

Jami Rahkonen

GEOMAGNEETTISTEN MYRSKYJEN VAIKUTUKSET SÄHKÖVERKKOON

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta

Kandidaatintutkielma

Toukokuu 2019

TIIVISTELMÄ

Jami Rahkonen: Geomagneettisten myrskyjen vaikutukset sähköverkkoon
Kandidaatintutkielma
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan TkK-tutkinto-ohjelma, Sähkötekniikka
Toukokuu 2019

Tämän työn tarkoituksena oli tarkastella Auringon aiheuttamien geomagneettisten myrskyjen vaikutuksia sähköverkkoihin. Ensimmäiseksi selvitettiin erilaisia aurinkomyrskyjen ominaisuuksia ja miten ne lopulta johtavat sähköverkkojen kannalta oleellisten ilmiöiden syntymiseen. Työssä käsiteltiin myös historiallisesti merkittäviä geomagneettisia myrskyjä. Lopuksi tarkasteltiin erilaisia keinoja, joilla myrskyihin voitaisiin varautua paremmin ja miten niiden aiheuttamien vahinkojen määrä voitaisiin minimoida.

Aineistona työssä käytettiin muun muassa Suomen Ilmatieteenlaitoksen ja Yhdysvaltain ilmali- ja avaruushallintoviraston verkkosivuja, Euroopan unionin aiheesta teettämää EURISGIC-projektia, sekä muita aiheeseen liittyviä julkaisuja.

Eniten sähköverkkoihin vaikuttava geomagneettisten myrskyjen aikaansaama ilmiö on geomagneettisesti indusoituneet virrat. Ne luovat pääasiassa vaihtovirtaa hyödyntäviin sähköverkkoihin tasavirtakomponentin. Tasavirta on vahingollista erityisesti sähköverkon muuntajille, joissa se voi aiheuttaa osien lämpenemistä, värinää ja pahimmillaan muuntajan rikkoutumisen. Kaikkia geomagneettisten myrskyjen aiheuttamia vahinkoja ei välttämättä edes huomata heti, sillä ne voivat ilmetä vasta kuukaudenkin päästä myrskystä. Lisäksi ylimääräinen tasavirta verkossa vaikuttaa virran laatuun ja voi aiheuttaa sähkökatkoja laukaisemalla verkon suojalaitteita. Myös verkkoon kytketyt generaattorit voivat vaurioitua syntyvien harmoonisten yliaaltojen vaikutuksesta.

Nykyään on olemassa keinoja, joilla geomagneettisten myrskyjen vaikutuksia sähköverkkoihin voidaan vähentää. Aihetta on tutkittu varsin laajasti muun muassa Suomen Ilmatieteenlaitoksen, Euroopan unionin ja Fingridin kaltaisten sähköverkkoyhtiöiden toimesta. Useat näistä keinoista ovat kuitenkin verrattain kalliita, joten niiden toteuttaminen harvinaisten voimakkaiden myrskyjen varalta ei ole verkkoyhtiöille aina mielekästä. On myös olemassa erilaisia keinoja tarkkailla Aurinkoa, sekä ennustaa aurinkomyrskyjä, jolloin sähköverkkoyhtiöiden kykyä varautua niihin etukäteen voidaan parantaa. Lähellä Maan magneettikentän heikoimpia kohtia, napa-alueita, sijaitsevilla maissa sähköverkkoyhtiöt ovat jo nyt hyvin varautuneita suurienkin aurinkomyrskyjen varalle. Lähempänä päiväntasaaja geomagneettisten myrskyjen vaikutukset verkkoihin ovat yleensä vähäisempiä, mutta riski vaurioille on silti olemassa.

Avainsanat: Geomagneettinen myrsky, aurinkomyrsky, sähköverkko, GI-virrat, muuntaja

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|--|----|
| 1. JOHDANTO | 4 |
| 2. GEOMAGNEETTISET MYRSKYT | 6 |
| 2.1 Aurinkomyrskyt | 6 |
| 2.2 Geomagneettiset myrskyt..... | 7 |
| 2.3 GI-virrat..... | 10 |
| 2.4 Geomagneettiset myrskyt Suomessa..... | 13 |
| 3. GI-VIRTOJEN VAIKUTUKSET SÄHKÖVERKKOIHIN..... | 14 |
| 3.1 GI-virtojen vaikutukset muuntajiin..... | 14 |
| 3.2 GI-virtojen vaikutus suojaareleisiin | 15 |
| 3.3 GI-virtojen vaikutukset generaattoreihin | 15 |
| 3.4 GI-virtojen muut vaikutukset sähköverkkoon | 15 |
| 4. HISTORIALLISESTI MERKITTÄVIÄ GEOMAGNEETTISIA MYRSKYJÄ | 17 |
| 4.1 Maaliskuun 1989 geomagneettinen myrsky | 17 |
| 4.2 Vuoden 2003 Halloween myrsky..... | 18 |
| 4.3 Vuonna 2012 Maan ohittanut purkaus..... | 19 |
| 5. EURISGIC-PROJEKTI | 20 |
| 6. SÄHKÖVERKKOJEN SUOJAAMINEN GEOMAGNEETTISILTA MYRSKYILTÄ. 21 | |
| 6.1 Geomagneettisiin myrskyihin ennalta varautuminen..... | 21 |
| 6.2 Muuntajien suojaaminen | 21 |
| 6.2.1 Muuntajan rakenteelliset vaikutukset..... | 21 |
| 6.2.2 Muuntajiin liittyvät varotoimet | 23 |
| 6.3 Muu sähköverkko..... | 24 |
| 6.4 Suojautuminen Suomessa | 24 |
| 6.5 Hydro-Québec nykyään | 25 |
| 7. YHTEENVETO..... | 26 |
| LÄHTEET | 28 |

LYHENTEET JA MERKINNÄT

| | |
|------------|--|
| CME | engl. coronal mass ejection, koronan massapurkaus |
| DGA | engl. dissolved gas analysis, muuntajassa tapahtuvan kaasun muodostumisen havainnointiin ja analysoimiseen käytetty menetelmä. |
| EURISGIC | engl. Erupean Risk from Geomagnetically Induced Currents, Euroopan unionin teettämä riskiarvio. |
| GI-virta | engl. geomagnetically induced current (GIC), geomagneettisesti indusoitunut virta. |
| IEEE | engl. Institute of Electrical and Electronics Engineers, kansainvälinen tekniikan alan järjestö. |
| Kp-indeksi | Kennziffer-indeksi, käytetään geomagneettisten myrskyjen kokoluokittelussa. |
| NASA | engl. National Aeronautics and Space Administration, Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallintovirasto. |
| SOHO | engl. Solar and Heliospheric Observatory, Aurinkoa tutkiva avaruusobservatorio. |

1. JOHDANTO

Ihmiskunta on muuttumassa koko ajan enemmän teknologiasta riippuvaiseksi. Lukemattomat erilaiset laitteet vaativat toimiakseen sähköä ja sähköntarve onkin kasvanut maailmanlaajuisesti jo vuosikymmenien ajan. Sähköverkon keksiminen teki suurien energiamäärien siirtämisestä pitkienkin matkojen päähän nopeaa ja suhteellisen vaivatonta. Suuri osa nykyään käyttämistämme laitteista paperinpainokoneista kännykkään ovat riippuvaisia verkkovirrasta. Tulevaisuutemme kannalta onkin siis tärkeää ymmärtää paremmin erilaisia sähköverkkoon kohdistuvia uhkia ja kehittää keinoja, joilla näitä uhkia pystyttäisiin paremmin torjumaan.

Yksi merkittävimmistä uhista sähköverkoille ovat Auringosta alkunsa saavat geomagneettiset myrskyt. Internetin keskustelupalstoilla ja erilaisissa medioissa törmää usein artikkeleihin tai videoihin, joissa povataan Auringon tuhoavan joku päivä sähköverkot ympäri maailmaa lähettäen ihmiskunnan takaisin keskiajalle. Kuinka paljon näissä jutuissa on sitten perää? Kuinka suurta vahinkoa aurinkomyrsky voi nykypäivänä aiheuttaa sähköverkoille? Minkälaisista vaurioista on tarkalleen kyse ja miten niitä voitaisiin mahdollisesti estää?

Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan geomagnettisten myrskyjen sähköverkoille aiheuttamia haittoja. Muita geomagneettisten myrskyjen vaikutuksia ja ilmiöitä sivutaan vain lyhyesti. Ensimmäiseksi työssä tutustutaan erilaisiin aurinkomyrskytyyppeihin ja niiden sähkömagneettisiin ominaisuuksiin. Syntymekanismia myrskyjen taustalla Auringossa ei käsitellä kovinkaan tarkasti, sillä se ei ole oleellista tämän työn kannalta. Tämän jälkeen tarkastellaan aurinkomyrskyjen aiheuttamia muutoksia muun muassa Maan magneettikentässä ja miten nämä muutokset lopulta johtavat sähköverkon kannalta oleellisimman ilmiön, geomagneettisesti indusoituneiden virtojen, eli GI-virtojen, syntymiseen. Oleellista on myös tarkastella sähköverkkojen niitä rakenteita, joille nämä virrat aiheuttavat eniten ongelmia.

Työssä kerrotaan myös Euroopan unionin GI-virtoja ja sähköverkkoja tutkineesta laajasta projektista. Se oli tämän työn tiedonhaun kannalta varsin merkityksellinen, sillä sen aikana tuotettiin useita julkaisuja, joihin tässä ja useissa muissakin geomagneettisia myrskyjä tutkivissa töissä on viitattu.

Jotta vaikutuksia sähköverkkoihin pystyttäisiin arvioimaan ja ymmärtämään paremmin, työssä kerrotaan kahdesta historiallisesti merkittävästä ja maailmanlaajuisesti tunnetusta aurinkomyrskystä: vuoden 1989 aurinkomyrskystä, sekä vuoden 2003

"Halloween" aurinkomyrsky. Lisäksi työssä kerrotaan myös todella voimakkaasta auringon purkauksesta, joka ohitti Maan ja esitetään arvioita siitä, minkälaista vahinkoa tällainen myrsky olisi voinut aiheuttaa.

Lopuksi luetellaan vielä eri menetelmiä, joilla geomagneettisia myrskyjä voidaan ennustaa, miten niitä vastaan voidaan pyrkiä suojautumaan ja mitä mahdollisia ongelmia näihin suojausmenetelmiin liittyy.

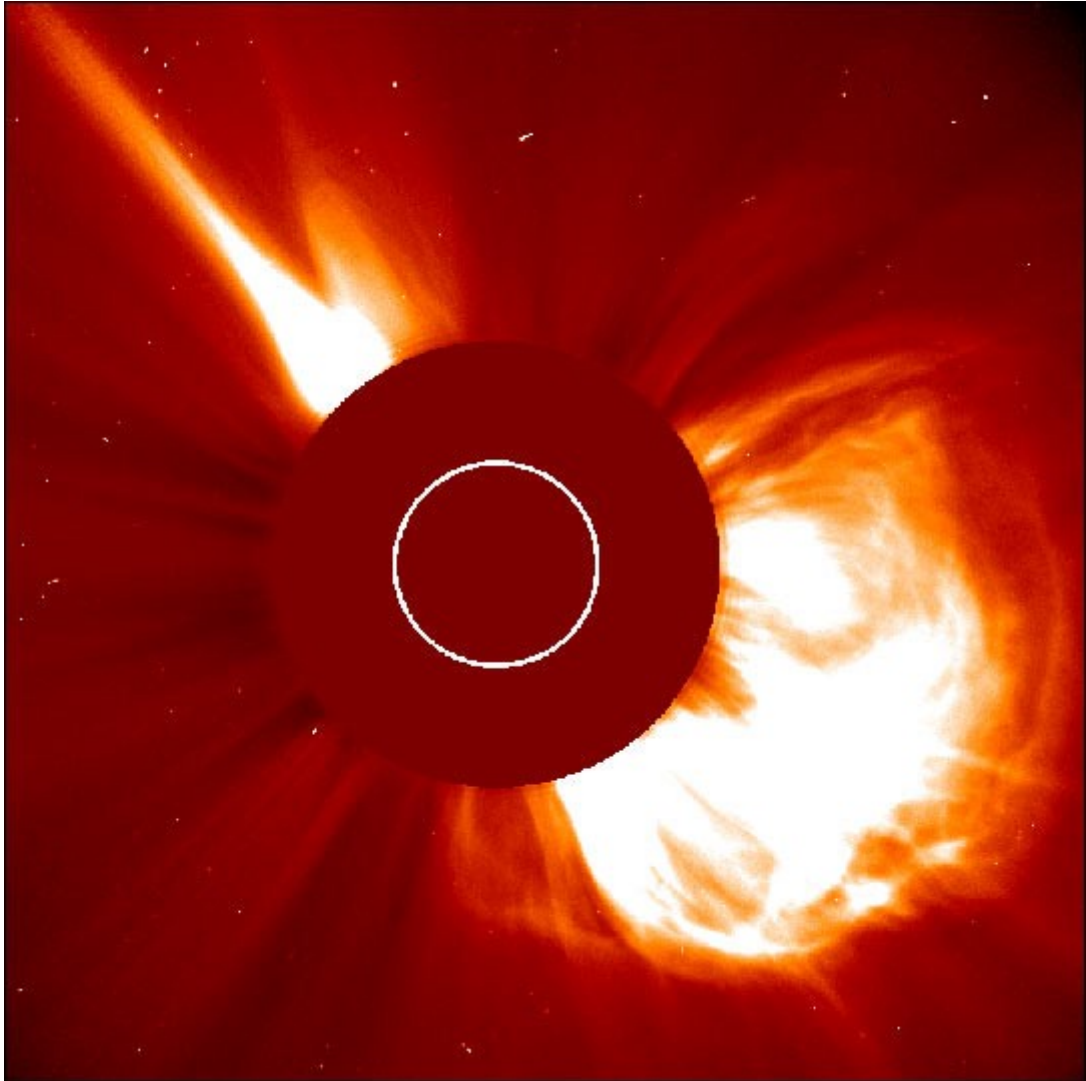
2. GEOMAGNEETTISET MYRSKYT

Geomagneettiset myrskyt ovat Maan magnetosfäärissa tapahtuvia sähkömagneettisia häiriöitä. Yleensä niiden aiheuttajina ovat Maahan osuvat aurinkotuulten puuskat, jotka aiheutuvat purkauksista Auringossa. Voimakkaat geomagneettiset myrskyt aiheuttavat ajoittain häiriöitä esimerkiksi radioliikenteessä ja voivat vaurioittaa satelliittien elektroniikka. Sähköverkkojen kannalta kaikista merkittävien geomagneettisten myrskyjen aiheuttama ilmiö on geomagneettisesti indusoidut virrat, eli GI-virrat. [1] [2, s. 1]

2.1 Aurinkomyrskyt

Aurinkomyrsky on Auringossa tapahtuva hiukkaspurkaus, jonka aiheuttajat jaetaan yleensä roihupurkauksiin (engl. flare) ja koronan massapurkauksiin (engl. CME). Roihupurkauksessa Auringon aktiiviselta alueelta purkautuu avaruuteen sen magneettikenttään varastoitunutta energiaa. Purkaus koostuu suurienergisistä hiukkasista, sekä eri sähkömagneettisen säteilyn lajeista, kuten gamma- ja ultraviolettisäteilystä. Koronan massapurkaus eli CME (engl. coronal mass ejection) on roihupurkausta voimakkaampi ja vaikuttaa Maan magneettikenttään eniten. Se on massiivinen, Auringosta avaruuteen purkautuva hiukkaspilvi, joka koostuu pääasiassa alemmaa Auringon kaasukehystä peräisin olevista varautuneista hiukkasista. Roihupurkauksilla ei yleensä ole sähköverkkojen kannalta merkittäviä vaikutuksia, joten tässä työssä keskitytään tarkastelemaan lähinnä massapurkauksia. Useimmiten roihupurkauksia ja massapurkauksia on kuitenkin vaikeaa erottaa toisistaan, sillä ne tapahtuvat harvoin erikseen. Yleensä ne tapahtuvat yhtä aikaa, tai heti toistensa perään. Tästä johtuen myöskään niiden suhdetta toisiinsa ei olla vielä pystytty määrittämään tarkasti. [1] [2, s. 1] [3]

Kuvaa 1 tarkastelemalla voi saada käsityksen siitä miten massiivisia purkaukset todellisuudessa voivat olla. Kyseessä on Auringosta otettu koronagrafikuva. Ne ovat kuvia, joissa tähden kirkkain osa on peitetty, jotta tähden lähellä olevia vähemmän kirkkaita kappaleita ja tapahtumia, kuten auringonpurkauksia, pystyttäisiin havainnoimaan paremmin. [1] Kyseessä on kuvan ottamishetkellä suurin koskaan havaittu roihupurkaus. Kuvassa näkyvä kirkas valkoinen alue on osa purkaukseen liittynyttä koronan massapurkausta. [4]



Kuva 1: NASAn SOHO-satelliitilla 4.11.2003 otettu kuva suuresta roihupurkauksesta. [4]

Maassa tapahtuvien geomagneettisten myrskyjen voimakkuus riippuu siihen osuvan hiukkaspilven hiukkastiheydestä, nopeudesta sekä magneettikentän suunnasta. Voimakkaimpien geomagneettisten myrskyjen on huomattu tapahtuvan silloin, kun Maahan osuu suurinopeuksinen ja tiheä CME, jonka magneettikenttä on etelään päin osoittava. Kulkiessaan avaruuden läpi hiukkaspilvet harvenevat ja heikkenevät niiden levitessä laajemmalle alueelle, mutta suurien purkausten vaikutukset tuntuvat silti Maassa asti 150 miljoonan kilometrin etäisyydellä Auringosta. [1] [2, s. 1] [3]

2.2 Geomagneettiset myrskyt

Maan magneettikentän muodosta johtuen siihen saapuvat varatut hiukkaset kulkeutuvat magneettikentän kenttäviivoja pitkin Maan magneettisille navoille, jossa magneettikenttä on heikoimmillaan. Yleensä aurinkotuuli on sen verran heikko, että Maan

magneettikenttä pystyy suojelemaan ihmiskuntaa sen pahimmilta vaikutuksilta. Aurinkotuulen puuskien osumisen huomaa usein vain taivaalla näkyvistä revontulista ja satunnaisista radioliikenteen häiriöistä lähellä napa-alueita. Joskus Maahan osuu kuitenkin voimakkaampia, joiden aikaansaamat geomagneettiset myrskyt voivat aiheuttaa häiriöitä myös esimerkiksi sähköjakelussa, tai satelliittien elektroniikassa. Niiden aiheuttajana on yleensä koronan massapurkaus. Voimakkaat geomagneettiset myrskyt aikaansaavat sen, että Maan magneettikenttä heikkenee laajemmalla alueella ja näin ollen myrskyn aiheuttamat ilmiöt, kuten revontulet, ovat voimakkaampia ja näkyvät pienemmällä leveysasteilla. Tällaisten myrskyjen kesto on yleensä muutamia päiviä, mutta joskus useat peräkkäiset massapurkaukset aiheuttavat häiriöitä, jotka voivat kestää jopa yli viikon. [1]

Geomagneettisten myrskyjen kokoluokittelussa käytetään usein magneettista Kp-indeksin arvoa, joka lasketaan hyödyntämällä mittausdataa kolmestatoista keskileveysasteilla sijaitsevasta magneettisesta tarkkailuasemasta. Kp indeksiarvo vaihtelee välillä 0–9. Esimerkiksi Ilmatieteenlaitos luokittelee geomagneettiset myrskyt myös geomagneettisen Kp-indeksin avulla, joka saa arvoja välillä G1–G5, vähäisestä äärimmäiseen. Taulukkoon 1 on listattu eri kokoisten myrskyjen vaikutukset ja niiden Kp-indeksit. Myös arvio myrskyjen yleisyydestä yhden pilkkujakson aikana on listattuna. Auringonpilkkujen määrä vaihtelee syklisesti ja yhtä tällaista sykliä kutsutaan pilkkujaksoksi. Yhden pilkkujakson pituus vaihtelee, mutta on keskimäärin noin 11 vuotta. Auringonpurkausten esiintymistodennäköisyys on korkeimmillaan pilkkumaksimien aikaan ja suuria purkauksia tapahtuu paljon harvemmin pilkkuminimien aikana. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, etteikö tuhoisa geomagneettinen myrsky voisi tapahtua pilkkuminimin aikana. Myrskyihin tulee olla varautunut kaikkina pilkkujakson kausina. Pilkkuminimien aikana massapurkauksia tapahtuu keskimäärin noin 0,8 ja pilkkumaksien aikana noin 3,5 vuorokaudessa. [1] [3] [5, s. 37]

Taulukko 1: Suomen Ilmatieteenlaitoksen käyttämä kokoluokitus geomagneettisille myrskyille. [1]

| Luokitus | Vaikutukset | Kp | Yleisyys |
|-------------------|---|----|--|
| G5 Äärimmäinen | <p>Revontulia voi näkyä 40. geomagneettisella leveyspiirillä asti (esim. Valencia Espanjassa).</p> <p>Sähkönjakelun kantaverkossa voi esiintyä laajoja jännitteenhallintaongelmia. Sähkökatkot ja muuntajavauriot mahdollisia. Indusoituneet sähkövirrat mm. maakaasuputkissa jopa satoja ampeereja.</p> <p>Satelliittipaikannuksen laatu voi heikentyä päiviksi. HF-taajuusalueen radioliikenteessä voi esiintyä alueellisia katkoksia parin päivän ajan. Matalataajuisissa navigointisignaaleissa voi esiintyä katkoksia.</p> <p>Satelliiteille voi aiheutua merkittäviä ongelmia sähköisestä varautumisesta. Satelliittien asennonsäädössä ja yhteyksissä maa-asemiin voi esiintyä ongelmia.</p> | 9 | 4 kertaa (4 päivänä) piikkujaksossa |
| G4 Ankara | <p>Revontulia voi näkyä 45. geomagneettisella leveyspiirillä asti (esim. Milano Italiassa).</p> <p>Sähkönjakelun kantaverkossa jännitteenhallintaongelmat mahdollisia. Suojausjärjestelmät saattavat virheellisesti kytkeä irti osia verkosta. Indusoituneet virrat häiritsevät korroosiosuojausta mm. maakaasuputkissa.</p> <p>Satelliittipaikannuksen laatu voi heikentyä tunneiksi. HF-taajuusalueen radioliikenteessä voi esiintyä alueellisia häiriöitä. Matalataajuisissa navigointisignaaleissa voi esiintyä häiriöitä.</p> <p>Satelliiteille voi aiheutua ongelmia sähköisestä varautumisesta. Satelliittien asennonsäädössä ja seurannassa saattaa esiintyä ongelmia.</p> | 8 | 100 kertaa (60 päivänä) piikkujaksossa |
| G3 Voimakas | <p>Revontulia voi näkyä 50. geomagneettisella leveyspiirillä asti (esim. Köln Saksassa).</p> <p>Sähkönjakelun kantaverkossa saatetaan tarvita jännitteenkorjauksia. Suojausjärjestelmät saattavat aiheuttaa vääriä hälytyksiä.</p> <p>Satelliittipaikannuksessa, HF-taajuusalueen radioliikenteessä ja matalataajuisissa navigointisignaaleissa saattaa esiintyä ajoittaisia häiriöitä.</p> <p>Satelliiteissa voi esiintyä haitallista sähköistä varautumista. Satelliittien asennonsäädössä voi esiintyä häiriöitä.</p> | 7 | 200 kertaa (130 päivänä) piikkujaksossa |
| G2 Kohtalainen | <p>Revontulia voi näkyä 55. geomagneettisella leveyspiirillä asti (esim. Malmö Ruotsissa).</p> <p>HF-taajuusalueen radioaaltojen eteneminen voi heikentyä korkeilla leveysasteilla.</p> <p>Matalalla kiertoradalla olevien satelliittien ja avaruusromun kokema ilmanvastus voi kasvaa merkittävästi tällä ja korkeammilla häiriötasoilla, mikä aiheuttaa muutoksia kiertoratoihin.</p> | 6 | 600 kertaa (360 päivänä) piikkujaksossa |
| G1 Vähäinen | <p>Revontulia näkyy yleisesti vähän tavanomaisen revontulivyöhykkeen eteläpuolella (esim. Etelä-Suomessa).</p> <p>Muuttoeläinten magneettiaistiin perustuva suunnistus häiriintyy tällä ja korkeammilla häiriötasoilla.</p> | 5 | 1700 kertaa (900 päivänä) piikkujaksossa |

Todennäköisyys sille, että G5 kokoluokan myrsky osuisi Maahan on matala, mutta historiasta löytyy kuitenkin tapauksia, jolloin näin on käynyt. Arviot siitä miten paljon vahinkoa tällaiset myrskyt voisivat pahimmassa tapauksessa aiheuttaa maailmanlaajuisesti liikkuvat usein sadoissa miljardeissa tai jopa biljoonissa euroissa. Kaikkien vahinkojen korjaamisessa voisi kestää joidenkin arvioiden mukaan

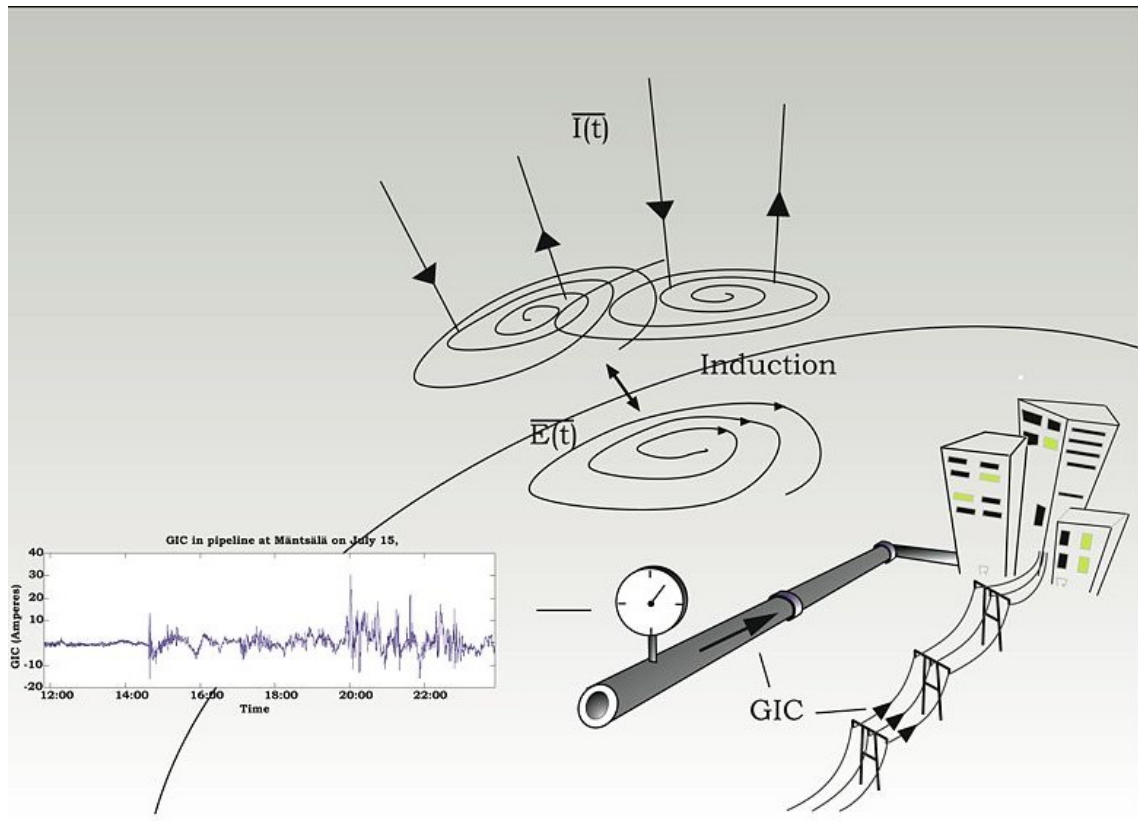
pahimmillaan jopa vuosia [6]. Vahinkojen arviointi on kuitenkin hankalaa, sillä laajoja sähköverkkoja ei ole ollut olemassa kovin kauan ja kyseisenä aikana suuria geomagneettisia myrskyjä on tapahtunut vain muutaman kerran.

2.3 GI-virrat

GI-virrat ovat maanpäällisiä tasavirtoja, joita esiintyy geomagneettisten myrskyjen aikana. Niitä voi käytännössä esiintyä missä päin maailmaa tahansa, mutta suurimmat GI-virrat esiintyvät pääasiassa lähellä Maan magneettisia napa-alueita. Nämä virrat eivät suoranaisesti aiheuta vaaraa ihmisille, mutta ne voivat aiheuttaa vaaraa ihmisten hyvinvoinnille epäsuorasti esimerkiksi vahingoittamalla sähköjakelujärjestelmiä.

Maan ionosfääri on osa ilmakehää, joka yltää noin 70 kilometrin korkeudesta aina tuhansien kilometrien korkeuteen maanpinnasta, jossa raja sen ja magnetosfäärin välillä alkaa hämärtyä. Auringonsäteilyn, sekä ylempää Maan magnetosfääristä tulevien hiukkasten vaikutuksesta arviolta 0,1–1 % ionosfäärin kaasusta on ionisoitunut. Tämän johdosta ionosfäärissä liikkuu vapaita elektroneja, eli siis sähkövirtoja. Aurinkotuulen puuskat aiheuttavat muutoksia Maan magneettikentässä, jolloin nämä ionosfäärissä luonnollisesti kulkevat virrat voimistuvat. [1] [2, s. 1] [7]

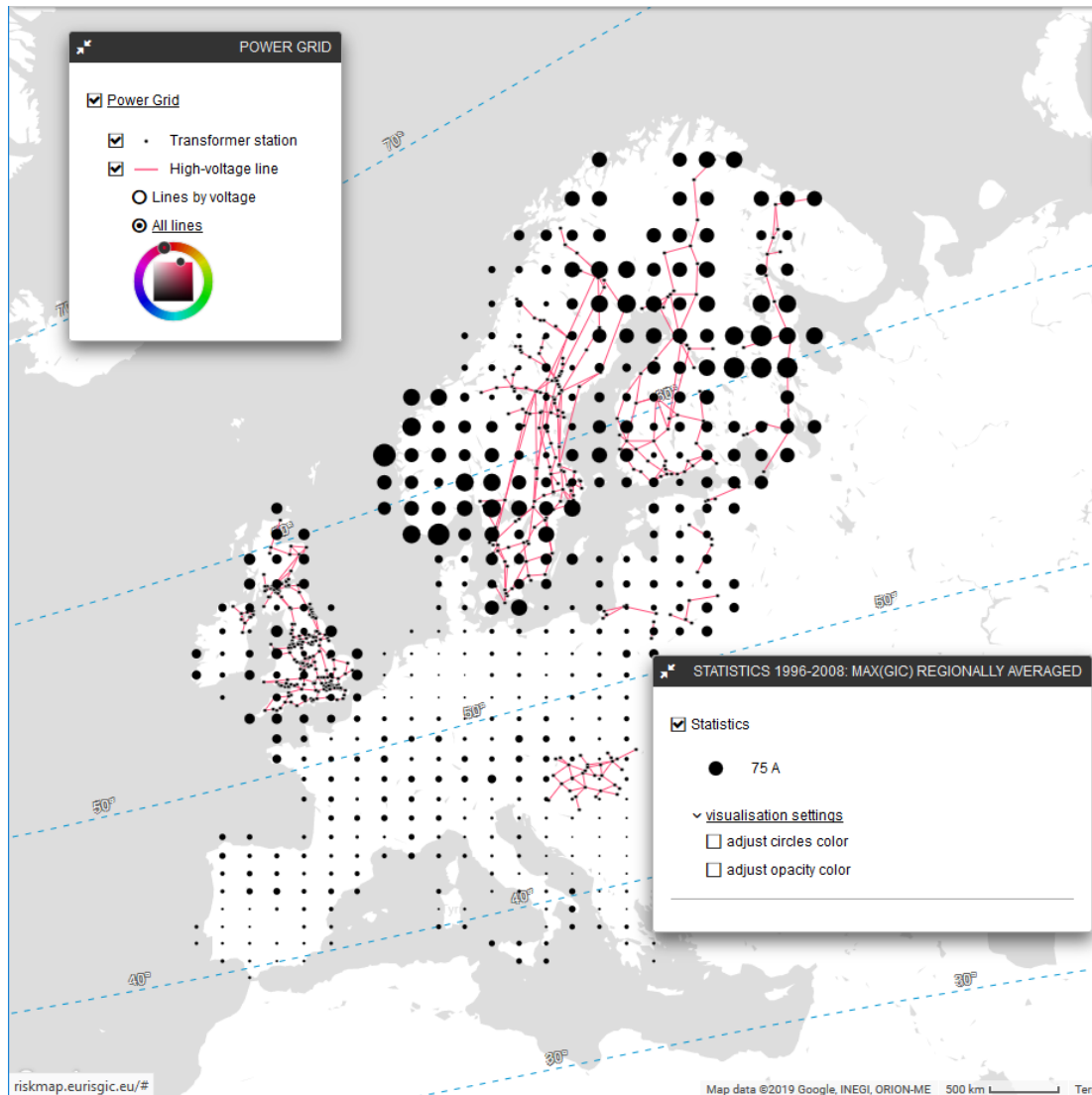
Liikkuvat varaukset luovat ympärilleen sähkö- ja magneettikentän. Tämä tarkoittaa sitä, että ionosfäärissä esiintyvät virrat luovat yläilmakehään sähkö- ja magneettikenttiä. Geomagneettisten myrskyjen aikana näiden kenttien voimakkuudet kasvavat ja vaihtelevat nopeasti ja arvaamattomasti. Nämä ionosfäärin virrat eivät kuitenkaan ole maanpinnalla havaittavia GI-virtoja. Mitään varsinaisia sähkövirtoja ei nimittäin pääse virtaamaan yläilmakehästä maanpinnalle asti ilman korkeasta eristävydestä johtuen. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, etteikö näillä virroilla olisi maanpinnalla havaittavia vaikutuksia. Faradayn induktiolain mukaan muuttuva magneettikenttä indusoi avoimeen virtapiiriin jännitteen. Näin ollen ionosfäärin magneettikentän vaihtelut indusoivat maaperään sähkökentän. Eli eri maa-alueiden välille syntyy siis jännite-eroja. Näiden alueiden välillä alkaa liikkua virtoja, joita sanotaan GI-virroiksi. [2, s. 2] [8, s. 2] [9] Edellä kuvattua GI-virtojen syntymekanismia on pyritty havainnollistamaan Kuvassa 2.



Kuva 2: Havainnekuva GI-virtojen syntymekanismista. $I(t)$ kuvaa ionosfäärin sähkövirtoja ja $E(t)$ maaperään indusoitunutta sähkökenttää. Harmaa putki sähköverkkopiirroksen vasemmalla puolella kuvaa maakaasuputkea. Vasemmalla olevassa kuvaajassa on oletettavasti ainoa mittausdataa GI-virroista mäntsäläläisestä maakaasuputkesta. [10].

GI-virrat kulkevat yleensä pienen resistiivisyyden omaavissa rakenteissa kuten maakaasuputkissa, öljyputkissa ja sähköverkoissa. Yleensä indusoituneiden sähkökenttien luomat jännite-erot eri maa-alueiden välillä ovat alle yksi voltti kilometriä kohden. Satojen kilometrien pituisissa johtimissa tämä voi kuitenkin johtaa satojen volttien suuruisiin jännite-eroihin johtimien päiden välillä, jolloin GI-virrat voivat nousta jopa satojen ampeerien suuruiseksi. [8, s. 2] [9]

Johdinten pituuden lisäksi myös maaperän johtavuus, laajojen vesistöjen läheisyys ja geomagneettisen myrskyn voimakkuus vaikuttavat merkittävästi indusoituneiden virtojen suuruuteen [11, s. 37]. Varsinkin pohjoisella pallonpuoliskolla kallioperä johtavuus on keskimäärin varsin huonoa ja GI-virrat voivat kasvaa todella suuriksi. Tämä johtuu siitä, että GI-virrat eivät pysty virtaamaan helposti Maan läpi, vaan jäävät kiertämään lähelle maanpintaa. [8, s. 1-2] [9] Kuvasta 3 voidaankin huomata, että yleisesti ottaen suurimmat GI-virrat esiintyvätkin juuri Pohjois-Euroopassa. Kuva 3 on Euroopan unionin EURISGIC projektissa luodusta kartasta, jolla pyrittiin arvioimaan GI-virtojen suuruuksia ja esiintymistodennäköisyyksiä eri puolilla Eurooppaa. [12]



Kuva 3: Kuvakaappaus EURISGIC-projektissa suurten GI-virtojen esiintymisen arviointiin luodusta riskikartasta. [13]

Kuvasta 3 voidaan todentaa, kuten on tullut jo aiemmin mainittua, ettei maantieteellinen (pohjoinen/etelä) sijainti ole ainoa GI-virtojen voimakkuuteen vaikuttava tekijä, sillä virtojen voimakkuudet vaihtelevat suuresti samoilla leveysasteillakin. Selkeimpänä esimerkkinä tästä on Norja, jossa GI-virrat vaikuttaisivat olevan suurimpia maan eteläosissa.

Suomessa suurin sähköverkossa koskaan mitattu GI-virta oli luokkaa 200 A, mutta esimerkiksi Ruotsissa suurin mitattu virta oli noin 300 A. Hieman etelämpänä Britanniassa ja Baltiassa taas voi esiintyä pahimmillaan 100 A suuruisia GI-virtoja. Teoriassa näitäkin suuremmat virrat ovat kuitenkin mahdollisia. Etelä-Euroopassa GI-virrat ovat huomattavasti pienempiä, eikä maissa kuten Kreikassa ollakaan koettu laajoja GI-virtojen aiheuttamia sähkökatkoja koko sen sähköverkkojen lyhyen olemassaolon aikana. Tai jos on ollut, niin niiden aiheuttajaksi ei olla osattu epäillä GI-virtoja. [9] [12]

2.4 Geomagneettiset myrskyt Suomessa

Suomi sijaitsee maantieteellisesti pohjoisessa lähellä Maan magneettista pohjoisnapaa, joten geomagneettisia myrskyjä esiintyy verrattain usein ja niiden synnyttämät GI-virrat ovat niin suuria, että ne täytyy ottaa huomioon sähköverkkoa suunniteltaessa. Myrskyjen aiheuttamat uhat on otettu Suomessa huomioon myös valtiotasolla. [5, s. 37–38]

Suomen sisäministeriön vuonna 2015 teettämässä kansallisessa riskiarviossa tarkasteltiin muiden uhkien ohella myös aurinkomyrskyjen 100-vuoden riskiskenaariota. Riskiarviossa aurinkomyrskyt jaotellaan säteilymyrskyihin, hiukkasmyrskyihin ja magneettisiin myrskyihin. Raportin mukaan pahimmat vaikutukset yhteiskunnalle aiheutuvat geomagneettisesta myrskystä, jossa kaikki kolme myrskytuyppeä tapahtuvat kaikki samanaikaisesti. Voimakkaalla geomagneettisella myrskyllä voisi olla vakavia seurauksia erityisesti talviaikaan johtuen vuoden ajalle ominaisista alhaisista lämpötiloista. Sähköverkkojen kaatuminen katkaisisi monilta myös lämmityksen, jolla voisi olla varsinkin kovilla pakkasilla kohtalokkaita seurauksia. Kesällä suurimmat ongelmat liittyisivät todennäköisesti ruoka- ja vesihuoltoon. [5, s. 37–38]

Kansallisen riskiarvion mukaan aurinkomyrskyjen aiheuttamia ongelmia voidaan kokea ympäri maata. Erityisesti Pohjois-Suomessa pieniä häiriöitä esiintyy jatkuvasti. Raportissa ei ole kuitenkaan eritelty, kuinka moni näistä häiriöistä liittyy juuri sähköverkkoihin ja kuinka moni esimerkiksi tietoliikenteeseen. ”Suuria ja vaikutukseltaan laajoja” myrskyjä arvioidaan tapahtuvan Suomessa noin kerran 11 vuodessa, eli yhden pilkkujakson aikana. ”Koko maassa ja useilla eri yhteiskunnan sektoreilla” negatiivisia vaikutuksia aiheuttavia aurinkomyrskyjä arvioidaan esiintyvän noin kerran sadassa vuodessa. [5, s. 37–38] Geomagneettiset myrskyt eivät ole kuitenkaan tähän mennessä aiheuttaneet merkittäviä sähkökatkoja, tai laitteistovikoja Suomen sähköverkoissa [14, s. 555].

3. GI-VIRTOJEN VAIKUTUKSET SÄHKÖVERKKOIHIN

Sähköverkossa kaikista herkimpiä osia GI-virroille ovat muuntajat. Muuntajat ovatkin juuri se osa sähköverkkoa, jossa esiintyy eniten ongelmia geomagneettisten myrskyjen aikaan. Muuntajan rakenne vaikuttaa merkittävästi siihen, miten GI-virrat niihin vaikuttavat. Varsinkin muuntajan sydämen rakenne. Ongelmia saatetaan kuitenkin kokea myös verkon suojalaitteissa ja generaattoreissa. GI-virrat voivat vaurioittaa myös sähköverkon muita osia epäsuorasti laitevaurioiden kautta.

3.1 GI-virtojen vaikutukset muuntajiin

GI-virrat pääsevät voimalinjoihin yleensä Y-kytkentäisten muuntajien maadoituspisteiden kautta [2, s. 1] [9]. GI-virrat virtaavat pääasiassa vain korkeajännite puolella, mutta niiden aikaansaamat harmoniset yliaallot saattavat aiheuttaa merkittäviä ongelmia myös muuntajan kolmioon kytketyllä pienjännitepuolella. [15, s. 4, 9]

GI-virrat luovat verkkovirtaan tasavirtakomponentin, joka saa aikaan sen, että verkon vaihtovirran aaltomuodon positiivinen puolijakso kasvaa suuremmaksi kuin sen negatiivinen puolijakso. Tämä voi johtaa muuntajan sydämen kyllästymiseen ja muuntajan epälineaariseen toimintaan. Myös verkkovirtaan ja -jännitteeseen vääristymiä aiheuttavia harmonisia yliaaltoja voi syntyä ja muuntajien loistehon kulutuksen on huomattu kasvavan. Tällä on vaikutuksia verkon tehotasapainoon heikentäen sen tehonsiirtokykyä. [8, s. 2] [16, s. 2342]

Muuntajan sydämen kyllästyessä syntyy sydämen ulkopuolisia pyörrevirtoja, ja magneettivuon leviää sydäimestä muuntajan muihin rakenteisiin. Normaalisti magneettivuon leviäminen muuntajassa estetään epämagneettisista materiaaleista valmistetuilla suojilla, tai rinnakkaisvastuksilla, jotka kuluttavan vuon energiaa pääasiassa muuttamalla sitä lämmöksi. Magneettivuon voimistuessa ja levitessä näiden suojien ja muidenkin muuntajan osien lämpöhäviöt voivat kuitenkin kasvaa voimakkaasti. Vuot saattavat keskittyä tiettyyn alueeseen esimerkiksi käämeissä, jolloin syntyy paikallisia kuumia pisteitä (engl. hot-spot). Varsinkin vanhoissa muuntajatyypeissä tämä voi johtaa komponenttien sulamiseen, tai kaasun muodostumisilmiöön (engl. gassing), eli muuntajan paperi- ja öljyeristysten vaurioitumiseen. Paperin kärsimät lämpövauriot ovat pysyviä, sillä lämpö aiheuttaa paperin selluloosan hajoamista. Lisäksi muutokset kyllästymis- ja normaalitilan välillä voivat aiheuttaa meteliä ja värinää. Nämä, sekä osien

lämpeneminen, voivat aiheuttaa mekaanisia vaurioita muuntajalle. [8, s. 2] [14, s. 560] [17, s. 2-29, 2-30]

3.2 GI-virtojen vaikutus suojarieleisiin

Toinen GI-virroille heikko kohta sähköverkossa, joka aiheuttaa usein ongelmia, liittyy sähköverkkojen suojaukseen. Liian herkäät suojarieleet saattavat aktivoitua GI-virtojen verkkovirtaan aiheuttamien poikkeamien takia, vaikkei tälle olisikaan varsinaista tarvetta. Seurauksena tästä on yleensä sähkökatko. [8, s. 1] Suojarieleistä erityisesti sähkömekaaniset rieleet ovat herkkiä GI-virtojen aiheuttamille tasavirtakomponenteille ja harmonisille yliaalloille. Nykyään suurin osa sähköverkoissa käytettävistä rieleistä ovat kuitenkin elektronisia kiinteän tilan rieleitä (engl. solid-state relay), jotka voivat hyödyntää toiminnassaan harmonisia yliaaltoja ja tasavirtakomponentteja havaitsevia algoritmeja. Tällöin ne eivät ole yhtä herkkiä GI-virroille, kuin sähkömekaaniset rieleet. [15, s. 19]

3.3 GI-virtojen vaikutukset generaattoreihin

Muuntajien lisäksi myös sähköverkkoon kytketyt generaattorit ovat haavoittuvaisia GI-virroille. Pääasiassa ongelmat aiheutuvat GI-virtojen aiheuttamista virran harmonisista yliaalloista, jotka saavat aikaan muun muassa generaattorin roottorin lämpenemistä. Tämän aiheuttaa generaattorin käämityksessä negatiivisen sekvenssin virtoina käyttäytyvät harmoniset virrat, joihin tavalliset generaattoreiden suojarieleet eivät välttämättä osaa reagoida. Toinen mahdollinen ongelma liittyy suuriin korkean paineen turbiini-generaattoreihin. Niissä harmoniset virrat saattavat vuorovaikuttaa turbiinien resonanssiajauksien kanssa, jonka seurauksena turbiinissa saattaa esiintyä värinää, joka taas voi johtaa turbiinin lapojen vaurioitumiseen. [17, s. 2-34]

3.4 GI-virtojen muut vaikutukset sähköverkkoon

GI-virrat voivat vaikuttaa sähköverkkoihin myös epäsuorasti. Vauriot esimerkiksi muuntajilla voivat johtaa muun muassa tulipaloihin, jotka voivat aiheuttaa tuhoa myös muuntajaa ympäröivissä laitteissa ja rakenteissa esimerkiksi sähköntuotantolaitoksilla.

Vuonna 1994 tapahtui kohtalaisen suuri geomagneettinen myrsky. Myrskyn aikana Yhdysvaltalaisen Zionin ydinvoimalan generaattorimuuntaja kärsi mittavia vaurioita. Muuntajan tuhansia litroja öljyä sisältänyt säiliö murtui, öljyä pääsi valumaan muuntajasta voimalan piha-alueelle, jonka jälkeen se syttyi tuleen. Tuli levisi voimalan muihin järjestelmiin, kuten erilaisiin ohjauspiireihin. Täyttä varmuutta onnettomuuden aiheuttajasta ei kuitenkaan ole, sillä alueella ei tarkkailtu GI-virtoja voimalaitoksen

omistavan yhtiön toimesta ja omistajat ovat kiistäneet väitteet geomagneettisen myrskyn osuudesta tapahtuneeseen. GI-virtojen aiheuttamia ongelmia koettiin kuitenkin samaan aikaan myös muissa voimaloissa, joten geomagneettinen myrsky on kaikista todennäköisimmin syy tapahtuneeseen. Ja vaikka muuntajan pettäminen myrskyn aikana olisikin vain sattumaa, on tämä hyvä esimerkki siitä, miten GI-virrat voivat epäsuorasti vaurioittaa sähköverkoja. [17, s. 2-33] Jos tällainen onnettomuus pääsisi tapahtumaan ydinvoimalalla, voisi se pahimmassa tapauksessa johtaa jopa ydinonnettomuuteen. Tiettävästi näin ei ole kuitenkaan koskaan vielä tapahtunut.

Muita GI-virtojen verkossa aiheuttamia ongelmia ovat loistehon kasvusta johtuvat jännitehäviöt ja loistehokompensaattoreiden ylikuormittuminen. Kompensaattorit pyrkivät minimoimaan teho- ja jännitehäviöitä vaikuttamalla verkon loistehon määrään. [15 s. 16]

4. HISTORIALLISTI MERKITTÄVIÄ GEOMAGNEETISIA MYRSKYJÄ

Jotta suurten geomagneettisten myrskyjen vaikutuksia voitaisiin arvioida nykypäivän sähköverkkoihin, olisi hyvä tarkastella myös jo tapahtuneita, historiallisesti merkittäviä myrskyjä. GI-virtojen aiheuttamien vahinkojen määrää suurimman luokan aurinkomyrskyn osuessa Maahan on kuitenkin todella vaikeaa lähteä arvioimaan, sillä sähköverkot ovat olleet käytössä verrattain lyhyen aikaa, eikä sinä aikana suurista GI-virroista ja niiden vaikutuksista ole pystytty keräämään kovinkaan paljon mittaustietoa [12]. Tutustutaan kuitenkin hieman kahteen merkittävään myrskyyn, joita tarkastellaan usein erilaisissa geomagneettisia myrskyjä käsittelevissä tutkimuksissa.

4.1 Maaliskuun 1989 geomagneettinen myrsky

13–14. maaliskuuta 1989 koettiin yksi mittaushistorian voimakkaimmista ja tunnetuimmista geomagneettisista myrskyistä, kun useita peräkkäisiä auringon epätavallisen korkeasta aktiivisuudesta seuranneita CME purkauksia osui Maahan. Kaikista tunnetuin kyseisen myrskyn piirre on varmaankin se, että väkiluvultaan Kanadan suurimmassa provinssissa Québéciassa koko sähköverkko käytännössä romahti. Miljoonat ihmiset jäivät vaille sähköä yhdeksäksi tunniksi ja revontulista tehtiin havaintoja niinkin etelässä kuin Kuubassa [18]. Myrskyn Kp arvoksi on määritetty 9, joka on siis Taulukon 1 mukaan voimakkaimman luokan myrsky [19, s. 6]. [11, s. 38–41]

Geomagneettinen myrsky loi voimakkaita GI-virtoja Kanadan maaperään, jotka aiheuttivat seitsemän, Hydro-Québecin järjestelmään kuuluvan La Granden verkon toiminnan kannalta oleellisen staattisen kompensattorin (engl. static compensator) sulkeutumisen. Tämän seurauksena verkon jännite putosi, taajuus kasvoi ja lopulta verkko kaatui lukuun ottamatta muutamaa muusta verkosta eristettyä ala-asemaa. Hydro-Quebecin sähköverkko menetti 9500 MW tehostaan, joka johti koko Québecin provinssin laajuiseen sähkökatkoon. [11, s. 40–41] [20, s. 1]

Ongelmia koettiin myös Yhdysvalloissa, kun New York Power menetti 150 MW ja New England Power Pool yli 1400 MW verkkojensa tehosta Hydro-Quebecin kaatumisen myötä. Yhdysvaltojen sähköverkkojen kapasiteetit riittivät kuitenkin kompensoimaan tämän tehon menetyksen, sillä verkkojen kuormitus oli myrskyn aikana vähäistä. Tämän ansiosta Yhdysvalloissa ei koettu lainkaan sähkökatkoja ja verkkojen kapasiteetti riitti kompensoimaan myös kasvaneen loistehon kulutuksen [11, s. 37]. Kaiken kaikkiaan

Yhdysvaltojen sähköverkoissa koettiin kaikkiaan yli 200 vikaa. Muun muassa muuntajia vahingoittui, kuten Kuvassa 5 näkyvä Yhdysvaltalaisella Salemin ydinvoimalalla lämpövaurioita kärsinyt ~1000MVA generaattorimuuntaja (engl. generator set-up transformer) [17, s. 2-29]. [18] [20, s. 1]



Kuva 4: Vuoden 1989 geomagneettisessa myrskyssä vaurioitunut muuntaja Salemin ydinvoimalalla. Oikeanpuoleiset kuvat ovat muuntajan vaurioituneesta 22 kV alajännitekäämityksestä. [17, s. 2-33]

Kuvan 5 muuntajan jäähdytys ja eristys oli toteutettu öljyllä. Myös paperi eristystä oli käytetty, mutta käämien lämpeneminen pyörrevirtojen ja magneettivuon leviämisen johdosta oli niin voimakasta, että paperieristys tuhoutui ja osa käämityksestä sulii. [17, s. 2-29] Myös muualla pohjoisella pallonpuoliskolla, kuten esimerkiksi Ruotsissa, koettiin vakavia häiriöitä sähkönsiirtoverkoissa [19, s. 1–2].

4.2 Vuoden 2003 Halloween myrsky

30. lokakuuta 2003, tapahtui yksi mittaushistorian voimakkaimmista geomagneettisista myrskyistä. Auringossa tapahtui 17 suurta peräkkäistä auringonpurkausta aiheuttaen kaksi Maahan osunutta koronan massapurkausta. Revontulista tehtiin havaintoja niinkin etelässä kuin Yhdysvaltoihin kuuluvassa Floridan osavaltiossa. Myrskyn Kp arvo oli voimakkaimmillaan luokkaa 9. [21]

Purkausten aiheuttama geomagneettinen myrsky sai Malmössä Ruotsissa aikaan tunnin kestäneen sähkökatkon. Vian aiheutti 130 kV johdon suojarieheen laukeaminen, joka oli ollut mitoitukseltaan liian herkkä perustaajuuden (50 Hz) kolmannelle harmoniselle, eli 150 Hz yliaallolle. Tämä johtui mitä todennäköisimmin vähintään yhden verkossa olleen muuntajan sydämen kyllästymiseen GI-virtojen vaikutuksesta. [22, s. 1776-1782] Ongelmia koettiin myös Etelä-Afrikassa, jossa Eskom yhtiön sähköverkko menetti 14 sen 400kV:n muuntajaa. [17, s. 3-27]

4.3 Vuonna 2012 Maan ohittanut purkaus

23.7.2012 suurimman luokan CME lävisti Maan kiertoradan kohdasta, jossa Maa oli ollut vain noin viikkoa aikaisemmin. Sen voimakkuus saatiin mitattua STEREO-A nimisellä satelliitilla, joka sattui olemaan purkauksen reitillä. Euroopan unionin teettämän raportin mukaan kyseinen CME olisi saattanut olla voimakkuudeltaan samaa luokkaa, tai ehkä jopa voimakkaampi, kuin vuoden 1989 aurinkomyrsky [12]. Voimakkuuden arviointi on kuitenkin hankalaa, ja joidenkin arvioiden mukaan myrsky saattoi olla jopa yhtä suuri kuin ihmiskunnan historian ehkä tunnetuin ja voimakkain aurinkomyrsky. Tämä tunnetaan nimellä The Carrington event ja se tapahtui syyskuussa 1859. Myrskyn seurauksena revontulia nähtiin niinkin lähellä päiväntasaajaa, kuin Ranskan Polynesiaan kuuluvalla Tahitilla. Tuolloin ei kuitenkaan ollut vielä olemassa sähköverkkoja, joita se olisi voinut vaurioittaa, mutta se aiheutti kuitenkin ongelmia sähkölennätinjärjestelmissä. Jos tällainen purkaus olisi osunut Maahan heinäkuussa 2012, se olisi voinut aiheuttaa vahinkoa joidenkin arvioiden mukaan jopa yli 2 biljoonan dollarin edestä. Vaurioiden, kuten hajonneiden muuntajien, korjaaminen olisi voinut pahimmillaan kestää jopa vuosia. [8]

5. EURISGIC-PROJEKTI

Modernin yhteiskunnan toimivuuden kannalta on tärkeää ymmärtää ja tutkia siihen kohdistuvia uhkia. EURISGIC (European risk from geomagnetically induced currents) oli ensimmäinen Euroopan laajuinen prototyyppi palvelusta, jolla pystyttäisiin reaaliaikaisesti arvioimaan ja ennustamaan GI-virtojen vaikutuksia sähköverkkoihin [23]. Geomagneettisten myrskyjen vaikutuksia sähköverkkoihin on tutkittu ennenkin pääasiassa sähköverkkoyhtiöiden toimesta, mutta EURISGIC on varmastikin yksi laajimmista aiheita tutkivista projekteista. Se oli monikansallinen projekti, jossa tuotettiin useita eri tutkielmia. Myös tässä työssä on käytetty pohjatiedon hankintaan ja lähteinä useita projektin seurauksena syntyneitä julkaisuja, sekä projektin loppuraporttia.

EURISGIC-projektin pääasiallisena rahoittajana toimi Euroopan Unioniin kuuluva European Community's Seventh Framework Programme ja projektin koordinoinnista vastasi Suomen Ilmatieteenlaitos. Mukana oli myös muita instituutioita esimerkiksi Yhdysvalloista, Venäjältä ja Ruotsista. Kokonaisbudjetti oli 1 561 175 €, josta Euroopan unionin osuus oli 1 056 184 €. Projekti aloitettiin 1.3.2011, ja saatiin päätökseen 28.2.2014. Tavoitteena oli muun muassa tilastotietoa apuna käyttäen arvioida, minkälaista vahinkoa suuret GI-virrat voisivat pahimmillaan saada aikaan eurooppalaisissa sähköverkoissa. Lisäksi projektissa pyrittiin mallintamaan GI-virtojen laskemiseen soveltuva sähköverkkomalli, kokoamaan luettelo maaperän johtavuutta tarkastelevista malleista, sekä keräämään dataa eurooppalaisilta havaintoasemilta auringon pilkuista ja GI-virroista vuosilta 1996-2008. [12] [23]

Pahimpia mahdollisia GI-virtojen aiheuttamia tapahtumia arvioitaessa tultiin siihen loppupäätelmään, että kaksi kertaa vuoden 2003 geomagneettista myrskyä voimakkaampia tapahtumia esiintyy Maassa arviolta noin kerran sadassa vuodessa. Tarkkaa arviota siitä miten voimakas tällainen myrsky voisi pahimmillaan olla on vaikeaa tehdä, johtuen GI-virtojen, sekä auringon aktiivisuuden tarkkailun mittaushistorian lyhydestä. GI-virtojen aiheuttamia sähkökatkoja arvioidaan tapahtuvan noin kerran kymmenessä vuodessa. Tulevaisuudessa suuri geomagneettinen myrsky saattaa aiheuttaa mittavia, ehkä jopa koko mantereenlaatuisia ongelmia, sillä yhä useammilla sähköverkoilla on useammin maiden rajoja ylittäviä yhteyksiä. [12]

6. SÄHKÖVERKKOJEN SUOJAAMINEN GEOMAGNEETTISILTA MYRSKYILTÄ

6.1 Geomagneettisiin myrskyihin ennalta varautuminen

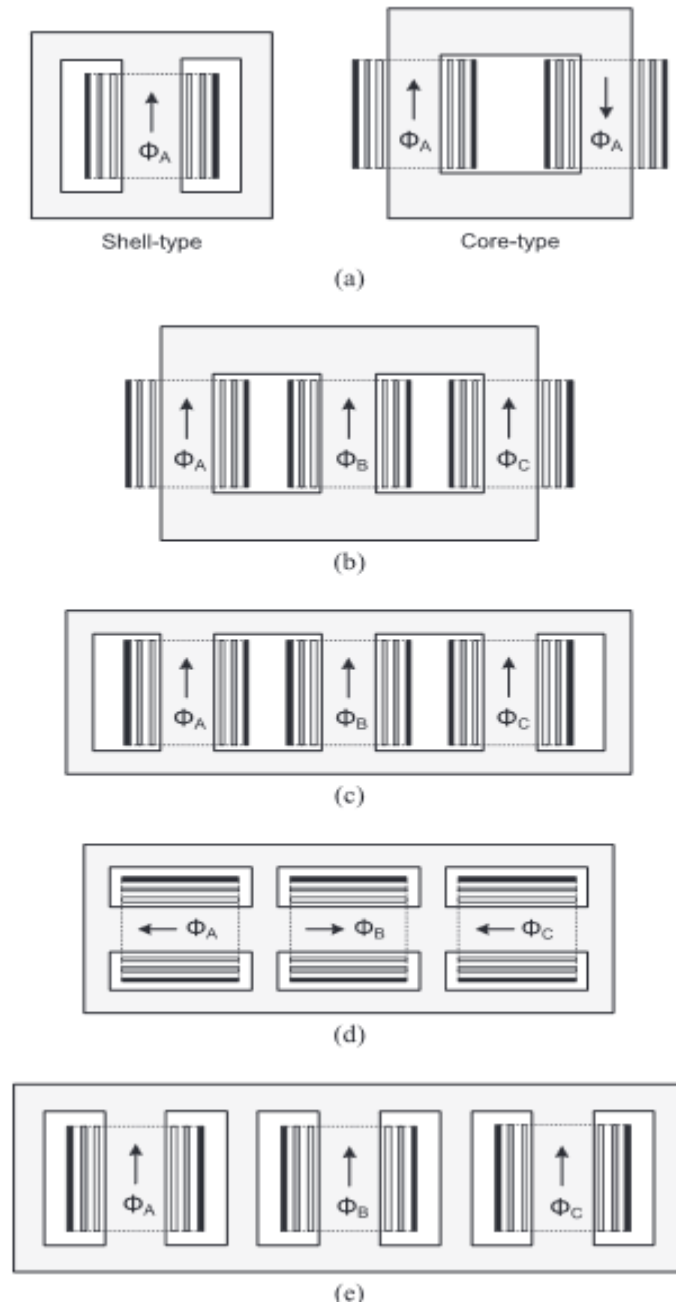
Auringon aktiivisuutta, myrskyjen esiintymistä, ja yhteiskunnallisia vaikutuksia pyritään ennustamaan etukäteen käyttäen eri tutkimusmenetelmiä. Nykyään aurinkomyrskyihin pystytään myös varautumaan ennalta seuraamalla kansainvälisesti hankittavaa dataa auringon aktiivisuudesta. Kun CME tapahtuu, se havaitaan Auringosta otettavien koronagrafikuvien avulla. Aikaa, joka koronan massapurkauksessa syntyvältä hiukkaspilveltä kuluu kulkea Auringosta Maahan, on vaikeaa arvioida, sillä kulkiessaan avaruuden läpi se on käytännössä näkymätön. Yleensä kyseinen aika on vähintään vuorokausi. Purkauksen voimakkuuttakaan ei pystytä kuin arvioimaan siihen asti, kunnes purkaus saavuttaa Auringon ja Maan välillä Aurinkoa kiertävän, Auringon aktiivisuuden tarkasteluun tarkoitetun DSCVR-satelliitin. Tosin, tällöin aikaa myrskyyn varautumiseen jää enää vajaa tunti. [1]

6.2 Muuntajien suojaaminen

6.2.1 Muuntajan rakenteelliset vaikutukset

Koska vakavimmat ongelmat, joita GI-virrat aiheutuvat muuntajille, johtuvat osien lämpenemisestä, olisi yhtenä hyvänä suojautumiskeinona muuntajien jäähdytyksen parantaminen. Lisäksi muuntajiin voitaisiin lisätä sopivia rinnakkaiskytkentöjä, joilla voitaisiin vähentää magneettivuon leviämisestä aiheutuvia pyörrevirtoja. [8, s. 3] Ilmaväli ja muuntajan säiliö ovat myös tärkeitä rakenteita, joilla muuntajia voidaan suojata GI-virroilta. Näiden käyttäminen on erityisen tärkeää kolmipylväisissä muuntajissa. [16, 1, s. 2349]

Kolmivaihemuuntajat ovat herkempiä GI-virtojen luomille tasavirta komponenteille kuin yksivaihemuuntajat. [24, s. 1369] Kaikki sähköverkon muuntajat eivät ole kuitenkaan rakenteeltaan samanlaisia, vaan on olemassa useita eri tapoja toteuttaa kolmivaiheinen vaihtovirtamuuntaja. Muuntajan sydämen rakenteesta riippumatta kaikki kolmivaihemuuntajat ovat alttiita GI-virtojen aiheuttamalle kyllästymiselle. Kuvassa 4 on lueteltu näistä yleisimmät. Lisäksi kuvassa (a) on vertailun vuoksi esitetty myös yksivaiheisen muuntajan sydämen kaksi eri rakennetyyppiä.



Kuva 5: Erilaisia muuntajien sydäntyyppejä: (a) yksivaiheinen, (b) kolmipylväinen, (c) viisipylväinen, (d) kuorimuotoinen (engl. shell-type) ja (e) seitsenpylväinen kuorimuotoinen sydän. [16, s. 2343]

Yli 200 tai 300 MVA muuntajilla yleisimmin käytetty sydäntyyppi on viisipylväinen muuntaja rakenne (Kuva 4 c). Kolmipylväinen rakenne (Kuva 4 b) vaikuttaisi kuitenkin olevan GI-virroilta suojautumisen kannalta parempi vaihtoehto. Ongelmana vain on se, että kolmipylväisen suurjännitemuuntajan valmistaminen on paljon haastavampaa kuin viisipylväisen. Vuonna 2006 ABB sai valmiiksi Fortumin ja E.ON:n yhteisomistuksessa olevalle Oskarshamn 2 ydinvoimalalle kolmipylväisen 825 MVA muuntajan, jonka tarkoitus on kestää suuriakin GI-virtoja. [24, s. 1373 - 1374] [25]

Koska GI-virrat pääsevät muuntajaan maadoituspisteen kautta, voitaisiin sen ja maan väliseen maadoitusjohtimeen asentaa resistiivinen komponentti. Esimerkiksi käämin lisääminen maadoitusjohtimeen voisi olla hyvä vaihtoehto, sillä käämejä käytetään jo esimerkiksi Suomessa 400 kV järjestelmissä vähentämään maasulkuvirtojen suuruutta. Yleensä tämä pienentää myös maadoitusjohtimen kautta kulkevan GI-virran suuruutta, mutta joissakin tapauksissa tämä saattaa myös kasvattaa GI-virran suuruutta. Käämin lisääminen pelkästään yksittäisen muuntajan maadoitusjohtimeen saattaisi nimittäin ohjata GI-virtoja muihin verkon muuntajiin. Käämejä hyödynnettäessä niitä tulisikin siis käyttää jokaisessa verkon muuntajassa. [26, s. 1, 9-10]

6.2.2 Muuntajiin liittyvät varotoimet

Varsinkin suuret muuntajat olisi hyvä tarkistaa DGA-menetelmällä muutaman päivän sisällä suuren geomagneettisen myrskyn jälkeen, sillä osa muuntajista on saattanut vaurioitua, vaikka ne vaikuttaisivatkin muuten toimivan moitteettomasti. Muuntaja saattaa hajota päivien, tai jopa kuukausien päästä geomagneettisesta myrskystä. Tämän takia geomagneettista myrskyä ei välttämättä edes osata epäillä vian aiheuttajaksi. Erityisesti lähempänä päiväntasaajaa sijaitsevilla mailla, kuten Kreikassa, jossa muuntajia ei välttämättä ole suojattu voimakkaita GI-virtoja vastaan, syylliseksi epäillään yleensä vain muuntajan ikääntymistä, tai valmistusvirhettä. [8, s. 3]

Sähköverkkoyhtiöllä voisi olla korvaavia varamuuntajia varastossa, sillä uuden muuntajan hankkimisessa voi kestää pahimmillaan jopa yli vuoden. Jos verkkoyhtiöllä olisi varastossa valmiina korvaavia muuntajia, vian korjaaminen voisi onnistua muuntajan koosta riippuen muutamassa viikossa. Yksittäisten sähköverkon muuntajien toiminnasta poistuminen ei yleensä aiheuta laajoja ongelmia, sillä sähköverkot on suunniteltu niin, että virralla on useita reittejä asiakkaille. Vakavampi tilanne syntyy, jos suurien voimalaitosten generaattorimuuntajia hajoaa. Ne ovat suuria muuntajia, jotka yhdistävät voimalaitokset sähköverkkoon. Niiden rikkoutuminen johtaa siihen, että sähköverkko menettää koko voimalaitoksen sähkön tuotannon. Suuret yli 600 MVA muuntajat ovat kuitenkin kalliita. Kalliiden laitteiden varastoiminen sitoo yhtiön käyttöpääomaa ja suuria myrskyjä, jotka voisivat vahingoittaa generaattorimuuntajien kaltaisia suuria muuntajia, esiintyy vain harvoin. Näistä syistä johtuen verkkoyhtiöt eivät yleensä kovin halukkaita tekemään tällaisia suuria investointeja vaativia varotoimia. [17, s. 2-33, 2-34] Suurien generaattorimuuntajien suojaaminen GI-virtoja vastaan voisikin olla sähköverkkoyhtiöiden kannalta parempi vaihtoehto.

6.3 Muu sähköverkko

GI-virtojen suuruutta verkossa voidaan vähentää myös lisäämällä verkkoon sarjaan kytkettyjä kondensaattoreita. Sarjaan kytkettyinä kondensaattorit estävät GI-virtojen kaltaisten tasavirtakomponenttien virtaamisen johtimissa. Tätä keinoa käytetään esimerkiksi Pohjoismaissa [27, s. 13]. Tällaiset kondensaattorit ovat kuitenkin kalliita ja teknisesti vaikeasti toteutettavissa. Jos kondensaattoreiden asentamista ei suunnitella huolella, on olemassa riski, että GI-virrat kasvavat suuremmiksi kuin ilman kondensaattoreita. Resistiiviset komponentit verkossa voisivat pienentää GI-virtoja, mutta ne myös aiheuttaisivat ylimääräisiä vaihtovirtahäviöitä. [26, s. 1-2, 7] Myös verkkojen väliaikainen uudelleen konfigurointi voisi olla eräs keino vähentää GI-virtojen vaikutuksia [8, s. 3].

Sähköverkkoyhtiöt voisivat pyrkiä arvioimaan loistehon kulutuksen kasvua verkoissaan suuren geomagneettisen myrskyn aikana. Tällöin verkkoon voitaisiin lisätä loistehoreservejä säilyttämään verkon tehotasapaino. Tämä ei kuitenkaan välttämättä ole kannattava sijoitus, sillä voimakkaasti loistehon kulutusta lisääviä geomagneettisia myrskyjä esiintyy vain harvoin. [14, s. 561]

Generaattoreiden suojaamiseen harmonisilta yliaalloilta on olemassa IEEE standardit C50.12 ja C50.13. Niiden mukaan avo- ja umpinapageneraattorit täytyy suojata lämpenemiseltä negatiivisilla sekvenssireleillä. (engl. negative-sequence relay) [20, katso 28, 29]

6.4 Suojautuminen Suomessa

Koska Suomi sijaitsee lähellä pohjoisnapaa, geomagneettisten myrskyjen ja niiden aiheuttamien haittojen esiintymistodennäköisyys on verrattain korkea. Tämän vuoksi muun muassa sähköverkko- ja tietoliikennetoimijoiden on pystyttävä varautumaan niihin ennalta suurimpien ongelmien välttämiseksi. Suomessa ei ole kuitenkaan koskaan koettu GI-virroista johtuvia laajoja sähkökatkoja tai laitevikoja. Suomessa on tutkittu GI-virtoja jo 1970-luvulta lähtien. Tutkimukset aloitti Ilmatieteenlaitos yhteistyössä valtion omistaman energiayhtiön Imatran Voima Oy:n kanssa. Suomessa on tutkittu esimerkiksi Imatran Voima Oy:n ja Fingrid Oyj:n toimesta suurten GI-virtojen vaikutuksia 400 kV suurjänniteverkon muuntajiin, jotka kuten on jo aiemmin tullut todettua, ovat GI-virtojen kannalta sähköverkkojen heikoin osa. Vuonna 2002 Suomessa oli osana sähkönlaatua tarkkailevassa järjestelmässä kolme 400 kV verkkoa, joissa mitattiin GI-virtoja. Tutkimuksissa on todettu, että suurienkin geomagneettisten myrskyjen vaikutukset Suomen muuntajiin ovat nykypäivänä vähäisiä. [9] [14, s. 555]

Nykyään Suomessa avaruussään valvomisesta, ennustamisesta ja säästä varoittamisesta vastaa Ilmatieteenlaitos. Tiedottamisessa käytetään apuna LUOVA- ja KRIVAT-järjestelmiä, joilla jaetaan ajankohtaista tietoa esimerkiksi sääoloista sähköverkkoyhtiöille, kuten kantaverkkoyhtiö Fingrid Oy:lle [28]. Ilmatieteenlaitos käyttää omien mittaustensa lisäksi useita muitakin keinoja Auringon ja sen myrskyjen tutkimiseen. Pitkäaikaisvaikutuksia tutkitaan ReSoLVE yksiköllä, myrskyjä ja niiden esiintymistiheyttä SOLE ja SAFIR- projekteilla, sekä myrskyjen vaikutuksia ydinturvallisuuteen EXWE-projektilla. [1] [7, s. 37–38]

6.5 Hydro-Québec nykyään

1989 geomagneettisen myrskyn jälkeen Hydro-Québec on onnistunut välttämään suurilta vioilta ottamalla käyttöön erinäisiä suojausmenetelmiä. Käyttöön on otettu häiriöitä sähköverkossa mittaava hälytysjärjestelmä ja verkon suojausjärjestelmiä on uudelleenkalibroitu esimerkiksi nostamalla johdonsuojakatkaisijoiden toimintarajoja. Verkkoon on myös lisätty sarjakompensaattoreita, jotka auttavat verkkoa säilyttämään tehotasapainonsa. Myös toimintatapoihin on tehty muutoksia. Häiriöiden ilmetessä siirrettävän tehon määrää verkossa, sekä tasavirtaa verkon yhteyksissä, vähennetään ja kytkentöjen tekeminen lopetetaan. Hydro-Québec käyttää myös hyväkseen auringon aktiivisuudesta kerättävää dataa, joka mahdollistaa valmistautumisen koronan massapurkausten aiheuttamiin ongelmiin jo etukäteen. [29]

7. YHTEENVETO

Aurinkomyrskyt jaotellaan yleensä roihupurkauksiin ja koronan massapurkauksiin. Sähköverkon kannalta CME aiheuttaa suurimmat ongelmat. Maan magneettikenttä suojelee yleensä ihmiskuntaa aurinkotuulen pahimmilta haittavaikutuksilta. Heikoimmillaan Maan magneettikenttä on lähellä magneettisia napa-alueita, jonka takia esimerkiksi Suomessa ja Kanadassa sähköverkot on jo nyt suunniteltu niin, että ne kestävät hyvin geomagneettisten myrskyjen aiheuttamia häiriöitä. Geomagneettisten myrskyjen vaikutuksiin on kuitenkin hyvä varautua myös etelämpänä, sillä geomagneettinen myrsky vaikuttaa Maan magneettikenttään niin, että myrskyjen vaikutusalue laajenee napa-alueilta lähemmäs päiväntasaajaa. Etelämpänä sijaitsevilla maissa, kuten Kreikassa verkkoyhtiöt eivät kuitenkaan välttämättä ole varautuneet suurien geomagneettisten myrskyjen varalta, sillä kyseisissä maissa ei olla totuttu olemaan tekemissä geomagneettisten myrskyjen aiheuttamien ongelmien kanssa. Myrskyjen aiheuttamia vaurioita esimerkiksi muuntajiin ei välttämättä edes osata liittää geomagneettisiin myrskyihin. Tämän vuoksi voisikin olla hyvä, jos tietoisuutta GI-virroista näissä maissa pystyttäisiin jotenkin parantamaan.

Maahan osuttuaan auringonpurkauksen hiukkaspilven magneettikenttä vuorovaikuttaa Maan magneettikentän kanssa voimistaen ionosfäärissä esiintyviä virtoja, luoden voimakkaita sähkö- ja magneettikentän vaihteluita. Näistä seuraa Faradayn induktiolakien mukaisesti maan pinnalla havaittavia GI-virtoja. Sähköverkkoon GI-virrat pääsevät yleensä muuntajien maadoitusten kautta. Ne luovat verkkovirtaan tasavirtakomponentin, jonka seurauksena muuntajan loistehon kulutus kasvaa, syntyy harmonisia yliaaltoja ja muuntajat voivat vaurioitua mekaanisesti. Muuntajan vaurioituminen voi johtaa esimerkiksi tulipaloihin, jotka voivat vaurioittaa myös muita muuntajan läheisyydessä olevia laitteita ja rakenteita. GI-virrat voivat myös aiheuttaa sähkökatkoja laukaisemalla liian herkiksi viritettyjä verkon suojusteja. Myös verkkoon kytketyt generaattorit saattavat vaurioitua.

Sähköverkkojen olemassaolon aikana ei ole tapahtunut kovin montaa laajaa vahinkoa aiheuttanutta geomagneettista myrskyä. Yksi parhaiten tunnetuista myrskyistä on vuoden 1989 myrsky, joka muun muassa kaatoi Quebecin sähköverkon. Kyseinen myrsky aiheutti vakavia ongelmia etenkin Pohjois-Amerikassa, mutta näistä pystyttiin toipumaan ennen kuin mitään katastrofaalista ehti tapahtua. Vuonna 2003 tapahtui heikompi, mutta silti monessa eri valtiossa ongelmia aiheuttanut geomagneettinen myrsky.

Useat sähköverkkoyhtiöt, sekä esimerkiksi myös Euroopan unioni ja Ilmatieteenlaitos, ovat tutkineet geomagneettisten myrskyjen vaikutuksia sähköverkkoihin useissa eri projekteissa. Tutkimuksissa on todettu, että todennäköisyys suurelle geomagneettisen myrskyn aiheuttamalle katastrofille lähitulevaisuudessa on matala, mutta mahdollisuus on silti olemassa. EURISGIC-projektissa arvioitiin, että GI-virrat aiheuttavat sähkökatkoja noin kerran vuodessa ja laajaa vahinkoa aiheuttavia myrskyjä arvioidaan tapahtuvan noin kerran sadassa vuodessa.

Sähköverkkojen suojaamiseen GI-virroilta on kehitetty erinäisiä keinoja. Sähköverkkoyhtiöt voisivat hankkia varastoihinsa varamuuntajia, jolloin hajonneet muuntajat voitaisiin korvata suhteellisen lyhyellä aikataululla. Suuret muuntajat ovat kuitenkin todella kalliita, joten niiden varastoiminen voimakkaan geomagneettisen myrskyn varalle, joita esiintyy hyvin harvoin, ei ole kovin kannattavaa. Muuntajan suojausta voidaan parantaa korvaamalla yleisesti käytössä olevia viisipylväisiä muuntajia kolmipylväisillä. Kolmipylväiset muuntajat ovat kuitenkin hankalampia toteuttaa. Lämpövaurioita voidaan pyrkiä estämään parantamalla muuntajien jäähdytystä ja tekemällä tiettyjä rinnakkaiskytkentöjä. GI-virtojen kulkemista muuntajien kautta voidaan pyrkiä estämään maadoitusjohtimiin lisättävien käämien avulla. GI-virtojen kulkeutumista verkossa voidaan pyrkiä estämään myös sarjaan kytkettyjen kondensaattoreiden avulla, mutta nämä ovat usein kalliita ja vaikeasti toteutettavissa. Loistehon kulutuksen kasvua voitaisiin pyrkiä kompensoimaan kasvattamalla loistehoreservejä, joka voi kuitenkin olla kallista.

LÄHTEET

- [1] Geomagneettiset myrskyt, Ilmatieteenlaitos [Viitattu: 10.3.2019]. Saatavissa: <https://ilmatieteenlaitos.fi> > Teematietoa > Avaruus ja magneettikenttä > Avaruussään vaikutuksia > Avaruussään häiriöiden luokittelu > Geomagneettiset myrskyt.
- [2] P. Stauning, Power grid disturbances and polar cap index during geomagnetic storms, Journal of Space Weather and Space Climate, Vol.3, 2013, A22. Saatavissa: <https://search-proquest-com.libproxy.tuni.fi/docview/1762692187/fulltextPDF/53D427778DBD463EPQ/1?accountid=14242>
- [3] Roihut ja massapurkaukset, Ilmatieteenlaitos [Viitattu 10.3.2019]. Saatavissa: <https://ilmatieteenlaitos.fi> > Teematietoa > Avaruus ja magneettikenttä > Aurinko > Roihut ja massapurkaukset.
- [4] Ionosfääri, Ilmatieteenlaitos [Viitattu 15.3.2019]. Saatavissa: <https://ilmatieteenlaitos.fi> > Teematietoa > Avaruus ja magneettikenttä > Maan magneettikenttä > Ionosfääri.
- [5] Suomen kansallinen riskiarvio 2015, Sisäministeriön julkaisu 3/2016, 2016, s. 37–39. Saatavissa: http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/64948/Kansallinen_riski_arvio_2015_fi_FINAL_4.pdf
- [6] R. Lovett, What If the Biggest Solar Storm on Record Happened Today, National Geography, 4.3.2011 [Viitattu 28.3.2019]. Saatavissa: <https://news.nationalgeographic.com/news/2011/03/110302-solar-flares-sun-storms-earth-danger-carrington-event-science/>
- [7] Maanpäälliset sähkövirrat, Ilmatieteenlaitos [Viitattu 17.3.2019]. Saatavissa: <https://ilmatieteenlaitos.fi> > Teematietoa > Avaruus ja magneettikenttä > Avaruussään vaikutuksia > Maanpäälliset sähkövirrat.
- [8] I. Zois, Solar activity and transformer failures in the Greek national electric grid, Journal of Space Weather and Space Climate, Vol.3, 2013, A32. Saatavissa: <https://search-proquest-com.libproxy.tuni.fi/docview/1762692429?pq-origsite=summon>
- [9] Maanpäälliset sähkövirrat, Ilmatieteenlaitos [Viitattu 18.3.2019]. Saatavissa: <https://ilmatieteenlaitos.fi> > Teematietoa > Avaruus ja magneettikenttä > Avaruussään vaikutuksia > Maanpäälliset sähkövirrat.
- [10] File: GIC generation.jpg, Wikimedia Commons, 17.12.2007 [Viitattu 27.4.2019]. Saatavissa: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:GIC_generation.jpg
- [11] March 13, 1989 Geomagnetic Disturbance, North American Electric Reliability Corporation, 1990, pp.36–60. Saatavissa: https://www.nerc.com/pa/Stand/Geomagnetic%20Disturbance%20Resources%20DL/NERC_1989-Quebec-Disturbance_Report.pdf

- [12] Final Report Summary – EURISGIC (European Risk from Geomagnetically Induced Currents), Cordis, 8.12.2014. Saatavissa: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/97914/reporting/en>
- [13] Risk Map, EURISGIC: European Risk from Geomagnetically Induced Currents [Viitattu 3.5.2019]. Saatavissa: <http://www.eurisgic.eu/> > Risk Map > Web Application
- [14] M. Lahtinen, J. Elovaara, GIC occurrence and GIC test for 400 kV system transformer, IEEE Transactions on Power Delivery Vol.17, Issue 2, Apr 2002, pp.555–561. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/997938>
- [15] A. Hussein, Novel Solutions to suppress adverse effects of geomagnetically induced current (GIC) on power systems, The University of Memphis, ProQuest Dissertations Publishing, Dec 2016. Saatavissa: <https://search-proquest-com.libproxy.tuni.fi/docview/1884789767?pq-origsite=summon>
- [16] A. Rezaei-Zare, L. Marti, A. Narang, A. Yan, Analysis of Three-Phase Transformer Response due to GIC Using an Advanced Duality-Based Model, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.31, Issue 5, 17.12.2015, pp. 2342–2350. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/7355396>
- [17] J. Kappenman, Geomagnetic Storms and Their Impacts on the U.S. Power Grid, Metatech Corporation, Meta-R-319, Jan 2010, 119 p. Saatavissa: https://www.ferc.gov/industries/electric/indus-act/reliability/cybersecurity/ferc_meta-r-319.pdf
- [18] S. Odenwald, The Day the Sun Brought Darkness, NASA:n verkkosivut, 13.3.2009 [Viitattu 21.4.2019]. Saatavissa: https://www.nasa.gov/topics/earth/features/sun_darkness.html
- [19] A.V. Schirochkov, L.N. Makarov, V.D. Nikolaeva, A.L.Kotikov, The storm of March 1989 revisited: A fresh look at the event, Advances in Space Research, Vol.55, Issue 1, 1.1.2015, pp.211–219. Saatavissa: <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0273117714005742>
- [20] D.H. Boteler, R.J. Pirjola, H. Nevanlinna, The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the Earth's surface, Advances in Space Research Vol.22, Issue 1, 1998, pp.17–27. Saatavissa: <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S027311779701096X>
- [21] M. Wilk et al. Space weather events in July 1982 and October 2003 and the effects of geomagnetically induced currents on Swedish technical system, Annales Geophysicae, 2009, pp.1775–1787. Saatavissa: <https://www.ann-geophys.net/27/1775/2009/angeo-27-1775-2009.pdf>
- [22] Halloween Storms of 2003 Still the Scariest, NASA:n verkkosivut, 27.10.2008 [Viitattu 28.4.2019]. Saatavissa: https://www.nasa.gov/topics/solarsystem/features/halloween_storms.html
- [23] Welcome to the EURISGIC project website, EURISGIC: European Risk from Geomagnetically Induced Currents [Viitattu 29.4.2019]. Saatavissa: <http://www.eurisgic.eu/>

- [24] S. Lu, Y. Liu, FEM analysis of DC saturation to assess transformer susceptibility to geomagnetically induced currents, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, Issue 3, Jul 1993, pp.1367–1376. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/252663>
- [25] ABB engineering protects power plant from solar storms, ABB [Viitattu 19.5.2019]. Saatavissa: <http://www.abb.com/cawp/seitp202/c99eb3b89c85b7b2c12571c6004579aa.aspx>
- [26] E. Arajärvi, R. Pirjola, A. Viljanen, Effects of neutral point reactors and series capacitors on geomagnetically induced currents in a high-voltage electric power transmission system, Space Weather, Vol. 9, Issue 11, S11005, 23.11.2011. Saatavissa: <https://search-proquest-com.libproxy.tuni.fi/docview/911023444?pg-origsite=summon>
- [27] A. Viljanen, R. Pirjola, M. Wik, DC description of power grids EURISGIC technical note Deliverable item D1.1, EURISGIC: European Risk from Geomagnetically Induced Currents, 18.1.2012. Saatavissa: <http://www.eurisgic.eu/> > Project > WP1: Power Grid Model > Technical note on the European power grid model: PDF
- [28] P. Brink, Kantaverkko kestää useimmat sääilmiöt, Fingrid Oyj:n lehti, 3/2016, s.22–23. Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/asiakaslehdet/asiakaslehti-3_2016.pdf
- [29] In March 1989, Québec experienced a blackout caused by a solar storm, Hydro-Québec. Saatavissa: <http://www.hydroquebec.com/learning/notions-de-base/tempete-mars-1989.html>