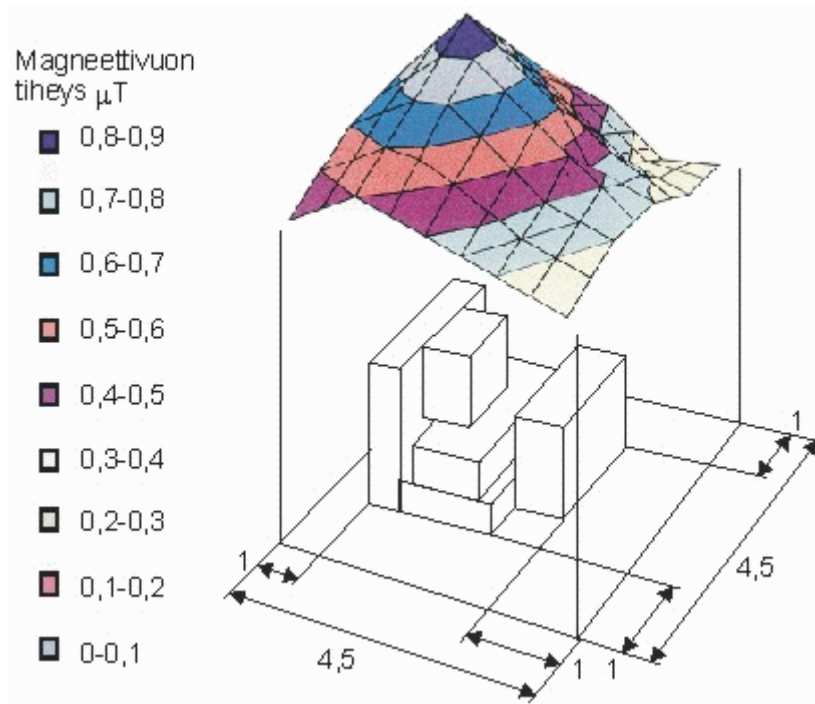
Muuntamoiden osalta aikaisempia tutkimuksia on tehty ensisijaisesti kiinteistömuuntamoihin liittyen, koska lähinnä niiden yläpuolella olevissa huoneistoissa on todettu erilaisia laitehäiriöitä. Uusien kiinteistömuuntamoiden suunnittelussa magneettikentät on jo jonkin aikaa otettu huomioon. Markkinoille on tuotu esimerkiksi kiinteistömuuntamoja, joiden ympärillä magneettikentät ovat perinteisiä huomattavasti pienempiä. Magneettikenttien pienentäminen muuntamoissa perustuu magneettikenttiä aiheuttavien komponenttien keskinäiseen sijoitteluun ja suojaukseen. Myös vanhoissa muuntamoissa on tehty saneerauksia magneettikenttien aiheuttamien häiriöiden vähentämiseksi. Tätä on tutkittu erityisesti Ruotsissa ja kotimaisetkin jakeluyhtiöt ovat tehneet joitakin kokeiluja.

Aikaisemmissa tutkimuksissa esiteltyjen erilaisten esimerkkitapausten perusteella tiedetään myös joitakin keinoja vanhojen muuntamoiden kenttien pienentämiseksi. Kolmivaihekaapelin käyttö pienjännitekojeiston ja muuntajan välillä yksivaihekaapelin tai kiskosillan sijasta pienentää vaihejohdinten välin pieneksi ja siten pienentää kenttiä. Kolmivaihejärjestelmän vaiheiden jakaminen kahteen osaan ja asetteleminen symmetrisesti pienentää myös kenttiä. Muuntajan ja pienjännitekojeiston yhdistäminen lattian kautta, katon sijasta, pienentää erityisesti muuntamon yläpuolisen tilan kenttiä. Syntyvä kenttä on myös sitä pienempi, mitä lyhyempi johdinyhteys on. /14/

2.3 Magneettikentät huomioon ottava tehdasvalmisteinen kiinteistömuuntamo

Magneettikenttien pienentäminen on jo huomioitu valmistajien toiminnassa. Kiinteistömuuntamon suunnittelua, hankintaa ja asennusta helpottamaan on kehitetty esimerkiksi Teslasafe-muuntamo. Muuntamo suunnitellaan valmiille alustalle, johon valitaan sähkötekniisin perustein suurjännitekojeisto, muuntaja, kiskosilta ja tarpeita vastaava pienjännitekeskus. Alustaan kuuluu myös öljynkeräyskaukalo.

Muuntamon ympäristössä normaalisti esiintyviä magneettikenttiä voidaan pienentää tällä muuntamoratkaisulla. Magneettikenttien pienentäminen muuntamossa perustuu magneettikenttiä aiheuttavien komponenttien keskinäiseen sijoitteluun ja suojaukseen. Kuvassa 2.1 on esimerkki Teslasafe -muuntamon magneettivuon tiheydestä 750 A virralla 2 m etäisyydellä (yläpuolella). Virta vastaa noin 500 kW kuormitusta.



Kuva 2.1. Teslasafe-muuntamon magneettivuon tiheys 2 metriä muuntamokojeiston yläpuolella. Mitat ovat kuvassa metreinä. /1/

Kuvan 2.1 magneettikenttä vastaa kenttää muuntamon yläpuolella sijaitsevassa tilassa. Suurin arvo muuntamokojeiston yläpuolella on $0,9 \mu\text{T}$. Sivusuunnassa pienjännitekojeiston kohdalla kenttä on 2 metrin etäisyydellä $1,0 \mu\text{T}$ ja muissa suunnissa $0,7 \mu\text{T}$. /1/

TTKK:n tutkimusten perusteella yleensä kiinteistömuuntamoiden magneettikentät 1 metrin korkeudella yläpuolisen tilan lattiasta ovat muutamasta mikroteslasta joihinkin kymmeneen mikrotesloihin. /5/

2.4 Rakennusten sähköjärjestelmien magneettikentät

Rakennuksen sähköjärjestelmien aiheuttamat magneettikentät riippuvat kuormitusvirrasta ja tarkasteluetaisyydestä. Yleensä rakennusten magneettikentät ovat suuruusluokkaa $0,01 - 1 \mu\text{T}$. /7/ Kenttien suuruuteen vaikuttavat muun muassa virran kulkureittien geometria, mitat sekä kotelointi. Symmetrisesti kuormitetussa kolmivaihejärjestelmässä 50 Hz vaihevirtojen summa on nolla, jolloin vaihevirtojen synnyttämät magneettikentät kumoavat toisiaan. Käytännössä kuormitus ei kuitenkaan ole symmetrinen ja vaihejohtimien välillä on merkittävä etäisyys, jolloin kentät eivät kumoa toisiaan täysin. Epäsymmetrisesti kuormitetussa kolmivaihejärjestelmässä vaihevirtojen summa ei ole nolla. Pääosa summavirtana esiintyvistä paluuvirrasta kulkee nollajohtimessa.

rakennuksen sähköjärjestelmä on tehty TN-S -järjestelmäksi, eli viisijohdinjärjestelmäksi, summavirta kulkee yhden muuntajan järjestelmässä ainoastaan nollajohtimessa. Jos rakennuksen sähköjärjestelmässä on käytetty TN-C - tai TN-S-C -järjestelmää, eli nelijohdin- tai sekajärjestelmää, summavirta saattaa kulkea osittain järjestelmän maadoitettujen johtavien rakenteiden kautta. Tällaista maadoitettujen johtavien rakenteiden kautta kulkevaa virtaa kutsutaan harhavirraksi.

Magneettikenttiä voidaan vähentää useilla eri keinoilla. Keinoja ovat mm. etäisyyden kasvattaminen lähteeseen, johtimien vaihevälin pienentäminen, johtimien vaihesymmetrisointi, johdinten suojaus, kojeistojen suojaus ja kolmannen yliaallon suodattaminen verkosta.

2.5 Muuntajan magneettikentät

Muuntajan käämit tuottavat voimakkaan magneettikentän muuntajan rautasydämeen. Tämä magneettikenttä kuitenkin sulkeutuu pääosin rautasydämessä. Lisäksi pienjännitekäämeille kulkevat läpiviennit ovat toinen merkittävä tekijä, mikä aiheuttaa magneettikenttää muuntajan ulkopuolelle.

Osa muuntajan sisällä olevasta kentästä kuitenkin vaimenee öljytäytteisellä muuntajalla muuntajan säiliöön. Osa käämien vuosta kulkee kuitenkin sydämen ulkopuolella hajavuona. /15/

öljytäytteisten muuntajien magneettikenttä 1 m etäisyydellä sivusuunnassa muuntajasta voi olla suurimmillaan esimerkiksi 3150 kVA muuntajalla noin 50 μT ja 800 kVA muuntajalla noin 20 μT . Esimerkiksi 500 kVA valuhartsieristeisillä muuntajilla kentät voivat olla noin 25 μT (1 m etäisyydellä).

Kuivamuuntajan nimellistehoon nähden suhteellisesti suurempi magneettikenttä johtuu käämien erilaisesta rakenteen eristyksestä ja siitä, että niillä ei käytetä vahvaa kotelointia kuten öljymuuntajilla. Muuntajan magneettikenttä vaimenee kuitenkin erittäin nopeasti. Edellä mainituilla muuntajilla suurimmat kentät 2 m päässä sivusuunnassa muuntajista ovat 3150 kVA muuntajalla noin 9 μT , 800 kVA muuntajalla noin 4 μT ja 500 kVA kuivamuuntajalla noin 3 μT . /15/

3 KIINTEISTÖMUUNTAMON MAGNEETTIKENTTIEN LASKENTA

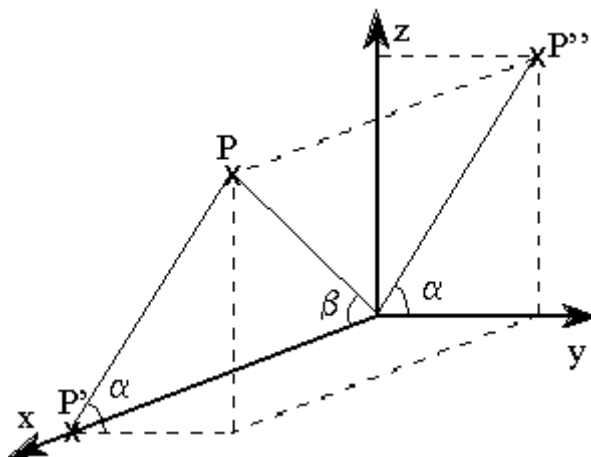
Sähkö- ja magneettikenttiä lasketaan sekä analyyttisesti että numeerisesti (esimerkiksi FEM -menetelmällä). Kiinteistömuuntamojen kenttien laskentaan soveltuu analyyttinen laskenta. Erilaisten vaimentavien materiaalien tutkimisessa tarvitaan numeerista laskentaa.

3.1 Analyyttinen laskenta

Magneettikentän analyyttisessä laskennassa käytetään Biot-Savartin lakia, jolla voidaan laskea suorassa johtimessa kulkevan virran ympärilleen aiheuttama magneettikenttä. Kun halutaan laskea mutkittelevan johdon magneettikenttä, johto kuvataan suorilla osuuksilla, jotka lasketaan erikseen. Näillä johdinosuuksilla kulkee kaikilla kuitenkin samassa vaihejohtimessa sama virta. Koko johdon magneettikenttä saadaan laskemalla osajohdinten aiheuttamat magneettikenttävektorit yhteen.

Kun halutaan laskea magneettivuon tiheys tietyssä tarkastelupisteessä, se tehdään 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. /12/

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.

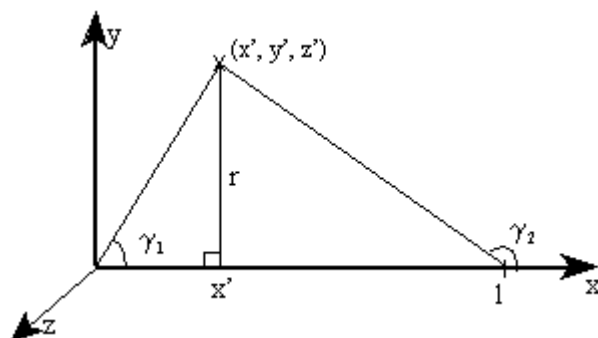
$$T_z = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

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.

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

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 ärettömän 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.

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

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

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

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.

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

missä n on solmuvälien lukumäärä ja

B_i solmuvälin i aiheuttama magneettivuon

tiheys.

Laskennassa on kuitenkin huomioitava, että magneettivuon tiheys B on vektorisuure.

Magneettivuon tiheyden resultantti B_{res} lasketaan yhtälön 11 mukaan ottamalla neliöjuuri vuontiheyden komponenttien reaali- ja imaginaariosien 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 siniaallostaa poikkeavan kentän vaihtelun. Kolmeaksellisella magneettikenttämittarilla saadaan määritettyä suoraan magneettivuon tiheyden resultantti.

Yksiaksellisella mittarilla resultantti saadaan laskettua mitatuista arvoista. Laskettuja hetkellisarvoja ei voida verrata mittauksiin.

3.2 Numeerinen laskenta

Elementtimenetelmä (FEM) on muodostunut magneettikenttien ratkaisemisen vakiomenetelmäksi, kun halutaan ratkaista magneettikenttä johtavien tai magneettisten materiaalien lähellä. Sen perusideana on ratkaista osittaisdifferentiaaliyhtälö variaatiotehtävän avulla. Tutkittava alue jaetaan pieniin osa-alueisiin eli elementteihin, joissa kaikissa on oma kenttäsuuretta kuvaava elementaarinen funktionsa. Kun funktioiden kertoimet valitaan oikein, on ratkaisu hyvä approksimaatio oikeasta. Tarkkuutta voidaan parantaa tihentämällä elementtiverkkoa tai nostamalla ratkaistavien funktioiden astelukua.

FEM-ohjelmien käyttökelpoisuus perustuu paljolti sen joustavuuteen geometrian kuvaamisessa. Elementeillä voidaan käsitellä alueita, joiden reunat voidaan riittävällä tarkkuudella esittää tasoista tai kaarevista pinnoista koostuvilla osilla. Myöskään tehtäväalueen sisäosan mallintamiseen käytetyn elementtiverkon ei tarvitse olla säännöllinen. Elementit saavat olla eri kokoisia ja muotoisia.

FEM-ohjelmistot koostuvat yleensä kolmesta osasta: esikäsitteijästä, ratkaisijasta ja jälkikäsitteijästä. Esikäsitteijällä muodostetaan tarvittava geometria ja siihen elementtiverkko. Esikäsitteijät perustuvat useimmiten graafisen päätteen tai työaseman käyttöön. Ne mahdollistavat geometrian ja elementtiverkon interaktiivisen luomisen ja muokkaamisen. Ratkaisijalla suoritetaan numeerinen laskenta. Jälkikäsitteijää käytetään kenttäkuvien erilaisten käyrämuotojen ja numeroarvojen katselemiseen ja tulostamiseen.

Magneettikentän ratkaisemiseen voidaan vaikuttaa suoraan lähteiden ja reuna-arvojen avulla. Laskenta-alueella olevalle lähdevirrälle annetaan suuruus ja vaihekulma. Tehtäväalueen reunalle asetetaan tarvittavat reunaehdot, jotka ratkaisu toteuttaa. Tulosten tarkastelu on lähes jokaisessa ohjelmassa erilainen.

Sellaisissa esimerkkimuuntamoissa, joissa muuntajan ja pienjännitekeskuksen välisessä kisko- tai kaapelisillassa oli suojakotelo, -kouru tai suojalevy tai muuntamon seinään oli asennettu suojalevy, myös suojan suojausvaikutus piti ottaa huomioon laskennassa.

Pienjännitesilta mallinnettiin ensin ilman magneettikenttäsuojan vaimennusmateriaalin vaikutusta. Suojan kohdalla materiaaliksi valittiin ensin ilma. Suojan rakenne otettiin malliin mukaan, koska sen geometrian lisääminen myöhemmässä vaiheessa aiheuttaisi virhettä tuloksiin. Magneettikentän tulokset tallennettiin samalta etäisyydeltä kuin magneettikentän analyttinen laskenta tehtiin. Seuraavaksi suojan ominaisuudet vaihdettiin esimerkissä käytetyn materiaalin ominaisuuksiksi. Myös tästä laskennasta tallennettiin magneettikentän tulokset samalta etäisyydeltä. Tämän jälkeen magneettikenttäsuojan suojausvaikutus (SE) saadaan laskemalla ennen suojausta laskettujen magneettikenttätulosten suhde suojauksen jälkeen laskettuihin magneettikenttätuloksiin yhtälön 12 mukaisesti.

$$SE = 20 \log_{10} \frac{B_0}{B_{suoja}} \quad (12)$$

missä B_0 on magneettivuon tiheys ilman suojaa ja

B_{suoja} on magneettivuon tiheys suojan kanssa.

Analyttisessä menetelmässä voidaankin käyttää kaksiulotteisen FEM-ohjelman avulla laskettuja suojausvaikutuksen 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 suojausvaikutukseen.

Suojausvaikutus otetaan huomioon laskennassa niissä pienjännitesillan osissa, jotka jäävät suojan sisään. Magneettikenttäsuojan vaikutus muuntamon magneettikenttään lasketaan analyttisesti. Suojausvaikutusta käytetään yhtälön 13 mukaisesti kertoimena analyttisessä laskennassa suojan sisällä olevien pienjännitesillan osien tuottamissa magneettikenttäkomponenteissa.

$$B_i = 10^{-\frac{SE}{20}} B_{i,0} \quad (13)$$

missä B_i on suojan sisällä olevan pienjännitesillan osan i magneettivuon tiheys, kun suojausvaikutus otetaan huomioon ja

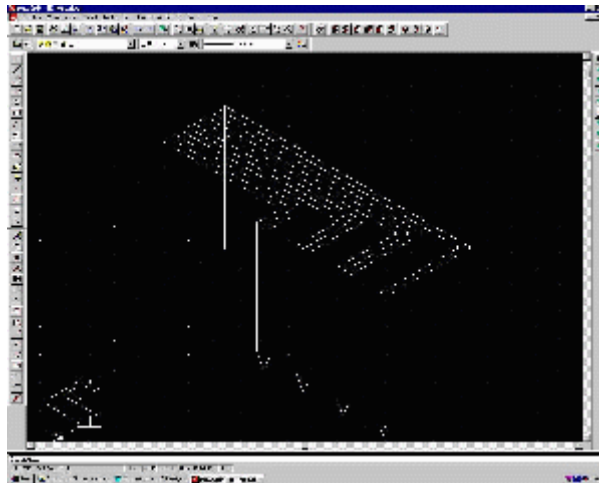
$B_{i,0}$ on suojan sisällä olevan pienjännitesillan osan i analyttisesti laskettu magneettivuon tiheys.

Suojausvaikutuksen laskenta tehtiin kaksidimensioista FEM-ohjelmaa käyttäen. Kaksidimensioinen geometrian mallintaminen on yleensä riittävän tarkka suojausten laskentaan. Laskentaan käytettiin MagNet 5.1 -ohjelmaa.

3.3 Kiinteistömuuntamon magneettikenttien laskennan toteutus TTKK:ssa

Johdinjärjestelmän aiheuttaman magneettikentän laskentaan on TTKK:ssa kehitetty analyttiseen laskentaan perustuva ohjelmistosovellutus. Johdinjärjestelmän kulmapisteiden syöttäminen tehdään antamalla jokaisen johtimen kulmapisteen koordinaatit tietokoneelle CAD-ohjelmaan.

Kuvassa 3.3 on esimerkki johdinjärjestelmästä CAD-ohjelman näytöllä. Koordinaattien syöttäminen suoraan laskentaohjelmistoon (Matlab) on hidasta ja etenkin monimutkaisemman kolmiulotteisen kuvion hahmottaminen on hankalaa. Tähän kulmapisteiden syöttövaiheeseen päätettiin ottaa avuksi CAD-ohjelmisto, jolla myös johdinjärjestelmän visuaalinen kolmiulotteinen hahmottaminen on havainnollisempaa kuin koordinaattien syöttö komentoriville laskentaohjelmistossa.



Kuva 3.3. Esimerkki johdinjärjestelmästä CAD -ohjelman näytöllä.

CAD:ssä johdinjärjestelmää voidaan tarkastella mistä tahansa kulmasta, joten piirtäminen helpottuu. CAD:n käytöstä on lisäksi hyötyä, kun johdinjärjestelmän geometriaa halutaan muuttaa. Johtimia voidaan helposti siirtää tai venyttää, eikä geometriapistettä tarvitse syöttää joka kerta uudelleen siirryttäessä analyttiseen laskentaan. Matlab -ohjelma, jossa laskenta tehdään, ei kuitenkaan suoraan ymmärrä CAD-ohjelman tiedostoja. Tähän tarkoitukseen on käytetty Excel-tilukkolaskentaohjelmaa, johon on tehty makro-ohjelmia Visual Basic-ohjelmointikielen avulla. Visual Basic-makrolla on toteutettu CAD-tiedoston muunto Matlab:n ymmärtämäksi tekstitiedostoksi.

Lähtötietojen muunto laskentaohjelmalla

Muunnosvaihe jakaantuu kolmeen osaan: piirtämiseen, makro-ohjelman ajoon ja laskentaan. Erityisesti piirrosvaiheessa on oltava huolellinen, jotta johdinjärjestelmä siirtyisi oikein laskentaohjelmistoon. Matlab-laskentaohjelmistossa laskenta suoritetaan muuttamalla johdinjärjestelmä lukuisiksi suoriksi johtimiksi. Jokaisessa suorassa johtimessa kulkevan virran aiheuttama magneettikenttä lasketaan lopuksi yhteen analyttisellä menetelmällä Biot-Savart:n lain mukaan ja näin saadaan ympäristöön vaikuttava magneettikenttä tietyssä tarkastelupisteessä.

Laskentaohjelmisto siis käsittää kaikki samankin vaiheen johdinpätkät eri johtimiksi, vaikka ne oikeasti ovatkin samaa johdinta.

Piirtäminen

CAD-piirustusohjelma tallentaa jokaisen viivanpätkän alku- ja loppukoordinaatit nimeten ne sen mukaan millä piirtokäskyllä viiva on piirretty. Makro-ohjelma poimii johtimien koordinaatit CAD-tiedostosta piirtokäskyn mukaan. Viivojen koordinaatit kootaan $[3 \times N]$ -matriisimuotoon Excel työkirjaan, jossa ne sitten tallennetaan tekstitiedostoksi (N on viivan kulmapisteiden lukumäärä). Pisteet määrittävät koordinaatit ovat x-, y- ja z-sarakkeissa ja viivojen pisteet ovat peräkkäin rivissä.

Piirtäminen on suoritettava oikealla tavalla, koska johtimet tallentuvat tiedostoon aikajärjestyksessä eli ensimmäisenä piirretty johdin ja sen kulmapisteet tallennetaan tiedostoon ensin, sitten toinen jne. Jos piirtämisessä tehdään virheitä ei muunnos CAD:stä Matlab:in tapahdu oikein. Jokainen yhden tai useamman kulman omaava johdin kannattaa piirtää ensin kokonaan ja sitten siirtyä seuraavan kaapelin tai kiskon piirtoon. Piirtämisen aikana pidetään kirjaa johdinpätkien piirtojärjestyksestä, vaihejärjestyksestä ja kulmapisteiden lukumäärästä kussakin johtimessa. Jos johtimien keskinäinen järjestys ei ole tiedossa, voi johtimelle tulla virta-arvoja syöttäessä annettua väärä virta-arvo. Mikäli solmupisteiden määrä ei täsmää, ei johdinjärjestelmä siirry oikein laskentaohjelmistoon. Kun johdinjärjestelmä on piirretty, se tallennetaan yleiseen CAD-tiedostomuotoon (DXF).

Makro-ohjelman ajaminen on yksinkertainen toimenpide. Avataan Excel ja ajetaan makro-ohjelma. Ohjelma tallentaa kulmapisteet tekstitiedostoksi.

Matlab-laskentasovellutus

Magneettikentälaskenta suoritetaan Matlab-laskentaohjelmistolla. Laskentaohjelmisto on kolmiosainen. Ensimmäisessä määritetään johdinjärjestelmien geometria ja virta-arvot. Toisessa osassa määritetään johdinjärjestelmän sijainti huoneessa, mikä käytännössä tarkoittaa laskenta-alueen pinta-alan laajuutta järjestelmän ympärillä. Laskenta-alue voi olla esimerkiksi muuntamotilan lattia.

Laskentakorkeudella valitaan tarkastelukorkeus, esimerkiksi järjestelmän alapuolella tai muuntamotilan yläpuolisessa tilassa. Syötettäessä laskentakorkeutta täytyy tietää, että onko kaapelit valmiiksi piirretty jollekin korkeudelle. Piirtäjä voi esimerkiksi ajatella johdinjärjestelmän lähtevän muuntajasta, jolloin johdinjärjestelmällä siis on valmiiksi jokin korkeus. Toinen mahdollisuus on, että johdinjärjestelmä on piirretty sellaisenaan, jolloin johdinjärjestelmän koordinaattipisteet lähtevät esimerkiksi origosta.

Kolmannessa osassa suoritetaan varsinainen laskenta geometrian ja alueen määrittelyn jälkeen, jonka jälkeen saadaan tuloksena magneettivuon tiheys kyseisellä korkeudella ja laskenta-alueella. Usein esimerkiksi alue voi olla jo ennestään määritetty, jolloin sitä ei tarvitse joka kerta erikseen määrittellä kokeiltaessa erilaisia johdinjärjestelmiä. Lisäksi on vielä neljäs ohjelma, joka piirtää johdinjärjestelmän kolmiulotteeseen koordinaatistoon ja siitä voidaan helposti tarkastaa muunnoksen onnistuminen.

4 KIINTEISTÖMUUNTAMOIDEN KENTTIEN MITTAAMINEN

Kiinteistömuuntamon magneettikenttien mittaukset on toteutettu aikaisemmin julkaistulla tavalla. / [8](#)/ Tässä raportissa esitetään lyhyesti mittausten toteutusta.

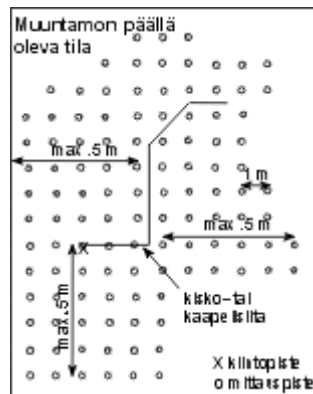
Mittauskohteeseen perehtymisen jälkeen käytännön mittaukset on aloitettu määrittelemällä kiintopiste, jonka avulla mittauspisteet määritellään. Muuntamossa kiintopisteeksi valitaan esimerkiksi muuntajan kannelta keskimmäinen pienjännitteen vaihe. Kiintopisteen avulla voidaan määrittellä myös esimerkiksi muuntamon yläpuolisen tilan mittauspisteet.

4.1 Kiinteistömuuntamon aiheuttaman magneettikentän mittaaminen yläpuolisessa (tai alapuolisessa) tilassa

Sen jälkeen kun keskimmäisen vaiheen sijainti on paikannettu mittaamalla muuntamon seiniä apuna

käyttäen, voidaan määrittää muuntamon yläpuolella tai (mahdollisesti myös alapuolella) olevan huoneen magneettikenttämittausten kiintopiste. Muiden mittauspisteiden määrittäminen aloitetaan tästä pisteestä.

Tilan pohjapiirrokseseen tai lattiaan merkitään kiintopisteen lisäksi myös muuntajan ja pääkeskuksen välisen pienjännitekiskon tai -kaapelin sijainti tilan alapuolella. Seuraavaksi pohjapiirrokseseen tai lattiaan merkitään yhden metrin mittausvälillä ruudukko, joka lähtee liikkeelle kiintopisteestä. Ruudukon suunta noudattaa tilan seinien suuntaa, jos seinät ovat kohtisuorassa toisiinsa nähden. Jos seinät eivät ole kohtisuorassa toisiinsa nähden, käytetään ruudukon suunnan määrittämiseen lähimpänä muuntamon kattoa olevan pienjännitekiskon tai -kaapelin osan suuntaa. Pienjännitekiskon tai -kaapelin suunta valitaan ruudukon toiseksi suunnaksi. Toinen suunta on kohtisuorassa pienjännitekiskon tai -kaapelin suuntaan nähden. Esimerkki ruudukosta on esitetty kuvassa 4.1.



Kuva 4.1. Esimerkki mittauspisteistä muuntamon yläpuolisessa tilassa kenttien mittaamisessa (× on kiintopiste, o on mittauspiste).

Ruudukko on kooltaan sellainen, että se peittää koko alapuolisen muuntajan ja pienjännitekojeiston välisen yhteyden. Joissakin tiloissa seinät rajoittavat ruudukon kokoa. Ruudukon kokoa määrittelee se, miten pitkälle katsotaan aiheelliseksi mitata. Ruudukon kokoa määritettäessä voidaan myös tehdä katselmusmittaus, jossa kävellään mittarin kanssa mitattavassa tilassa ja seurataan kentän tasoa. Tämän mittauksen tulosten avulla saadaan selville, miten suureksi ruudukko kannattaa määrittää.

Kun ruudukko on saatu määritetyksi mitattavaan tilaan, mitataan muuntajan ja pääkeskuksen välisen pienjännitekiskon tai -kaapelin virta. Mittaukseen voidaan käyttää esimerkiksi pihtiampeerimittaria, jolla virran saa mitata vain kyseisiin jännitetöihin oikeutettu henkilö.

Kentät voidaan mitata määritetyn ruudukon pisteistä 0 m, 1 m ja 2 m korkeudella, mutta yleensä kaksi mittauskorkeutta 0 m ja 1 m ovat riittävät. Tulokset merkitään mittauspöytäkirjaan.

Mittaus aloitetaan kiintopisteestä. Mittaus etenee kiintopisteestä lähtien johonkin määritetystä neljästä suunnasta niin pitkälle kun on katsottu aiheelliseksi. Kun kaikki tarvittavat pisteet on saatu mitattua, voidaan mitata kentän spektri. Varsinkin magneettikentän spektri on hyödyllistä mitata kiinteistömuuntamon magneettikenttien mittauksen yhteydessä. Koska kaupunkialueilla käytettävä kuormitus vaihtelee varsin paljon, voivat kuormitukset sisältää huomattavan määrän yliaaltoja. Magneettikentän taajuusspektrin mittaamisella voidaan selvittää yliaaltojen osuus magneettikentässä. Yliaaltojen mittaukseen on hyvä sisällyttää yliaaltotaajuudet, esimerkiksi 1000 Hz asti.

Spektri voidaan mitata esimerkiksi mittauksen kiintopisteestä tai pisteestä, jossa on mitattu suurin magneettikentän arvo. Jos spektrin arvoissa havaitaan jotain erikoista, esimerkiksi 50 Hz arvo ei ole spektrissä suurin arvo, on mittauksen paikkaa syytä vaihtaa. Merkittävimmän taajuuden poikkeaminen 50 Hz:stä tarkoittaa yleensä, että magneettikenttä ei aiheudu muuntamosta, vaan jostakin muusta lähellä olevasta laitteesta. Spektrin mittauspaikka ja -korkeus merkitään

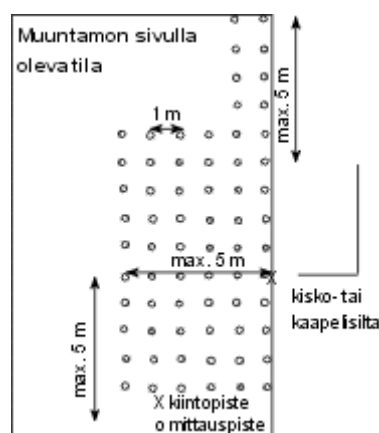
mittauspöytäkirjaan. Mittaus voidaan tehdä esimerkiksi 1 m korkeudelta.

Kun magneettikenttä ja sen spektri on saatu mitattua, mitataan muuntajan ja pääkeskuksen välisen pienjännitekiskon tai -kaapelin virta uudestaan. Virta mitataan samalla tavalla kuin ennen magneettikenttämittausten aloittamista.

Mikäli muuntamo on tilan yläpuolella, voidaan mittaus tehdä kuten muuntamon yläpuolisen tilan mittauksissa, mutta mittauskorkeudeksi sopii parhaiten 1 m.

4.2 Kiinteistömuuntamon aiheuttaman kentän mittaaminen viereisessä tilassa

Kiinteistömuuntamon viereisessä tilassa mittaaminen aloitetaan määrittämällä mittauksen kiintopiste, joka on muuntamon viereisen tilan seinässä, muuntajan keskimmäisen pienjännitevaiheen läpivientiä vastaavalla kohdalla. Tässäkin tapauksessa tilan pohjapiirroksen tai lattiaan merkitään mittauksen kiintopisteen paikka. Seuraavaksi pohjapiirroksen tai lattiaan merkitään yhden metrin mittausvälillä ruudukko, joka aloitetaan mittauksen kiintopisteestä. Esimerkki ruudukosta on esitetty kuvassa 4.2.



Kuva 4.2. Esimerkki mittauspisteistä muuntamon viereisessä tilassa kenttien mittaamisessa (× on kiintopiste, o on mittauspiste).

Ruudukko tehdään 5 m etäisyydelle muuntajan ja tilan välisestä seinästä lähtien. Seinän suunnassa ruudukkoa jatketaan 5 m muuntajan ja pienjännitekojeiston välisen kisko- tai kaapelisillan ulkopuolelle molempiin suuntiin.

Ruudukon suunta noudattaa tilan ja muuntamon välisen seinän suuntaa, jos tilan seinät ovat kohtisuorassa toisiinsa nähden. Jos seinät eivät ole kohtisuorassa toisiinsa nähden, käytetään ruudukon suunnan määrittämiseen lähimpänä muuntamon seinää olevaa pienjännitekiskon tai -kaapelin osaa.

Virran, magneettikentän ja spektrin mittaukset tehdään samoin kuin muuntamon yläpuolella olevan tilan mittauksissa. Kaikki tulokset merkitään mittauspöytäkirjaan.

4.3 Kiinteistömuuntamoa lähellä olevan tilan kentän mittaaminen

Kiinteistömuuntamon rakenteista ei ole edellä kuvattuja mittauksia varten aina riittävän tarkkoja tietoja. Mittaajilla ei myöskään aina ole mahdollisuutta mitata virtaa. Näissä tilanteissa voidaan mitata muuntamon läheisyydessä sijaitsevan tilan magneettikentät samalla tavalla kuin mikä tahansa työtila voidaan mitata.

Tilan mittaukset suoritetaan määritellyistä mittauspisteistä, joita on tilan kokoon nähden riittävästi. Mittauspisteet voidaan valita esimerkiksi siten, että mitataan kenttä jokaisen huoneen tai tilan keskipisteestä, sekä diagonaalien neljänneksiltä, jolloin mittauspisteitä on kaikkiaan viisi.

Jos kuitenkin kentässä on paikallista vaihtelua, kenttä voidaan kartoittaa laajemmin mittaamalla useammasta pisteestä. Tällöin merkitään pohjapiirroksen tai suoraan lattiaan ruudukko, ja suoritetaan mittaukset sen mukaisissa pisteissä. Sopiva mittausväli mitattavien pisteiden välillä on

esimerkiksi 1 m. Mittauskorkeutena voidaan käyttää edellä esitettyjä 0 m ja 1 m.

4.4 Virran mittaaminen

Virrassa pitää ottaa huomioon muuntajan maadoituksen vaikutus, koska vanhoissa muuntamoissa muuntajan maadoitus saattaa mennä suoraan nollaliittimeen. Uudet muuntajat maadoitetaan maadoituskiskoon. Maadoitus vaikuttaa virtojen vaihekulmiin ja jos virta mitataan muuntajan liittimistä ennen muuntajan maajohtimen haaroittumista, virran suuruus saattaa poiketa todellisesta.

Virrasta pyritään mittaamaan tehollisarvo jokaisesta vaihejohtimesta ja nollajohtimesta. Jos virran mittaamiseen käytetään muuntamon omia analogisia virtamittareita, on hyvä harkita mittareiden mittausalueiden sopivuutta ennen magneettikenttämittauksia. Usein mittareiden alueet on valittu huippukuormien mukaan, jolloin mittareista on vaikea lukea sellaiset virrat, joita mittauksien yhteydessä yleensä esiintyy. Tätä ongelmaa ei nykyään ole, koska useissa asennettavissa mittareissa on digitaalinen näyttö.

Pihtiampeerimittareilla mitattaessa tai pihtiantureita käytettäessä on oltava erityisen varovainen, koska mittari joudutaan käytännössä asentamaan jännitteiseen kiskoon tai kaapeliin. Vaarana on paitsi pienjännitteiset muuntamon osat, joista virta mitataan, myös muuntajan suurjänniteliittimet ja kaapelit.

Virran pysyvyyden avulla voidaan päätellä magneettikentän mittaustulosten ajallista vaihtelua, joten virtaa kannattaa rekisteröidä vähän aikaa, jos se on mahdollista. Virran muutosten avulla pystytään päättämään, onko magneettikenttämittauksen aikainen virta ollut keskimääräistä kuormitusta suurempi vai pienempi. Myös kuormitusvirran yliaallot voi olla hyvä mitata, jos niiden epäillä olevan merkittävän suuria ja sitä varten tarvittava mittauskalusto on saatavilla. Mittaamalla yliaaltojen osuus virrasta voidaan arvioida myös yliaaltojen osuutta magneettikentässä.

4.5 Muuntamotilan kenttien mittaaminen

Muuntamon kenttien mittaus on hyvä tehdä siellä, missä työntekijät voivat altistua, ellei ole erityistä häiriöongelmaa ratkaistavana. Tällöin muuntamotilan mittaus tehdään muuntamon sisältä hoitokäytävältä muutamassa pisteessä. Mittaukset voidaan tehdä korkeuksilta 0 m, 1 m, ja mahdollisesti korkeudelta 2 m. Muuntamon sisältä mitattaessa voidaan mitata sekä kentän että virran spektri. Magneettivuon tiheyden spektri on hyvä mitata kiskon tai kaapelin lähellä olevasta mittauspisteestä. Mittauksen tulokset tallennetaan tarpeelliseksi katsotulta taajuuskaistalta.

4.6 Muuntajan ja pienjännitekeskuksen kenttien mittaaminen

Muuntajan tai pienjännitekeskuksen aiheuttamat kentät voidaan mitata kuten esimerkiksi laitteen kentät käyttöympäristössä edestä, sivuilta, takaa ja kulmista, mikäli se on mahdollista.

Käytännössä seinät estävät usein kaikkien suuntien mittaamisen. Muuntajan kentän mittaus tehdään muuntajan suoja-aidan takaa, kuitenkin selvästi irti aidasta. Suoja-aita vaikuttaa muuntamon sähköasennuksista aiheutuvaan magneettikenttään. Mitattu kenttä on tästä huolimatta kyseisessä kohdassa vaikuttava magneettikenttä.

Pienjännitekeskuksen kentän mittaus tehdään käyttö- tai työskentelyetäisyydeltä. Magneettikentän mittaamisen jälkeen tai mittauksen aikana mitataan muuntajan tai keskuksen virta. Sähkökentät ovat yleensä niin pieniä, ettei niitä ole mielekästä mitata.

5 KIINTEISTÖMUUNTAMOITA KOSKEVA PUHELINKYSELY

Tutkittavan aineiston kartoittamiseksi tehtiin puhelinkysely sähköyhtiöiden kiinteistömuuntamoihin liittyvistä kenttähäiriöistä.

5.1 Kyselyn toteutus

Kyselyn tarkoituksena oli saada selville, miten paljon sähköyhtiöt ovat tehneet muutostöitä kiinteistömuuntamoissa magneettikenttien vähentämiseksi. Tämän lisäksi haluttiin erityisesti selvittää käytettyjä kenttien vähennyskeinoja, niiden tehokkuutta ja kustannuksia. Kysely

suoritettiin pääasiassa puhelimitse, ja ensimmäinen yhteydenotto suoritettiin aina puhelimitse. Myöhemmässä kanssakäymisessä käytettiin muitakin yhteydenpitokeinoja, kuten esimerkiksi sähköpostia ja telefaxia.

Kyselyssä kartoitettiin aakkosjärjestyksessä sähköyhtiöitä ympäri Suomea. Kyselyssä keskityttiin asutuskeskuksissa toimiviin sähköyhtiöihin.

Ennen ensimmäistä yhteydenottoa yritettiin ottaa selville muuntamoista vastaava henkilö esimerkiksi puhelinluettelosta tai yhtiön internet -sivuilta. Jos tämä ei tuottanut tulosta, yleensä soitettiin yrityksen puhelinkeskukseen ja kysyttiin muuntamoista vastaavaa henkilöä puhelimeen.

Keskustelun aluksi muuntamovastaavalle kerrottiin meneillä olevasta projektista ”Teknologian kehittäminen pientaajuisten magneettikenttien vähentämiseksi sähkön siirrossa ja jakelussa” ja annettiin yleistietoa siitä, mitä oli jo saatu aikaan ja mitä projektin edetessä tullaan vielä tekemään. Tämän jälkeen kysyttiin, onko yhtiössä tehty kiinteistömuuntamoissa muutostöitä magneettikenttien vähentämiseksi. Jos yhtiössä oli suoritettu muuntamoissa magneettikenttien vähentämistöitä, kysyttiin olisiko yhtiöllä tarjota tietoja tuloksista, menetelmistä ja kustannuksista. Keskustelun edetessä selvitettiin vastaajan kokemuksia magneettikenttähäiriöistä, niiden poistosta, ja myöskin kokemuksia tarjolla olevan tiedon määrästä. Keskustelun päätteeksi sovittiin tulevasta yhteydenpidosta sekä siitä, miten yhtiöt toimittavat tietoja mahdollisista muutostöistä.

5.2 Kyselyn tulokset

Yhteensä 31 sähköyhtiöön otettiin yhteyttä kyselyn muodossa. Aikaisemmin tietoja oli jo 3 yhtiöltä. Näistä yhtiöistä aikaisemmin saadut tiedot ovat mukana tuloksissa. Kolmesta yhtiöstä ei saatu kiinni henkilöä, joka olisi osannut vastata kysymyksiin tai yhtiöistä ei soittopyyntöihin sekä sähköpostiin vastattu.

Kyselyn perusteella harvoilla yhtiöillä oli ollut ongelmia muuntamojen magneettikentistä. Muutamat yhtiöt olivat varautuneet ongelmiin jo etukäteen tekemällä uusista muuntamoista puistomuuntamoita. Muutamilla yhtiöillä oli pari häiriötapausta. Yhteensä kiinteistömuuntamoita, joissa on jo tehty muutostöitä häiriöiden tähden oli noin 30. Tämän kyselyn perusteella yleisemmin kiinteistömuuntamoihin on liittynyt meluhäiriöitä. Neljän yhtiön joissakin muuntamoissa esiintyi jonkinlaisia häiriöitä. Suunnitteilla on kolme muuntamon muutostyötä, joihin TTKK:n tutkimusryhmä voi tutustua etukäteen.

Kysely ei tietenkään sisällä kaikkia mahdollisia kiinteistömuuntamo-ongelmia, sillä kaikki yhtiöt eivät anna mielellään tietoja ulkopuolisille. Vastaanotto oli kuitenkin yleisesti positiivista ja yhtiöt ovat kiinnostuneita tutkimusten tuloksista. Seuraavassa taulukossa 5.1 on esitetty yhteenvedo kyselyn tuloksista.

Taulukko 5.1. Yhteenvedo kyselyn tuloksista. /11/

Sähköyhtiöt	Ei muutostöitä	Muutostöitä	Piirustukset	Mitattu	Tulokset	Kustannukset
Elnova (Nummela)	x					
Espoon Sähkö Oyj	x					
Etelä-Suomen Energia Oy	x					
Forssan Energia Oy	x					
Heinola Energia Oy	x					
Helsingin energia Oy		x	x	x	x	x
Hämeenlinnan	x					

Energia Oy						
Haminan Energia Oy	x					
Haukiputaan Sähköosuuskunta	x					
Imatran Seudun Sähkö Oy	x					
Isommus-energia Oy	x					
Pietarsaaren Energialaitos (Jakobstad Energiverk)	x					
Jyväskylän energia		x			x	x
Kaakon Energia Oy	x					
Kainuun Sähkö Oyj	x					
Keravan Energia Oy	x					
Keski-Suomen Valo Oy	x					
Keuruun Sähkö Oy	x					
Kuopion Energia Oy		x	x	x	x	
Kokemäen Sähkö Oy	x					
Lahti Energia Oy		x	x	x	x	x
Länsivoima Oyj, Alavus		x				
Länsivoima Oyj, Paimio	x					
Pori Energia Oy		x				
Porvoon Energia Oy	x					
Tampereen Sähkölaitos		x	x			
Turku Energia Oy - Åbo Energi Ab		x	x		x	x
Tuusulanjärven Energia Oy		x				
Oulun Energia Oy		x				
Vaasan Sähkö Oy	x					
Valkeakosken		x				

5.3 Johtopäätökset kyselystä

Yleisesti ottaen voidaan kyselyn perusteella päätellä, että ainakaan vielä kiinteistömuuntamoiden magneettikentät eivät ole olleet suuri ongelma suomalaisille sähköyhtiöille. Magneettikenttiä yleisempi häiriölähde on monessa yhtiössä ollut muuntamoista aiheutuneet meluhäiriöt. Keskusteluissa kävi kuitenkin selvästi ilmi, että sähköyhtiöt ovat tietoisia ihmisten huolesta magneettikenttien suhteen ja monet kyselyyn vastanneista ovatkin kertoneet yhtiönsä rakentavan uudet muuntamot ulkotiloihin välttääkseen jo etukäteen kiinteistömuuntamoista mahdollisesti aiheutuvat terveysvaikutukset, ja etenkin erilaisissa laitteissa aiheutuneet häiriöt.

Kyselyssä yleisimmin esille tulleita vähentämistapoja olivat: pienjännitesillan siirtäminen kauemmaksi häiriintyvästä kohteesta, kiskojen muuttaminen kaapeleiksi, muuntajan vaihtaminen kahteen pienempään, rakennuksen harhavirtojen vähentäminen, suojaus metallikourun, -kotelon tai -levyn avulla sekä eri keinojen yhdistäminen.

Eri keinojen yhdistäminen on näistä suosituin. Parhaan mahdollisen tuloksen aikaansaamiseksi erilaisia tapoja yhdistellään suuremman yhteisvaikutuksen saavuttamiseksi.

Jo suhteellisen pienellä panostuksella on päästy hyviin lopputuloksiin, kun toteutettu vähennysmenetelmä on mietitty tarkkaan etukäteen, sekä toteutettu hyvin. Väärin tai huonosti toteutetut ratkaisut voivat johtaa jopa toimenpiteitä edeltävää tilannetta huonompaan tulokseen. Yleispätevää oikeata tapaa kenttien vähentämiseen ei ole, vaan kuhunkin muuntamoon on erikseen tutkittava ja mietittävä paras ratkaisu.

Suurin osa kyselyyn vastanneista, jotka olivat tehneet muutostöitä, olivat pystyneet vähentämään magneettikenttien voimakkuudet puoleen alkuperäisestä tilanteesta. Tässäkin täytyy ottaa huomioon se, että suurin osa mittauksista oli sähköyhtiöiden itsensä tekemiä ja mittauskäytännöt eivät olleet täysin yhteneväisiä. Myöskään mittareista ja niiden ominaisuuksista (esimerkiksi tarkkuudesta) ei monestikaan saatu tietoja.

Erialaisten menetelmien kustannukset olivat odotettua vaikeampaa arvioida. Materiaalikustannukset on yleensä ottaen helppo laskea, mutta suunnittelu- ja työkustannukset on vaikea erottaa muista työtehtävistä. Myös keskeytyksestä aiheutuneita kustannuksia on vaikea arvioida. Usein magneettikenttiä vähentäviä muutostöitä tehdään samanaikaisesti muuntamoon tehtävien muiden muutostöiden kanssa. Tällöin magneettikenttien vähentämisestä aiheutuneet kustannukset on entistä vaikeampi arvioida.

1 JOHDANTO

Vuoden 1997 tietojen mukaan Suomessa on 121 830 jakelumuuntamoita, joista kiinteistömuuntamoita on 8 799. Sähköyhtiöiden kiinteistömuuntamoista on 6 074 taajamissa olevien jakeluyhtiöiden omistuksessa, 1 252 maaseudulla olevien jakeluyhtiöiden omistuksessa ja 169 muiden sähköyhtiöiden omistuksessa. Teollisuuslaitosten omistuksessa on 1 227 kiinteistömuuntamoita /14/.

Kiinteistömuuntamo on rinnastettavissa mihin tahansa laitteeseen rakennuksen sähköjärjestelmässä. Kiinteistömuuntamot ovat aikaisempien tutkimusten perusteella osoittautuneet jakeluverkossa keskeiseksi magneettikenttälähteeksi ja niiden on huomattu aiheuttavan jonkin verran laitehäiriöitä esimerkiksi muuntamon yläpuolisessa tilassa. Tämän tähden on katsottu tarpeelliseksi tutkia mahdollisuuksia pienentää ja arvioida jo olemassa olevien kiinteistömuuntamojen magneettikenttiä. Aihe on valittu yhdeksi tutkimuskohteeksi Tampereen teknillisessä korkeakoulussa (TTKK) käynnissä olevassa projektissa ”Teknologian kehittäminen pientaajujen magneettikenttien vähentämiseksi sähkönsiirrossa ja jakelussa”.

Tutkimusprojektista on aikaisemmin kirjoitettu raportti ”Kiinteistömuuntamoiden magneettikentät”,

jossa on esitetty tuloksia siitä, miten olemassa olevia kiinteistömuuntamoja voidaan ryhmitellä rakenteen mukaan. /9/

Aikaisemmassa raportissa käsiteltiin tietoja 200 muuntamosta (Helsingin Energialta, Tampereen kaupungin sähkölaitokselta ja Kuopion Energialta). Näiden perusteella suunniteltiin ryhmittely. Kiinteistömuuntamot jaettiin 18 ryhmään. Ensimmäinen jako tehtiin kisko- ja kaapelisillalla toteutettujen muuntamojen välillä. Ryhmittelyn eteneminen poikkesi hieman toisistaan näillä kahdella haaralla. Kiskollisilla muuntamoilla ryhmittely jatkui jaolla lappeellaan ja pystyssä olevien kiskojen mukaan sekä erikoistapauksiin. Kiskojen asennon jälkeen ryhmät jaettiin lähellä kattoa tai muualla kulkeviin. Viimeinen jako tehtiin kiskosillan pituuden mukaan lyhyisiin ja pitkiin. Kaapeleilla ryhmittely jatkui ensimmäisen jaon jälkeen jakoon lähellä kattoa ja muualla kulkeviin sekä erikoistapauksiin. Kulkureitin jälkeen kaapelit jaettiin symmetrisoituihin ja symmetrisoimattomiin. Kaapeleilla kuten kiskoillakin viimeinen jako oli pituuden mukaan lyhyisiin ja pitkiin.

Suurimpaan ryhmään (kaapelit lähellä kattoa, ei symmetrisoitu, pitkä) tuli 41 muuntamo. Suurimpia ja siten keskeisimpiä ryhmiä tämän tutkimuksen perusteella ovat: kaapelit lähellä kattoa sekä vaihejärjestystä ei symmetrisoitu ja pitkä, kiskot pystyssä sekä kiinnitetty lähelle kattoa ja pitkät, kiskot lappeellaan sekä kiinnitetty muualle kuin kattoon ja lyhyet ja kaapelit lattialla sekä vaihejärjestystä ei symmetrisoitu ja pitkä

Ryhmittelyn perusteella valittiin esimerkkimuuntamoja, joiden magneettikentät sekä mitattiin että laskettiin. Laskenta ja mittaustulokset eivät kaikkien muuntamotyyppien osalta olleet täysin yhteneväisiä.

Magneettikentät ovat yleensä suurempia kiskoilla varustetuissa muuntamoissa kuin kaapeleilla varustetuissa. Suuri merkitys magneettikenttien suuruuteen on sillä, mihin silta on kiinnitetty. Lähelle kattoa kiinnitetyillä kiskostoilla magneettivuon tiheys saattaa olla useita kymmeniä mikrotlesloja. Myös lähelle kattoa kiinnitetyillä kaapelisilloilla magneettivuon tiheys voi olla merkittävästi suurempi kuin lattialle kiinnitetyillä kaapelisilloilla. Magneettikenttä on selvästi pienempi niissä tapauksissa, joissa kisko- tai kaapelisilta on kiinnitetty muualle kuin lähelle kattoa.

Tutkimuksen seuraavassa vaiheessa on keskitytty tutkimaan tarkemmin esimerkkimuuntamoja ja niiden magneettikenttien vähentämistä muuntamon yläpuolisessa tai viereisessä tilassa. Magneettikenttien aiheuttamien häiriöiden käytännön teknisistä ratkaisuksista on tehty kartoitus puhelinkyselynä. Tässä raportissa esitellään puhelinkyselyn tulokset, tutkitut kiinteistömuuntamot sekä niihin tehdyt muutostyöt. Eri vaiheista on mitattu ja laskettu magneettikentät ja tulosten perusteella on pyritty arvioimaan magneettikenttien vähentämismenetelmiä.

Sähköyhtiöt ja muuntamoita valmistava teollisuus saavat muuntamoiden magneettikenttien vähentämiseen suunnitteluapua raportissa esitetyistä vähentämismenetelmistä. Valmistavassa teollisuudessa menetelmien soveltamisella voidaan saavuttaa myös vientituotteille kilpailuetua. Magneettikenttien suuruus voi vaikuttaa kuluttajien ostopäätöksiin, sillä pienikenttäinen tuote saattaa kiinnostaa asiakasta.

2 MAGNEETTIKENTÄT

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 Sähköjärjestelmien magneettikentät

Suomen sähköjärjestelmä koostuu kantaverkosta, alueverkoista ja jakeluverkoista. Kantaverkossa sähköä siirtoon käytetään 400 kV, 220 kV ja 110 kV siirtojohtoja. Alueverkoissa käytetään

pääasiassa 20 kV ja 10 kV keskijännitejohtoja. Sähkönjakeluun pienkuluttajille käytetään 400 V jännitettä.

Kantaverkkoa käytetään suurten tehojen siirtoon, joten suuresta jännitteestä huolimatta myös virrat ovat suuria. Tämän vuoksi siirtojohdot aiheuttavat ympäristöönsä huomattavan magneettikentän. Vuonna 1989 tehdyssä selvityksessä oli keskimääräinen magneettivuon tiheys 90%:lla 400 kV johdoilla maksimissaan alle 6,5 μT ja 110 kV johdoilla vastaavasti alle 2,5 μT . /3,16/

Keskijännitejohdoilla virrat ovat yleensä pienempiä kuin siirtojohdoilla ja johdinten vaihevälit ovat huomattavasti pienemmät. Näistä syistä keskijännitejohtojen magneettikentät ovat maanpinnan tasolla yleensä alle 3 μT . /10/

400 V jännitteellä tapahtuvassa jakelussa käytetään yleensä taajama-alueella kaapeleita, joilla vaihejohtimet ovat mahdollisimman lähellä toisiaan. Tämän vuoksi niiden magneettikentät rajoittuvat vain lähelle johtoja. /7/

2.2 Muuntamojen magneettikentät

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 muuntamon yläpuolisessa tilassa yhden metrin korkeudella lattiasta alle 12 μT . /2,17/

Muuntamoiden osalta aikaisempia tutkimuksia on tehty ensisijaisesti kiinteistömuuntamoihin liittyen, koska lähinnä niiden yläpuolella olevissa huoneistoissa on todettu erilaisia laitehäiriöitä. Uusien kiinteistömuuntamoiden suunnittelussa magneettikentät on jo jonkin aikaa otettu huomioon. Markkinoille on tuotu esimerkiksi kiinteistömuuntamoja, joiden ympärillä magneettikentät ovat perinteisiä huomattavasti pienempiä. Magneettikenttien pienentäminen muuntamoissa perustuu magneettikenttiä aiheuttavien komponenttien keskinäiseen sijoitteluun ja suojaukseen. Myös vanhoissa muuntamoissa on tehty saneerauksia magneettikenttien aiheuttamien häiriöiden vähentämiseksi. Tätä on tutkittu erityisesti Ruotsissa ja kotimaisetkin jakeluyhtiöt ovat tehneet joitakin kokeiluja.

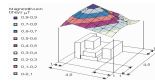
Aikaisemmissa tutkimuksissa esiteltyjen erilaisten esimerkkitapausten perusteella tiedetään myös joitakin keinoja vanhojen muuntamoiden kenttien pienentämiseksi. Kolmivaihekaapelin käyttö pienjännitekojeiston ja muuntajan välillä yksivaihekaapelin tai kiskosillan sijasta pienentää vaihejohtinten välin pieneksi ja siten pienentää kenttiä. Kolmivaihejärjestelmän vaiheiden jakaminen kahteen osaan ja asetteleminen symmetrisesti pienentää myös kenttiä. Muuntajan ja pienjännitekojeiston yhdistäminen lattian kautta, katon sijasta, pienentää erityisesti muuntamon yläpuolisen tilan kenttiä. Syntyvä kenttä on myös sitä pienempi, mitä lyhyempi johdinyhteys on. /14/

2.3 Magneettikentät huomioon ottava tehdasvalmisteinen kiinteistömuuntamo

Magneettikenttien pienentäminen on jo huomioitu valmistajien toiminnassa. Kiinteistömuuntamon suunnittelua, hankintaa ja asennusta helpottamaan on kehitetty esimerkiksi Teslasafe-muuntamo. Muuntamo suunnitellaan valmiille alustalle, johon valitaan sähkötekniisin perustein suurjännitekojeisto, muuntaja, kiskosilta ja tarpeita vastaava pienjännitekeskus. Alustaan kuuluu myös öljynkeräyskalko.

Muuntamon ympäristössä normaalisti esiintyviä magneettikenttiä voidaan pienentää tällä muuntamoratkaisulla. Magneettikenttien pienentäminen muuntamossa perustuu magneettikenttiä aiheuttavien komponenttien keskinäiseen sijoitteluun ja suojaukseen. Kuvassa 2.1 on esimerkki

Teslasafe -muuntamon magneettivuon tiheydestä 750 A virralla 2 m etäisyydellä (yläpuolella). Virta vastaa noin 500 kW kuormitusta.



Kuva 2.1. Teslasafe-muuntamon magneettivuon tiheys 2 metriä muuntamokojeiston yläpuolella. Mitat ovat kuvassa metreinä. /1/

Kuvan 2.1 magneettikenttä vastaa kenttää muuntamon yläpuolella sijaitsevassa tilassa. Suurin arvo muuntamokojeiston yläpuolella on $0,9 \mu\text{T}$. Sivusuunnassa pienjännitekojeiston kohdalla kenttä on 2 metrin etäisyydellä $1,0 \mu\text{T}$ ja muissa suunnissa $0,7 \mu\text{T}$. /1/

TTKK:n tutkimusten perusteella yleensä kiinteistömuuntamoiden magneettikentät 1 metrin korkeudella yläpuolisen tilan lattiasta ovat muutamasta mikrotoslasta joihinkin kymmeneen mikrotoslaihin. /5/

2.4 Rakennusten sähköjärjestelmien magneettikentät

Rakennuksen sähköjärjestelmien aiheuttamat magneettikentät riippuvat kuormitusvirrasta ja tarkasteluetaisyydestä. Yleensä rakennusten magneettikentät ovat suuruusluokkaa $0,01 - 1 \mu\text{T}$. /7/ Kenttien suuruuteen vaikuttavat muun muassa virran kulkureittien geometria, mitat sekä koteloointi. Symmetrisesti kuormitetussa kolmivaihejärjestelmässä 50 Hz vaihevirtojen summa on nolla, jolloin vaihevirtojen synnyttämät magneettikentät kumoavat toisiaan. Käytännössä kuormitus ei kuitenkaan ole symmetrinen ja vaihejohtimien välillä on merkittävä etäisyys, jolloin kentät eivät kumoja toisiaan täysin. Epäsymmetrisesti kuormitetussa kolmivaihejärjestelmässä vaihevirtojen summa ei ole nolla. Pääosa summavirtana esiintyvistä paluuvirrasta kulkee nollajohtimessa.

rakennuksen sähköjärjestelmä on tehty TN-S -järjestelmäksi, eli viisijohdinjärjestelmäksi, summavirta kulkee yhden muuntajan järjestelmässä ainoastaan nollajohtimessa. Jos rakennuksen sähköjärjestelmässä on käytetty TN-C - tai TN-S-C -järjestelmää, eli nelijohdin- tai sekajärjestelmää, summavirta saattaa kulkea osittain järjestelmän maadoitettujen johtavien rakenteiden kautta. Tällaista maadoitettujen johtavien rakenteiden kautta kulkevaa virtaa kutsutaan harhavirraksi.

Magneettikenttiä voidaan vähentää useilla eri keinoilla. Keinoja ovat mm. etäisyyden kasvattaminen lähteeseen, johtimien väijäväljn pienentäminen, johtimien vaihesymmetrisointi, johdinten suojaus, kojeistojen suojaus ja kolmannen yliaallon suodattaminen verkosta.

2.5 Muuntajan magneettikentät

Muuntajan käämit tuottavat voimakkaan magneettikentän muuntajan rautasydämeen. Tämä magneettikenttä kuitenkin sulkeutuu pääosin rautasydämessä. Lisäksi pienjännitekäämeille kulkevat läpiviennit ovat toinen merkittävä tekijä, mikä aiheuttaa magneettikenttää muuntajan ulkopuolelle. Osa muuntajan sisällä olevasta kentästä kuitenkin vaimenee öljytäytteisellä muuntajalla muuntajan säiliöön. Osa käämien vuosta kulkee kuitenkin sydämen ulkopuolella hajavuona. /15/

öljytäytteisten muuntajien magneettikenttä 1 m etäisyydellä sivusuunnassa muuntajasta voi olla suurimmillaan esimerkiksi 3150 kVA muuntajalla noin $50 \mu\text{T}$ ja 800 kVA muuntajalla noin $20 \mu\text{T}$. Esimerkiksi 500 kVA valuhartsieristeisillä muuntajilla kentät voivat olla noin $25 \mu\text{T}$ (1 m etäisyydellä).

Kuivamuuntajan nimellistehoon nähden suhteellisesti suurempi magneettikenttä johtuu käämien erilaisesta rakenteen eristyksestä ja siitä, että niillä ei käytetä vahvaa koteloointia kuten öljymuuntajilla. Muuntajan magneettikenttä vaimenee kuitenkin erittäin nopeasti. Edellä mainituilla muuntajilla suurimmat kentät 2 m päässä sivusuunnassa muuntajista ovat 3150 kVA muuntajalla noin $9 \mu\text{T}$, 800 kVA muuntajalla noin $4 \mu\text{T}$ ja 500 kVA kuivamuuntajalla noin $3 \mu\text{T}$. /15/

3 KIINTEISTÖMUUNTAMON MAGNEETTIKENTTIEN LASKENTA

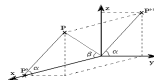
Sähkö- ja magneettikenttiä lasketaan sekä analyyttisesti että numeerisesti (esimerkiksi FEM-menetelmällä). Kiinteistömuuntojen kenttien laskentaan soveltuu analyyttinen laskenta. Erilaisten vaimentavien materiaalien tutkimisessa tarvitaan numeerista laskentaa.

3.1 Analyyttinen laskenta

Magneettikentän analyyttisessä laskennassa käytetään Biot-Savartin lakia, jolla voidaan laskea suorassa johtimessa kulkevan virran ympärilleen aiheuttama magneettikenttä. Kun halutaan laskea mutkittlevan johdon magneettikenttä, johto kuvataan suorilla osuuksilla, jotka lasketaan erikseen. Näillä johdinosuuksilla kulkee kaikilla kuitenkin samassa vaihejohtimessa sama virta. Koko johdon magneettikenttä saadaan laskemalla osajohdinten aiheuttamat magneettikenttävektorit yhteen.

Kun halutaan laskea magneettivuon tiheys tietyssä tarkastelupisteessä, se tehdään 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. /12/

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.

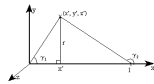
$$T_z = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

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.

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

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.

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

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.

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

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

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

missä n on solmuvälien lukumäärä ja

B_i solmuvälin i aiheuttama magneettivuon tiheys.

Laskennassa on kuitenkin huomioitava, että magneettivuon tiheys 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 siniaallosa poikkeavan kentän vaihtelun. Kolmeakselisella magneettikenttämittarilla saadaan määritettyä suoraan magneettivuon tiheyden resultantti. Yksiakselisella mittarilla resultantti saadaan laskettua mitatuista arvoista. Laskettuja hetkellisarvoja ei voida verrata mittauksiin.

3.2 Numeerinen laskenta

Elementtimenetelmä (FEM) on muodostunut magneettikenttien ratkaisemisen vakiomenetelmäksi, kun halutaan ratkaista magneettikenttä johtavien tai magneettisten materiaalien lähellä. Sen perusideana on ratkaista osittaisdifferentiaaliyhtälö variaatiotehtävän avulla. Tutkittava alue jaetaan pieniin osa-alueisiin eli elementteihin, joissa kaikissa on oma kenttäsuureta kuvaava elementaarinen funktionsa. Kun funktioiden kertoimet valitaan oikein, on ratkaisu hyvä approksimaatio oikeasta. Tarkkuutta voidaan parantaa tihentämällä elementtiverkkoa tai nostamalla ratkaistavien funktioiden astelukua.

FEM-ohjelmien käyttökelpoisuus perustuu paljolti sen joustavuuteen geometrian kuvaamisessa. Elementeillä voidaan käsitellä alueita, joiden reunat voidaan riittävällä tarkkuudella esittää tasoista tai kaarevista pinnoista koostuvilla osilla. Myöskään tehtäväalueen sisäosan mallintamiseen käytetyn elementtiverkon ei tarvitse olla säännöllinen. Elementit saavat olla eri kokoisia ja muotoisia.

FEM-ohjelmistot koostuvat yleensä kolmesta osasta: esikäsitteijästä, ratkaisijasta ja jälkikäsitteijästä. Esikäsitteijällä muodostetaan tarvittava geometria ja siihen elementtiverkko. Esikäsitteijät perustuvat useimmiten graafisen päätteen tai työaseman käyttöön. Ne mahdollistavat geometrian ja elementtiverkon interaktiivisen luomisen ja muokkaamisen. Ratkaisijalla suoritetaan numeerinen laskenta. Jälkikäsitteijää käytetään kenttäkuvien erilaisten käyrämuotojen ja numeroarvojen katselemiseen ja tulostamiseen.

Magneettikentän ratkaisemiseen voidaan vaikuttaa suoraan lähteiden ja reuna-arvojen avulla. Laskenta-alueella olevalle lähdevirrälle annetaan suuruus ja vaihekulma. Tehtäväalueen reunalle asetetaan tarvittavat reunaehdot, jotka ratkaisu toteuttaa. Tulosten tarkastelu on lähes jokaisessa ohjelmassa erilainen.

Sellaisissa esimerkkimuuntamoissa, joissa muuntajan ja pienjännitekeskuksen välisessä kisko- tai kaapelisillassa oli suojakotelo, -kouru tai suojalevy tai muuntamon seinään oli asennettu suojalevy, myös suojan suojausvaikutus piti ottaa huomioon laskennassa.

Pienjännitesilta mallinnettiin ensin ilman magneettikenttäsuojan vaimennusmateriaalin vaikutusta. Suojan kohdalla materiaaliksi valittiin ensin ilma. Suojan rakenne otettiin malliin mukaan, koska sen geometrian lisääminen myöhemmässä vaiheessa aiheuttaisi virhettä tuloksiin. Magneettikentän tulokset tallennettiin samalta etäisyydeltä kuin magneettikentän analyttinen laskenta tehtiin. Seuraavaksi suojan ominaisuudet vaihdettiin esimerkissä käytetyn materiaalin ominaisuuksiksi.

Myös tästä laskennasta tallennettiin magneettikentän tulokset samalta etäisyydeltä. Tämän jälkeen magneettikenttäsuojan suojausvaikutus (SE) saadaan laskemalla ennen suojausta laskettujen magneettikenttätulosten suhde suojauksen jälkeen laskettuihin magneettikenttätuloksiin yhtälön 12 mukaisesti.

$$SE = 20 \log_{10} \frac{B_0}{B_{suoja}} \quad (12)$$

missä B_0 on magneettivuon tiheys ilman suojaaja ja

B_{suoja} on magneettivuon tiheys suojan kanssa.

Analyttisessä menetelmässä voidaankin käyttää kaksiulotteisen FEM-ohjelman avulla laskettuja suojausvaikutuksen 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 suojausvaikutukseen.

Suojausvaikutus otetaan huomioon laskennassa niissä pienjännitesillan osissa, jotka jäävät suojan sisään. Magneettikenttäsuojan vaikutus muuntamon magneettikenttään lasketaan analyttisesti. Suojausvaikutusta käytetään yhtälön 13 mukaisesti kertoimena analyttisessä laskennassa suojan sisällä olevien pienjännitesillan osien tuottamissa magneettikenttäkomponenteissa.

$$B_i = 10^{-\frac{SE}{20}} B_{i,0} \quad (13)$$

missä B_i on suojan sisällä olevan pienjännitesillan osan i magneettivuon tiheys, kun suojausvaikutus otetaan huomioon ja

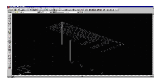
$B_{i,0}$ on suojan sisällä olevan pienjännitesillan osan i analyttisesti laskettu magneettivuon tiheys.

Suojausvaikutuksen laskenta tehtiin kaksidimensioista FEM-ohjelmaa käyttäen. Kaksidimensioinen geometrian mallintaminen on yleensä riittävän tarkka suojauslaskentaan. Laskentaan käytettiin MagNet 5.1 -ohjelmaa.

3.3 Kiinteistömuuntamon magneettikenttien laskennan toteutus TTKK:ssa

Johdinjärjestelmän aiheuttaman magneettikentän laskentaan on TTKK:ssa kehitetty analyttiseen laskentaan perustuva ohjelmistosovellutus. Johdinjärjestelmän kulmapisteiden syöttäminen tehdään antamalla jokaisen johtimen kulmapisteen koordinaatit tietokoneelle CAD-ohjelmaan.

Kuvassa 3.3 on esimerkki johdinjärjestelmästä CAD-ohjelman näytöllä. Koordinaattien syöttäminen suoraan laskentaohjelmistoon (Matlab) on hidasta ja etenkin monimutkaisemman kolmiulotteisen kuvion hahmottaminen on hankalaa. Tähän kulmapisteiden syöttövaiheeseen päätettiin ottaa avuksi CAD-ohjelmisto, jolla myös johdinjärjestelmän visuaalinen kolmiulotteinen hahmottaminen on havainnollisempaa kuin koordinaattien syöttö komentoriville laskentaohjelmistossa.



Kuva 3.3. Esimerkki johdinjärjestelmästä CAD -ohjelman näytöllä.

CAD:ssä johdinjärjestelmää voidaan tarkastella mistä tahansa kulmasta, joten piirtäminen helpottuu. CAD:n käytöstä on lisäksi hyötyä, kun johdinjärjestelmän geometriaa halutaan muuttaa. Johtimia voidaan helposti siirtää tai venyttää, eikä geometriapistettä tarvitse syöttää joka kerta uudelleen siirryttäessä analyttiseen laskentaan. Matlab -ohjelma, jossa laskenta tehdään, ei kuitenkaan suoraan ymmärrä CAD-ohjelman tiedostoja. Tähän tarkoitukseen on käytetty Excel-tilukkolaskentaohjelmaa, johon on tehty makro-ohjelmia Visual Basic-ohjelmointikielen avulla. Visual Basic-makrolla on toteutettu CAD-tiedoston muunto Matlab:n ymmärtämäksi tekstitiedostoksi.

Lähtötietojen muunto laskentaohjelmalla

Muunnosvaihe jakaantuu kolmeen osaan: piirtämiseen, makro-ohjelman ajoon ja laskentaan. Erityisesti piirrosvaiheessa on oltava huolellinen, jotta johdinjärjestelmä siirtyisi oikein laskentaohjelmistoon. Matlab-laskentaohjelmistossa laskenta suoritetaan muuttamalla johdinjärjestelmä lukuisiksi suoriksi johtimiksi. Jokaisessa suorassa johtimessa kulkevan virran aiheuttama magneettikenttä lasketaan lopuksi yhteen analyttisellä menetelmällä Biot-Savart:n lain mukaan ja näin saadaan ympäristöön vaikuttava magneettikenttä tietyssä tarkastelupisteessä. Laskentaohjelmisto siis käsittää kaikki samankin vaiheen johdinpätkät eri johtimiksi, vaikka ne oikeasti ovatkin samaa johdinta.

Piirtäminen

CAD-piirustusohjelma tallentaa jokaisen viivanpätkän alku- ja loppukoordinaatit nimeten ne sen mukaan millä piirtokäskyllä viiva on piirretty. Makro-ohjelma poimii johtimien koordinaatit CAD-tiedostosta piirtokäskyn mukaan. Viivojen koordinaatit kootaan $[3 \times N]$ -matriisimuotoon Excel työkirjaan, jossa ne sitten tallennetaan tekstitiedostoksi (N on viivan kulmapisteiden lukumäärä). Pisteet määrittävät koordinaatit ovat x-, y- ja z-sarakkeissa ja viivojen pisteet ovat peräkkäin rivissä.

Piirtäminen on suoritettava oikealla tavalla, koska johtimet tallentuvat tiedostoon aikajärjestyksessä eli ensimmäisenä piirretty johdin ja sen kulmapisteet tallennetaan tiedostoon ensin, sitten toinen jne. Jos piirtämisessä tehdään virheitä ei muunnos CAD:stä Matlab:in tapahdu oikein. Jokainen yhden tai useamman kulman omaava johdin kannattaa piirtää ensin kokonaan ja sitten siirtyä seuraavan kaapelin tai kiskon piirtoon. Piirtämisen aikana pidetään kirjaa johdinpätkien piirtojärjestyksestä, vaihejärjestyksestä ja kulmapisteiden lukumäärästä kussakin johtimessa. Jos johtimien keskinäinen järjestys ei ole tiedossa, voi johtimelle tulla virta-arvoja syöttäessä annettua väärä virta-arvo. Mikäli solmupisteiden määrä ei täsmää, ei johdinjärjestelmä siirry oikein laskentaohjelmistoon. Kun johdinjärjestelmä on piirretty, se tallennetaan yleiseen CAD-tiedostomuotoon (DXF).

Makro-ohjelman ajaminen on yksinkertainen toimenpide. Avataan Excel ja ajetaan makro-ohjelma. Ohjelma tallentaa kulmapisteet tekstitiedostoksi.

Matlab-laskentasovellutus

Magneettikentälaskenta suoritetaan Matlab-laskentaohjelmistolla. Laskentaohjelmisto on kolmiosainen. Ensimmäisessä määritetään johdinjärjestelmien geometria ja virta-arvot. Toisessa osassa määritetään johdinjärjestelmän sijainti huoneessa, mikä käytännössä tarkoittaa laskenta-alueen pinta-alan laajuutta järjestelmän ympärillä. Laskenta-alue voi olla esimerkiksi muuntamotilan lattia.

Laskentakorkeudella valitaan tarkastelukorkeus, esimerkiksi järjestelmän alapuolella tai muuntamotilan yläpuolisessa tilassa. Syötettäessä laskentakorkeutta täytyy tietää, että onko kaapelit valmiiksi piirretty jollekin korkeudelle. Piirtäjä voi esimerkiksi ajatella johdinjärjestelmän lähtevän muuntajasta, jolloin johdinjärjestelmällä siis on valmiiksi jokin korkeus. Toinen mahdollisuus on, että johdinjärjestelmä on piirretty sellaisenaan, jolloin johdinjärjestelmän koordinaattipisteet lähtevät esimerkiksi origosta.

Kolmannessa osassa suoritetaan varsinainen laskenta geometrian ja alueen määrittelyn jälkeen, jonka jälkeen saadaan tuloksena magneettivuon tiheys kyseisellä korkeudella ja laskenta-alueella. Usein esimerkiksi alue voi olla jo ennestään määritetty, jolloin sitä ei tarvitse joka kerta erikseen määrittellä kokeiltaessa erilaisia johdinjärjestelmiä. Lisäksi on vielä neljäs ohjelma, joka piirtää johdinjärjestelmän kolmiulotteeseen koordinaatistoon ja siitä voidaan helposti tarkastaa muunnoksen onnistuminen.

4 KIINTEISTÖMUUNTAMOIDEN KENTTIEN MITTAAMINEN

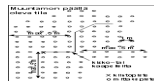
Kiinteistömuuntamon magneettikenttien mittaukset on toteutettu aikaisemmin julkaistulla tavalla. / [8/](#) Tässä raportissa esitetään lyhyesti mittausten toteutusta.

Mittauskohteeseen perehtymisen jälkeen käytännön mittaukset on aloitettu määrittelemällä kiintopiste, jonka avulla mittauspisteet määritellään. Muuntamossa kiintopisteeksi valitaan esimerkiksi muuntajan kannelta keskimmäinen pienjännitteen vaihe. Kiintopisteen avulla voidaan määritellä myös esimerkiksi muuntamon yläpuolisen tilan mittauspisteet.

4.1 Kiinteistömuuntamon aiheuttaman magneettikentän mittaaminen yläpuolisessa (tai alapuolisessa) tilassa

Sen jälkeen kun keskimmäisen vaiheen sijainti on paikannettu mittaamalla muuntamon seiniä apuna käyttäen, voidaan määrittää muuntamon yläpuolella tai (mahdollisesti myös alapuolella) olevan huoneen magneettikenttämittausten kiintopiste. Muiden mittauspisteiden määrittäminen aloitetaan tästä pisteestä.

Tilan pohjapiirrokseseen tai lattiaan merkitään kiintopisteen lisäksi myös muuntajan ja pääkeskuksen välisen pienjännitekiskon tai -kaapelin sijainti tilan alapuolella. Seuraavaksi pohjapiirrokseseen tai lattiaan merkitään yhden metrin mittausvälillä ruudukko, joka lähtee liikkeelle kiintopisteestä. Ruudukon suunta noudattaa tilan seinien suuntaa, jos seinät ovat kohtisuorassa toisiinsa nähden. Jos seinät eivät ole kohtisuorassa toisiinsa nähden, käytetään ruudukon suunnan määrittämiseen lähimpänä muuntamon kattoa olevan pienjännitekiskon tai -kaapelin osan suuntaa. Pienjännitekiskon tai -kaapelin suunta valitaan ruudukon toiseksi suunnaksi. Toinen suunta on kohtisuorassa pienjännitekiskon tai -kaapelin suuntaan nähden. Esimerkki ruudukosta on esitetty kuvassa 4.1.



Kuva 4.1. Esimerkki mittauspisteistä muuntamon yläpuolisessa tilassa kenttien mittaamisessa (× on kiintopiste, o on mittauspiste).

Ruudukko on kooltaan sellainen, että se peittää koko alapuolisen muuntajan ja pienjännitekojeiston välisen yhteyden. Joissakin tiloissa seinät rajoittavat ruudukon kokoa. Ruudukon kokoa määrittelee se, miten pitkälle katsotaan aiheelliseksi mitata. Ruudukon kokoa määritettäessä voidaan myös tehdä katselmusmittaus, jossa kävellään mittarin kanssa mitattavassa tilassa ja seurataan kentän tasoa. Tämän mittauksen tulosten avulla saadaan selville, miten suureksi ruudukko kannattaa määrittää.

Kun ruudukko on saatu määritetyksi mitattavaan tilaan, mitataan muuntajan ja pääkeskuksen välisen pienjännitekiskon tai -kaapelin virta. Mittaukseen voidaan käyttää esimerkiksi pihtiampeerimittaria, jolla virran saa mitata vain kyseisiin jännitetöihin oikeutettu henkilö.

Kentät voidaan mitata määritetyn ruudukon pisteistä 0 m, 1 m ja 2 m korkeudella, mutta yleensä kaksi mittauskorkeutta 0 m ja 1 m ovat riittävät. Tulokset merkitään mittauspöytäkirjaan.

Mittaus aloitetaan kiintopisteestä. Mittaus etenee kiintopisteestä lähtien johonkin määritetystä neljästä suunnasta niin pitkälle kun on katsottu aiheelliseksi. Kun kaikki tarvittavat pisteet on saatu mitattua, voidaan mitata kentän spektri. Varsinkin magneettikentän spektri on hyödyllistä mitata kiinteistömuuntamon magneettikenttien mittauksen yhteydessä. Koska kaupunkialueilla käytettävä kuormitus vaihtelee varsin paljon, voivat kuormitukset sisältää huomattavan määrän yliaaltoja. Magneettikentän taajuusspektrin mittaamisella voidaan selvittää yliaaltojen osuus magneettikentässä. Yliaaltojen mittaukseen on hyvä sisällyttää yliaaltotaajuudet, esimerkiksi 1000 Hz asti.

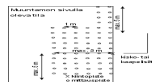
Spektri voidaan mitata esimerkiksi mittausten kiintopisteestä tai pisteestä, jossa on mitattu suurin magneettikentän arvo. Jos spektrin arvoissa havaitaan jotain erikoista, esimerkiksi 50 Hz arvo ei ole spektrissä suurin arvo, on mittauksen paikkaa syytä vaihtaa. Merkittävimmän taajuuden poikkeaminen 50 Hz:stä tarkoittaa yleensä, että magneettikenttä ei aiheudu muuntamosta, vaan jostakin muusta lähellä olevasta laitteesta. Spektrin mittauspaikka ja -korkeus merkitään mittauspöytäkirjaan. Mittaus voidaan tehdä esimerkiksi 1 m korkeudelta.

Kun magneettikenttä ja sen spektri on saatu mitattua, mitataan muuntajan ja pääkeskuksen välisen pienjännitekiskon tai -kaapelin virta uudestaan. Virta mitataan samalla tavalla kuin ennen magneettikenttämittausten aloittamista.

Mikäli muuntamo on tilan yläpuolella, voidaan mittaus tehdä kuten muuntamon yläpuolisen tilan mittauksissa, mutta mittauskorkeudeksi sopii parhaiten 1 m.

4.2 Kiinteistömuuntamon aiheuttaman kentän mittaaminen viereisessä tilassa

Kiinteistömuuntamon viereisessä tilassa mittaaminen aloitetaan määrittämällä mittauksen kiintopiste, joka on muuntamon viereisen tilan seinässä, muuntajan keskimmäisen pienjännitevaiheen läpivientiä vastaavalla kohdalla. Tässäkin tapauksessa tilan pohjapiirroksen tai lattiaan merkitään mittauksen kiintopisteen paikka. Seuraavaksi pohjapiirroksen tai lattiaan merkitään yhden metrin mittausvälillä ruudukko, joka aloitetaan mittausten kiintopisteestä. Esimerkki ruudukosta on esitetty kuvassa 4.2.



Kuva 4.2. Esimerkki mittauspisteistä muuntamon viereisessä tilassa kenttien mittaamisessa (× on kiintopiste, o on mittauspiste).

Ruudukko tehdään 5 m etäisyydelle muuntajan ja tilan välisestä seinästä lähtien. Seinän suunnassa ruudukkoa jatketaan 5 m muuntajan ja pienjännitekojeiston välisen kisko- tai kaapelisillan ulkopuolelle molempiin suuntiin.

Ruudukon suunta noudattaa tilan ja muuntamon välisen seinän suuntaa, jos tilan seinät ovat kohtisuorassa toisiinsa nähden. Jos seinät eivät ole kohtisuorassa toisiinsa nähden, käytetään ruudukon suunnan määrittämiseen lähimpänä muuntamon seinää olevaa pienjännitekiskon tai -kaapelin osaa.

Virran, magneettikentän ja spektrin mittaukset tehdään samoin kuin muuntamon yläpuolella olevan tilan mittauksissa. Kaikki tulokset merkitään mittauspöytäkirjaan.

4.3 Kiinteistömuuntamoa lähellä olevan tilan kentän mittaaminen

Kiinteistömuuntamon rakenteista ei ole edellä kuvattuja mittauksia varten aina riittävän tarkkoja tietoja. Mittaajilla ei myöskään aina ole mahdollisuutta mitata virtaa. Näissä tilanteissa voidaan mitata muuntamon läheisyydessä sijaitsevan tilan magneettikentät samalla tavalla kuin mikä tahansa työtila voidaan mitata.

Tilan mittaukset suoritetaan määritellyistä mittauspisteistä, joita on tilan kokoon nähden riittävästi. Mittauspisteet voidaan valita esimerkiksi siten, että mitataan kenttä jokaisen huoneen tai tilan keskipisteestä, sekä diagonaalien neljänneksiltä, jolloin mittauspisteitä on kaikkiaan viisi.

Jos kuitenkin kentässä on paikallista vaihtelua, kenttä voidaan kartoittaa laajemmin mittaamalla useammasta pisteestä. Tällöin merkitään pohjapiirroksen tai suoraan lattiaan ruudukko, ja suoritetaan mittaukset sen mukaisissa pisteissä. Sopiva mittausväli mitattavien pisteiden välillä on esimerkiksi 1 m. Mittauskorkeutena voidaan käyttää edellä esitettyjä 0 m ja 1 m.

4.4 Virran mittaaminen

Virrassa pitää ottaa huomioon muuntajan maadoituksen vaikutus, koska vanhoissa muuntamoissa muuntajan maadoitus saattaa mennä suoraan nollaliittimeen. Uudet muuntajat maadoitetaan maadoituskiskoon. Maadoitus vaikuttaa virtojen vaihekulmiin ja jos virta mitataan muuntajan liittimistä ennen muuntajan maajohtimen haaroittumista, virran suuruus saattaa poiketa todellisesta.

Virrasta pyritään mittaamaan tehollisarvo jokaisesta vaihejohtimesta ja nollajohtimesta. Jos virran mittaamiseen käytetään muuntamon omia analogisia virtamittareita, on hyvä harkita mittareiden mittausalueiden sopivuutta ennen magneettikenttämittauksia. Usein mittareiden alueet on valittu huippukuormien mukaan, jolloin mittareista on vaikea lukea sellaiset virrat, joita mittauksien

yhteydessä yleensä esiintyy. Tätä ongelmaa ei nykyään ole, koska useissa asennettavissa mittareissa on digitaalinen näyttö.

Pihtiampeerimittareilla mitattaessa tai pihtiantureita käytettäessä on oltava erityisen varovainen, koska mittari joudutaan käytännössä asentamaan jännitteeseen kiskoon tai kaapeliin. Vaarana on paitsi pienjännitteiset muuntamon osat, joista virta mitataan, myös muuntajan suurjänniteliittimet ja kaapelit.

Virran pysyvyyden avulla voidaan päätellä magneettikentän mittaustulosten ajallista vaihtelua, joten virtaa kannattaa rekisteröidä vähän aikaa, jos se on mahdollista. Virran muutosten avulla pystytään päättämään, onko magneettikenttämittauksen aikainen virta ollut keskimääräistä kuormitusta suurempi vai pienempi. Myös kuormitusvirran yliaallot voi olla hyvä mitata, jos niiden epäillä olevan merkittävän suuria ja sitä varten tarvittava mittauskalusto on saatavilla. Mittaamalla yliaaltojen osuus virrasta voidaan arvioida myös yliaaltojen osuutta magneettikentässä.

4.5 Muuntamotilan kenttien mittaaminen

Muuntamon kenttien mittaaminen on hyvä tehdä siellä, missä työntekijät voivat altistua, ellei ole erityistä häiriöongelmaa ratkaistavana. Tällöin muuntamotilan mittaaminen tehdään muuntamon sisältä hoitokäytävältä muutamassa pisteessä. Mittaukset voidaan tehdä korkeuksilta 0 m, 1 m, ja mahdollisesti korkeudelta 2 m. Muuntamon sisältä mitattaessa voidaan mitata sekä kentän että virran spektri. Magneettivuon tiheyden spektri on hyvä mitata kiskon tai kaapelin lähellä olevasta mittauspisteestä. Mittauksen tulokset tallennetaan tarpeelliseksi katsotulta taajuuskaistalta.

4.6 Muuntajan ja pienjännitekeskuksen kenttien mittaaminen

Muuntajan tai pienjännitekeskuksen aiheuttamat kentät voidaan mitata kuten esimerkiksi laitteen kentät käyttöympäristössä edestä, sivuilta, takaa ja kulmista, mikäli se on mahdollista.

Käytännössä seinät estävät usein kaikkien suuntien mittaamisen. Muuntajan kentän mittaaminen tehdään muuntajan suoja-aidan takaa, kuitenkin selvästi irti aidasta. Suoja-aita vaikuttaa muuntamon sähköasennuksista aiheutuvaan magneettikenttään. Mitattu kenttä on tästä huolimatta kyseisessä kohdassa vaikuttava magneettikenttä.

Pienjännitekeskuksen kentän mittaaminen tehdään käyttö- tai työskentelyetäisyydeltä. Magneettikentän mittaamisen jälkeen tai mittauksen aikana mitataan muuntajan tai keskuksen virta. Sähkökentät ovat yleensä niin pieniä, ettei niitä ole mielekästä mitata.

5 KIINTEISTÖMUUNTAMOITA KOSKEVA PUHELINKYSELY

Tutkittavan aineiston kartoittamiseksi tehtiin puhelinkysely sähköyhtiöiden kiinteistömuuntamoihin liittyvistä kenttähäiriöistä.

5.1 Kyselyn toteutus

Kyselyn tarkoituksena oli saada selville, miten paljon sähköyhtiöt ovat tehneet muutostöitä kiinteistömuuntamoissa magneettikenttien vähentämiseksi. Tämän lisäksi haluttiin erityisesti selvittää käytettyjä kenttien vähennyskeinoja, niiden tehokkuutta ja kustannuksia. Kysely suoritettiin pääasiassa puhelimitse, ja ensimmäinen yhteydenotto suoritettiin aina puhelimitse. Myöhemmässä kanssakäymisessä käytettiin muitakin yhteydenpitokeinoja, kuten esimerkiksi sähköpostia ja telefaxia.

Kyselyssä kartoitettiin aakkosjärjestyksessä sähköyhtiöitä ympäri Suomea. Kyselyssä keskityttiin asutuskeskuksissa toimiviin sähköyhtiöihin.

Ennen ensimmäistä yhteydenottoa yritettiin ottaa selville muuntamoista vastaava henkilö esimerkiksi puhelinluettelosta tai yhtiön internet -sivuilta. Jos tämä ei tuottanut tulosta, yleensä soitettiin yrityksen puhelinkeskukseen ja kysyttiin muuntamoista vastaavaa henkilöä puhelimeen.

Keskustelun aluksi muuntamovastaavalle kerrottiin meneillä olevasta projektista ”Teknologian kehittäminen pientaajusten magneettikenttien vähentämiseksi sähkön siirrossa ja jakelussa” ja

annettiin yleistietoa siitä, mitä oli jo saatu aikaan ja mitä projektin edetessä tullaan vielä tekemään. Tämän jälkeen kysyttiin, onko yhtiössä tehty kiinteistömuuntamoissa muutostöitä magneettikenttien vähentämiseksi. Jos yhtiössä oli suoritettu muuntamoissa magneettikenttien vähentämistöitä, kysyttiin olisiko yhtiöllä tarjota tietoja tuloksista, menetelmistä ja kustannuksista. Keskustelun edetessä selvitettiin vastaajan kokemuksia magneettikenttähäiriöistä, niiden poistosta, ja myöskin kokemuksia tarjolla olevan tiedon määrästä. Keskustelun päätteeksi sovittiin tulevasta yhteydenpidosta sekä siitä, miten yhtiöt toimittavat tietoja mahdollisista muutostöistä.

5.2 Kyselyn tulokset

Yhteensä 31 sähköyhtiöön otettiin yhteyttä kyselyn muodossa. Aikaisemmin tietoja oli jo 3 yhtiöltä. Näistä yhtiöistä aikaisemmin saadut tiedot ovat mukana tuloksissa. Kolmesta yhtiöstä ei saatu kiinni henkilöä, joka olisi osannut vastata kysymyksiin tai yhtiöistä ei soittopyyntöihin sekä sähköpostiin vastattu.

Kyselyn perusteella harvoilla yhtiöillä oli ollut ongelmia muuntamojen magneettikentistä. Muutamit yhtiöt olivat varautuneet ongelmiin jo etukäteen tekemällä uusista muuntamoista puistomuuntamoita. Muutamilla yhtiöillä oli pari häiriötapausta. Yhteensä kiinteistömuuntamoita, joissa on jo tehty muutostöitä häiriöiden tähden oli noin 30. Tämän kyselyn perusteella yleisemmin kiinteistömuuntamoihin on liittynyt meluhäiriöitä. Neljän yhtiön joissakin muuntamoissa esiintyi jonkinlaisia häiriöitä. Suunnitteilla on kolme muuntamon muutostyötä, joihin TTKK:n tutkimusryhmä voi tutustua etukäteen.

Kysely ei tietenkään sisällä kaikkia mahdollisia kiinteistömuuntamo-ongelmia, sillä kaikki yhtiöt eivät anna mielellään tietoja ulkopuolisille. Vastaanotto oli kuitenkin yleisesti positiivista ja yhtiöt ovat kiinnostuneita tutkimusten tuloksista. Seuraavassa taulukossa 5.1 on esitetty yhteenveto kyselyn tuloksista.

Taulukko 5.1. Yhteenveto kyselyn tuloksista. /11/

Sähköyhtiöt	Ei muutostöitä	Muutostöitä	Piirustukset	Mitattu	Tulokset	Kustannukset
Elnova (Nummela)	x					
Espoon Sähkö Oyj	x					
Etelä-Suomen Energia Oy	x					
Forssan Energia Oy	x					
Heinola Energia Oy	x					
Helsingin energia Oy		x	x	x	x	x
Hämeenlinnan Energia Oy	x					
Haminan Energia Oy	x					
Haukiputaan Sähkösuuskunta	x					
Imatran Seudun Sähkö Oy	x					
Isommus-energia Oy	x					

Pietarsaaren Energialaitos (Jakobstad Energiverk)	x					
Jyväskylän energia		x			x	x
Kaakon Energia Oy	x					
Kainuun Sähkö Oyj	x					
Keravan Energia Oy	x					
Keski-Suomen Valo Oy	x					
Keuruun Sähkö Oy	x					
Kuopion Energia Oy		x	x	x	x	
Kokemäen Sähkö Oy	x					
Lahti Energia Oy		x	x	x	x	x
Länsivoima Oyj, Alavus		x				
Länsivoima Oyj, Paimio	x					
Pori Energia Oy		x				
Porvoon Energia Oy	x					
Tampereen Sähkölaitos		x	x			
Turku Energia Oy - Åbo Energi Ab		x	x		x	x
Tuusulanjärven Energia Oy		x				
Oulun Energia Oy		x				
Vaasan Sähkö Oy	x					
Valkeakosken Energia Oy		x				

5.3 Johtopäätökset kyselystä

Yleisesti ottaen voidaan kyselyn perusteella päätellä, että ainakaan vielä kiinteistömuuntamoiden magneettikentät eivät ole olleet suuri ongelma suomalaisille sähköyhtiöille. Magneettikenttiä yleisempi häiriölähde on monessa yhtiössä ollut muuntamoista aiheutuneet meluhäiriöt. Keskusteluissa kävi kuitenkin selvästi ilmi, että sähköyhtiöt ovat tietoisia ihmisten huolesta magneettikenttien suhteen ja monet kyselyyn vastanneista ovatkin kertoneet yhtiönsä rakentavan uudet muuntamot ulkotiloihin välttääkseen jo etukäteen kiinteistömuuntamoista mahdollisesti aiheutuvat terveysvaikutukset, ja etenkin erilaisissa laitteissa aiheutuneet häiriöt.

Kyselyssä yleisimmin esille tulleita vähentämistapoja olivat: pienjännitesillan siirtäminen

kauemmaksi häiriintyvistä kohteesta, kiskojen muuttaminen kaapeleiksi, muuntajan vaihtaminen kahteen pienempään, rakennuksen harhavirtojen vähentäminen, suojaus metallikourun, -kotelon tai -levyn avulla sekä eri keinojen yhdistäminen.

Eri keinojen yhdistäminen on näistä suosituin. Parhaan mahdollisen tuloksen aikaansaamiseksi erilaisia tapoja yhdistellään suuremman yhteisvaikutuksen saavuttamiseksi.

Jo suhteellisen pienellä panostuksella on päästy hyviin lopputuloksiin, kun toteutettu vähennysmenetelmä on mietitty tarkkaan etukäteen, sekä toteutettu hyvin. Väärin tai huonosti toteutetut ratkaisut voivat johtaa jopa toimenpiteitä edeltävää tilannetta huonompaan tulokseen. Yleispätevää oikeata tapaa kenttien vähentämiseen ei ole, vaan kuhunkin muuntamoon on erikseen tutkittava ja mietittävä paras ratkaisu.

Suurin osa kyselyyn vastanneista, jotka olivat tehneet muutostöitä, olivat pystyneet vähentämään magneettikenttien voimakkuudet puoleen alkuperäisestä tilanteesta. Tässäkin täytyy ottaa huomioon se, että suurin osa mittauksista oli sähköyhtiöiden itsensä tekemiä ja mittauskäytännöt eivät olleet täysin yhteneväisiä. Myöskään mittareista ja niiden ominaisuuksista (esimerkiksi tarkkuudesta) ei monestikaan saatu tietoja.

Erilaisten menetelmien kustannukset olivat odotettua vaikeampaa arvioida. Materiaalikustannukset on yleensä ottaen helppo laskea, mutta suunnittelu- ja työkuustannukset on vaikea erottaa muista työtehtävistä. Myös keskeytyksestä aiheutuneita kustannuksia on vaikea arvioida. Usein magneettikenttiä vähentäviä muutostöitä tehdään samanaikaisesti muuntamoon tehtävien muiden muutostöiden kanssa. Tällöin magneettikenttien vähentämisestä aiheutuneet kustannukset on entistä vaikeampi arvioida.

1 JOHDANTO

Vuoden 1997 tietojen mukaan Suomessa on 121 830 jakelumuuntamoita, joista kiinteistömuuntamoita on 8 799. Sähköyhtiöiden kiinteistömuuntamoista on 6 074 taajamissa olevien jakeluyhtiöiden omistuksessa, 1 252 maaseudulla olevien jakeluyhtiöiden omistuksessa ja 169 muiden sähköyhtiöiden omistuksessa. Teollisuuslaitosten omistuksessa on 1 227 kiinteistömuuntamoita [/14/](#).

Kiinteistömuuntamo on rinnastettavissa mihin tahansa laitteeseen rakennuksen sähköjärjestelmässä. Kiinteistömuuntamot ovat aikaisempien tutkimusten perusteella osoittautuneet jakeluverkossa keskeiseksi magneettikenttälähteeksi ja niiden on huomattu aiheuttavan jonkin verran laitehäiriöitä esimerkiksi muuntamon yläpuolisessa tilassa. Tämän tähden on katsottu tarpeelliseksi tutkia mahdollisuuksia pienentää ja arvioida jo olemassa olevien kiinteistömuuntamojen magneettikenttiä. Aihe on valittu yhdeksi tutkimuskohteeksi Tampereen teknillisessä korkeakoulussa (TTKK) käynnissä olevassa projektissa ”Teknologian kehittäminen pientaajusten magneettikenttien vähentämiseksi sähkönsiirrossa ja jakelussa”.

Tutkimusprojektista on aikaisemmin kirjoitettu raportti ”Kiinteistömuuntamoiden magneettikentät”, jossa on esitetty tuloksia siitä, miten olemassa olevia kiinteistömuuntamoja voidaan ryhmitellä rakenteen mukaan. [/9/](#)

Aikaisemmassa raportissa käsiteltiin tietoja 200 muuntamosta (Helsingin Energialta, Tampereen kaupungin sähkölaitokselta ja Kuopion Energialta). Näiden perusteella suunniteltiin ryhmittely. Kiinteistömuuntamot jaettiin 18 ryhmään. Ensimmäinen jako tehtiin kisko- ja kaapelisillalla toteutettujen muuntamojen välillä. Ryhmittelyn eteneminen poikkesi hieman toisistaan näillä kahdella haaralla. Kiskollisilla muuntamoilla ryhmittely jatkui jaolla lappeellaan ja pystyssä olevien kiskojen mukaan sekä erikoistapauksiin. Kiskojen asennon jälkeen ryhmät jaettiin lähellä kattoa tai muualla kulkeviin. Viimeinen jako tehtiin kiskosillan pituuden mukaan lyhyisiin ja pitkiin. Kaapeleilla ryhmittely jatkui ensimmäisen jaon jälkeen jakoon lähellä kattoa ja muualla kulkeviin sekä erikoistapauksiin. Kulkureitin jälkeen kaapelit jaettiin symmetrisoituihin ja symmetrisoimattomiin. Kaapeleilla kuten kiskoillakin viimeinen jako oli pituuden mukaan lyhyisiin

ja pitkiin.

Suurimpaan ryhmään (kaapelit lähellä kattoa, ei symmetrisoitu, pitkä) tuli 41 muuntamoita. Suurimpia ja siten keskeisimpiä ryhmiä tämän tutkimuksen perusteella ovat: kaapelit lähellä kattoa sekä vaihejärjestystä ei symmetrisoitu ja pitkä, kiskot pystyssä sekä kiinnitetty lähelle kattoa ja pitkät, kiskot lappeellaan sekä kiinnitetty muualle kuin kattoon ja lyhyet ja kaapelit lattialla sekä vaihejärjestystä ei symmetrisoitu ja pitkä

Ryhmittelyn perusteella valittiin esimerkkimuuntamoja, joiden magneettikentät sekä mitattiin että laskettiin. Laskenta ja mittaustulokset eivät kaikkien muuntamotyyppien osalta olleet täysin yhteneväisiä.

Magneettikentät ovat yleensä suurempia kiskoilla varustetuissa muuntamoissa kuin kaapeleilla varustetuissa. Suuri merkitys magneettikenttien suuruuteen on sillä, mihin silta on kiinnitetty. Lähelle kattoa kiinnitetyillä kiskostoilla magneettivuon tiheys saattaa olla useita kymmeniä mikrotlesloja. Myös lähelle kattoa kiinnitetyillä kaapelisilloilla magneettivuon tiheys voi olla merkittävästi suurempi kuin lattialle kiinnitetyillä kaapelisilloilla. Magneettikenttä on selvästi pienempi niissä tapauksissa, joissa kisko- tai kaapelisilta on kiinnitetty muualle kuin lähelle kattoa.

Tutkimuksen seuraavassa vaiheessa on keskitytty tutkimaan tarkemmin esimerkkimuuntamoja ja niiden magneettikenttien vähentämistä muuntamon yläpuolisessa tai viereisessä tilassa. Magneettikenttien aiheuttamien häiriöiden käytännön teknisistä ratkaisuista on tehty kartoitus puhelinkyselyä. Tässä raportissa esitellään puhelinkyselyn tulokset, tutkitut kiinteistömuuntamot sekä niihin tehdyt muutostyöt. Eri vaiheista on mitattu ja laskettu magneettikentät ja tulosten perusteella on pyritty arvioimaan magneettikenttien vähentämismenetelmiä.

Sähköyhtiöt ja muuntamoita valmistava teollisuus saavat muuntamoiden magneettikenttien vähentämiseen suunnitteluapua raportissa esitetyistä vähentämismenetelmistä. Valmistavassa teollisuudessa menetelmien soveltamisella voidaan saavuttaa myös vientituotteille kilpailuetua. Magneettikenttien suuruus voi vaikuttaa kuluttajien ostopäätöksiin, sillä pienikentäinen tuote saattaa kiinnostaa asiakasta.

2 MAGNEETTIKENTÄT

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 Sähköjärjestelmien magneettikentät

Suomen sähköjärjestelmä koostuu kantaverkosta, alueverkoista ja jakeluverkoista. Kantaverkossa sähkön siirtoon käytetään 400 kV, 220 kV ja 110 kV siirtojohtoja. Alueverkoissa käytetään pääasiassa 20 kV ja 10 kV keskijännitejohtoja. Sähkönjakeluun pienkuluttajille käytetään 400 V jännitettä.

Kantaverkkoa käytetään suurten tehojen siirtoon, joten suuresta jännitteestä huolimatta myös virrat ovat suuria. Tämän vuoksi siirtojohdot aiheuttavat ympäristöönsä huomattavan magneettikentän. Vuonna 1989 tehdyssä selvityksessä oli keskimääräinen magneettivuon tiheys 90%:lla 400 kV johdoilla maksimissaan alle 6,5 μT ja 110 kV johdoilla vastaavasti alle 2,5 μT . /3,16/

Keskijännitejohdoilla virrat ovat yleensä pienempiä kuin siirtojohdoilla ja johdinten vaihevälit ovat huomattavasti pienemmät. Näistä syistä keskijännitejohtojen magneettikentät ovat maanpinnan tasolla yleensä alle 3 μT . /10/

400 V jännitteellä tapahtuvassa jakelussa käytetään yleensä taajama-alueella kaapeleita, joilla vaihejohtimet ovat mahdollisimman lähellä toisiaan. Tämän vuoksi niiden magneettikentät

rajoittuvat vain lähelle johtoja. /7/

2.2 Muuntamojen magneettikentät

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 muuntamon yläpuolisessa tilassa yhden metrin korkeudella lattiasta alle 12 μT . /2,17/

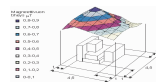
Muuntamoiden osalta aikaisempia tutkimuksia on tehty ensisijaisesti kiinteistömuuntamoihin liittyen, koska lähinnä niiden yläpuolella olevissa huoneistoissa on todettu erilaisia laitehäiriöitä. Uusien kiinteistömuuntamoiden suunnittelussa magneettikentät on jo jonkin aikaa otettu huomioon. Markkinoille on tuotu esimerkiksi kiinteistömuuntamoja, joiden ympärillä magneettikentät ovat perinteisiä huomattavasti pienempiä. Magneettikenttien pienentäminen muuntamoissa perustuu magneettikenttiä aiheuttavien komponenttien keskinäiseen sijoitteluun ja suojaukseen. Myös vanhoissa muuntamoissa on tehty saneerauksia magneettikenttien aiheuttamien häiriöiden vähentämiseksi. Tätä on tutkittu erityisesti Ruotsissa ja kotimaisetkin jakeluyhtiöt ovat tehneet joitakin kokeiluja.

Aikaisemmissa tutkimuksissa esiteltyjen erilaisten esimerkkitapausten perusteella tiedetään myös joitakin keinoja vanhojen muuntamoiden kenttien pienentämiseksi. Kolmivaihekaapelin käyttö pienjännitekojeiston ja muuntajan välillä yksivaihekaapelin tai kiskosillan sijasta pienentää vaihejohdinten välin pieneksi ja siten pienentää kenttiä. Kolmivaihejärjestelmän vaiheiden jakaminen kahteen osaan ja asetteleminen symmetrisesti pienentää myös kenttiä. Muuntajan ja pienjännitekojeiston yhdistäminen lattian kautta, katon sijasta, pienentää erityisesti muuntamon yläpuolisen tilan kenttiä. Syntyvä kenttä on myös sitä pienempi, mitä lyhyempi johdinyhteys on. /14/

2.3 Magneettikentät huomioon ottava tehdasvalmisteinen kiinteistömuuntamo

Magneettikenttien pienentäminen on jo huomioitu valmistajien toiminnassa. Kiinteistömuuntamon suunnittelua, hankintaa ja asennusta helpottamaan on kehitetty esimerkiksi Teslasafe-muuntamo. Muuntamo suunnitellaan valmiille alustalle, johon valitaan sähkötekniisin perustein suurjännitekojeisto, muuntaja, kiskosilta ja tarpeita vastaava pienjännitekeskus. Alustaan kuuluu myös öljynkeräyskaukalo.

Muuntamon ympäristössä normaalisti esiintyviä magneettikenttiä voidaan pienentää tällä muuntamoratkaisulla. Magneettikenttien pienentäminen muuntamossa perustuu magneettikenttiä aiheuttavien komponenttien keskinäiseen sijoitteluun ja suojaukseen. Kuvassa 2.1 on esimerkki Teslasafe -muuntamon magneettivuon tiheydestä 750 A virralla 2 m etäisyydellä (yläpuolella). Virta vastaa noin 500 kW kuormitusta.



Kuva 2.1. Teslasafe-muuntamon magneettivuon tiheys 2 metriä muuntamokojeiston yläpuolella. Mitat ovat kuvassa metreinä. /1/

Kuvan 2.1 magneettikenttä vastaa kenttää muuntamon yläpuolella sijaitsevassa tilassa. Suurin arvo muuntamokojeiston yläpuolella on 0,9 μT . Sivusuunnassa pienjännitekojeiston kohdalla kenttä on 2 metrin etäisyydellä 1,0 μT ja muissa suunnissa 0,7 μT . /1/

TTKK:n tutkimusten perusteella yleensä kiinteistömuuntamoiden magneettikentät 1 metrin korkeudella yläpuolisen tilan lattiasta ovat muutamasta mikroteslasta joihinkin kymmeneen

mikrotesloihin. /5/

2.4 Rakennusten sähköjärjestelmien magneettikentät

Rakennuksen sähköjärjestelmien aiheuttamat magneettikentät riippuvat kuormitusvirrasta ja tarkasteluetaisyydestä. Yleensä rakennusten magneettikentät ovat suuruusluokkaa $0,01 - 1 \mu\text{T}$. /7/ Kenttien suuruuteen vaikuttavat muun muassa virran kulkureittien geometria, mitat sekä kotelointi. Symmetrisesti kuormitetussa kolmivaihejärjestelmässä 50 Hz vaihevirtojen summa on nolla, jolloin vaihevirtojen synnyttämät magneettikentät kumoavat toisiaan. Käytännössä kuormitus ei kuitenkaan ole symmetrinen ja vaihejohtimien välillä on merkittävä etäisyys, jolloin kentät eivät kumoa toisiaan täysin. Epäsymmetrisesti kuormitetussa kolmivaihejärjestelmässä vaihevirtojen summa ei ole nolla. Pääosa summavirtana esiintyvistä paluuvirrasta kulkee nollajohtimessa.

rakennuksen sähköjärjestelmä on tehty TN-S -järjestelmäksi, eli viisijohdinjärjestelmäksi, summavirta kulkee yhden muuntajan järjestelmässä ainoastaan nollajohtimessa. Jos rakennuksen sähköjärjestelmässä on käytetty TN-C - tai TN-S-C -järjestelmää, eli nelijohdin- tai sekajärjestelmää, summavirta saattaa kulkea osittain järjestelmän maadoitettujen johtavien rakenteiden kautta. Tällaista maadoitettujen johtavien rakenteiden kautta kulkevaa virtaa kutsutaan harhavirraksi.

Magneettikenttiä voidaan vähentää useilla eri keinoilla. Keinoja ovat mm. etäisyyden kasvattaminen lähteeseen, johtimien vaihevälin pienentäminen, johtimien vaihesymmetrisointi, johdinten suojaus, kojeistojen suojaus ja kolmannen yliaallon suodattaminen verkosta.

2.5 Muuntajan magneettikentät

Muuntajan käämit tuottavat voimakkaan magneettikentän muuntajan rautasydämeen. Tämä magneettikenttä kuitenkin sulkeutuu pääosin rautasydämessä. Lisäksi pienjännitekäämeille kulkevat läpiviennit ovat toinen merkittävä tekijä, mikä aiheuttaa magneettikenttää muuntajan ulkopuolelle. Osa muuntajan sisällä olevasta kentästä kuitenkin vaimenee öljytäytteisellä muuntajalla muuntajan säiliöön. Osa käämien vuosta kulkee kuitenkin sydämen ulkopuolella hajavuona. /15/

öljytäytteisten muuntajien magneettikenttä 1 m etäisyydellä sivusuunnassa muuntajasta voi olla suurimmillaan esimerkiksi 3150 kVA muuntajalla noin $50 \mu\text{T}$ ja 800 kVA muuntajalla noin $20 \mu\text{T}$. Esimerkiksi 500 kVA valuhartsieristeisillä muuntajilla kentät voivat olla noin $25 \mu\text{T}$ (1 m etäisyydellä).

Kuivamuuntajan nimellistehoon nähden suhteellisesti suurempi magneettikenttä johtuu käämien erilaisesta rakenteen eristyksestä ja siitä, että niillä ei käytetä vahvaa kotelointia kuten öljymuuntajilla. Muuntajan magneettikenttä vaimenee kuitenkin erittäin nopeasti. Edellä mainituilla muuntajilla suurimmat kentät 2 m päässä sivusuunnassa muuntajista ovat 3150 kVA muuntajalla noin $9 \mu\text{T}$, 800 kVA muuntajalla noin $4 \mu\text{T}$ ja 500 kVA kuivamuuntajalla noin $3 \mu\text{T}$. /15/

3 KIINTEISTÖMUUNTAMON MAGNEETTIKENTTIEN LASKENTA

Sähkö- ja magneettikenttiä lasketaan sekä analyyttisesti että numeerisesti (esimerkiksi FEM -menetelmällä). Kiinteistömuuntamojen kenttien laskentaan soveltuu analyyttinen laskenta. Erilaisten vaimentavien materiaalien tutkimisessa tarvitaan numeerista laskentaa.

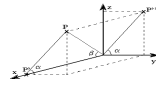
3.1 Analyttinen laskenta

Magneettikentän analyyttisessä laskennassa käytetään Biot-Savartin lakia, jolla voidaan laskea suorassa johtimessa kulkevan virran ympärilleen aiheuttama magneettikenttä. Kun halutaan laskea mutkittelevan johdon magneettikenttä, johto kuvataan suorilla osuuksilla, jotka lasketaan erikseen. Näillä johdinosuuksilla kulkee kaikilla kuitenkin samassa vaihejohtimessa sama virta. Koko johdon magneettikenttä saadaan laskemalla osajohdinten aiheuttamat magneettikenttävektorit yhteen.

Kun halutaan laskea magneettivuon tiheys tietyssä tarkastelupisteessä, se tehdään 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. /12/

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 kierroksessa 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 kierroksessa z-koordinaatit eivät muutu. Muunnokseen tarvittava muunnosmatriisi on yhtälön 2 mukainen.

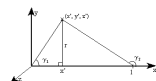
$$T_z = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Muunnokset voidaan myös yhdistää, jolloin molemmat koordinaatistokierrat 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.

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

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.

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

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.

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

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.

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

missä n on solmuvälien lukumäärä ja
 B_i solmuvälin i aiheuttama magneettivuon tiheys.

Laskennassa on kuitenkin huomioitava, että magneettivuon tiheys 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.

Käsimittareilla mitataan yleensä magneettivuon tiheyden tehollisarvoa tai niin kutsuttua todellista tehollisarvoa, joka huomioi myös siniaallostta poikkeavan kentän vaihtelun. Kolmeakselisella magneettikenttämittarilla saadaan määritettyä suoraan magneettivuon tiheyden resultantti. Yksiakselisella mittarilla resultantti saadaan laskettua mitatuista arvoista. Laskettuja hetkellisarvoja ei voida verrata mittauksiin.

3.2 Numeerinen laskenta

Elementtimenetelmä (FEM) on muodostunut magneettikenttien ratkaisemisen vakiomenetelmäksi, kun halutaan ratkaista magneettikenttä johtavien tai magneettisten materiaalien lähellä. Sen perusideana on ratkaista osittaisdifferentiaaliyhtälö variaatiotehtävän avulla. Tutkittava alue jaetaan pieniin osa-alueisiin eli elementteihin, joissa kaikissa on oma kenttäsuuretta kuvaava elementaarinen funktionsa. Kun funktioiden kertoimet valitaan oikein, on ratkaisu hyvä approksimaatio oikeasta. Tarkkuutta voidaan parantaa tihentämällä elementtiverkkoa tai nostamalla ratkaistavien funktioiden astelukua.

FEM-ohjelmien käyttökelpoisuus perustuu paljolti sen joustavuuteen geometrian kuvaamisessa. Elementeillä voidaan käsitellä alueita, joiden reunat voidaan riittävällä tarkkuudella esittää tasoista tai kaarevista pinnoista koostuvilla osilla. Myöskään tehtäväalueen sisäosan mallintamiseen käytetyn elementtiverkon ei tarvitse olla säännöllinen. Elementit saavat olla eri kokoisia ja muotoisia.

FEM-ohjelmistot koostuvat yleensä kolmesta osasta: esikäsitteijästä, ratkaisijasta ja jälkikäsitteijästä. Esikäsitteijällä muodostetaan tarvittava geometria ja siihen elementtiverkko. Esikäsitteijät perustuvat useimmiten graafisen päätteen tai työaseman käyttöön. Ne mahdollistavat geometrian ja elementtiverkon interaktiivisen luomisen ja muokkaamisen. Ratkaisijalla suoritetaan numeerinen laskenta. Jälkikäsitteijää käytetään kenttäkuvien erilaisten käyrämuotojen ja numeroarvojen katselemiseen ja tulostamiseen.

Magneettikentän ratkaisemiseen voidaan vaikuttaa suoraan lähteiden ja reuna-arvojen avulla. Laskenta-alueella olevalle lähdevirrälle annetaan suuruus ja vaihekulma. Tehtäväalueen reunalle asetetaan tarvittavat reunaehdot, jotka ratkaisu toteuttaa. Tulosten tarkastelu on lähes jokaisessa ohjelmassa erilainen.

Sellaisissa esimerkkimuuntamoissa, joissa muuntajan ja pienjännitekeskuksen välisessä kisko- tai kaapelisillassa oli suojakotelo, -kouru tai suojalevy tai muuntamon seinään oli asennettu suojalevy, myös suojan suojausvaikutus piti ottaa huomioon laskennassa.

Pienjännitesilta mallinnettiin ensin ilman magneettikenttäsuojan vaimennusmateriaalin vaikutusta. Suojan kohdalla materiaaliksi valittiin ensin ilma. Suojan rakenne otettiin malliin mukaan, koska sen geometrian lisääminen myöhemmässä vaiheessa aiheuttaisi virhettä tuloksiin. Magneettikentän tulokset tallennettiin samalta etäisyydeltä kuin magneettikentän analyttinen laskenta tehtiin. Seuraavaksi suojan ominaisuudet vaihdettiin esimerkissä käytetyn materiaalin ominaisuuksiksi. Myös tästä laskennasta tallennettiin magneettikentän tulokset samalta etäisyydeltä. Tämän jälkeen magneettikenttäsuojan suojausvaikutus (SE) saadaan laskemalla ennen suojausta laskettujen magneettikenttätulosten suhde suojauksen jälkeen laskettuihin magneettikenttätuloksiin yhtälön 12 mukaisesti.

$$SE = 20 \log_{10} \frac{B_0}{B_{\text{suoja}}} \quad (12)$$

missä B_0 on magneettivuon tiheys ilman suojaa ja

B_{suoja} on magneettivuon tiheys suojan kanssa.

Analyttisessä menetelmässä voidaankin käyttää kaksiulotteisen FEM-ohjelman avulla laskettuja suojausvaikutuksen 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 suojausvaikutukseen.

Suojausvaikutus otetaan huomioon laskennassa niissä pienjännitesillan osissa, jotka jäävät suojan sisään. Magneettikenttäsuojan vaikutus muuntamon magneettikenttään lasketaan analyttisesti. Suojausvaikutusta käytetään yhtälön 13 mukaisesti kertoimena analyttisessä laskennassa suojan sisällä olevien pienjännitesillan osien tuottamissa magneettikenttäkomponenteissa.

$$B_i = 10^{-\frac{SF}{20}} B_{i,0} \quad (13)$$

missä B_i on suojan sisällä olevan pienjännitesillan osan i magneettivuon tiheys, kun suojausvaikutus otetaan huomioon ja

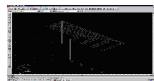
$B_{i,0}$ on suojan sisällä olevan pienjännitesillan osan i analyttisesti laskettu magneettivuon tiheys.

Suojausvaikutuksen laskenta tehtiin kaksidimensioista FEM-ohjelmaa käyttäen. Kaksidimensioinen geometrian mallintaminen on yleensä riittävän tarkka suojauslaskentaan. Laskentaan käytettiin MagNet 5.1 -ohjelmaa.

3.3 Kiinteistömuuntamon magneettikenttien laskennan toteutus TTKK:ssa

Johdinjärjestelmän aiheuttaman magneettikentän laskentaan on TTKK:ssa kehitetty analyttiseen laskentaan perustuva ohjelmistosovellutus. Johdinjärjestelmän kulmapisteiden syöttäminen tehdään antamalla jokaisen johtimen kulmapisteen koordinaatit tietokoneelle CAD-ohjelmaan.

Kuvassa 3.3 on esimerkki johdinjärjestelmästä CAD-ohjelman näytöllä. Koordinaattien syöttäminen suoraan laskentaohjelmistoon (Matlab) on hidasta ja etenkin monimutkaisemman kolmiulotteisen kuvion hahmottaminen on hankalaa. Tähän kulmapisteiden syöttövaiheeseen päätettiin ottaa avuksi CAD-ohjelmisto, jolla myös johdinjärjestelmän visuaalinen kolmiulotteinen hahmottaminen on havainnollisempaa kuin koordinaattien syöttö komentoriville laskentaohjelmistossa.



Kuva 3.3. Esimerkki johdinjärjestelmästä CAD -ohjelman näytöllä.

CAD:ssä johdinjärjestelmää voidaan tarkastella mistä tahansa kulmasta, joten piirtäminen helpottuu. CAD:n käytöstä on lisäksi hyötyä, kun johdinjärjestelmän geometriaa halutaan muuttaa. Johtimia voidaan helposti siirtää tai venyttää, eikä geometriapistettä tarvitse syöttää joka kerta uudelleen siirryttäessä analyttiseen laskentaan. Matlab -ohjelma, jossa laskenta tehdään, ei kuitenkaan suoraan ymmärrä CAD-ohjelman tiedostoja. Tähän tarkoitukseen on käytetty Excel-taulukkolaskentaohjelmaa, johon on tehty makro-ohjelmia Visual Basic-ohjelmointikielen avulla. Visual Basic-makrolla on toteutettu CAD-tiedoston muunto Matlab:n ymmärtämäksi tekstitiedostoksi.

Lähtötietojen muunto laskentaohjelmalla

Muunnosvaihe jakaantuu kolmeen osaan: piirtämiseen, makro-ohjelman ajoon ja laskentaan. Erityisesti piirrosvaiheessa on oltava huolellinen, jotta johdinjärjestelmä siirtyisi oikein laskentaohjelmistoon. Matlab-laskentaohjelmistossa laskenta suoritetaan muuttamalla johdinjärjestelmä lukuisiksi suoriksi johtimiksi. Jokaisessa suorassa johtimessa kulkevan virran aiheuttama magneettikenttä lasketaan lopuksi yhteen analyttisellä menetelmällä Biot-Savart:n lain mukaan ja näin saadaan ympäristöön vaikuttava magneettikenttä tietyssä tarkastelupisteessä. Laskentaohjelmisto siis käsittää kaikki samankin vaiheen johdinpätkät eri johtimiksi, vaikka ne oikeasti ovatkin samaa johdinta.

Piirtäminen

CAD-piirustusohjelma tallentaa jokaisen viivanpätkän alku- ja loppukoordinaatit nimeten ne sen

mukaan millä piirtokäskyllä viiva on piirretty. Makro-ohjelma poimii johtimien koordinaatit CAD-tiedostosta piirtokäskyn mukaan. Viivojen koordinaatit kootaan $[3 \times N]$ -matriisimuotoon Excel työkirjaan, jossa ne sitten tallennetaan tekstitiedostoksi (N on viivan kulmapisteiden lukumäärä). Pisteet määrittävät koordinaatit ovat x-, y- ja z-sarakkeissa ja viivojen pisteet ovat peräkkäin rivissä.

Piirtäminen on suoritettava oikealla tavalla, koska johtimet tallentuvat tiedostoon aikajärjestyksessä eli ensimmäisenä piirretty johdin ja sen kulmapisteet tallennetaan tiedostoon ensin, sitten toinen jne. Jos piirtämisessä tehdään virheitä ei muunnos CAD:stä Matlab:in tapahdu oikein. Jokainen yhden tai useamman kulman omaava johdin kannattaa piirtää ensin kokonaan ja sitten siirtyä seuraavan kaapelin tai kiskon piirtoon. Piirtämisen aikana pidetään kirjaa johdinpätkien piirtojärjestyksestä, vaihejärjestyksestä ja kulmapisteiden lukumäärästä kussakin johtimessa. Jos johtimien keskinäinen järjestys ei ole tiedossa, voi johtimelle tulla virta-arvoja syöttäessä annettua väärä virta-arvo. Mikäli solmupisteiden määrä ei täsmää, ei johdinjärjestelmä siirry oikein laskentaohjelmistoon. Kun johdinjärjestelmä on piirretty, se tallennetaan yleiseen CAD-tiedostomuotoon (DXF).

Makro-ohjelman ajaminen on yksinkertainen toimenpide. Avataan Excel ja ajetaan makro-ohjelma. Ohjelma tallentaa kulmapisteet tekstitiedostoksi.

Matlab-laskentasovellutus

Magneettikentälaskenta suoritetaan Matlab-laskentaohjelmistolla. Laskentaohjelmisto on kolmiosainen. Ensimmäisessä määritetään johdinjärjestelmien geometria ja virta-arvot. Toisessa osassa määritetään johdinjärjestelmän sijainti huoneessa, mikä käytännössä tarkoittaa laskenta-alueen pinta-alan laajuutta järjestelmän ympärillä. Laskenta-alue voi olla esimerkiksi muuntamotilan lattia.

Laskentakorkeudella valitaan tarkastelukorkeus, esimerkiksi järjestelmän alapuolella tai muuntamotilan yläpuolisessa tilassa. Syötettäessä laskentakorkeutta täytyy tietää, että onko kaapelit valmiiksi piirretty jollekin korkeudelle. Piirtäjä voi esimerkiksi ajatella johdinjärjestelmän lähtevän muuntajasta, jolloin johdinjärjestelmällä siis on valmiiksi jokin korkeus. Toinen mahdollisuus on, että johdinjärjestelmä on piirretty sellaisenaan, jolloin johdinjärjestelmän koordinaattipisteet lähtevät esimerkiksi origosta.

Kolmannessa osassa suoritetaan varsinainen laskenta geometrian ja alueen määrittelyn jälkeen, jonka jälkeen saadaan tuloksena magneettivuon tiheys kyseisellä korkeudella ja laskenta-alueella. Usein esimerkiksi alue voi olla jo ennestään määritetty, jolloin sitä ei tarvitse joka kerta erikseen määrittellä kokeiltaessa erilaisia johdinjärjestelmiä. Lisäksi on vielä neljäs ohjelma, joka piirtää johdinjärjestelmän kolmiulotteeseen koordinaatistoon ja siitä voidaan helposti tarkastaa muunnoksen onnistuminen.

4 KIINTEISTÖMUUNTAMOIDEN KENTTIEN MITTAAMINEN

Kiinteistömuuntamon magneettikenttien mittaukset on toteutettu aikaisemmin julkaistulla tavalla. / [8/](#) Tässä raportissa esitetään lyhyesti mittausten toteutusta.

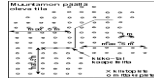
Mittauskohteeseen perehtymisen jälkeen käytännön mittaukset on aloitettu määrittelemällä kiintopiste, jonka avulla mittauspisteet määritellään. Muuntamossa kiintopisteeksi valitaan esimerkiksi muuntajan kannelta keskimmäinen pienjännitteen vaihe. Kiintopisteen avulla voidaan määrittellä myös esimerkiksi muuntamon yläpuolisen tilan mittauspisteet.

4.1 Kiinteistömuuntamon aiheuttaman magneettikentän mittaaminen yläpuolisessa (tai alapuolisessa) tilassa

Sen jälkeen kun keskimmäisen vaiheen sijainti on paikannettu mittaamalla muuntamon seiniä apuna käyttäen, voidaan määrittää muuntamon yläpuolella tai (mahdollisesti myös alapuolella) olevan huoneen magneettikenttämittausten kiintopiste. Muiden mittauspisteiden määrittäminen aloitetaan tästä pisteestä.

Tilan pohjapiirroksen tai lattiaan merkitään kiintopisteen lisäksi myös muuntajan ja pääkeskuksen

välisen pienjännitekiskon tai -kaapelin sijainti tilan alapuolella. Seuraavaksi pohjapiirroksen tai lattiaan merkitään yhden metrin mittausvälillä ruudukko, joka lähtee liikkeelle kiintopisteestä. Ruudukon suunta noudattaa tilan seinien suuntaa, jos seinät ovat kohtisuorassa toisiinsa nähden. Jos seinät eivät ole kohtisuorassa toisiinsa nähden, käytetään ruudukon suunnan määrittämiseen lähimpänä muuntamon kattoa olevan pienjännitekiskon tai -kaapelin osan suuntaa. Pienjännitekiskon tai -kaapelin suunta valitaan ruudukon toiseksi suunnaksi. Toinen suunta on kohtisuorassa pienjännitekiskon tai -kaapelin suuntaan nähden. Esimerkki ruudukosta on esitetty kuvassa 4.1.



Kuva 4.1. Esimerkki mittauspisteistä muuntamon yläpuolisessa tilassa kenttien mittaamisessa (× on kiintopiste, o on mittauspiste).

Ruudukko on kooltaan sellainen, että se peittää koko alapuolisen muuntajan ja pienjännitekojeiston välisen yhteyden. Joissakin tiloissa seinät rajoittavat ruudukon kokoa. Ruudukon kokoa määrittelee se, miten pitkälle katsotaan aiheelliseksi mitata. Ruudukon kokoa määritettäessä voidaan myös tehdä katselmusmittaus, jossa kävellään mittarin kanssa mitattavassa tilassa ja seurataan kentän tasoa. Tämän mittauksen tulosten avulla saadaan selville, miten suureksi ruudukko kannattaa määrittää.

Kun ruudukko on saatu määritetyksi mitattavaan tilaan, mitataan muuntajan ja pääkeskuksen välisen pienjännitekiskon tai -kaapelin virta. Mittaukseen voidaan käyttää esimerkiksi pihtiampeerimittaria, jolla virran saa mitata vain kyseisiin jännitetöihin oikeutettu henkilö.

Kentät voidaan mitata määritetyn ruudukon pisteistä 0 m, 1 m ja 2 m korkeudella, mutta yleensä kaksi mittauskorkeutta 0 m ja 1 m ovat riittävät. Tulokset merkitään mittauspöytäkirjaan.

Mittaus aloitetaan kiintopisteestä. Mittaus etenee kiintopisteestä lähtien johonkin määritetystä neljästä suunnasta niin pitkälle kun on katsottu aiheelliseksi. Kun kaikki tarvittavat pisteet on saatu mitattua, voidaan mitata kentän spektri. Varsinkin magneettikentän spektri on hyödyllistä mitata kiinteistömuuntamon magneettikenttien mittauksen yhteydessä. Koska kaupunkialueilla käytettävä kuormitus vaihtelee varsin paljon, voivat kuormitukset sisältää huomattavan määrän yliaaltoja. Magneettikentän taajuusspektrin mittaamisella voidaan selvittää yliaaltojen osuus magneettikentässä. Yliaaltojen mittaukseen on hyvä sisällyttää yliaaltotaajuuksia, esimerkiksi 1000 Hz asti.

Spektri voidaan mitata esimerkiksi mittausten kiintopisteestä tai pisteestä, jossa on mitattu suurin magneettikentän arvo. Jos spektrin arvoissa havaitaan jotain erikoista, esimerkiksi 50 Hz arvo ei ole spektrissä suurin arvo, on mittauksen paikkaa syytä vaihtaa. Merkittävimmän taajuuden poikkeaminen 50 Hz:stä tarkoittaa yleensä, että magneettikenttä ei aiheudu muuntamosta, vaan jostakin muusta lähellä olevasta laitteesta. Spektrin mittauspaikka ja -korkeus merkitään mittauspöytäkirjaan. Mittaus voidaan tehdä esimerkiksi 1 m korkeudelta.

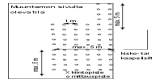
Kun magneettikenttä ja sen spektri on saatu mitattua, mitataan muuntajan ja pääkeskuksen välisen pienjännitekiskon tai -kaapelin virta uudestaan. Virta mitataan samalla tavalla kuin ennen magneettikenttämittausten aloittamista.

Mikäli muuntamo on tilan yläpuolella, voidaan mittaus tehdä kuten muuntamon yläpuolisen tilan mittauksissa, mutta mittauskorkeudeksi sopii parhaiten 1 m.

4.2 Kiinteistömuuntamon aiheuttaman kentän mittaaminen viereisessä tilassa

Kiinteistömuuntamon viereisessä tilassa mittaaminen aloitetaan määrittämällä mittauksen kiintopiste, joka on muuntamon viereisen tilan seinässä, muuntajan keskimmäisen pienjännitevaiheen läpivientiä vastaavalla kohdalla. Tässäkin tapauksessa tilan pohjapiirroksen tai lattiaan merkitään mittauksen kiintopisteen paikka. Seuraavaksi pohjapiirroksen tai lattiaan merkitään yhden metrin mittausvälillä ruudukko, joka aloitetaan mittausten kiintopisteestä.

Esimerkki ruudukosta on esitetty kuvassa 4.2.



Kuva 4.2. Esimerkki mittauspisteistä muuntamon viereisessä tilassa kenttien mittaamisessa (× on kiintopiste, o on mittauspiste).

Ruudukko tehdään 5 m etäisyydelle muuntajan ja tilan välisestä seinästä lähtien. Seinän suunnassa ruudukkoa jatketaan 5 m muuntajan ja pienjännitekojeiston välisen kisko- tai kaapelisillan ulkopuolelle molempiin suuntiin.

Ruudukon suunta noudattaa tilan ja muuntamon välisen seinän suuntaa, jos tilan seinät ovat kohtisuorassa toisiinsa nähden. Jos seinät eivät ole kohtisuorassa toisiinsa nähden, käytetään ruudukon suunnan määrittämiseen lähimpänä muuntamon seinää olevaa pienjännitekiskon tai -kaapelin osaa.

Virran, magneettikentän ja spektrin mittaukset tehdään samoin kuin muuntamon yläpuolella olevan tilan mittauksissa. Kaikki tulokset merkitään mittauspöytäkirjaan.

4.3 Kiinteistömuuntamoa lähellä olevan tilan kentän mittaaminen

Kiinteistömuuntamon rakenteista ei ole edellä kuvattuja mittauksia varten aina riittävän tarkkoja tietoja. Mittaajilla ei myöskään aina ole mahdollisuutta mitata virtaa. Näissä tilanteissa voidaan mitata muuntamon läheisyydessä sijaitsevan tilan magneettikentät samalla tavalla kuin mikä tahansa työtila voidaan mitata.

Tilan mittaukset suoritetaan määritellyistä mittauspisteistä, joita on tilan kokoon nähden riittävästi. Mittauspisteet voidaan valita esimerkiksi siten, että mitataan kenttä jokaisen huoneen tai tilan keskipisteestä, sekä diagonaalien neljänneksiltä, jolloin mittauspisteitä on kaikkiaan viisi.

Jos kuitenkin kentässä on paikallista vaihtelua, kenttä voidaan kartoittaa laajemmin mittaamalla useammasta pisteestä. Tällöin merkitään pohjapiirroksen tai suoraan lattiaan ruudukko, ja suoritetaan mittaukset sen mukaisissa pisteissä. Sopiva mittaaväli mitattavien pisteiden välillä on esimerkiksi 1 m. Mittauskorkeutena voidaan käyttää edellä esitettyjä 0 m ja 1 m.

4.4 Virran mittaaminen

Virrassa pitää ottaa huomioon muuntajan maadoituksen vaikutus, koska vanhoissa muuntamoissa muuntajan maadoitus saattaa mennä suoraan nollaliittimeen. Uudet muuntajat maadoitetaan maadoituskiskoon. Maadoitus vaikuttaa virtojen vaihekulmiin ja jos virta mitataan muuntajan liittimistä ennen muuntajan maajohtimen haaroittumista, virran suuruus saattaa poiketa todellisesta.

Virrasta pyritään mittaamaan tehollisarvo jokaisesta vaihejohtimesta ja nollajohtimesta. Jos virran mittaamiseen käytetään muuntamon omia analogisia virtamittareita, on hyvä harkita mittareiden mitta-alueiden sopivuutta ennen magneettikenttämittauksia. Usein mittareiden alueet on valittu huippukuormien mukaan, jolloin mittareista on vaikea lukea sellaiset virrat, joita mittauksien yhteydessä yleensä esiintyy. Tätä ongelmaa ei nykyään ole, koska useissa asennettavissa mittareissa on digitaalinen näyttö.

Pihtiampeerimittareilla mitattaessa tai pihtiantureita käytettäessä on oltava erityisen varovainen, koska mittari joudutaan käytännössä asentamaan jännitteeseen kiskoon tai kaapeliin. Vaarana on paitsi pienjännitteiset muuntamon osat, joista virta mitataan, myös muuntajan suurjänniteliittimet ja kaapelit.

Virran pysyvyyden avulla voidaan päätellä magneettikentän mittaustulosten ajallista vaihtelua, joten virtaa kannattaa rekisteröidä vähän aikaa, jos se on mahdollista. Virran muutosten avulla pystytään päättämään, onko magneettikenttämittauksen aikainen virta ollut keskimääräistä kuormitusta suurempi vai pienempi. Myös kuormitusvirran yliaallot voi olla hyvä mitata, jos niiden epäillä olevan merkittävän suuria ja sitä varten tarvittava mittauskalusto on saatavilla. Mittaamalla

yliaaltojen osuus virrasta voidaan arvioida myös yliaaltojen osuutta magneettikentissä.

4.5 Muuntamotilan kenttien mittaaminen

Muuntamon kenttien mittaaminen on hyvä tehdä siellä, missä työntekijät voivat altistua, ellei ole erityistä häiriöongelmaa ratkaistavana. Tällöin muuntamotilan mittaaminen tehdään muuntamon sisältä hoitokäytävältä muutamassa pisteessä. Mittaukset voidaan tehdä korkeuksilta 0 m, 1 m, ja mahdollisesti korkeudelta 2 m. Muuntamon sisältä mitattaessa voidaan mitata sekä kentän että virran spektri. Magneettivuon tiheyden spektri on hyvä mitata kiskon tai kaapelin lähellä olevasta mittauspisteestä. Mittauksen tulokset tallennetaan tarpeelliseksi katsotulta taajuuskaistalta.

4.6 Muuntajan ja pienjännitekeskuksen kenttien mittaaminen

Muuntajan tai pienjännitekeskuksen aiheuttamat kentät voidaan mitata kuten esimerkiksi laitteen kentät käyttöympäristössä edestä, sivuilta, takaa ja kulmista, mikäli se on mahdollista.

Käytännössä seinät estävät usein kaikkien suuntien mittaamisen. Muuntajan kentän mittaaminen tehdään muuntajan suoja-aidan takaa, kuitenkin selvästi irti aidasta. Suoja-aita vaikuttaa muuntamon sähköasennuksista aiheutuvaan magneettikenttään. Mitattu kenttä on tästä huolimatta kyseisessä kohdassa vaikuttava magneettikenttä.

Pienjännitekeskuksen kentän mittaaminen tehdään käyttö- tai työskentelyetäisyydeltä. Magneettikentän mittaamisen jälkeen tai mittauksen aikana mitataan muuntajan tai keskuksen virta. Sähkökentät ovat yleensä niin pieniä, ettei niitä ole mielekää mitata.

5 KIINTEISTÖMUUNTAMOITA KOSKEVA PUHELINKYSELY

Tutkittavan aineiston kartoittamiseksi tehtiin puhelinkysely sähköyhtiöiden kiinteistömuuntamoihin liittyvistä kenttähäiriöistä.

5.1 Kyselyn toteutus

Kyselyn tarkoituksena oli saada selville, miten paljon sähköyhtiöt ovat tehneet muutostöitä kiinteistömuuntamoissa magneettikenttien vähentämiseksi. Tämän lisäksi haluttiin erityisesti selvittää käytettyjä kenttien vähennyskeinoja, niiden tehokkuutta ja kustannuksia. Kysely suoritettiin pääasiassa puhelimitse, ja ensimmäinen yhteydenotto suoritettiin aina puhelimitse. Myöhemmässä kanssakäymisessä käytettiin muitakin yhteydenpitokeinoja, kuten esimerkiksi sähköpostia ja telefaxia.

Kyselyssä kartoitettiin aakkosjärjestyksessä sähköyhtiöitä ympäri Suomea. Kyselyssä keskityttiin asutuskeskuksissa toimiviin sähköyhtiöihin.

Ennen ensimmäistä yhteydenottoa yritettiin ottaa selville muuntamoista vastaava henkilö esimerkiksi puhelinluettelosta tai yhtiön internet -sivuilta. Jos tämä ei tuottanut tulosta, yleensä soitettiin yrityksen puhelinkeskukseen ja kysyttiin muuntamoista vastaavaa henkilöä puhelimeen.

Keskustelun aluksi muuntamovastaavalle kerrottiin meneillä olevasta projektista ”Teknologian kehittäminen pientaajuisten magneettikenttien vähentämiseksi sähkön siirrossa ja jakelussa” ja annettiin yleistietoa siitä, mitä oli jo saatu aikaan ja mitä projektin edetessä tullaan vielä tekemään. Tämän jälkeen kysyttiin, onko yhtiössä tehty kiinteistömuuntamoissa muutostöitä magneettikenttien vähentämiseksi. Jos yhtiössä oli suoritettu muuntamoissa magneettikenttien vähentämistöitä, kysyttiin olisiko yhtiöllä tarjota tietoja tuloksista, menetelmistä ja kustannuksista. Keskustelun edetessä selvitettiin vastaajan kokemuksia magneettikenttähäiriöistä, niiden poistosta, ja myöskin kokemuksia tarjolla olevan tiedon määrästä. Keskustelun päätteeksi sovittiin tulevasta yhteydenpidosta sekä siitä, miten yhtiöt toimittavat tietoja mahdollisista muutostöistä.

5.2 Kyselyn tulokset

Yhteensä 31 sähköyhtiöön otettiin yhteyttä kyselyn muodossa. Aikaisemmin tietoja oli jo 3 yhtiöltä. Näistä yhtiöistä aikaisemmin saadut tiedot ovat mukana tuloksissa. Kolmesta yhtiöstä ei saatu kiinni henkilöä, joka olisi osannut vastata kysymyksiin tai yhtiöistä ei soittopyyntöihin sekä

sähköpostiin vastattu.

Kyselyn perusteella harvoilla yhtiöillä oli ollut ongelmia muuntamojen magneettikentistä. Muutamat yhtiöt olivat varautuneet ongelmiin jo etukäteen tekemällä uusista muuntamoista puistomuuntamoita. Muutamilla yhtiöillä oli pari häiriötapausta. Yhteensä kiinteistömuuntamoita, joissa on jo tehty muutostöitä häiriöiden tähden oli noin 30. Tämän kyselyn perusteella yleisemmin kiinteistömuuntamoihin on liittynyt meluhäiriöitä. Neljän yhtiön joissakin muuntamoissa esiintyi jonkinlaisia häiriöitä. Suunnitteilla on kolme muuntamon muutostyötä, joihin TTKK:n tutkimusryhmä voi tutustua etukäteen.

Kysely ei tietenkään sisällä kaikkia mahdollisia kiinteistömuuntamo-ongelmia, sillä kaikki yhtiöt eivät anna mielellään tietoja ulkopuolisille. Vastaanotto oli kuitenkin yleisesti positiivista ja yhtiöt ovat kiinnostuneita tutkimusten tuloksista. Seuraavassa taulukossa 5.1 on esitetty yhteenveto kyselyn tuloksista.

Taulukko 5.1. Yhteenveto kyselyn tuloksista. /11/

Sähköyhtiöt	Ei muutostöitä	Muutostöitä	Piirustukset	Mitattu	Tulokset	Kustannukset
Elnova (Nummela)	x					
Espoon Sähkö Oyj	x					
Etelä-Suomen Energia Oy	x					
Forssan Energia Oy	x					
Heinola Energia Oy	x					
Helsingin energia Oy		x	x	x	x	x
Hämeenlinnan Energia Oy	x					
Haminan Energia Oy	x					
Haukiputaan Sähköosuuskunta	x					
Imatran Seudun Sähkö Oy	x					
Isommus-energia Oy	x					
Pietarsaaren Energialaitos (Jakobstad Energiverk)	x					
Jyväskylän energia		x			x	x
Kaakon Energia Oy	x					
Kainuun Sähkö Oyj	x					
Keravan Energia Oy	x					
Keski-Suomen Valo	x					

Oy						
Keuruun Sähkö Oy	x					
Kuopion Energia Oy		x	x	x	x	
Kokemäen Sähkö Oy	x					
Lahti Energia Oy		x	x	x	x	x
Länsivoima Oyj, Alavus		x				
Länsivoima Oyj, Paimio	x					
Pori Energia Oy		x				
Porvoon Energia Oy	x					
Tampereen Sähkölaitos		x	x			
Turku Energia Oy - Åbo Energi Ab		x	x		x	x
Tuusulanjärven Energia Oy		x				
Oulun Energia Oy		x				
Vaasan Sähkö Oy	x					
Valkeakosken Energia Oy		x				

5.3 Johtopäätökset kyselystä

Yleisesti ottaen voidaan kyselyn perusteella päätellä, että ainakaan vielä kiinteistömuuntamoiden magneettikentät eivät ole olleet suuri ongelma suomalaisille sähköyhtiöille. Magneettikenttiä yleisempi häiriölähde on monessa yhtiössä ollut muuntamoista aiheutuneet meluhäiriöt. Keskusteluissa kävi kuitenkin selvästi ilmi, että sähköyhtiöt ovat tietoisia ihmisten huolesta magneettikenttien suhteen ja monet kyselyyn vastanneista ovatkin kertoneet yhtiönsä rakentavan uudet muuntamot ulkotiloihin välttääkseen jo etukäteen kiinteistömuuntamoista mahdollisesti aiheutuvat terveysvaikutukset, ja etenkin erilaisissa laitteissa aiheutuneet häiriöt.

Kyselyssä yleisimmin esille tulleita vähentämistapoja olivat: pienjännitesillan siirtäminen kauemmaksi häiriintyvistä kohteesta, kiskojen muuttaminen kaapeleiksi, muuntajan vaihtaminen kahteen pienempään, rakennuksen harhavirtojen vähentäminen, suojaus metallikourun, -kotelon tai -levyn avulla sekä eri keinojen yhdistäminen.

Eri keinojen yhdistäminen on näistä suosituin. Parhaan mahdollisen tuloksen aikaansaamiseksi erilaisia tapoja yhdistellään suuremman yhteisvaikutuksen saavuttamiseksi.

Jo suhteellisen pienellä panostuksella on päästy hyviin lopputuloksiin, kun toteutettu vähennysmenetelmä on mietitty tarkkaan etukäteen, sekä toteutettu hyvin. Väärin tai huonosti toteutetut ratkaisut voivat johtaa jopa toimenpiteitä edeltävää tilannetta huonompaan tulokseen. Yleispätevää oikeata tapaa kenttien vähentämiseen ei ole, vaan kuhunkin muuntamoon on erikseen tutkittava ja mietittävä paras ratkaisu.

Suurin osa kyselyyn vastanneista, jotka olivat tehneet muutostöitä, olivat pystyneet vähentämään

magneettikenttien voimakkuudet puoleen alkuperäisestä tilanteesta. Tässäkin täytyy ottaa huomioon se, että suurin osa mittauksista oli sähköyhtiöiden itsensä tekemiä ja mittauskäytännöt eivät olleet täysin yhteneväisiä. Myöskään mittareista ja niiden ominaisuuksista (esimerkiksi tarkkuudesta) ei monestikaan saatu tietoja.

Erialaisten menetelmien kustannukset olivat odotettua vaikeampaa arvioida. Materiaalikustannukset on yleensä ottaen helppo laskea, mutta suunnittelu- ja työkuustannukset on vaikea erottaa muista työtehtävistä. Myös keskeytyksestä aiheutuneita kustannuksia on vaikea arvioida. Usein magneettikenttiä vähentäviä muutostöitä tehdään samanaikaisesti muuntamoon tehtävien muiden muutostöiden kanssa. Tällöin magneettikenttien vähentämisestä aiheutuneet kustannukset on entistä vaikeampi arvioida.

6 KIINTEISTÖMUUNTAMOESIMERKIT

Puhelinkyselyn ja hankkeessa mukana olevien yritysten avulla on saatu kerättyä 20 kiinteistömuuntamoiesimerkkiä, jotka esitellään tässä tarkemmin. Esimerkkimuuntamoita saatiin 5 sähköyhtiöltä; Helsingin Energia Oy:ltä, Kuopion Energia Oy:ltä, Lahti Energia Oy:ltä, Tampereen Sähkölaitokselta ja Turku Energia Oy:ltä - Åbo Energi Ab:ltä. Tutkittavat kiinteistömuuntamot on ryhmitelty taulukossa 6.1.

Taulukko 6.1. Kiinteistömuuntamoiden laskentaesimerkit.

Muuntamo	Teho, kVA	Ryhmittely alkuperäisen rakenteen perusteella	Huomioitavaa
T290	700	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	
L254	-	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	
T1387	2000	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	Kuivamuuntaja
H2453	800	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	
T573	800	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestystä ei symmetroituu	
H302	-	Kiskot lappeellaan kiinnitetty muualle kuin kattoon	Selät vastakkain, 3 mm Al-kotelo
H2605	-	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestys symmetroituu	
H2793	800	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	
H276	1000	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	
Tu96-011	500	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestystä ei symmetroituu	
T53	500	Kaapeli lattialla, vaihejärjestys symmetroituu	
H447	1000	Kiskot lappeellaan kiinnitetty muualle kuin kattoon	Selät vastakkain
T567	800	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	
H37	800	Kiskot pystyssä, kiinnitetty muualle kuin kattoon	
T1217	500	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestys symmetroituu	
T994	500	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestystä ei symmetroituu	

T486	500	Kaapeli lattialla, vaihejärjestys ei symmetroidu	
K60	-	Kaapeli lattialla, vaihejärjestystä ei symmetroidu	
K38	-	Kaapeli lattialla, vaihejärjestystä ei symmetroidu	
T1369	1000	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty muualle kuin kattoon	Seinässä 4 mm Al-levy

Muuntamoaineistossa on kiskot 11 muuntamossa (55%) ja kaapelit 9 muuntamossa (45%). Ryhmiteltäessä muuntamoita muuntajan ja pienjännitekeskuksen välisen kiskosillan rakenteen mukaan, merkittävin ryhmä on kiskot lappeellaan ja kiinnitetty lähelle kattoa (20%). Kaapelisilloista yli puolet oli lähellä kattoa.

Kun esimerkkimuuntamoiden rakenteita verrataan raportissa "Kiinteistömuuntamoiden magneettikentät" /8/ esitettyyn ryhmittelyyn, havaitaan rakenteiden osuuksissa eroa. Siinä suurimmat ryhmät olivat: kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa (11,5%) sekä kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestystä ei symmetroidu (23%). Syy ryhmittelyn erilaisuuteen on, että tämän raportin muuntamoissa suuressa osassa oli ollut magneettikenttähäiriöitä, jolloin aineisto painottuu muuntamoiden magneettikenttien suuruuden kannalta tiettyihin rakenteisiin.

6.1 Esimerkkimuuntamo T290

Muuntamon yläpuolisessa toimistossa muuntajan kohdalla olleessa tietokoneessa oli ollut näytössä häiriöitä. Sähköyhtiö teki häiriöiden poistamiseksi muutostöitä.

Alkuperäisessä rakenteessa muuntamossa T290 pienjännitekiskot olivat lähellä kattoa lappeellaan. Kiskot olivat alumiinia ja niiden mitat 120×10 mm. Muuntajan teho on 700 kVA ja kytkentäryhmä Dyn11. Muuntamossa on myös toinen muuntaja (800 kVA), joka ei kuitenkaan ole jatkuvasti käytössä. Suurjännitekojeisto on ilmaeristeinen ja sijaitsee samassa tilassa muuntajan ja pienjännitekeskuksen kanssa. Muuntamon alkuperäisen rakenteen piirros on esitetty kuvassa 6.1.



Kuva 6.1. Piirros muuntamon T290 rakenteesta.

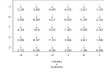
Sähköyhtiö oli tehnyt muuntamon yläpuolisessa tilassa magneettikenttämittauksen lattiasta 0,75 m korkeudelta. Vaihevirtojen keskiarvo mittausten aikana oli 506 A. Sähköyhtiön mittausten mukaan magneettikenttä oli 6,2 μ T. Magneettikenttä laskettiin samalta korkeudelta kuin se oli mitattu ja tulos oli 4,42 μ T. Lasketut arvot olivat hieman pienempiä kuin mitatut. Yksi laskennan ja mittauksen eroon vaikuttava seikka oli kuormituksen vaihtelut, jotka toimistokuormituksessa vaikuttavat työpäivän aikana. Magneettikenttään vaikuttivat myös laskennassa huomioimatta jätetyt sähköjohdot sekä johtavat rakenteet. Myös toinen muuntaja, vaikka ei ollutkaan mittauksen aikana käytössä, vaikuttaa siihen indusoituvien pyörrevirtojen kautta magneettikenttään

Magneettikenttä laskettiin myös yhden metrin korkeudelta, jotta muutoksen jälkeisen magneettikentän laskentaa voitaisiin verrata ennen muutosta suoritettuun laskentaan. Kuormitusvirtana käytettiin muutoksen jälkeisen mittauksen virtaa 505 A. Yhteenvedo magneettikentän laskentatuloksista metrin korkeudella muuntamon yläpuolisessa toimistossa on esitetty kuvassa 6.2.



Kuva 6.2. Muuntamon T290 yläpuolisessa toimistossa metrin korkeudelta lasketut magneettikentän arvot. Laskenta-alue on rajattu harmaalla.

metrin korkeudella muuntamon yläpuolisessa toimistossa on esitetty kuvassa 6.6.

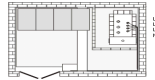


Kuva 6.6. Muuntamon L254 yläpuolisessa toimistossa metrin korkeudelta lasketut magneettikentän arvot. Laskenta-alue on rajattu harmaalla.

Laskemalla saadun magneettikentän suurin arvo oli 10,7 μT . Esiintynyt magneettikenttä saattaa ylittää kuvaputkinäyttöjen häiriönsiedon.

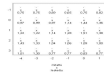
Kiskosilta vaihdettu kaapelisiltaan ja kaapelit lattialle

Sähköyhtiö teki magneettikenttien pienentämiseksi muutostöitä. Muuntamossa L254 pienjännitekiskosilta oli muutettu lattialla kulkeviksi kaapeleiksi. Muuntamon piirros on esitetty kuvassa 6.7.



Kuva 6.7. Piirros muuntamon L254 rakenteesta muutostyön jälkeen.

Muuntamon yläpuolisessa toimistossa lattialta sähköyhtiö oli mitannut muutostyön jälkeen noin 3 μT magneettikentän. Kuormitusvirta arvioitiin samaksi kuin ennen muutostyötä, eli 380 A. Yhteenvedo magneettikentän laskentatuloksista metrin korkeudella muuntamon yläpuolisessa toimistossa on esitetty kuvassa 6.8.



Kuva 6.8. Muutostyön jälkeen muuntamon L254 yläpuolisessa toimistossa metrin korkeudelta lasketut magneettikentän arvot. Laskenta-alue on rajattu harmaalla.

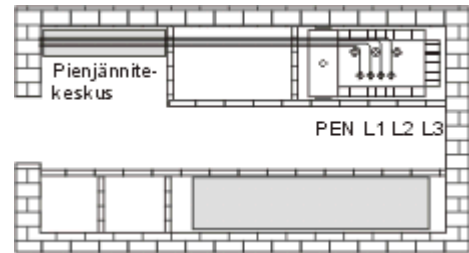
Laskemalla saadun magneettikentän suurin arvo muutostyön jälkeen oli 1,51 μT yhden metrin korkeudelta.

6.3 Esimerkkimuuntamo T1387

Muuntamon vieressä olevassa teollisuuskiinteistössä muuntamon kohdalla olleessa työpisteessä oli tietokoneen näytössä häiriöitä. Sähköyhtiö pyrki muutostöitä tekemällä poistamaan häiriöt. Magneettikenttää tutkittiin muuntamotilassa, koska viereiseen teollisuustilaan ei ollut mahdollista päästä. Sähköyhtiö, jonka asiakas teollisuusyritys on, ei halunnut häiritä teollisuusyrityksen työntekijöitä.

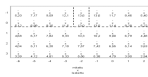
Alkuperäisessä rakenteessa muuntamossa T1387 pienjännitekiskot olivat lappeellaan ja kiinnitetty lähelle kattoa. Muuntajan teho oli 2000 kVA, kytkentäryhmä Dyn11 ja se oli ilmaeristeinen kuivamuuntaja. Suurjännitekojeisto on SF₆-eristeinen ja sijaitsee samassa tilassa muuntajan ja pienjännitekeskuksen kanssa. Muuntamon valokuva ja piirros muuntamon rakenteesta on esitetty kuvassa 6.9.

ovat $3 \times (3 \times \text{MK240}) + (2 \times \text{MK240})$. Muuntajan teho on 800 kVA ja kytkentäryhmä Dyn11. Suurjännitekojeisto on ilmaeristeinen ja sijaitsee samassa tilassa muuntajan ja pienjännitekeskuksen kanssa. Muuntamon valokuva ja piirros muuntamon rakenteesta on esitetty kuvassa 6.17.



Kuva 6.17. Valokuva muuntamon T573 pienjännitekeskuksesta ja piirros muuntamon rakenteesta.

Sähköyhtiö oli tehnyt magneettikentän mittauksia, joiden mukaan magneettikenttä oli yli $10 \mu\text{T}$ alkuperäisessä rakenteessa muuntajan kohdalla yläpuolisessa asunnossa yhden metrin korkeudella. Sähköyhtiö ei halunnut häiritä asukkaita uudella kattavammalla mittauksella. Alkuperäisen rakenteen mukaisesti laskettu yhteenveto magneettikentän laskentatuloksista on esitetty kuvassa 6.18. Vaihevirtana on laskennassa käytetty 715 A joka mitattiin muuntamoon tutustumisen yhteydessä.



Kuva 6.18. Muuntamon T573 yläpuolisessa asunnossa metrin korkeudelta lasketut magneettikentän arvot. Laskenta-alue on rajattu harmaalla, katkoviiva esittää yläpuolisessa tilassa olevia seinä.

Laskemalla suurin magneettivuon tiheys $13,6 \mu\text{T}$ saatiin yläpuolisen asunnon lattialta metrin korkeudelta muuntajan kohdalla. Laskemalla saadut magneettikentän arvot olivat sellaista tasoa, että tietokoneiden näyttö saattaa häiriintyä magneettikentästä.

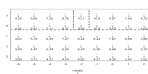
Ensimmäinen muutostyö: Muuntamon pienjännitekaapelisilta laskettiin lattialle niiltä osin, kun se pystyttiin tekemään ilman käyttökeskeytystä

Ensimmäisenä muutostyönä katossa kulkeva pienjännitekaapelisilta oli laskettu lattialle niiltä osin, kun se oli pystytty tekemään ilman käyttökeskeytystä. Muuntamon ensimmäisen muutostyön jälkeen otettu valokuva on esitetty kuvassa 6.19.



Kuva 6.19. Valokuva ensimmäisen muutostyön jälkeen muuntamon T573 pienjännitekeskuksesta.

Sähköyhtiö oli tehnyt magneettikentän mittauksia muuntamon yläpuolisessa tilassa myös ensimmäisen muutostyön jälkeen. Magneettikentän suurin arvo oli pienentynyt muutaman mikrotieslan verran. Magneettikentän laskentatulokset metrin korkeudella muuntamon yläpuolisessa tilassa on esitetty kuvassa 6.20



Kuva 6.20. Muuntamon T573 yläpuolisessa asunnossa metrin korkeudelta lasketut magneettikentän arvot. Laskenta-alue on rajattu harmaalla, katkoviiva esittää yläpuolisessa tilassa olevia seinä.

Laskemalla suurin magneettivuon tiheys $10,8 \mu\text{T}$ saatiin yläpuolisen asunnon lattialta muuntajatilaa seinän kohdalla, jossa kaapelisilta oli edelleen lähellä kattoa. Laskemalla saadut magneettikentän arvot olivat myös ensimmäisen muutostyön jälkeen hieman suurempia kuin mitatut.

Toinen muutostyö: Muuntamon pienjännitekaapelisilta laskettiin koko matkalta muuntajan ja pienjännitekeskuksen väliltä muuntamon lattialle

Muutostyötä varten muuntaja täytyi kytkeä jännitteettömäksi. Jotta kuormitukset olisivat mahdollisimman pieniä, muutostyöt tehtiin yöllä. Valokuva muuntamosta toisen muutostyön jälkeen on esitetty kuvassa 6.21.



Kuva 6.21. Valokuva toisen muutostyön jälkeen muuntamon T573 pienjännitekeskuksesta. Sähköyhtiö kävi tekemässä muuntamon yläpuolisessa asunnossa mittauksia. Vaihevirtojen keskiarvo mittausten aikana oli 700 A. Yhteenvedo magneettikentän mittaus- ja laskentatuloksista metrin korkeudella muuntamon yläpuolisessa asunnossa on esitetty kuvassa 6.22.

Kuva 6.22. Toisen muutostyön jälkeen muuntamon T573 yläpuolisessa asunnossa metrin korkeudelta lasketut ja mitatut magneettikentän arvot. Laskenta- ja mitta-alue on rajattu harmaalla, katkoviiva esittää yläpuolisessa tilassa olevia seinä.

Magneettikentän suurin laskettu arvo oli $1,60 \mu\text{T}$. Mitatun ja lasketun magneettikentän ero (keskiarvo \pm keskihajonta) oli $-0,17 \pm 0,42 \mu\text{T}$. Muutostyön jälkeen magneettivuon tiheys oli 88% pienempi kuin alkuperäisessä rakenteessa, kun virran muuttuminen otetaan huomioon.

Kolmas muutostyö: Pienjännitekeskuksen taakse asennettiin alumiinilevy

Keskuksen tilapäistä syöttöä varten korvaava sähkö tuotettiin agregaatilla. Jotta kuormitukset olisivat mahdollisimman pieniä, muutostyöt tehtiin kesällä yöllä. Muuntamon valokuva kolmannen muutostyön jälkeen on esitetty kuvassa 6.23.



Kuva 6.23. Valokuva kolmannen muutostyön jälkeen muuntamosta T573.

Asennettu magneettikenttäsuojat koostui kahdesta $85 \times 85 \text{ cm}^2$ kokoisesta 5 mm paksusta alumiinilevystä. Kahteen erilliseen levyyn päädyttiin, koska pienjännitekeskus olisi ollut vaikea irroittaa yön aikana seinästä, ja alumiinilevyn asennuksen jälkeen kiinnittää takaisin seinään. Lisäksi alumiinilevy ei saanut joutua johtavaan yhteyteen pienjännitekeskuksen tukirakenteiden kanssa, koska silloin levyn maadoitus olisi tapahtunut useammasta kuin yhdestä pisteestä. Jos levy maadoitetaan useammasta kuin yhdestä pisteestä, siihen muodostuvat pyörrevirrat eivät vähennä magneettikenttää, vaan voivat maadoitusjärjestelmään kulkeutuessaan jopa lisätä magneettikenttää.

Sähköyhtiö kävi tekemässä muuntamon yläpuolisessa asunnossa mittauksia. Vaihevirtojen keskiarvo mittausten aikana oli 680 A. Yhteenvedo magneettikentän mittaus- ja laskentatuloksista metrin korkeudella muuntamon yläpuolisessa asunnossa on esitetty kuvassa 6.24.

Kuva 6.24. Kolmannen muutostyön jälkeen muuntamon T573 yläpuolisessa asunnossa metrin

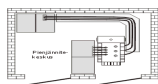
6.24. korkeudelta lasketut ja mitatut magneettikentän arvot. Laskenta- ja mitta-alue on rajattu harmaalla, katkoviiva esittää yläpuolisessa tilassa olevia seinä.

Magneettikentän suurin laskettu arvo oli $1,60 \mu\text{T}$. Mitatun ja lasketun magneettikentän ero (keskiarvo \pm keskihajonta) oli $-0,20 \pm 0,54 \mu\text{T}$. Magneettikentän suurin arvo ei tämän muutostyön seurauksena muuttunut merkittävästi. Muutostyöllä oli kuitenkin suuri merkitys, sillä alumiinilevyn asentamisen jälkeen pienjännitekojeiston kohdalla magneettikenttä pieneni jopa 50%. Kolmannen muutostyön vaikutusta tietokoneen näytössä esiintyneisiin häiriöihin ei päästy enää vertaamaan, sillä tietokone oli siirretty muihin tiloihin.

6.6 Esimerkkimuuntamo H302

Sähköyhtiö oli kokeillut muuntamon asennuksen parantamista rakenteessa, jossa muuntaja ja pienjännitekeskus olivat selät vastakkain, asentamalla kiskosiltaan 3 mm alumiinikotelo. Magneettikenttä oli muuntamon rakenteen takia melko pieni jo ennen muutostyötä.

Alkuperäisessä rakenteessa muuntamossa H302 muuntaja ja pienjännitekeskus olivat selät vastakkain. Pienjännitekiskot menivät muuntajalta suoraan pienjännitekeskukseen lappeellaan. Suurjännitekojeisto on samassa tilassa muuntajan ja pienjännitekeskuksen kanssa. Muuntamon alkuperäisen rakenteen piirros on esitetty kuvassa 6.25.



Kuva 6.25. Piirros muuntamon H302 rakenteesta.

Sähköyhtiö oli tehnyt muuntamon yläpuolisessa tilassa magneettikenttämittauksen. Vaihevirtojen keskiarvo mittausten aikana oli 850 A. Sähköyhtiön mittausten mukaan magneettikentän suurin arvo oli $2,3 \mu\text{T}$. Yhteenveto magneettikentän laskentatuloksista metrin korkeudella muuntamon yläpuolisessa tilassa on esitetty kuvassa 6.26.



Kuva 6.26. Muuntamon H302 yläpuolisessa tilassa metrin korkeudelta lasketut magneettikentän arvot. Laskenta-alue on rajattu harmaalla.

Laskemalla saadun magneettikentän suurin arvo oli $2,54 \mu\text{T}$. Magneettikentän verraten suuri arvo johtui suuresta kuormitusvirrasta, 850A.

Kiskosiltaan asennettu alumiinikotelo

Muuntamossa H302 oli muutostyönä kiskosiltaan asennettu 3 mm paksusta alumiinista tehty suojakotelo. Muuntamon valokuva muutostyön jälkeen on esitetty kuvassa 6.27.



Kuva 6.27. Valokuva muuntamon H302 pienjännitekeskuksen päälle ulottuvasta suojakotelosta muutostyön jälkeen.

Sähköyhtiön mittausten mukaan magneettikentän suurin arvo muutostyön jälkeen oli $1,7 \mu\text{T}$. Laskennassa kuormitusvirtana käytettiin 850 A. Yhteenveto magneettikentän laskentatuloksista metrin korkeudella muuntamon yläpuolisessa tilassa on esitetty kuvassa 6.28.

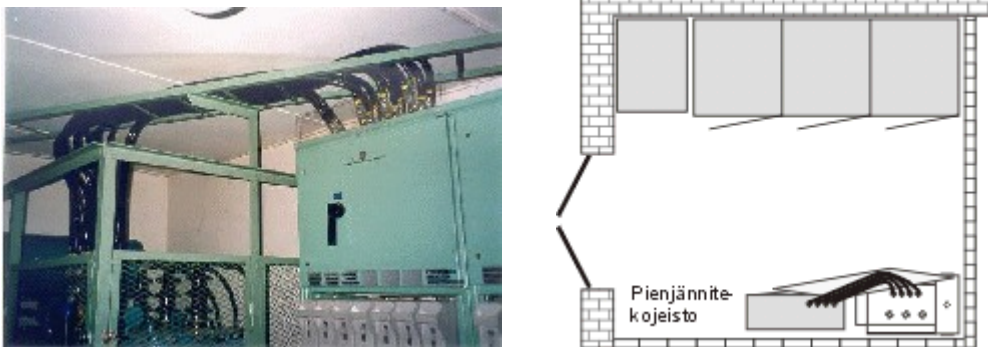


Kuva 6.28. Muutostyön jälkeen muuntamon H302 yläpuolisessa tilassa metrin korkeudelta lasketut magneettikentän arvot. Laskenta-alue on rajattu harmaalla.

Suojakotelon vaikutus magneettikenttään laskettiin numeerisesti MagNet-ohjelmalla. Laskemalla saadun magneettikentän suurin arvo oli $0,27 \mu\text{T}$. Mitatun ja lasketun magneettikentän ero oli merkittävä. Laskemalla saadut magneettikentän arvot olivat huomattavasti pienempiä kuin mitatut. Tähän vaikutti ainakin muuntajan keskijännitesyöttökaapelit. Kuvan 6.27 valokuvan perusteella voidaan todeta keskijännitesyöttökaapelien olevan aivan muuntamon katossa. Koska keskijännitesyöttöjä ei huomioitu laskennassa, saattoi se vaikuttaa myös tuloksien eroihin. Lisäksi valokuvasta nähdään, että muuntamossa on muitakin sähköjohtoja, jotka saattavat vaikuttaa muuntamon magneettikenttään. Myös suojakotelon vaikutus magneettikenttään saattaa jäädä laskettua pienemmäksi.

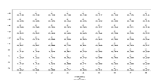
6.7 Esimerkkimuuntamo H2605

Alkuperäisessä rakenteessa muuntamossa H2605 pienjännitekaapelit olivat lähellä kattoa. Kaapelien vaihejärjestys oli symmetroidu asentamalla yksivaihekaapelit kolmivaihenipuiksi. Suurjännitekojeisto on ilmaeristeinen ja sijaitsee samassa tilassa muuntajan ja pienjännitekeskuksen kanssa. Muuntamon valokuva ja piirros muuntamon rakenteesta on esitetty kuvassa 6.29.



Kuva 6.29. Valokuva muuntamon H2605 pienjännitekaapelisillasta ja piirros muuntamon rakenteesta.

Sähköyhtiön tekemien mittausten mukaan magneettikenttä oli $8 - 10 \mu\text{T}$ alkuperäisessä rakenteessa muuntajan ja pienjännitekeskuksen kohdalla yläpuolisen asunnon lattialla. Yhden metrin korkeudella kenttä oli $0,4 - 1,5 \mu\text{T}$. Alkuperäisen rakenteen mukaisesti laskettu yhteenveto magneettikentän laskentatuloksista on esitetty kuvassa 6.30. Kuormitusvirtana laskennassa on käytetty 300 A.



Kuva 6.30. Muuntamon H2605 yläpuolisessa asunnossa metrin korkeudelta lasketut magneettikentän arvot. Laskenta-alue on rajattu harmaalla.

Laskemalla suurin magneettivuon tiheys $3,89 \mu\text{T}$ saatiin metrin korkeudelta kaapelisillan kohdalta. Laskemalla saadut magneettikentän arvot olivat suurempia kuin mittaamalla saadut. Mittauksissa ei kuitenkaan ollut selvitetty kuormitusvirtaa. Magneettikenttä oli verraten pienellä kuormitusvirralla sellaista tasoa, että tietokoneiden näyttö saattaa häiriintyä magneettikentästä.

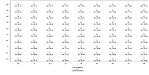
Muuntamon pienjännitekaapelisilta laskettiin noin metri alkuperäistä alemmaksi

Muutostyönä katossa kulkeva pienjännitekaapelisilta oli laskettu noin metriä alkuperäistä alemmaksi. Muuntamon ensimmäisen muutostyön jälkeen otettu valokuva on esitetty kuvassa 6.31.



Kuva 6.31. Valokuva muutostyön jälkeen muuntamon H2605 pienjännitekaapelisillasta. Sähköyhtiö oli tehnyt myös muutostyön jälkeen magneettikenttämittauksen muuntamon yläpuolisessa tilassa. Magneettikenttä asunnon lattialta oli $1,0 - 2,8 \mu\text{T}$. Magneettikentän laskentatulokset metrin korkeudella muuntamon yläpuolisessa tilassa on esitetty kuvassa 6.32.

Kuormitusvirtana laskennassa on käytetty 300 A.



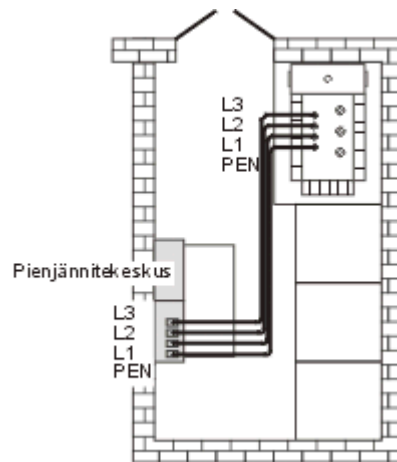
Kuva 6.32. Muuntamon H2605 yläpuolisessa asunnossa metrin korkeudelta lasketut magneettikentän arvot. Laskenta-alue on rajattu harmaalla.

Laskemalla suurin magneettivuon tiheys $0,90 \mu\text{T}$ saatiin metrin korkeudelta kaapelisillan kohdalta. Laskemalla saadut magneettikentän arvot olivat myös muutostyön jälkeen hieman suurempia kuin mitatut.

6.8 Esimerkkimuuntamo H2793

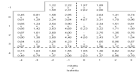
Muuntamon yläpuolisessa asunnossa muuntajan kohdalla olleessa kotitietokoneessa oli ollut näytössä häiriöitä. Sähköyhtiö pyrki muutostöitä tekemällä poistamaan häiriöt. Sekä taloyhtiö että sähköyhtiö osallistuivat muutostöiden kustannuksiin.

Alkuperäisessä rakenteessa muuntamossa H2793 pienjännitekiskot olivat lähellä kattoa pystyssä. Kiskot olivat alumiinia ja niiden mitat $80 \times 10 \text{ mm}$. Muuntajan teho on 800 kVA ja kytkentäryhmä Dyn11. Suurjännitekojeisto on ilmaeristeinen ja sijaitsee samassa tilassa muuntajan ja pienjännitekeskuksen kanssa. Muuntamon alkuperäisen rakenteen valokuva ja piirros on esitetty kuvassa 6.33.



Kuva 6.33. Valokuva muuntamon H2793 pienjännitekiskosillasta ja piirros muuntamon rakenteesta.

Vaihevirtojen keskiarvo mittausten aikana oli 382 A. Yhteenveto magneettikentän mittaus- ja laskentatuloksista metrin korkeudella muuntamon yläpuolisessa asunnossa on esitetty kuvassa 6.34.



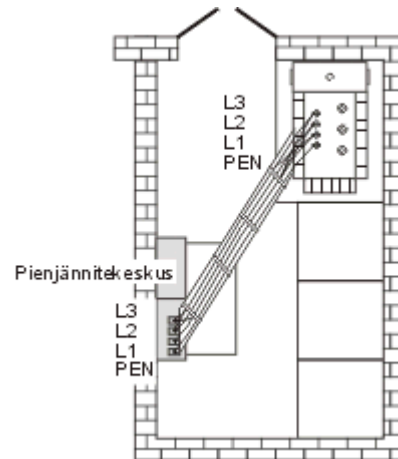
Kuva 6.34. Muuntamon H2793 yläpuolisessa tilassa metrin korkeudelta lasketut ja mitatut magneettikentän arvot. Laskenta- ja mittausalue on rajattu harmaalla, katkoviiva esittää yläpuolisessa tilassa olevia seiniä.

Suurin magneettivuon tiheys mitattiin yläpuolisen tilan lattialta. Kuvien perusteella voidaan havaita, että magneettikentän suuruus seuraa kiskostoa ja pienenee siirryttäessä kiskoston sijainnin kohdalta pois päin mihin tahansa suuntaan.

Laskemalla saadun magneettikentän suurin arvo oli $5,23 \mu\text{T}$. Mitatun ja lasketun magneettikentän ero (keskiarvo \pm keskihajonta) oli $-0,18 \pm 0,40 \mu\text{T}$. Lasketut arvot olivat hieman suurempia kuin mitatut. Muuntamo syötti kerrostaloa ja sen kuormitus vaihteli koko mittauksen ajan. Osaksi erot mitattujen ja laskettujen magneettikentän arvojen välillä johtuvat kiskoston kuormitusvirran vaihteluista. Magneettikenttään vaikuttivat myös laskennassa huomioimatta jätetyt sähköjohdot sekä johtavat rakenteet.

Ensimmäinen muutostyö: Kiskosilta vaihdettu kaapelisilta ja vaihejärjestys optimoitu, etäisyys häiriintyvään kohteeseen kasvatettu, alumiinikouru asennettu

Muuntamossa H2793 tehtiin magneettikentistä johtuen muutostöitä. Muuntamon rakennetta muutettiin niin, että aikaisemmin muuntamossa ollut kiskosilta vaihdettiin kaapelisillaksi. Pienjännitekaapelit viedään pienjännitekeskukselle lähellä kattoa, mutta kuitenkin aikaisempaa kiskosiltaa alempana. Kaapelisilta on $3 \times (2 \times \text{MK120}) + \text{MK120}$. Vaihejärjestys on tehty rakenteellisesti symmetriseksi ja kaapelisillan alapuolelle on asennettu alumiininen suojakouru. Muuntajaa ei vaihdettu. Ensimmäisen muutostyön jälkeen otettu valokuva ja piirros muuntamosta on esitetty kuvassa 6.35.



Kuva 6.35. Valokuva muuntamon H2793 pienjännitekiskosillasta ja piirros muuntamon rakenteesta ensimmäisen muutostyön jälkeen.

Vaihevirtojen keskiarvo mittausten aikana oli 246 A. Magneettikenttä mitattiin muuntamon muutostöiden jälkeen samoista paikoista kuin ennen muutostöitä. Yhteenveto magneettikentän mittaus- ja laskentatuloksista metrin korkeudella muuntamon yläpuolisessa asunnossa on esitetty kuvassa 6.36.

A photograph of a computer monitor displaying a grid of numerical data. The data is organized into columns and rows, representing magnetic field measurements and calculations at a 1-meter height. The screen shows various values, some highlighted in grey, indicating specific measurement points or results.

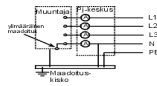
Kuva 6.36. Ensimmäisen muutostyön jälkeen muuntamon H2793 yläpuolisessa asunnossa metrin korkeudelta lasketut ja mitatut magneettikentän arvot. Laskenta- ja mittausalue on rajattu harmaalla, katkoviiva esittää yläpuolisessa tilassa olevia seinä.

Muutostöiden jälkeen magneettikentän suurin arvo oli 92,5% pienempi kuin alkuperäisellä rakenteella. Kuormitusvirta oli muutostöiden jälkeen tehdyssä mittauksessa 35,8% pienempi kuin alkuperäisen rakenteen mittauksissa. Rakenteen muutoksesta aiheutuva magneettikentän pienentyminen oli siis noin 90,8%. /8/

Alumiinikourun suojausvaikutus huomioitiin laskennassa niissä kaapelisillan osissa, jotka ovat kourussa. Laskemalla saadun magneettikentän suurin arvo oli $0,31 \mu\text{T}$. Mitatun ja lasketun magneettikentän ero (keskiarvo \pm keskiahajonta) oli $-0,05 \pm 0,07 \mu\text{T}$. Laskettu magneettikenttä oli koko tarkastelualueella suurempi kuin mitattu. Hyvästä vaimennuksesta huolimatta magneettikenttä saattaa vielä häiritä yläpuolisessa tilassa esimerkiksi tietokoneen näyttöä.

Toinen muutostyö: Harhavirtojen poistaminen

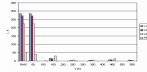
Muuntajan maadoitus oli tehty sekä maadoituskiskoon, että muuntajan nollaliittimeen. Piirros kytkennästä on esitetty kuvassa 6.37.



Kuva 6.37. Piiros muuntamon H2793 maadoituskykennästä.

Kuvassa näkyvän ylimääräisen maadoituksen seuraksena kiinteistössä oli harhavirtareitti. Harhavirtareitti katkaistiin, jonka seurauksena myös magneettikentän kolmella jaollisella yliaalloilla vähenevät. Kuvasta voidaan todeta myös virtamittausten paikat.

Kuvissa 6.38 ja 6.39 on esitetty virran yliaallot ennen ylimääräisen maadoituksen poistamista ja sen jälkeen.

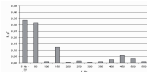


Kuva 6.38. Muuntamon H2793 pienjännitekeskuksesta mitattu virta ennen ylimääräisen maadoituksen poistamista.

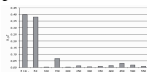


Kuva 6.39. Muuntamon H2793 pienjännitekeskuksesta mitattu virta ylimääräisen maadoituksen poistamisen jälkeen.

Kuvista voi havaita, että vaikka virta kasvoi, virran yliaalloissa ei tapahtunut juurikaan muutosta. Muutos vaikuttaa ainoastaan PEN-johtimen virtaan, mutta siinäkin muutos on niin pieni, että sitä ei voi kuvasta havaita. Myös magneettikenttä mitattiin ennen ylimääräisen maadoituksen poistamista ja sen jälkeen. Magneettikentän yliaallot on esitetty kuvissa 6.40 ja 6.41.



Kuva 6.40. Muuntamon H2793 yläpuolisesta asunnosta pisteestä (0,-1) metrin korkeudelta mitatun magneettikentän yliaallot ennen ylimääräisen maadoituksen poistamista.

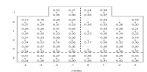


Kuva 6.41. Muuntamon H2793 yläpuolisesta asunnosta pisteestä (0,-1) metrin korkeudelta mitatun magneettikentän yliaallot ylimääräisen maadoituksen poistamisen jälkeen.

Kuvista voidaan havaita, että magneettikentän kolmella jaollisella yliaalloilla ovat pienentyneet huomattavasti ylimääräisen maadoituksen poistamisen jälkeen. Kolmas yliaalto on pienentynyt 52% ja yhdeksäs yliaalto on pienentynyt 54%. Kun otetaan huomioon, että kuormat ovat kasvaneet magneettikentän mittausten välisenä aikana noin 10%, parannuksen vaikutuksen voidaan arvioida olevan noin 60% kolmella jaollisilla parittomilla yliaalloilla.

Kolmas muutostyö: Alumiinikouru täydennetty koteloksi

Muuntamon magneettikenttää haluttiin edelleen pienentää, joten alumiinikouru täydennettiin seuraavaksi koteloksi laittamalla kourun päälle kansi. Vaihevirtojen keskiarvo mittausten aikana oli 294 A. Magneettikenttä mitattiin samoista paikoista. Yhteenveto magneettikentän mittausta- ja laskentatuloksista metrin korkeudella muuntamon yläpuolisessa asunnossa on esitetty kuvassa 6.42.



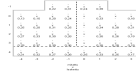
Kuva 6.42. Kolmannen muutostyön jälkeen muuntamon H2793 yläpuolisessa asunnossa metrin korkeudelta lasketut ja mitatut magneettikentän arvot. Laskenta- ja mitta-alue on rajattu harmaalla, katkoviiva esittää yläpuolisessa tilassa olevia seinä.

Muutostöiden jälkeen magneettikentän suurin laskettu arvo 0,42 µT, oli 93% pienempi kuin alkuperäisellä rakenteella ja 31% pienempi kuin edellisen muutoksen jälkeen. Kuormitusvirta oli muutostöiden jälkeen tehdyssä mittauksessa 23% pienempi kuin alkuperäisen rakenteen

mittauksissa ja 20% suurempi kuin edellisen muutoksen jälkeen. Koska kuormitustilanne vaihtelee koko ajan, magneettikenttä kasvoi joissakin pisteissä, esimerkiksi pisteessä (2,4). Rakenteen muutoksesta aiheutuva magneettikentän pienentyminen oli noin 90% alkuperäiseen rakenteeseen verrattuna. Mitatun ja lasketun magneettikentän ero (keskiarvo \pm keskihajonta) oli $-0,01 \pm 0,11 \mu\text{T}$.

Neljäs muutostyö: Keskijännitekojeiston suojaus alumiinilevyllä

Myös avorakenteisen keskijännitekojeiston vaikutusta magneettikenttään haluttiin pienentää, joten keskijännitekeskuksen päälle asennettiin alumiinilevy. Magneettikenttää ei tämän muutostyön jälkeen mitattu yhtä perusteellisesti kuin aikaisemmin, koska ei haluttu häiritä yläpuolisen tilan asukkaita. Sähköyhtiö mittasi magneettikentän kuitenkin muuntamon sisällä keskuksen yläpuolelta, jotta suojan vaikutus saataisiin selville. Mittauksen perusteella magneettikenttä vaimeni keskijännitekojeiston osalta noin 50%. Kuvassa 6.43 on esitetty laskentatulokset, kun keskijännitekojeiston vaimennus on otettu huomioon.



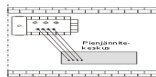
Kuva 6.43. Keskijännitekojeiston muutostöiden jälkeen magneettikenttä muuntamon H2793 yläpuolisessa asunnossa metrin korkeudelta lasketut magneettikentän arvot. Laskenta-alue on rajattu harmaalla, katkoviiva esittää yläpuolisessa tilassa olevia seiniä.

Muutostyön vaikutus jäi pieneksi, koska magneettikentän suurin arvo oli kaukana keskijännitekojeistosta. Muutostyö on kuitenkin merkittävä keskijännitekojeiston kohdalla muuntamon yläpuolisessa asunnossa olevalle magneettikentälle.

6.9 Esimerkkimuuntamo H276

Muuntamo oli muutostöiden yhteydessä muutettu kaksoismuuntamoksi (2 \times 1000 kVA). Muuntamon yläpuolisessa toimistotilassa tietokoneiden näytöissä oli muutostyön jälkeen selviä häiriöitä, jotka johtuivat magneettikentästä.

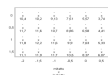
Muuntamossa H276 pienjännitekeskukset olivat lähellä kattoa lappeellaan. Molempien muuntajien teho on 1000 kVA ja kytkentäryhmä Dyn11. Toinen muuntaja otettiin muuntamossa tehtyjen mittausten ajaksi pois käytöstä. Suurjännitekojeisto on samassa tilassa muuntajien ja pienjännitekeskuksen kanssa. Muuntamon ennen suojauksen toteutusta olleen rakenteen piirros on esitetty kuvassa 6.44.



Kuva 6.44. Piirros muuntamon H276 rakenteesta.

Sähköyhtiö oli tehnyt muuntamon yläpuolisessa tilassa magneettikenttämittauksen. Vaihevirtojen keskiarvo mittausten aikana oli 1200 A. Sähköyhtiön mittausten mukaan suurin arvo oli $12,0 \mu\text{T}$.

Magneettikenttä laskettiin yhden metrin korkeudelta. Yhteenveto magneettikentän laskentatuloksista metrin korkeudella muuntamon yläpuolisessa toimistossa on esitetty kuvassa 6.45.



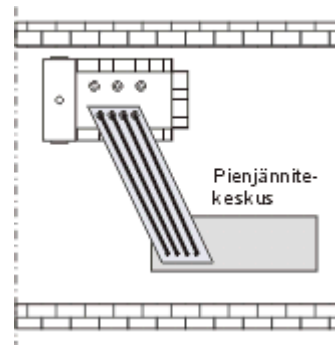
Kuva 6.45. Muuntamon H276 yläpuolisessa toimistossa metrin korkeudelta lasketut magneettikentän arvot. Laskenta-alue on rajattu harmaalla.

Laskemalla saadun magneettikentän suurin arvo on $12,2 \mu\text{T}$. Mitatun ja lasketun magneettikentän suurimman arvon ero on $-1,7\%$ eli mitattu arvo on pienempi kuin laskettu. Ero on kuitenkin varsin pieni.

Kiskosilta koteloitu

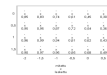
Muuntamossa H276 tehtiin häiriöiden poistamiseksi muutostöitä. Häiriöitä pyrittiin poistamaan

koteloimalla pienjännitekiskosilta 1,5 mm teräslevystä, 5 mm seosalumiinista ja 5 mm johdealumiinista tehdyillä koteloilla, sekä johdealumiinista tehdyllä kourulla /12/. Kokeilujen perusteella muuntamossa päädyttiin johdealumiinista valmistettuun suojakotelointiin. Muuntamon valokuva ja piirros on esitetty kuvassa 6.46.



Kuva 6.46. Valokuva muuntamosta H276 ja piirros muuntamon rakenteesta muutostyön jälkeen.

Kuormitusvirta oli 1200 A. Sähköyhtiön mittausten mukaan suurin magneettikenttä oli 2,1 μ T. Yhteenveto magneettikentän laskentatuloksista metrin korkeudella muuntamon yläpuolisessa asunnossa on esitetty kuvassa 6.47.



Kuva 6.47. Muutostyön jälkeen muuntamon H276 yläpuolisessa toimistossa metrin korkeudelta lasketut magneettikentän arvot. Laskenta-alue on rajattu harmaalla.

Laskemalla saadun magneettikentän suurin arvo oli 0,99 μ T. Mitatun ja lasketun magneettikentän suurimman arvon ero oli yli 50%. Laskemalla saadut magneettikentän arvot olivat huomattavasti pienempiä kuin mitatut. Koska magneettikenttä on laskennan perusteella varsin pieni, muuntamon pienjännitekiskosillan lisäksi rakennuksen muut magneettikenttälähteet vaikuttavat merkittävästi magneettikenttään. Tulosten eroon vaikuttaa ainakin muuntamon pienjännitekeskukselta lähtevät rakennuksen pienjännisyötöt ja muut pienjännitesyötöt, sekä muuntajan keskijännitesyöttö. Myös rakennuksen johtavat rakenteet vaikuttivat magneettikenttätuloksiin.

6.10 Esimerkkimuuntamo Tu96-011

Muuntamossa Tu96-011 pienjännitekaapelit ovat lähellä kattoa. Muuntajan teho on 500 kVA ja kytkentäryhmä Dyn11. Suurjännitekojeisto sijaitsee samassa tilassa muuntajan ja pienjännitekeskuksen kanssa. Muuntamon vieressä olevassa toimistotilassa tietokoneiden näytöissä oli häiriöitä, jotka johtuivat magneettikentästä. Toimistossa ei kuitenkaan oltu tehty magneettikenttämittausta. Piirros muuntamon rakenteesta on esitetty kuvassa 6.48.



Kuva 6.48. Piirros muuntamon Tu96-011 rakenteesta.

Kuormitusvirtana laskennassa käytettiin 500 A. Yhteenveto magneettikentän laskentatuloksista on esitetty kuvassa 6.49.



Kuva 6.49. Muuntamon Tu96-011 viereisessä tilassa metrin korkeudelta lasketut magneettikentän arvot. Laskenta-alue on rajattu harmaalla.

Magneettikentän suurin laskettu arvo oli $5,42 \mu\text{T}$. Myös laskentatuloksien perusteella muuntamon vieressä olevassa tilassa saattaa esiintyä laitehäiriöitä.

Muuntamon ja viereisen tilan seinään alumiinilevy

Magneettikenttähäiriön poistamiseksi viereisen tilan ja muuntamon välinen seinä vuorattiin 5 mm alumiinilevyllä. Levyjä asennettiin koko muuntamon seinän leveydelle ja liitoskohdat hitsattiin. Levy maadoitettiin yhdestä kohdasta maadoituskiskoon. Alumiinilevyn vaikutus on laskettu numeerisesti MagNet-ohjelmalla. Magneettikentän laskentatulokset metrin korkeudella muuntamon viereisessä tilassa on esitetty kuvassa 6.50.

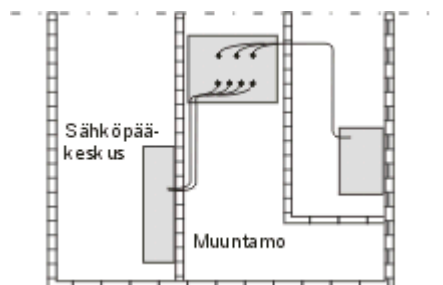


Kuva 6.50. Muuntamon Tu96-011 viereisessä tilassa metrin korkeudelta lasketut magneettikentän arvot. Laskenta-alue on rajattu harmaalla.

Laskemalla saatu suurin magneettivuon tiheys $2,61 \mu\text{T}$ metrin korkeudelta muuntamon viereisessä tilassa. Suurin arvo on aivan seinän lähellä. Magneettikenttähäiriö poistui alumiinilevyn asennuksen jälkeen, joten magneettikentän vaimennus onnistui riittävän hyvin. Laskentatulosten perusteella näyttäisi kuitenkin mahdolliselta, että suuren kuormitusvirran aikana viereisessä tilassa voisi esiintyä vieläkin magneettikenttähäiriöitä.

6.11 Esimerkkimuuntamo T53

Muuntamotilassa T53 on kaksi muuntamo. Muuntamossa T53;2 pienjännitekaapelit on viety pienjännitekeskukselle lattialla. Vaihejärjestys on tehty symmetriseksi. Molempien muuntajien tehot ovat 500 kVA ja kytkentäryhmä Dyn11. Suurjännitekojeistot ovat SF₆-eristeisiä ja sijaitsevat samassa tilassa muuntajien kanssa. Muuntajan 1 pienjännitekeskus on samassa tilassa muuntajan kanssa ja muuntajan 2 omassa sähkötilassaan. Muuntamon 2 pienjännitekaapelisillan valokuva ja piirros muuntamon 2 rakenteesta on esitetty kuvassa 6.51.



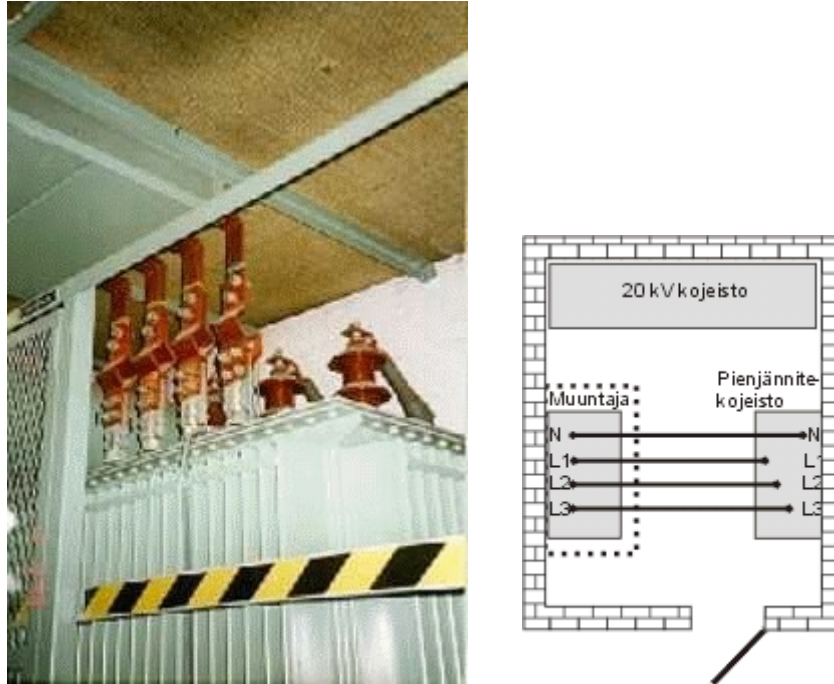
Kuva 6.51. Valokuva muuntamon T53;2 pienjännitekaapelisillasta ja piirros muuntamon rakenteesta.

Vaihevirtojen keskiarvo mittausten aikana oli 138 A. Magneettikentät on mitattu muuntamon yläpuolisessa tilassa. Yhteenvedo magneettikentän mittaus- ja laskentatuloksista on esitetty kuvassa 6.52.

välinen kiskosilta on tällä muuntamon rakenteella erittäin lyhyt, magneettikenttä rajoittuu erittäin pienelle alueelle.

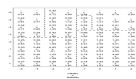
6.13 Esimerkkimuuntamo T567

Muuntamossa T567 pienjännitekiskot ovat lähellä kattoa lappeellaan. Kiskot ovat alumiiniset kaksoiskiskot ja niiden mitat ovat 60×10 mm. Muuntajan teho on 800 kVA ja kytkentäryhmä Dyn11. Suurjännitekojeisto on samassa tilassa muuntajan ja pienjännitekeskuksen kanssa. Muuntamon pienjännitekiskosillan valokuva ja piirros muuntamon rakenteesta on esitetty kuvassa 6.55.



Kuva 6.55. Valokuva muuntamon T567 pienjännitekiskosillasta ja piirros muuntamon rakenteesta.

Vaihevirtojen keskiarvo mittausten aikana oli 730 A. Yhteenveto magneettikentän mittaus- ja laskentatuloksista on esitetty kuvassa 6.56.



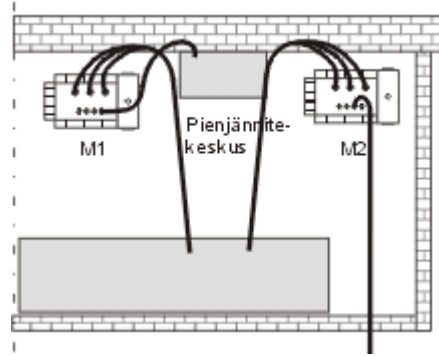
Kuva 6.56. Muuntamon T567 yläpuolisessa tilassa metrin korkeudelta lasketut ja mitatut magneettikentän arvot. Laskenta- ja mittausalue on rajattu harmaalla, katkoviiva esittää yläpuolisessa tilassa olevia seiniä.

Magneettikenttä on suurin muuntamon alajännitepuolen liittimien kohdalla. Magneettivuon tiheys pienenee muuntamon etäisyyden kasvaessa. Mittaustuloksista voidaan päätellä, että magneettikenttä aiheutuu muuntamosta.

Mittauksen ja laskennan tuloksia vertaamalla voidaan havaita, että laskentatuloksia on mitattua suurempi. Tämä johtuu siitä, että muuntamon L2-vaiheen paikan määrittämisessä on tullut mittavirhe. Paikan määrittäminen tarkasti oli vaikeaa, koska kellarikerroksessa ja ylemmissä kerroksissa oli erilainen seinän paksuus. Muuntamon suurin mitattu ja laskettu arvo olivat kuitenkin lähellä toisiaan, joten kiskoston rakenne on mitattu oikein.

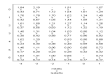
Magneettikentän suurin laskettu arvo oli $6,32 \mu\text{T}$. Lasketun ja mitatun magneettikentän suurimman arvon välinen ero oli $-14,7\%$, eli laskettu arvo oli suurempi kuin mitattu. Mitatun ja lasketun magneettikentän ero (keskiarvo \pm keskihajonta) oli $-0,82 \pm 1,23 \mu\text{T}$.

6.14 Esimerkkimuuntamo H37



Kuva 6.59. Valokuva muuntamon T1217 pienjännitekaapelisillasta ja piirros muuntamon rakenteesta.

Magneettikenttä on mitattu muuntamon yläpuolisessa tilassa, joka on tietokoneluokka. Vaihevirtojen keskiarvo mittausten aikana oli 511 A. Yhteenveto magneettikentän mittaus- ja laskentatuloksista on esitetty kuvassa 6.60.



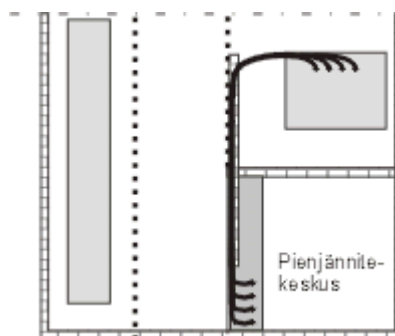
Kuva 6.60. Muuntamon T1217 yläpuolisessa tilassa metrin korkeudelta lasketut ja mitatut magneettikentän arvot. Laskenta- ja mittausalue on rajattu harmaalla.

Magneettikentän suurin laskettu arvo oli $1,61 \mu\text{T}$. Magneettikentän suurimmat arvot ovat yläpuolisen tilan lattialla metrin korkeudella kaapelisiltojen kohdalla. Suurin magneettikenttä on muuntajan 1 kohdalla, koska sen kuormitusvirta on suurempi kuin muuntajan 2 ja sen kaapelisiltaa ei ole tehty symmetriseksi.

Koska magneettikenttään vaikutti merkittävästi toisen muuntajan magneettikenttä, lasketun ja mitatun magneettikentän suurimman arvon välinen ero oli 26,5%, eli laskettu arvo oli pienempi kuin mitattu. Mitatun ja lasketun magneettikentän ero (keskiarvo \pm keskihajonta) oli $0,66 \pm 0,50 \mu\text{T}$. Mittauksen ja laskennan tulosten eroon vaikutti toisen muuntamon lisäksi myös se, että mitattu huone oli tietokoneluokka. Tietokoneet aiheuttavat huoneeseen oman taustakenttensä, jota ei laskennassa huomioitu.

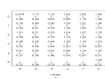
6.16 Esimerkkimuuntamo T994

Muuntamossa T994 on pienjännitekaapelit viety pienjännitekeskukselle lähellä kattoa. Vaihejärjestystä ei ole tehty symmetriseksi. Muuntajan teho on 500 kVA ja kytkentäryhmä Dyn11. Suurjännitekojeisto on ilmaeristeinen ja sijaitsee samassa tilassa muuntajan kanssa. Pienjännitekeskus on omassa sähkötilassaan. Muuntamon pienjännitekaapelisillan valokuva ja piirros muuntamon rakenteesta on esitetty kuvassa 6.61.



Kuva 6.61. Valokuva muuntamon T994 pienjännitekaapelisillasta ja piirros muuntamon rakenteesta.

Vaihevirtojen keskiarvo mittausten aikana oli 356 A. Yhteenvedo magneettikentän mittaus- ja laskentatuloksista on esitetty kuvassa 6.62.



Kuva 6.62. Muuntamon T994 yläpuolisessa tilassa metrin korkeudelta lasketut ja mitatut magneettikentän arvot. Laskenta- ja mittausalue on rajattu harmaalla.

Suurimmat arvot olivat kaapelisillan lähellä kattoa olevissa kohdissa. Laskennassa saatiin lähes vastaavat tulokset kuin mittaamalla. Magneettikentän suurin laskettu arvo oli $1,74 \mu\text{T}$. Lasketun ja mitatun magneettikentän suurimman arvon välinen ero oli 15,1%, eli laskettu arvo oli pienempi kuin mitattu. Mitatun ja lasketun magneettikentän ero (keskiarvo \pm keskihajonta) oli $0,40 \pm 0,28 \mu\text{T}$. Yksi syy eroon on ilmaeristeinen suurjännitekojeisto, jonka kautta kulki useiden muuntamoiden syöttö.

6.17 Esimerkkimuuntamo T486

Muuntamossa oli tehty muutostöitä, joista ei kuitenkaan ollut rakennepiirustuksia saatavilla. Muuntamossa T486 katon kautta aikaisemmin menneet pienjännitekiskosilta oli vaihdettu kaapeleiksi. Pienjännitekaapelit viedään pienjännitekeskukselle lattialla. Vaihejärjestystä ei ole tehty symmetriseksi. Muuntajan teho on 500 kVA ja kytkentäryhmä Dyn11. Suurjännitekojeistot on SF₆-eristeinen ja sijaitsee samassa tilassa muuntajan kanssa. Muuntamon pienjännitekaapelisillan valokuva ja piirros muuntamon rakenteesta on esitetty kuvassa 6.63.



Kuva 6.63. Valokuva muuntamon T486 pienjännitekaapelisillasta ja piirros muuntamon rakenteesta.

Kuormitusvirtana laskennassa käytettiin 500 A. Magneettikentät on laskettu muuntamon yläpuolisessa tilassa. Yhteenvedo magneettikentän laskentatuloksista on esitetty kuvassa 6.64.



Kuva 6.64. Muuntamon T486 yläpuolisessa tilassa metrin korkeudelta lasketut magneettikentän arvot. Laskenta-alue on rajattu harmaalla.

Magneettikentän suurin laskettu arvo oli 2,81 μ T. Yläpuolisessa tilassa oli lastentarha, jossa ei ollut esiintynyt laitehäiriöitä muuntamon nykyisen rakenteen aikana.

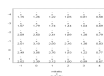
6.18 Esimerkkimuuntamo K60

Muuntamossa K60 pienjännitekaapelit on viety pienjännitekeskukselle lähellä kattoa. Vaihejärjestystä ei ole tehty symmetriseksi. Suurjännitekojeisto on SF₆-eristeinen ja sijaitsee pienjännitekeskuksen ja muuntajan kanssa samassa tilassa. Piirros muuntamon rakenteesta on esitetty kuvassa 6.65.



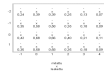
Kuva 6.65. Piirros muuntamon K60 rakenteesta.

Kuormitusvirtana laskennassa käytettiin 500 A. Yhteenvedo magneettikentän laskentatuloksista on esitetty kuvassa 6.66.



Kuva 6.67. Piirros muuntamon K38 rakenteesta.

Kuormitusvirtana laskennassa käytettiin 500 A. Yhteenveto magneettikentän laskentatuloksista on esitetty kuvassa 6.68.



Kuva 6.68. Muuntamon K38 yläpuolisessa tilassa metrin korkeudelta lasketut magneettikentän arvot. Laskenta-alue on rajattu harmaalla.

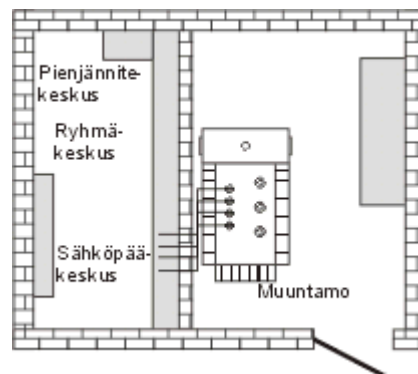
Magneettikentän laskettu suurin arvo oli $0,72 \mu\text{T}$. Kuormitusvirran suuruuteen nähden magneettikenttä yläpuolisessa tilassa metrin korkeudelta on varsin pieni.

6.20 Esimerkkimuuntamo T 1369

Muuntamossa T1369 pienjännitekiskot ovat lähellä kattoa lappeellaan. Kiskot ovat alumiiniset ja niiden mitat ovat $80 \times 10 \text{ mm}$. Muuntajan teho on 1000 kVA ja kytkentäryhmä Dyn11. Suurjännitekojeisto on SF_6 -eristinen ja sijaitsee samassa tilassa muuntajan kanssa.

Pienjännitekeskus on omassa sähkötilassaan.

Muuntamon ja viereisen tilan seinän sisään oli rakentamisen yhteydessä asennettu 4 mm paksua alumiinilevyä magneettikenttäsuojaksi. Suoja oli asennettu, koska viereiseen tilaan oli tarkoitus sijoittaa tietokoneita, joiden näyttöjen epäiltiin häiriintyvän muuntamosta. Suoja oli rakennettu niittaamalla alumiinilevyjä yhteen. Levyt olivat kooltaan $1,2 \text{ m} \times 1,6 \text{ m}$. Muuntamon pienjännitekiskosillan valokuva ja piirros muuntamon rakenteesta on esitetty kuvassa 6.69.



Kuva 6.69. Valokuva muuntamon T1369 pienjännitekiskosillasta ja piirros muuntamon rakenteesta.

Vaihevirtojen keskiarvo mittausten aikana oli 428 A. Yhteenveto magneettikentän mittaus- ja laskentatuloksista on esitetty kuvassa 6.70.

0	0,24 x	0,25 x	0,23 x	- x	- x
	0,26	0,31	0,21	0,06	0,10
1	0,16 x	0,16 x	0,17 x	0,14 x	0,12 x
	0,13	0,14	0,09	0,03	0,04
2	0,26 x	0,11 x	0,11 x	0,11 x	0,10 x
	0,08	0,07	0,05	0,02	0,01
3	0,15 x	0,19 x	0,23 x	0,12 x	0,10 x
	0,05	0,04	0,03	0,01	-
4	0,13 x	0,11 x	0,10 x	0,09 x	0,12 x
	0,03	0,03	0,02	0,01	-
	-2	-1	0	1	2

mitattu
x
laskettu

Kuva 6.70. Muuntamon T1369 viereisessä tilassa metrin korkeudelta lasketut ja mitatut magneettikentän arvot. Laskenta- ja mittausalue on rajattu harmaalla.

Tulosten perusteella voidaan havaita muuntamon pienjännitepuolen kiskosillan vaikuttavan vain vähän viereisen tilan magneettikenttään. Muuntamon ja mitatun tilan välisessä seinässä on käytetty 4 mm paksuista alumiinilevyä, jonka vaikutus on laskettu numeerisesti MagNet-ohjelmalla. Tulokset ovat likimain saman suuruisia, vaikka laskennassa ei huomioitaisi alumiinilevyn vaimennusvaikutusta. Tämän perusteella voidaan todeta, että suojauksella ei ole kovin suurta merkitystä tässä tapauksessa. Pisteissä (-1,3) ja (0,3) mitatut viereisiä pisteitä selvästi suuremmat arvot aiheutuivat lähellä sijainneista loisteputkivalaisimista.

Magneettikentän suurin laskettu arvo oli 0,31 μT . Lasketun ja mitatun magneettikentän suurimman arvon välinen ero oli -19,2%, eli laskettu arvo oli suurempi kuin mitattu. Mitatun ja lasketun magneettikentän ero (keskiarvo \pm keskihajonta) oli $0,08 \pm 0,07 \mu\text{T}$.

7 MAGNEETTIKENTÄN VÄHENTÄMINEN ESIMERKKIMUUNTAMOISSA

Magneettikenttien kannalta muuntamossa eniten kannattaa kiinnittää huomiota muuntajan ja pienjännitekeskuksen väliseen kisko- tai kaapelisiltaan. Siinä esiintyvät muuntamon suurimmat virrat. Muuntaja ei ole yleensä merkittävä magneettikenttälähde, sillä magneettivuo pysyy hyvin muuntajan rautasydämessä tai vaimenee muuntajan öljysäiliössä. Pienjännitekojeiston aiheuttamat magneettikentät tulevat merkittäviksi vasta silloin, kun kisko- tai kaapelisillan magneettikenttiä on saatu pienennettyä. Seuraavassa käydään läpi, miten muuntamoiden kenttiä on vähennetty eri esimerkeissä.

7.1 Muuntamon rakenteen muuttaminen esimerkkimuuntamoissa

Muuntamon rakenteellisia muutoksia ovat kiskojen muuttaminen kaapeleiksi, kaapelin vaihejärjestyksen parantaminen, pienjännitesillan siirtäminen kauemmaksi häiriintyvistä kohteesta, muuntajan vaihtaminen kahteen pienempään, rakennuksen harhavirtojen vähentäminen sekä muuntajan ja pienjännitekeskuksen siirtäminen niin, että ne ovat selät vastakkain. [/4,5,6,11/](#)

Kiskojen muuttaminen kaapeleiksi

Muuntajan ja pienjännitekeskuksen välisen kiskosillan muuttaminen kaapelisillaksi pienentää magneettikenttää, koska kaapelisillassa vaiheväli saadaan kiskosilta pienemmäksi. Kaapelisilta saadaan myös vietyä ahtaampien paikkojen läpi kuin kiskosilta, joten sen reitti voidaan valita siten, että sen aiheuttamat magneettikenttähäiriöt ovat pienemmät kuin kiskosillan. Kolmivaihekaapelin poikkileikkauksessa johtimet sijaitsevat tasasivuisen kolmion kärkipisteissä, joka on kolmella johtimella symmetrisin geometria. Myös yksivaihekaapeleilla toteutettu kaapelisilta saadaan

geometrisesti symmetriseksi, jos vaiheet sidotaan tiukasti toisiinsa. Sidontaan voidaan käyttää esimerkiksi nippusiteitä.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkimuuntamoissa T290, L254, T1387, H2453, H2793 ja T486. Kiskojen muuttamista kaapeleiksi ei oltu tehty ainoana muutostyönä missään muuntamossa. Muutostyön yhteydessä kaapelisilta oli asennettu yleensä lattialle ja vaihejärjestys oli tehty alkuperäistä paremmaksi. Taulukossa 7.1 on esitelty magneettikentän pienentyminen muuntamoissa, joissa muutostyö sisälsi kiskojen muuttamisen kaapeleiksi. Tulosten vertailu on tehty suurimman lasketun ja mitatun arvon perusteella.

Taulukko 7.1. Magneettikentän laskettu ja mitattu muutos muuntamoissa, joissa kiskot muutettu kaapeleiksi (vertailu alkuperäiseen rakenteeseen, virran muuttuminen huomioitu muutoksen laskennassa). Al on alumiini.

Muuntamo	Alku-peräinen laskettu, μT	Alku-peräinen mitattu, μT	Muutostyö	Rakenne muutettu, laskettu, μT	Rakenne muutettu, mitattu, μT	Laskettu muutos, %	Mitattu muutos, %
T290	2,56	***	Kiskot kaapeleiksi, alkuperäistä alempana, vaihejärjestys optimoitu	1,58	1,56	38,3	*
L254	10,7	n. 20**	Kiskot lattialla kulkeviksi kaapeleiksi	1,51	n. 3**	85,9	85,0**
T1387	458,7	***	Kaksi 1000 kVA:n öljyeristeistä muuntajaa, silta kaapeleiksi	166,6	151,6	55,2	***
H2453	3,33	n. 3,3	Silta uusittu, kaapelit lattialla ja 5 mm Al-kouru	0,70	-	79,0	***
H2793	5,23	4,23	Kiskot vaihdettu kaapelisillaksi ja 5 mm Al-kouru	0,31	0,40	90,8	85,3
T486	2,81	*	Kaapeli lattialla, vaihejärjestys ei symmetroitua	-	-	-	-

* toinen mittaus 0,75 m korkeudella, ** lattialla,*** toinen mittaus puuttuu

Muutostöiden pienennysvaikutukset ovat laskentatulosten perusteella välillä 38,3% - 90,8%. Suuri hajonta syntyy ennen muuta muista muutostöistä, joita rakenteeseen on tehty. Niillä voi olla jopa suurempi merkitys kenttien pienemiseen kuin kiskojen muuttamisella kaapeleiksi. Muuntamoissa, joista on olemassa mittaustuloksia, vaimennusvaikutus on ollut noin 85%.

Muuntamossa L254 muuntajan ja pienjännitekeskuksen välinen kiskosilta on muutettu lattialla kulkeviksi kaapeleiksi. Magneettikenttä on pienentynyt laskentatulosten mukaan yli 80%. Lähes samanlainen muutos oli tehty muuntamossa H2453. Erona oli pienjännitekaapelisilta, joka oli tässä muuntamossa koteloitu 5 mm paksulla alumiinikotelolla. Magneettikenttä on pienentynyt myös tämän muuntamon kohdalla laskentatulosten mukaan noin 80%. Magneettikentän pienentyminen oli laskennan perusteella 0,9% suurempi metrin korkeudella lattiasta kuin mittausten perusteella

yläpuolisen tilan lattialla.

Muuntamossa T1387 yksi 2000 kVA kuivamuuntaja on vaihdettu kahdeksi 1000 kVA öljyeristeiseksi muuntajaksi. Sähköyhtiössä päädyttiin tällaiseen ratkaisuun, koska muuntamo jouduttiin uusimaan muuttuneen kuormituksen takia. Muutoksen yhteydessä vaihdettiin kiskosilta kahdeksi kaapelisillaksi, joiden sijainti pyrittiin saamaan optimaaliseksi viereisessä tilassa olleeseen mahdollisesti häiriintyvään kohteeseen nähden. Magneettikenttää tutkittiin muuntamotilassa, koska viereiseen teollisuustilaan ei ollut mahdollista päästä. Muutoksesta johtuen magneettikenttä pieneni muuntamossa yli 50%.

Kiskojen muuttaminen kaapeleiksi pitää suunnitella sekä materiaalien osalta että työn osalta etukäteen. Kaapelit pitää olla ennen työn aloittamista valmiina ja sopivan pituisina pätkinä. Myös kaapelikengät pitää hankkia etukäteen. Jos muuntamon pienjännitekeskus sijaitsee eri tilassa kuin muuntaja, joudutaan myös tilojen välinen palosulku uusimaan. Tarvikekustannukset ovat suuruusluokaltaan noin 1 500 mk, palosulku noin 1 000 mk ja kahden työntekijän yhden päivän työ 2 500 mk. Suunnittelukustannuksista voi olla vaikea rajata muutostyön suunnittelun osuutta.

Lisäksi kustannuksia tulee myös siitä, että kiskojen muuttaminen kaapeleiksi vaatii aina käyttökeskeytyksen. Korvaavan sähkön tuottaminen tai korvaavan yhteyden käyttö lisää muutostyön kustannuksia.

Kaapelisillan vaihejärjestyksen parantaminen

Magneettikenttää voidaan vähentää kaapelien vaihejärjestystä parantamalla. Vähentämiskeino sopii kaapelisillan, jossa vaihetta kohden on kaksi tai useampi johdin. Vaihejärjestyksessä pyritään mahdollisimman symmetriseen johdinjärjestykseen. Vaihejärjestysvaihtoehtoja on paljon. Yksi vaihtoehto on tehdä kaapelisilta suurvirtakaapelijärjestelmän mukaisesti, jolloin johtimet voidaan tukea suurvirtakaapelijärjestelmään tarkoitettujen tukieristimien avulla. Voidaan myös käyttää nippusiteitä, joilla kuitenkin kaapelien järjesteleminen ei ole helppoa. Kuvassa 7.1 on esitetty esimerkkejä symmetrisestä vaihejärjestyksestä sillalle, jossa on kaksi johdinta vaihetta kohden ja yksi PEN-johdin.



Kuva 7.1. Muuntajan ja pienjännitekeskuksen välisen kaapelisillan symmetrisiä vaihejärjestyksiä.

Kun osajohtimia on enemmän, myös mahdollisten symmetristen vaihejärjestysten määrä kasvaa. Toteutettavan rakenteen valintaan vaikuttaa magneettikentän vähentämistavoitteiden lisäksi käytettävissä oleva tila. Usein kaapelisillalle varattua reittiä ei ole mahdollista suurentaa, joten kaapelisillan muoto pitää valita tilaan sopivaksi.

Symmetrisessä tilanteessa nollajohtimen sijoittamisella ei ole merkitystä, koska nollajohtimen virta on nolla. Sähköisesti epäsymmetrisiä kuormituksia varten nollajohdin on hyvä sijoittaa mahdollisimman lähelle vaihejohtimia ja viedä se samaa reittiä kuin vaihejohtimet. Tavallisessa jakelumuuntamossa nollajohtimen sijoittaminen on magneettikenttien kannalta käytännössä hankalaa, koska kuormitus ei yleensä ole symmetrinen. Nollajohdin kannattaa sijoittaa lähelle vaihejohtimia, että virtojen aiheuttama magneettikenttä kumoutuisi mahdollisimman hyvin.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkimuuntamoissa T290, H2605, H2793, T53 ja T1217. Kaapelien vaihejärjestyksen parantamista ei oltu tehty ainoana muutostyönä missään muuntamossa. Taulukossa 7.2 on esitelty magneettikentän pienentyminen muuntamoissa, joissa muutostyö sisälsi kaapelien vaihejärjestyksen parantamisen.

Taulukko 7.2. Magneettikentän laskettu ja mitattu muutos muuntamoissa, joissa kaapelien vaihejärjestystä on parannettu (vertailu alkuperäiseen rakenteeseen, virran muuttuminen huomioitu muutoksen laskennassa). Al on alumiini.

Muuntamo	Alku- peräinen laskettu, μT	Alku- peräinen mitattu, μT	Muutostyö	Rakenne muutettu, laskettu, μT	Rakenne muutettu, mitattu, μT	Laskettu muutos, %	Mitattu muutos, %
T290	2,56	**	Kiskot kaapeleiksi, alkuperäistä alempana, vaihejärjestys optimoitu	1,58	1,56	38,3	*
H2605	1,22	n. 1,5	Silta laskettu metriä alemmaksi, vaihejärjestys optimoitu	0,90	n. 1,0	26,2	33,3
H2793	5,23	4,23	Kiskot vaihdettu kaapelisillaksi ja 5 mm Al-kouru	0,31	0,40	90,8	85,3
T53	0,49	0,49	Kaapeli lattialla, vaihejärjestys symmetroituu	-	-	-	-
T1217	1,61	2,19	Kaapeli katossa, symmetroituu	-	-	-	-

* toinen mittaus 0,75 m korkeudella, ** toinen tapaus puuttuu

Muutostöiden pienennysvaikutukset ovat laskentatulosten perusteella välillä 26,2% - 90,8%. Mitatuissa muuntamoissa vaimennusvaikutus on ollut 33,3% ja 85,3%. Myös tämän muutostyön vaikutus tulee yhdistettynä muihin muutostöihin, koska pelkästään vaihejärjestyksen parantamista ei oltu käytetty missään muuntamossa.

Esimerkkinä muutostyöstä muuntamossa H2793 kiskosilta on vaihdettu vaihejärjestykseltään optimoiduksi kaapelisillaksi. Vaihejärjestyksen optimointi on toteutettu käyttämällä kaapelien tuentaan suurvirtakaapelijärjestelmän tukieristimiä.

Kaapelin vaihejärjestyksen parantamisesta ei aiheudu lisäkustannuksia, jos se tehdään heti muuntamon asennuksen yhteydessä. Myös muutostyönä tehty kaapelien vaihejärjestyksen parantaminen ei aiheuta merkittäviä kustannuksia. Kustannukset ovat lähes pelkästään työkustannuksia. Kahdelta työntekijältä muutostyöhön kuluu aikaa noin puoli päivää, joten kustannus on noin 1 000 mk.

Pienjännitesillan siirtäminen kauemmaksi häiriintyvistä kohteista

Häiriintyvän kohteen ja pienjännitesillan välisen etäisyyden pienikin kasvattaminen vaikuttaa magneettikenttään merkittävästi. Pienjännitesillan siirtäminen on kiskosillalla huomattavasti hankalampaa kuin kaapelisillalla. Yleensä häiriintyvä kohde on muuntamon yläpuolisessa tilassa, jolloin pienjännitesillaa pitää siirtää alemmaksi. Kun korkealla, esimerkiksi muuntamon katossa olevaa kiskosillaa siirretään alemmaksi, joudutaan ottamaan huomioon myös henkilöturvallisuusasiat. Jos kiskosilta on muutoksen jälkeen kosketusetäisyydellä, täytyy siihen rakentaa kosketussuoja. Kaikki kiskosillan muutostyöt vaativat käyttökeskeytyksen.

Kaapelisillan siirtäminen alemmaksi on nopea toimenpide, jos sillan päitä ei jouduta irrottamaan. Kaapelisillaa ei jouduta uusimaan edellä mainitussa tapauksessa, joten magneettikentän vähentämiseen liittyvät muutostyön kokonaiskustannukset ovat pieniä. Yksinkertaisin muutostyö on laskea kaapelisilta lähellä kattoa kulkevalta kaapelihyllyltä muuntamon lattialle.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkinä muuntamoissa T290, L254, T1387, H2453, T573, H2605,

H2793, T53, H37 ja K38. Pienjännitesillan siirtäminen kauemmaksi häiriintyvistä kohteesta oli muuntamossa H2605 ainoa muutostyö. Muissa muuntamoissa muutostyön yhteydessä oli tehty myös muita muutoksia. Taulukossa 7.3 on esitelty magneettikentän pienentyminen muuntamoissa, joissa muutostyö sisälsi pienjännitesillan siirtämisen kauemmaksi häiriintyvistä kohteesta.

Taulukko 7.3. Magneettikentän laskettu ja mitattu muutos muuntamoissa, joissa pienjännitesilta siirretty kauemmaksi häiriintyvistä kohteesta (vertailu alkuperäiseen rakenteeseen, virran muuttuminen huomioitu muutoksen laskennassa). Al on alumiini.

Muuntamo	Alku- peräinen laskettu, μT	Alku- peräinen mitattu, μT	Muutostyö	Rakenne muutettu, laskettu, μT	Rakenne muutettu, mitattu, μT	Laskettu muutos, %	Mitattu muutos, %
T290	2,56	***	Kiskot kaapeleiksi, alkuperäistä alempana, vaihejärjestys optimoitu	1,58	1,56	38,3	*
L254	10,7	n. 20**	Kiskot lattialla kulkeviksi kaapeleiksi	1,51	n. 3**	85,9	85,0**
T1387	458,7	***	Kaksi 1000 kVA:n öljyeristeistä muuntajaa, silta kaapeleiksi	166,6	151,6	55,2	***
H2453	3,33	n. 3,3	Silta uusittu, kaapelit lattialla ja 5 mm Al-kouru	0,70	***	79,0	***
T573	13,6	n. 10	Silta laskettu niiltä osin, kuin onnistunut ilman keskeytystä	10,8	n. 8	20,6	20,0
			Silta laskettu koko matkalta	1,60	n. 1,3	88,0	86,7
H2605	1,22	n. 1,5	Silta laskettu metriä alemmaksi	0,90	n. 1,0	26,2	33,3
H2793	5,23	4,23	Kiskot vaihdettu kaapelisillaksi ja 5 mm Al-kouru, kaapelisilta alkuperäistä alempana	0,31	0,40	90,8	85,3
T53	0,49	0,49	Kaapeli lattialla, vaihejärjestys symmetroituu	-	-	-	-
H37	2,98	3,83	Kiskot muualla kuin katossa	-	-	-	-
K38	0,72	***	Kaapeli lattialla, vaihejärjestystä ei	-	-	-	-

* toinen mittaus 0,75 m korkeudella, ** lattialla, *** mittaus puuttuu

Muuntamossa H2605 kaapelisiltaa on laskettu metri alkuperäistä rakennetta alemmaksi. Muutostyön vaimennusvaikutus oli laskentatulosten perusteella 26,2% ja mittaustulosten perusteella 33,3%. Muutostyön vaikutus tulee kaikissa muissa muuntamoissa yhdistettynä muihin muutostöihin, koska pelkästään pienjännitesillan siirtämistä kauemmaksi häiriintyvistä kohteesta ei oltu käytetty muissa muuntamossa. Muissa muuntamoissa pienennysvaikutukset ovat laskentatulosten perusteella välillä 20,6% - 90,8% ja mitatuissa muuntamoissa 20,0% - 86,7%.

Muuntamossa T573 kaapelisillan osittainen lattialle laskeminen on pienentänyt magneettikenttää mitta- ja laskentatulosten perusteella 20%. Kun kaapelisilta laskettiin kokonaan lattialle, magneettikenttä pienentyi mittaustulosten perusteella yli 80% yläpuolisen tilan lattialla. Muuntamossa H2605 symmetroitua kaapelisiltaa on laskettu yksi metri alemmaksi kuin alkuperäisessä tapauksessa, jolloin pienennysvaikutus oli 26%.

Pienjännitesillan siirtäminen kauemmaksi häiriintyvistä kohteesta voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Jos muutostyö tehdään nopeasti lyhyellä keskeytyksellä, esimerkiksi kaapelit siirretään kaapelihyllyltä muuntamon lattialle niiltä osin kuin se ei vaadi keskeytystä, ainoa kustannus on työkustannus. Kahdelta työntekijältä muutostyöhön kuluu aikaa noin puoli päivää, joten kustannus on noin 1 000 mk.

Jos asennuksessa joudutaan siirtämään kaapelit suoja-aidan alle, vaihtamaan kaapelit tai poraamaan betoniseinään kaapeleille aukko, kustannukset saattavat kasvaa huomattavasti. Esimerkiksi betoniin tehtävä aukko aiheuttaa kustannuksia timanttisauhauksella toteutettuna noin 1 500 mk. Muutostyö pitää suunnitella ennalta materiaalien, työkalujen ja työn osalta, joten suunnittelukustannukset vaikuttavat muutostyön kokonaiskustannuksiin.

Muuntajan vaihtaminen kahteen pienempään

Usein magneettikenttiin liittyvät muutostyöt tehdään muuntamon uusimisen yhteydessä. Jos muuntamo uusitaan lisääntyneen kuormituksen takia, voidaan myös joutua uusimaan muuntaja. Tällaisessa tapauksessa kannattaa harkita mahdollisuutta vaihtaa muuntaja kahteen pienempään muuntajaan yhden ison asemasta. Kahta muuntajaa käytettäessä kuormitus jakaantuu kahdelle pienjännitesillalle, joiden sijoittaminen voidaan suunnitella niin, että mahdollisesti häiriintyvän kohteen sijainti otetaan huomioon.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkimuuntamossa T1387. Muutostyön takia magneettikenttä pieneni laskennan perusteella muuntamossa 55,2%.

Muuntajan vaihtaminen kahteen pienempään pitää suunnitella materiaalien ja työn osalta etukäteen. Muuntamossa T1387 kustannukset olivat 113 300 mk ilman suunnittelu- ja keskeytyskustannuksia. Muuntamoon hankittiin yksi uusi muuntaja, kaapelia molempiin kaapelisiltoihin ja tarvittava määrä kaapelikenkiä. Toinen muuntaja siirrettiin muuntamoon varastosta.

Rakennuksen harhavirtojen vähentäminen

Rakennuksen sähköjärjestelmä saattaa olla rakenteeltaan sellainen, että rakennuksessa esiintyy harhavirtoja. Jos rakennuksessa on TN-C -jakelujärjestelmä eli nelijohdinjärjestelmä, yhdistetty suoja- ja käyttömaajohdin (PEN-johdin) toimii harhavirralla virtapiirin osana. Harhavirta voi esiintyä rakennuksen kaikissa maan kanssa johtavassa yhteydessä olevissa rakenteissa, kuten lämpöpattereissa, metallisissa vesijohdoissa, viemäreissä tai tukipalkeissa. Sähköjärjestelmän rakenne olisi TN-S -jakelujärjestelmää käytettäessä harhavirtojen kannalta parempi ja siten myös magneettikenttien kannalta parempi.

Toinen harhavirtaa mahdollisesti aiheuttava sähköjärjestelmän osa on jakelumuuntamo. Vanhan asennuskäytännön mukaisesti muuntajan maadoitus voi olla sekä maadoituskiskoon että muuntajan nollaliittimeen. Tästä on kuitenkin seurauksena harhavirtareitti, joka vaikuttaa rakennuksessa

esiintyviin magneettikenttiin. Harhavirta vaikuttaa erityisesti kolmella jaollisiin parittomiin yliaaltoihin, jotka voivat olla esimerkiksi tietokoneen näytön häiriintymisen syynä. Magneettikenttien vähennyskeinona voidaan harhavirtareitti katkaista, jolloin myös magneettikentän kolmella jaolliset yliaallot vähenevät.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkimuuntamoissa H2793 ja H302. Muuntamossa H2793 magneettikenttä mitattiin ennen muutostyötä ja sen jälkeen. Muutostyön ansiosta magneettikentän kolmella jaolliset parittomat yliaallot pienenevät noin 60%. Muuntamon H302 muutostyön yhteydessä ei tehty magneettikenttämittausta.

Harhavirtojen poistaminen ei aiheuttanut mitään kustannuksia kummassakaan tarkastellussa muuntamossa. Harhavirtareittinä toiminut muuntajan ylimääräinen maadoitus katkaistiin tongeilla. Muutostyössä ei tarvittu edes käyttökeskeytystä, koska maadoitus on maan potentiaalissa.

Muuntaja ja pienjännitekeskus selät vastakkain

Mahdollisimman lyhyt muuntajan ja pienjännitekeskuksen välinen kisko- tai kaapelisilta vähentää magneettikentän leviämistä muuntamon yläpuoliseen tai sivulla olevaan tilaan. Pienjännitesilta on lyhyt muuntamorakenteessa, jossa muuntaja ja pienjännitekeskus sijoitetaan selät vastakkain. Myös pienjännitesillan tuennan ei tarvitse olla yhtä vankka kuin pitkän pienjännitesillan tapauksessa, koska johtimien väliset voimat ovat pienempiä. Selät vastakkain -rakenteessa pienjännitesiltaa ei tarvitse tukea esimerkiksi kattoon, joten myös etäisyys yläpuoliseen tilaan tulee suuremmaksi.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkimuuntamoissa H302 ja H447. Muuntamot oli suunniteltu alkuperäiseltä rakenteeltaan pienikenttäisiksi, jolloin niillä ei ole vertailtavaa rakennetta.

Muuntajan ja pienjännitekeskuksen asennus on tapahtunut esimerkkimuuntamoilla rakentamisen yhteydessä. Rakenteen suunnittelusta, asennuksesta tai materiaaleista ei aiheudu ylimääräisiä kustannuksia. Hyvänä puolena on lisäksi muuntamon pieni koko, joka mahdollistaa muuntamon asentamisen melko pieneen tilaan.

7.2 Muuntamon pienjännitesillan suojaaminen esimerkkimuuntamoissa

Muuntamon pienjännitesillan suojaus voidaan toteuttaa metallikourulla, -kotelolla tai -levyllä. Suurvirtajärjestelmien suojaustapauksissa, esimerkiksi teollisuuskäytöissä, on otettava huomioon suojausten lämmönsiirtoa huonontava vaikutus kuormitettavuutta arvioitaessa. Suoja saattaa estää konvektion eli lämmön siirtymisen pienjännitesillasta ympäröivään ilmaan. Tilannetta saattaa huonontaa myös se, ettei ilmavirta suojausten jälkeen pääse liikkumaan vapaasti. /4,5,6,11/

Suojaamisen kustannukset vaihtelevat asennuksen laajuudesta riippuen huomattavasti. Muutostyön kustannukset ovat olleet noin 400 - 200 000 mk. Pienimmät kustannukset syntyvät pienestä suojasta, esimerkiksi pienjännitekeskuksen taakse asennetusta 5 mm paksusta alumiinilevystä. Ylärajalle päädytään, jos vuorataan koko muuntamo 5 mm paksulla alumiinilla. Työhön vaikuttaa materiaalikustannusten lisäksi suunnittelu- ja työkustannukset. Muutostyön kokonaiskustannuksia laskettaessa kannattaa kustannusten laskennassa ottaa huomioon muutostyöstä saatava magneettikentän pienentäminen. Suojauksesta syntyy myös häviökustannuksia jakeluyhtiölle. Magneettikenttien vertailun voi tehdä laskennan avulla tai kokemusperäisesti, tosin molemmilla menetelmillä tehty vertailu sisältää lukuisasti epävarmuustekijöitä. Jos pienemmällä kustannuksella kuitenkin päästään vastaavaan magneettikentän pienentymiseen kuin koko muuntamon vuorauksella, ei vuoraus ole järjevä vaihtoehto.

Myös tavoitetaso kannattaa miettiä ennen muutostyöhön ryhtymistä. Laskennan avulla kannattaa varmistaa, että suunnitellun muutostyön avulla päästään riittävän pieneen magneettikenttään.

Metallikouru

Magneettikenttien suojauksessa voidaan käyttää hyvin johtavaa tai ferromagneettista materiaalia. Johtavalla materiaalilla suojaus perustuu indusoituihin pyörrevirtoihin, jotka asettuvat materiaaliin kokonaisenergian kannalta optimaalisesti. Ferromagneettisella materiaalilla suojausvaikutus

perustuu materiaalin hyvään magneettivuon johtokykyyn, joka ohjaa magneettivuon materiaaliin.

Käytännön suojauksissa käytetään yleensä mahdollisimman puhdasta alumiinia /13/. Muuntajan ja pienjännitekeskuksen välisen kisko- tai kaapelisillan suojauksessa voidaan käyttää alumiinikourua. Tärkeää kourussa on, että koko kouru tehdään hyvin johtavaksi. Tämän takia mahdolliset liitokset olisi hyvä tehdä hitsaamalla /13/. Kouru voidaan magneettikenttien suojauksen kannalta asentaa joko aukeamaan ylös tai alas. Kourun suunta ei vaikuta suojaukseen merkittävästi. Käytännön kannalta kouru on joissakin tapauksissa helpompi asentaa kuin kotelo.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkimuuntamoissa H2453 ja H2793. Kourun asentamisen yhteydessä kummassakin esimerkkimuuntamossa kiskosilta oli vaihdettu kaapelisillaksi. Kouru oli molemmissa muuntamoissa tehty alumiinistä. Taulukossa 7.4 on esitelty magneettikentän pienentyminen muuntamoissa, joissa muutostyö sisälsi kourun asentamisen.

Taulukko 7.4. Magneettikentän laskettu ja mitattu muutos muuntamoissa, joissa magneettikentän pienentämiseen käytetty metallikourua (vertailu alkuperäiseen rakenteeseen, virran muuttuminen huomioitu muutoksen laskennassa). Al on alumiini.

Muuntamo	Alku-peräinen laskettu, μT	Alku-peräinen mitattu, μT	Muutostyö	Rakenne muutettu, laskettu, μT	Rakenne muutettu, mitattu, μT	Laskettu muutos, %	Mitattu muutos, %
H2453	3,33	n. 3,3	Silta uusittu, kaapelit lattialla ja 5 mm Al-kouru	0,70	*	79,0	*
H2793	5,23	4,23	Kiskot vaihdettu kaapelisillaksi ja 5 mm Al-kouru	0,31	0,40	90,8	85,3

* toinen mittaus puuttuu

Molemmissa taulukon muuntamoissa oli alumiinikourun asentamisen lisäksi tehty muita muutostöitä. Kourun vaikutus tulee molemmissa muuntamoissa yhdistettynä muihin muutostöihin. Muutostyön vaimennusvaikutus oli laskentatulosten perusteella 80% - 90% ja mittaustulosten perusteella 85%.

Metallikotelo

Pienjännitesillan suojaus voidaan toteuttaa käytännössä alumiinikotelolla. Myös alumiinikotelolla suojaus perustuu indusoituviin pyörrevirtoihin. Valmiin kotelon asentaminen kisko- tai kaapelisillan päälle voi joissakin rakenteissa olla hankalaa. Tämä on ratkaistu käytännössä niin, että ensin on tehty alumiinikouru ja se on täydennetty koteloksi asentamalla kouruun kansilevy. Jottei vaurioitettaisi suojan sisällä olevia eristeitä, kourua ja kantta ei ole aina hitsattu, vaan on tyydytty johtamattomien saumojen mahdollisesti aiheuttamaan suojauksen heikkenemiseen.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkimuuntamoissa H302, H2793 ja H276. Kotelo oli muuntamoissa tehty alumiinistä. Alumiinikotelon asentaminen oli muuntamoissa H302 ja H276 ainoa muutostyö. Muuntamossa H2793 sitä vastoin muutostyön yhteydessä oli tehty myös muita muutoksia. Taulukossa 7.5 on esitelty magneettikentän pienentyminen muuntamoissa, joissa muutostyö sisälsi kotelon asentamisen.

Taulukko 7.5. Magneettikentän laskettu ja mitattu muutos muuntamoissa, joissa magneettikentän pienentämiseen käytetty metallikotelo (vertailu alkuperäiseen rakenteeseen, virran muuttuminen huomioitu muutoksen laskennassa). Al on alumiini.

Muuntamo	Alku-peräinen	Alku-peräinen	Muutostyö	Rakenne muutettu,	Rakenne muutettu,	Laskettu muutos,	Mitattu muutos,
----------	---------------	---------------	-----------	-------------------	-------------------	------------------	-----------------

	laskettu, μT	mitattu, μT		laskettu, μT	mitattu, μT	%	%
H302	2,54	n. 2,3	Asennettu 3 mm Al-kotelo	0,27	n. 1,7	89,4	26,1
H2793	5,23	4,23	Kouru täydennetty 5 mm Al-koteloksi	0,39	0,39	90,3	88,0
H276	12,2	12,0	Kiskot suojattu 5 mm Al-kotelolla	0,99	n. 2,1	91,9	82,5

Metallikotelon pienennysvaikutus on ollut laskentatulosten perusteella noin 90%. Käytännössä tulokset ovat kuitenkin jääneet hieman alle laskennan avulla odotettavissa olevista tuloksista. Yksi tähän vaikuttava seikka on suojan rakentamisessa heikkenevät levyn sähköiset ominaisuudet. Materiaalissa tulee muutoksia esimerkiksi kulmien tekemisessä ja hitsauksessa. Toinen suojauksen pienennysvaikutusta heikentävä seikka on muuntamon muut sähköjohtimet ja sähkön syötöt, joiden vaikutus voidaan havaita erityisesti muuntamon H302 tuloksissa.

Metallilevy

Koko muuntamon vuoraus alumiinilevyllä on huomattavan kallis investointi. Sitä vastoin esimerkiksi pienjännitekeskuksen suojaus alumiinilevyllä voi olla käytännön ratkaisu, jos magneettikenttähäiriön syy saadaan kohdistettua johonkin muuntamon laitteeseen. Tällainen esimerkki on pienjännitekeskus, jossa kojeisto on rakennettu muuntamon sisällä ja keskuksessa oleva kiskosto on avorakenteinen. Alumiinilevyllä on päästy hyvään suojaukseen. Asentamalla se mahdollisimman lähellä kiskostoa alumiiniin indusoituvat pyörrevirrat pienentävät magneettikenttää myös yläpuolisesta tilasta tarkasteltuna.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkimuuntamoissa T573, H2793, Tu96-011 ja T1369. Metallilevy oli muuntamoissa tehty alumiinistä. Alumiinilevyn asentaminen oli muuntamoissa Tu96-011 ja T1369 ainoa muutostyö. Muuntamoissa T573 ja H2793 muutostyön yhteydessä oli tehty myös muita muutoksia. Taulukossa 7.6 on esitelty magneettikentän pienentyminen muuntamoissa, joissa muutostyö sisälsi suojalevyn asentamisen.

Taulukko 7.6. Magneettikentän laskettu ja mitattu muutos muuntamoissa, joissa magneettikentän pienentämiseen käytetty metallilevyä (vertailu alkuperäiseen rakenteeseen, virran muuttuminen huomioitu muutoksen laskennassa). Pjk on pienjännitekeskus ja Al on alumiini.

Muuntamo	Alku- peräinen laskettu, μT	Alku- peräinen mitattu, μT	Muutostyö	Rakenne muutettu, laskettu, μT	Rakenne muutettu, mitattu, μT	Laskettu muutos, %	Mitattu muutos, %
T573	13,6	n. 10	Pjk:n taakse asennettu 5 mm Al-levy	1,60	n. 1,3	87,6	86,3
H2793	5,23	4,23	Keskijännitekojeiston päälle asennettu 5 mm Al-levy	0,39	**	90,3	**
Tu96-011	5,42	*	Muuntamon seinässä 5 mm Al-levy	2,61	*	51,8	*
T1369	0,36	**	Rakentamisessa muuntamon seinään 4 mm alumiinilevy	0,31	0,26	13,9	**

* ei mittauksia, ** toinen mittaus puuttuu

Muutostyön vaimennusvaikutus oli laskentatulosten perusteella 13,9% - 90,3% ja mittatussa muuntamossa 86,3%. Pienjännitekeskuksen taakse ja keskijännitekojeiston päälle asennetuilla alumiinilevyillä on päästy melko hyviin tuloksiin muuntamoissa T573 ja H2793. Näissä muuntamoissa on tehty alumiinilevyn asentamisen lisäksi myös muita muutostöitä. Pelkän alumiinilevyn vaikutus oli kummassakin muuntamossa noin 50%, mutta vaimennusvaikutus rajoittui melko pienelle alueelle. Myös muuntamossa Tu96-011 on päädytty noin 50% vaimennusvaikutukseen, kun muuntamon ja viereisen tilan seinään on asennettu 5 mm alumiinilevy. Muuntamossa T1369 vaimennusvaikutus on jäänyt laskennan perusteella huomattavasti pienemmäksi. Yksi syy tähän on se, että tässä muuntamossa on kiskosillan etäisyys alumiinilevyn huomattavasti muita rakenteita suurempi.

7.3 Muuntamossa useita muutosvaiheita

Muuntamoissa T573 ja H2793 muutokset tehtiin useissa muutosvaiheissa. Muuntamossa T573 ensisijaisena muutostyönä pyrittiin kasvattamaan mahdollisimman paljon etäisyyttä häiriintyvään kohteeseen. Lisäksi pienjännitekeskuksen taakse asennettiin 5 mm paksu alumiinilevy. Muuntamossa H2793 kiskot vaihdettiin kaapeleiksi ja vaimennettiin magneettikenttää alumiinikourulla ja -kotelolla toteutetun suojauksen avulla. Taulukossa 7.7 on esitelty magneettikentän pienentyminen muuntamon muutostöiden eri vaiheissa.

Taulukko 7.7. Magneettikentän laskettu ja mitattu muutos muuntamoissa, joissa magneettikentän pienentäminen toteutettu useiden muutosvaiheiden kautta (vertailu alkuperäiseen rakenteeseen, virran muuttuminen huomioitu muutoksen laskennassa). Al on alumiini.

Muuntamo	Alku-peräinen laskettu, μT	Alku-peräinen mitattu, μT	Muutostyö	Rakenne muutettu, laskettu, μT	Rakenne muutettu, mitattu, μT	Laskettu muutos, %	Mitattu muutos, %
T573	13,6	n. 10	Silta laskettu niiltä osin, kuin onnistunut ilman keskeytystä	10,8	n. 8	20,6	20,0
			Silta laskettu koko matkalta	1,60	n. 1,3	88,0	86,7
			Pjk:n taakse asennettu 5 mm Al-levy	1,60	n. 1,3	87,6	86,3
H2793	5,23	4,23	Kiskot vaihdettu kaapelisillaksi ja 5 mm Al-kouru	0,31	0,40	90,8	85,3
			Kouru täydennetty koteloksi	0,39	0,39	90,3	88,0
			Keskijännitekojeiston päälle asennettu 5 mm Al-levy	0,39	*	90,3	*

*mittaus puuttuu

Muuntamossa T573 kaapelisillan osittainen lattialle laskeminen on pienentänyt magneettikenttää mittaus- ja laskentatulosten perusteella 20%. Kun kaapelisilta laskettiin kokonaan lattialle, magneettikenttä pienentyi lähes 90% yläpuolisen tilan lattialla metrin korkeudella. Muuntamossa T573 asennettiin myös 5 mm paksu alumiinilevy suojaamaan muuntamon pienjännitekeskuksen vaakatasossa olevan kiskoston aiheuttamaa magneettikenttää. Muuntamoon asennettu alumiinilevy vaikutti lähinnä sillä kohtaa, missä pienjännitekojeisto sijaitsee. Tällä kohtaa magneettikenttä

pienentyi suojan vaikutuksesta noin 50%. Suojauksella ei ollut vaikutusta yläpuolisen asunnon magneettikenttään, jos tarkastellaan pelkästään suurinta arvoa. Laskennan perusteella päädyttiin lähes saman suuruiseen magneettikentän pienentymiseen kuin mittauksien perusteella. Erot lasketun ja mitatun magneettikentän pienentymisen välillä ovat 0,6%, 1,2% ja 0,4%.

Muuntamossa H2793 kiskosilta on vaihdettu vaihejärjestykseltään optimoiduksi kaapelisillaksi ja samalla magneettikenttien vaimentamiseksi on asennettu lisäksi 5 mm paksu alumiinikouru. Vaihejärjestyksen optimointi on toteutettu käyttämällä kaapelien tuentaan suurvirtakaapelijärjestelmän tukieristimiä. Alumiinikouru on asennettu alhaalta päin. Seuraavana muutostyönä kouru on täydennetty koteloksi. Magneettikenttä on laskentatulosten perusteella pienentynyt noin 90% alkuperäisestä kummankin muutostyön avulla. Mittamalla ei saatu kuitenkaan aivan yhtä hyviä tuloksia. Kun muuntamoon on lisätty keskijännitekojeiston päälle 5 mm paksusta alumiinilevystä tehty suoja, ei olla enää päästy pienempään magneettikenttään. Sitä vastoin alumiinisuojan lisäämisellä on ollut vaikutusta yläpuolisessa tilassa sillä kohtaa, missä keskijännitekojeisto sijaitsee. Siellä kenttä on pienentynyt suojan vaikutuksesta noin 50%. Erot lasketun ja mitatun magneettikentän pienentymisen välillä olivat 1,2% ja 2,1%.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkimuksessa tarkasteluun otettiin 20 muuntamoita, joista 10:ssä oli tehty muutostöitä magneettikenttien vähentämiseksi. Näistä muuntamoista, joissa oli tehty muutostöitä, osassa muutostyöt oli tehty erillisinä muutosvaiheina, jolloin yhdestä muuntamosta saatiin useampi kuin kaksi rakennetta. Yhteensä näistä 10 muuntamosta saatiin tutkittavaksi 24 rakennetta. Lopuista 10 muuntamosta laskettiin 11 eri rakennetta, koska yhdessä muuntamossa oli jo rakennusvaiheessa asennettu muuntamon ja viereisen tilan väliseen seinään alumiinilevy.

Tarkastellussa muuntamoaineistossa oli kiskot 11 muuntamossa (55%) ja kaapelit 9 muuntamossa (45%). Ryhmiteltäessä muuntamoita muuntajan ja pienjännitekeskuksen välisen kiskosillan rakenteen mukaan, merkittävin ryhmä on kiskot lappeellaan ja kiinnitetty lähelle kattoa (20%). Kaapelisilloista yli puolet oli lähellä kattoa.

Tutkimus perustuu sähköyhtiöiltä saataviin rakennepiirustuksiin toteutetuista kiinteistömuuntamoiden magneettikenttien vähentämiskeinoista. Sähköyhtiöt olivat myös tehneet joissakin muuntamoissa magneettikenttämittauksia, joiden tuloksia saatiin käytettäväksi. Rakennepiirustuksien avulla muuntamoiden muuntajan ja pienjännitekeskuksen välinen kisko- tai kaapelisilta digitoitiin, ja muuntamosta tehtiin magneettikentälaskenta. Raportissa on analysoitu muuntamoiden rakenteita sekä magneettikentän mittaus- ja laskentatuloksia. Näiden perusteella on pyritty löytämään tiettyyn muuntamon rakenteeseen sopiva magneettikentän vähentämiskeino. Tutkimuksen aikana on tehty myös kenttämittauksia.

8.1 Muuntamon kenttien vähentämiskeinojen vertailu

Muuntamon rakenteiden paremmuutta tarkasteltaessa magneettikenttä voidaan jakaa kuormitusvirralla, koska magneettikenttä on suoraan verrannollinen kuormitusvirtaan. Tämän avulla saadaan selville rakenteen tuottama magneettikenttä kuormituksesta riippumattomana lukuna. Taulukossa 8.1 on esitetty sekä mittauksen että laskennan avulla saatu magneettikenttä jaettuna kuormitusvirralla. Tuloksista voidaan analysoida rakenteen vaikutusta.

Taulukko 8.1. Yhteenvedo kiinteistömuuntamoiden laskenta- ja mittauksien tuloksista suhteessa kuormitusvirran 100 ampeeriin. Pjk on pienjännitekeskus ja Al on alumiini.

Muuntamo	Muuntamon kuvaus	Mitattu B/I, $\mu\text{T}/100\text{ A}$	Laskettu B/I, $\mu\text{T}/100\text{ A}$
T290	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	1,23*	0,51 0,87*
	Kiskot kaapeleiksi, alkuperäistä alempana,	0,31	0,31

	vaihejärjestys optimoitu		
L254	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	5,26**	2,82
	Kiskot lattialla kulkeviksi kaapeleiksi	0,79**	0,40
T1387	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	***	30,6*****
	Kaksi 1000 kVA:n öljyeristeistä muuntajaa, silta kaapeleiksi	12,5*****	13,7*****
H2453	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	1,32	1,33
	Silta uusittu, kaapelit lattialla ja 5 mm Al-kouru	***	0,28
T573	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestystä ei symmetroituu	1,40	1,90
	Silta laskettu niiltä osin, kuin onnistunut ilman keskeytystä	1,12	1,51
	Silta laskettu koko matkalta	0,19	0,23
	Pjk:n taakse asennettu 5 mm Al-levy	0,19	0,24
H302	Kiskot lappeellaan kiinnitetty muualle kuin kattoon, muuntaja ja pjk selät vastakkain	0,27	0,30
	Asennettu 3 mm Al-kotelo	0,12	0,03
H2605	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestys symmetroituu	***	0,41
	Silta laskettu metriä alemmaksi	***	0,30
H2793	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	1,11	1,37
	Kiskot vaihdettu kaapelisillaksi ja 5 mm Al-kouru	0,16	0,13
	Kouru täydennetty koteloksi	0,13	0,13
	Keskijännitekojeiston päälle asennettu 5 mm Al-levy	***	0,13
H276	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	1,00	1,02
	Kiskot suojattu 5 mm Al-kotelolla	0,18	0,08
Tu96-011	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestystä ei symmetroituu	***	1,08
	Muuntamon seinässä 5 mm Al-levy	***	0,52
T53	Kaapeli lattialla, vaihejärjestys symmetroituu	0,36	0,43
H447	Muuntaja ja pjk selät vastakkain	0,18	0,15
T567	Kiskot lappeellaan katossa	0,75	0,87
H37	Kiskot muuaalla kuin katossa	0,39	0,31
T1217	Kaapeli katossa, symmetroituu	0,43	0,32
T994	Kaapeli katossa, ei symmetroituu	0,58	0,49
T486	Kaapeli lattialla, vaihejärjestys ei symmetroituu	***	0,51
K60	Kaapeli katossa, ei symmetroituu	***	0,64
K38	Kaapeli lattialla, vaihejärjestystä ei symmetroituu	***	0,14
T1369	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty muualle kuin	***	0,08

	kattoon		
	Rakentamisessa muuntamon seinään 4 mm alumiinilevy	0,06	0,07

* 0,75 m laskentakorkeus, ** lattialla, *** ei mittausta, **** muuntamossa, ***** viereisessä tilassa

Taulukon perusteella voidaan todeta, että parhaita muuntamoita ovat T573, H302, H2793, H276, H447, K38 ja T1369. Näissä muuntamoissa magneettikentän suhde 100 A kuormitusvirtaan on alle 0,2 $\mu\text{T}/100\text{ A}$. Kyseinen arvo tarkoittaa yhden mikrotieslan arvoa kurmitusvirran ollessa 500 A.

Magneettikenttien kannalta parhaissa muuntamoissa on rakenteellisia yhtäläisyyksiä. Muuntamoissa T573 ja K38 kaapelisilta on lattialla. Muuntamoissa H302 ja H447 muuntaja ja pienjännitekeskus ovat selät vastakkain. Muuntamossa H302 on lisäksi 3 mm alumiinikotelo. Muuntamossa H2793 yläpuolinen kaapelisilta on suojattu 5 mm alumiinikourulla ja toisessa rakenteessa 5 mm alumiinikotelolla. Muuntamossa H276 suojaukseen on käytetty 5 mm alumiinikoteloita. Muuntamossa T1369 on tarkasteltu magneettikenttää muuntamon vieressä olevassa tilassa, joten muuntamon ja tilan välinen etäisyys vaikuttaa tulokseen tässä muuntamossa merkittävästi.

Sekä mitattuun että laskettuun magneettikentän arvoon vaikuttaa kuormitusvirran epäsymmetrisyys. Mittaustuloksiin vaikuttaa lisäksi kuormitusvirran vaihtelu, epäsymmetrian vaihtelu, kiinteistössä esiintyvät harhavirrat ja kaikki kiinteistössä käytetyt sähkölaitteet. Lisäksi mittaustuloksiin vaikuttaa kaikki kiinteistön kaapeloinnit, joissa kulkee virtaa. Sähkökäytöstä syntyvä magneettikenttä riippuu suuresti asennus- ja johdotustekniikasta, sekä kolmella jaollisten yliaaltojen määrästä. Tämän vuoksi pelkästään kiinteistömuuntamosta aiheutuvaa magneettikenttää ei voida mitata kuin laboratorio-olosuhteissa. Myöskään tällaista pelkästään kiinteistömuuntamosta aiheutuvaa magneettikenttää ei esiinny käytännössä juurikaan. Siksi myöskään laskennallinen symmetrisen kuormitusvirran tarkastelu ei ole välttämättä mielekäästä, vaan virtana kannattaa laskennassa käyttää mitattua virtaa.

Tarkasteltujen kiinteistömuuntamoiesimerkkien perusteella magneettikenttien pienentämiselle ei löytynyt sellaista ratkaisua, jonka voisi todeta aina olevan hyvä ratkaisu. Laskennan yhteydessä todettiin, että kuormitusvirran epäsymmetrisyys vaikuttaa huomattavasti kiinteistömuuntamon magneettikentän suuruuteen. Koska kuormitustilanteet ja kuormitusvirran epäsymmetrisyys vaihtelevat koko ajan, pelkän muuntamorakenteen tarkastelu ja muuttaminen eivät takaa pientä magneettikenttää. Myös muuntamon kuormitusvirtaan on syytä paneutua magneettikentän pienentämisen yhteydessä. Myös kiinteistön mahdolliset harhavirrat on syytä tutkia.

Mittausten ja laskennan perusteella jokainen muuntamo on käsiteltävä erillisenä tapauksena, jonka magneettikentän pienentäminen on suunniteltava erikseen. Koska magneettikenttien pienentäminen on usein melko kallis toimenpide, magneettikentät olisi hyvä ottaa huomioon jo muuntamo suunniteltaessa.

Myös rakenteiden lämpiäminen tulee ottaa huomioon vaimennusta käytettäessä erityisesti, jos tarkastellaan suurien kuormitusten kisko- tai kaapelisiltojen kotelointia. Suuria kuormituksia esiintyy erityisesti teollisuudessa käytettävissä kiinteistömuuntamoissa.

Ferromagneettista magneettikenttäsuojaa käytettäessä voidaan koteloon tehdä lämmönvaihtoa parantavia tuuletusaukkoja suojan ominaisuuksien huonontumatta. Sitä vastoin johtavasta materiaalista tehtyyn suojakoteloon ei voi tehdä aukkoja, koska ne heikentävät suojan ominaisuuksia. Kun käytännössä toteutetuissa vähentämiskäytöksissä käytettiin suojauksessa lähes aina alumiinisia kotelointeja, voidaan suurien kuormitusten yhteydessä joutua lämpenemisen takia ongelmiin.

Lämpäminen saattaa olla ongelma erityisesti pienjännitekaapelisilloissa, koska kaapelien kuormitettavuus suunnitellaan tiettyyn ympäristön lämpötilaan. Suojakotelon sisällä suljetussa tilassa lämpötila saattaa kuitenkin nousta tavallista ympäristön lämpötilaa korkeammaksi.

Suojakotelointia suunniteltaessa lämpötilan kasvamisen vaikutus kaapelien kuormitettavuuteen tulee ottaa huomioon.

Yksi keino ottaa kiinteistömuuntamon magneettikentät huomioon, on käyttää pienikenttäiseksi todettuja muuntamorakenteita, kuten muuntamo ja pienjännitekeskus selät vastakkain -rakennetta tai tehdasvalmisteista pienikenttäistä kiinteistömuuntamoa. Tehdasvalmisteisen pienikenttäisen kiinteistömuuntamon etuna on, että sen magneettikenttä on mitattu laboratorio-olosuhteissa jo etukäteen. Tehdasvalmisteisen kiinteistömuuntamon aiheuttama magneettikenttä voidaan ennustaa, jos asennuksessa ei tehdä virheitä ja muuntajan kuormitus on tasattu eri vaiheille niin, että kuormitus on lähes symmetristä. Tällöin kiinteistömuuntamoa suunniteltaessa tiedetään kiinteistön arvioidun kuormituksen perusteella, mitä suuruusluokkaa magneettikenttä tulee olemaan muuntamon yläpuolisessa tai vieressä olevassa tilassa.

8.2 Laskenta- ja mittaustulosten vertailu

Taulukossa 8.2 on mittaustuloksia verrattu laskentatuloksiin muuntamoissa, joiden rakennetta on muutettu magneettikenttien pienentämiseksi.

Taulukko 8.2. Kiinteistömuuntamoiden vähentämisesimerkkien mittaustulosten vertailu laskentatuloksiin (maksimi-arvot). Pjk on pienjännitekeskus ja Al on alumiini.

Muuntamo	Muutostyö	Laskettu arvo, μT	Mitattu arvo, μT	Lasketun arvon ero mitattuun, %
T290	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	2,56 4,42*	**** n. 6,2*	**** -28,7*
	Kiskot kaapeleiksi, alkuperäistä alempana, vaihejärjestys optimoitu	1,58	1,56	1,3
L254	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	10,7	n. 20**	***
	Kiskot lattialla kulkeviksi kaapeleiksi	1,51	n. 3**	***
T1387	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	458,7	****	****
	Kaksi 1000 kVA:n öljyeristeistä muuntajaa, silta kaapeleiksi	166,6	151,6	-9,9
H2453	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	3,33	n. 3,3	-0,9
	Silta uusittu, kaapelit lattialla ja 5 mm Al-kouru	0,70	****	****
T573	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestystä ei symmetroitua	13,6	n. 10	-36,0
	Silta laskettu niiltä osin, kuin onnistunut ilman keskeytystä	10,8	n. 8	-35,0
	Silta laskettu koko matkalta	1,60	n. 1,3	-23,1
	Pjk:n taakse asennettu 5 mm Al-levy	1,60	n. 1,3	-23,1
H302	Kiskot lappeellaan kiinnitetty muualle kuin kattoon, muuntaja ja pjk selät vastakkain	2,54	n. 2,3	-10,4
	Asennettu 3 mm Al-kotelo	0,27	n. 1,7*****	*****

H2605	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestys symmetroituu	1,22	n. 1,5	****
	Silta laskettu metriä alemmaksi	0,90	n. 1,0	****
H2793	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	5,23	4,23	-23,6
	Kiskot kaapeleiksi ja 5 mm Al-kouru	0,31	0,40	22,5
	Kouru täydennetty koteloksi	0,39	0,39	0,0
	Keskijännitekojeiston päälle 5 mm Al-levy	0,39	****	****
H276	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	12,2	12,0	-1,7
Tu96-011	Kiskot suojattu 5 mm Al-kotelolla	0,99	n. 2,1	52,9
	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestystä ei symmetroituu	5,42	****	****
	Muuntamon seinässä 5 mm Al-levy	2,61	****	****

* 0,75 m, ** lattialla, *** mittaus ja laskenta eri korkeudelta, **** ei mittausa, tai virtaa ei mitattu, ***** magneettikenttä keskijännitekojeistosta

Lasketun ja mitatun magneettikentän eron itseisarvot olivat välillä 0,0% - 52,9%. Suurin ero lasketun ja mitatun arvon välillä johtui siitä, että suojakotelon vaimennus ei ollut yhtä hyvä kuin laskennan mukaan sen olisi pitänyt olla. Suojan vaimennusta laskettaessa virroille valitaan vaihekulmat joltain hetkeltä. Kuormituksen muuttuessa myös vaihekulmat yleensä muuttuvat, jolloin vaimennus ei enää vastaa laskettua. Lisäksi kuormituksen vaihtelu, magneettikenttämittari ja mittausmenetelmä sekä kaikki magneettikenttää tuottavat johdot ja laitteet saattoivat vaikuttaa lasketun ja mitatun arvon eroihin.

Kuormitukset vaihtelevat lähes kaikissa muuntamon sähköjohdoissa. Muuntamon kuormituksen muuttumista on vaikea ottaa huomioon magneettikenttien laskennassa. Kuormituksen vaihtelu on joissakin muuntamoissa hyvin nopeaa, jolloin esimerkiksi muuntamon yläpuolisen asunnon mittauksessa joissakin mittauspisteissä voi olla huomattava ero mittaus- ja laskentatulosten välillä ja toisissa mittauspisteissä ero voi olla pieni. Kaikissa muuntamoissa lasketun ja mitatun arvon eroihin vaikutti myös sellaiset sähköjohdot ja sähkölaitteet, joita ei otettu laskennassa huomioon.

Sähköyhtiöiden tekemissä mittauksissa mittausmenetelmä ei kaikissa mittauksissa ollut yhtä kattava kuin TTKK:n tekemissä mittauksissa. Myös kaikissa sähköyhtiöiden mittauksissa käytetyistä mittareista tai mittareiden kalibroinneista ei ole tarkkaa tietoa. TTKK:n mittauksissa käytetty magneettikenttämittari on kalibroitu 12.2.1998.

Yhteenvedona kiinteistömuuntamoiden laskennan ja mittauksen erosta on esitetty taulukossa 8.3 eron keskiarvo ja keskihajonta.

Taulukko Yhteenvedo kiinteistömuuntamoiden laskennan ja mittauksen erosta (keskiarvo ja keskihajonta). Pjk on pienjännitekeskus ja Al on alumiini.

Muuntamo	Muuntamon kuvaus	Keskiarvo, μT	Keskihajonta, μT
T290	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	*	*
	Kiskot kaapeleiksi, alkuperäistä alempana, vaihejärjestys optimoitu	-0,18	0,14
L254	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	*	*

	Kiskot lattialla kulkeviksi kaapeleiksi	*	*
T1387	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	*	*
	Kaksi 1000 kVA:n öljyeristeistä muuntajaa, silta kaapeleiksi	-27,0	31,5
H2453	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	*	*
	Silta uusittu, kaapelit lattialla ja 5 mm Al-kouru	*	*
T573	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestystä ei symmetroituu	*	*
	Silta laskettu niiltä osin, kuin onnistunut ilman keskeytystä	*	*
	Silta laskettu koko matkalta	-0,17	0,42
	Pjk:n taakse asennettu 5 mm Al-levy	-0,20	0,54
H302	Kiskot lappeellaan kiinnitetty muualle kuin kattoon muuntaja ja pjk selät vastakkain	*	*
	Asennettu 3 mm Al-kotelo	*	*
H2605	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestys symmetroituu	*	*
	Silta laskettu metriä alemmaksi	*	*
H2793	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	-0,18	0,40
	Kiskot vaihdettu kaapelisillaksi ja 5 mm Al-kouru	0,05	0,07
	Kouru täydennetty koteloksi	-0,01	0,11
	Keskijännitekojeiston päälle asennettu 5 mm Al-levy	*	*
H276	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	*	*
	Kiskot suojattu 5 mm Al-kotelolla	*	*
Tu96-011	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestystä ei symmetroituu	*	*
	Muuntamon seinässä 5 mm Al-levy	*	*
T53	Kaapeli lattialla, vaihejärjestys symmetroituu	0,06	0,11
H447	Muuntaja ja pjk selät vastakkain	0,09	0,03
T567	Kiskot lappeellaan katossa	-0,82	1,23
H37	Kiskot muuaalla kuin katossa	0,11	0,71
T1217	Kaapeli katossa, symmetroituu	0,66	0,50
T994	Kaapeli katossa, ei symmetroituu	0,40	0,28
T486	Kaapeli lattialla, vaihejärjestys ei symmetroituu	*	*
K60	Kaapeli katossa, ei symmetroituu	*	*
K38	Kaapeli lattialla, vaihejärjestystä ei symmetroituu	*	*
T1369	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty muualle kuin kattoon	*	*
	Rakentamisessa muuntamon seinään 4 mm alumiinilevy	0,10	0,07

*ei mittausta

Mittausten ja laskennan väliset erot olivat joissakin muuntamoissa huomattavan suuria. Oleellisesti tähän asiaan vaikuttaa se, että muuntamon paikka on vaikea saada selville yläpuolisessa tai

vierisessä tilassa rakenteiden mittaamisen avulla tai piirustuksia tutkimalla. Myös lattian paksuus oli vaikea mitata käytössä olleilla laitteilla.

Lasketun ja mitatun magneettikentän erot johtuivat osittain myös siitä, että laskennan avulla saadaan määritettyä magneettikenttä myös sellaisista kohdista, joissa mittausta ei voi suorittaa. Tällaisia paikkoja ovat esimerkiksi komerot, kaapit ja huoneistojen seinät. Lisäksi eroon vaikutti se, että joitakin magneettikentän mittauksia on tehnyt sähköyhtiö, jolloin mittauspisteiden tarkkaa sijaintia tai tarkkoja mittaustuloksia ei aina ole ollut saatavissa.

Usein kiinteistöjen piirustukset eivät täysin vastaa rakennuksen käytännön toteutusta. Myös muuntamoiden rakentamisessa rakentajat ovat usein tehneet omia ratkaisuja. Näiden seurauksena muuntamosta lasketun magneettikentän arvot saattavat tulla eri kohtaan kuin mittauksessa, jolloin mittaus- ja laskentatulosten ero kasvaa merkittävästi.

Mittaus- ja laskentatulosten eroon vaikuttaa myös muut kenttälähteet kuin muuntamo. Kiinteistömuuntamo onkin tässä suhteessa käsitettävä yhdeksi laitteeksi. Yksittäisen laitteen aiheuttamaa magneettikentän osuutta on lähes mahdoton saada selville käytännön olosuhteissa. Pelkän muuntamon magneettikentän mittaaminen onnistuu vain laboratorio-olosuhteissa.

LÄHTEET

- /1/ ABB Transmit Oy, Keskijännitekojeet ja -kojeistot, Muuntamot. Teslasafe-kiinteistömuuntamot - Uusi toteutustapa. Esite TESLASAFE 1 FI 97-08. 1997. 4 s.
- /2/ EMC ja rakennusten sähkötekniikka. 1997. Sähkötieto, Espoo. 198 s.
- /3/ Hongisto, M. & Valjus, J. Magneettikenttäaltistus 110-400 kV johtojen läheisyydessä. Vantaa, IVO-A-05/93 tutkimusraportteja. IVO Oy, ympäristönsuojeluyksikkö. 1993. 141 s.
- /4/ Keikko T., Isokorpi J. & Korpinen L. Pientaajuisten magneettikenttähäiriöiden pienentämismenetelmiä. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkövoimatekniikka, Raportti 9-97. 1997. 76 s.
- /5/ Keikko T., Kotiniitty J., Korpinen L., Elovaara J. & Vanhala P. Considering Electric and Magnetic Fields in Electric Power System Design in Finland. Cigre 2000, Group 36: Power System Electromagnetic Compatibility, Ranska, 36-102. 2000. 7 s.
- /6/ Keikko T., Kotiniitty J. & Korpinen L. Calculations of Magnetic Fields from Indoor Distribution Substation Bus Bars. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2000, Seattle, USA. 2000. 6 s.
- /7/ Korpinen, L., Hietanen, M., Jokela, K., Juutilainen, J. & Valjus, J. Voimajohtojen sähkö- ja magneettikentät ympäristössä. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 89. 1995. 210 s.
- /8/ Korpinen, L. Laitteiden ja elinympäristön sähkö- ja magneettikenttien mittaaminen. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 9/2000. 2000. 131 s.
- /9/ Kotiniitty J., Reivonen S., Kantell T., Keikko T. & Korpinen L. Kiinteistömuuntamoiden magneettikentät. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkövoimatekniikka, Teollisuuden sähkötekniikka, Raportti 1-99. 1999. 90 s.
- / Kursi, J. Sähköjohtojen 50 Hz kenttien laskenta-apuneuvot. Diplomityö. Tampere,
- 10/ Tampereen teknillinen korkeakoulu, sähkötekniikan osasto. 1995. 120 s.
- /11/ Kuusiluoma S. & Korpinen L.; Tuloksia kiinteistömuuntamoja koskevasta puhelinkyselystä. Raportissa: Leena Korpinen (toim.). Ajankohtaista käyttötaajuisista sähkö- ja magneettikentistä ympäristössä. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkövoimatekniikan laitos, raportti 3-2000. 2000. 6 s.

- / Schweitz, P. Ein Verfahren zur Berechnung von Dreidimensionalen Magnetfeldern im
12/ Nachbereich von Leitungen der Elektrischen Energieversorgung. *Electrization*, vol. 85, no 21. 1986. Ss. 827-831.
- / Suomen sähkölaitosyhdistys ry. Kiinteistömuuntamon aiheuttaman magneettikentän
13/ vaimentamiskeinoja. Julkaisusarja 4/93. 1993. 48 s.
- /
14/ Sähkötilasto 1997. Adato Energia Oy, Helsinki. 1998. 90 s.
- / Tikkanen J. Verkkotaajuiset magneettikentät jakelumuuntajan ympäristössä. Diplomityö.
15/ Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan osasto. 1992. 125 s.
- / Valjus, J. 50 Hz Electric And Magnetic Fields in the Environment: Studies of Health Effects
16/ on Man. Depart of Public Health, University of Helsinki, Kansanterveystieteen julkaisuja M 123. 1996. 60 s.
- / Vanhala, P. Muuntamoiden magneettikentät ja niiden vaimentaminen. Raportissa: Korpinen,
17/ L., Pääkkönen, R. & Partanen, J. (toim.): Käyttötaajuisien sähkö- ja magneettikenttien tekninen vähentäminen työympäristössä. Tampereen teknillinen korkeakoulu, sähköenergiajärjestelmät, raportti 5-93. 1993. 6 s.

7 MAGNEETTIKENTÄN VÄHENTÄMINEN ESIMERKKIMUUNTAMOISSA

Magneettikenttien kannalta muuntamossa eniten kannattaa kiinnittää huomiota muuntajan ja pienjännitekeskuksen väliseen kisko- tai kaapelisiltaan. Siinä esiintyvät muuntamon suurimmat virrat. Muuntaja ei ole yleensä merkittävä magneettikenttälähde, sillä magneettivuo pysyy hyvin muuntajan rautasydämessä tai vaimenee muuntajan öljysäiliössä. Pienjännitekojeiston aiheuttamat magneettikentät tulevat merkittäviksi vasta silloin, kun kisko- tai kaapelisillan magneettikenttiä on saatu pienennettyä. Seuraavassa käydään läpi, miten muuntamoiden kenttiä on vähennetty eri esimerkeissä.

7.1 Muuntamon rakenteen muuttaminen esimerkkimuuntamoissa

Muuntamon rakenteellisia muutoksia ovat kiskojen muuttaminen kaapeleiksi, kaapelin vaihejärjestyksen parantaminen, pienjännitesillan siirtäminen kauemmaksi häiriintyvistä kohteesta, muuntajan vaihtaminen kahteen pienempään, rakennuksen harhavirtojen vähentäminen sekä muuntajan ja pienjännitekeskuksen siirtäminen niin, että ne ovat selät vastakkain. /[4,5,6,11](#)/

Kiskojen muuttaminen kaapeleiksi

Muuntajan ja pienjännitekeskuksen välisen kiskosillan muuttaminen kaapelisillaksi pienentää magneettikenttää, koska kaapelisillassa vaiheväli saadaan kiskosilta pienemmäksi. Kaapelisilta saadaan myös vietyä ahtaampien paikkojen läpi kuin kiskosilta, joten sen reitti voidaan valita siten, että sen aiheuttamat magneettikenttähäiriöt ovat pienemmät kuin kiskosillan. Kolmivaihekaapelin poikkileikkauksessa johtimet sijaitsevat tasasivuisen kolmion kärkipisteissä, joka on kolmella johtimella symmetrisin geometria. Myös yksivaihekaapeleilla toteutettu kaapelisilta saadaan geometrisesti symmetriseksi, jos vaiheet sidotaan tiukasti toisiinsa. Sidontaan voidaan käyttää esimerkiksi nippusiteitä.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkimuuntamoissa T290, L254, T1387, H2453, H2793 ja T486. Kiskojen muuttamista kaapeleiksi ei oltu tehty ainoana muutostyönä missään muuntamossa. Muutostyön yhteydessä kaapelisilta oli asennettu yleensä lattialle ja vaihejärjestys oli tehty alkuperäistä paremmaksi. Taulukossa 7.1 on esitelty magneettikentän pienentyminen muuntamoissa, joissa muutostyö sisälsi kiskojen muuttamisen kaapeleiksi. Tulosten vertailu on tehty suurimman lasketun ja mitatun arvon perusteella.

Taulukko 7.1. Magneettikentän laskettu ja mitattu muutos muuntamoissa, joissa kiskot muutettu kaapeleiksi (vertailu alkuperäiseen rakenteeseen, virran muuttuminen huomioitu)

muutoksen laskennassa). Al on alumiini.

Muuntamo	Alku- peräinen laskettu, μT	Alku- peräinen mitattu, μT	Muutostyö	Rakenne muutettu, laskettu, μT	Rakenne muutettu, mitattu, μT	Laskettu muutos, %	Mitattu muutos, %
T290	2,56	***	Kiskot kaapeleiksi, alkuperäistä alempana, vaihejärjestys optimoitu	1,58	1,56	38,3	*
L254	10,7	n. 20**	Kiskot lattialla kulkeviksi kaapeleiksi	1,51	n. 3**	85,9	85,0**
T1387	458,7	***	Kaksi 1000 kVA:n öljyeristeistä muuntajaa, silta kaapeleiksi	166,6	151,6	55,2	***
H2453	3,33	n. 3,3	Silta uusittu, kaapelit lattialla ja 5 mm Al-kouru	0,70	-	79,0	***
H2793	5,23	4,23	Kiskot vaihdettu kaapelisillaksi ja 5 mm Al-kouru	0,31	0,40	90,8	85,3
T486	2,81	*	Kaapeli lattialla, vaihejärjestys ei symmetroituu	-	-	-	-

* toinen mittaus 0,75 m korkeudella, ** lattialla,*** toinen mittaus puuttuu

Muutostöiden pienennysvaikutukset ovat laskentatulosten perusteella välillä 38,3% - 90,8%. Suuri hajonta syntyy ennen muuta muista muutostöistä, joita rakenteeseen on tehty. Niillä voi olla jopa suurempi merkitys kenttien pienemiseen kuin kiskojen muuttamisella kaapeleiksi. Muuntamoissa, joista on olemassa mittaustuloksia, vaimennusvaikutus on ollut noin 85%.

Muuntamossa L254 muuntajan ja pienjännitekeskuksen välinen kiskosilta on muutettu lattialla kulkeviksi kaapeleiksi. Magneettikenttä on pienentynyt laskentatulosten mukaan yli 80%. Lähes samanlainen muutos oli tehty muuntamossa H2453. Erona oli pienjännitekaapelisilta, joka oli tässä muuntamossa koteloitu 5 mm paksulla alumiinikotelolla. Magneettikenttä on pienentynyt myös tämän muuntamon kohdalla laskentatulosten mukaan noin 80%. Magneettikentän pienentyminen oli laskennan perusteella 0,9% suurempi metrin korkeudella lattiasta kuin mittausten perusteella yläpuolisen tilan lattialla.

Muuntamossa T1387 yksi 2000 kVA kuivamuuntaja on vaihdettu kahdeksi 1000 kVA öljyeristeiseksi muuntajaksi. Sähköyhtiössä päädyttiin tällaiseen ratkaisuun, koska muuntamo jouduttiin uusimaan muuttuneen kuormituksen takia. Muutoksen yhteydessä vaihdettiin kiskosilta kahdeksi kaapelisillaksi, joiden sijainti pyrittiin saamaan optimaaliseksi viereisessä tilassa olleeseen mahdollisesti häiriintyvään kohteeseen nähden. Magneettikenttää tutkittiin muuntamotilassa, koska viereiseen teollisuustilaan ei ollut mahdollista päästä. Muutoksesta johtuen magneettikenttä pieneni muuntamossa yli 50%.

Kiskojen muuttaminen kaapeleiksi pitää suunnitella sekä materiaalien osalta että työn osalta etukäteen. Kaapelit pitää olla ennen työn aloittamista valmiina ja sopivan pituisina pätkinä. Myös

kaapelikengät pitää hankkia etukäteen. Jos muuntamon pienjännitekeskus sijaitsee eri tilassa kuin muuntaja, joudutaan myös tilojen välinen palosulku uusimaan. Tarvikekustannukset ovat suuruusluokaltaan noin 1 500 mk, palosulku noin 1 000 mk ja kahden työntekijän yhden päivän työ 2 500 mk. Suunnittelukustannuksista voi olla vaikea rajata muutostyön suunnittelun osuutta.

Lisäksi kustannuksia tulee myös siitä, että kiskojen muuttaminen kaapeleiksi vaatii aina käyttökeskeytyksen. Korvaavan sähkön tuottaminen tai korvaavan yhteyden käyttö lisää muutostyön kustannuksia.

Kaapelisillan vaihejärjestyksen parantaminen

Magneettikenttää voidaan vähentää kaapelien vaihejärjestystä parantamalla. Vähentämiskeino sopii kaapelisillan, jossa vaihetta kohden on kaksi tai useampi johdin. Vaihejärjestyksessä pyritään mahdollisimman symmetriseen johdinjärjestykseen. Vaihejärjestysvaihtoehtoja on paljon. Yksi vaihtoehto on tehdä kaapelisilta suurvirtakaapelijärjestelmän mukaisesti, jolloin johtimet voidaan tukea suurvirtakaapelijärjestelmään tarkoitettujen tukieristimien avulla. Voidaan myös käyttää nippusiteitä, joilla kuitenkin kaapelien järjesteleminen ei ole helppoa. Kuvassa 7.1 on esitetty esimerkkejä symmetrisestä vaihejärjestyksestä sillalle, jossa on kaksi johdinta vaihetta kohden ja yksi PEN-johdin.



Kuva 7.1. Muuntajan ja pienjännitekeskuksen välisen kaapelisillan symmetrisiä vaihejärjestyksiä.

Kun osajohtimia on enemmän, myös mahdollisten symmetristen vaihejärjestysten määrä kasvaa. Toteutettavan rakenteen valintaan vaikuttaa magneettikentän vähentämistavoitteiden lisäksi käytettävissä oleva tila. Usein kaapelisillalle varattua reittiä ei ole mahdollista suurentaa, joten kaapelisillan muoto pitää valita tilaan sopivaksi.

Symmetrisessä tilanteessa nollajohtimen sijoittamisella ei ole merkitystä, koska nollajohtimen virta on nolla. Sähköisesti epäsymmetrisiä kuormituksia varten nollajohdin on hyvä sijoittaa mahdollisimman lähelle vaihejohtimia ja viedä se samaa reittiä kuin vaihejohtimet. Tavallisessa jakelumuuntamossa nollajohtimen sijoittaminen on magneettikenttien kannalta käytännössä hankalaa, koska kuormitus ei yleensä ole symmetrinen. Nollajohdin kannattaa sijoittaa lähelle vaihejohtimia, että virtojen aiheuttama magneettikenttä kumoutuisi mahdollisimman hyvin.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkimuuntamoissa T290, H2605, H2793, T53 ja T1217. Kaapelien vaihejärjestyksen parantamista ei oltu tehty ainoana muutostyönä missään muuntamossa. Taulukossa 7.2 on esitelty magneettikentän pienentyminen muuntamoissa, joissa muutostyö sisälsi kaapelien vaihejärjestyksen parantamisen.

Taulukko 7.2. Magneettikentän laskettu ja mitattu muutos muuntamoissa, joissa kaapelien vaihejärjestystä on parannettu (vertailu alkuperäiseen rakenteeseen, virran muuttuminen huomioitu muutoksen laskennassa). Al on alumiini.

Muuntamo	Alkuperäinen laskettu, μT	Alkuperäinen mitattu, μT	Muutostyö	Rakenne muutettu, laskettu, μT	Rakenne muutettu, mitattu, μT	Laskettu muutos, %	Mitattu muutos, %
T290	2,56	**	Kiskot kaapeleiksi, alkuperäistä alempana, vaihejärjestys optimoitu	1,58	1,56	38,3	*
H2605	1,22	n. 1,5	Silta laskettu	0,90	n. 1,0	26,2	33,3

			metriä alemmaksi, vaihejärjestys optimoitu				
H2793	5,23	4,23	Kiskot vaihdettu kaapelisillaksi ja 5 mm Al-kouru	0,31	0,40	90,8	85,3
T53	0,49	0,49	Kaapeli lattialla, vaihejärjestys symmetroidu	-	-	-	-
T1217	1,61	2,19	Kaapeli katossa, symmetroidu	-	-	-	-

* toinen mittaus 0,75 m korkeudella, ** toinen tapaus puuttuu

Muutostöiden pienennysvaikutukset ovat laskentatulosten perusteella välillä 26,2% - 90,8%. Mitatuissa muuntamoissa vaimennusvaikutus on ollut 33,3% ja 85,3%. Myös tämän muutostyön vaikutus tulee yhdistettynä muihin muutostöihin, koska pelkästään vaihejärjestyksen parantamista ei oltu käytetty missään muuntamossa.

Esimerkkinä muutostyöstä muuntamossa H2793 kiskosilta on vaihdettu vaihejärjestykseltään optimoiduksi kaapelisillaksi. Vaihejärjestyksen optimointi on toteutettu käyttämällä kaapelien tuentaan suurvirtakaapelijärjestelmän tukieristimiä.

Kaapelin vaihejärjestyksen parantamisesta ei aiheudu lisäkustannuksia, jos se tehdään heti muuntamon asennuksen yhteydessä. Myös muutostyönä tehty kaapelien vaihejärjestyksen parantaminen ei aiheuta merkittäviä kustannuksia. Kustannukset ovat lähes pelkästään työkustannuksia. Kahdelta työntekijältä muutostyöhön kuluu aikaa noin puoli päivää, joten kustannus on noin 1 000 mk.

Pienjännitesillan siirtäminen kauemmaksi häiriintyvistä kohteesta

Häiriintyvän kohteen ja pienjännitesillan välisen etäisyyden pienikin kasvattaminen vaikuttaa magneettikenttään merkittävästi. Pienjännitesillan siirtäminen on kiskosillalla huomattavasti hankalampaa kuin kaapelisillalla. Yleensä häiriintyvä kohde on muuntamon yläpuolisessa tilassa, jolloin pienjännitesillaa pitää siirtää alemmaksi. Kun korkealla, esimerkiksi muuntamon katossa olevaa kiskosillaa siirretään alemmaksi, joudutaan ottamaan huomioon myös henkilöturvallisuusasiat. Jos kiskosilta on muutoksen jälkeen kosketusetäisyydellä, täytyy siihen rakentaa kosketussuoja. Kaikki kiskosillan muutostyöt vaativat käyttökeskeytyksen.

Kaapelisillan siirtäminen alemmaksi on nopea toimenpide, jos sillan päitä ei jouduta irrottamaan. Kaapelisillaa ei jouduta uusimaan edellä mainitussa tapauksessa, joten magneettikentän vähentämiseen liittyvät muutostyön kokonaiskustannukset ovat pieniä. Yksinkertaisin muutostyö on laskea kaapelisilta lähellä kattoa kulkevalta kaapelihyllyltä muuntamon lattialle.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkimuuntamoissa T290, L254, T1387, H2453, T573, H2605, H2793, T53, H37 ja K38. Pienjännitesillan siirtäminen kauemmaksi häiriintyvistä kohteesta oli muuntamossa H2605 ainoa muutostyö. Muissa muuntamoissa muutostyön yhteydessä oli tehty myös muita muutoksia. Taulukossa 7.3 on esitelty magneettikentän pienentyminen muuntamoissa, joissa muutostyö sisälsi pienjännitesillan siirtämisen kauemmaksi häiriintyvistä kohteesta.

Taulukko 7.3. Magneettikentän laskettu ja mitattu muutos muuntamoissa, joissa pienjännitesilta siirretty kauemmaksi häiriintyvistä kohteesta (vertailu alkuperäiseen rakenteeseen, virran muuttuminen huomioitu muutoksen laskennassa). Al on alumiini.

Muuntamo	Alku-peräinen	Alku-peräinen	Muutostyö	Rakenne muutettu,	Rakenne muutettu,	Laskettu muutos,	Mitattu muutos,
-----------------	----------------------	----------------------	------------------	--------------------------	--------------------------	-------------------------	------------------------

	laskettu, μT	mitattu, μT		laskettu, μT	mitattu, μT	%	%
T290	2,56	***	Kiskot kaapeleiksi, alkuperäistä alempana, vaihejärjestys optimoitu	1,58	1,56	38,3	*
L254	10,7	n. 20**	Kiskot lattialla kulkeviksi kaapeleiksi	1,51	n. 3**	85,9	85,0**
T1387	458,7	***	Kaksi 1000 kVA:n öljyeristeistä muuntajaa, silta kaapeleiksi	166,6	151,6	55,2	***
H2453	3,33	n. 3,3	Silta uusittu, kaapelit lattialla ja 5 mm Al-kouru	0,70	***	79,0	***
T573	13,6	n. 10	Silta laskettu niiltä osin, kuin onnistunut ilman keskeytystä	10,8	n. 8	20,6	20,0
			Silta laskettu koko matkalta	1,60	n. 1,3	88,0	86,7
H2605	1,22	n. 1,5	Silta laskettu metriä alemmaksi	0,90	n. 1,0	26,2	33,3
H2793	5,23	4,23	Kiskot vaihdettu kaapelisillaksi ja 5 mm Al-kouru, kaapelisilta alkuperäistä alempana	0,31	0,40	90,8	85,3
T53	0,49	0,49	Kaapeli lattialla, vaihejärjestys symmetroidu	-	-	-	-
H37	2,98	3,83	Kiskot muualla kuin katossa	-	-	-	-
K38	0,72	***	Kaapeli lattialla, vaihejärjestystä ei symmetroidu	-	-	-	-

* toinen mittaus 0,75 m korkeudella, ** lattialla, *** mittaus puuttuu

Muuntamossa H2605 kaapelisillaa on laskettu metri alkuperäistä rakennetta alemmaksi. Muutostyön vaimennusvaikutus oli laskentatulosten perusteella 26,2% ja mittaustulosten perusteella 33,3%. Muutostyön vaikutus tulee kaikissa muissa muuntamoissa yhdistettynä muihin muutostöihin, koska pelkästään pienjännitesillan siirtämistä kauemmaksi häiriintyvistä kohteesta ei oltu käytetty muissa muuntamossa. Muissa muuntamoissa pienennysvaikutukset ovat laskentatulosten perusteella välillä 20,6% - 90,8% ja mitatuissa muuntamoissa 20,0% - 86,7%.

Muuntamossa T573 kaapelisillan osittainen lattialle laskeminen on pienentänyt magneettikenttää

mittaus- ja laskentatulosten perusteella 20%. Kun kaapelisilta laskettiin kokonaan lattialle, magneettikenttä pienentyi mittaustulosten perusteella yli 80% yläpuolisen tilan lattialla. Muuntamossa H2605 symmetroitua kaapelisiltaa on laskettu yksi metri alemmaksi kuin alkuperäisessä tapauksessa, jolloin pienennysvaikutus oli 26%.

Pienjännitesillan siirtäminen kauemmaksi häiriintyvistä kohteesta voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Jos muutostyö tehdään nopeasti lyhyellä keskeytyksellä, esimerkiksi kaapelit siirretään kaapelihyllyltä muuntamon lattialle niiltä osin kuin se ei vaadi keskeytystä, ainoa kustannus on työkustannus. Kahdelta työntekijältä muutostyöhön kuluu aikaa noin puoli päivää, joten kustannus on noin 1 000 mk.

Jos asennuksessa joudutaan siirtämään kaapelit suoja-aidan alle, vaihtamaan kaapelit tai poraamaan betoniseinään kaapeleille aukko, kustannukset saattavat kasvaa huomattavasti. Esimerkiksi betoniin tehtävä aukko aiheuttaa kustannuksia timanttisauhauksella toteutettuna noin 1 500 mk. Muutostyö pitää suunnitella ennalta materiaalien, työkalujen ja työn osalta, joten suunnittelukustannukset vaikuttavat muutostyön kokonaiskustannuksiin.

Muuntajan vaihtaminen kahteen pienempään

Usein magneettikenttiin liittyvät muutostyöt tehdään muuntamon uusimisen yhteydessä. Jos muuntamo uusitaan lisääntyneen kuormituksen takia, voidaan myös joutua uusimaan muuntaja. Tällaisessa tapauksessa kannattaa harkita mahdollisuutta vaihtaa muuntaja kahteen pienempään muuntajaan yhden ison asemasta. Kahta muuntajaa käytettäessä kuormitus jakaantuu kahdelle pienjännitesillalle, joiden sijoittaminen voidaan suunnitella niin, että mahdollisesti häiriintyvän kohteen sijainti otetaan huomioon.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkimuuntamossa T1387. Muutostyön takia magneettikenttä pieneni laskennan perusteella muuntamossa 55,2%.

Muuntajan vaihtaminen kahteen pienempään pitää suunnitella materiaalien ja työn osalta etukäteen. Muuntamossa T1387 kustannukset olivat 113 300 mk ilman suunnittelu- ja keskeytyskustannuksia. Muuntamoon hankittiin yksi uusi muuntaja, kaapelia molempiin kaapelisiltoihin ja tarvittava määrä kaapelikenkiä. Toinen muuntaja siirrettiin muuntamoon varastosta.

Rakennuksen harhavirtojen vähentäminen

Rakennuksen sähköjärjestelmä saattaa olla rakenteeltaan sellainen, että rakennuksessa esiintyy harhavirtoja. Jos rakennuksessa on TN-C -jakelujärjestelmä eli nelijohdinjärjestelmä, yhdistetty suoja- ja käyttömaajohdin (PEN-johdin) toimii harhavirralla virtapiirin osana. Harhavirta voi esiintyä rakennuksen kaikissa maan kanssa johtavassa yhteydessä olevissa rakenteissa, kuten lämpöpattereissa, metallisissa vesijohdoissa, viemäreissä tai tukipalkeissa. Sähköjärjestelmän rakenne olisi TN-S -jakelujärjestelmää käytettäessä harhavirtojen kannalta parempi ja siten myös magneettikenttien kannalta parempi.

Toinen harhavirtaa mahdollisesti aiheuttava sähköjärjestelmän osa on jakelumuuntamo. Vanhan asennuskäytännön mukaisesti muuntajan maadoitus voi olla sekä maadoituskiskoon että muuntajan nollaliittimeen. Tästä on kuitenkin seurauksena harhavirtareitti, joka vaikuttaa rakennuksessa esiintyviin magneettikenttiin. Harhavirta vaikuttaa erityisesti kolmella jaollisiin parittomiin yliaaltoihin, jotka voivat olla esimerkiksi tietokoneen näytön häiriintymisen syynä. Magneettikenttien vähennyskeinona voidaan harhavirtareitti katkaista, jolloin myös magneettikentän kolmella jaolliset yliaallot vähenevät.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkimuuntamoissa H2793 ja H302. Muuntamossa H2793 magneettikenttä mitattiin ennen muutostyötä ja sen jälkeen. Muutostyön ansiosta magneettikentän kolmella jaolliset parittomat yliaallot pienenevät noin 60%. Muuntamon H302 muutostyön yhteydessä ei tehty magneettikenttämittausta.

Harhavirtojen poistaminen ei aiheuttanut mitään kustannuksia kummassakaan tarkastellussa muuntamossa. Harhavirtareittinä toiminut muuntajan ylimääräinen maadoitus katkaistiin tongeilla.

Muutostyössä ei tarvittu edes käyttökeskeytystä, koska maadoitus on maan potentiaalissa.

Muuntaja ja pienjännitekeskus selät vastakkain

Mahdollisimman lyhyt muuntajan ja pienjännitekeskuksen välinen kisko- tai kaapelisilta vähentää magneettikentän leviämistä muuntamon yläpuoliseen tai sivulla olevaan tilaan. Pienjännitesilta on lyhyt muuntamorakenteessa, jossa muuntaja ja pienjännitekeskus sijoitetaan selät vastakkain. Myös pienjännitesillan tuennan ei tarvitse olla yhtä vankka kuin pitkän pienjännitesillan tapauksessa, koska johtimien väliset voimat ovat pienempiä. Selät vastakkain -rakenteessa pienjännitesiltaa ei tarvitse tukea esimerkiksi kattoon, joten myös etäisyys yläpuoliseen tilaan tulee suuremmaksi.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkimuuntamoissa H302 ja H447. Muuntamot oli suunniteltu alkuperäiseltä rakenteeltaan pienikenttäisiksi, jolloin niillä ei ole vertailtavaa rakennetta.

Muuntajan ja pienjännitekeskuksen asennus on tapahtunut esimerkkimuuntamoilla rakentamisen yhteydessä. Rakenteen suunnittelusta, asennuksesta tai materiaaleista ei aiheudu ylimääräisiä kustannuksia. Hyvänä puolena on lisäksi muuntamon pieni koko, joka mahdollistaa muuntamon asentamisen melko pieneen tilaan.

7.2 Muuntamon pienjännitesillan suojaaminen esimerkkimuuntamoissa

Muuntamon pienjännitesillan suojaus voidaan toteuttaa metallikourulla, -kotelolla tai -levyllä. Suurvirtajärjestelmien suojaustapauksissa, esimerkiksi teollisuuskäytöissä, on otettava huomioon suojausten lämmönsiirtoa huonontava vaikutus kuormitettavuutta arvioitaessa. Suoja saattaa estää konvektion eli lämmön siirtymisen pienjännitesillasta ympäröivään ilmaan. Tilannetta saattaa huonontaa myös se, ettei ilmavirta suojausten jälkeen pääse liikkumaan vapaasti. /4,5,6,11/

Suojaamisen kustannukset vaihtelevat asennuksen laajuudesta riippuen huomattavasti. Muutostyön kustannukset ovat olleet noin 400 - 200 000 mk. Pienimmät kustannukset syntyvät pienestä suojasta, esimerkiksi pienjännitekeskuksen taakse asennetusta 5 mm paksusta alumiinilevystä. Ylärajalle päädytään, jos vuorataan koko muuntamo 5 mm paksulla alumiinilla. Työhön vaikuttaa materiaalikulujen lisäksi suunnittelu- ja työkustannukset. Muutostyön kokonaiskustannuksia laskettaessa kannattaa kustannusten laskennassa ottaa huomioon muutostyöstä saatava magneettikentän pieneminen. Suojauksesta syntyy myös häviökustannuksia jakeluyhtiölle. Magneettikenttien vertailun voi tehdä laskennan avulla tai kokemukseräisesti, tosin molemmilla menetelmillä tehty vertailu sisältää lukuisasti epävarmuustekijöitä. Jos pienemmällä kustannuksella kuitenkin päästään vastaavaan magneettikentän pienentymiseen kuin koko muuntamon vuorauksella, ei vuoraus ole järkevä vaihtoehto.

Myös tavoitetaso kannattaa miettiä ennen muutostyöhön ryhtymistä. Laskennan avulla kannattaa varmistaa, että suunnitellun muutostyön avulla päästään riittävän pieneen magneettikenttään.

Metallikouru

Magneettikenttien suojauksessa voidaan käyttää hyvin johtavaa tai ferromagneettista materiaalia. Johtavalla materiaalilla suojaus perustuu indusoituihin pyörrevirtoihin, jotka asettuvat materiaaliin kokonaisenergian kannalta optimaalisesti. Ferromagneettisella materiaalilla suojausvaikutus perustuu materiaalin hyvään magneettivuon johtokykyyn, joka ohjaa magneettivuon materiaaliin.

Käytännön suojauksissa käytetään yleensä mahdollisimman puhdasta alumiinia /13/. Muuntajan ja pienjännitekeskuksen välisen kisko- tai kaapelisillan suojauksessa voidaan käyttää alumiinikourua. Tärkeää kourussa on, että koko kouru tehdään hyvin johtavaksi. Tämän takia mahdolliset liitokset olisi hyvä tehdä hitsaamalla /13/. Kouru voidaan magneettikenttien suojauksen kannalta asentaa joko aukeamaan ylös tai alas. Kourun suunta ei vaikuta suojaukseen merkittävästi. Käytännön kannalta kouru on joissakin tapauksissa helpompi asentaa kuin kotelo.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkimuuntamoissa H2453 ja H2793. Kourun asentamisen yhteydessä kummassakin esimerkkimuuntamossa kiskosilta oli vaihdettu kaapelisillaksi. Kouru oli molemmissa muuntamoissa tehty alumiinista. Taulukossa 7.4 on esitelty magneettikentän

pienentyminen muuntamoissa, joissa muutostyö sisälsi kourun asentamisen.

Taulukko 7.4. Magneettikentän laskettu ja mitattu muutos muuntamoissa, joissa magneettikentän pienentämiseen käytetty metallikourua (vertailu alkuperäiseen rakenteeseen, virran muuttuminen huomioitu muutoksen laskennassa). Al on alumiini.

Muuntamo	Alku-peräinen laskettu, μT	Alku-peräinen mitattu, μT	Muutostyö	Rakenne muutettu, laskettu, μT	Rakenne muutettu, mitattu, μT	Laskettu muutos, %	Mitattu muutos, %
H2453	3,33	n. 3,3	Silta uusittu, kaapelit lattialla ja 5 mm Al-kouru	0,70	*	79,0	*
H2793	5,23	4,23	Kiskot vaihdettu kaapelisillaksi ja 5 mm Al-kouru	0,31	0,40	90,8	85,3

* toinen mittaus puuttuu

Molemmissa taulukon muuntamoissa oli alumiinikourun asentamisen lisäksi tehty muita muutostöitä. Kourun vaikutus tulee molemmissa muuntamoissa yhdistettynä muihin muutostöihin. Muutostyön vaimennusvaikutus oli laskentatulosten perusteella 80% - 90% ja mittaustulosten perusteella 85%.

Metallikotelo

Pienjännitesillan suojaus voidaan toteuttaa käytännössä alumiinikotelolla. Myös alumiinikotelolla suojaus perustuu indusoituviin pyörrevirtoihin. Valmiin kotelon asentaminen kisko- tai kaapelisillan päälle voi joissakin rakenteissa olla hankalaa. Tämä on ratkaistu käytännössä niin, että ensin on tehty alumiinikouru ja se on täydennetty koteloksi asentamalla kouruun kansilevy. Jottei vaurioitettaisi suojan sisällä olevia eristeitä, kourua ja kantta ei ole aina hitsattu, vaan on tyydytty johtamattomien saumojen mahdollisesti aiheuttamaan suojauksen heikkenemiseen.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkimuuntamoissa H302, H2793 ja H276. Kotelo oli muuntamoissa tehty alumiinistä. Alumiinikotelon asentaminen oli muuntamoissa H302 ja H276 ainoa muutostyö. Muuntamossa H2793 sitä vastoin muutostyön yhteydessä oli tehty myös muita muutoksia. Taulukossa 7.5 on esitelty magneettikentän pienentyminen muuntamoissa, joissa muutostyö sisälsi kotelon asentamisen.

Taulukko 7.5. Magneettikentän laskettu ja mitattu muutos muuntamoissa, joissa magneettikentän pienentämiseen käytetty metallikotelo (vertailu alkuperäiseen rakenteeseen, virran muuttuminen huomioitu muutoksen laskennassa). Al on alumiini.

Muuntamo	Alku-peräinen laskettu, μT	Alku-peräinen mitattu, μT	Muutostyö	Rakenne muutettu, laskettu, μT	Rakenne muutettu, mitattu, μT	Laskettu muutos, %	Mitattu muutos, %
H302	2,54	n. 2,3	Asennettu 3 mm Al-kotelo	0,27	n. 1,7	89,4	26,1
H2793	5,23	4,23	Kouru täydennetty 5 mm Al-koteloksi	0,39	0,39	90,3	88,0
H276	12,2	12,0	Kiskot suojattu 5 mm Al-kotelolla	0,99	n. 2,1	91,9	82,5

Metallikotelon pienennysvaikutus on ollut laskentatulosten perusteella noin 90%. Käytännössä

tulokset ovat kuitenkin jääneet hieman alle laskennan avulla odotettavissa olevista tuloksista. Yksi tähän vaikuttava seikka on suojan rakentamisessa heikkenevät levyn sähköiset ominaisuudet. Materiaalissa tulee muutoksia esimerkiksi kulmien tekemisessä ja hitsauksessa. Toinen suojauksen pienennysvaikutusta heikentävä seikka on muuntamon muut sähköjohtimet ja sähkön syötöt, joiden vaikutus voidaan havaita erityisesti muuntamon H302 tuloksissa.

Metallilevy

Koko muuntamon vuoraus alumiinilevyllä on huomattavan kallis investointi. Sitä vastoin esimerkiksi pienjännitekeskuksen suojaus alumiinilevyllä voi olla käytännön ratkaisu, jos magneettikenttähäiriön syy saadaan kohdistettua johonkin muuntamon laitteeseen. Tällainen esimerkki on pienjännitekeskus, jossa kojeisto on rakennettu muuntamon sisällä ja keskuksessa oleva kiskosto on avorakenteinen. Alumiinilevyllä on päästy hyvään suojaukseen. Asentamalla se mahdollisimman lähellä kiskostoa alumiiniin indusoituvat pyörrevirrat pienentävät magneettikenttää myös yläpuolisesta tilasta tarkasteltuna.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkinuuntamoissa T573, H2793, Tu96-011 ja T1369. Metallilevy oli muuntamoissa tehty alumiinista. Alumiinilevyn asentaminen oli muuntamoissa Tu96-011 ja T1369 ainoa muutostyö. Muuntamoissa T573 ja H2793 muutostyön yhteydessä oli tehty myös muita muutoksia. Taulukossa 7.6 on esitelty magneettikentän pienentyminen muuntamoissa, joissa muutostyö sisälsi suojalevyn asentamisen.

Taulukko 7.6. Magneettikentän laskettu ja mitattu muutos muuntamoissa, joissa magneettikentän pienentämiseen käytetty metallilevyä (vertailu alkuperäiseen rakenteeseen, virran muuttuminen huomioitu muutoksen laskennassa). Pjk on pienjännitekeskus ja Al on alumiini.

Muuntamo	Alku-peräinen laskettu, μT	Alku-peräinen mitattu, μT	Muutostyö	Rakenne muutettu, laskettu, μT	Rakenne muutettu, mitattu, μT	Laskettu muutos, %	Mitattu muutos, %
T573	13,6	n. 10	Pjk:n taakse asennettu 5 mm Al-levy	1,60	n. 1,3	87,6	86,3
H2793	5,23	4,23	Keskijännitekojeiston päälle asennettu 5 mm Al-levy	0,39	**	90,3	**
Tu96-011	5,42	*	Muuntamon seinässä 5 mm Al-levy	2,61	*	51,8	*
T1369	0,36	**	Rakentamisessa muuntamon seinään 4 mm alumiinilevy	0,31	0,26	13,9	**

* ei mittauksia, ** toinen mittaus puuttuu

Muutostyön vaimennusvaikutus oli laskentatulosten perusteella 13,9% - 90,3% ja mittatussa muuntamossa 86,3%. Pienjännitekeskuksen taakse ja keskijännitekojeiston päälle asennetuilla alumiinilevyillä on päästy melko hyviin tuloksiin muuntamoissa T573 ja H2793. Näissä muuntamoissa on tehty alumiinilevyn asentamisen lisäksi myös muita muutostöitä. Pelkän alumiinilevyn vaikutus oli kummassakin muuntamossa noin 50%, mutta vaimennusvaikutus rajoittui melko pienelle alueelle. Myös muuntamossa Tu96-011 on päädytty noin 50% vaimennusvaikutukseen, kun muuntamon ja viereisen tilan seinään on asennettu 5 mm alumiinilevy. Muuntamossa T1369 vaimennusvaikutus on jäänyt laskennan perusteella huomattavasti pienemmäksi. Yksi syy tähän on se, että tässä muuntamossa on kiskosillan etäisyys alumiinilevyn huomattavasti muita rakenteita suurempi.

7.3 Muuntamossa useita muutosvaiheita

Muuntamoissa T573 ja H2793 muutokset tehtiin useissa muutosvaiheissa. Muuntamossa T573 ensisijaisena muutostyönä pyrittiin kasvattamaan mahdollisimman paljon etäisyyttä häiriintyvään kohteeseen. Lisäksi pienjännitekeskuksen taakse asennettiin 5 mm paksu alumiinilevy. Muuntamossa H2793 kiskot vaihdettiin kaapeleiksi ja vaimennettiin magneettikenttää alumiinikourulla ja -kotelolla toteutetun suojauksen avulla. Taulukossa 7.7 on esitelty magneettikentän pienentyminen muuntamon muutostöiden eri vaiheissa.

Taulukko 7.7. Magneettikentän laskettu ja mitattu muutos muuntamoissa, joissa magneettikentän pienentäminen toteutettu useiden muutosvaiheiden kautta (vertailu alkuperäiseen rakenteeseen, virran muuttuminen huomioitu muutoksen laskennassa). Al on alumiini.

Muuntamo	Alku-peräinen laskettu, μT	Alku-peräinen mitattu, μT	Muutostyö	Rakenne muutettu, laskettu, μT	Rakenne muutettu, mitattu, μT	Laskettu muutos, %	Mitattu muutos, %
T573	13,6	n. 10	Silta laskettu niiltä osin, kuin onnistunut ilman keskeytystä	10,8	n. 8	20,6	20,0
			Silta laskettu koko matkalta	1,60	n. 1,3	88,0	86,7
			Pjk:n taakse asennettu 5 mm Al-levy	1,60	n. 1,3	87,6	86,3
H2793	5,23	4,23	Kiskot vaihdettu kaapelisillaksi ja 5 mm Al-kouru	0,31	0,40	90,8	85,3
			Kouru täydennetty koteloksi	0,39	0,39	90,3	88,0
			Keskijännitekojeiston päälle asennettu 5 mm Al-levy	0,39	*	90,3	*

*mittaus puuttuu

Muuntamossa T573 kaapelisillan osittainen lattialle laskeminen on pienentänyt magneettikenttää mittaus- ja laskentatulosten perusteella 20%. Kun kaapelisilta laskettiin kokonaan lattialle, magneettikenttä pienentyi lähes 90% yläpuolisen tilan lattialla metrin korkeudella. Muuntamossa T573 asennettiin myös 5 mm paksu alumiinilevy suojaamaan muuntamon pienjännitekeskuksen vaakatasossa olevan kiskoston aiheuttamaa magneettikenttää. Muuntamoon asennettu alumiinilevy vaikutti lähinnä sillä kohtaa, missä pienjännitekojeisto sijaitsee. Tällä kohtaa magneettikenttä pienentyi suojan vaikutuksesta noin 50%. Suojauksella ei ollut vaikutusta yläpuolisen asunnon magneettikenttään, jos tarkastellaan pelkästään suurinta arvoa. Laskennan perusteella päädyttiin lähes saman suuruiseen magneettikentän pienentymiseen kuin mittauksien perusteella. Erot lasketun ja mitatun magneettikentän pienentymisen välillä ovat 0,6%, 1,2% ja 0,4%.

Muuntamossa H2793 kiskosilta on vaihdettu vaihejärjestykseltään optimoiduksi kaapelisillaksi ja samalla magneettikenttien vaimentamiseksi on asennettu lisäksi 5 mm paksu alumiinikouru. Vaihejärjestyksen optimointi on toteutettu käyttämällä kaapelien tuentaan suurvirtakaapelijärjestelmän tukieristimiä. Alumiinikouru on asennettu alhaalta päin. Seuraavana muutostyönä kouru on täydennetty koteloksi. Magneettikenttä on laskentatulosten perusteella pienentynyt noin 90% alkuperäisestä kummankin muutostyön avulla. Mittamalla ei saatu kuitenkaan aivan yhtä hyviä tuloksia. Kun muuntamoon on lisätty keskijännitekojeiston päälle 5

mm paksusta alumiinilevystä tehty suoja, ei olla enää päästy pienempään magneettikenttään. Sitä vastoin alumiinisuojan lisäämisellä on ollut vaikutusta yläpuolisessa tilassa sillä kohtaa, missä keskijännitekojeisto sijaitsee. Siellä kenttä on pienentynyt suojan vaikutuksesta noin 50%. Erot lasketun ja mitatun magneettikentän pienentymisen välillä olivat 1,2% ja 2,1%.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkimuksessa tarkasteluun otettiin 20 muuntamoita, joista 10:ssä oli tehty muutostöitä magneettikenttien vähentämiseksi. Näistä muuntamoista, joissa oli tehty muutostöitä, osassa muutostyöt oli tehty erillisinä muutosvaiheina, jolloin yhdestä muuntamosta saatiin useampi kuin kaksi rakennetta. Yhteensä näistä 10 muuntamosta saatiin tutkittavaksi 24 rakennetta. Lopuista 10 muuntamosta laskettiin 11 eri rakennetta, koska yhdessä muuntamossa oli jo rakennusvaiheessa asennettu muuntamon ja viereisen tilan väliseen seinään alumiinilevy.

Tarkastellussa muuntamoaineistossa oli kiskot 11 muuntamossa (55%) ja kaapelit 9 muuntamossa (45%). Ryhmiteltäessä muuntamoita muuntajan ja pienjännitekeskuksen välisen kiskosillan rakenteen mukaan, merkittävin ryhmä on kiskot lappeellaan ja kiinnitetty lähelle kattoa (20%). Kaapelisilloista yli puolet oli lähellä kattoa.

Tutkimus perustuu sähköyhtiöiltä saataviin rakennepiirustuksiin toteutetuista kiinteistömuuntamoiden magneettikenttien vähentämiskäytännöistä. Sähköyhtiöt olivat myös tehneet joissakin muuntamoissa magneettikenttämittauksia, joiden tuloksia saatiin käytettäväksi. Rakennepiirustuksien avulla muuntamoiden muuntajan ja pienjännitekeskuksen välinen kisko- tai kaapelisilta digitoitiin, ja muuntamosta tehtiin magneettikentälaskenta. Raportissa on analysoitu muuntamoiden rakenteita sekä magneettikentän mittaus- ja laskentatuloksia. Näiden perusteella on pyritty löytämään tiettyyn muuntamon rakenteeseen sopiva magneettikentän vähentämiskäytäntö. Tutkimuksen aikana on tehty myös kenttämittauksia.

8.1 Muuntamon kenttien vähentämiskeinojen vertailu

Muuntamon rakenteiden paremmuutta tarkasteltaessa magneettikenttä voidaan jakaa kuormitusvirralla, koska magneettikenttä on suoraan verrannollinen kuormitusvirtaan. Tämän avulla saadaan selville rakenteen tuottama magneettikenttä kuormituksesta riippumattomana lukuna. Taulukossa 8.1 on esitetty sekä mittauksen että laskennan avulla saatu magneettikenttä jaettuna kuormitusvirralla. Tuloksista voidaan analysoida rakenteen vaikutusta.

Taulukko 8.1. Yhteenvedo kiinteistömuuntamoiden laskenta- ja mittauksien tuloksista suhteessa kuormitusvirran 100 ampeeriin. Pjk on pienjännitekeskus ja Al on alumiini.

Muuntamo	Muuntamon kuvaus	Mitattu B/I, $\mu\text{T}/100\text{ A}$	Laskettu B/I, $\mu\text{T}/100\text{ A}$
T290	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	1,23*	0,51 0,87*
	Kiskot kaapeleiksi, alkuperäistä alempana, vaihejärjestys optimoitu	0,31	0,31
L254	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	5,26**	2,82
	Kiskot lattialla kulkeviksi kaapeleiksi	0,79**	0,40
T1387	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	***	30,6*****
	Kaksi 1000 kVA:n öljyeristeistä muuntajaa, silta kaapeleiksi	12,5*****	13,7*****
H2453	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	1,32	1,33
	Silta uusittu, kaapelit lattialla ja 5 mm Al-kouru	***	0,28
T573	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestystä ei	1,40	1,90

	symmetroituu		
	Silta laskettu niiltä osin, kuin onnistunut ilman keskeytystä	1,12	1,51
	Silta laskettu koko matkalta	0,19	0,23
	Pjk:n taakse asennettu 5 mm Al-levy	0,19	0,24
H302	Kiskot lappeellaan kiinnitetty muualle kuin kattoon, muuntaja ja pjk selät vastakkain	0,27	0,30
	Asennettu 3 mm Al-kotelo	0,12	0,03
H2605	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestys symmetroituu	***	0,41
	Silta laskettu metriä alemmaksi	***	0,30
H2793	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	1,11	1,37
	Kiskot vaihdettu kaapelisillaksi ja 5 mm Al-kouru	0,16	0,13
	Kouru täydennetty koteloksi	0,13	0,13
	Keskijännitekojeiston päälle asennettu 5 mm Al-levy	***	0,13
H276	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	1,00	1,02
	Kiskot suojattu 5 mm Al-kotelolla	0,18	0,08
Tu96-011	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestystä ei symmetroituu	***	1,08
	Muuntamon seinässä 5 mm Al-levy	***	0,52
T53	Kaapeli lattialla, vaihejärjestys symmetroituu	0,36	0,43
H447	Muuntaja ja pjk selät vastakkain	0,18	0,15
T567	Kiskot lappeellaan katossa	0,75	0,87
H37	Kiskot muuaalla kuin katossa	0,39	0,31
T1217	Kaapeli katossa, symmetroituu	0,43	0,32
T994	Kaapeli katossa, ei symmetroituu	0,58	0,49
T486	Kaapeli lattialla, vaihejärjestys ei symmetroituu	***	0,51
K60	Kaapeli katossa, ei symmetroituu	***	0,64
K38	Kaapeli lattialla, vaihejärjestystä ei symmetroituu	***	0,14
T1369	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty muualle kuin kattoon	***	0,08
	Rakentamisessa muuntamon seinään 4 mm alumiinilevy	0,06	0,07

* 0,75 m laskentakorkeus, ** lattialla, *** ei mitausta, **** muuntamossa, ***** viereisessä tilassa

Taulukon perusteella voidaan todeta, että parhaita muuntamoita ovat T573, H302, H2793, H276, H447, K38 ja T1369. Näissä muuntamoissa magneettikentän suhde 100 A kuormitusvirtaan on alle 0,2 μ T/100 A. Kyseinen arvo tarkoittaa yhden mikrotieslan arvoa kurmitusvirran ollessa 500 A.

Magneettikenttien kannalta parhaissa muuntamoissa on rakenteellisia yhtäläisyyksiä. Muuntamoissa T573 ja K38 kaapelisilta on lattialla. Muuntamoissa H302 ja H447 muuntaja ja pienjännitekeskus ovat selät vastakkain. Muuntamossa H302 on lisäksi 3 mm alumiinikotelo. Muuntamossa H2793

yläpuolinen kaapelisilta on suojattu 5 mm alumiinikourulla ja toisessa rakenteessa 5 mm alumiinikotelolla. Muuntamossa H276 suojaukseen on käytetty 5 mm alumiinikoteloa. Muuntamossa T1369 on tarkasteltu magneettikenttää muuntamon vieressä olevassa tilassa, joten muuntamon ja tilan välinen etäisyys vaikuttaa tulokseen tässä muuntamossa merkittävästi.

Sekä mitattuun että laskettuun magneettikentän arvoon vaikuttaa kuormitusvirran epäsymmetrisyys. Mittaustuloksiin vaikuttaa lisäksi kuormitusvirran vaihtelu, epäsymmetrian vaihtelu, kiinteistössä esiintyvät harhavirrat ja kaikki kiinteistössä käytetyt sähkölaitteet. Lisäksi mittaustuloksiin vaikuttaa kaikki kiinteistön kaapeloinnit, joissa kulkee virtaa. Sähkökäytöstä syntyvä magneettikenttä riippuu suuresti asennus- ja johdotustekniikasta, sekä kolmella jaollisten yliaaltojen määrästä. Tämän vuoksi pelkästään kiinteistömuuntamosta aiheutuvaa magneettikenttää ei voida mitata kuin laboratorio-olosuhteissa. Myöskään tällaista pelkästään kiinteistömuuntamosta aiheutuvaa magneettikenttää ei esiinny käytännössä juurikaan. Siksi myöskään laskennallinen symmetrisen kuormitusvirran tarkastelu ei ole välttämättä mielekäästä, vaan virtana kannattaa laskennassa käyttää mitattua virtaa.

Tarkasteltujen kiinteistömuuntamoiesimerkkien perusteella magneettikenttien pienentämiselle ei löytynyt sellaista ratkaisua, jonka voisi todeta aina olevan hyvä ratkaisu. Laskennan yhteydessä todettiin, että kuormitusvirran epäsymmetrisyys vaikuttaa huomattavasti kiinteistömuuntamon magneettikentän suuruuteen. Koska kuormitustilanteet ja kuormitusvirran epäsymmetrisyys vaihtelevat koko ajan, pelkän muuntamorakenteen tarkastelu ja muuttaminen eivät takaa pientä magneettikenttää. Myös muuntamon kuormitusvirtaan on syytä paneutua magneettikentän pienentämisen yhteydessä. Myös kiinteistön mahdolliset harhavirrat on syytä tutkia.

Mittausten ja laskennan perusteella jokainen muuntamo on käsiteltävä erillisenä tapauksena, jonka magneettikentän pienentäminen on suunniteltava erikseen. Koska magneettikenttien pienentäminen on usein melko kallis toimenpide, magneettikentät olisi hyvä ottaa huomioon jo muuntamoa suunniteltaessa.

Myös rakenteiden lämpiäminen tulee ottaa huomioon vaimennusta käytettäessä erityisesti, jos tarkastellaan suurien kuormitusten kisko- tai kaapelisiltojen kotelointia. Suuria kuormituksia esiintyy erityisesti teollisuudessa käytettävissä kiinteistömuuntamoissa.

Ferromagneettista magneettikenttäsuojaa käytettäessä voidaan koteloon tehdä lämmönvaihtoa parantavia tuuletusaukkoja suojan ominaisuuksien huonontumatta. Sitä vastoin johtavasta materiaalista tehtyyn suojakoteloon ei voi tehdä aukkoja, koska ne heikentävät suojan ominaisuuksia. Kun käytännössä toteutetuissa vähentämiskäytöksissä käytettiin suojauksessa lähes aina alumiinisia kotelointeja, voidaan suurien kuormitusten yhteydessä joutua lämpenemisen takia ongelmiin.

Lämpiäminen saattaa olla ongelma erityisesti pienjännitekaapelisilloissa, koska kaapelien kuormitettavuus suunnitellaan tiettyyn ympäristön lämpötilaan. Suojakotelon sisällä suljetussa tilassa lämpötila saattaa kuitenkin nousta tavallista ympäristön lämpötilaa korkeammaksi. Suojakotelointia suunniteltaessa lämpötilan kasvamisen vaikutus kaapelien kuormitettavuuteen tulee ottaa huomioon.

Yksi keino ottaa kiinteistömuuntamon magneettikentät huomioon, on käyttää pienikenttäiseksi todettuja muuntamorakenteita, kuten muuntamo ja pienjännitekeskus selät vastakkain -rakennetta tai tehdasvalmisteista pienikenttäistä kiinteistömuuntamoa. Tehdasvalmisteisen pienikenttäisen kiinteistömuuntamon etuna on, että sen magneettikenttä on mitattu laboratorio-olosuhteissa jo etukäteen. Tehdasvalmisteisen kiinteistömuuntamon aiheuttama magneettikenttä voidaan ennustaa, jos installoinnissa ei tehdä virheitä ja muuntajan kuormitus on tasattu eri vaiheille niin, että kuormitus on lähes symmetristä. Tällöin kiinteistömuuntamoa suunniteltaessa tiedetään kiinteistön arvioidun kuormituksen perusteella, mitä suuruusluokkaa magneettikenttä tulee olemaan muuntamon yläpuolisessa tai vieressä olevassa tilassa.

8.2 Laskenta- ja mittaustulosten vertailu

Taulukossa 8.2 on mittaustuloksia verrattu laskentatuloksiin muuntamoissa, joiden rakennetta on muutettu magneettikenttien pienentämiseksi.

Taulukko 8.2. Kiinteistömuuntamoiden vähentämisesimerkkien mittaustulosten vertailu laskentatuloksiin (maksimi-arvot). Pjk on pienjännitekeskus ja Al on alumiini.

Muuntamo	Muutostyö	Laskettu arvo, μT	Mitattu arvo, μT	Lasketun arvon ero mitattuun, %
T290	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	2,56 4,42*	**** n. 6,2*	**** -28,7*
	Kiskot kaapeleiksi, alkuperäistä alempana, vaihejärjestys optimoitu	1,58	1,56	1,3
L254	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	10,7	n. 20**	***
	Kiskot lattialla kulkeviksi kaapeleiksi	1,51	n. 3**	***
T1387	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	458,7	****	****
	Kaksi 1000 kVA:n öljyeristeistä muuntajaa, silta kaapeleiksi	166,6	151,6	-9,9
H2453	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	3,33	n. 3,3	-0,9
	Silta uusittu, kaapelit lattialla ja 5 mm Al-kouru	0,70	****	****
T573	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestystä ei symmetroitunut	13,6	n. 10	-36,0
	Silta laskettu niiltä osin, kuin onnistunut ilman keskeytystä	10,8	n. 8	-35,0
	Silta laskettu koko matkalta	1,60	n. 1,3	-23,1
	Pjk:n taakse asennettu 5 mm Al-levy	1,60	n. 1,3	-23,1
H302	Kiskot lappeellaan kiinnitetty muualle kuin kattoon, muuntaja ja pjk selät vastakkain	2,54	n. 2,3	-10,4
	Asennettu 3 mm Al-kotelo	0,27	n. 1,7*****	*****
H2605	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestys symmetroitunut	1,22	n. 1,5	****
	Silta laskettu metriä alemmaksi	0,90	n. 1,0	****
H2793	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	5,23	4,23	-23,6
	Kiskot kaapeleiksi ja 5 mm Al-kouru	0,31	0,40	22,5
	Kouru täydennetty koteloksi	0,39	0,39	0,0
	Keskijännitekojeiston päälle 5 mm Al-levy	0,39	****	****
H276	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	12,2	12,0	-1,7

	Kiskot suojattu 5 mm Al-kotelolla	0,99	n. 2,1	52,9
Tu96-011	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestystä ei symmetroituu	5,42	****	****
	Muuntamon seinässä 5 mm Al-levy	2,61	****	****

* 0,75 m, ** lattialla, *** mittaus ja laskenta eri korkeudelta, **** ei mittausa, tai virtaa ei mitattu, ***** magneettikenttä keskijännitekojeistosta

Lasketun ja mitatun magneettikentän eron itseisarvot olivat välillä 0,0% - 52,9%. Suurin ero lasketun ja mitatun arvon välillä johtui siitä, että suojakotelon vaimennus ei ollut yhtä hyvä kuin laskennan mukaan sen olisi pitänyt olla. Suojan vaimennusta laskettaessa virroille valitaan vaihekulmat joltain hetkeltä. Kuormituksen muuttuessa myös vaihekulmat yleensä muuttuvat, jolloin vaimennus ei enää vastaa laskettua. Lisäksi kuormituksen vaihtelu, magneettikenttämittari ja mittausmenetelmä sekä kaikki magneettikenttää tuottavat johdot ja laitteet saattoivat vaikuttaa lasketun ja mitatun arvon eroihin.

Kuormitukset vaihtelevat lähes kaikissa muuntamon sähköjohdoissa. Muuntamon kuormituksen muuttumista on vaikea ottaa huomioon magneettikenttien laskennassa. Kuormituksen vaihtelu on joissakin muuntamoissa hyvin nopeaa, jolloin esimerkiksi muuntamon yläpuolisen asunnon mittauksessa joissakin mittauspisteissä voi olla huomattava ero mittaus- ja laskentatulosten välillä ja toisissa mittauspisteissä ero voi olla pieni. Kaikissa muuntamoissa lasketun ja mitatun arvon eroihin vaikutti myös sellaiset sähköjohdot ja sähkölaitteet, joita ei otettu laskennassa huomioon.

Sähköyhtiöiden tekemissä mittauksissa mittausmenetelmä ei kaikissa mittauksissa ollut yhtä kattava kuin TTKK:n tekemissä mittauksissa. Myös kaikissa sähköyhtiöiden mittauksissa käytetyistä mittareista tai mittareiden kalibroinneista ei ole tarkkaa tietoa. TTKK:n mittauksissa käytetty magneettikenttämittari on kalibroitu 12.2.1998.

Yhteenvedona kiinteistömuuntamoiden laskennan ja mittauksen erosta on esitetty taulukossa 8.3 eron keskiarvo ja keskihajonta.

Taulukko Yhteenvedo kiinteistömuuntamoiden laskennan ja mittauksen erosta (keskiarvo ja keskihajonta). Pjk on pienjännitekeskus ja Al on alumiini.

Muuntamo	Muuntamon kuvaus	Keskiarvo, μT	Keskihajonta, μT
T290	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	*	*
	Kiskot kaapeleiksi, alkuperäistä alempana, vaihejärjestys optimoitu	-0,18	0,14
L254	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	*	*
	Kiskot lattialla kulkeviksi kaapeleiksi	*	*
T1387	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	*	*
	Kaksi 1000 kVA:n öljyeristeistä muuntajaa, silta kaapeleiksi	-27,0	31,5
H2453	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	*	*
	Silta uusittu, kaapelit lattialla ja 5 mm Al-kouru	*	*
T573	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestystä ei symmetroituu	*	*
	Silta laskettu niiltä osin, kuin onnistunut ilman keskeytystä	*	*
	Silta laskettu koko matkalta	-0,17	0,42

	Pjk:n taakse asennettu 5 mm Al-levy	-0,20	0,54
H302	Kiskot lappeellaan kiinnitetty muualle kuin kattoon muuntaja ja pjk selät vastakkain	*	*
	Asennettu 3 mm Al-kotelo	*	*
H2605	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestys symmetroituu	*	*
	Silta laskettu metriä alemmaksi	*	*
H2793	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	-0,18	0,40
	Kiskot vaihdettu kaapelisillaksi ja 5 mm Al-kouru	0,05	0,07
	Kouru täydennetty koteloksi	-0,01	0,11
	Keskijännitekojeiston päälle asennettu 5 mm Al-levy	*	*
H276	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	*	*
	Kiskot suojattu 5 mm Al-kotelolla	*	*
Tu96-011	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestystä ei symmetroituu	*	*
	Muuntamon seinässä 5 mm Al-levy	*	*
T53	Kaapeli lattialla, vaihejärjestys symmetroituu	0,06	0,11
H447	Muuntaja ja pjk selät vastakkain	0,09	0,03
T567	Kiskot lappeellaan katossa	-0,82	1,23
H37	Kiskot muualla kuin katossa	0,11	0,71
T1217	Kaapeli katossa, symmetroituu	0,66	0,50
T994	Kaapeli katossa, ei symmetroituu	0,40	0,28
T486	Kaapeli lattialla, vaihejärjestys ei symmetroituu	*	*
K60	Kaapeli katossa, ei symmetroituu	*	*
K38	Kaapeli lattialla, vaihejärjestystä ei symmetroituu	*	*
T1369	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty muualle kuin kattoon	*	*
	Rakentamisessa muuntamon seinään 4 mm alumiinilevy	0,10	0,07

*ei mittausta

Mittausten ja laskennan väliset erot olivat joissakin muuntamoissa huomattavan suuria. Oleellisesti tähän asiaan vaikuttaa se, että muuntamon paikka on vaikea saada selville yläpuolisessa tai vierisessä tilassa rakenteiden mittaamisen avulla tai piirustuksia tutkimalla. Myös lattian paksuus oli vaikea mitata käytössä olleilla laitteilla.

Lasketun ja mitatun magneettikentän erot johtuivat osittain myös siitä, että laskennan avulla saadaan määritettyä magneettikenttä myös sellaisista kohdista, joissa mittausta ei voi suorittaa. Tällaisia paikkoja ovat esimerkiksi komerot, kaapit ja huoneistojen seinät. Lisäksi eron vaikutti se, että joitakin magneettikentän mittauksia on tehnyt sähköyhtiö, jolloin mittauspisteiden tarkkaa sijaintia tai tarkkoja mittaustuloksia ei aina ole ollut saatavissa.

Usein kiinteistöjen piirustukset eivät täysin vastaa rakennuksen käytännön toteutusta. Myös muuntamoiden rakentamisessa rakentajat ovat usein tehneet omia ratkaisuja. Näiden seurauksena muuntamosta lasketun magneettikentän arvot saattavat tulla eri kohtaan kuin mittauksessa, jolloin mittaus- ja laskentatulosten ero kasvaa merkittävästi.

Mittaus- ja laskentatulosten eron vaikuttaa myös muut kenttälähteet kuin muuntamo.

Kiinteistömuuntamo onkin tässä suhteessa käsitettävä yhdeksi laitteeksi. Yksittäisen laitteen aiheuttamaa magneettikentän osuutta on lähes mahdoton saada selville käytännön olosuhteissa. Pelkän muuntamon magneettikentän mittaaminen onnistuu vain laboratorio-olosuhteissa.

LÄHTEET

- /1/ ABB Transmit Oy, Keskijännitekojeet ja -kojeistot, Muuntamot. Teslasafe-kiinteistömuuntamot - Uusi toteutustapa. Esite TESLASAFE 1 FI 97-08. 1997. 4 s.
- /2/ EMC ja rakennusten sähkötekniikka. 1997. Sähkötieto, Espoo. 198 s.
- /3/ Hongisto, M. & Valjus, J. Magneettikenttäaltistus 110-400 kV johtojen läheisyydessä. Vantaa, IVO-A-05/93 tutkimusraportteja. IVO Oy, ympäristönsuojeluyksikkö. 1993. 141 s.
- /4/ Keikko T., Isokorpi J. & Korpinen L. Pientaajuisten magneettikenttähäiriöiden pienentämismenetelmiä. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkövoimatekniikka, Raportti 9-97. 1997. 76 s.
- /5/ Keikko T., Kotiniitty J., Korpinen L., Elovaara J. & Vanhala P. Considering Electric and Magnetic Fields in Electric Power System Design in Finland. Cigre 2000, Group 36: Power System Electromagnetic Compatibility, Ranska, 36-102. 2000. 7 s.
- /6/ Keikko T., Kotiniitty J. & Korpinen L. Calculations of Magnetic Fields from Indoor Distribution Substation Bus Bars. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2000, Seattle, USA. 2000. 6 s.
- /7/ Korpinen, L., Hietanen, M., Jokela, K., Juutilainen, J. & Valjus, J. Voimajohtojen sähkö- ja magneettikentät ympäristössä. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 89. 1995. 210 s.
- /8/ Korpinen, L. Laitteiden ja elinympäristön sähkö- ja magneettikenttien mittaaminen. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 9/2000. 2000. 131 s.
- /9/ Kotiniitty J., Reivonen S., Kantell T., Keikko T. & Korpinen L. Kiinteistömuuntamoiden magneettikentät. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkövoimatekniikka, Teollisuuden sähkötekniikka, Raportti 1-99. 1999. 90 s.
- / Kursi, J. Sähköjohtojen 50 Hz kenttien laskenta-apuneuvot. Diplomityö. Tampere,
- 10/ Tampereen teknillinen korkeakoulu, sähkötekniikan osasto. 1995. 120 s.
- /11/ Kuusiluoma S. & Korpinen L.; Tuloksia kiinteistömuuntamoja koskevasta puhelinkyselystä. Raportissa: Leena Korpinen (toim.). Ajankohtaista käyttäajuisista sähkö- ja magneettikentistä ympäristössä. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkövoimatekniikan laitos, raportti 3-2000. 2000. 6 s.
- / Schweiz, P. Ein Verfahren zur Berechnung von Dreidimensionalen Magnetfeldern im
- 12/ Nachbereich von Leitungen der Elektrischen Energieversorgung. *Electrizitätswirtschaft*, vol. 85, no 21. 1986. Ss. 827-831.
- / Suomen sähkölaitosyhdistys ry. Kiinteistömuuntamon aiheuttaman magneettikentän
- 13/ vaimentamiskeinoja. Julkaisusarja 4/93. 1993. 48 s.
- /
- 14/ Sähkötilasto 1997. Adato Energia Oy, Helsinki. 1998. 90 s.
- / Tikkanen J. Verkkotaajuiset magneettikentät jakelumuuntajan ympäristössä. Diplomityö.
- 15/ Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan osasto. 1992. 125 s.
- / Valjus, J. 50 Hz Electric And Magnetic Fields in the Environment: Studies of Health Effects
- 16/ on Man. Depart of Public Health, University of Helsinki, Kansanterveystieteen julkaisuja M

123. 1996. 60 s.

/ Vanhala, P. Muuntamoiden magneettikentät ja niiden vaimentaminen. Raportissa: Korpinen, 17/ L., Pääkkönen, R. & Partanen, J. (toim.): Käyttötaajuisten sähkö- ja magneettikenttien tekninen vähentäminen työympäristössä. Tampereen teknillinen korkeakoulu, sähköenergiajärjestelmät, raportti 5-93. 1993. 6 s.

7 MAGNEETTIKENTÄN VÄHENTÄMINEN ESIMERKKIMUUNTAMOISSA

Magneettikenttien kannalta muuntamossa eniten kannattaa kiinnittää huomiota muuntajan ja pienjännitekeskuksen väliseen kisko- tai kaapelisiltaan. Siinä esiintyvät muuntamon suurimmat virrat. Muuntaja ei ole yleensä merkittävä magneettikenttälähde, sillä magneettivuo pysyy hyvin muuntajan rautasydämessä tai vaimenee muuntajan öljysäiliössä. Pienjännitekojeiston aiheuttamat magneettikentät tulevat merkittäviksi vasta silloin, kun kisko- tai kaapelisillan magneettikenttiä on saatu pienennettyä. Seuraavassa käydään läpi, miten muuntamoiden kenttiä on vähennetty eri esimerkeissä.

7.1 Muuntamon rakenteen muuttaminen esimerkkimuuntamoissa

Muuntamon rakenteellisia muutoksia ovat kiskojen muuttaminen kaapeleiksi, kaapelin vaihejärjestyksen parantaminen, pienjännitesillan siirtäminen kauemmaksi häiriintyvistä kohteesta, muuntajan vaihtaminen kahteen pienempään, rakennuksen harhavirtojen vähentäminen sekä muuntajan ja pienjännitekeskuksen siirtäminen niin, että ne ovat selät vastakkain. /[4,5,6,11](#)/

Kiskojen muuttaminen kaapeleiksi

Muuntajan ja pienjännitekeskuksen välisen kiskosillan muuttaminen kaapelisillaksi pienentää magneettikenttää, koska kaapelisillassa vaiheväli saadaan kiskosilta pienemmäksi. Kaapelisilta saadaan myös vietyä ahtaampien paikkojen läpi kuin kiskosilta, joten sen reitti voidaan valita siten, että sen aiheuttamat magneettikenttähäiriöt ovat pienemmät kuin kiskosillan. Kolmivaihekaapelin poikkileikkauksessa johtimet sijaitsevat tasasivuisen kolmion kärkipisteissä, joka on kolmella johtimella symmetrisin geometria. Myös yksivaihekaapeleilla toteutettu kaapelisilta saadaan geometrisesti symmetriseksi, jos vaiheet sidotaan tiukasti toisiinsa. Sidontaan voidaan käyttää esimerkiksi nippusiteitä.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkimuuntamoissa T290, L254, T1387, H2453, H2793 ja T486. Kiskojen muuttamista kaapeleiksi ei oltu tehty ainoana muutostyönä missään muuntamossa. Muutostyön yhteydessä kaapelisilta oli asennettu yleensä lattialle ja vaihejärjestys oli tehty alkuperäistä paremmaksi. Taulukossa 7.1 on esitelty magneettikentän pienentyminen muuntamoissa, joissa muutostyö sisälsi kiskojen muuttamisen kaapeleiksi. Tulosten vertailu on tehty suurimman lasketun ja mitatun arvon perusteella.

Taulukko 7.1. Magneettikentän laskettu ja mitattu muutos muuntamoissa, joissa kiskot muutettu kaapeleiksi (vertailu alkuperäiseen rakenteeseen, virran muuttuminen huomioitu muutoksen laskennassa). Al on alumiini.

Muuntamo	Alkuperäinen laskettu, μT	Alkuperäinen mitattu, μT	Muutostyö	Rakenne muutettu, laskettu, μT	Rakenne muutettu, mitattu, μT	Laskettu muutos, %	Mitattu muutos, %
T290	2,56	***	Kiskot kaapeleiksi, alkuperäistä alempana, vaihejärjestys optimoitu	1,58	1,56	38,3	*

L254	10,7	n. 20**	Kiskot lattialla kulkeviksi kaapeleiksi	1,51	n. 3**	85,9	85,0**
T1387	458,7	***	Kaksi 1000 kVA:n öljyeristeistä muuntajaa, silta kaapeleiksi	166,6	151,6	55,2	***
H2453	3,33	n. 3,3	Silta uusittu, kaapelit lattialla ja 5 mm Al-kouru	0,70	-	79,0	***
H2793	5,23	4,23	Kiskot vaihdettu kaapelisillaksi ja 5 mm Al-kouru	0,31	0,40	90,8	85,3
T486	2,81	*	Kaapeli lattialla, vaihejärjestys ei symmetroitua	-	-	-	-

* toinen mittaus 0,75 m korkeudella, ** lattialla,*** toinen mittaus puuttuu

Muutostöiden pienennysvaikutukset ovat laskentatulosten perusteella välillä 38,3% - 90,8%. Suuri hajonta syntyy ennen muuta muista muutostöistä, joita rakenteeseen on tehty. Niillä voi olla jopa suurempi merkitys kenttien pienemiseen kuin kiskojen muuttamisella kaapeleiksi. Muuntamoissa, joista on olemassa mittaustuloksia, vaimennusvaikutus on ollut noin 85%.

Muuntamossa L254 muuntajan ja pienjännitekeskuksen välinen kiskosilta on muutettu lattialla kulkeviksi kaapeleiksi. Magneettikenttä on pienentynyt laskentatulosten mukaan yli 80%. Lähes samanlainen muutos oli tehty muuntamossa H2453. Erona oli pienjännitekaapelisilta, joka oli tässä muuntamossa koteloitu 5 mm paksulla alumiinikotelolla. Magneettikenttä on pienentynyt myös tämän muuntamon kohdalla laskentatulosten mukaan noin 80%. Magneettikentän pienentyminen oli laskennan perusteella 0,9% suurempi metrin korkeudella lattiasta kuin mittausten perusteella yläpuolisen tilan lattialla.

Muuntamossa T1387 yksi 2000 kVA kuivamuuntaja on vaihdettu kahdeksi 1000 kVA öljyeristeiseksi muuntajaksi. Sähköyhtiössä päädyttiin tällaiseen ratkaisuun, koska muuntamo jouduttiin uusimaan muuttuneen kuormituksen takia. Muutoksen yhteydessä vaihdettiin kiskosilta kahdeksi kaapelisillaksi, joiden sijainti pyrittiin saamaan optimaaliseksi viereisessä tilassa olleeseen mahdollisesti häiriintyvään kohteeseen nähden. Magneettikenttää tutkittiin muuntamotilassa, koska viereiseen teollisuustilaan ei ollut mahdollista päästä. Muutoksesta johtuen magneettikenttä pieneni muuntamossa yli 50%.

Kiskojen muuttaminen kaapeleiksi pitää suunnitella sekä materiaalien osalta että työn osalta etukäteen. Kaapelit pitää olla ennen työn aloittamista valmiina ja sopivan pituisina pätkinä. Myös kaapelikengät pitää hankkia etukäteen. Jos muuntamon pienjännitekeskus sijaitsee eri tilassa kuin muuntaja, joudutaan myös tilojen välinen palosulku uusimaan. Tarvikekustannukset ovat suuruusluokaltaan noin 1 500 mk, palosulku noin 1 000 mk ja kahden työntekijän yhden päivän työ 2 500 mk. Suunnittelukustannuksista voi olla vaikea rajata muutostyön suunnittelun osuutta.

Lisäksi kustannuksia tulee myös siitä, että kiskojen muuttaminen kaapeleiksi vaatii aina käyttökäytöksen. Korvaavan sähkön tuottaminen tai korvaavan yhteyden käyttö lisää muutostyön kustannuksia.

Kaapelisillan vaihejärjestyksen parantaminen

Magneettikenttää voidaan vähentää kaapelien vaihejärjestystä parantamalla. Vähentämiskeino sopii kaapelisillan, jossa vaihetta kohden on kaksi tai useampi johdin. Vaihejärjestyksessä pyritään

mahdollisimman symmetriseen johdinjärjestykseen. Vaihejärjestysvaihtoehtoja on paljon. Yksi vaihtoehto on tehdä kaapelisilta suurvirtakaapelijärjestelmän mukaisesti, jolloin johtimet voidaan tukea suurvirtakaapelijärjestelmään tarkoitettujen tukieristimien avulla. Voidaan myös käyttää nippusiteitä, joilla kuitenkin kaapelien järjesteleminen ei ole helppoa. Kuvassa 7.1 on esitetty esimerkkejä symmetrisestä vaihejärjestyksestä sillalle, jossa on kaksi johdinta vaihetta kohden ja yksi PEN-johdin.



Kuva 7.1. Muuntajan ja pienjännitekeskuksen välisen kaapelisillan symmetrisiä vaihejärjestyksiä.

Kun osajohtimia on enemmän, myös mahdollisten symmetristen vaihejärjestysten määrä kasvaa. Toteutettavan rakenteen valintaan vaikuttaa magneettikentän vähentämistavoitteiden lisäksi käytettävissä oleva tila. Usein kaapelisillalle varattua reittiä ei ole mahdollista suurentaa, joten kaapelisillan muoto pitää valita tilaan sopivaksi.

Symmetrisessä tilanteessa nollassa sijoittamisella ei ole merkitystä, koska nollassa virta on nolla. Sähköisesti epäsymmetrisiä kuormituksia varten nollassa johdin on hyvä sijoittaa mahdollisimman lähelle vaihejohtimia ja viedä se samaa reittiä kuin vaihejohtimet. Tavallisessa jakelumuuntamossa nollassa sijoittaminen on magneettikenttien kannalta käytännössä hankalaa, koska kuormitus ei yleensä ole symmetrinen. Nollassa johdin kannattaa sijoittaa lähelle vaihejohtimia, että virtojen aiheuttama magneettikenttä kumoutuisi mahdollisimman hyvin.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkimuuntamoissa T290, H2605, H2793, T53 ja T1217. Kaapelien vaihejärjestyksen parantamista ei oltu tehty ainoana muutostyönä missään muuntamossa. Taulukossa 7.2 on esitelty magneettikentän pienentyminen muuntamoissa, joissa muutostyö sisälsi kaapelien vaihejärjestyksen parantamisen.

Taulukko 7.2. Magneettikentän laskettu ja mitattu muutos muuntamoissa, joissa kaapelien vaihejärjestyksestä on parannettu (vertailu alkuperäiseen rakenteeseen, virran muuttuminen huomioitu muutoksen laskennassa). Al on alumiini.

Muuntamo	Alkuperäinen laskettu, μT	Alkuperäinen mitattu, μT	Muutostyö	Rakenne muutettu, laskettu, μT	Rakenne muutettu, mitattu, μT	Laskettu muutos, %	Mitattu muutos, %
T290	2,56	**	Kiskot kaapeleiksi, alkuperäistä alempana, vaihejärjestys optimoitu	1,58	1,56	38,3	*
H2605	1,22	n. 1,5	Silta laskettu metriä alemmaksi, vaihejärjestys optimoitu	0,90	n. 1,0	26,2	33,3
H2793	5,23	4,23	Kiskot vaihdettu kaapelisillaksi ja 5 mm Al-kouru	0,31	0,40	90,8	85,3
T53	0,49	0,49	Kaapeli lattialla, vaihejärjestys symmetroidu	-	-	-	-
T1217	1,61	2,19	Kaapeli katossa,	-	-	-	-

* toinen mittaus 0,75 m korkeudella, ** toinen tapaus puuttuu

Muutostöiden pienennysvaikutukset ovat laskentatulosten perusteella välillä 26,2% - 90,8%. Mitatuissa muuntamoissa vaimennusvaikutus on ollut 33,3% ja 85,3%. Myös tämän muutostyön vaikutus tulee yhdistettynä muihin muutostöihin, koska pelkästään vaihejärjestyksen parantamista ei oltu käytetty missään muuntamossa.

Esimerkkinä muutostyöstä muuntamossa H2793 kiskosilta on vaihdettu vaihejärjestykseltään optimoiduksi kaapelisillaksi. Vaihejärjestyksen optimointi on toteutettu käyttämällä kaapelien tuentaan suurvirtakaapelijärjestelmän tukieristimiä.

Kaapelin vaihejärjestyksen parantamisesta ei aiheudu lisäkustannuksia, jos se tehdään heti muuntamon asennuksen yhteydessä. Myös muutostyönä tehty kaapelien vaihejärjestyksen parantaminen ei aiheuta merkittäviä kustannuksia. Kustannukset ovat lähes pelkästään työkustannuksia. Kahdelta työntekijältä muutostyöhön kuluu aikaa noin puoli päivää, joten kustannus on noin 1 000 mk.

Pienjännitesillan siirtäminen kauemmaksi häiriintyvistä kohteista

Häiriintyvän kohteen ja pienjännitesillan välisen etäisyyden pienikin kasvattaminen vaikuttaa magneettikenttään merkittävästi. Pienjännitesillan siirtäminen on kiskosillalla huomattavasti hankalampaa kuin kaapelisillalla. Yleensä häiriintyvä kohde on muuntamon yläpuolisessa tilassa, jolloin pienjännitesillaa pitää siirtää alemmaksi. Kun korkealla, esimerkiksi muuntamon katossa olevaa kiskosillaa siirretään alemmaksi, joudutaan ottamaan huomioon myös henkilöturvallisuusasiat. Jos kiskosilta on muutoksen jälkeen kosketusetäisyydellä, täytyy siihen rakentaa kosketussuoja. Kaikki kiskosillan muutostyöt vaativat käyttökeskeytyksen.

Kaapelisillan siirtäminen alemmaksi on nopea toimenpide, jos sillan päitä ei jouduta irrottamaan. Kaapelisillaa ei jouduta uusimaan edellä mainitussa tapauksessa, joten magneettikentän vähentämiseen liittyvät muutostyön kokonaiskustannukset ovat pieniä. Yksinkertaisin muutostyö on laskea kaapelisilta lähellä kattoa kulkevalta kaapelihyllyltä muuntamon lattialle.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkinä muuntamoissa T290, L254, T1387, H2453, T573, H2605, H2793, T53, H37 ja K38. Pienjännitesillan siirtäminen kauemmaksi häiriintyvistä kohteista oli muuntamossa H2605 ainoa muutostyö. Muissa muuntamoissa muutostyön yhteydessä oli tehty myös muita muutoksia. Taulukossa 7.3 on esitelty magneettikentän pienentyminen muuntamoissa, joissa muutostyö sisälsi pienjännitesillan siirtämisen kauemmaksi häiriintyvistä kohteista.

Taulukko 7.3. Magneettikentän laskettu ja mitattu muutos muuntamoissa, joissa pienjännitesilta siirretty kauemmaksi häiriintyvistä kohteista (vertailu alkuperäiseen rakenteeseen, virran muuttuminen huomioitu muutoksen laskennassa). Al on alumiini.

Muuntamo	Alku-peräinen laskettu, μT	Alku-peräinen mitattu, μT	Muutostyö	Rakenne muutettu, laskettu, μT	Rakenne muutettu, mitattu, μT	Laskettu muutos, %	Mitattu muutos, %
T290	2,56	***	Kiskot kaapeleiksi, alkuperäistä alempana, vaihejärjestys optimoitu	1,58	1,56	38,3	*
L254	10,7	n. 20**	Kiskot lattialla kulkeviksi kaapeleiksi	1,51	n. 3**	85,9	85,0**

T1387	458,7	***	Kaksi 1000 kVA:n öljyeristeistä muuntajaa, silta kaapeleiksi	166,6	151,6	55,2	***
H2453	3,33	n. 3,3	Silta uusittu, kaapelit lattialla ja 5 mm Al-kouru	0,70	***	79,0	***
T573	13,6	n. 10	Silta laskettu niiltä osin, kuin onnistunut ilman keskeytystä	10,8	n. 8	20,6	20,0
			Silta laskettu koko matkalta	1,60	n. 1,3	88,0	86,7
H2605	1,22	n. 1,5	Silta laskettu metriä alemmaksi	0,90	n. 1,0	26,2	33,3
H2793	5,23	4,23	Kiskot vaihdettu kaapelisillaksi ja 5 mm Al-kouru, kaapelisilta alkuperäistä alempana	0,31	0,40	90,8	85,3
T53	0,49	0,49	Kaapeli lattialla, vaihejärjestys symmetroituu	-	-	-	-
H37	2,98	3,83	Kiskot muualla kuin katossa	-	-	-	-
K38	0,72	***	Kaapeli lattialla, vaihejärjestystä ei symmetroituu	-	-	-	-

* toinen mittaus 0,75 m korkeudella, ** lattialla, *** mittaus puuttuu

Muuntamossa H2605 kaapelisiltaa on laskettu metri alkuperäistä rakennetta alemmaksi. Muutostyön vaimennusvaikutus oli laskentatulosten perusteella 26,2% ja mittaustulosten perusteella 33,3%. Muutostyön vaikutus tulee kaikissa muissa muuntamoissa yhdistettynä muihin muutostöihin, koska pelkästään pienjännitesillan siirtämistä kauemmaksi häiriintyvistä kohteesta ei oltu käytetty muissa muuntamossa. Muissa muuntamoissa pienennysvaikutukset ovat laskentatulosten perusteella välillä 20,6% - 90,8% ja mitatuissa muuntamoissa 20,0% - 86,7%.

Muuntamossa T573 kaapelisillan osittainen lattialle laskeminen on pienentänyt magneettikenttää mittaus- ja laskentatulosten perusteella 20%. Kun kaapelisilta laskettiin kokonaan lattialle, magneettikenttä pienentyi mittaustulosten perusteella yli 80% yläpuolisen tilan lattialle. Muuntamossa H2605 symmetroitua kaapelisiltaa on laskettu yksi metri alemmaksi kuin alkuperäisessä tapauksessa, jolloin pienennysvaikutus oli 26%.

Pienjännitesillan siirtäminen kauemmaksi häiriintyvistä kohteesta voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Jos muutostyö tehdään nopeasti lyhyellä keskeytyksellä, esimerkiksi kaapelit siirretään kaapelihyllyltä muuntamon lattialle niiltä osin kuin se ei vaadi keskeytystä, ainoa kustannus on työkustannus. Kahdelta työntekijältä muutostyöhön kuluu aikaa noin puoli päivää, joten kustannus on noin 1 000 mk.

Jos asennuksessa joudutaan siirtämään kaapelit suoja-aidan alle, vaihtamaan kaapelit tai poraamaan

betoniseinään kaapeleille aukko, kustannukset saattavat kasvaa huomattavasti. Esimerkiksi betoniin tehtävä aukko aiheuttaa kustannuksia timanttisahauksella toteutettuna noin 1 500 mk. Muutostyö pitää suunnitella ennalta materiaalien, työkalujen ja työn osalta, joten suunnittelukustannukset vaikuttavat muutostyön kokonaiskustannuksiin.

Muuntajan vaihtaminen kahteen pienempään

Usein magneettikenttiin liittyvät muutostyöt tehdään muuntamon uusimisen yhteydessä. Jos muuntamo uusitaan lisääntyneen kuormituksen takia, voidaan myös joutua uusimaan muuntaja. Tällaisessa tapauksessa kannattaa harkita mahdollisuutta vaihtaa muuntaja kahteen pienempään muuntajaan yhden ison asemasta. Kahta muuntajaa käytettäessä kuormitus jakaantuu kahdelle pienjännitesillalle, joiden sijoittaminen voidaan suunnitella niin, että mahdollisesti häiriintyvän kohteen sijainti otetaan huomioon.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkimuuntamossa T1387. Muutostyön takia magneettikenttä pieneni laskennan perusteella muuntamossa 55,2%.

Muuntajan vaihtaminen kahteen pienempään pitää suunnitella materiaalien ja työn osalta etukäteen. Muuntamossa T1387 kustannukset olivat 113 300 mk ilman suunnittelu- ja keskeytyskustannuksia. Muuntamoon hankittiin yksi uusi muuntaja, kaapelia molempiin kaapelisiltoihin ja tarvittava määrä kaapelikenkiä. Toinen muuntaja siirrettiin muuntamoon varastosta.

Rakennuksen harhavirtojen vähentäminen

Rakennuksen sähköjärjestelmä saattaa olla rakenteeltaan sellainen, että rakennuksessa esiintyy harhavirtoja. Jos rakennuksessa on TN-C -jakelujärjestelmä eli nelijohdinjärjestelmä, yhdistetty suoja- ja käyttömaajohdin (PEN-johdin) toimii harhavirralla virtapiirin osana. Harhavirta voi esiintyä rakennuksen kaikissa maan kanssa johtavassa yhteydessä olevissa rakenteissa, kuten lämpöpattereissa, metallisissa vesijohdoissa, viemäreissä tai tukipalkeissa. Sähköjärjestelmän rakenne olisi TN-S -jakelujärjestelmää käytettäessä harhavirtojen kannalta parempi ja siten myös magneettikenttien kannalta parempi.

Toinen harhavirtaa mahdollisesti aiheuttava sähköjärjestelmän osa on jakelumuuntamo. Vanhan asennuskäytännön mukaisesti muuntajan maadoitus voi olla sekä maadoituskiskoon että muuntajan nollaliittimeen. Tästä on kuitenkin seurauksena harhavirtareitti, joka vaikuttaa rakennuksessa esiintyviin magneettikenttiin. Harhavirta vaikuttaa erityisesti kolmella jaollisiin parittomiin yliaaltoihin, jotka voivat olla esimerkiksi tietokoneen näytön häiriintymisen syytä. Magneettikenttien vähennyskeinona voidaan harhavirtareitti katkaista, jolloin myös magneettikentän kolmella jaolliset yliaallot vähenevät.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkimuuntamoissa H2793 ja H302. Muuntamossa H2793 magneettikenttä mitattiin ennen muutostyötä ja sen jälkeen. Muutostyön ansiosta magneettikentän kolmella jaolliset parittomat yliaallot pienenevät noin 60%. Muuntamon H302 muutostyön yhteydessä ei tehty magneettikenttämittausta.

Harhavirtojen poistaminen ei aiheuttanut mitään kustannuksia kummassakaan tarkastellussa muuntamossa. Harhavirtareittinä toiminut muuntajan ylimääräinen maadoitus katkaistiin tongeilla. Muutostyössä ei tarvittu edes käyttökeskeytystä, koska maadoitus on maan potentiaalissa.

Muuntaja ja pienjännitekeskus selät vastakkain

Mahdollisimman lyhyt muuntajan ja pienjännitekeskuksen välinen kisko- tai kaapelisilta vähentää magneettikentän leviämistä muuntamon yläpuoliseen tai sivulla olevaan tilaan. Pienjännitesilta on lyhyt muuntamorakenteessa, jossa muuntaja ja pienjännitekeskus sijoitetaan selät vastakkain. Myös pienjännitesillan tuennan ei tarvitse olla yhtä vankka kuin pitkän pienjännitesillan tapauksessa, koska johtimien väliset voimat ovat pienempiä. Selät vastakkain -rakenteessa pienjännitesiltaa ei tarvitse tukea esimerkiksi kattoon, joten myös etäisyys yläpuoliseen tilaan tulee suuremmaksi.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkimuuntamoissa H302 ja H447. Muuntamot oli suunniteltu

alkuperäiseltä rakenteeltaan pienikenttäisiksi, jolloin niillä ei ole vertailtavaa rakennetta.

Muuntajan ja pienjännitekeskuksen asennus on tapahtunut esimerkkimuuntamoilla rakentamisen yhteydessä. Rakenteen suunnittelusta, asennuksesta tai materiaaleista ei aiheudu ylimääräisiä kustannuksia. Hyvänä puolena on lisäksi muuntamon pieni koko, joka mahdollistaa muuntamon asentamisen melko pieneen tilaan.

7.2 Muuntamon pienjännitesillan suojaaminen esimerkkimuuntamoissa

Muuntamon pienjännitesillan suojaus voidaan toteuttaa metallikourulla, -kotelolla tai -levyllä. Suurvirtajärjestelmien suojaustapauksissa, esimerkiksi teollisuuskäytöissä, on otettava huomioon suojausten lämmönsiirtoa huonontava vaikutus kuormitettavuutta arvioitaessa. Suoja saattaa estää konvektion eli lämmön siirtymisen pienjännitesillasta ympäröivään ilmaan. Tilannetta saattaa huonontaa myös se, ettei ilmavirta suojausten jälkeen pääse liikkumaan vapaasti. /4,5,6,11/

Suojaamisen kustannukset vaihtelevat asennuksen laajuudesta riippuen huomattavasti. Muutostyön kustannukset ovat olleet noin 400 - 200 000 mk. Pienimmät kustannukset syntyvät pienestä suojasta, esimerkiksi pienjännitekeskuksen taakse asennetusta 5 mm paksusta alumiinilevystä. Ylärajalle päädytään, jos vuorataan koko muuntamo 5 mm paksulla alumiinilla. Työhön vaikuttaa materiaalikustannusten lisäksi suunnittelu- ja työkustannukset. Muutostyön kokonaiskustannuksia laskettaessa kannattaa kustannusten laskennassa ottaa huomioon muutostyöstä saatava magneettikentän pienentyminen. Suojauksesta syntyy myös häviökustannuksia jakeluyhtiölle. Magneettikenttien vertailun voi tehdä laskennan avulla tai kokemuseräisesti, tosin molemmilla menetelmillä tehty vertailu sisältää lukuisasti epävarmuustekijöitä. Jos pienemmillä kustannuksilla kuitenkin päästään vastaavaan magneettikentän pienentymiseen kuin koko muuntamon vuorauksella, ei vuoraus ole järkevä vaihtoehto.

Myös tavoitetaso kannattaa miettiä ennen muutostyöhön ryhtymistä. Laskennan avulla kannattaa varmistaa, että suunnitellun muutostyön avulla päästään riittävän pieneen magneettikenttään.

Metallikouru

Magneettikenttien suojauksessa voidaan käyttää hyvin johtavaa tai ferromagneettista materiaalia. Johtavalla materiaalilla suojaus perustuu indusoituihin pyörrevirtoihin, jotka asettuvat materiaaliin kokonaisenergian kannalta optimaalisesti. Ferromagneettisella materiaalilla suojausvaikutus perustuu materiaalin hyvään magneettivuon johtokykyyn, joka ohjaa magneettivuon materiaaliin.

Käytännön suojauksissa käytetään yleensä mahdollisimman puhdasta alumiinia /13/. Muuntajan ja pienjännitekeskuksen välisen kisko- tai kaapelisillan suojauksessa voidaan käyttää alumiinikourua. Tärkeää kourussa on, että koko kouru tehdään hyvin johtavaksi. Tämän takia mahdolliset liitokset olisi hyvä tehdä hitsaamalla /13/. Kouru voidaan magneettikenttien suojauksen kannalta asentaa joko aukeamaan ylös tai alas. Kourun suunta ei vaikuta suojaukseen merkittävästi. Käytännön kannalta kouru on joissakin tapauksissa helpompi asentaa kuin kotelo.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkimuuntamoissa H2453 ja H2793. Kourun asentamisen yhteydessä kummassakin esimerkkimuuntamossa kiskosilta oli vaihdettu kaapelisillaksi. Kouru oli molemmissa muuntamoissa tehty alumiinista. Taulukossa 7.4 on esitelty magneettikentän pienentyminen muuntamoissa, joissa muutostyö sisälsi kourun asentamisen.

Taulukko 7.4. Magneettikentän laskettu ja mitattu muutos muuntamoissa, joissa magneettikentän pienentämiseen käytetty metallikourua (vertailu alkuperäiseen rakenteeseen, virran muuttuminen huomioitu muutoksen laskennassa). Al on alumiini.

Muuntamo	Alku-peräinen laskettu, μT	Alku-peräinen mitattu, μT	Muutostyö	Rakenne muutettu, laskettu, μT	Rakenne muutettu, mitattu, μT	Laskettu muutos, %	Mitattu muutos, %
H2453	3,33	n. 3,3	Silta uusittu,	0,70	*	79,0	*

			kaapelit lattialla ja 5 mm Al-kouru				
H2793	5,23	4,23	Kiskot vaihdettu kaapelisillaksi ja 5 mm Al-kouru	0,31	0,40	90,8	85,3

* toinen mittaus puuttuu

Molemmissa taulukon muuntamoissa oli alumiinikourun asentamisen lisäksi tehty muita muutostöitä. Kourun vaikutus tulee molemmissa muuntamoissa yhdistettynä muihin muutostöihin. Muutostyön vaimennusvaikutus oli laskentatulosten perusteella 80% - 90% ja mittaustulosten perusteella 85%.

Metallikotelo

Pienjännitesillan suojaus voidaan toteuttaa käytännössä alumiinikotelolla. Myös alumiinikotelolla suojaus perustuu indusoituviin pyörrevirtoihin. Valmiin kotelon asentaminen kisko- tai kaapelisillan päälle voi joissakin rakenteissa olla hankalaa. Tämä on ratkaistu käytännössä niin, että ensin on tehty alumiinikouru ja se on täydennetty koteloksi asentamalla kouruun kansilevy. Jottei vaurioitettaisi suojan sisällä olevia eristeitä, kourua ja kantta ei ole aina hitsattu, vaan on tyydytty johtamattomien saumojen mahdollisesti aiheuttamaan suojauksen heikkenemiseen.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkimuuntamoissa H302, H2793 ja H276. Kotelo oli muuntamoissa tehty alumiinista. Alumiinikotelon asentaminen oli muuntamoissa H302 ja H276 ainoa muutostyö. Muuntamossa H2793 sitä vastoin muutostyön yhteydessä oli tehty myös muita muutoksia. Taulukossa 7.5 on esitelty magneettikentän pienentyminen muuntamoissa, joissa muutostyö sisälsi kotelon asentamisen.

Taulukko 7.5. Magneettikentän laskettu ja mitattu muutos muuntamoissa, joissa magneettikentän pienentämiseen käytetty metallikotelo (vertailu alkuperäiseen rakenteeseen, virran muuttuminen huomioitu muutoksen laskennassa). Al on alumiini.

Muuntamo	Alkuperäinen laskettu, μT	Alkuperäinen mitattu, μT	Muutostyö	Rakenne muutettu, laskettu, μT	Rakenne muutettu, mitattu, μT	Laskettu muutos, %	Mitattu muutos, %
H302	2,54	n. 2,3	Asennettu 3 mm Al-kotelo	0,27	n. 1,7	89,4	26,1
H2793	5,23	4,23	Kouru täydennetty 5 mm Al-koteloksi	0,39	0,39	90,3	88,0
H276	12,2	12,0	Kiskot suojattu 5 mm Al-kotelolla	0,99	n. 2,1	91,9	82,5

Metallikotelon pienennysvaikutus on ollut laskentatulosten perusteella noin 90%. Käytännössä tulokset ovat kuitenkin jääneet hieman alle laskennan avulla odotettavissa olevista tuloksista. Yksi tähän vaikuttava seikka on suojan rakentamisessa heikkenevät levyn sähköiset ominaisuudet. Materiaalissa tulee muutoksia esimerkiksi kulmien tekemisessä ja hitsauksessa. Toinen suojauksen pienennysvaikutusta heikentävä seikka on muuntamon muut sähköjohtimet ja sähkön syötöt, joiden vaikutus voidaan havaita erityisesti muuntamon H302 tuloksissa.

Metallilevy

Koko muuntamon vuoraus alumiinilevyllä on huomattavan kallis investointi. Sitä vastoin esimerkiksi pienjännitekeskuksen suojaus alumiinilevyllä voi olla käytännön ratkaisu, jos magneettikenttähäiriön syy saadaan kohdistettua johonkin muuntamon laitteeseen. Tällainen

esimerkki on pienjännitekeskus, jossa kojeisto on rakennettu muuntamon sisällä ja keskuksessa oleva kiskosto on avorakenteinen. Alumiinilevyllä on päästy hyvään suojaukseen. Asentamalla se mahdollisimman lähellä kiskostoa alumiiniin indusoituvat pyörrevirrat pienentävät magneettikenttää myös yläpuolisesta tilasta tarkasteltuna.

Tätä menetelmää on sovellettu esimerkkimuuntamoissa T573, H2793, Tu96-011 ja T1369. Metallilevy oli muuntamoissa tehty alumiinistä. Alumiinilevyn asentaminen oli muuntamoissa Tu96-011 ja T1369 ainoa muutostyö. Muuntamoissa T573 ja H2793 muutostyön yhteydessä oli tehty myös muita muutoksia. Taulukossa 7.6 on esitelty magneettikentän pienentyminen muuntamoissa, joissa muutostyö sisälsi suojalevyn asentamisen.

Taulukko 7.6. Magneettikentän laskettu ja mitattu muutos muuntamoissa, joissa magneettikentän pienentämiseen käytetty metallilevyä (vertailu alkuperäiseen rakenteeseen, virran muuttuminen huomioitu muutoksen laskennassa). Pjk on pienjännitekeskus ja Al on alumiini.

Muuntamo	Alku-peräinen laskettu, μT	Alku-peräinen mitattu, μT	Muutostyö	Rakenne muutettu, laskettu, μT	Rakenne muutettu, mitattu, μT	Laskettu muutos, %	Mitattu muutos, %
T573	13,6	n. 10	Pjk:n taakse asennettu 5 mm Al-levy	1,60	n. 1,3	87,6	86,3
H2793	5,23	4,23	Keskijännitekojeiston päälle asennettu 5 mm Al-levy	0,39	**	90,3	**
Tu96-011	5,42	*	Muuntamon seinässä 5 mm Al-levy	2,61	*	51,8	*
T1369	0,36	**	Rakentamisessa muuntamon seinään 4 mm alumiinilevy	0,31	0,26	13,9	**

* ei mittauksia, ** toinen mittaus puuttuu

Muutostyön vaimennusvaikutus oli laskentatulosten perusteella 13,9% - 90,3% ja mittatussa muuntamossa 86,3%. Pienjännitekeskuksen taakse ja keskijännitekojeiston päälle asennetuilla alumiinilevyillä on päästy melko hyviin tuloksiin muuntamoissa T573 ja H2793. Näissä muuntamoissa on tehty alumiinilevyn asentamisen lisäksi myös muita muutostöitä. Pelkän alumiinilevyn vaikutus oli kummassakin muuntamossa noin 50%, mutta vaimennusvaikutus rajoittui melko pienelle alueelle. Myös muuntamossa Tu96-011 on päädytty noin 50% vaimennusvaikutukseen, kun muuntamon ja viereisen tilan seinään on asennettu 5 mm alumiinilevy. Muuntamossa T1369 vaimennusvaikutus on jäänyt laskennan perusteella huomattavasti pienemmäksi. Yksi syy tähän on se, että tässä muuntamossa on kiskosillan etäisyys alumiinilevyyn huomattavasti muita rakenteita suurempi.

7.3 Muuntamossa useita muutosvaiheita

Muuntamoissa T573 ja H2793 muutokset tehtiin useissa muutosvaiheissa. Muuntamossa T573 ensisijaisena muutostyönä pyrittiin kasvattamaan mahdollisimman paljon etäisyyttä häiriintyvään kohteeseen. Lisäksi pienjännitekeskuksen taakse asennettiin 5 mm paksu alumiinilevy. Muuntamossa H2793 kiskot vaihdettiin kaapeleiksi ja vaimennettiin magneettikenttää alumiinikourulla ja -kotelolla toteutetun suojauksen avulla. Taulukossa 7.7 on esitelty magneettikentän pienentyminen muuntamon muutostöiden eri vaiheissa.

Taulukko 7.7. Magneettikentän laskettu ja mitattu muutos muuntamoissa, joissa magneettikentän pienentäminen toteutettu useiden muutosvaiheiden kautta (vertailu alkuperäiseen

rakenteeseen, virran muuttuminen huomioitu muutoksen laskennassa). Al on alumiini.

Muuntamo	Alku- peräinen laskettu, μT	Alku- peräinen mitattu, μT	Muutostyö	Rakenne muutettu, laskettu, μT	Rakenne muutettu, mitattu, μT	Laskettu muutos, %	Mitattu muutos, %
T573	13,6	n. 10	Silta laskettu niiltä osin, kuin onnistunut ilman keskeytystä	10,8	n. 8	20,6	20,0
			Silta laskettu koko matkalta	1,60	n. 1,3	88,0	86,7
			Pjk:n taakse asennettu 5 mm Al-levy	1,60	n. 1,3	87,6	86,3
H2793	5,23	4,23	Kiskot vaihdettu kaapelisillaksi ja 5 mm Al-kouru	0,31	0,40	90,8	85,3
			Kouru täydennetty koteloksi	0,39	0,39	90,3	88,0
			Keskijännitekojeiston päälle asennettu 5 mm Al-levy	0,39	*	90,3	*

*mittaus puuttuu

Muuntamossa T573 kaapelisillan osittainen lattialle laskeminen on pienentänyt magneettikenttää mittaus- ja laskentatulosten perusteella 20%. Kun kaapelisilta laskettiin kokonaan lattialle, magneettikenttä pienentyi lähes 90% yläpuolisen tilan lattialla metrin korkeudella. Muuntamossa T573 asennettiin myös 5 mm paksu alumiinilevy suojaamaan muuntamon pienjännitekeskuksen vaakatasossa olevan kiskoston aiheuttamaa magneettikenttää. Muuntamoon asennettu alumiinilevy vaikutti lähinnä sillä kohtaa, missä pienjännitekojeisto sijaitsee. Tällä kohtaa magneettikenttä pienentyi suojan vaikutuksesta noin 50%. Suojauksella ei ollut vaikutusta yläpuolisen asunnon magneettikenttään, jos tarkastellaan pelkästään suurinta arvoa. Laskennan perusteella päädyttiin lähes saman suuruiseen magneettikentän pienentymiseen kuin mittauksien perusteella. Erot lasketun ja mitatun magneettikentän pienentymisen välillä ovat 0,6%, 1,2% ja 0,4%.

Muuntamossa H2793 kiskosilta on vaihdettu vaihejärjestykseltään optimoiduksi kaapelisillaksi ja samalla magneettikenttien vaimentamiseksi on asennettu lisäksi 5 mm paksu alumiinikouru. Vaihejärjestyksen optimointi on toteutettu käyttämällä kaapelien tuentaan suurvirtakaapelijärjestelmän tukieristimiä. Alumiinikouru on asennettu alhaalta päin. Seuraavana muutostyönä kouru on täydennetty koteloksi. Magneettikenttä on laskentatulosten perusteella pienentynyt noin 90% alkuperäisestä kummankin muutostyön avulla. Mittamalla ei saatu kuitenkaan aivan yhtä hyviä tuloksia. Kun muuntamoon on lisätty keskijännitekojeiston päälle 5 mm paksusta alumiinilevystä tehty suoja, ei olla enää päästy pienempään magneettikenttään. Sitä vastoin alumiinisuojan lisäämisellä on ollut vaikutusta yläpuolisessa tilassa sillä kohtaa, missä keskijännitekojeisto sijaitsee. Siellä kenttä on pienentynyt suojan vaikutuksesta noin 50%. Erot lasketun ja mitatun magneettikentän pienentymisen välillä olivat 1,2% ja 2,1%.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkimuksessa tarkasteluun otettiin 20 muuntamoita, joista 10:ssä oli tehty muutostöitä magneettikenttien vähentämiseksi. Näistä muuntamoista, joissa oli tehty muutostöitä, osassa muutostyöt oli tehty erillisinä muutosvaiheina, jolloin yhdestä muuntamosta saatiin useampi kuin kaksi rakennetta. Yhteensä näistä 10 muuntamosta saatiin tutkittavaksi 24 rakennetta. Lopuista 10

muuntamosta laskettiin 11 eri rakennetta, koska yhdessä muuntamossa oli jo rakennusvaiheessa asennettu muuntamon ja viereisen tilan väliseen seinään alumiinilevy.

Tarkastellussa muuntamoaineistossa oli kiskot 11 muuntamossa (55%) ja kaapelit 9 muuntamossa (45%). Ryhmiteltäessä muuntamoita muuntajan ja pienjännitekeskuksen välisen kiskosillan rakenteen mukaan, merkittävin ryhmä on kiskot lappeellaan ja kiinnitetty lähelle kattoa (20%). Kaapelisilloista yli puolet oli lähellä kattoa.

Tutkimus perustuu sähköyhtiöiltä saataviin rakennepiirustuksiin toteutetuista kiinteistömuuntamoiden magneettikenttien vähentämiskäytännöistä. Sähköyhtiöt olivat myös tehneet joissakin muuntamoissa magneettikenttämittauksia, joiden tuloksia saatiin käytettäväksi. Rakennepiirustuksien avulla muuntamoiden muuntajan ja pienjännitekeskuksen välinen kisko- tai kaapelisilta digitoitui, ja muuntamosta tehtiin magneettikentälaskenta. Raportissa on analysoitu muuntamoiden rakenteita sekä magneettikentän mittaus- ja laskentatuloksia. Näiden perusteella on pyritty löytämään tiettyyn muuntamon rakenteeseen sopiva magneettikentän vähentämiskäytäntö. Tutkimuksen aikana on tehty myös kenttämittauksia.

8.1 Muuntamon kenttien vähentämiskeinojen vertailu

Muuntamon rakenteiden paremmuutta tarkasteltaessa magneettikenttä voidaan jakaa kuormitusvirralla, koska magneettikenttä on suoraan verrannollinen kuormitusvirtaan. Tämän avulla saadaan selville rakenteen tuottama magneettikenttä kuormituksesta riippumattomana lukuna. Taulukossa 8.1 on esitetty sekä mittauksen että laskennan avulla saatu magneettikenttä jaettuina kuormitusvirralla. Tuloksista voidaan analysoida rakenteen vaikutusta.

Taulukko 8.1. Yhteenveto kiinteistömuuntamoiden laskenta- ja mittaustuloksen arvoista suhteessa kuormitusvirran 100 ampeeriin. Pjk on pienjännitekeskus ja Al on alumiini.

Muuntamo	Muuntamon kuvaus	Mitattu B/I, $\mu\text{T}/100\text{ A}$	Laskettu B/I, $\mu\text{T}/100\text{ A}$
T290	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	1,23*	0,51 0,87*
	Kiskot kaapeleiksi, alkuperäistä alempana, vaihejärjestys optimoitu	0,31	0,31
L254	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	5,26**	2,82
	Kiskot lattialla kulkeviksi kaapeleiksi	0,79**	0,40
T1387	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	***	30,6****
	Kaksi 1000 kVA:n öljyeristeistä muuntajaa, silta kaapeleiksi	12,5****	13,7****
H2453	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	1,32	1,33
	Silta uusittu, kaapelit lattialla ja 5 mm Al-kouru	***	0,28
T573	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestystä ei symmetroitui	1,40	1,90
	Silta laskettu niiltä osin, kuin onnistunut ilman keskeytystä	1,12	1,51
	Silta laskettu koko matkalta	0,19	0,23
	Pjk:n taakse asennettu 5 mm Al-levy	0,19	0,24
H302	Kiskot lappeellaan kiinnitetty muualle kuin kattoon, muuntaja ja pjk selät vastakkain	0,27	0,30
	Asennettu 3 mm Al-kotelo	0,12	0,03

H2605	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestys symmetroituu	***	0,41
	Silta laskettu metriä alemmaksi	***	0,30
H2793	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	1,11	1,37
	Kiskot vaihdettu kaapelisillaksi ja 5 mm Al-kouru	0,16	0,13
	Kouru täydennetty koteloksi	0,13	0,13
	Keskijännitekojeiston päälle asennettu 5 mm Al-levy	***	0,13
H276	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	1,00	1,02
	Kiskot suojattu 5 mm Al-kotelolla	0,18	0,08
Tu96-011	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestystä ei symmetroituu	***	1,08
	Muuntamon seinässä 5 mm Al-levy	***	0,52
T53	Kaapeli lattialla, vaihejärjestys symmetroituu	0,36	0,43
H447	Muuntaja ja pj-k selät vastakkain	0,18	0,15
T567	Kiskot lappeellaan katossa	0,75	0,87
H37	Kiskot muualla kuin katossa	0,39	0,31
T1217	Kaapeli katossa, symmetroituu	0,43	0,32
T994	Kaapeli katossa, ei symmetroituu	0,58	0,49
T486	Kaapeli lattialla, vaihejärjestys ei symmetroituu	***	0,51
K60	Kaapeli katossa, ei symmetroituu	***	0,64
K38	Kaapeli lattialla, vaihejärjestystä ei symmetroituu	***	0,14
T1369	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty muualle kuin kattoon	***	0,08
	Rakentamisessa muuntamon seinään 4 mm alumiinilevy	0,06	0,07

* 0,75 m laskentakorkeus, ** lattialla, *** ei mittausta, **** muuntamossa, ***** viereisessä tilassa

Taulukon perusteella voidaan todeta, että parhaita muuntamoita ovat T573, H302, H2793, H276, H447, K38 ja T1369. Näissä muuntamoissa magneettikentän suhde 100 A kuormitusvirtaan on alle 0,2 $\mu\text{T}/100\text{ A}$. Kyseinen arvo tarkoittaa yhden mikrotieslan arvoa kurmitusvirran ollessa 500 A.

Magneettikenttien kannalta parhaissa muuntamoissa on rakenteellisia yhtäläisyyksiä. Muuntamoissa T573 ja K38 kaapelisilta on lattialla. Muuntamoissa H302 ja H447 muuntaja ja pienjännitekeskus ovat selät vastakkain. Muuntamossa H302 on lisäksi 3 mm alumiinikotelo. Muuntamossa H2793 yläpuolinen kaapelisilta on suojattu 5 mm alumiinikourulla ja toisessa rakenteessa 5 mm alumiinikotelolla. Muuntamossa H276 suojaukseen on käytetty 5 mm alumiinikotelo. Muuntamossa T1369 on tarkasteltu magneettikenttää muuntamon vieressä olevassa tilassa, joten muuntamon ja tilan välinen etäisyys vaikuttaa tulokseen tässä muuntamossa merkittävästi.

Sekä mitattuun että laskettuun magneettikentän arvoon vaikuttaa kuormitusvirran epäsymmetrisyys. Mittaustuloksiin vaikuttaa lisäksi kuormitusvirran vaihtelu, epäsymmetrian vaihtelu, kiinteistössä esiintyvät harhavirrät ja kaikki kiinteistössä käytetyt sähkölaitteet. Lisäksi mittaustuloksiin vaikuttaa kaikki kiinteistön kaapeloinnit, joissa kulkee virtaa. Sähkökäytöstä syntyvä magneettikenttä riippuu suuresti asennus- ja johdotustekniikasta, sekä kolmella jaollisten yliaaltojen määrästä. Tämän vuoksi pelkästään kiinteistömuuntamosta aiheutuvaa magneettikenttää ei voida

mitata kuin laboratorio-olosuhteissa. Myöskään tällaista pelkästään kiinteistömuuntamosta aiheutuvaa magneettikenttää ei esiinny käytännössä juurikaan. Siksi myöskään laskennallinen symmetrisen kuormitusvirran tarkastelu ei ole välttämättä mielekäästä, vaan virtana kannattaa laskennassa käyttää mitattua virtaa.

Tarkasteltujen kiinteistömuuntamoiesimerkkien perusteella magneettikenttien pienentämiselle ei löytynyt sellaista ratkaisua, jonka voisi todeta aina olevan hyvä ratkaisu. Laskennan yhteydessä todettiin, että kuormitusvirran epäsymmetrisyys vaikuttaa huomattavasti kiinteistömuuntamon magneettikentän suuruuteen. Koska kuormitustilanteet ja kuormitusvirran epäsymmetrisyys vaihtelevat koko ajan, pelkän muuntamorakenteen tarkastelu ja muuttaminen eivät takaa pientä magneettikenttää. Myös muuntamon kuormitusvirtaan on syytä paneutua magneettikentän pienentämisen yhteydessä. Myös kiinteistön mahdolliset harhavirrat on syytä tutkia.

Mittausten ja laskennan perusteella jokainen muuntamo on käsiteltävä erillisenä tapauksena, jonka magneettikentän pienentäminen on suunniteltava erikseen. Koska magneettikenttien pienentäminen on usein melko kallis toimenpide, magneettikentät olisi hyvä ottaa huomioon jo muuntamoa suunniteltaessa.

Myös rakenteiden lämpiäminen tulee ottaa huomioon vaimennusta käytettäessä erityisesti, jos tarkastellaan suurien kuormitusten kisko- tai kaapelisiltojen kotelointia. Suuria kuormituksia esiintyy erityisesti teollisuudessa käytettävissä kiinteistömuuntamoissa.

Ferromagneettista magneettikenttäsuojaa käytettäessä voidaan koteloon tehdä lämmönvaihtoa parantavia tuuletusaukkoja suojan ominaisuuksien huonontumatta. Sitä vastoin johtavasta materiaalista tehtyyn suojakoteloon ei voi tehdä aukkoja, koska ne heikentävät suojan ominaisuuksia. Kun käytännössä toteutetuissa vähentämiskäytöksissä käytettiin suojauksessa lähes aina alumiinisia kotelointeja, voidaan suurien kuormitusten yhteydessä joutua lämpenemisen takia ongelmiin.

Lämpiäminen saattaa olla ongelma erityisesti pienjännitekaapelisilloissa, koska kaapelien kuormitettavuus suunnitellaan tiettyyn ympäristön lämpötilaan. Suojakotelon sisällä suljetussa tilassa lämpötila saattaa kuitenkin nousta tavallista ympäristön lämpötilaa korkeammaksi. Suojakotelointia suunniteltaessa lämpötilan kasvamisen vaikutus kaapelien kuormitettavuuteen tulee ottaa huomioon.

Yksi keino ottaa kiinteistömuuntamon magneettikentät huomioon, on käyttää pienikenttäiseksi todettuja muuntamorakenteita, kuten muuntamo ja pienjännitekeskus selät vastakkain -rakennetta tai tehdasvalmisteista pienikenttäistä kiinteistömuuntamoa. Tehdasvalmisteisen pienikenttäisen kiinteistömuuntamon etuna on, että sen magneettikenttä on mitattu laboratorio-olosuhteissa jo etukäteen. Tehdasvalmisteisen kiinteistömuuntamon aiheuttama magneettikenttä voidaan ennustaa, jos installoinnissa ei tehdä virheitä ja muuntajan kuormitus on tasattu eri vaiheille niin, että kuormitus on lähes symmetristä. Tällöin kiinteistömuuntamoa suunniteltaessa tiedetään kiinteistön arvioidun kuormituksen perusteella, mitä suuruusluokkaa magneettikenttä tulee olemaan muuntamon yläpuolisessa tai vieressä olevassa tilassa.

8.2 Laskenta- ja mittaustulosten vertailu

Taulukossa 8.2 on mittaustuloksia verrattu laskentatuloksiin muuntamoissa, joiden rakennetta on muutettu magneettikenttien pienentämiseksi.

Taulukko 8.2. Kiinteistömuuntamoiden vähentämisesimerkkien mittaustulosten vertailu laskentatuloksiin (maksimi-arvot). Pjk on pienjännitekeskus ja Al on alumiini.

Muuntamo	Muutostyö	Laskettu arvo, μT	Mitattu arvo, μT	Lasketun arvon ero mitattuun, %
T290	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	2,56 4,42*	**** n. 6,2*	**** -28,7*

	Kiskot kaapeleiksi, alkuperäistä alempana, vaihejärjestys optimoitu	1,58	1,56	1,3
L254	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	10,7	n. 20**	***
	Kiskot lattialla kulkeviksi kaapeleiksi	1,51	n. 3**	***
T1387	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	458,7	****	****
	Kaksi 1000 kVA:n öljyeristeistä muuntajaa, silta kaapeleiksi	166,6	151,6	-9,9
H2453	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	3,33	n. 3,3	-0,9
	Silta uusittu, kaapelit lattialla ja 5 mm Al-kouru	0,70	****	****
T573	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestystä ei symmetroituu	13,6	n. 10	-36,0
	Silta laskettu niiltä osin, kuin onnistunut ilman keskeytystä	10,8	n. 8	-35,0
	Silta laskettu koko matkalta	1,60	n. 1,3	-23,1
	Pjk:n taakse asennettu 5 mm Al-levy	1,60	n. 1,3	-23,1
H302	Kiskot lappeellaan kiinnitetty muualle kuin kattoon, muuntaja ja pjk selät vastakkain	2,54	n. 2,3	-10,4
	Asennettu 3 mm Al-kotelo	0,27	n. 1,7*****	*****
H2605	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestys symmetroituu	1,22	n. 1,5	****
	Silta laskettu metriä alemmaksi	0,90	n. 1,0	****
H2793	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	5,23	4,23	-23,6
	Kiskot kaapeleiksi ja 5 mm Al-kouru	0,31	0,40	22,5
	Kouru täydennetty koteloksi	0,39	0,39	0,0
	Keskijännitekojeiston päälle 5 mm Al-levy	0,39	****	****
H276	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	12,2	12,0	-1,7
	Kiskot suojattu 5 mm Al-kotelolla	0,99	n. 2,1	52,9
Tu96-011	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestystä ei symmetroituu	5,42	****	****
	Muuntamon seinässä 5 mm Al-levy	2,61	****	****

* 0,75 m, ** lattialla, *** mittaus ja laskenta eri korkeudelta, **** ei mittausta, tai virtaa ei mitattu, ***** magneettikenttä keskijännitekojeistosta

Lasketun ja mitatun magneettikentän eron itseisarvot olivat välillä 0,0% - 52,9%. Suurin ero lasketun ja mitatun arvon välillä johtui siitä, että suojakotelon vaimennus ei ollut yhtä hyvä kuin

laskennan mukaan sen olisi pitänyt olla. Suojan vaimennusta laskettaessa virroille valitaan vaihekulmat joltain hetkeltä. Kuormituksen muuttuessa myös vaihekulmat yleensä muuttuvat, jolloin vaimennus ei enää vastaa laskettua. Lisäksi kuormituksen vaihtelu, magneettikenttämittari ja mittausmenetelmä sekä kaikki magneettikenttää tuottavat johdot ja laitteet saattoivat vaikuttaa lasketun ja mitatun arvon eroihin.

Kuormitukset vaihtelevat lähes kaikissa muuntamon sähköjohdoissa. Muuntamon kuormituksen muuttumista on vaikea ottaa huomioon magneettikenttien laskennassa. Kuormituksen vaihtelu on joissakin muuntamoissa hyvin nopeaa, jolloin esimerkiksi muuntamon yläpuolisen asunnon mittauksessa joissakin mittauspisteissä voi olla huomattava ero mittaus- ja laskentatulosten välillä ja toisissa mittauspisteissä ero voi olla pieni. Kaikissa muuntamoissa lasketun ja mitatun arvon eroihin vaikutti myös sellaiset sähköjohdot ja sähkölaitteet, joita ei otettu laskennassa huomioon.

Sähköyhtiöiden tekemissä mittauksissa mittausmenetelmä ei kaikissa mittauksissa ollut yhtä kattava kuin TTKK:n tekemissä mittauksissa. Myös kaikissa sähköyhtiöiden mittauksissa käytetyistä mittareista tai mittareiden kalibroinneista ei ole tarkkaa tietoa. TTKK:n mittauksissa käytetty magneettikenttämittari on kalibroitu 12.2.1998.

Yhteenvedona kiinteistömuuntamoiden laskennan ja mittauksen erosta on esitetty taulukossa 8.3 eron keskiarvo ja keskihajonta.

Taulukko Yhteenvedo kiinteistömuuntamoiden laskennan ja mittauksen erosta (keskiarvo ja keskihajonta). Pjk on pienjännitekeskus ja Al on alumiini.

Muuntamo	Muuntamon kuvaus	Keskiarvo, μT	Keskihajonta, μT
T290	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	*	*
	Kiskot kaapeleiksi, alkuperäistä alempana, vaihejärjestys optimoitu	-0,18	0,14
L254	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	*	*
	Kiskot lattialla kulkeviksi kaapeleiksi	*	*
T1387	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	*	*
	Kaksi 1000 kVA:n öljyeristeistä muuntajaa, silta kaapeleiksi	-27,0	31,5
H2453	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	*	*
	Silta uusittu, kaapelit lattialla ja 5 mm Al-kouru	*	*
T573	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestystä ei symmetroituu	*	*
	Silta laskettu niiltä osin, kuin onnistunut ilman keskeytystä	*	*
	Silta laskettu koko matkalta	-0,17	0,42
	Pjk:n taakse asennettu 5 mm Al-levy	-0,20	0,54
H302	Kiskot lappeellaan kiinnitetty muualle kuin kattoon muuntaja ja pjk selät vastakkain	*	*
	Asennettu 3 mm Al-kotelo	*	*
H2605	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestys symmetroituu	*	*
	Silta laskettu metriä alemmaksi	*	*
H2793	Kiskot pystyssä, kiinnitetty lähelle kattoa	-0,18	0,40
	Kiskot vaihdettu kaapelisillaksi ja 5 mm Al-kouru	0,05	0,07

	Kouru täydennetty koteloksi	-0,01	0,11
	Keskijännitekojeiston päälle asennettu 5 mm Al-levy	*	*
H276	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty lähelle kattoa	*	*
	Kiskot suojattu 5 mm Al-kotelolla	*	*
Tu96-011	Kaapeli lähellä kattoa, vaihejärjestystä ei symmetroituu	*	*
	Muuntamon seinässä 5 mm Al-levy	*	*
T53	Kaapeli lattialla, vaihejärjestys symmetroituu	0,06	0,11
H447	Muuntaja ja pjk selät vastakkain	0,09	0,03
T567	Kiskot lappeellaan katossa	-0,82	1,23
H37	Kiskot muualla kuin katossa	0,11	0,71
T1217	Kaapeli katossa, symmetroituu	0,66	0,50
T994	Kaapeli katossa, ei symmetroituu	0,40	0,28
T486	Kaapeli lattialla, vaihejärjestys ei symmetroituu	*	*
K60	Kaapeli katossa, ei symmetroituu	*	*
K38	Kaapeli lattialla, vaihejärjestystä ei symmetroituu	*	*
T1369	Kiskot lappeellaan, kiinnitetty muualle kuin kattoon	*	*
	Rakentamisessa muuntamon seinään 4 mm alumiinilevy	0,10	0,07

*ei mittausta

Mittausten ja laskennan väliset erot olivat joissakin muuntamoissa huomattavan suuria. Oleellisesti tähän asiaan vaikuttaa se, että muuntamon paikka on vaikea saada selville yläpuolisessa tai vierisessä tilassa rakenteiden mittaamisen avulla tai piirustuksia tutkimalla. Myös lattian paksuus oli vaikea mitata käytössä olleilla laitteilla.

Lasketun ja mitatun magneettikentän erot johtuivat osittain myös siitä, että laskennan avulla saadaan määritettyä magneettikenttä myös sellaisista kohdista, joissa mittausta ei voi suorittaa. Tällaisia paikkoja ovat esimerkiksi komerot, kaapit ja huoneistojen seinät. Lisäksi eroon vaikutti se, että joitakin magneettikentän mittauksia on tehnyt sähköyhtiö, jolloin mittauspisteiden tarkkaa sijaintia tai tarkkoja mittaustuloksia ei aina ole ollut saatavissa.

Usein kiinteistöjen piirustukset eivät täysin vastaa rakennuksen käytännön toteutusta. Myös muuntamoiden rakentamisessa rakentajat ovat usein tehneet omia ratkaisuja. Näiden seurauksena muuntamosta lasketun magneettikentän arvot saattavat tulla eri kohtaan kuin mittauksessa, jolloin mittaus- ja laskentatulosten ero kasvaa merkittävästi.

Mittaus- ja laskentatulosten eroon vaikuttaa myös muut kenttälähteet kuin muuntamo. Kiinteistömuuntamo onkin tässä suhteessa käsitettävä yhdeksi laitteeksi. Yksittäisen laitteen aiheuttamaa magneettikentän osuutta on lähes mahdollista saada selville käytännön olosuhteissa. Pelkän muuntamon magneettikentän mittaaminen onnistuu vain laboratorio-olosuhteissa.

LÄHTEET

- /1/ ABB Transmit Oy, Keskijännitekojeet ja -kojeistot, Muuntamot. Teslasafe-kiinteistömuuntamot - Uusi toteutustapa. Esite TESLASAFE 1 FI 97-08. 1997. 4 s.
- /2/ EMC ja rakennusten sähkötekniikka. 1997. Sähkötieto, Espoo.198 s.
- /3/ Hongisto, M. & Valjus, J. Magneettikenttäaltistus 110-400 kV johtojen läheisyydessä.

- Vantaa, IVO-A-05/93 tutkimusraportteja. IVO Oy, ympäristönsuojeluyksikkö. 1993. 141 s.
- /4/ Keikko T., Isokorpi J. & Korpinen L. Pientaajuisten magneettikenttähäiriöiden pienentämismenetelmiä. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkövoimatekniikka, Raportti 9-97. 1997. 76 s.
- /5/ Keikko T., Kotiniitty J., Korpinen L., Elovaara J. & Vanhala P. Considering Electric and Magnetic Fields in Electric Power System Design in Finland. Cigre 2000, Group 36: Power System Electromagnetic Compatibility, Ranska, 36-102. 2000. 7 s.
- /6/ Keikko T., Kotiniitty J. & Korpinen L. Calculations of Magnetic Fields from Indoor Distribution Substation Bus Bars. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2000, Seattle, USA. 2000. 6 s.
- /7/ Korpinen, L., Hietanen, M., Jokela, K., Juutilainen, J. & Valjus, J. Voimajohtojen sähkö- ja magneettikentät ympäristössä. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 89. 1995. 210 s.
- /8/ Korpinen, L. Laitteiden ja elinympäristön sähkö- ja magneettikenttien mittaaminen. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 9/2000. 2000. 131 s.
- /9/ Kotiniitty J., Reivonen S., Kantell T., Keikko T. & Korpinen L. Kiinteistömuuntamoiden magneettikentät. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkövoimatekniikka, Teollisuuden sähkötekniikka, Raportti 1-99. 1999. 90 s.
- / Kursi, J. Sähköjohtojen 50 Hz kenttien laskenta-apuneuvot. Diplomityö. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, sähkötekniikan osasto. 1995. 120 s.
- /11/ Kuusiluoma S. & Korpinen L.; Tuloksia kiinteistömuuntamoja koskevasta puhelinkyselystä. Raportissa: Leena Korpinen (toim.). Ajankohtaista käyttötaajuisista sähkö- ja magneettikentistä ympäristössä. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkövoimatekniikan laitos, raportti 3-2000. 2000. 6 s.
- / Schweiz, P. Ein Verfahren zur Berechnung von Dreidimensionalen Magnetfeldern im Nachbereich von Leitungen der Elektrischen Energieversorgung. *Electrizi-tätswirtschaft*, vol. 85, no 21. 1986. Ss. 827-831.
- / Suomen sähkölaitosyhdistys ry. Kiinteistömuuntamon aiheuttaman magneettikentän vaimentamiskeinoja. Julkaisusarja 4/93. 1993. 48 s.
- / Sähkötilasto 1997. Adato Energia Oy, Helsinki. 1998. 90 s.
- / Tikkanen J. Verkkotaajuiset magneettikentät jakelumuuntajan ympäristössä. Diplomityö. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan osasto. 1992. 125 s.
- / 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. 1996. 60 s.
- / Vanhala, P. Muuntamoiden magneettikentät ja niiden vaimentaminen. Raportissa: Korpinen, L., Pääkkönen, R. & Partanen, J. (toim.): Käyttötaajuisten sähkö- ja magneettikenttien tekninen vähentäminen työympäristössä. Tampereen teknillinen korkeakoulu, sähköenergiajärjestelmät, raportti 5-93. 1993. 6 s.