

# Teknologian kehittäminen pientaajuisten magneettikenttien vähentämiseksi sähkön siirrossa ja -jakelussa



Selvitys tutkimustarpeesta ja  
ehdotus tutkimussuunnitelmasta  
vuosille 1998 - 2000

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

Tutkimus on tehty Teknologian kehittämiskeskuksen tuella

Julkaistu 31.12.1997

[Palaute](#)

1. Taustaa .....	3
1. Taustaa .....	3
2. Tarpeet eri osapuolten näkökulmista .....	4
2.1 Verkkoyhtiöt .....	4
2.2 Sähköteollisuus .....	4
2.3 Sähkönkäyttäjät .....	5
2.4 Viranomaiset .....	5
3. Sähkövoimatekniikan kehitystrendit .....	6
3.1 Informaatioteknologian hyödyntäminen .....	6
3.2 Sähkömarkkinoiden vapautuminen .....	6
3.3 Ympäristötekijät .....	7
4. Aikaisempia tutkimustuloksia .....	7
4.1 Magneettikenttien määrittäminen .....	8
4.2 Magneettikenttien tekninen pienentäminen .....	9
5. Selvityksen aikana esille tulleet tutkimusalueet .....	11
5.1 Magneettikenttien ja häiriöiden vähentäminen .....	12
5.2 Magneettikenttien mittaamiseen liittyvät aiheet .....	13
5.3 Muut esille tulleet tutkimusaiheet .....	13
6. Tutkimuksen tavoitteet .....	14
7. Tutkimusohjelman hallinto ja organisointi .....	15
8. Tulosten hyödyntäminen .....	16
Viitteet .....	16

# 1. Taustaa

Teknologian kehittämiskeskus [Tekes](#) myönsikeväällä 1997 Tampereen teknillisen korkeakoulun ([TTKK](#)) Sähkövoimatekniikan laitoksella rahoituksen esiselvitykseen "Teknologian kehittäminen pientaajuisten magneettikenttien vähentämiseksi sähkönsiirrossa jakelussa". Selvitys on tehty koko sähkövoimatekniikan alueelta, mutta se painottuu sähkönsiirron ja jakelun aiheuttamiin magneettikenttiin. Tämä raportti on yhteenveto tehdystä esiselvityksestä.

Magneettikenttien vähentämiselle löytyy perusteita muun muassa kansainvälisistä standardeista ja suosituksista. EMC-standardit dellyttävät laitteilta häiriintymätöntä toimintaaniissä määrättyissä olosuhteissa. 50 Hz magneettikentille raja-arvo on yleisesti  $3,8 \mu\text{T}$  /[34](#)/. Näytöille raja-arvo on  $1,3 \mu\text{T}$  ja teollisuuden laitteille  $37,7 \mu\text{T}$ , kun laitteissa on magneettikentille alttiita osia /[34,35](#)/. Nämä raja-arvot ovat kuitenkin melkomatalat, joten laitteet voivat käytännön olosuhteissa häiriintyä. Etenkin teollisuudessa esiintyy usein kenttiä, jotka ovat näitä suurempia. Kenttien mahdollisten terveysvaikutusten osalta on tällä hetkellä olemassa erilaisia standardiluonnoksia ja kansainvälisiä suosituksia. Näissä kentänvoimakkuustasot ovat yleensä edellämainittuja korkeampia. /[6](#), [24](#)/

TTKK:n Sähkövoimatekniikan laitoksella on tutkittu sähköjärjestelmien pientaajuisia magneettikenttiä jo pitkään. Alkuvaiheessa tutkimukset suuntautuivat sähkö- ja magneettikenttien terveysvaikutuksiin. Tästä aiheesta tehtyjä tutkimuksia on käsitelty mm. tämän esiselvityksen johtajan väitöskirjassa /[23](#)/. Tutkimuksen painopiste on vuosien myötä siirtynyt kuitenkin yhä enemmän teknisten aiheiden suuntaan, kuten pientaajuisten magneettikenttien tekniseen mittaamiseen, laskentaan ja niiden aiheuttamiin häiriöihin sekä niiden vähentämiseen. TTKK:n tutkimusryhmäntuloksia on julkaistu kotimaisissa ja kansainvälisissä julkaisuissa /[16](#), [17,21](#), [22,30](#)/. Aiheista on tehty myös useita opinnäytetöitä. Tutkimusten rahoittajina ovat olleet mm. [Suomen Akatemia](#), [Kauppa- ja teollisuusministeriö](#), [Opetusministeriö](#), Sähkövoimatekniikan kehityspooli ja [Työsuojelurahasto](#).

Edellä mainittujen tutkimuksien perusteella on syntynyt selvä tarve jatkaa pientaajuisten magneettikenttien vähentämisteknologioiden kehittämistä yhteistyössä teollisuuden kanssa. Tämän esiselvityksen tavoitteena olikin selvittää, millainen on teollisuuden tarve tämän alan tutkimukselle. Selvityksen pohjalta on tarkoitus käynnistää yhteistyöhanke teollisuuden kanssa teknologian kehittämiseksi pientaajuisten magneettikenttien alueelta.

Esiselvityksessä on käyty läpi teollisuuden trendejä ja olemassa olevia tarpeita pientaajuisten magneettikenttien vähentämisteknologioiden kehittämiseksi. Sähkövoimatekniikan alalla toimii paljon yrityksiä, jotka ovat potentiaalisia hyödyntäjiä tälle teknologialle. Kaikkiin alalla aktiivisesti toimiviin yrityksiin on pyritty ottamaan yhteyttä ja keskustelemaan tutkimusyhteistyötarpeesta. Yhteydenotoissa on noussut esiin useita aiheita mahdollisiksi tutkimuskohteiksi. Tarpeen mukaan aiheesta on käyty tarkempia keskusteluja ja tehty myös suunnitelmia mahdollisesta yhteistyöstä.

Esiselvityksessä on katsottu aiheelliseksi ehdottaa myöhemmin laajempaa tutkimushankkeen käynnistämistä yhteistyössä eriyrittäjien ja tutkimuslaitosten kanssa. Tutkimushanke on kokonaisuus, joka koostuu erilaisista kapeista soveltamiskohteista. Tutkimushanke muodostaa pohjanuuden teknologian hyödyntämiseen yleisesti teollisuudessa.

Tähän raporttiin on koottu esiselvityksen keskeiset tulokset. Tulosten pohjalta on määritelty myös alustavasti laajempaa tutkimuskokonaisuuden tavoitteet.

## 2. Tarpeet eri osapuolten näkökulmista

Osapuolia, jotka voisivat olla kiinnostuneita tutkimusyhteistyöstä pientaajuuksien magneettikenttien vähentämiseksi sähkönsiirrossa ja jakelussa, on monia. Yhtiöt, jotka omistavat siirto- ja jakeluverkot, ovat yksi luonnollinen osapuoli. Lisäksi näihin verkkoihin komponentteja valmistava teollisuus on kiinnostunut alan kehityksestä. Sähkön käyttäjiä taas kiinnostaa sähkön käytössä mahdollisesti esiintyvät ongelmat. Lopulta yhtenä vaikuttajana mukaantulevat viranomaiset, jotka säätävät sallitut toimintatavat ja rajoitukset sähköalalla.

### 2.1 Verkkoyhtiöt

Sähkön siirto ja jakelu tapahtuu pääosin sähköyhtiöiden omistamissa verkoissa. [Sähköyhtiöt](#) omistavat myös paljon sähköasemia ja valtaosan jakelumuuntamoista. Lisäksi teollisuudella on omistuksessaan merkittävää määrää sähköverkkoja, joissa siirretään huomattavia energiamääriä. Teollisuuslaitoksissa on myös sähköasemia ja jakelumuuntamoita.

Sähköverkon magneettikentät voivat aiheuttaa häiriöitä muiden sähköjärjestelmien ja -laitteiden toimintaan. Häiriöllä voi olla suuri taloudellinen merkitys, mikäli esimerkiksi tuotantokeskeytyy häiriön seurauksena tai jos häiriön seurauksena tuotetaan huonolaatuisia tai jopa viallisia tuotteita. Häiriöt voivat vaikuttaa myös sähköverkon toimintaan. Lisäksi on olemassa mahdollisuus, että magneettikentät saattavat aiheuttaa terveystarpeita. Yhtiöt vastaavat omistajina sähkön siirto- ja jakeluverkkojen aiheuttamista haitoista ja näin ollen yhtiöillä on tarve haittojen vähentämiseen. Tässä tapauksessa haitta on magneettikenttien aiheuttamat häiriöt, joita voidaan vähentää pienentämällä magneettikenttiä.

Verkkojen magneettikentät ulottuvat varsinaisten [johtokatu](#)jen ja asematilojen ulkopuolelle ja voivat siten aiheuttaa häiriöitä kaukanakin sijaitseville sähkölaitteille. Kaapelien magneettikenttä ei taas ulotu kauas, mutta toisaalta kaapelit voivat kulkea paljon lähempänä häiriintyviä laitteita. Jotta voidaan selvittää, aiheutuuko esiintyvä häiriö sähköverkkojen magneettikentistä, on kenttien mittaamisen oltava luotettavaa ja mittaustavan yleisesti hyväksyttyä. Mittausten avulla voidaan myös selvittää, aiheutuuko magneettikenttä siirto- tai jakeluverkosta vai jostakin muusta lähteestä.

Mikäli sähköverkon magneettikentät todella aiheuttavat häiriöitä, on verkon omistajalla oltava keinoja häiriöiden poistamiseksi tai vähentämiseksi. Magneettikenttien aiheuttamien häiriöiden vähentäminen ei ole yksinkertaista, koska magneettikenttiä on hankala 'ohjata' teknisesti. Tämän vuoksi vähentämiskustannukset voivat nousta huomattaviksi. Tehtävien toimenpiteiden oikea mitoittaminen on tämän vuoksi tärkeää. Kustannustarkastelussa häiriöiden vähentämisen mahdollisena vaihtoehtona on esimerkiksi haitasta maksettava korvaus. Kalliiden vähentämistoimenpiteiden tai korvausten välttämiseksi on käytännöllisintä huomioida magneettikentät jo suunnitteluvaiheessa.

### 2.2 Sähköteollisuus

Kun sähköverkon haltijoilla on tarvetta vähentää verkkojensa ympäristöön aiheuttamia magneettikenttiä, tämä tarve välittyy verkkokomponentteja valmistavalle teollisuudelle. Teollisuuden on siis otettava huomioon asiakkaidensa tarpeet ja valmistettavat tuotteet, jotka aiheuttavat ympärilleen pienempiä magneettikenttiä. Tämä ominaisuus voi olla myös merkittävä kilpailutekijä kireillä kansainvälisillä markkinoilla, kun muut kilpailutekijät on jo mahdollisuuksien mukaan hyödynnetty.

Toisaalta teollisuudella on tarve kehittää tuotteitansa kestävämpään paremmin magneettikenttiä häiriintymättä. Laitteiden tuleesietää häiriintymättä ainakin standardeissa määritellyntasoisia magneettikenttiä /34,35/. Laitteiden laadun parantamiseksi saattaa ollatarpeellista suunnitella ne kestävämpään suurempiakinmagneettikenttiä, koska niitä saattaa esiintyä laitteen todennäköisessäkäyttöympäristössä. Etenkin teollisuusympäristössäesiintyy usein huomattavasti suurempia magneettikenttiä kuin onstandardeissa määritelty sietotaso.

Teollisuudessa on jatkuvasti tarvetta myös tuotekehityksellemagneettikenttiä soveltavissa tuotteissa. Tässä mielessämagneettikentissä on vielä paljon hyödynnettävissäerityisesti uusissa käyttökohteissa, kuten vaikka sähköjärjestelmäntilanseurannassa. Tällä alueella on runsaasti mahdollisuuksia myösuusille innovaatioille. Perinteisissäkin tuotteissa, kuten esimerkiksimuuntajissa, on myös luonnollisesti tarvetta jatkuvalla tuotekehitykselle.

Nykyään yritysten toiminnan ohjausta tukee usein jokin järjestelmä,kuten laatu- tai ympäristöjärjestelmä36,37/. Näilläsertifioituilla järjestelmillä yritys takaa kumppaneilleen luvatusoisien toiminnan järjestelmän kuvaamalla alalla. Vihreiden arvojensaadessa yhä enemmän merkitystä ympäristöjärjestelmänkäyttö yleistyy. Ympäristöjärjestelmässä onolennaisena ajatuksena jatkuva kehitys. Eli toiminnan ja tuotteiden ympäristöystävällisyyttäon jatkuvasti pyrittävä parantamaan sertifikaatin säilyttämiseksi.Tuotteiden ympäristövaikutuksiin kuuluu tässä mielessämyös magneettikentät, jotka on siis huomioitava tuotteissa jatuotannossa.

Edellä mainituista syistä teollisuudella on tarve myös laskea jमितata magneettikenttiä. Yrityksen on kyettävä luotettavasti määrittämäänuotteidensa ympäristöön aiheuttamat magneettikentätvoidakseen kertoa ne edelleen asiakkailleen. Magneettikenttien laskenta jमितtaminen ovat tärkeitä myös tuotekehityksen yhteydessä,kun kenttiä pyritään pienentämään.

## 2.3 Sähkökäyttäjät

Sähkökäyttäjilläkin on tarvetta pienentää sähkönjakelusta aiheutuvia magneettikenttiä. Mitä suurempi käyttäjänsähkön kulutus on, sitä enemmän siitä voi aiheutua häiriöitä.Suurilla kuluttajilla, kuten teollisuudella, on omistuksessaan myösjakelumuuntamoita ja jopa sähköasemia. Myös sisäasennusverkkojenmagneettikentät aiheuttavat häiriöitä, joita on sitentarvetta pienentää.

Yksittäisten laitteidenkin aiheuttamat suuret magneettikenttäsaattavat aiheuttaa ongelmia käyttäjille. Sähkökäyttäjienmagneettikenttien pienentämistarve kohdistuuakin yleisemmin yksittäisiinmagneettikenttälähteisiin. Lähteet kuitenkin vaihtelevat erittäinpaljon, megawattien valokaariuunista tavallisiin sähkölaitteisiin. Käytettävissäolevat resurssit eivät aina riitä kenttien pienentämisenperusteelliseen selvittämiseen. Tämän vuoksi sähkökäyttäjienmagneettikenttien selvitystarve on painottunut kenttien aiheuttamien ongelmiennopeaan tunnistamiseen ja yleisien pienentämiskeinojen käytännöntoteutukseen.

## 2.4 Viranomaiset

Viranomaisten tehtävänä on pientaajuisten magneettikenttienosalta määrittellä sallitut raja-arvot. Raja-arvoja voidaan määrittäjäsekä teknisten häiriöiden että väestönmagneettikenttältistuksen rajoittamiseksi.

Sähköjärjestelmien muille sähkölaitteille aiheuttamienteknisten häiriöiden rajoittamiseksi on Suomessakin voimassaEMC-standardit.Niissä määritellään ympäristöolosuhteet,joissa laitteiden tulee toimia häiriöttömästi,magneettikenttienkin osalta. /34,35/

Yleisesti kaikkien sähkölaitteiden on noudatettava sähköturvallisuusmääräyksiä, joissa todetaan, että sähköjärjestelmä ei saa aiheuttaavaaraa /39/. Tällä perusteella olisitarpeellista määritellä, kuinka suuri magneettikenttä aiheuttaa merkittävän vaaran, joko suoraan tai sähkölaitteidenhäiriöiden kautta.

Ohjeita ympäristön magneettikenttien raja-arvoiksi ollaan valmistele massassa mm. Euroopan Unionin puitteissa /6/. Suomessa [Säteilyturvakeskus](#) valmistelee yhteistyössä [Työterveyslaitoksen](#) kanssa [Sosiaali- ja terveystieteiden tutkimuskeskukseen](#) (STM) uutta STM:n päätöstä ionisoimattoman säteilyennimmäisarvoista, jotka sisältävät myös enimmäisarvot pientaajuisille sähkö- ja magneettikentille.

Määräysten noudattamista voidaan valvoa mittauksilla. Tämän vuoksi viranomaisilla on oltava ohjeet kenttien mittaamisesta niin sähkö- kuin magneettikenttienkin osalta ja lisäksi soveltamisohjeita erilaisiin käytännöntapauksiin. Rajatapauksissa viranomaiset kuitenkin lopulta päättävät, mikä on oikea tapa mitata kentät.

### **3. Sähkövoimatekniikan kehitystrendit**

Sähkövoimatekniikan alan kolme keskeistä kehitystrendiä ovat: informaatioteknologian kasvava hyödyntäminen, sähkömarkkinoiden vapautuminen ja ympäristöarvojen korostuminen. Näillä kaikilla alueilla on liittymäkohtia myös pientaajuisen magneettikenttien pienentämiseen.

#### **3.1 Informaatioteknologian hyödyntäminen**

Informaatioteknologian soveltaminen sähkövoimatekniikassa lisääntyy jatkuvasti ja sähkölaitteet kehittyvät edelleen pienemmiksi ja 'älykkäämmiksi'. Tässä hyödynnetään mm. mikroprosessoreita ja niiden ohjelmitavuutta.

Tämä kehitys lisää sähkövoimatekniikan tuotteiden ominaisuuksia. Kun laitteiden ominaisuudet lisääntyvät, samalla lisääntyvät usein myös mahdolliset häiriöt jatoisaalta laitteet voivat tulla herkemmiksi magneettikenttien aiheuttamille häiriöille. Häiriöiden esiintymistä pyritään rajoittamaan EMC-standardeilla, jotka asettavat vaatimukset laitteiden häiriöiden siedolle toimintaympäristössään /34,35/. Laitteet testataan määräysten täyttämisen osoittamiseksi. Ongelmia saattaa kuitenkin syntyä erityisesti silloin, kun useat yksittäiset laitteet toimivat isoina järjestelminä.

Informaatioteknologian kehitys parantaa magneettikenttien mittausta. Mittaustentarkkuus paranee ja kenttiä voidaan analysoida paremmin jo mittaustenyhteydessä. Magneettikenttien laskentaa voidaan nopeuttaa ja liittää osaksi mittausjärjestelmiä.

#### **3.2 Sähkömarkkinoiden vapautuminen**

Sähkömarkkinoiden vapautuminen on uudistanut sähkön siirtoaja jakelua monella tavalla. Vapautuminen on merkinnyt kilpailun tuloa aiemmin suljetulle sektorille. Kilpailu tuo mukanaan uusia näkemyksiä sähköyhtiöihin ja edistää siten kehitystä. Tästä on esimerkkinä mm. hinnoittelun asiakaslähtöisyys ja ekosähkö, jota ympäristötietoiset kuluttajat voivat halutessaan ostaa. Ekosähkö on tuotettu ympäristöystävällisestijä on tavallista sähköä kalliimpaa.

Markkinoiden vapautuminen vapautti sähkökaupan, muttaverkkoliiketoiminta jäi luvanvaraiseksi alueelliseksi monopoliksi. Sähkökaupan vapauttaminen on kiristänyt kilpailua, joka puolestaan on

tuonutmarkkinoille uusia tuotteita, kuten juuri ekosähkön. Verkkoliiketoimintaa seuraa Sähkömarkkinakeskus, joka valvoo, että toiminnasta saatava voitto pysyy kohtuullisena. Kohtuullisuuden ehtomahdollistaa kuitenkin investoinnit muuten taloudellisesti ehkäkannattamattomaan magneettikenttien pienentämiseen.

Kilpailun vaikutus magneettikenttien osalta painottuu sähkönlaatuun. Magneettikentät voivat aiheuttaa häiriöitä ja keskeytyksiä. Keskeytykset eivät aiheudu suoraan magneettikentistä, vaan niiden sähköverkotoiminnalle aiheuttamien häiriöiden kautta. Koska sähkönlaatuon yksi kilpailutekijä, on sitä hyvä voida parantaa. Tämänvuoksi on voitava parantaa sähköverkon magneettikenttähäiriönsietoatai pienentää häiriöitä aiheuttavia magneettikenttiä. Ympäristöön aiheutuvia magneettikenttiä on voitava pienentää, jos kentät aiheuttavat häiriöitä asiakkaille. Mahdollistenterveyshaittojen vuoksi ympäristön magneettikenttien pienentäminen, tai ainakin huomioon ottaminen, on myös imago-kysymys asiakkaistakilpailtaessa.

### 3.3 Ympäristötekijät

Ympäristökysymykset korostuvat koko sähkövoimatekniikanalalla yleisen ympäristökiinnostuksen kasvun myötä. Tämä käsittää kokonaisvaltaisesti kaikki mahdolliset haitat ympäristöllesähköntuotannosta kulutukseen. Magneettikentät ovat yksitodellinen ympäristötekijä, vaikka pienten kenttien haitallisuutta terveydelle ei ainakaan tähän mennessä tehdyissä tutkimuksissa ole voitu kiistatta osoittaa. /24/

Pientaajuisille sähkö- ja magneettikentille ei toistaiseksi ole kotimaisia virallisia raja-arvoja. Kentille on kuitenkin olemassa kansainvälisten organisaatioiden asettamia suositusarvoja /24/. Virallisia raja-arvoja ollaan parhaillaan valmistelemaan niin kansallisellakuin kansainväliselläkin tasolla. Raja-arvot perustuvat yleensä magneettikentän tai sähkökentän ihmiseen indusoimaan sähkövirtaan. Raja-arvoja esitetään yleisesti erikseen työntekijöille jamuulle väestölle. Muulle väestölle raja-arvot ovathuomattavasti matalampia kuin työntekijöille.

Ympäristöarvoilla on myös taloudellista käytännönmerkitystä. Ympäristön laatu vaikuttaa esimerkiksi kiinteistöjen arvoon. Rakennuksen, joka sijaitsee lähellä voimajohtoa, arvo voi alentua paitsi maisemallisista syistä myös magneettikenttien tähden. Huoneistoissa arvo voi alentua viereisen kiinteistömuuntamon vuoksi, jos se aiheuttaa suuren magneettikentän. Magneettikentät aiheuttavat käytännön ongelmia esimerkiksi liiketiloissa häiritsemällä tietokoneiden näyttöjä, jolloin vuokralainen ehkä vaatii magneettikenttien pienentämistä tai vuokran alentamista.

## 4. Aikaisempia tutkimustuloksia

Magneettikenttien terveysvaikutuksista on tehty paljon tutkimuksia. Ensimmäiset tutkimustulokset kenttien terveysvaikutuksista julkaistiin jo 1960-luvulla. Suomessakin asiaa on tutkittu vuosia. Varsin kattava kirjallisuus selvitysvoimajohtojen sähkö- ja magneettikenttien terveysvaikutuksista on tehty vuonna 1995 Kauppa- ja teollisuusministeriön rahoituksella. Tähäntutkimukseen osallistuivat kaikki merkittävät alan kansalliset tutkimuslaitokset /24/. Tällä hetkellä terveysvaikutuksien tutkimuksessa Euroopan maiden kesken tehdään yhteistyötä mm. COST244bis projektissa, johon Suomikin on liittymässä.

Tässä raportissa magneettikenttiin keskitytään teknisenä ongelmana. Seuraavassa käydään tarkemmin läpi tutkimuksia magneettikenttien määrittämisestä ja teknisestä pienentämisestä.

## 4.1 Magneetikenttien määrittäminen

### *Magneetikenttien laskeminen*

Magneetikenttien laskentaan on olemassa runsaasti erilaisia kaupallisiaohjelmistoja. Lisäksi laskentaan voidaan soveltaa matemaattisiaohjelmistoja esimerkiksi analyttisten kaavojen avulla /25/.Magneetikenttien laskemisen tutkimuksessa painopistealue on nykyäänkenttien numeerisen laskennan kehittämisessä. Kehityksessä pyritäänhyödyntämään tietotekniikan edistyksen suomiamahdollisuuksia soveltaa parempia laskenta-algoritmeja käytäntöön.

### *Magneetikenttämittarit*

Magneetikenttien varsinaiseen mittaamiseen on nykyään tarjolla paljonkaupallisia mittareita. Mittarien ominaisuudet vaihtelevat kuitenkin runsaasti.Mittarin valinnan yhteydessä onkin otettava huomioon tuleva käyttötarkoitus.Mittareiden ominaisuuksia on vertailtu joissakin TTKK:n aikaisemmissatutkimuksissa. /15/

### *Magneetikenttien mittaaminen käytännössä*

Magneetikenttiä on mitattu varsin paljon erilaisissa käytännötilanteissa. Tutkimuksissa mitattavina kohteina ovat olleet mm. voimajohtot jaerilaiset laitteet /5,8, 12, 18,19, 30/. Tehdyille mittauksille onollut tyypillistä, että kukin tutkimusryhmä on käyttänytoma mittaamenetelmää. Tällöin eri menetelmilläsaatujen mittaustulosten vertailtavuus ei välttämättä olehyvä.

Esityksiä yhtenäisistä ohjeista varsinaisiksimittausprotokolliksi on olemassa vähän. Voimajohtojenmagneetikenttien mittaamiseen on standardi Yhdysvalloissa /2/.Standardin mukaan kenttä mitataan johdon suunnassa yhdeltä pylväsväliltäjohtoa vastaan kohtisuorassa suunnassa vähintään 30 m päänuloimmasta johtimesta Ympäristön ja laitteiden kenttienmittaamiseenkin on olemassa joitakin ehdotuksia /27,32,46/. Ehdotukset eivät kuitenkaan ole standardinluontoisia, joten mittauksien suoritustapa on hyvä kuvata ainamittaustuloksien yhteydessä.

TTKK:ssakin on tutkittu magneetikenttien mittaamista aikaisemmin. Juuri päättyneessä Sähkövoimatekniikan kehityspoolin rahoittamassa projektissa "Pientaajuistenmagneetikenttien määrittäminen ja vähentäminen"on laadittu alustavia ohjeistoja voimajohtojen, laitteiden, työ- ja elinympäristönsekä altistuksen mittaamisesta /21/. Voimajohtojenmittausohjeisto pohjautuu pitkälti yhdysvaltalaiseen standardiin /2/. Laitteiden mittaushjeisto puolestaan perustuu pääosinmittauksista saatuihin omiin kokemuksiin /17/. Työ- ja elinympäristön mittaushjeistossa on yhdistelty eri menetelmienhyviä ominaisuuksia monipuolisten mittausten mahdollistamiseksi. /21/

### *Kalibrointi*

Mittarien toiminnan luotettavuus on yksi mittaukseen liittyvä tärkeätekijä ja sen tähden tässä raportissa on tarkasteltu myös magneetikenttämittarien kalibrointiä. Suomessa kalibrointiin liittyvää kansallista mittanormaalijärjestelmää koordinoi Mittatekniikakeskus. Mittanormaalijärjestelmä koostuu viidestä Mittatekniikakeskuksen nimeämästä laboratoriosta /29/.Mittatekniikan keskus myös akkreditoi muut kalibrointipaikat /28/. Kansallisen mittanormaalijärjestelmänsuureisiin ei kuitenkaan kuulu magneettisia suureita. Magneettivuon tiheys voidaan kuitenkin, kun kenttää tuottavan kelan mitat ja sähkövirta ovat jäljitettävissä. Kalibrointeja varten on TTKK:n aikaisemmissa tutkimuksissa rakennettuHelmholtzin kelaan perustuvalaitteisto. Laitteistolla voidaan tuottaa 1000  $\mu$ T kenttä. /16/



## 4.2 Magneettikenttien tekninen pienentäminen

### *Siirto- ja jakelujohdot*

Voimajohtojen sähkö- ja magneettikenttien pienentämistä on tutkittu varsin paljon. Kenttien pienentämiskeinot perustuvat lähinnä muutoksiin geometriassa ja symmetriassa sekä kompensointiin. Geometrialla saadaan johtimien kentät symmetrisesti kumoamaan toisensa tai kenttää voidaan kompensoida erillisillä johtimilla. Johdinten keskinäisessä sijoittelussa voidaan muuttaa vaiheväliä, johtoprofiilia ja vaihejärjestystä. Myös virtapiirien lukumäärää voidaan muuttaa. /14, [24,45](#)/

Pienempiin vaiheväleihin päästään käyttämällä päällystettyjä PAS-johtimia, mutta kustannukset ovathuomattavasti suuremmat tavallisiin johtimiin verrattuna. PAS-johtimia onsaatavilla 110 kV jännitetasolle asti. /14,45/

Varsinkin Ruotsissa on tutkittu uusia pylväsratkaisuja, joissa johdongeometria on otettu huomioon. Siellä on kokeiltu käytännössä pienikenttisiä T-pylväitä, joissa vaihejohtimet sijoitetaan tasaväisen kolmion kärkiin. Tällöin magneettikenttä pienenee 30%:iin normaalista. /7, 9/

Myös kahden virtapiirin johtojen osalta on tutkittu mahdollisia magneettikenttien pienentämiskeinoja. Esimerkiksi varsin yleisten kahdenvirtapiirin [tannenbaum](#)-johtojenvaihejohtimien järjestys voidaan muuttaa siten, että vaiheiden aiheuttamat kentät kompensoivat toisiaan. Paras vaihejärjestys on pistesymmetrinen (RST TSR), kun siirtosuunnat virtapiireissä ovat samat, ja peilisyymmetrinen (RST RST), kun siirretään eri suuntiin /14, [45](#)/. Myös kahden virtapiirin johdoilla on tutkittu teoreettisesti uusia pylväsratkaisuja, pienikenttäistä X-pylvästä, jossa kaksi vaihetta sijaitsevat jaettuna neliönvastakkaisiin kulmiin ja kolmannen vaiheen molemmat johtimet ovat neliönkeskipisteessä. Tällä ratkaisulla magneettikentät pienensivät jopa 90% verrattuna tavalliseen yhden virtapiirin johtoon /7,33/.

Magneettikentän kompensoinnilla tarkoitetaan menetelmää, jossa kentän aiheuttavan johdon läheisyyteen sijoitettaviin kompensointijohtimiin aiheutetaan vastakkainen kompensoiva virta. Se voidaan aiheuttaa joko aktiivisesti (syöttämällä virta) tai passiivisesti (virta indusoituu). Vaikka kenttä voidaan teknisestikin kompensoida jopa täysin, ei kompensointi laajemmassa mittakaavassa ole käytännöllinen vaihtoehto /12,13, [14,45](#)/.

### *Sähköasemat*

Sähköasemien osalta aikaisemmin on lähinnä selvitetty mitensuuria kenttiä niillä esiintyy. [Imatran Voima Oy](#):n tekemien mittausten mukaan magneettikenttä on 400 kV sähköasemalla hoitokäytävällä ja 110 kV sähköasemalla alle 30  $\mu$ T. Suurimpia kenttälähteitä ovat mm. kompensointireaktori ja muuntajien alajännitepuolen lähdöt /22, [43](#)/.

Sähköaseman kenttien pienentämistä on kartoitettu TTKK:n aikaisemmissa tutkimuksissa lähinnä esimerkkitapausten avulla. Sähköaseman magneettikenttää on mahdollista pienentää esimerkiksi nostamalla sähköaseman johtojen ja laitteiden asennuskorkeutta taitekemällä yksittäisiä rakenteellisia parannuksia, lähinnä tietyn alueen kenttien pienentämiseksi.

Suurimpia magneettikenttiä on yleensä muuntajan alajännitepuolen lähtöjen lähellä. Laskemalla on tutkittu pienennysvaikutustakolmion muotoon laitetuille kaapeleille sekä vaihejohtimien järjestysoptimoinnille ja vaihevälin pienentämiselle. Pienentämiskeinojenvähentämistulokset

olivat kolmion muotoon laitetulle kaapelille 36% javaihejohtimien optimoinnille ja vaihevälin pienentämiselle 75% /22/. Esimerkkilaskelmien perusteella näyttääsiltä, että jos johdinten korkeutta nostetaan 0,5 metrillä,pienenee kytkinkentän magneettikenttä noin 10% /22/.Muutoksen toteuttaminen valmiilla sähköasemalla ei ole taloudellisestimahdollista. Uuden aseman suunnitteluvaiheessa korkeuteen on kuitenkinmahdollista vaikuttaa. Korkeampien sähköasemien tekeminen on maisemanäkökulmastamahdollisesti huonompi vaihtoehto.

### *Muuntamot*

Muuntamoiden osalta tutkimuksia on tehty ensisijaisesti kiinteistömuuntamoihinliittyen, koska lähinnä niiden yläpuolella olevissa huoneistoissaon todettu erilaisia laitehäiriöitä (esimerkiksi tietokoneiden näyttöpäätteissä).

Rakennukseen sijoitetut muuntamot voivat aiheuttaa yläpuolella oleviintiloihin muuta sähköjärjestelmää suuremman, 2 - 12  $\mu$ T,magneettikentän (1 m korkeudella lattiasta) /40/.Yleensä rakennusten, lähinnä sähköjärjestelmänaiheuttama, taustakenttä on tasoa 0,1 - 1  $\mu$ T. Kiinteistömuuntamonsisällä magneettivuon tiheys on yleisesti tasoa 2 - 5  $\mu$ T (1000 Akuormitusvirralla). Pienjännitekojeiston vieressä voi magneettikenttäolla tasoa 60  $\mu$ T. /42, 44/

Kiinteistömuuntamoiden magneettikenttien pienentämistä onselvitetty kotimaassakin runsaasti. Uusien kiinteistömuuntamoidensuunnittelussa magneettikentät on jo jonkin aikaa otettu huomioon.Esimerkiksi ABB Transmit Oy ontuonut markkinoille Teslasafe-kiinteistömuuntamon, jonka ympärillämagneettikentät ovat perinteisiä huomattavasti pienemmät.Magneettikenttien pienentäminen muuntamossa perustuu magneettikenttiäaiheuttavien komponenttien keskinäiseen sijoitteluun ja suojaukseen.Teslasafe-muuntamon magneettivuon tiheys on esimerkiksi 750 A virralla kahdenmetrin etäisyydellä yläpuolella 0,9  $\mu$ T, pienjännitekojeistonsuunnassa 1,0  $\mu$ T ja muilla sivuilla 0,7  $\mu$ T. Virta vastaa noin 500 kWkuormitusta. Vanhojen kiinteistömuuntamoiden kenttien pienentäminen onhankalampaa ja kalliimpaa. Valtaosa olemassa olevista kiinteistömuuntamoista(n. 8500) tulee kuitenkin olemaan käytössä vielä pitkään./1, 38, 40/

Aikaisemmissa tutkimuksissa esiteltyjen erilaisten esimerkkitapaustenperusteella tiedetään myös joitakin keinoja vanhojen muuntamoidenkenttien pienentämiseksi. Kolmivaihekaapelin käyttö pienjännitekojeistonja muuntajan välillä yksivaihekaapelin tai kiskosillan sijasta pienentäävaihejohdinten välin mahdollisimman pieneksi ja siten pienentääkenttiä. Kolmivaihejärjestelmän vaiheiden jakaminen kahteen osaanja asetteleminen symmetrisesti pienentää myös kenttiä.Muuntajan ja pienjännitekojeiston yhdistäminen lattian kautta katonsijasta pienentää erityisesti muuntamon yläpuolisen tilan kenttiä.Syntyvä kenttä on myös sitä pienempi, mitä lyhyempijohdinyhteys on. /40, 44/

### *Sisäasennukset*

Sisäasennusten osuutta esiintyvien kenttien lähteenä onselvitetty varsin vähän. Tutkimukset ovat painottuneet mittauksiin,koska sisäasennusjohtojen ja virtojen mallintaminen laskentaa varten on työlästä.

Sisäasennusten aiheuttamiin magneettikenttiin vaikuttaa valittu johdinjärjestelmä.Varsinkin aikaisemmin Suomessa on käytetty yleisesti TN-C-S tai TN-C-järjestelmää(ns. seka- tai nelijohdinjärjestelmää). Tällöinesiintyvät magneettikentät kasvavat, kun osa sekajärjestelmätai nelijohdinjärjestelmän PEN-johtimessa kulkevasta kuormitusvirrastapääsee talon johtaviin rakenteisiin, esim. putkistoihin jarunkorakenteisiin. Kun maadoitus tehdään keskitetysti TN-S-

järjestelmällä (ns. viisijohdinjärjestelmä), jolloin nollajohtimen virta ei pääse maadoituksiin, magneettikentät pienenevät. Tämän edellytyksenä on järjestelmän virheettömyys, eli siinä ei saa olla ylimääräisiä maadoituksia. /40/

Kentissä esiintyy usein myös kolmannen yliaallon nollajohtoonsummautumisen vaikutus. Laittevalmistajan mukaan kolmannen yliaallonsuodattimella voidaan pienentää kenttiä, koska se estää kolmannen yliaallon kulkua nollajohtimessa /40/. Tätä vaikutusta ei ole tutkittu laajasti.

### *Magneettikenttäsuojaus*

Suojausta ja varsinkin erilaisia suojakoteloita on tutkittu melko paljon, pääasiassa kuitenkin teoreettisesti laskemalla. Magneettikenttäsuoja voidaan rakentaa esimerkiksi muuntamon pienjännitejohdinten ympärille. Muuntamon javoimalaitoksen generaattorikiskoston suojausta on teoreettisesti tutkittu mm. TTKK:ssa esimerkitapausten avulla /21,23/. Suojissa tapahtuvien häviöiden vuoksi yksimerkittävä käytännön ongelma on suojien lämpeneminen.

Suojaus voidaan tehdä ferromagneettisella materiaalilla, sähköisesti hyvin johtavalla materiaalilla tai molempien yhdistelmällä /11/. Suojan tehokkuutta kuvaa suojakerroin, johon vaikuttavia tekijöitä ovat suojamateriaalin paksuus, johtavuus, permeabiliteetti sekä suojan mitat että muoto. Ferromagneettisilla erikoismateriaaleilla (esim. myy-metalli) voidaan saavuttaa jopa satakertainen suojaus varsin ohuella (n. 4 mm) suojalla. Suojamateriaalin kyllästyminen heikentää suojan tehoa suuremmilla kentillä. Tämän vuoksi esimerkiksi tavallisella teräksellä suojaus perustuukin lähinnä pyörrevirtoihin. /20, 22,40, 41/

Tämä pyörrevirtoihin perustuva suojausvaikutus syntyy siitä, että magneettivuo indusoi kaikkiin johtaviin materiaaleihin pyörrevirtoja lävistäessään niitä. Pyörrevirran synnyttämä magneettivuo on puolestaan vastakkainen indusoivalle vuolle. Tällöin resuloiva magneettivuo on pienempi ja magneettikenttä suojan toisella puolella siten pienempi. Mitä parempi materiaalin johtavuus on, sitä paremmin se suojaa. Johtavilla suojoilla on olennaista, että suojan saumat ovat hyvin johtavat, jotta ne eivät rajoita pyörrevirtoja. /40/

Magneettikenttien aiheuttamia häiriöitä voidaan vähentää myös suojaamalla häiriintyvä kohde kenttälähteen asemesta. Kohteen suojouksessa voidaan soveltaa pitkälti samoja menetelmiä kuin edellä esitettiin. Kohteen suojouksessa voidaan suojata häiriintyvälaitte tai tarvittaessa tila, jossa on häiriintyviä laitteita. Laitteensuojaus voidaan toteuttaa myös tekemällä tarvittavia muutoksia laitteen normaaliin kotelointiin. /4/

Yksi kohderyhmä, jonka suojausta on tutkittu paljon, ovat tietokoneiden näytöt, jotka ovat melko herkkiä häiriintymään magneettikentistä. Näytöt voivat häiriintyä jo 0,5  $\mu$ T kentässä /3/. Erityisesti teollisuusympäristössä tämä taso voi usein ylittyä. Tämän ongelman ratkaisemiseksi on saatavilla kaupallisesti suojoja ja toisaalta vaativiin ympäristöolosuhteisiin tarkoitettuja näyttöjä, joissa sovelletaan myös aktiivistakompensointia. Eri suojien ominaisuuksista on tehty myös joitakin tutkimuksia, lähinnä vaimennusominaisuuksien selvittämiseksi. Suojien avulla näyttö toimii häiriintymättä huomattavasti suuremmissa kentissä. Käyttämällä suojiakerroksittain, eli kahta eri kokoista suojoa päällekkäin, voidaan päästä vielä parempiin tuloksiin. /3,26,31/

## **5. Selvityksen aikana esille tulleet tutkimusalueet**

Esiselvityksen aikana on kartoitettu laajasti sähkövoimatekniikanalalla toimivien yritysten tutkimustarvetta pientaajuisten magneettikenttien vähentämisen osalta. Kartoitusta tehtiin ensi vaiheessa puhelin soitoilla yritysisiin, joidentiedettiin olevan kiinnostuneita aiheesta. Aiheesta mahdollisesti kiinnostuneita yrityksiä haettiin myös Internetistä sen lisäksi, mitä oli jo tiedossa aiempien kontaktien perusteella. Kartoituksessa löytyi useita tutkimuskohteita, joita yritykset pitivät tarpeellisina. Tarkempianeuvotteluja käytiin myös pääasiassa edelleen puhelimitse, kun yritykset olivat ensin jonkin aikaa tarkentaneet omia tutkimustarpeitaan.

Selvityksen aikana esille tulleista tutkimustarpeista on katsottu aiheelliseksi uusi tutkimuskokonaisuus. Niistä aihealueista, joiden on katsottu soveltuvan uuteen tutkimuskokonaisuuteen, on käyty tarkempia kahden keskiä neuvotteluja yritysten kanssa. Seuraavana esitellään tarkemmin merkittävimpiä esille tulleita tutkimusalueita.

## 5.1 Magneettikenttien ja häiriöiden vähentäminen

### *Jakelumuuuntamoiden magneettikenttien pienentäminen*

Selvityksen aikana on tullut ilmi, että uusissa asennettavissa kiinteistömuuntamoissa ympäristön magneettikenttien minimointi voidaan jo käytännössä huomioida hyvin. Markkinoilla on esimerkiksi muuntamotyyppi, jonka magneettikentän minimoitu  $1/$ . Olemassa olevien muuntamoiden magneettikenttien pienentämiselle on selvää tutkimustarvetta. Näissä tapauksissa tehokkaiden ja edullisten pienentämismenetelmien valintatapauskohtaisesti on vaikeaa ja pienentämismenetelmiä ei tunneta riittävästi hyvin. Näin ollen on tarvetta laatia tapauskohtaisia ohjeita magneettikenttien pienentämiseen eri kentänvoimakkuustasoilla ottaen huomioon muuntamoiden tyyppirakenteet. Kansainvälisiä käytännönkokemuksia on myös hyvä selvittää ohjeita laadittaessa.

### *Maadoituksista syntyvät häiriöt*

Toinen laajempi esille tullut tutkimusalue on maadoitukset ja niihin liittyvät häiriöt. Maadoitukset ovat kahdella tavalla merkityksellinen tekijä magneettikenttien kannalta. Ensinnäkin maadoitusten kautta johtaviin rakenteisiin pääsevät virrat aiheuttavat ympärilleen magneettikentän. Toisaalta magneettikentät voivat indusoida maadoituspiireihin virtoja, jotka puolestaan voivat häiritä sähkölaitteiden toimintaa. Virtojen maadoituksissa aiheuttamat jännitteet voivat myös olla ilmenevien häiriöiden lähteitä.

Käytännön näkökulmasta on syytä tutkia miten häiriöitä aiheuttavia kenttiä voidaan pienentää. Mikäli sekä tainelijohdinjärjestelmän PEN-johtimesta pääsee virta rakenteisiin, on hyvä tutkia nollajohtimen virran pienentämistä. Nollajohtimen virtaan vaikuttavat mm. kuormituksen symmetria ja yliaallot. Maadoitetun verkon valvonnalla on mahdollista seurata tilannetta magneettikenttien esiintymisen ja rakenteisiin pääsevien virtojen osalta.

### *Sähkömagneettinen yhteensopivuus*

Tällä hetkellä varsin keskeinen tutkimusalue sähköalalla on sähkömagneettinen yhteensopivuus. Laitteiden magneettikenttäsieltoisuuden nykyään varsin hyvä EMC-standardien seurauksena. Myös EMC-testaustoiminta on jo varsin kattavaa. Tutkimustarvetta on lähinnä yksittäisistä laitteista koostuvien järjestelmien häiriönsiedossa. Järjestelmäksi koottuna laitteet voivat häiriintyä alemmista magneettikentistä kuin yksittäisinä. Laajoissa järjestelmissä, kuten teollisuusverkoissa tai

laivoissa, ongelmat voivat saada suurenmerkityksen. Järjestelmän häiriöihin vaikuttavat myösmaadoitukset, joiden ongelmia kuvattiin edellä.

### *Taajuudenmuuttajien aiheuttamat häiriöt*

Esiselvityksessä tarkemmin käsitelty kenttien aiheuttama häiriötyyppion taajuudenmuuttajakäytöissä esiintyvät suuritaajuisetlaakerivirrat, jota voidaan pitää merkittävänä tutkimusalueena. Laakerivirran aiheuttava akselijännite indusoituumoottorin akselin päiden välille magneettisten epäsymmetrioiden ja huonojen maadoitusten vuoksi. Laakereiden yli syntyvä potentiaaliero aiheuttaa niiden öljykalvojen läpi kulkevan virran, jonka seurauksena laakerit kuluvat normaalia nopeammin. Taajuudenmuuttajakäytöissä esiintyvien laakerivirtojen tyypillinen taajuus on muutamista kymmenistä satoihin kilohertzeihin. Taajuudenmuuttajakäyttöisen moottorin hetkelliset vaihejännitteiden epäsymmetriat aiheuttavat suuritaajuisia laakerivirtoja. Epäsymmetrian seurauksena syntyy virtatransientti taajuusmuuttajakäytön kaikkien hajakapasitanssien läpitaajuusmuuttajan jokaisella kytkentähetkellä /10/. Näitä virtoja ja niiden vähentämistä on syytä selvittää.

## **5.2 Magneetikenttien mittaamiseen liittyvät aiheet**

### *Mittausohjeistojen kehittäminen*

Selvityksessä on noussut esiin tarve kehittää magneetikenttien mittausta. Magneetikenttien mittauksen yhteydessä on hyvä kehittää myös sähkökenttien mittausta, koska ne usein liittyvät läheisestitoisiinsa. Esimerkiksi siirto- ja jakelujohdot aiheuttavat merkittäviä sekä sähkö- että magneetikenttiä. Kenttien mittaamiseen ei ole valmiita kansallisia eikä kansainvälisiä ohjeita. Tämän vuoksi eri tahojen mittaukset eivät ole useinkaan vertailukelpoisia eivätkä välttämättä luotettavia, koska käytännöt vaihtelevat. Asian korjaamiseksi on erittäin tarpeellista kehittää kansalliset ohjeet sähkö- ja magneetikenttien mittaamiseen ottaen huomioon kansainväliset käytännöt.

### *Pulssimuotoisten magneetikenttien mittaaminen*

Pientaajuisia kenttiä koskevan mittausohjeiston lisäksi on tarvetta tutkia pulssimuotoisten kenttien mittaamista. Niihin liittyvät käytännöt ovat varsin epäselviä, vaikka uudet suositusluonnokset koskevat myös niitä. Yleensä olemassa olevat ohjeet käsittelevät vain sinimuotoisten kenttien mittausta. Pulssimuotoisten kenttien nopeat muutokset saattavat kuitenkin indusoida häiriöitä laitteille toisin kuin sinimuotoiset tasaisesti muuttuvat kentät. Koska näiden kenttien vaikutukset ovat erilaiset, on niitä hyvä tarkastella erikseen jakehittää oma mittausohje.

### *Magneetikenttämittarien kehittäminen ja niiden kalibrointi*

Mittausohjeiston puutteen lisäksi on käynyt ilmi, että myös varsinaisissa mittalaitteissa on kehitettävää. Parannettavaa on mm. mittarien käytettävyydessä ja tulosten tallennuksessa sekä analysoinnissa. Lisäksi nykyiset mittarit eivät mittaa kaikkiasuureita, joita voi tulevaisuuden standardeissa olla mukana, kuten eritaajuuksien osuudet. Oman ongelman aiheuttaa pulssimuotoisen kentän mittaaminen. Magneetikenttämittarien kalibrointiin ei ole akkreditoitua laboratoriota Suomessa, mutta se on erittäin tarpeellinen mittarien kehittämisessä sekä mittausten tarkkuuden parantamisessa.

## **5.3 Muut esille tulleet tutkimusaiheet**

### *Magneettikenttiä hyödyntävien laitteiden kehittäminen*

Yksi tutkimusalue, joka on tullut esiin selvityksen aikana, on magneettikenttienhyödyntäminen laiteratkaisuissa. Tällä hetkellä sähköjärjestelmässään jo olemassa yksittäisiä laitteita, esim. virtamuuntaja, joiden toiminta pohjautuu magneettikenttiin. Näitä teknisiä ratkaisujavoidaan edelleen kehittää ja tutkia. Toinen vaihtoehto on uusien laitteiden kehittäminen. Uusien tekniikoiden käyttöönotto edellyttää merkittävää tuotekehityspanostusta, jotta uusista tuotteista saadaan kilpailukykyisiä.

### *Induktiokuumennus*

Induktiokuumennus perustuu magneettikenttien indusoimiin pyörrevirtoihin kuumennettavassa kohteessa. Kuumennus aiheuttaa kenttiä myös ympäristöön, joten kenttien suuntaamista tai suojausta on tarpeen kehittää ympäristökenttien pienentämiseksi. Induktiokuumennuksen matemaattista mallintamistakuumennuksessa ja kuumennuslaitteiston ohjauksessa on jo pidempää tutkittu [Lappeenrannan teknillisessä korkeakoulussa \(LTKK\)](#), [sähkötekniikan laitoksella](#). Tällä alueella on myös merkittäviä tutkimustarpeita.

## **6. Tutkimuksen tavoitteet**

Esiselvityksen perusteella tullaan ehdottamaan kolmivuotista tutkimushanketta ajalle 1998-2000. Tutkimuskokonaisuus painottuu seuraaviin aihealueisiin, joista seuraavassa on lyhyt esittely.

### *Magneettikenttähäiriösietoisuuden parantaminen sähkönsiirrossa ja -jakelussa*

Tässä osassa tavoitteena on kehittää menetelmiä, joilla voidaan parantaa sähköverkon hallinnassa ja ohjauksessa käytettävien laitteiden ja koko järjestelmän magneettikenttähäiriösietoisuutta. Kehitettäviä menetelmiä testataan sekä laboratoriossa että käytännössä.

### *Kiinteistömuuntamoiden magneettikenttien pienentäminen*

Tässä osassa on tavoitteena selvittää olemassa olevien kiinteistömuuntamoiden aiheuttamia magneettikenttähäiriöitä näiden vähentämistä. Tarkoituksena on pyrkiä ryhmittelemään olemassa olevia muuntamoita rakenteiden perusteella. Tavoitteena on löytää ryhmiä, joiden kenttien pienentämiseen soveltuvat samanlaiset vähentämiskeinot. Kiinteistömuuntamoiden aiheuttamien kenttien määrittämiseen on tarpeellista tehdä myös yksityiskohtainen ohje.

### *Sähkö- ja magneettikenttämittausten laadun parantaminen*

Tämän osan tavoitteena on laatia yhtenäiset ohjeet sähkö- ja magneettikenttien käytännön mittaamiseen. Tavoitteena on myös käsitellä mittarien valintaa ja kalibrointien tekemistä. Mittausohjeisto sisältää mm. yksittäisten laitteiden jakojeistojen mittaamisen, siirto- ja jakelujohtojen mittaamisen, huone- ja työskentelytilojen mittaamisen sekä rakennusten sähköjärjestelmien kenttien mittaamisen. Mittausohjeita testataan käytännössä, jotta myös erilaisten mittarien soveltuvuudesta eri tilanteisiin saadaan tietoa. Mittarien kalibrointiin tehdään myös ohjeet. Magneettikenttämittarien kalibrointiin tarkoitettua TTKK:n proto-laitteistoa edelleen kehitetään.

### *Pulssimuotoisten kenttien mittauksen kehittäminen*

Pulssimuotoisten kenttien mittaamisesta on varsin vähän käytännönkokemusta. Tämän osan tavoitteena on selvittää näiden kenttien mittaamista. Tarkoituksena on laatia mittaohjeet pulssimuotoisille kentille. Kenttien käyrämuoto otetaan myös mittaohjeistoissahuomioon. Erityisesti keskitytään transientti-ilmiöiden aiheuttamien kenttien mittaamiseen.

### *Induktiokuumennuksen kehittäminen*

Tämän osan tavoitteena on kehittää taloudelliset ja tekniset menetelmät pienentämään induktiokuumennuksen ympäristönsä aiheuttamia häiriöitä. Tavoitteena on selvittää suurtaajuusteholähteen lähettämien häiriösignaaliensuojausta, induktorin magneettikenttien leviämistä ympäristöön ja tutkia teholähteen ja induktorin välissä olevan siirto johdon häiriönsuojausta. Erityisongelmana on magneettikenttäsuojauksen toteutus ilman että käytettävätsuojat lämpenevät liikaa.

Seuraavassa on koottu taulukkomuotoon (taulukko 1) yhteenveto edellä esitetyistä aiheista ja niiden hyödyt eri osapuolille; sähköteollisuudelle, sähköyhtiöille ja viranomaisille.

Taulukko 1. Osahankkeista saatavat hyödyt eri osapuolille.

<b>OSAHANKKEIDEN HYÖDYT ERI TAHOILLA</b>			
	<b>SÄHKÖTEOLLISUUS</b>	<b>SÄHKÖYHTIÖT</b>	<b>VIRANOMAINEN</b>
<b>Magneettikenttähäiriösietoisuuden parantaminen sähkön siirrossa ja jakelussa</b>	Tuotteiden luotettavuus paranee	Käytettävien laitteiden häiriöiden aiheuttamat käyttökatkokset vähenevät	Sähköverkon käyttöturvallisuus paranee
<b>Kiinteistömuuntamoiden magneettikenttien pienentäminen</b>	Tuotteiden kilpailukyky paranee ympäristöystävällisyyden kautta	Jakelumuuntamoiden asiakkaalle aiheuttamat häiriöt vähenevät	Jakelumuuntamoiden aiheuttamat magneettikenttähäiriöt voidaan tunnistaa
<b>Sähkö- ja magneettikenttämittausten laadun parantaminen</b>	Laitteiden aiheuttamat kentät voidaan mitata luotettavasti	Siirto- ja jakeluverkon aiheuttamat kentät voidaan mitata luotettavasti	Kenttämittaukset ovat luotettavia ja vertailukelpoisia
<b>Pulssimuotoisten kenttien mittaaminen</b>	Pulssikenttien aiheuttamia häiriöitä voidaan vähentää	Pulssikenttien aiheuttamat häiriöt pystytään tunnistamaan	Kattavat ohjeet ympäristön magneettikenttien mittaamiseen
<b>Induktiokuumennuksen kehittäminen</b>	Induktiokuumennuksen aiheuttamat häiriöt ja terveysriskit vähenevät	Induktiokuumennuksen sähköverkkoon aiheuttamat häiriöt vähenevät	Tieto induktiokuumennuksen aiheuttamista kentistä tarkentuu

## **7. Tutkimusohjelman hallinto ja organisointi**

Tutkimushanke on tarkoitus toteuttaa yhteistyössä sähköteollisuuden ja tutkimuslaitosten kanssa. Tavoitteena on yhdistää osapuolien osaaminen synergian luomiseksi. Varsinaisen yhteistyön lisäksi ollaan jatkuvassa yhteydessä kehitettävien ratkaisujen ja sovellusten loppukäyttäjien, kuten sähköyhtiöihin, ja muihin asiantuntijoihin, joiden mielipiteet ovat tervetulleita.

Kehitettäviä ratkaisuja pyritään saamaan mahdollisimman hyvin käytäntöön soveltuviksi, jotta ratkaisut ovat kaupallisesti kilpailukykyisiä teollisuudelle myös kansainvälisesti. Hankkeessa pyritään hyödyntämään kaikkien osapuolien parasta osaamista.

Tutkimushankkeen johtajan tehtävänä on seurata kokonaishankkeentavoitteiden toteutumista ja koordinoida toiminta eri yhteistyökumppaneiden kesken. Tutkimuksen koordinointi on olennaista tutkimusresurssien oikea-aikaiseksi kohdentamiseksi ja tutkimuksen sujuvan etenemisen varmistamiseksi.

## 8. Tulosten hyödyntäminen

Tutkimushankkeen tuloksia hyödynnetään ensisijaisesti uusiensuunnittelumenetelmien ja toimintamallien muodossa eri tahoilla. Hyödynnettävyyden varmistetaan yhteistyöllä hankkeen osapuolien ja muiden alanvaikuttajien kesken. Saatavia tuloksia hyödynnetään myös opetuksessa ja jatkokoulutuksessa.

Tutkimushankkeen tulokset ovat pääsääntöisesti julkisia ja niistä raportoidaan sekä kotimaassa että kansainvälisesti. Myös Internetiä käytetään julkaisukanavana.

Sähköyhtiölle hyötynä tutkimustuloksista tulee parempisähkönlaatu, joka on seurausta vähentyneistä häiriöistä sähköjohdosten jakelussa ja käytössä. Pienentyneen ympäristöaltistuksen myötä myös sähköyhtiöiden ympäristöystävällisyys paranee.

Sähköteollisuuden kilpailukyky paranee kansainvälisillä markkinoilla kilpailuvaltteinaan häiriöttömyys ja ympäristöystävällisyys. Kansainvälisillä markkinoilla vahvojen suuryritysten lisäsihanke palvelee myös pien- ja keskisuuria yrityksiä.

Viranomaisnäkökulmasta tutkimushanke tarjoaa kattavat ohjeet vertailukelpoisten magneettikenttämittausten suorittamiseen luotettavien mittaustuloksien saamiseksi. Luotettavat mittaustulokset ovat ensiarvoisen tärkeitä tarkasteltaessa magneettikentille asetettujen raja-arvojen ylittymistä jalkautuessa uusiin valmisteilla oleviin kansallisiin ja kansainvälisiin ohjeisiin.

## Viitteet

1. ABB Transmit Oy, Keskijännitekojeet ja -kojeistot, Muuntamot. 1997. Teslasafe-kiinteistömuuntamot Uusi toteutustapa. Esite TESLASAFE 1 FI97-08. 4 s.
2. ANSI/IEEE Std 644. 1987. IEEE standard procedures for measurement of power frequency electric and magnetic fields from ac power lines. American National Standards Institute. 23 s.
3. Autere J. 1993. Kaikki näytöt alttiina magneettisille häiriöille. MikroPC, No. 9, s. 38-39.
4. Chatterton, P. & Houlden, M. 1991. EMC Electromagnetic Theory to Practical Design. John Wiley & Sons Ltd., England. 295 s.
5. Deadman, J., Camus, M., Armstrong, B., Heroux, P., Cyr, D., Plante, M. & Theriault, G. 1988. Occupational and Residential 60 Hz Electromagnetic Fields and High-Frequency Electric Transients: Exposure Assessment Using a New Dosimeter. American Industrial Hygiene Association Journal. Vol. 49(8), s. 409-419.
6. European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC). 1995. ENV 50166-1, Human exposure to electromagnetic fields, Low-frequency (0 Hz to 10 kHz). 23 s.
7. Deno, D.W. 1982. Field effects of overhead transmission lines and stations. Transmission line reference book -345 kV and above. 2. p. Palo Alto, s. 329-419.



8. Gauger, J.R. 1985. Household appliance magnetic field survey. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-104 No. 9, s. 2436-2444.
9. Gidlund, J., Petterson, Å., Ruritz, R., Söderberg, L. & Jansson, R. Swedish state power board adopts the T-tower design for 420 kV lines. Wattenfall. CIGRE SC22-88 (WG8) -13. 1988.
10. Hammar, T. 1997. Suuritaajuiset laakerivirrat oikosulkumoottori käytöissä. Tuusa, H. (toim.) Säädetyt moottorikäytöt. Tampere teknillinen korkeakoulu, Tehoelektroniikka, Raportti 5/97. 17 s.
11. Hasselgren, L. & Hamnerius, Y. 1993. Calculations of Low Frequency Magnetic Shielding of A Substation Using A Two Dimensional Finite Element Method. Göteborg: Chalmers University of Technology, technical report, no. 2. 48 s.
12. Hongisto, M. & Valjus, J. 1993. Magneetikenttäaltistus 110-400 kV johtojen läheisyydessä. Vantaa, IVO-A-05/93 tutkimusraportteja. IVO Oy, ympäristönsuojeluyksikkö. 141 s.
13. Hongisto, M. & Valjus, J. 1994. Magnetic field exposure in the vicinity of the national grid of Finland. CIGRE Session 28th August-3rd September, Paper no. 36-104.
14. Hongisto, M. & Vuola, R. 1993. Siirto- ja jakelujohtojen sähkö- ja magneettikenttien tekninen vähentäminen. Korpinen, L. & Pääkkönen, R. & Partanen, J. (toim.) Käyttötaajuisien sähkö- ja magneettikenttien tekninen vähentäminen työympäristössä. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähköenergiajärjestelmät, Raportti 5-93, s. 34-46.
15. Hänninen, V. 1996. Pientaajuisien sähkö- ja magneettikenttien mittaussuomenmenetelmät. Diplomityö. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, sähkötekniikan osasto, 85 s.
16. Isokorpi, J., Keikko, T. & Korpinen, L. 1996. Magneettikenttämittarien kalibrointi. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkövoimatekniikka, raportti 2-97. 93 s.
17. Isokorpi, J., Keikko, T., Korpinen, L. & Partanen, J. 1997. Measurement of the Extremely Low Frequency Magnetic Fields from Electrical Appliances. XIVIMEKO World Congress, 1. 6.6. 1997, Tampere, Finland. Vol. IV A, s. 115 -120.
18. Juutilainen, J., Saali, K., Eskelinen, J., Matilainen, P. & Leinonen, A-L. 1989. Measurements of 50 Hz Magnetic Fields in Finnish Homes. Helsinki, IVO Oy, Tutkimusraportti IVO-A-02/89. 31 s.
19. Kaune, W.T. & Zaffanella, L.E. 1992. Analysis of Magnetic Fields Produced Far from Electric Power Lines. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No.4, s. 2082-2091.
20. Keikko, T. 1995. Kiskostojen magneettikenttien laskenta. Diplomityö. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto. 65 s.
21. Keikko, T., Isokorpi, J. & Korpinen, L. 1996. Pientaajuisien magneettikenttien mittaaminen. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähköenergiajärjestelmät, raportti 11-96. 117 s.
22. Keikko, T., Isokorpi, J. & Korpinen, L. 1997. Pientaajuisien magneettikenttähäiriöiden pienentämismenetelmiä. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkövoimatekniikka, raportti 9-97. 76 s.
23. Korpinen, L. 1996. Cardiovascular Effects of Short Term Exposure to Electric and Magnetic Fields of Electricity Power Transmission. Tampere University of Technology, Publications 182. 140 s.
24. Korpinen, L., Hietanen, M., Jokela, K., Juutilainen, J. & Valjus, J. 1995. Voimajohtojen sähkö- ja magneettikentät ympäristössä. Helsinki, Kauppa- ja teollisuusministeriö, Energiaosasto, Raportti 89/1995. 210 s.

25. Kursi, J. 1995. Sähköjohtojen 50 Hz kenttien laskenta-apuneuvot. Diplomityö. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikanosasto. 120 s.
26. Mildh, K.-H., Sandström, M., Berglund, A. & Eriksson, A. 1989. Bildskärmsstörtålgighet för ytter 50 Hz magnetfält. Undersökningsrapport 1989:28. Arbetsmiljöinstitutet Umeå Sverige. 6 s.
27. Misakian, M., Bell, G.K., Bracken, T.D., Fink, L.H., Holte, K.C., Hudson, J.E., Johnson, G.B., McDermott, T.J., Mukherji, R.G., Olsen, R.G., Rauch, G.B., Sebo, S.A., Silva, J.M. & Wong, P.S. 1993. A protocol for spot measurements of residential power frequency magnetic fields. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, s. 1386-1393.
28. Mittatekniikakeskus. 1994. Mittatekniikan keskuksen tiedotuslehti 1/94. 16 s.
29. Mittatekniikakeskus. 1995. FINMET- Suomen kansallinen mittanormaalijärjestelmä. 8 s.
30. Pääkkönen, R. & Korpinen, L. 1993. Parranajokoneen kenttä suurempi kuin 400kV johdon - kartoitus pientaajuisista sähkö- ja magneettikentistä. Sähkö & Tele ; Vol. 66, No. 7-8.
31. Pääkkönen, R. & Stenius, H. 1996. Näyttöpäätteiden säteilyuojat. Sähkö & Tele, Vol. 69, No. 2. s. 11 - 14.
32. Smith, E. 1995. Måleprotocoll for 50 Hz elektromagnetiske felter. 10 s.
33. Stymme, P. 1994. Minskar fälten till en tiondel. ERA, no. 11, s. 12-13.
34. SuomenstandardisoimisVIITto. 1992. SFS-EN 50082-1, Sähkömagneettinen yhteensopivuus - häiriönsieto, osa 1: kotitaloudet, toimistot jakevyt teollisuus. 18 s.
35. SuomenstandardisoimisVIITto. 1996. SFS-EN 50082-2, Sähkömagneettinen yhteensopivuus - häiriönsieto, osa 2: teollisuus. 24 s.
36. SuomenstandardisoimisVIITto. 1988. SFS-ISO 9000, Laatujohtamisen jalaadunvarmistuksen standardit: ohjeita valintaa ja käyttöä varten. 11 s.
37. SuomenstandardisoimisVIITto. 1996. SFS-ISO 14004, Ympäristöjärjestelmät: yleisiä ohjeita periaatteista, järjestelmistä ja tukeantavista menetelmistä. 74 s.
38. Suomensähkölaitosyhdistys ry. 1993. Kiinteistömuuntamonaiheuttaman magneettikentän vaimentamiskeinoja. SLY-Palvelu Oy, Julkaisusarja 4/93. 48 s.
39. Sähkötarkastuskeskus. 1993. A1-93 Sähköturvallisuusmääräykset. 297 s.
40. Sähkötietory. 1997. EMC ja rakennusten sähkötekniikka. Espoo. 198 s.
41. Tikkanen, J. 1992. Verkko- ja pientaajuiset magneettikentät jakelumuuntajan ympäristössä. Diplomityö. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Energiatekniikan osasto. 125 s.
42. Tikkanen, J., Vanhala, P. & Virtanen, E. 1995. Reduction of 50 Hz Magnetic Fields Caused by Indoor Substations, 13th International Conference on Electricity Distribution, Vol. 1, Session 2, s. 2.20.1 2.20.6.
43. Valjus, J. 1987. Pientaajuisien sähkö- ja magneettikenttien fysiologiset vaikutukset. Helsinki, Imatran Voima Oy, tutkimusraportti IVO-A-04/87. 154 s.
44. Vanhala, P. 1993. Muuntamoiden magneettikentät ja niiden vaimentaminen. Raportissa: Korpinen, L., Pääkkönen, R. & Partanen, J. (toim.): Käyttötaajuisien sähkö ja magneettikenttien tekninen vähentäminen työympäristössä. Tampereen teknillinen korkeakoulu, sähköenergiajärjestelmät. Raportti 5/93.
45. Vuola, R. 1994. Voimajohtojen aiheuttamien magneettikenttien pienentämismahdollisuudet. Helsinki, IVO Voimansiirto Oy, tutkimusraportteja IVS R 01.

46. Yost, G.M., Lee, G.M., Duane, D., Fisch, J. & Neutra, R.R. 1992. California protocol for measuring 60 Hz magnetic fields in residences. *Appl. Occup. Environ. Hyg.* 11/92, s. 772-777.