



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JOONAS KOSKI
SARJAKONDENSAATTORIEN LUOTETTAVUUS JA KUNNON-
HALLINTA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Pertti Järven-
tausta
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 12. elokuuta
2015

TIIVISTELMÄ

JOONAS KOSKI: Sarjakondensaattorien luotettavuus ja kunnonhallinta

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 65 sivua, 15 liitesivua

Marraskuu 2015

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Sähköverkot ja -markkinat

Tarkastaja: professori Pertti Järventausta

Avainsanat: RCM, sarjakondensaattori, sarjakompensointi, kunnossapito, kunnonhallinta, sähkömarkkinamalli

Sarjakondensaattorien tehtävänä on parantaa sähköverkon transientti- ja jännitestabiiliutta, vähentää häviösähkökustannuksia sekä optimoida tehonjakoa. Fingridin sarjakondensaattorien luotettavuus on ollut historiallisesti tarkasteltuna huono, mutta epäkäytettävyysajat ovat olleet lyhyitä. Diplomityön tarkoituksena on löytää syyt huonolle luotettavuudelle ja esittää ehdotuksia luotettavuuden parantamiseksi. Diplomityö on osa Fingrid Oyj:n strategista hanketta: Rajasiirtoyhteyksien luotettavuuden parantaminen.

Diplomityön teoreettisessa osassa esitellään sarjakompensoinnin taustaa ja sarjakondensaattorin rakennetta sekä kunnonhallinnan teoriaa. Tulososiossa esitellään sarjakondensaattorien vikatilastot, vioista aiheutuvat haitat ja RCM-analyysin tulokset. Tulososiossa käsitellään myös sarjakondensaattorien elinkaarta sekä kipinävälistä luopumista.

Työn johtopäätös oli, että suurin osa sarjakondensaattorien vioista johtuu suojaus- ja ohjausjärjestelmästä. Suojaus- ja ohjausjärjestelmän viat ovat aiheutuneet pääsääntöisesti signaalinsiirto- ja teholähdevioista sekä tuntemattomista syistä. Sarjakondensaattorien vikojen aiheuttamia vastaostokustannuksia työssä arvioitiin markkinasimulointiin pohjautuvalla menetelmällä, jonka perusteella ohituksella on merkittävä vaikutus siirtokykyyn, mutta ennustettujen siirtotarpeiden valossa vastaostojen aiheutumisen todennäköisyys on melko pieni. Arvioinnissa käytetty menetelmä osoittautui kehityskelpoiseksi. Saatujen tulosten perusteella Fingrid tulee panostamaan viankorjausvalmiuden kehittämiseen. Lisäksi suojaus- ja ohjausjärjestelmän FAT- ja SAT-testausta sekä tyyppihyväksyntämenetelyä tullaan kehittämään.

ABSTRACT

JOONAS KOSKI: Series Capacitors: Reliability and Maintenance Management
Master of Science Thesis, 65 pages, 15 Appendix pages
November 2015
Master's Degree Programme in Electrical Engineering
Major: Power Systems and Market
Examiner: Professor Pertti Järventausta

Keywords: RCM, series capacitor, series compensation, maintenance, maintenance management, power market model

Series capacitors are used to improve dynamic system stability, to reduce the cost of energy losses, and to optimize the load sharing of a power system. In a historical perspective, Fingrid's series capacitors have been unreliable, but the unavailability times have been short. The purpose of this thesis is to determine the causes for the unreliability of the series capacitors, and to propose reliability improvements. The thesis is a part of Fingrid's strategic project: Improving the reliability of cross-border connections.

The theoretical section of the thesis deals with the background of series compensation, the physical structure of series capacitors, and the theory of maintenance management. The result section introduces fault statistics, the effects of the capacitor faults, and results of the RCM-analysis. The result section also deals with the life cycle of series capacitors, as well as phasing out the use of spark gaps.

The conclusion of the thesis is that the main cause of the faults is the control and protection system. The control and protection system faults are mainly caused by signal transmission faults, laser power supply faults, and unknown reasons. The counter trade caused by a series capacitor fault was estimated by a power market simulation model based method. According to the simulation results, the series capacitor faults have a relatively big impact on transmission capability. However the probability of counter purchases caused by the fault is still quite low. The power market model based method proved to have a lot of potential for development. Based on the results of the thesis, Fingrid will focus on improving fast fault correction. Furthermore, the FAT- and the SAT-testing protocols of the control and protection system, as well as the type approval procedure, will be improved.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Fingrid Oyj:lle verkkojärjestelmät -yksikköön. Työn ohjaajana toimi DI Kimmo Nepola Fingrid Oyj:stä ja tarkastajana professori Pertti Järventausta Tampereen teknillisestä yliopistosta. Haluan kiittää heitä ohjauksesta ja kiinnostuksesta työtä kohtaan.

Diplomityöhön liittyvien tausta-analyysien toteuttamisesta haluan kiittää DI Ilkka Luukosta, TkT Marcin Pohjanpaloa sekä DI Risto Kuusta. Ilman heidän panostaan työtä ei olisi pystytty toteuttamaan nykyisessä laajuudessaan. Lisäksi haluan kiittää kaikkia työn kommentointiin osallistuneita arvokkaista neuvoista.

Iso kiitos kuuluu myös kaikille läheisilleni, jotka ovat tukeneet ja kannustaneet minua koko opiskeluaikani.

Helsingissä 16.10.2015

Joonas Koski

SISÄLLYSLUETTELO

| | | |
|-------|---|----|
| 1. | JOHDANTO | 1 |
| 1.1 | Tutkimuksen tausta | 1 |
| 1.2 | Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset..... | 2 |
| 1.3 | Diplomityön rakenne..... | 2 |
| 2. | SARJAKOMPENSOINTI | 4 |
| 2.1 | Tehokulmayhtälö siirto johdoilla | 4 |
| 2.2 | Siirto johdon loistehotase | 5 |
| 2.3 | Vaikutus transienttistabiiliuteen..... | 7 |
| 2.4 | Vaikutus jännitestabiiliuteen | 9 |
| 2.5 | Vaikutus siirtokapasiteettiin..... | 10 |
| 2.6 | Fingridin sarjakondensaattorit..... | 13 |
| 3. | SARJAKONDENSAATTORIN KOMPONENTIT | 15 |
| 3.1 | Kondensaattorit | 15 |
| 3.2 | Varistorit..... | 16 |
| 3.3 | Kipinäväli | 17 |
| 3.4 | Vaimennuspiiri | 18 |
| 3.5 | Virtamuuntajat..... | 19 |
| 3.6 | Ohituskatkaisija..... | 20 |
| 3.7 | Erottimet..... | 20 |
| 3.8 | Suojaus- ja ohjauksjärjestelmä..... | 20 |
| 3.9 | Kommunikaatio ja tehonsyöttö | 22 |
| 4. | KUNNONHALLINTA | 23 |
| 4.1 | Yleistä..... | 23 |
| 4.2 | Fingridin kunnonhallinnan toimintamalli..... | 23 |
| 4.3 | Kunnossapitolajit..... | 24 |
| 4.4 | Vikaantumiskäyrät | 25 |
| 4.5 | Vikaantumisprosessi..... | 26 |
| 4.6 | Kunnossapidon tehokkuus..... | 28 |
| 5. | RCM - LUOTETTAVUUSKESKEINEN KUNNOSSAPITO..... | 30 |
| 5.1 | Taustaa | 30 |
| 5.2 | RCM-analyysin laatiminen | 30 |
| 5.2.1 | Järjestelmän ja osajärjestelmien määrittely..... | 31 |
| 5.2.2 | Toimintojen ja toimintojen vikaantumisen määrittely | 32 |
| 5.2.3 | Vikamuotojen määrittely..... | 32 |
| 5.2.4 | Vikojen vaikutusten arviointi..... | 33 |
| 5.2.5 | Kunnossapitotehtävien valinta | 33 |
| 5.3 | Vikapuuanalyysi..... | 33 |
| 6. | TUTKIMUKSEN LÄHTÖAINEISTO..... | 35 |
| 6.1 | Laitteiden tiedot ja vikailmoitukset Elnetissä | 35 |
| 6.2 | Sarjakondensaattorien kunnossapitokustannukset | 36 |

| | | |
|-----|---|----|
| 6.3 | Verkkovaikutuksista aiheutuvat vastaostotarpeet | 37 |
| 6.4 | Sarjakondensaattorien komponentit ja huolto-ohjelmat..... | 39 |
| 7. | TUTKIMUKSEN TULOKSET | 40 |
| 7.1 | RCM-analyysi | 40 |
| 7.2 | Vikatilastot | 42 |
| 7.3 | Vikapuuanalyysi..... | 46 |
| 7.4 | Kipinävälistä luopuminen | 47 |
| 7.5 | Sarjakondensaattorien elinkaari ja perusparannukset | 49 |
| 7.6 | Siirtokykyanalyysi..... | 50 |
| 7.7 | Vastaostotarpeet | 52 |
| 7.8 | Kunnossapidon kustannukset | 60 |
| 8. | JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET | 62 |
| 9. | YHTEENVETO | 65 |
| | LÄHTEET..... | 66 |

LIITE A: FINGRID OYJ:N VOIMANSIIRTOVERKKO

LIITE B: KONDENSAATTORIYKSIKÖIDEN VIKATAAJUUDET SARJAKONDENSAATTOREISSA JA RINNAKKAISKONDENSAATTOREISSA

LIITE C: VIKAPUUANALYYSI

LIITE D: VASTAOSTOTARPEIDEN MÄÄRITTELYSSÄ KÄYTETYT SIIRTOKAPASITEETIN TUONTI- JA VIENTIRAJOITUKSET

LIITE E: RCM-ANALYYSI

LYHENTEET JA MERKINNÄT

LYHENTEET

| | |
|---------|---|
| BID3 | Pöyryn toteuttama sähkömarkkinamalli |
| CIGRÉ | ransk. Conseil International des Grands Réseaux Électriques, kansainvälinen suurjännitesektorin järjestö |
| Elvis | Fingridille räätälöity omaisuudenhallinnan tietojärjestelmä (Elnetin korvaaja) |
| Elnet | Fingridille räätälöity omaisuudenhallinnan tietojärjestelmä |
| ENTSO-E | engl. European Network of Transmission System Operators for Electricity, Eurooppalaisten kantaverkko-organisaatioiden yhteistyöelin |
| FAT | engl. Factory Acceptance Test, tehdastestaus |
| FMEA | engl. Failure Modes and Effects Analysis, vika- ja vaikutusanalyysi |
| GWS | engl. Gateway Station, yhdyskäytäväasema |
| IEEE | engl. Institute of Electrical and Electronics Engineers, kansainvälinen tekniikan alan järjestö |
| ITOMS | engl. International Transmission Operations & Maintenance Study, kantaverkkoyhtiöiden kunnossapidon vertailu |
| MTBF | engl. Mean Time Between Failures, keskimääräinen aika laitteen vikaantumiseen sen edellisestä korjaamisesta |
| MTTF | engl. Mean Time to Failure, kestoikä |
| MTTR | engl. Mean Time to Recovery, toipumisaika |
| MOV | engl. Metal Oxide Varistor, metallioksidivaristori |
| OWS | engl. Operator Work Station, paikalliskäytön työasema |
| NC | Nokian Capacitors (nyk. Alstom Grid) |
| PAS 55 | omaisuuden hallinnan sertifikaatti |
| PSS/E | yleisesti käytössä oleva verkostolaskentasovellus |
| pu | engl. per-unit, suhteellisarvo |
| RCM | engl. Reliability-centered Maintenance, luotettavuuskeskeinen kunnossapito |
| RTDS | engl. Real Time Digital Simulator, reaaliaiksimulaattori |
| SAT | engl. Site Acceptance Test, käyttöönottotestaus |
| SC | engl. Series Capacitor, sarjakondensaattori |
| SIL | engl. Surge impedance loading, luonnollinen teho |
| SSR | engl. subsynchronous resonance, aliharmoninen resonanssi |
| SVC | engl. Static VAR Compencator, tyristoriohjattu kompensattori |
| TRV | engl. Transient Recovery Voltage, palaava transienttijännite |
| UAL | United Airlines |

FINGRIDIN KÄYTTÄMÄT SÄHKÖASEMALYHENTEET

| | |
|----|-------------|
| AJ | Alajärvi |
| AP | Alapitkä |
| HS | Hirvisuo |
| JY | Jylkkä |
| KI | Keminmaa |
| PI | Pirttikoski |
| PR | Pikkarala |

| | |
|----|--------------|
| PS | Pyhänselkä |
| PT | Petäjäskoski |
| SB | Svartbyn |
| VJ | Vuolijoki |

MERKINNÄT

| | |
|-----------|--------------------------|
| C | kapasitanssi |
| I | virta |
| I_n | nimellinen virta |
| k | kompensointiaste |
| P | pätöteho |
| P_m | mekaaninen teho |
| Q | loisteho |
| Q_n | nimellinen loisteho |
| S | näennäisteho |
| U_1 | johdon alkupään jännite |
| U_2 | johdon loppupään jännite |
| U_n | nimellinen jännite |
| X | reaktanssi |
| X_n | nimellinen reaktanssi |
| Z_c | johdon aaltoimpedanssi |
| B | suskeptanssi |
| δ | kulmaero |
| λ | vikaantumistaajuus |

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Suomen kantaverkon käytöstä, ylläpidosta ja kehittämisestä vastaava Fingrid Oyj (myöhemmin Fingrid) omistaa yhdeksän sarjakondensaattoria, joilla parannetaan kantaverkon siirtokykyä ja käyttövarmuutta sekä pienennetään häviösähkökustannuksia. Fingridin yhtenä strategisena hankkeena on vuodesta 2013 saakka ollut rajasiirtoyhteyksien luotettavuuden parantaminen [1], joka asettaa lisävaatimuksia myös sarjakondensaattorien luotettavuudelle. Historiallisesti tarkasteltuna Fingridin omistamien sarjakondensaattorien käytettävyyttä on ollut hyvä, mutta luotettavuus heikko. Toisin sanoen sarjakondensaattoreissa on ilmennyt paljon vikoja, joiden korjausajat ovat kuitenkin pysyneet lyhyinä. Ilmenevistä vioista aiheutuu suoria ja epäsuoria kustannuksia Fingridille sekä yhteiskunnalle, joten luotettavuuden tutkiminen on taloudellisesti perusteltua.

Fingrid hankki ensimmäiset sarjakondensaattorinsa vuonna 1997, josta lähtien hankinta- ja kunnonhallintakäytäntöjä on kehitetty. Sarjakondensaattorien nykyinen kunnossapitomalli on suurilta osin peräisin vuodelta 2005, jolloin kunnossapidon järjestelmänäkökulmaa alettiin painottamaan. Erikoisjärjestelmät, kuten sarjakondensaattorit ja tasasähkölinkit ovat verkon siirtokyvyn kannalta tärkeitä järjestelmiä, joiden vikaantumisista aiheutuu merkittäviä suoria ja epäsuoria kustannuksia. Vikojen aiheuttamat suorat kustannukset koostuvat viankorjauksen kustannuksista ja epäsuorat kustannukset esimerkiksi siirtokapasiteetin laskun aiheuttamista vastaostokustannuksista. Vikojen ennaltaehkäisy ja korjaamisen haasteena on järjestelmien vähäinen määrä, joten myös kunnossapidon suunnitteluun tarvittavan vikadatan määrä on suhteellisen vähäinen verrattuna tavanomaisiin sähköasemalaitteisiin. Erikoisjärjestelmissä käytetyt tekniset ratkaisut eroavat tavanomaisista siirtoverkon ratkaisuista, joten varaosien ja osaamisen saatavuus voivat aiheuttaa haasteita kunnossapidolle pitkän elinkaaren aikana.

Monimutkaisten teknisten järjestelmien ja laitteiden kunnossapitoa voidaan analysoida esimerkiksi luotettavuuskeskeisen kunnossapidon periaatteiden mukaisesti. Luotettavuuskeskeinen kunnossapito, RCM (Reliability Centered Maintenance), kehitettiin alun perin 1970-luvulla vastaamaan lentokoneeteollisuuden muuttuneisiin kunnossapitotarpeisiin. Sitten RCM-periaatteita on sovellettu laajalti eri tekniikan alueilla, kuten ydinvoimaloissa ja sotateollisuudessa [2]. RCM-viitekehyksen soveltamista sähköverkkoihin on tutkinut esimerkiksi Lina Bertling väitöstutkimuksessaan vuonna 2002 sekä Pasi Yli-Salomäki lisensiaatintyössään niin ikään vuonna 2002 [3] [4]. Yksinkertaisuudessaan RCM pyrkii minimoimaan vikojen vaikutukset, ei vikojen lukumäärää. Myös Fingrid on

suorittanut RCM-analyysejä kunnossapidon tehostamiseksi [5]. Tämä diplomityö syven-
tää ja päivittää Fingridin sarjakondensaattorien huolto-ohjelman kehittämiseksi vuonna
2005 laadittua RCM-analyysiä.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset

Tämän diplomityön ylätasoinen tavoitteena on kehittää järjestelmälähtöisyyttä painottavaa,
analyttistä kunnonhallinnan viitekehystä Fingridin erikoisjärjestelmien hankintojen ja
kunnonhallinnan suunnitteluun. Tavoitteen saavuttamiseksi tutkitaan millainen sarjakon-
densaattorien luotettavuus on ollut ja millaisilla toimenpiteillä mahdollisiin ongelmakoh-
tiin tulisi puuttua. Tutkimus koostuu Fingridin omistamien sarjakondensaattorien kun-
nossapidon vaikutusten arvioinnista sekä kustannustehokkuuden tarkastelusta. Diplomi-
työssä päivitetään sarjakondensaattoreille vuonna 2005 suoritettu RCM-analyysi, sekä
selvitetään vikapuuanalyysin soveltuvuutta sarjakondensaattorien vikaantumisen analy-
sointiin. RCM-analyysin pohjalta sarjakondensaattorien vikaantumista tarkastellaan kva-
litatiivisesti ja kvantitatiivisesti. Kustannustarkastelussa selvitetään vikojen aiheuttamien
suorien ja epäsuorien kustannusten sekä ehkäisevän kunnossapidon kustannusten suu-
rusluokat. Verkkovaikutuksista aiheutuvien kustannusten arviointi pohjautuu Fingridin
asiantuntijoiden tekemiin siirtokyky- ja siirtotarveanalyysiin. Työssä siirtokyky- ja siir-
totarveanalyysien pohjalta laaditaan arvio sarjakondensaattorien ohitusten aiheuttamista
vastaostotarpeista. Diplomityön tavoitteita tarkentavat seuraavat tutkimuskysymykset:

- Mistä ongelmat ovat aiheutuneet?
- Mitä ongelmille olisi tehtävissä?
- Mitä tulisi ottaa huomioon jo hankintavaiheessa?
- Miten, milloin ja mille ennakoivaa kunnossapitoa kannattaisi tehdä?
- Mikä on ollut kunnossapidon tehokkuus tähän asti?
- Miten kunnossapitoa voisi tehostaa?
- Miten hyödyt ja kustannukset muodostuvat?
- Missä vaiheessa elinkaarta ollaan?
- Milloin mahdollinen perusparannus kannattaa tehdä?
- Lisääkö kipinävälistä luopuminen luotettavuutta?

1.3 Diplomityön rakenne

Luvussa 2 esitellään sarjakompensoinnin sähköteknistä teoriaa ja matemaattista mallin-
nusta sekä sarjakompensoinnin vaikutusta siirtoverkkoon. Luvun tarkoituksena on selvit-
tää lukijalle, miksi sarjakompensointia käytetään.

Luvussa 3 paneudutaan sarjakondensaattorin fyysiseen toteutukseen. Luvussa esitellään
yleisellä tasolla kaikki sarjakondensaattorin pääkomponentit ja niiden tehtävät.

Luvuissa 4 ja 5 käsitellään kunnonhallinnan määritelmiä ja soveltamista. Luvussa 4 esittelee Fingridin kunnonhallinnan toimintamalli sekä yleistä kunnonhallinnan teoriaa. Luvussa 5 esitellään luotettavuuskeskeistä kunnossapitoa, joka on kunnossapidon suunnitteluun käytetty viitekehys.

Luvussa 6 esitellään tutkimuksen lähtöaineisto ja lähtöoletukset. Luvussa 7 esitellään tutkimuksen tulokset. Tulokset sisältävät tietoa sarjakondensaattorien vikaantumisesta, vikaantumisen vaikutuksista sekä vikaantumista ehkäisevistä toimenpiteistä. Luvussa 8 esitetään tutkimuksen tulosten pohjalta laaditut johtopäätökset.

2. SARJAKOMPENSOINTI

Sarjakompensointi on järjestelmä, jonka tarkoituksena on kumota osa siirtojohdon reaktanssia. Sarjakompensointi toteutetaan kytkemällä sarjakondensaattori siirtojohdon kanssa sarjaan, jolloin pienentyneen reaktanssin ansiosta transientti- ja jännitestabiilius paranevat sekä verkon siirtokapasiteetti lisääntyy. Sarjakompensoinnin seurauksena kuormittuneen siirtojohdon tarve ottaa loistehoa verkosta pienenee. Lisäksi sarjakompensoinnin sijoittelulla voidaan vaikuttaa rinnakkaisten siirtojohtojen tehonjakoon.

2.1 Tehokulmayhtälö siirtojohdoilla

Sarjakompensoinnin verkkovaikutusten hahmottamiseksi on tunnettava siirtoverkossa tapahtuvan tehonsiirron perusteet. Siirtojohdon jännitetason kasvaessa johdon reaktanssi suhteessa resistanssiin kasvaa. Käytettäessä 400 kV:n jännitetasoa on reaktanssi noin kymmenen kertaa suurempi kuin resistanssi. Siirtojohdoilla tehonsiirtoon vaikuttaa johdon reaktanssin ja resistanssin lisäksi konduktanssi ja kapasitanssi. Lyhyillä, alle 100 km mittaisilla siirtojohdoilla laskentaa voidaan kuitenkin yksinkertaistaa ja kuvata johto pelkän reaktanssin avulla. Sarjakompensoinnin periaatteen havainnollistamiseksi on riittävä tarkastella lyhyen johdon yhtälöitä. [6]

Johdolla siirtyvän pätö- ja loistehon määrään vaikuttaa johdon impedanssi. Siirtojohdoilla impedanssi on pääosin reaktanssia, joten pätötehon siirtyminen vaatii johdon päiden välille jännitteen kulmaeron. Jos kulmaeroa ei ole ja jännitteiden itseisarvot eroavat toisistaan, siirtyy johdolla pelkkää loistehoa. Lyhyen siirtojohdon tapauksessa johdon alkupään näennäis-, pätö- ja loisteho voidaan esittää yhtälön 2.1 mukaisesti. [6]

$$\underline{S}_1 = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_1 \underline{I}^* = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta + j \left[\frac{U_1^2}{X} - \frac{U_1 U_2 \cos \delta}{X} \right] = P_1 + j Q_1, \quad (2.1)$$

jossa alaindeksi 1 viittaa johdon alkupäähän, alaindeksi 2 loppupäähän ja δ johdon päiden jännitteiden väliseen kulmaeroon. Vastaavalla tavalla voidaan esittää johdon loppupään tehot:

$$\underline{S}_2 = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_2 \underline{I}^* = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta + j \left[\frac{U_1 U_2 \cos \delta}{X} - \frac{U_2^2}{X} \right] = P_2 + j Q_2 \quad (2.2)$$

Johdon alku- ja loppupään tehojen yhtälöissä (2.1 ja 2.2) johdon impedanssi on mallinnettu puhtaana reaktanssina, joten johdon resistiiviset häviöt ovat nolla. Tämän seurauksena voidaan todeta johdolle tulevan pätötehon P_1 ja johdolta eteenpäin lähtevän pätötehon P_2 olevan yhtä suuret, jolloin johdolla siirtyvä pätöteho on yhtälöiden 2.1 ja 2.2 reaaliosan suuruinen. Saatua yhtälöä kutsutaan tehokulmayhtälöksi:

$$P_1 = P_2 = P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta \quad (2.3)$$

Johdon kuluttama loisteho saadaan yhtälöiden 2.1 ja 2.2 imaginääriosien erotuksesta:

$$Q = Q_1 - Q_2 = \frac{U_1^2}{X} + \frac{U_2^2}{X} - \frac{2U_1U_2\cos\delta}{X} \quad (2.4)$$

Sarjakompensoinnin toiminnan ymmärtämiseksi on oleellista tunnistaa pätötehon siirtoon vaikuttavat suureet. Kuten tehokulmayhtälössä 2.3 esitettiin, pätötehon siirtoon vaikuttaa johdon päiden välinen jännite, kulmaero sekä johdon reaktanssi. Sarjakompensointi perustuu johdon päiden välisen reaktanssin pienentämiseen, jolloin muiden yhtälön parametrien pysyessä muuttumattomina voidaan siirtää enemmän pätötehoa. Vaihtoehtoisesti sarjakompensoinnin avulla voidaan parantaa käyttövarmuutta. Sarjakompensoinnin ansiosta sama pätöteho pystytään siirtämään pienemmällä kulmaerolla, jolloin johdon transienttistabiilius paranee. Sarjakompensoinnin vaikutuksesta transientti- ja jännitestabiiliuteen on kerrottu tarkemmin luvuissa 2.3 ja 2.4. [6]

2.2 Siirto johdon loistehotase

Ampèren lain mukaisesti johtimessa kulkeva virta synnyttää johtimen ympärille virran suuruuteen verrannollisen magneettikentän. Symmetrisellä kuormalla kolmivaiheisessa vaihtosähköjärjestelmässä vaihekohtaisten virtojen summa pysyy vakiona, vaikka vaihekohtaisten virtojen arvot muuttuvat sinimuotoisesti. Koska johtimen ympärillä vaikuttava magneettikenttä on virtaan verrannollinen, muuttuu vaihekohtainen magneettikentän energia virran muutoksen mukaisesti. [7]

Johdon magneettikenttien energioiden summa on symmetrisellä kuormalla virran tapaan vakio, joten magneettikenttien energioiden on jakauduttava uudelleen vaiheiden välillä verkon taajuuden määrittämin väliajoin. Suurilla siirtojännitteillä uudelleen jakautuminen tapahtuu johdon maakapasitanssien kautta, mutta virran kasvaessa maakapasitanssien suuruus ei riitä uudelleenjakamaan magneettikenttien energioita. Tällöin loppuosa energiasta siirtyy vaiheelta toiselle verkon tähtipisteen kautta. Tähtipisteen kautta kulkevaa energiaa kutsutaan loistehoksi. Loisteho kuluttaa johdon siirtokapasiteettia ja magneettikenttien energioiden uudelleenjakaminen tähtipisteen kautta alentaa johdon jännitettä. [7]

Sarjakompensoidulla johdolla johdon kanssa sarjaan kytketty kondensaattori varastoi energiaa, jolloin magneettikentän tarvitsema energia saadaan tuotettua vaihekohtaisesti. Sarjakompensoinnilla siis pyritään minimoimaan johdolla kulkeva loisvirta, jolloin johdon siirtokapasiteetti vapautuu pätötehon siirtoon ja jänniteprofiili pysyy tasaisempana. Johdon loistehotase muodostuu johdon kuluttaman loistehon ja hajakapasitanssien tuottaman loistehon erotuksesta. Kun johdon tuottama ja kuluttama loisteho ovat tasapainossa, sanotaan johdon toimivan luonnollisella teholla (SIL, Surge Impedance Loading). Olettaen johdon molempien päiden jännitteiden itseisarvot yhtä suuriksi ja johto häviötömäksi voidaan luonnollinen teho laskea yhtälön 2.5 avulla.

$$SIL = \frac{U^2}{|Z_c|}, \quad (2.5)$$

jossa johdon aaltoimpedanssi Z_c voidaan esittää pelkän reaktanssin ja suskeptanssin avulla. [8]

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{x}{b}} \quad (2.6)$$

Sarjakompensoinnilla lisätään johdon loistehon tuotantoa, jolloin johdon luonnollinen teho kasvaa. Sarjakondensaattori tuottaa virran neliöön verrannollisen määrän kapasitiivista loistehoa, jolloin loistehon tuotanto muuttuu automaattisesti kuormitusilanteen vaihtuessa yhtälön 2.7 mukaisesti.

$$Q_{sc} = 3X_{sc}I^2, \quad (2.7)$$

jossa Q_{sc} sarjakondensaattorin tuottama loisteho
 X_{sc} sarjakondensaattorin reaktanssi = $1/\omega C$
 C sarjakondensaattorin kapasitanssi
 I sarjakondensaattorin läpi kulkeva virta

Sarjakompensoidun johdon reaktanssi saadaan määritettyä vähentämällä sarjakondensaattorin reaktanssi X_{sc} johdon reaktanssista X_L :

$$X = X_L - X_{sc} \quad (2.8)$$

Sijoittamalla saatu reaktanssi aiemmin esiteltyihin pätö- ja loistehon yhtälöihin (2.3 ja 2.4), voidaan arvioida johdon loistehotasetta. Loistehotaseen kannalta onkin tärkeää tiedostaa, että johdon kuluttama loisteho on riippuvainen reaktanssista ja pätötehon siirrosta. Johdon kapasitanssien tuottama loisteho taas on verrannollinen johdon jännitteeseen. [6]

Sarjakompensoinnin yhteydessä kompensointiaste on keskeinen käsite. Kompensointiaste k kuvaa sarjakondensaattorin reaktanssin X_{sc} ja johtoreaktanssin X_L suhdetta yhtälön 2.9 mukaisesti.

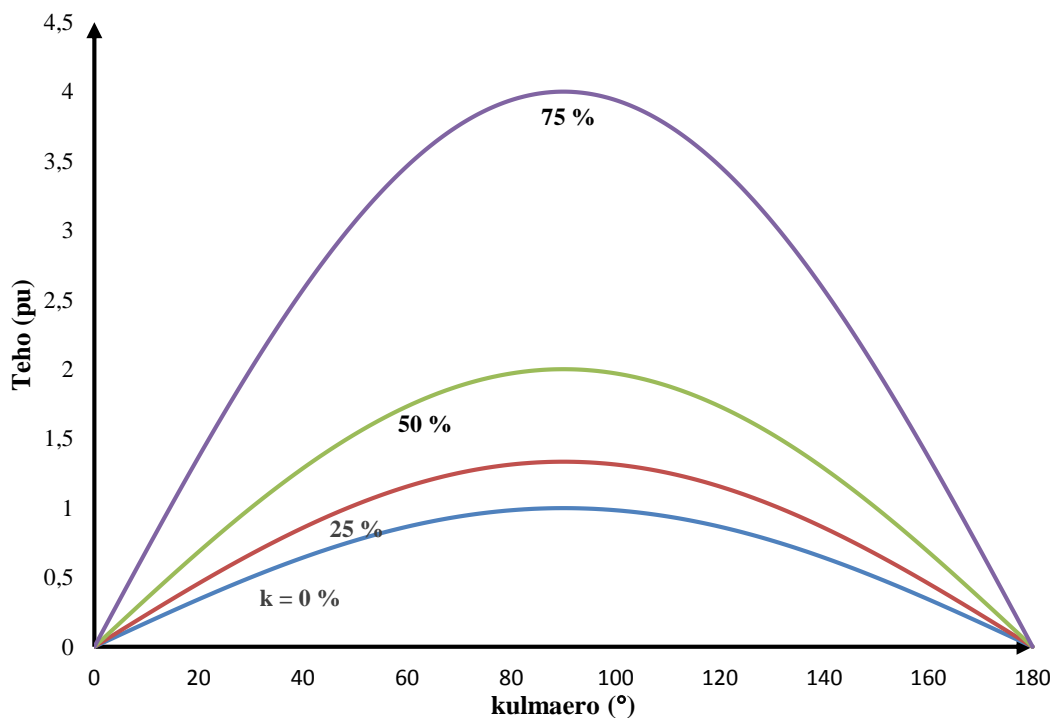
$$k = \frac{X_{sc}}{X_L} \quad (2.9)$$

Pitkillä siirto johdoilla kompensointiaste on yleisesti 30–75 %. Kompensointiasteen nostaminen lisää johdon stabiiliutta ja luonnollista tehoa, mutta käytännön syistä kompensointiasteen mielekäs yläraja on noin 80 %. Kompensointiasteen kasvaessa johdon sähköinen pituus lyhenee, jonka seurauksena myös vikavirrat kasvavat. Johdon keskelle sijoitettu sarjakondensaattori aiheuttaa jännitteen askelmaisen nousun, joka voi suurilla kompensointiasteilla aiheuttaa ylijänniteongelmia. Suurilla kompensointiasteilla ongel-

maksi voi muodostua myös aliharmoniset resonanssitaajuudet (SSR, subsynchronous resonance), joiden seurauksena sarjakondensaattori on sarjaresonanssissa verkkoreaktanssin kanssa. Sarjaresonanssista voi seurata värähtelyä läheisissä generaattoreissa, jonka seurauksena generaattoreiden akselit rasittuvat. Lisäksi johdon suuri kompensointiaste asettaa haasteita johtosuojauksen toteuttamiselle. [9]

2.3 Vaikutus transienttistabiiliuteen

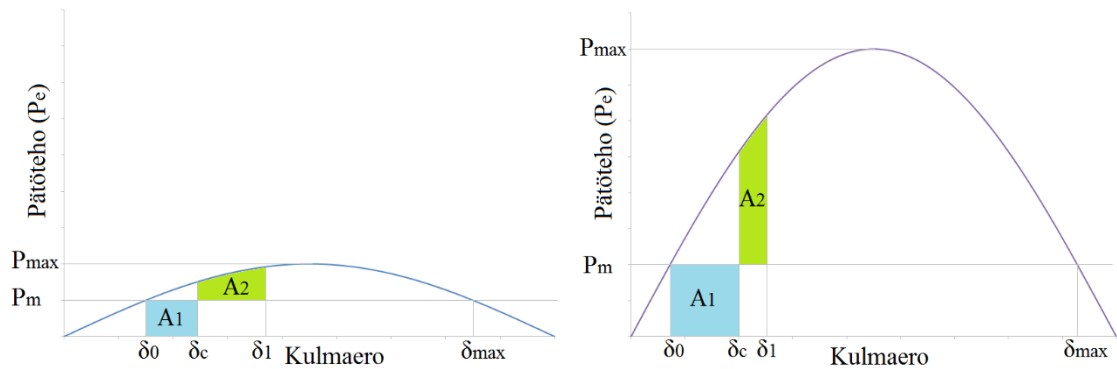
Sarjakompensointi parantaa verkon transienttistabiiliutta, eli verkon kyky säilyttää tahtikäyttö tehoheilahteluissa paranee. Sarjakompensoinnin ansiosta johdolla voidaan siirtää sama määrä tehoa pienemmällä kulmaerolla. Mikäli johdon päiden jännitteet oletetaan yhtä suuriksi, voidaan tehokulmayhtälöllä 2.3 yksinkertaisesti mallintaa kompensointiasteen vaikutus kulmaeron suuruuteen eri tehoilla. Kuvassa 2.1 on esitetty suhteellisarvoina sarjakompensoinnin vaikutus kulmaeroon tehonsiirrossa. Normaalisessa siirtotilanteessa kulmaero voi olla esimerkiksi 30° , jolloin kompensoimattomassa johdossa tehoa siirtyy 0,5 pu:ia ja kompensointiasteella 75 % tehoa siirtyy 2,0 pu:ia.



Kuva 2.1 Johdon pätöteho kulmaeron funktiona eri kompensointiasteilla.

Staattisessa tilanteessa kulmaeron stabiili alue on $0-90^\circ$. Käytännössä kulmaeron maksimiarvo on noin 30° . Staattisessa tilassa kulmaeron kasvu yli 90 asteen johtaa tahtikäytön menetykseen. Transienttistabiiliuden kannalta tilanne ei kuitenkaan ole näin yksinkertainen ja kulmaero voi hetkellisesti käydä yli 90° ilman tahtikäytön menetystä. [6]

Transienttistabiiliutta voidaan arvioida stabiiliuden pinta-alakriteerin avulla. Pinta-alakriteerin matemaattinen tausta löytyy heilahtelu-yhtälöstä, mutta matemaattisen taustan tunteminen ei ole välttämätöntä sarjakompensoinnin vaikutuksen hahmottamisessa. Pinta-alakriteeri perustuu johtoa syöttävän generaattorin mekaanisen tehon P_m ja sähkötehon P_e suhteeseen. Verkon toimiessa staattisessa tilassa $P_m = P_e$, eli generaattori pyörii vakionopeudella. Kuvassa 2.2 on esitetty stabiiliustarkastelussa käytettävät teho-kulmakäyrät kompensoimattomalle ja kompensoidulle johdolle.



Kuva 2.2 Stabiiliuden pinta-alakriteerin määrittämiseen tarvittavat teho-kulmakäyrät. Vasemmalla kompensoimattoman johdon teho-kulmakäyrä ja oikealla kompensoidun johdon teho-kulmakäyrä.

Kuvissa kulma δ_0 tarkoittaa kulmaeron arvoa vian alkaessa, jolloin generaattorin mekaaninen teho ja sähköinen teho ovat yhtä suuret. Vian aikana verkon ottama sähköteho on nollassa ja mekaaninen teho pysyy vakiona, jolloin kulmaero kasvaa ja generaattori alkaa kiihtymään. Vian vaikutusaika on kuvattu teho-kulmakäyriin alueella A_1 . Vian erotus verkosta tapahtuu kulmaeron δ_c (Clearing angle) kohdalla, jolloin sähköteho nousee tehokulmakäyrällä vastaamaan uutta kulmaeroa. Nyt sähköteho on mekaanista tehoa suurempi, joten generaattori alkaa hidastumaan. Kulmaero kuitenkin jatkaa kasvamistaan, kunnes hidastava pinta-ala A_2 on yhtä suuri kuin kiihdyttävä pinta-ala A_1 . Pinta-alojen ollessa yhtä suuret, generaattori on hidastunut tahtinopeuteen. Tahtinopeuden saavuttamisen jälkeen heilahtelut jatkuvat, mutta stabiilissa tilanteessa vaimenevat pois vähitellen. [6]

Stabiiliuden pinta-alakriteerin kannalta oleellinen kulmaero on δ_{max} . Kiihdyttävän ja hidastavan pinta-alan tulee olla tähän mennessä saavuttanut tasapainotilan tai sähköteho painuu alle mekaanisen tehon, jolloin järjestelmä alkaa kiihtymään ja generaattori putoaa tahdistasta. Tällöin järjestelmä on epästabiili. Sarjakompensoinnin merkitystä transienttistabiiliuteen voidaankin tarkastella tutkimalla kulmaerojen δ_c ja δ_{max} välimatkaa. Kuten aiemmin mainittiin, kompensoidulla johdolla saman tehon lisäyksen aikaansaamiseksi tarvitaan pienempi kulmaeron muutos. Kuvasta 2.2 huomataankin, että sarjakompensoinnilla saatu pienempi kulmaeron muutos antaa enemmän aikaa hidastaa generaattoria, jolloin transienttistabiilius paranee. Vastaavasti kompensoidulla johdolla voidaan siirtää enemmän tehoa, jos transienttistabiiliuden vaatimukset pidetään samana kuin kompensoimattomalla johdolla. [6]

2.4 Vaikutus jännitestabiiliuteen

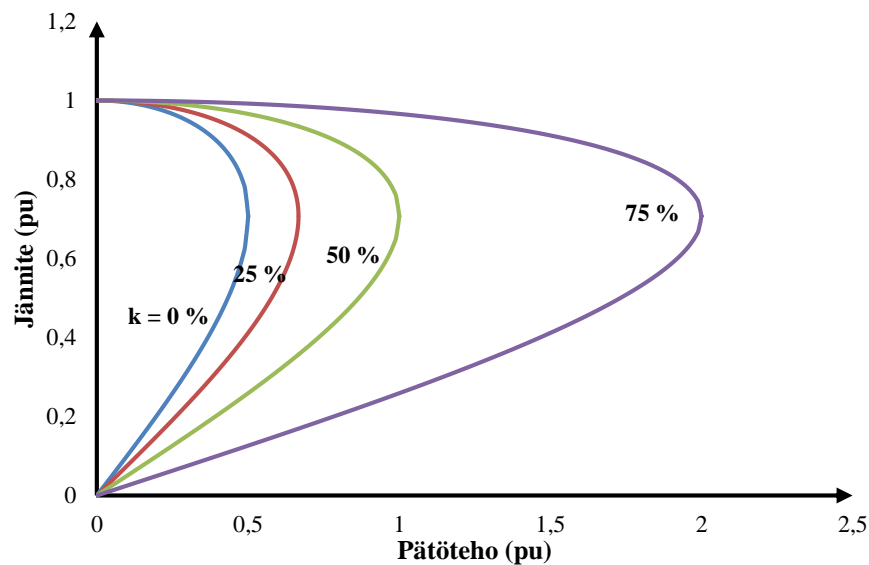
Jännitestabiilius määritellään IEEE:n ja CIGRÉ:n mukaan seuraavasti: *Voimajärjestelmän kyky ylläpitää vakaat jännitteet kaikissa solmuissa jatkuvassa tilassa ja häiriöiden jälkeen* [10]. Verkon jännite ja loistehotase vaikuttavat merkittävästi toisiinsa, joten loistehon kompensoinnilla voidaan vaikuttaa verkon jännitteisiin.

Kuten aiemmin mainittiin, johdon kuormituksen lisäys lisää myös johdon loistehon kuluusta. Loistehon kulutus taas laskee verkon jännitteitä, joten kompensoimattomassa verkossa siirto-tilanteella on suuri merkitys jännitteisiin. Sarjakompensoinnilla pystytään itsesäätyvän loistehotuotannon ansiosta hallitsemaan verkon jännitteiden muutoksia.

Sarjakompensoinnin vaikutusta siirtojohdon loppupään jännitteisiin voidaan havainnollistaa piirtämällä niin sanotut nenäkäyrät, jotka kuvaavat johdon loppupään jännitettä eri kompensointiasteilla. Häviöttömän johdon loppupään jännite u_2 saadaan ratkaistua suhteellisarvona yhtälön 2.10 avulla [6]:

$$u_2 = \sqrt{\frac{-(2xp \tan\phi - 1) \pm \sqrt{1 - 4xp \tan\phi - 4x^2 p^2}}{2}}, \quad (2.10)$$

jossa x on reaktanssi ja p on johdolla kulkeva teho. Tehokerroin $\tan\phi$ kuvaa kuorman loistehon suhdetta päteeseen (Q/P). Kompensoinnin vaikutusta jännitestabiiliuteen on yksinkertaisin kuvata käyttämällä täysin resistiivistä kuormaa. Olettaessa kuorma täysin resistiiviseksi, saadaan $\tan\phi$ nolllaksi. Muuttamalla reaktanssin arvoa vastaamaan eri kompensointiasteita, nähdään kompensointiasteen vaikutus johdon loppupään jännitteeseen tehon muuttuessa (Kuva 2.3).



Kuva 2.3 Johdon loppupään tehojännitekäyrät eri kompensointiasteilla, kun kuorma on puhdasta pätehoja ja johdon alkupään jännitteenä on 1 pu.

Kun johdolla ei ole riittävästi loistehon tuotantoa, jännite romahtaa tehon kasvaessa [11]. Tehojännitekäyriä tarkasteltaessa huomataan selkeästi johdon kompensointiasteen kasvattamisen parantavan jännitestabiiliutta.

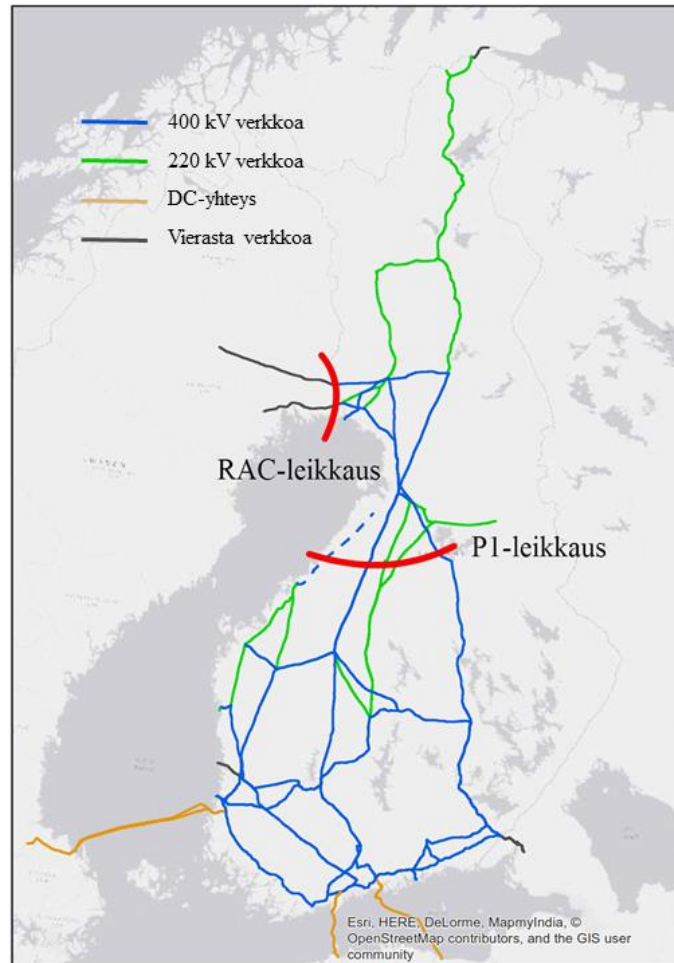
Dynaamisen jännitestabiiliuden parantaminen sarjakompensoinnilla liittyy vastaavaan ilmiöön. Esimerkiksi rinnakkaisen johdon irtoaminen verkosta vian seurauksena lisää kuormitusta äkillisesti muilla johdoilla. Tällöin loistehon kulutus pyrkii kasvamaan nopeasti ja jännitteet laskemaan. Sarjakompensoinnin loistehotuotanto mukautuu nopeasti muuttuneeseen kuormitustilanteeseen ja pystyy tukemaan jännitettä.

2.5 Vaikutus siirtokapasiteettiin

Siirtokapasiteetilla kuvataan verkon siirtokykyä eri pisteiden ja alueiden välillä. Kantaverkossa tapahtuvan siirron tarkastelussa luotettavuusnäkökulma korostuu, joten siirtokapasiteetti määritellään kompromissina siirtokyvyn ja käyttövarmuuden välillä. Yleisesti käyttövarmuuden määrittelyssä noudatetaan niin sanottua n-1-kriteeriä. Siirtokyvyn näkökulmasta tämä tarkoittaa siirtojen rajoittamista tasolle, jolla yksittäiset viat eivät aiheuta rengasverkossa keskeytystä tuotannolle tai kulutukselle. [11]

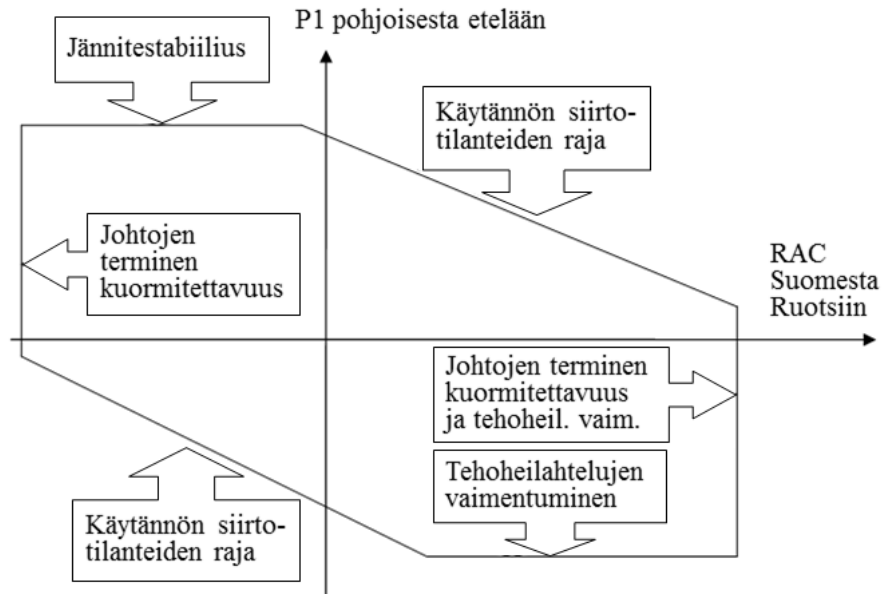
Verkon siirtokyky ei ole vakio. Siirtokykyyn vaikuttaa kuormitustilanne sekä voimalaitosten ajotilanne, joten siirtokapasiteetin määrittelemiseksi tarvitaan kulutus- ja tuotantoennusteisiin pohjautuvia simulointeja. Simuloinneilla määritetyt tekniset siirtokapasiteetit kuvaavat suurimpia mahdollisia siirtotehoja, joilla käyttövarmuudelle määrätty reunaehdot täyttyvät. Markkinoille tarjottavaa siirtokapasiteettia kutsutaan kaupalliseksi siirtokapasiteetiksi. Kaupallinen siirtokapasiteetti on teknistä siirtokapasiteettiä pienempi ja siinä on huomioitu varmuusmarginaalit sekä häiriöreservin vaatima siirtokapasiteetti. [11]

Kantaverkossa siirtokykyä tarkastellaan rinnakkaisten johtojen muodostamien leikkausten avulla. Sarjakompensoinnin kannalta kiinnostavimmat leikkaukset ovat Pohjois-Suomen ja Ruotsin välinen RAC-leikkaus sekä Keski- ja Pohjois-Suomen välinen P1-leikkaus (Kuva 2.4). RAC-leikkaus muodostuu kahdesta rinnakkaisesta 400 kV:n johdosta, jotka kulkevat Petäjäskoskelta Letsiin ja Keminmaalta Svartbyhyn. P1-leikkaukseen kuuluu kolme 400 kV:n ja kaksi 220 kV:n johtoa. 400 kV:n johdoista kaksi kulkevat Alajärveltä Pikkaralaan ja yksi Pyhänselältä Vuolijoelle. 220 kV:n johdot kulkevat Petäjävedeltä Pyhäkoskelle ja Nuojuaan. RAC- ja P1-leikkausten 400 kV:n johdot ovat ainoat Suomen kantaverkossa sarjakompensoidut johdot, joten siirtokykytarkastelu keskittyy näiden leikkausten siirtokykyyn. Tarkempi kuvaus Suomen kantaverkon voimajohdoista ja sähköasemista on esitetty liitteessä A.



Kuva 2.4 P1- ja RAC-leikkaukset kartalla punaisella. Rakenteilla olevat johdot merkitty kuvaan katkoviivalla.

Leikkausten siirtokykyä voidaan kuvata toiminta-aluekaaviolla (Kuva 2.5), jossa on esitetty periaatteellisella tasolla siirtokykyä rajoittavat tekijät erilaisissa siirtotilanteissa. Kaaviosta on huomioitava, että tehon siirtosuunnan muuttuessa rajoittavat tekijät muuttuvat. Toisin sanoen siirtokyky voi vaihdella merkittävästi eri siirtosuuntiin. Siirtojen ollessa kaavion määrittelemän toiminta-alueen sisällä, verkko kestää kaikki yksittäiset viat.



Kuva 2.5 Toiminta-aluekaavio, jossa on esitetty P1- ja RAC-leikkausten siirtokäy-
räjoittavat tekijät. [11]

RAC-leikkauksen läpi tehoa siirrettäessä siirtokapasiteettia rajoittavaksi tekijäksi muodostuu RAC-leikkauksen johtojen terminen kuormitettavuus. Käytännössä kaikki RAC-leikkauksen läpi siirretty teho kulkee myös P1-leikkauksen läpi, joten siirtokapasiteetin määrittelyssä täytyy huomioida myös P1-leikkaus. P1-leikkauksen kautta siirretty teho riippuu RAC-siirron lisäksi Pohjois-Suomen sähköntuotannon suuruudesta. Esimerkiksi P1-leikkauksen siirtokäy-
rä rajoittaa jännitestabiilius. Sarjakompensoinnilla pystytään parantamaan verkon jännitestabiiliutta, joten sarjakompensointi lisää P1- ja RAC-leikkausten siirtokapasiteettia [12].

Suomesta Ruotsiin päin tehoa siirrettäessä siirtokapasiteettia rajoittavaksi tekijäksi voi muodostua vaimentumattomat tehoheilahtelut, jotka johtavat generaattorien tahtikäytön menetykseen. Sarjakompensointi parantaa verkon transienttistabiiliutta, jonka ansiosta siirtokapasiteetti kasvaa. Siirtokapasiteetin kannalta on myös huomioitavaa, että sarjakondensaattoreita pystytään lyhytaikaisesti ylikuormittamaan esimerkiksi verkkovian jälkeisen kuormitusvirran lyhytaikaisen kasvun aikana. Fingridin sarjakondensaattorien ylikuormitettavuusvaatimukset pohjautuvat valvomon tarpeeseen saada siirrot sopeutettua 15 minuutin kuluessa vian alkamisesta, joten Fingridin ylikuormitettavuusvaatimukset eroavat hieman standardeissa määritellyistä vaatimuksista. Standardit IEC 60143-1 ja IEEE 824-2004 määrittelevät ylikuormitettavuudelle seuraavat vaatimukset [13] [14]:

- $1,10 \cdot I_n$ 8 tunnin ajan
- $1,35 \cdot I_n$ 30 minuutin ajan
- $1,50 \cdot I_n$ 10 minuutin ajan.
- $2,0 \cdot I_n$ 1 sekunnin ajan

Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla sähköpörssi Nord Pool Spot julkaisee kello 10:00 (CET) kantaverkkoyhtiöiden takaamat siirtokapasiteetit seuraavalle vuorokaudelle [15]. Siirtojen pysyminen siirtokapasiteetin rajoissa varmistetaan siirtojen hallinnan avulla. Mikäli siirto on ylittämässä siirtokapasiteetin esimerkiksi sarjakondensaattorin ohituksen seurauksena, joutuu Fingrid suorittamaan vastakauppoja. Vastakaupan tarkoituksena on muuttaa markkinaehtoisesti muodostunutta voimalaitosten tuotannon alueellista jakaumaa. Esimerkiksi jos P1-siirto pohjoisesta etelään on liian suurta, Fingrid maksaa Etelä-Suomen tuotannon lisäyksestä ja vastaavasti Pohjois-Suomen tuotannon vähentämisestä. Tällöin Suomen kokonaistase pysyy samana, mutta P1-siirto vähenee. Pitkäkestoisien ohitusten tapauksessa hinta-alueen sisäinen siirtokapasiteetin rajoitus on mahdollista siirtää raja-yhteydelle, mikäli rajoituksen siirtäminen on kansantaloudellisesti perusteltua. Rajoituksen siirtäminen hinta-alueen sisältä hinta-alueiden rajalle siirtää vastaoston kustannukset Fingridiltä yhteiskunnalle aluehintaeron kasvun muodossa [16].

2.6 Fingridin sarjakondensaattorit

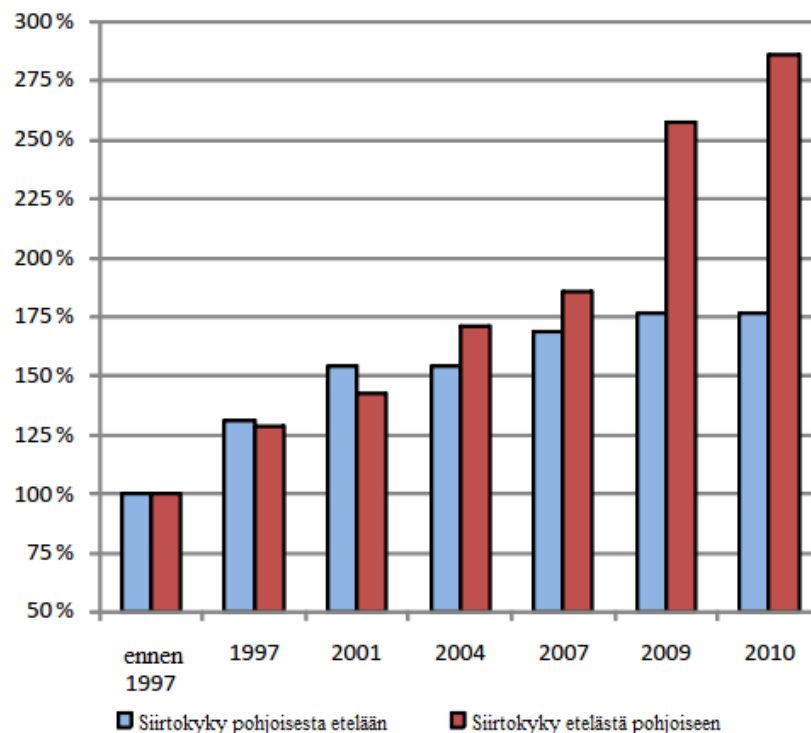
RAC- ja P1-leikkausten kymmenestä sarjakondensaattorista yhdeksän on Fingridin omistuksessa. Petäjäskoski – Letsi -voimajohdon sarjakondensaattori sijaitsee Ruotsin puolella, joten se rajataan tarkastelun ulkopuolelle. Fingridin omistamien sarjakondensaattorien sijainnit ja tekniset tiedot on lueteltu taulukossa 2.1. Sarjakondensaattorien kompensointiasteet vaihtelevat 57–76% välillä. Kunnossapitotarkastelun kannalta on oleellista huomata, että sarjakondensaattorit jakautuvat kahteen ryhmään: vanhempiin Nokian Capacitorsin (NC) valmistamiin ja uudempiin ABB:n valmistamiin. Vuonna 2016 Hirvisuolle valmistuvat sarjakondensaattorit toimittaa Siemens Osakeyhtiö, joten tulevaisuudessa sarjakondensaattorien laitekanta monipuolistuu.

Taulukko 2.1 Kantaverkkoon kytkettyjen sarjakondensaattorien tekniset tiedot

| Sijainti | As-muntti | Kemin-maa L | Kemin-maa I | Tuomela | Uusni-vala L | Uusni-vala I | Vuoli-joki E | Vuoli-joki P | Hirvisuo E | Hirvisuo P |
|--------------------|-----------|-------------|-------------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|------------|
| Voimajohto | PI - PR | SB - KI | KI - PR | PT - PS | AJ - PR L | AJ - PR I | VJ - AP | VJ - PS | TU - HS | HS - JY |
| Määrä [kpl] | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Valmistaja | ABB | NC | NC | ABB | NC | NC | NC | NC | Siemens | Siemens |
| Valmistusvuosi | 2009 | 1997 | 1997 | 2009 | 2001 | 2001 | 2000 | 2000 | 2016 | 2016 |
| Q_n [Mvar] | 369,3 | 301,2 | 301,2 | 301,3 | 158,8-2 | 317,5 | 149,9 | 149,9 | 231,3 | 159,4 |
| X_n [Ω] | 38 | 31 | 21 | 31 | 27 | 27 | 25,5 | 25,5 | 23,8 | 16,4 |
| U_n [kV] | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| I_n [A] | 1800 | 1800 | 1800 | 1800 | 1400 | 1400 | 1400 | 1800 | 1800 | 1800 |
| k [%] | 68 | 72 | 69 | 57 | 74 | 74 | 76 | 75 | 75 | 75 |
| Suojaustaso | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 |

Nykyisten sarjakondensaattorien siirtoverkkoon lisäämisen myötä P1-leikkauksen siirtokyky on kasvanut merkittävästi. Sarjakondensaattorien lisäksi merkittäviä parannuksia

P1-leikkauksen siirtokykyyn ovat tuoneet 2004 toteutettu lisästabiloinnin virityksen optimointi, kahden P1-leikkauksen keskeisen sähköaseman saneeraus sekä 2010 Kangasalan tyristoriohjatun kompensattorin (SVC, Static VAR Compensator) käyttöönotto. Huomioitavaa on myös, että vuonna 2007 Uusnivalan ja Vuolijoen sarjakondensaattorien kompensointiastetta nostettiin 50 prosentista nykyiseen noin 75 prosenttiin. Vuodesta 1997 toteutettujen P1-leikkauksen siirtokykyä parantavien investointien arvo on ollut yhteensä noin 100 miljoonaa euroa. Summa on varsin maltillinen verrattuna vastaavan siirtokykyisäyksen toteuttamiseen voimajohtoinvestoinnein. Investoinneilla saatu P1-leikkauksen siirtokyvyn parannus on esitetty kuvassa 2.6. [17]



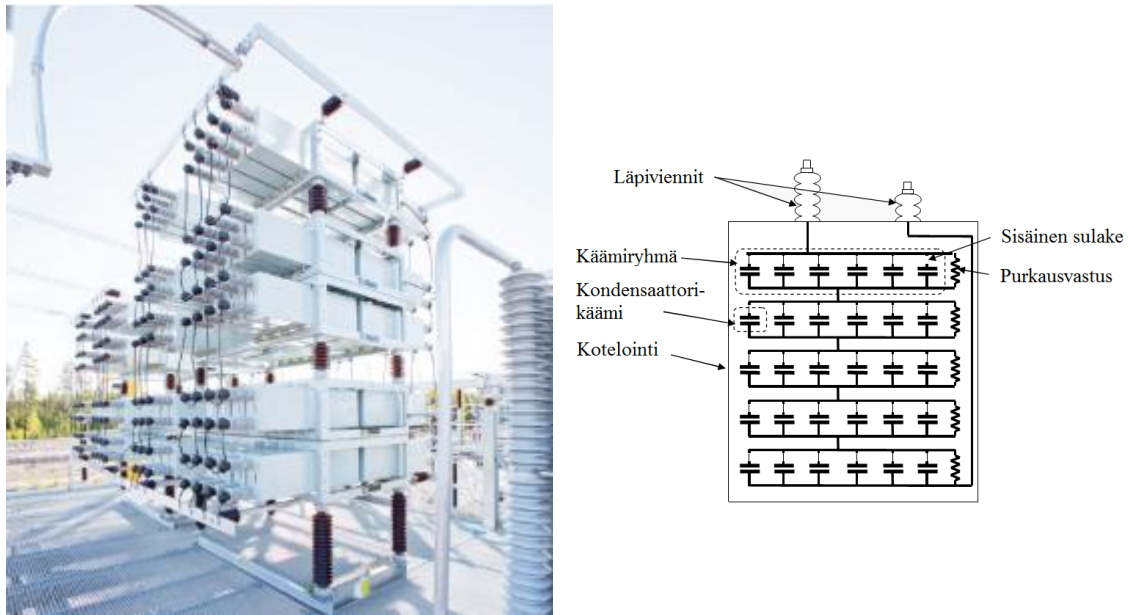
Kuva 2.6 P1-leikkauksen siirtokyvyn suhteellinen kasvu vuosien 1997–2010 välillä. [17]

Vuoden 1997 jälkeen P1-leikkauksen siirtokyky etelästä pohjoiseen (vientä) on lähes kolmikertaistunut ja siirtokyky pohjoisesta etelään (tuonti) lähes kaksinkertaistunut. Eron siirtokyvyn suhteellisissa muutoksissa selittää suurelta osin tuontikapasiteetin merkittävästi korkeampi lähtötaso ennen vuotta 1997. [17]

Sarjakondensaattorien lisäksi Fingrid omistaa jännitteensäätöön ja yliaaltojen suodatuksen tarkoitettuja rinnakkaiskondensaattoreita. Rinnakkaiskondensaattorit on asennettu 110 kV:n verkkoon ja kytketty siirtojohtojen rinnalle. Yliaaltojen suodatuksen tarkoitettujen rinnakkaiskondensaattorien tapauksessa kondensaattorit kytketään sarjaan kelan kanssa, jolloin halutulle taajuudelle muodostuu matalaimpedanssinen piiri. Rinnakkaiskondensaattoreissa käytetyt kondensaattoriyksiköt ovat samankaltaisia kuin sarjakondensaattoreissa, joten kondensaattoriyksiköiden osalta saatuja kokemuksia pystytään hyödyntämään sarjakondensaattorien elinkaaren arvioinnissa. [11]

torit on kytketty sarjaan siirto johdon kanssa, joten kuormitusvirran lisäksi myös vikavirrat lävistävät ne aiheuttaen ylijännitteitä. Ylijännitteiden takia sarjakondensaattorit on varustettava monimutkaisella ylijännitesuojauksella. [18]

Sarjakondensaattoriparisto (Kuva 3.2) muodostuu useista sarjaan- ja rinnankytketyistä kondensaattoriyksiköistä. Kondensaattoriyksiköt muodostuvat niin ikään sarjaan- ja rinnankytketyistä kondensaattorikämeistä. Kondensaattoriyksiköiden jännite- ja virta-arvot optimoidaan paristokohtaisesti. Sarjakondensaattoripariston jännite- ja virtakestoisuus sekä kapasitanssi määräytyvät käytetyn kondensaattorikytkennän perusteella.



Kuva 3.2 Sarjakondensaattoriparisto ja kondensaattoriyksikön rakenne. [19] [20]

3.2 Varistorit

Varistori eli MOV (Metal Oxide Varistor) on sylinterimäisistä metallioksidielementeistä koostuva epälineaarinen vastus, jonka tehtävänä on vikatilanteissa rajoittaa kondensaattorin yli vaikuttava jännite tasolle, jonka kondensaattorit kestävät. Verkon normaalissa käyttötilanteessa varistorin resistanssi on suuri, jolloin sen läpi kulkeva virta on hyvin pieni. Vian aiheuttaman virran nousun seurauksena kondensaattorin yli oleva jännite kasvaa, kunnes se saavuttaa varistorin suojaustason. Varistorin suojaustason ylittyessä sen resistanssi pienenee ja kondensaattorin läpi kulkeva virta siirtyy kulkemaan varistorin kautta. Suojaustason ylittyessä varistori pitää kondensaattorin yli olevan jännitteen vakiona, jolloin kondensaattorin läpi ei kulje virtaa. Kuvassa 3.3 on esitetty sarjakondensaattorin yhden vaiheen varistorit. [18]



Kuva 3.3 Sarjakondensaattorin yhden vaiheen varistorit. [19]

Varistorit kykenevät absorboimaan rajallisen määrän energiaa. Vian seurauksena absorboitavan energian määrä riippuu vikavirran suuruudesta sekä vian kestosta. Vian ollessa sarjakompensoidulla johdolla vikaa kutsutaan sisäiseksi viaksi. Sisäisissä vioissa oikosulkuvirrat ovat suuria ja sarjakondensaattori pyritään ohittamaan välittömästi, koska tällöin sarjakompensointia ei tarvita. Kompensoidun johdon ulkopuolisessa verkossa tapahtuvia vikoja kutsutaan ulkoisiksi vioiksi. Varistorit mitoitetaan siten, että ne kykenevät absorboimaan ulkoisen vian aiheuttaman energian kokonaan ja sisäisen vian aiheuttaman energian sarjakondensaattorin ohittumiseen saakka. Tällöin sarjakondensaattori pystyy toimimaan ulkoisen vian aikana, kun kondensaattorin yli olevan jännitteen hetkellisarvo on alle varistorien suojaustason. Mitä enemmän rinnakkaisia varistoreita asennetaan, sitä enemmän energiaa pystytään absorboimaan. Varistorien mitoitusenergian ylittyessä paristo ohitetaan laukaisemalla kipinäväli ja sulkemalla ohituskatkaisija. [18]

3.3 Kipinäväli

Kipinäväliä käytetään kondensaattorien nopeissa ohikytkennöissä suurivirtaisissa vioissa. Pakkoliipaistava kipinäväli saa suojausjärjestelmältä laukaisukäskyn, kun varistorien mitoitusenergia tai jokin muu ohitusehto täyttyy. Kipinävälin toiminta-aika on noin 1 ms ja ohituskatkaisijan kiinnikytkentäaika noin 20 – 30 ms. Kipinävälin nopeamman toiminta-ajan ansiosta varistorit voidaan mitoittaa pienemmälle energiakestoisuudelle.

Kipinävälin teknisestä rakenteesta löytyy kahta eri perusratkaisua. Perinteisessä ratkaisussa kipinäväli on toteutettu grafiittipalloilla, joiden väliin jätetään ilmaväli. Kipinäväli on sijoitettu suljetun rakenteen sisään, jolloin ympäristöolosuhteiden vaikutus kipinävälin toiminta-arvoihin vähenee. Toinen, uudempi ratkaisu kipinävälin toteuttamiseen on ABB:n CapThor-niminen suojalaite. CapThor muodostuu kahdesta pilarista, joissa ohitus

saadaan aikaan plasmassa tapahtuvalla läpilyönnillä ja nopealla mekaanisella kytkimellä. Kuva 3.4 esittää CapThor-suojalaitteen sekä kipinävälin rakenteen.



Kuva 3.4 CapThor-suojalaite vasemmalla ja perinteinen kipinäväli oikealla. [19]

Saadessaan liipaisukäskyn, CapThor syyttää valokaaren plasmalla, jonka jälkeen mekaaninen kytkin toimii sammuttaen valokaaren. Ohituskatkaisijan sulkeuduttua mekaaninen kytkin voidaan avata ja sarjakondensaattori voidaan kytkeä takaisin verkkoon. Rakenteeltaan CapThor on hermeettisesti suljettu, jolloin virran katkaisu tapahtuu vakiopaineessa ja -kosteudessa. Kipinävälin rakenteen takia ulkoiset ympäristöolosuhteet vaikuttavat jonkin verran toiminta-arvoihin, jolloin ääriolosuhteissa toiminta voi häiriintyä. Perinteiseen kipinäväliin verrattuna CapThorin tilantarve on pienempi ja olosuhteiden vaikutus toimintaan on vähäisempää. [11] [21]

3.4 Vaimennuspiiri

Vaimennuspiiri on kelan ja vastuksen rinnankytkennästä koostuva virranrajoitin (Kuva 3.5). Käyttötilanteessa kondensaattoriin varautuu merkittävästi energiaa, joka purkautuu kondensaattoria ohitettaessa. Vaimennuspiirin tarkoituksena on rajoittaa purkautumisesta aiheutuvan virran amplitudia, sovittaa purkausvirran taajuus verkkotaajuuteen sopivaksi sekä vastuksen avulla vaimentaa värähtely. [22]



Kuva 3.5 Vaimennuspiiri. [19]

Sarjakondensaattorin ollessa ohituksessa virta kulkee vaimennuspiirin kautta. Häviöiden vähentämiseksi vastus on kytketty vaimennuspiiriin varistorin tai kipinävälin kanssa sarjaan, jolloin virta kulkee vastuksen läpi ainoastaan vian aiheuttaman ylijännitteen seurauksena. [11]

3.5 Virtamuuntajat

Virtamuuntajat ovat keskeinen osa sarjakondensaattorin suojausjärjestelmää. Virtamuuntajien tehtävänä on mitata eri komponenttien läpi kulkevaa virtaa. Sarjakondensaattorissa virtamittauksia on viidessä paikassa, kuten kuvassa 3.1 on esitetty. Kuvanumeroinnin mukaiset virtamittaukset ovat:

8. linjavirta
9. varistorin läpi kulkeva virta
10. kipinävälin läpi kulkeva virta
11. lavavirta
12. kondensaattorien epäbalanssivirta

Sarjakondensaattorin rakenne tuo omat haasteensa virtasignaalin siirtämiseen maatasossa sijaitsevalle suojausjärjestelmälle. Koska lava sijaitsee johdon potentiaalissa, ei virtasignaalia voida siirtää suoraan johtimella maatasoon. Virtamuuntajien toisiovirta muutetaan välivirtamuuntajien, vastuksien ja muunninten avulla digitaalisignaalksi, joka voidaan siirtää valopilareissa kulkevien valokuitujen avulla maatasoon. Maatasossa valokuidussa kulkevat pulssit muunnetaan suojausjärjestelmälle sopivaksi jännitteeksi. Mittausjärjestelmän yksinkertaistamiseksi voidaan käyttää optisia virtamuuntajia, jolloin mittausignaalia ei tarvitse muuntaa maatasossa uudelleen jännitteeksi. [11]

3.6 Ohituskatkaisija

Ohituskatkaisija on sarjapariston rinnalle kytketty katkaisija, jonka tarkoitus on nimensä mukaisesti tarvittaessa ohittaa sarjaparisto ja rajoittaa kondensaattorin yli olevaa jännitettä. Ohituskatkaisijan toiminta on päinvastainen tavanomaiseen katkaisijaan nähden. Ohituskatkaisijan ollessa auki, kulkee virta sarjapariston läpi ja ohituskatkaisijan ollessa kiinni, on sarjaparisto ohitettuna. [8]

Käyttötarkoituksensa vuoksi ohituskatkaisijan mitoitus eroaa johtokatkaisijasta. Eristystason on vastattava johtokatkaisijan eristystasoa, mutta katkaisupäiden jännitelujuus voi olla huomattavasti pienempi. Sarjakondensaattorin nimellisjännite on suhteellisen pieni, joten johtokatkaisijan jännitelujuuksille ei ole tarvetta. Esimerkiksi Pirttikoski – Pikkarala 400 kV:n voimajohdolla sijaitsevan Asmuntin sarjakondensaattorin ohituskatkaisijan nimellisjännite on 170 kV johtokatkaisijoiden nimellisjännitteen ollessa 400 kV.

3.7 Erottimet

Sarjakondensaattorin pysyvää ohittamista ja erottamista varten tarvitaan ohitus- ja paristoerottimia. Ohituserottimen sulkemisella ja paristoerottimien avaamisella sarjakondensaattori saadaan erotettua verkosta huoltotoimenpiteitä varten. Sarjakondensaattorin pysyvä ohittaminen tai kytkeminen verkkoon vaatii ohituserottimelta induktiivisen virran katkaisukykyä. Muita erikoisvaatimuksia erottimiin ei kohdistu, joten paristoerottimina voidaan käyttää tavallisia erottimia. [8] [11]

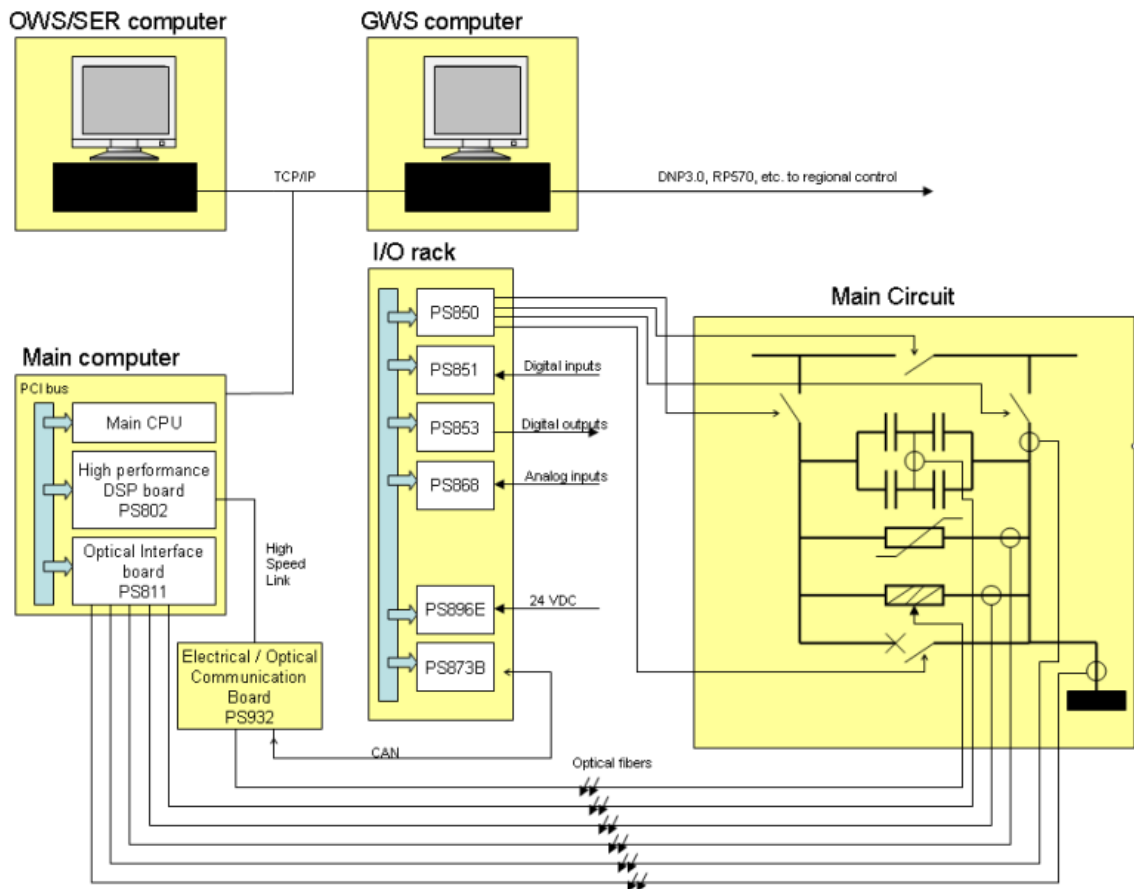
3.8 Suojaus- ja ohjausjärjestelmä

Suojaus- ja ohjausjärjestelmän ensisijaisena tehtävänä on suojata sarjakondensaattoria ohjaamalla järjestelmään kytkettyjä suojauslaitteita. Suojaus- ja ohjausjärjestelmän avulla pystytään ohjaamaan myös kaikkia sarjakondensaattorin yhteydessä olevia kytkinlaitteita sekä lukemaan kaikkien kytkinlaitteiden asentotiedot. Suojaus- ja ohjausjärjestelmä mahdollistaa myös kommunikoinnin johtosuojauksen kanssa sekä kaukokäytön valvomosta [8]. Suojaus- ja ohjausjärjestelmä voidaan jakaa neljään toiminnalliseen kokonaisuuteen:

- Virtojen mittauspiirit ja signaalinsiirto lavatasolta maatasoon
- Suojaus- ja ohjausjärjestelmä (tuottaa ohjaukset suojauslaitteille)
- Paikallinen käyttöliittymä (OWS, Operator Work Station)
- Kaukokäyttö (GWS, Gateway Station)

Suojaus- ja ohjausjärjestelmä on täysin kahdennettu virtamuuntajien toisioista aina ohituskatkaisijan kahdennetuille ohjaukseloille asti. Kahdennetut järjestelmät ovat fyysisesti ja toiminnallisesti identtisiä. Kahdennus takaa sarjakondensaattorin paremman käyttövar-

muuden sekä mahdollistaa suojaus- ja ohjausjärjestelmän huoltotyöt ilman sarjakondensaattorin irtikytkemistä verkosta. Kuvassa 3.6 on esitettyä yksi esimerkki sarjakondensaattorin suojaus- ja ohjausjärjestelmän toteutuksesta.



Kuva 3.6 ABB:n MACH 2 -suojaus- ja ohjausjärjestelmän yleiskuvaus. [23]

Kyseinen järjestelmä perustuu teollisuustietokoneeseen, johon on kytkettynä kenttäväylillä lisäkortteja ja I/O-räkki. Virtamittaukset tapahtuvat optisilla virtamuuntajilla ja digitaalinen virtatieto siirretään lavalta maatasoon valokuitua pitkin. Järjestelmään sisältyy paikalliskäytön työasema (OWS) sekä kaukokäyttöyhteys (GWS). [23]

Suojaus- ja ohjausjärjestelmään voi kuulua esimerkiksi seuraavanlaisia suojaustoimintoja:

- Kondensaattorien epäbalanssisuojaus
- Kondensaattorien ylikuormitussuojaus
- Lavasulkusuojaus
- Kipinäväli-/CapThor-suojaus
- Ohituskatkaisijan vikasuojaukset
- Johtovirran valvonta
- Varistorien vikasuojaukset
- Varistorien ylikuormitussuojaus

3.9 Kommunikaatio ja tehonsyöttö

Sarjakondensaattorit asennetaan vaihekohtaisille lavoille johdon potentiaaliin, joten tavanomaista johtimiin perustuvaa tehonsyöttöä ja kommunikointia ei voida hyödyntää lavan ja maatasolla sijaitsevan suojaus- ja ohjausjärjestelmän välillä. Tehonsiirtoa lavan ja maatason välillä ei tarvita, kun apusähkö otetaan johdon kuormitusvirrasta virtamuuntajan avulla. Ongelmaksi tässä ratkaisussa kuitenkin muodostuvat kevyet kuormitustilanteet, jolloin kuormitusvirrasta ei saada tarvittavaa tehoa. [11]

Kevyiden kuormitustilanteiden ja tiedonsiirron tarpeisiin lavan ja maatason väliin on asennettu valopilarit, joiden sisällä kulkee valokuitu. Valokuitu on sähköä johtamaton ja immuuni sähkömagneettisille häiriöille, joten se soveltuu hyvin käytettäväksi isonkin potentiaalieron välillä. Valokuitua pitkin voidaan myös siirtää tehoa kevyen kuormitustilanteen aikana käyttäen laser-teholähdettä [8]. Lavaelektroniikan tehon saanti voidaan varmistaa myös akkuvarmennuksella.

4. KUNNONHALLINTA

4.1 Yleistä

Kunnonhallinnalla tarkoitetaan kaikkia niitä toimenpiteitä, joilla omaisuuden nykykuntoa ja kunnon kehittymistä hallitaan. Kunnonhallinnan toteuttamista ohjaavia tavoitteita, periaatteita ja toimintamalleja kutsutaan kunnonhallintapolitiikaksi. Kunnonhallintapolitiikan ja muun ohjeistuksen käytännön toteutusta kutsutaan kunnossapidoksi. [11]

Suomen Standardisoimisliitto SFS ry määrittelee kunnossapidon seuraavasti: *Kunnossapito koostuu kaikista kohteen elinajan aikaisista teknisistä, hallinnollisista ja liikkeenjohdollisista toimenpiteistä, joiden tarkoituksena on ylläpitää tai palauttaa kohteen toimintakyky sellaiseksi, että kohde pystyy suorittamaan vaaditun toiminnon* [24].

Tässä työssä kunnossapitoa tarkastellaan järjestelmänäkökulmasta, eli määritelmässä mainittu *kohde* on järjestelmä. Kunnossapidon tavoitteena on ylläpitää tai palauttaa järjestelmän toiminta tilaan, jossa se pystyy suorittamaan siltä vaaditun toiminnon. Toisin sanoen, kunnossapito keskittyy järjestelmän toiminnan kannalta keskeisten toimintojen ylläpitoon.

Kunnossapidolla on suuri vaikutus sähkölaitteiden turvallisuuteen, joten myös lainsäädäntö asettaa omat reunaehdonsa sähkölaitteiden ja -laitteistojen kunnossapidolle. Sähköturvallisuuslain 5 § määrittää sähkölaitteiden kunnossapidosta: *Sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava niin sekä niitä on huollettava ja käytettävä niin, että:*

- 1) *niistä ei aiheudu kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa;*
- 2) *niistä ei sähköisesti tai sähkömagneettisesti aiheudu kohtuutonta häiriötä; sekä*
- 3) *niiden toiminta ei häiriinny helposti sähköisesti tai sähkömagneettisesti.*

Jos sähkölaite tai -laitteisto ei täytä 1 momentin edellytyksiä, sitä ei saa saattaa markkinoille eikä ottaa käyttöön. [25]

Sähköturvallisuuslain lisäksi Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös sähkölaitteistojen käyttöönotosta ja käytöstä (517/1996) määrittää sähkölaitteiston haltijan velvollisuuksia kunnossapidon järjestämisestä. Päätöksessä mainitaan muun muassa määräaikaistarkastusten taajuudesta sekä ilmenneiden vikojen riittävän nopeasta poistamisesta. [26]

4.2 Fingridin kunnonhallinnan toimintamalli

Fingridin kunnonhallinnan toimintamallin perusta tulee toimintaympäristön asettamista reunaehdoista. Sähköasemalaitteiden ja voimajohtojen elinkaarikustannukset muodostu-

vat pääosin hankintakustannuksista, joten taloudellisessa mielessä on usein järkevää pidentää elinkaarta kunnossapidolla niin kauan, kun komponentit täyttävät niille asetetut siirtokyky-, käyttövarmuus-, ympäristö- ja turvallisuusvaatimukset. Kunnossapidon taso määräytyy halutun käyttövarmuuden mukaan optimoimalla kunnossapitokustannusten ja riskikustannusten suhde.

Kunnonhallinnan toimintamalli perustuu vahvaan yhtiön sisäiseen asiantuntemukseen, tietojärjestelmien tehokkaaseen hyödyntämiseen sekä tilaaja-toimittaja-malliin. Tilaaja-toimittaja-mallissa Fingrid vastaa kunnossapitotöiden määrittelemisestä, valvonnasta ja kilpailuttamisesta, mutta kunnossapitotyöt tilataan ulkopuolisilta palveluntarjoajilta. Kunnonhallintaprosessia johtaa asiantuntijoista koostuva kunnonhallintaryhmä. Laiteryhmäkohtaisesta kunnonhallinnasta vastaavat laiteasiantuntijat. Kantaverkko on jaettu maantieteellisiin kunnossapitoalueisiin, joiden peruskunnossapitosopimukset kilpailutetaan keskitetysti määräajoin. Peruskunnossapitosopimukset sisältävät laiteasiantuntijoiden määrittelemät tavanomaisille kohteille suoritettavat tarkastukset, huollot ja korjaustyöt sekä viankorjausvalmiuden. Erityisosaamista vaativat kunnossapitotyöt kuuluvat erikoiskunnossapidon piiriin ja ne kilpailutetaan erikseen.

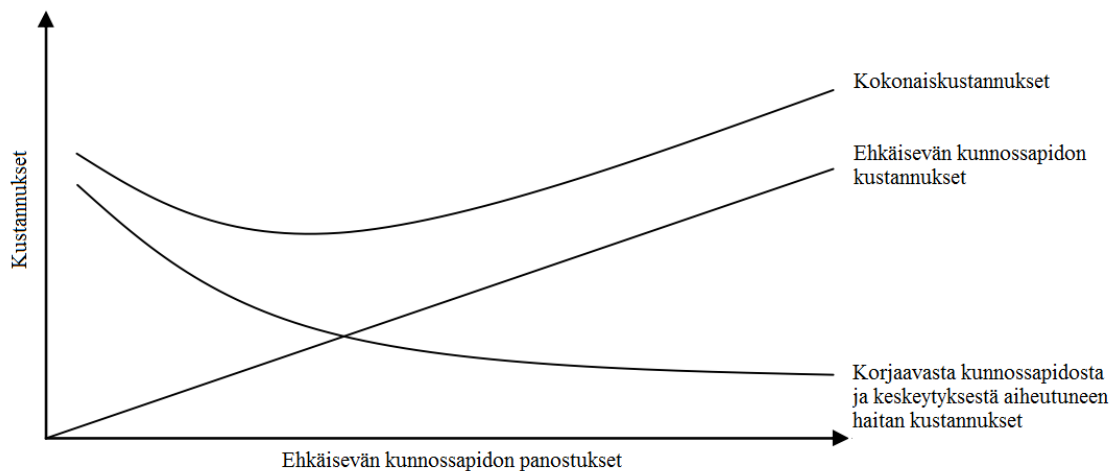
Fingrid seuraa ja kehittää kunnonhallintansa vaikuttavuutta aktiivisesti. Yksittäisten kunnossapitotöiden onnistumista tarkastellaan työkohteissa suoritettavan paikallisvalvonnan ja auditointien avulla. Kokonaisvaltaisempaa arviointia suoritetaan esimerkiksi osallistumalla kantaverkkoyhtiöiden kunnossapidon tehokkuuden vertailuun (ITOMS) sekä ylläpitämällä PAS 55 -sertifikaatin mukaista kokonaisvaltaista omaisuuden hallintaa. Fingrid on osallistunut ITOMS-vertailuun vuodesta 1995 alkaen ja sijoittunut joka kerta parhaiden yhtiöiden joukkoon. PAS 55 -sertifikaatin Fingrid sai ensimmäisenä pohjoismaisena yhtiönä vuonna 2010.

4.3 Kunnossapitolajit

Kunnossapito voidaan jakaa karkeasti kolmeen eri kunnossapitolajiin. Kun kunnossapitoa suoritetaan ennen toiminnon vioittumista, puhutaan ehkäisevästä kunnossapidosta. Ehkäisevää kunnossapitoa suoritetaan aikaperustaisesti tai muun säännön, esimerkiksi toimintakertojen mukaan ja sen tavoitteena on ennaltaehkäistä laitteen tai järjestelmän vioittumista [27]. Toiminnon vioittumisen jälkeen tapahtuvaa kunnossapitoa kutsutaan korjaavaksi kunnossapidoksi. Jos kunnossapidon yhteydessä kohteen luotettavuus tai suorituskykyominaisuudet paranevat alkuperäisestä, kutsutaan kunnossapitoa parantavaksi kunnossapidoksi.

Ehkäisevän kunnossapidon kannalta keskeinen käsite on kunnonvalvonta. Kunnonvalvonnan tavoitteena on määritellä kunnossapitokohteen nykyinen toimintakunto sekä ennustaa toimintakunnon muutoksia. Kuntotietojen pohjalta voidaan ennustaa mahdollisia vikaantumisia sekä huolto- ja korjausajankohtia. Kunnonvalvontaa toteutetaan erilaisten tarkastusten ja mittausten avulla.

Kunnossapidon suunnittelu on optimointitehtävä ehkäisevän ja korjaavan kunnossapidon välillä. Yleistäen voidaan sanoa, että ehkäisevän kunnossapidon lisääminen vähentää korjaavan kunnossapidon kustannuksia tiettyyn pisteeseen asti (Kuva 4.1). Kunnossapito-kustannuksissa täytyy huomioida itse kunnossapitotyön lisäksi järjestelmän epäkäytettävyydestä aiheutuvat kustannukset, jotka ovat korjaavassa kunnossapidossa yleisesti suuremmat. Epäkäytettävyyttä voidaan pienentää kunnossapitohenkilöstön varallaololla. Varallaolo tarkoittaa kunnossapitohenkilöstön pitämistä viankorjausvalmiudessa, jolloin korjaava kunnossapito saadaan aloitettua nopeammin ja järjestelmä nopeammin takaisin käyttöön.



Kuva 4.1 Periaatekuva kunnossapidon kokonaiskustannusten optimoinnista.

Kunnossapitoa suunniteltaessa täytyy myös tutkia ehkäisevän kunnossapidon vaikutusta järjestelmään. Kaikki ehkäisevä kunnossapito ei vähennä toiminnon vikaantumisen todennäköisyyttä. Pahimmillaan turhaan tai virheellisesti tehty ennakoiva kunnossapito jopa kasvattaa vikaantumisen todennäköisyyttä.

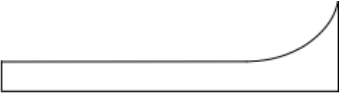

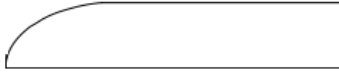

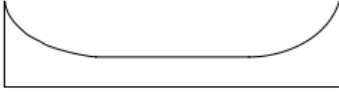
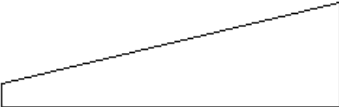
4.4 Vikaantumiskäyrät

Toimintojen vikaantumiskäyttäytymistä voidaan kuvata graafisesti vikaantumiskäyrillä. Vikaantumiskäyrä kuvaa vikataajuuden suuruutta kohteen elinkaaren eri vaiheissa. Vikaantumiskäyttäytymisen tunteminen on oleellista, jotta kohteen kunnossapito voidaan suunnitella analyttisesti. Taulukossa 4.1 on esitetty tyypillinen vikaantumiskäyrien jaottelu ja tutkimuksissa havaittuja todennäköisyyksiä eri käyrätyypeille. Tyypin A kuvaava suunnitelmallisen kunnossapidon alkuaikoina (1940–1950) vallinnutta oletusta käyttöiän voimakkaasta vaikutuksesta vikataajuuteen. Tekniikan ja tiedon lisääntyessä vikaantumiskäyttäytymistä alettiin kuvaamaan niin sanotun kylpyammekäyrän mukaisesti. Kylpyammekäyrä (tyyppi E) kuvaa kohonnutta vikataajuutta käyttöiän alkuvaiheessa. Tämä sisäajonvaihe sisältää valmistus- ja suunnitteluvirheistä aiheutuvat viat. Kylpyammeen pohja kuvaa käyttökautta, jolloin sisäajonkauden viat on korjattu, eikä ikääntyminen

vielä vaikuta vikataajuuteen. Elinkaaren lopussa ikääntyminen alkaa näkymään käyrässä ja vikataajuus lähtee voimakkaaseen nousuun. [28]

Nykyisin vikaantumiskäyttäytymistä ei enää mallinneta yksittäisen mallin avulla, vaan jokaisen vikatyypin kohdalla tarkastellaan erikseen vikaantumiskäyttäytymistä. Kuten eri vikaantumiskäyrien todennäköisyyksistä voidaan huomata, perinteiset käyrät A ja E kuvaavat vain pientä osaa vikatyypeistä.

Taulukko 4.1 Vikaantumiskäyrätyypit ja niille laskettuja esiintymistodennäköisyyksiä. [29] [30]

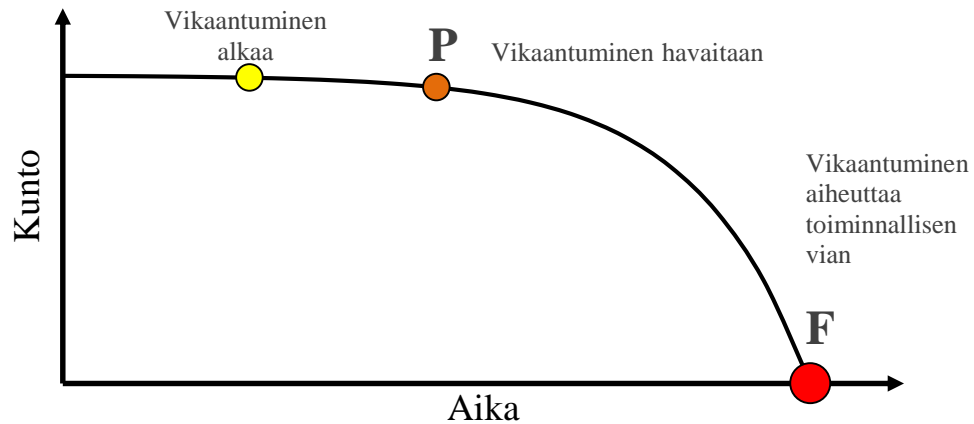
| | Tyyppi | UAL 1968 | BROM- BERG 1973 | U.S. NAVY 1982 | SUB- MEPP 2001 |
|---|--------|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|
|  | A | 2 % | 1 % | 17 % | 10 % |
|  | B | 68 % | 66 % | 29 % | 6 % |
|  | C | 7 % | 11 % | 6 % | 9 % |
|  | D | 14 % | 15 % | 42 % | 56 % |
|  | E | 4 % | 3 % | 3 % | 2 % |
|  | F | 5 % | 4 % | 3 % | 17 % |
| | | Siviililen- tokoneet | Siviililen- tokoneet | Laivat | Sukellus- veneet |

Kunnossapidon suunnittelun kannalta oleellista käyristä on havaita ikääntymisen vaikutus. Vikakäyrissä B, C ja D ikääntyminen ei kasvata vikataajuutta, kun taas käyrissä A, E ja F vikataajuus kohoaa merkittävästi lähestyttäessä kohteen elinkaaren loppua.

4.5 Vikaantumisprosessi

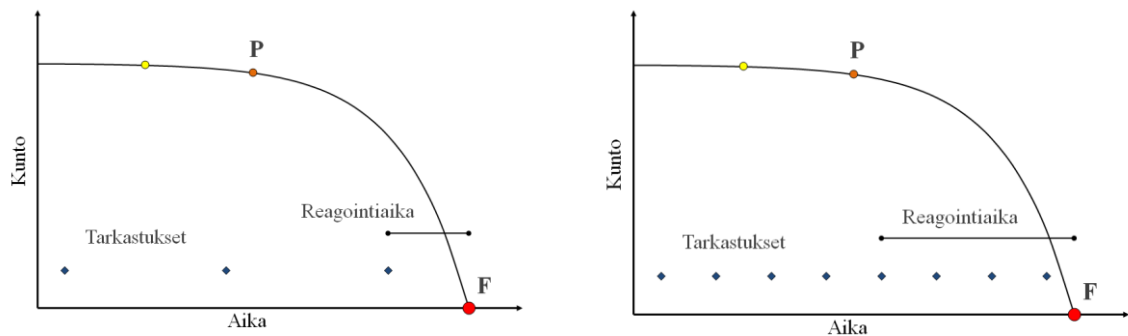
Vikaantumiskäyrien esiintymistodennäköisyyksistä nähtiin, että suurimmalla osalla vikaumodoista ikääntymisen vaikutus vikataajuuteen on vähäistä. Vian kehittyminen kuitenkin on ajan mittaan kehittyvä prosessi, eikä toiminnallinen vika yleensä ala ilman varoitusta. Tyypillistä vikaantumisprosessia voidaan mallintaa kuvan 4.2 mukaisella P-F -käyrällä (potential failure to failure). Vikaantuminen voi alkaa jo kauan ennen toiminnallista vikaa, eikä vikaantumisen alkamisella ole vaikutusta toimintoon. Vikaantumisen kehitty-

essä riittävän pitkälle, voidaan se havaita. Tällöin ollaan P-F -käyrän P-pisteessä (potential failure). Mikäli tilanteeseen ei puututa, vikaantuminen kiihtyy ja päättyy lopulta toiminnalliseen vikaan pisteessä F (failure). [28]



Kuva 4.2 P-F -käyrä

Pisteiden P ja F välistä aikaa kutsutaan P-F -jaksoksi. Kunnossapidon kannalta P-F -jakson tunteminen on oleellista, jotta vikaantumiseen voidaan puuttua ennen toiminnallista vikaa. Kuva 4.3 esittää tarkastustaajuuden vaikutusta vikaantumiseen reagoimiseen jäävään aikaan. P-F -jakson pituuteen nähden lyhyellä tarkastusvälillä saadaan todennäköisemmin enemmän aikaa reagoida vikaantumiseen. Toisaalta tarkastustaajuuden kasvattaminen lisää ehkäisevän kunnossapidon kustannuksia, joten tarkastustaajuuden määrittäminen on optimointitehtävä. [28]



Kuva 4.3 Tarkastusvälin pituuden vaikutus reagointiaikaan

Tarkastusväliä optimoitaessa pitää huomioida seuraavat seikat:

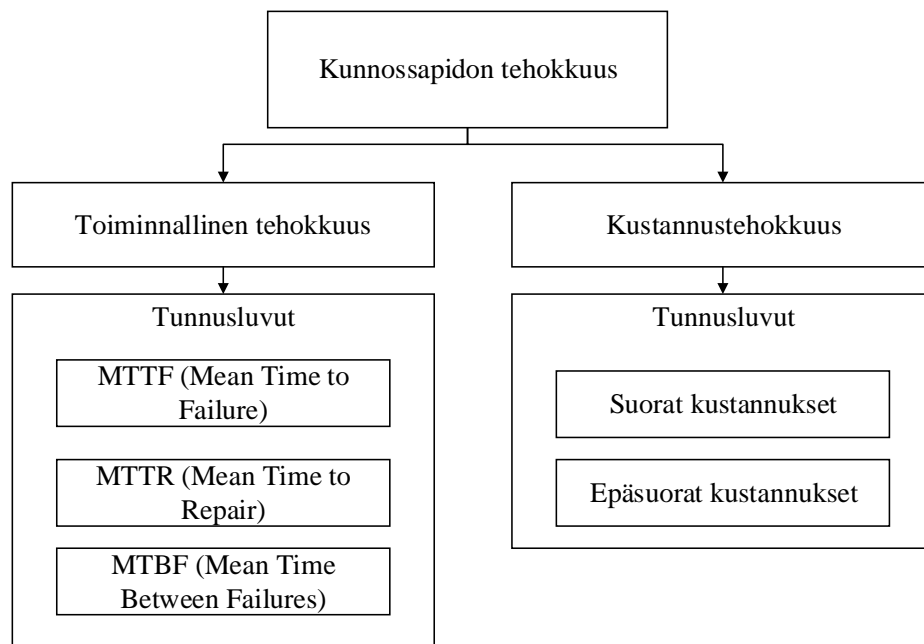
- tarkastusten kustannukset
- keskeytyksestä aiheutunut kustannus
- korjauskustannukset
- turvallisuus

Tarkastusten kustannukset luonnollisesti kasvavat tarkastusväliä lyhennettäessä, mutta toisaalta tällöin saadaan enemmän aikaa reagoida vikaantumiseen. Kun reagointiaikaa on

enemmän, saadaan huolto todennäköisemmin ajoitettua suunnitellun keskeytyksen aikaan eikä ylimääräistä huoltokatkoa tarvita. Myös korjauskustannuksiin pystytään vaikuttamaan aikaisemmalla puuttumisella vikaantumiseen. Jos esimerkiksi laakerivikainen generaattori saadaan pysäytettyä ennen laakerin pettämistä, estetään roottorin osuminen staattoriin ja korjaustoimenpiteeksi riittää pelkkä laakerin vaihto. Lisäksi toiminnallinen vika voi johtaa myös ympäristölle ja henkilöstölle vaarallisiin tilanteisiin. [28]

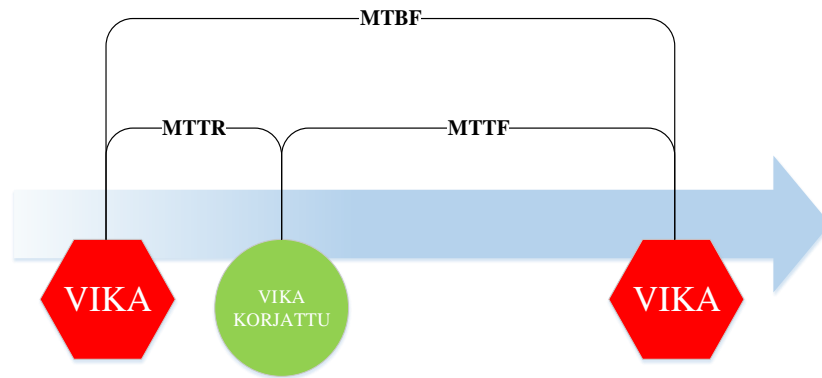
4.6 Kunnossapidon tehokkuus

Kunnossapidon kehittäminen ja arvioiminen vaatii kunnossapidon tehokkuuden mittaamista. Kunnossapidon tehokkuuden mittaaminen jaetaan yleisesti kahteen osaan, joista toisessa tarkastellaan kunnossapidon vaikutusta järjestelmän toimintavarmuuteen ja toisessa kunnossapidosta aiheutuneita kustannuksia. Kunnossapidon tehokkuus saadaan vertaamalla kunnossapidon vaikuttavuutta suhteessa kustannuksiin. Kuvassa 4.4 on esitetty esimerkki arvioinnissa käytettävistä tunnusluvuista.



Kuva 4.4 Kunnossapidon tehokkuuden mittaamiseen käytettäviä tunnuslukuja. [31]

Toiminnallisen tehokkuuden mittareista MTTF, MTTR ja MTBF kuvaavat tarkasteltavan laitteen tai järjestelmän käytettävyyttä. Kuten kuvassa 4.5 on esitetty, MTTR kuvaa järjestelmän epäkäytettävyyden keskiarvoa, MTTF käytettävyyden keskiarvoa ja MTBF näiden summaa eli vikaantumisvälin keskiarvoa.



Kuva 4.5 MTBF esitettyinä MTTR:n ja MTTF:n summana. [31]

MTBF saadaan laskettua yksinkertaisimmillaan vikaantumistaajuuden λ käänteislukuna:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (5.1)$$

MTTR muodostuu kaikista epäkäytettävyyteen vaikuttavista tekijöistä, joita on itse korjaustoimenpiteen lisäksi esimerkiksi korjaushenkilöstön paikalle saamiseen kuluva aika, vian diagnosointiin kuluva aika, varaosien löytämiseen kuluva aika sekä tarvittaviin käyttöönottokeistuksiin kuluva aika [28]. Kunnossapidon suunnittelulla voidaan vaikuttaa niin vikaantumisväliin kuin myös korjausaikaan.

Kunnossapidon kustannustehokkuuden tunnusluvuista ilmeisin on kunnossapidon suorat kustannukset. Suorat kustannukset ovat tietyille kunnossapitokohteelle osoitettavissa olevia kustannuksia, kuten tilatut työt ja varaosat. Epäsuorien kustannusten osoittaminen yksittäiselle kunnossapitokohteelle on hieman haastavampaa. Sähköverkkojen kunnossapidossa epäsuorat kustannukset voivat olla esimerkiksi kunnossapito- ja keskeytyssuunnittelun kustannuksia sekä viasta aiheutuneiden vastakauppojen tai kansantaloudellisen haitan kustannuksia.

5. RCM - LUOTETTAVUUSKESKEINEN KUNNOS- SAPITO

5.1 Taustaa

Luotettavuuskeskeinen kunnossapito, RCM (Reliability-centered Maintenance) on kunnossapidon viitekehys, jonka tarkoituksena on optimoida kunnossapidosta saatava hyöty systemaattisella tavalla [3]. RCM lähestyy luotettavuutta järjestelmänäkökulmasta, jolloin keskeistä on tunnistaa jokaisen osajärjestelmän ja toiminnon merkitys järjestelmän toiminnan kannalta. Hyvin määritellyn ja tunnetun järjestelmän kunnossapidon peruskäsitteenä on: *Mitä pitää tehdä, että kaikki toiminnot jatkavat järjestelmän niille asettamien vaatimusten täyttämistä* [28]? Järjestelmänäkökulman ansiosta voidaan vikojen ennaltaehkäisyyn sijaan keskittyä vikojen vaikutusten ehkäisyyn.

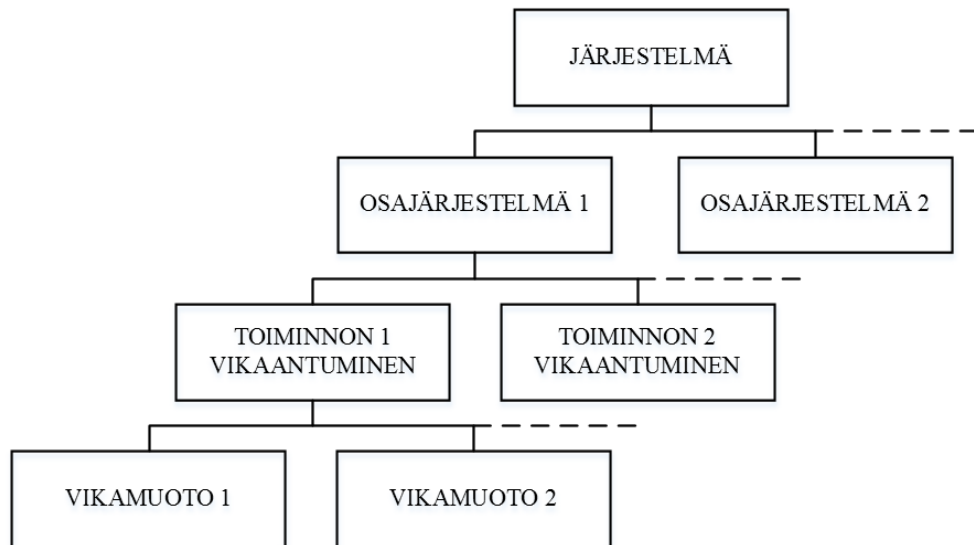
Luotettavuuskeskeinen kunnossapito kehitettiin Yhdysvalloissa 1960-luvun lopulla vastaamaan lentokoneiteollisuuden kunnossapitohaasteisiin. Boeingin suunnitelmassa laajarunkoista 747 matkustajakonettaan (Jumbo Jet) todettiin perinteisten ennakkohuolto-ohjelmien kustannusten nousevan liian suuriksi, joten tarvittiin uusi tapa suunnitella kunnossapitoa. Kunnossapidon lähtökohdaksi otettiin kaikkien turhien kunnossapitokustannusten karsiminen huonontamatta turvallisuutta tai käytettävyyttä. Näiden periaatteiden pohjalta syntyneessä huolto-ohjelmassa keskityttiin tunnistamaan järjestelmän toiminnan kannalta tärkeimmät kunnossapitotehtävät sekä ikääntymisen vaikutukset järjestelmän komponentteihin. Huolto-ohjelma osoittautui menestykseksi ja sitä alettiin soveltaa myös muissa kunnossapidon kannalta vaativissa kohteissa, kuten ydinvoimalaitoksissa. [3]

RCM on kehittynyt olemassaolonsa aikana vastaamaan erilaisten toimintaympäristöjen aiheuttamiin haasteisiin. Esimerkkinä mukautumisesta toimintaympäristön muutokseen mainittakoon ympäristönäkökulman mukaan tuominen 1980-luvulla. Alakohtaisesti RCM-periaatteiden soveltamisessa löytyy eroja, etenkin järjestelmän mallinnustarkkuuden osalta. Alakohtaisista eroista huolimatta peruseriaatteet kaikissa RCM-konsepteissa ovat edelleen samat kuin alkuperäisessä siviili-ilmailun tarpeisiin kehitetyssä konseptissa. [3]

5.2 RCM-analyysin laatiminen

RCM-analyysin laatimiseen ei ole yhtä vakiintunutta tapaa vaan analyysin laatimisessa tulee huomioida analyysin kohteena olevan järjestelmän ominaispiirteet. Järjestelmäkeskeisyyden vuoksi luotettavuuskeskeisessä kunnossapidossa analyysi aloitetaan poikkeuksetta määrittelemällä järjestelmä ja mahdolliset osajärjestelmät. Kuva 5.1 esittää RCM-

analyysissä käytettävän hierarkian, jossa osajärjestelmille määritellään mahdollisesti vioittuvat toiminnot sekä näille mahdolliset vikamuodot.



Kuva 5.1 RCM-analyysissä käytettävä hierarkinen jaottelu.

Sovelluskohteesta riippumatta RCM-analyysi sisältää yleensä seuraavat vaiheet:

1. Järjestelmän ja osajärjestelmien määrittely
2. Toimintojen ja toimintojen vikaantumisen määrittely
3. Vikamuotojen määrittely
4. Vikojen vaikutusten arviointi
5. Kunnossapitotehtävien valinta
6. Tulosten vaikutusten seuranta

Analyysin luotettavuuden kannalta oleellinen vaihe on myös ennen varsinaisen analysointityön aloittamista suoritettava tiedonhankinta. Analyysiä varten on kerättävä mahdollisimman paljon tietoa järjestelmän toimintaan ja vikaantumiseen vaikuttavista asioista.

5.2.1 Järjestelmän ja osajärjestelmien määrittely

RCM-analyysin ensimmäinen askel on määrittellä tarkasteltava järjestelmä sekä siihen kuuluvat osajärjestelmät. Osajärjestelmät määritellään seuraavasti [2]:

- Osajärjestelmä toteuttaa järjestelmän näkökulmasta ainakin yhden toiminnon
- Osajärjestelmät muodostavat yhdessä järjestelmän
- Osajärjestelmien väliset rajapinnat ovat tarkasti määritellyt
- Osajärjestelmät linkittyvät toisiinsa rajapintojen avulla
- Osajärjestelmien rajaukset eivät saa mennä päällekkäin

Järjestelmän toiminnan kannalta osajärjestelmät voidaan kuvata rinnan tai sarjassa. Rinnakkain olevat osajärjestelmät lisäävät järjestelmän redundanssia, sillä toiminto on järjestelmän käytettävissä niin kauan, kun ainakin yksi osajärjestelmä käytettävissä [28]. Sarjassa olevat osajärjestelmät ovat haavoittuvaisempia, sillä yhdenkin osajärjestelmän toimimattomuus aiheuttaa koko sarjan toimimattomuuden.

5.2.2 Toimintojen ja toimintojen vikaantumisen määrittely

Kun osajärjestelmät on määritelty ja tiedetään mitä rajapintojen läpi kulkee, keskitytään osajärjestelmien suorittamiin toimintoihin. Toimintojen määrittelytarkkuudessa tulee huomioida haluttu RCM-analyysin tarkkuus sekä mielekkyys kunnossapidolle. Esimerkiksi polkupyörän ketjun yksittäisen lenkin tarkastelu ei ole kunnossapidon kannalta oleellista, sillä kunnossapitotehtävien mielekäs taso on ketju kokonaisuudessaan. RCM-analyysin onnistumisen kannalta onkin ensiarvoisen tärkeää, että määriteltyihin toimintoihin voidaan kohdistaa kunnossapitotehtäviä. [2]

Toimintojen vikaantumisen määrittely on RCM-analyysin kannalta tärkeää, sillä analyysi tähtää nimenomaan toimintojen vikaantumisen estämiseen oikeanlaisilla kunnossapitotehtävillä. Toimintojen vikaantumisen määrittelyssä keskitytään nimenomaan toimintoihin, ei laitteisiin. Toiminnon vikaantuminen määritellään kyvyttömyytenä toteuttaa käyttäjän vaatimukset tietyssä toimintaympäristössä. RCM-analyysin kannalta onkin tärkeää selvittää toiminnon vaatimukset suorituskyvyille. Samalle laitteelle voidaan asettaa eri toimintaympäristöissä erilaisia vaatimuksia, joten pelkkää laitetta tarkastelemalla ei voida määrittää toiminnon vikaantumista. [2]

5.2.3 Vikamuotojen määrittely

Toiminnallisten vikojen määrittelyn jälkeen siirrytään määrittelemään kullekin toiminnalliselle vialle vikamuodot. Vikamuodolla tarkoitetaan mitä tahansa tapahtumaa, joka johtaa toiminnalliseen vikaan [28]. Vikamuotojen tarkastelussa siirrytään laitetasolle, jossa tarkastellaan laitteiden vaikutusta osajärjestelmän sisäiseen toimintaan. Jokaisen toiminnallisen vian kohdalla tutkitaan, minkä laitteen tai laitteiden hajoaminen johtaa osajärjestelmän toiminnalliseen vikaan ja mikä aiheutti laitteen vikaantumisen.

Kuten edellä mainittiin, kunnossapito tähtää toiminnallisten vikojen estämiseen, joten käytännön kunnossapito on kohdistettava toimintojen vikamuotoja vastaavaksi. Esimerkiksi, jos polkupyörää on raskas polkea, vika voi johtua ketjun voitelun puutteesta, johon oikea kunnossapitotehtävä on ketjun voitelu. Vikamuotojen analysoinnin laiminlyönti vähentää ehkäisevän kunnossapidon tehokkuutta ja lisää korjaavan kunnossapidon kustannuksia, joten etenkin yleisimpien vikamuotojen analysointiin kannattaa suunnata resursseja.

5.2.4 Vikojen vaikutusten arviointi

Vikojen vaikutusta arvioidaan vika- ja vaikutusanalyysin (FMEA, Failure Mode and Effects Analysis) avulla. Vika- ja vaikutusanalyysin soveltamiseksi on tunnettava vikamuodot, joista jokaisen vaikutus arvioidaan. Vaikutusten arvioinnissa tulisi huomioida ainakin seuraavat asiat [28]:

- Mistä tiedetään, että jokin vikamuoto on toteutunut?
- Millaisia turvallisuuteen ja ympäristöön liittyviä uhkia vika aiheuttaa?
- Millä tavoin vika vaikuttaa käyttöön?
- Mitä fyysisiä vaurioita vika aiheuttaa?
- Mitä on tehtävä, jotta vika saadaan korjattua?

Käyttötilanteessa vikamuodon tunnistamiseksi tarvitaan tieto vikamuodon tunnistustavasta. Tunnistustapa voi olla esimerkiksi varoitusvalo, savu tai ääni. Suojalaitteiden vikamuotoja ei voida todeta tavallisessa käyttötilanteessa, joten niiden vika- ja vaikutusanalyysissä on huomioitava suojalaitteen vian vaikutukset suojattavan laitteen vikaantumisessa. Mikäli vikamuoto aiheuttaa turvallisuus- tai ympäristöriskin, tulee nämä kirjata vika- ja vaikutusanalyysiin. Analyysissä pitää myös tarkastella rikkooko vikamuoto toteutuessaan turvallisuus- ja ympäristömääräyksiä.

Osa vioista ei vaikuta käyttöön mitenkään ja osalla vioista vaikutus voi olla todella merkittävä, osalla vioista taas ainoa vaikutus on muiden vikojen todennäköisyyden kasvattaminen. Sähköverkkojen tapauksessa vioilla voi olla myös merkittävät seurannaisvaikutukset, pahimmillaan suurhäiriö. Käyttöön liittyvien seurausten lisäksi on huomioitava millaisia fyysisiä vaurioita vikamuoto voi aiheuttaa. Vaurioiden perusteella voidaan arvioida varaosavaraston laajuutta ja sijaintia sekä korjaustoimenpiteissä tarvittavan henkilöstön määrää. Kun tiedetään mitä vian korjaaminen vaatii ja tarvittavat resurssit ovat nopeasti käytettävissä, saadaan vian vaikutusta käyttöön vähennettyä.

5.2.5 Kunnossapitotehtävien valinta



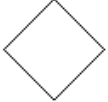
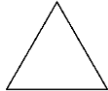
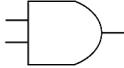


Kun vikamuodot ja niiden seuraukset on listattu, voidaan siirtyä kunnossapitotehtävien valintaan. Kunnossapitotehtävien valinta toteutetaan huomioiden luvussa 4 esitetyt kunnossapidon peruserätykset.

5.3 Vikapuuanalyysi

RCM-analyysin tuloksia on mahdollista jatkojalostaa vikapuuanalyysin avulla. Vikapuuanalyysi (Fault Tree Analysis, FTA) on menetelmä, jolla voidaan tarkastella vikojen toiminnallisia suhteita. Vikapuuanalyysi tarjoaa graafisen tavan esittää huipputapahtuman toteutuminen perustapahtumien keskinäisten suhteiden avulla. Huipputapahtumaksi kutsutaan järjestelmän epätoivottua tilaa, jonka toteutumisesta vikapuuanalyysissä tutkitaan.

Kukin vikapuu on räätälöity tiettyä huipputapahtumaa varten, joten yksittäinen vikapuu ei välttämättä kuvaa koko järjestelmän vikaantumista. Vikapuuhun valitaan huipputapahtuman kannalta oleelliset perustapahtumat eli vikamuodot. Vikamuotojen keskinäiset suhteet mallinnetaan loogisilla operaattoreilla, joiden avulla huipputapahtuman ja perustapahtumien välille muodostuu välitapahtumia. Perustapahtumille määritellyt esiintymistodennäköisyydet ja perustapahtumien väliset loogiset operaattorit määrittelevät välitapahtumien todennäköisyyden, ja lopulta myös huipputapahtuman todennäköisyyden. Vikapuu voidaan kuvata myös matemaattisessa muodossa Boolean algebraa käyttäen. Vikapuuanalyysin graafisessa esityksessä yleisimmin käytetyt symbolit on esitetty taulukossa 5.1. [32]

Taulukko 5.1 Vikapuuanalyysissä yleisimmin käytettävät symbolit.

| | | |
|---|---------------------------|---|
|  | Huippu- tai välitapahtuma | Tapahtuma, johon loogisten porttien ulostuloista päädytään |
|  | Perustapahtuma | Vikatapahtuma, jolle on määritetty todennäköisyys |
|  | Kehittämätön tapahtuma | Vikatapahtuma, jota ei ole vikapuussa kehitetty syvemmälle |
|  | Siirtymä | Kuvaa siirtymää vikapuun alemmalle hierarkiatasolle graafisessa esityksessä |
|  | JA-portti | $X = A \cdot B$ |
|  | TAI-portti | $X = A + B$ |
|  | $K \setminus N$ -portti | Tosi, jos $>K \setminus N$ tosia |

Vikapuuanalyysin lähtötiedoiksi tarvitaan analysointitarkkuuden kannalta riittävät tiedot järjestelmän toiminnasta ja laitteista. Esimerkiksi riittävällä tarkkuudella toteutettu RCM-analyysi tarjoaa hyvän pohjan vikapuuanalyysin suorittamiselle. Vikapuuanalyysin kannalta haastavin osuus on luotettavuuslaskenta, koska vikaantumistodennäköisyyksien arviointiin liittyy monesti suuria epävarmuustekijöitä. Luotettavuuslaskelmien tuloksia tulee tarkastella hyvin kriittisesti ja suuntaa-antavasti. Kenties suurin saatava hyöty vikapuuanalyysistä on vikaantumiseen johtavat minimikatkosjoukot ja muut kvalitatiivisen tutkimuksen lopputulokset.

6. TUTKIMUKSEN LÄHTÖAINEISTO

Työn lähtömateriaali kerättiin Fingridin tietojärjestelmistä, Fingridin aiemmin toteuttamista selvityksistä sekä asiantuntijalausunnoista. Materiaali koostettiin pääasiassa seuraavista lähteistä:

- Elnet (omaisuudenhallinnan, kunnossapidon, suunnittelun ja käytön tietojärjestelmä)
- Basware eOffice (laskujen käsittelyn ja arkistoinnin tietojärjestelmä)
- Fingridin asiantuntijoiden laatimat siirtokyky- ja siirtotarveanalyysit
- Fingridin ja Nokian Capacitorsin vuonna 2005 sarjakondensaattoreille laatima RCM-analyysi
- Sarjakondensaattorien tekninen dokumentaatio
- Sarjakondensaattorien huolto-ohjelmat
- Asiantuntijalausunnot (Fingrid ja laitevalmistajat)

6.1 Laitteiden tiedot ja vikailmoitukset Elnetissä

Työssä käytetyt sarja- ja rinnakkaiskondensaattorien perustiedot on tallennettu Elnetiin, joka on Fingridin käyttöön räätälöity omaisuudenhallinnan tietojärjestelmä. Elnetin käyttöönotto tapahtui vuonna 1994 [4] ja sen vaiheittainen korvaaminen Elvis-tietojärjestelmällä on käynnissä. Työn kannalta Elnetin kiinnostavat sovellukset ovat laiterekisteri sekä laiteviat.

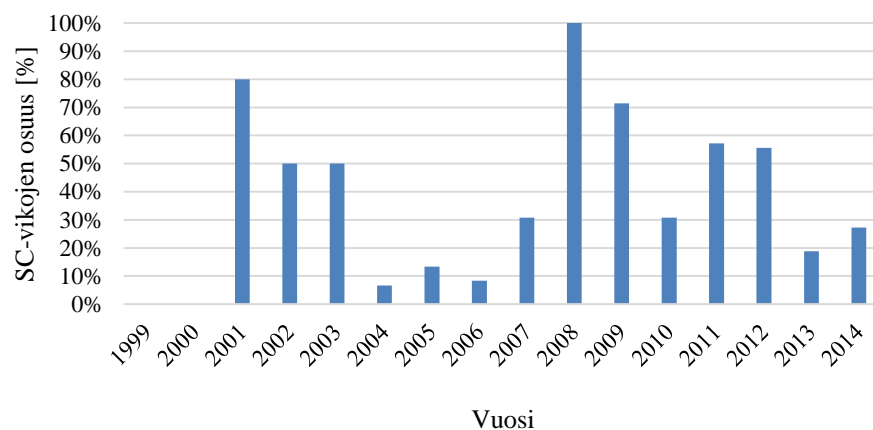
Sähköasemalaitteiden laitetiedot on tallennettu laiterekisteriin, joka sisältää laitteiden yleistietojen lisäksi laitteiden osalaiteluettelot, tekniset tiedot, tilaustiedot sekä historia-tiedot. Laiterekisterissä laitteet on ryhmitelty jännitetason ja sähköaseman mukaan hierarkkiseen rakenteeseen.

Diplomityön kannalta Elnetin kiinnostavin sovellus on laiteviat. Laitevikailmoituksiin on kirjattu voittuneen laitteen yksilöivien tunnisteiden lisäksi seuraavat asiat:

- havainnointiaika
- ympäristöolosuhteet
- vioittunut osa
- havainnointitapa
- vikaselostus
- vian vaikutus, kesto ja vakavuus
- korjausselostus

Laitevikailmoitukset on Elnetissä luokiteltu vakavuusasteen mukaan neljään ryhmään: *major*, *minor*, *havainto* ja *ei laitevikaa*. Havainto ja ei laitevikaa ryhmään luokitellut laitevikailmoitukset kuvaavat alkavia vikoja, kuten laitteessa havaittua pintaruostetta. Major ja minor luokitellut vikailmoitukset kuvaavat jo syntyneitä vikoja. Major luokitellut viat ovat vakavia, keskeytyksen aiheuttaneita tai vikoja, jotka vaativat pikaisia toimenpiteitä. Minor-viat ovat lievempiä vikoja, jotka eivät vaadi välittömiä toimenpiteitä. Minor-viaksi lasketaan kaikki poikkeamat laitteen normaaleista toiminta-arvoista.

Elnetiin on tallennettu noin 500 sarja- ja rinnakkaiskondensaattoreille kohdistettua laitevikailmoitusta, jotka jakautuvat puoliksi sarja- ja rinnakkaiskondensaattorien välillä. Sarjakondensaattoreille kohdistetut laitevikailmoitukset ovat vuosilta 1998–2015 ja rinnakkaiskondensaattoreille vuosilta 1983–2013. Työn kannalta laitevikailmoituksista kiinnostavia ovat kaikki sarjakondensaattoreille kohdistetut viat sekä rinnakkaiskondensaattorien kondensaattoriyksiköille kohdistetut viat, joita on yhteensä 312 kappaletta. Kuvassa 6.1 on esitetty sarjakondensaattorivikojen osuus kaikista häiriöön johtaneista primäärilaitteivioista.



Kuva 6.1 Sarjakondensaattorivikojen osuus kaikista häiriöön aiheuttaneista primäärilaitteiden laitevioista (1999–2014).

Kuvasta nähdään, että sarjakondensaattoriviat ovat ylliedustettuina suhteessa laitekannan kokoon eikä sarjakondensaattorien luotettavuus ole ollut muiden primäärilaitteiden tasolla.

6.2 Sarjakondensaattorien kunnossapitokustannukset

Työssä käytetyt kunnossapitokustannukset haettiin eOfficesta, joka on Fingridin laskujen käsittelyyn ja arkistointiin käyttämä tietojärjestelmä. eOfficesta haettiin kaikki sarjakondensaattoreille kohdistetut laskut, joiden työnumerot viittasivat sähköasemien tai relesuojauksen kunnossapitoon. Kyseiset työnumerot sisälsivät seuraavat alemman tason tarkenteet:

- määräaikainen kunnossapito
- viankorjaukset

- kunnossapitohankkeet
- erikoiskunnossapito
- suunnittelu ja kehittäminen
- koestukset ja mittaukset
- huollot ja suunnitellut korjaukset

Vanhimmat eOfficeen tallennetut sarjakondensaattoreille kohdistetut kunnossapitokustannukset olivat vuodelta 2002 ja uusimmat vuodelta 2015. Työssä tarkastelu kuitenkin rajattiin kunnossapitokustannusten osalta vuosille 2002–2014, jotta kustannuksia pystyttiin vertailemaan täysien kalenterivuosien osalta. Eri vuosille kohdistettujen kustannusten vertailemisen mahdollistamiseksi kustannukset korjattiin kustannusten laskutusvuoden tammikuun rakennuskustannusindeksillä (2000 = 100) [33].

6.3 Verkkovaikutuksista aiheutuvat vastaostotarpeet

Työtä varten kehitettiin menetelmä, jolla sarjakondensaattorin ohituksesta aiheutuvan haitan suuruusluokkaa pystytään arvioimaan. Menetelmäksi valikoitui kolmiportainen toteutus, jonka ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin sarjakondensaattorin ohituksen vaikutusta siirtokykyyn ja toisessa vaiheessa arvioitiin tulevaisuuden siirtotarpeita. Tämän jälkeen siirtokyky- ja siirtotarveanalyysit yhdistämällä päästiin arvioimaan ohituksesta aiheutuvan haitan suuruusluokkaa. Valintaperusteina menetelmän käytölle oli yksinkertainen toteutus sekä riittävä tarkkuus suuruusluokkatarkasteluun. Menetelmää päätettiin soveltaa ehjän verkon tapauksessa laskentatilanteiden määrän rajoittamiseksi. Ehjällä verkolla tarkoitetaan tilannetta, jossa kaikki siirtoverkon johdot ovat käytettävissä. Menetelmä ei siis huomioi esimerkiksi verkossa olevia keskeytystilanteita, joten vastaostojen todennäköisyys voi kasvaa merkittävästi, jos huomioitaisiin myös verkon erilaiset käyttötilanteet. Ehjän verkon tapauksessa menetelmän suurimmat epävarmuustekijät liittyvät markkinamallin oletuksiin sähkömarkkinoiden kehityksestä.

Menetelmän soveltamista varten Fingridin asiantuntijat laativat siirtokyky- ja siirtotarveanalyysit. Siirtokykyanalyysi toteutettiin PSS/E -verkostolaskentaohjelmistolla ja siirtotarveanalyysi Pöyryn BID3 -markkinamallilla. Analyysien pohjana käytettiin tilannetta, jossa siirtokapasiteetin kannalta merkittävimmät lähitulevaisuuden investoinnit on toteutettu. Analyyseissä nykyisiin verkkomalleihin lisättiin Olkiluodon kolmas ydinvoimayksikkö, neljäs 400 kV:n P1-johto Hirvisuolta Pikkaralaan sekä Alajärven sähköaseman 400 kV:n kiskojärjestelmän muutos duplex- eli kaksikatkaisijajärjestelmäksi. Näin saadut verkko- ja kustannusvaikutukset ovat ajantasaisia, kun sarjakondensaattorien kunnossapidon mahdollisista muutoksista päätetään. Simulointivuodeksi valikoitui vuosi 2022, jota varten oli olemassa valmis markkinamalli. Analyysissä käytetyn vuoden pituus oli 8 760 tuntia. Siirtymiä normaaliajan ja kesäajan välillä ei huomioitu.

Sarjakondensaattorien ohitusten aiheuttamaa haittaa siirtokyvyille arvioitiin vertailemalla ehjän verkon tilannetta sarjakondensaattorien ohitustilanteisiin. Tarkastelu aloitettiin

määrittelemällä P1- ja RAC-leikkauksille vienti- ja tuontitilanteen siirtorajat verkon normaalissa käyttötilanteessa, jonka jälkeen sarjakondensaattorit asetettiin yksitellen ohitukseen ja laskettiin jokaisen ohitustilanteen uudet vienti- ja tuontirajat. Siirtokkyanalyysin tuloksena saatuja siirtorajoja käytettiin lähtötietona vastaostotarpeen arvioinnissa.

Siirtokkyanalyysin lisäksi ohituksen aiheuttaman vastaostotarpeen arviointia varten simuloitiin vuoden 2022 siirtotarpeet. Tulevien siirtotarpeiden ja sähkömarkkinoiden käyttäytymisen ennustamisessa sähkömarkkinatoimijat käyttävät yleisesti hyväkseen erilaisia markkinamalleja. Saatujen ennusteiden pohjalta pyritään esimerkiksi optimoimaan sähköntuotantoa ja suunnittelemaan tulevia verkkoinvestointeja. Lähtötietoina markkinamallit käyttävät tuotantolaitosten mallintamiseen liittyviä teknisiä ja taloudellisia tietoja, veden tulovirtaamia sekä kulutus- ja verkkotietoja. Ulostulona markkinamallit tarjoavat ennusteen erilaisten markkinatilanteiden vaikutuksista siirtoihin. Vertailemalla erilaisia verkkoratkaisuita samassa markkinatilanteessa, voidaan arvioida erilaisten ratkaisujen kansantaloudellista vaikutusta. [11]

Siirtotarveanalyysissä käytetty BID3 sähkömarkkinamalli on tarkoitettu lämpövoimakkeksen markkina-alueen analysointiin, jossa myös vesivoiman osuus on merkittävä [34]. Markkinamallissa lämpövoiman epälineaariset kustannuskomponentit, kuten käynnistyskustannukset on mallinnettu analyttisesti, kun taas vesivoiman osalta mallinnus on aggregoitua. BID3 simuloi markkinatilanteen muihin malleihin verrattuna tarkalla tuntiresoluutiolla, jolloin ajan suhteen vaihteleva tuotanto voidaan huomioida tarkemmin.

Vastaostotarpeen arvioimista varten markkinamallin tuntiresoluutio oli välttämätön, koska sarjakondensaattorien keskimääräinen ohitus aika osoittautui laitevikailmoitusten perusteella noin 16 tunnin mittaiseksi. Työtä varten markkinamallilla laskettiin vuoden jokaisen tunnin vastaostotarve kolmella erilaisella "vesivuodella". Vesivuodella kuvataan vesivoimaloiden tulovirtaaman suuruutta, joka vaikuttaa suoraan vesivoimatuotannon suuruuteen ja välillisesti P1-siirron suuruuteen. Analyysissä käytetyt vesivuodet olivat kuiva, sateinen ja normaali. Todennäköisyys normaalille vesivuodelle arvioitiin olevan 80 %. Kuivalle ja sateiselle vesivuodelle esiintymistodennäköisyydeksi kummallekin arvioitiin 10 %. Vesivuosien esiintymistodennäköisyydet perustuvat Fingridin historiadaan.

Työssä vastaostotarve muodostettiin siirtokky- ja siirtotarveanalyysien pohjalta vertaamalla ohituksen seurauksena alentunutta siirtokkyä kyseisen ajanjakson simuloituun siirtotarpeeseen. Mikäli markkinamallin antama P1-siirto ylitti kaupallisen siirtokapasiteetin rajan verkon normaalitilassa, merkittiin P1-siirron suuruudeksi kaupallisen siirtokapasiteetin yläraja. Tällöin vastaostettavan energian määrässä näkyy ainoastaan sarjakondensaattorin ohituksesta aiheutuvat vastaostotarpeet. Sarjakondensaattorin ohitusta vastaostotarpeen määrittelyssä kuvattiin kolmella erisuuruuisella P1-siirtokapasiteetin rajoituksella. Rajoitukset olivat suuruudeltaan 3–14 % siirtokapasiteetista, jolloin rajoituksilla pystyttiin kuvaamaan eri sarjakondensaattorien ohitusten aiheuttamaa siirtokyvyn

laskua. Ohituksen kestoina käytettiin vikatilastojen muodostamisen yhteydessä saatua ohituksen keskimääräistä kestoja sekä viikon ja kuukauden mittaisia ohituksia kuvaamaan vaikeasti korjattavia vikoja. Ohituksen vaikutus mallinnettiin tarkasteluvuoden jokaisena tuntina. Analyysissä siirtojen hallinta toteutettiin kokonaisuudessaan vastaostoilla, eikä P1-rajoituksia siirretty hinta-alueiden rajalle.

6.4 Sarjakondensaattorien komponentit ja huolto-ohjelmat

RCM- ja vikapuuanalyysissä käytetyt komponenttitason tekniset tiedot selvitettiin laitevalmistajien toimittamasta teknisestä dokumentaatiosta. RCM-analyysissä käytetyt kunnossapitotehtävät perustuvat Fingridin tämänhetkisiin sarjakondensaattorien huolto-ohjelmiin. Komponenttien välisten suhteiden vaikutusta vikaantumiseen selvitettiin vuonna 2005 toteutetun RCM-analyysin, vikailmoitusten ja asiantuntijakeskusteluiden avulla. Komponenttien vikaantumiskäyttäytymisen selvittämiseksi Elnet-laitevikailmoituksista laadittiin selvitystyötä tukevia vikatilastoja.

RCM-analyysi ei itsessään ota kantaa komponenttien tai järjestelmän vikaantumistodennäköisyyteen, joten työssä selvitettiin vikapuuanalyysin soveltuvuutta sarjakondensaattorien ohittumisen todennäköisyyden arvioinnissa. Vikapuuanalyysi valikoitui selvitettäväksi menetelmäksi, sillä se huomioi komponenttikohtaiset vikaantumistodennäköisyydet sekä komponenttien väliset suhteet. Lisäksi vikapuuanalyysiä oli käytetty aiemmin Fingridin tasasähköyhteyksien luotettavuustarkasteluissa, joten Fingridissä oli jo tarvittava osaaminen ja ohjelmisto menetelmän soveltamista varten. Vikapuuanalyysin tuloksia oli tarkoitus käyttää kunnossapidon suunnittelun lisäksi sarjakondensaattoritarjouksissa ilmoitettujen vikaantumistodennäköisyyksien realistisuuden arvioinnissa. Työssä vikapuuanalyysi toteutettiin RiskSpectrum PSA -riskienhallintaohjelmistolla, jota käytetään muun muassa ydinvoimaloiden riskianalyseissa. [35]

7. TUTKIMUKSEN TULOKSET

7.1 RCM-analyysi

RCM-analyysin päivitystä varten sarjakondensaattoreille kohdistetut vikailmoitukset analysoitiin yksitellen. Yksittäisistä vikailmoituksista pyrittiin selvittämään vioittunut komponentti ja vikamuoto sekä mahdolliset ennusmerkit vikaantumisesta. Vikailmoituksista saatuja tietoja verrattiin vuoden 2005 RCM-analyysin tuloksiin. Mikäli toteutuneiden vikojen ja RCM-analyysin välillä havaittiin eroavaisuuksia, korjattiin analyysiä vastaamaan toteutuneita vikoja. Vanhasta analyysistä puuttuneiden vikamuotojen osalta suoritettiin luvussa 5.2 esitetyn mukainen arviointi vikamuotojen sijoittamisesta RCM-analyysiin.

Vikailmoitusten tarjoaman tiedon pohjalta osajärjestelmien määrittelyä muutettiin siten, että RCM-analyysi laajeni koskemaan myös kaukokäyttöä ja kytkinlaitteita. Vanhassa RCM-analyysissä kyseisiä osia ei laskettu kuuluvaksi sarjakondensaattorijärjestelmään. Vikailmoitusten perusteella kaukokäytöllä ja kytkinlaitteilla on kuitenkin suora vaikutus sarjakondensaattorin käytettävyyteen, joten nyt niiden ottaminen mukaan analyysiin koettiin perustelluksi.

Kytkinlaitteiden osalta uusiksi toiminnoiksi määriteltiin tilatiedon siirtäminen sekä sarjakondensaattorin erottaminen ja kytkeminen. Tilatiedon siirtäminen lisättiin osajärjestelmän toiminnoksi, koska vikailmoitusten mukaan ongelmat katkaisijan tilatietojen välittämisessä suojaus- ja ohjausjärjestelmälle olivat aiheuttaneet johtokatkaisijoiden virhelaukaisun. Sarjakondensaattorin kytkemisessä ja erottamisessa verkosta taas havaittiin ongelmia, joiden seurauksena kytkentätoimenpiteet olivat pitkittyneet. Pitkittyneiden kytkentätoimenpiteiden seurauksena sarjakondensaattorien ohitusajat olivat pidentyneet. Joissain tapauksissa kytkinlaitteiden aiheuttamien ongelmien korjaaminen oli vaatinut jopa johtokeskeytyksen

Kaukokäytön tehtävänä on välittää tietoa valvomon ja valvottavan järjestelmän välillä, joten kaukokäyttöön toiminnoiksi määriteltiin tiedon välittäminen sarjakondensaattorin ja valvomon välillä. Vikailmoitusten perusteella kaukokäytön vikojen seurauksena valvomon tullut tieto oli ollut virheellistä tai tietoa ei ollut tullut ollenkaan. Yhteysvikojen seurauksena myöskään sarjakondensaattorin ohjaaminen valvomosta käsin ei ollut ollut mahdollista. Vikojen seurauksena varallaolija oli jouduttu lähettämään paikan päälle korjaamaan yhteydet.

Kytkinlaitteiden osalta ehkäisevät kunnossapitotehtävät RCM-analyysin uusille vikamuodoille oli jo määriteltynä nykyisissä huolto-ohjelmissa. Kaukokäytön osalta kunnos-

sapito on korjaavaa eikä ennakoivaa kunnossapitoa suoriteta. Kaukokäytön vikaantumisen havaitseminen ennen toiminnallista vikaa on haastavaa, joten ennakoivalla kunnossapidolla ei pystytä kustannustehokkaasti ehkäisemään vikoja.

Vuoden 2005 RCM-analyysissä mukana olleisiin osajärjestelmiin *lavan suurjännitelaitteet* ja *elektroniikka* ei kohdistunut lisääntyneen vikadatan myötä suuria muutostarpeita. Edellisen RCM-analyysin tekemisen jälkeen Fingrid on ottanut käyttöön CapThor-laitteella suojattuja sarjakondensaattoreita, joten CapThor lisättiin kipinävälille vaihtoehdokseksi laitteeksi lavan suurjännitelaitteisiin.

Elektroniikan osalta vuonna 2009 hankitut ABB:n sarjakondensaattorit eroavat jonkin verran Nokian Capacitorsin (NC) sarjakondensaattoreista. Aiempi RCM-analyysi oli käytännössä räätälöity NC:n sarjakondensaattoreille, joten analyysiä jouduttiin yleistämään. Yleistys toteutettiin siten, että komponenttitaso tarkastelusta siirryttiin kohti funktionaalisen tason tarkastelua. Aiempaa RCM-analyysiä myös muutettiin vioista tehtyjen havaintojen mukaiseksi. Tärkein havainto elektroniikkajärjestelmän osalta oli, että kahdennuksesta huolimatta toisen järjestelmän vika voi johtaa ohitukseen. Vikatilastoista havaittiin myös kahdennettujen signaalinsiirron valokuitujen yhtäaikainen katkeaminen, joka johti ohitukseen. Kahdennuksen ei siis voi olettaa vähentävän ohituksen todennäköisyyttä kaikissa tilanteissa. Kahdennuksen suurin hyöty onkin luvussa 7.2 esitetävän ohitusajan lyheneminen. Toisen suojausjärjestelmän ollessa käyttökuntoinen, voidaan sarjakondensaattori kytkeä takaisin verkkoon ja korjata vioittunut suojausjärjestelmä sarjakondensaattorin ollessa verkossa.

RCM-analyysin päivitys tilastoiduilla vioilla ei juurikaan tarjonnut lisätietoa mahdollisista uusista vikamuodoista tai muutoksista kunnossapitotehtävien valinnassa. Sen sijaan päivitysprosessi osoitti yleisimpien vikojen ennaltaehkäisyn olevan vaikeaa, joten viankorjausvalmiuteen tulisi kiinnittää entistä enemmän huomiota. Viankorjausvalmiutta parantamalla vioista aiheutuvien ohitusten kestoja pystyttäisiin lyhentämään ja näin vähentämään ohituksista aiheutuvia verkkovaikutuksia. Viankorjausvalmiuden parantamiseksi peruskunnossapitäjiä tulisi kouluttaa niin, että he pystyisivät vähintään palauttamaan sarjakondensaattorin takaisin verkkoon vian ollessa kahdennetussa järjestelmässä. Käytössä olevia ympärivuorokautisia valmistajien puhelintukia hyödyntäen peruskunnossapitäjät voisivat mahdollisesti myös suorittaa korjaavaa kunnossapitoa sarjakondensaattoreille. Lisäksi sähköasemilla tulisi olla riittävä määrä varaosia yleisimpien vikojen korjaamiseksi. RCM-analyysiä varten analysoiduista vikailmoituksista muodostettiin vikatilastoja, joista selvisi kunnossapidon kannalta haastavat kohteet. Vikatilastot on esitetty luvussa 7.2. Luvussa 7.3. on esitelty RCM-analyysin pohjalta muodostettu vikapuuanalyysi, jonka tarkastelu rajoittui kvalitatiiviselle tasolle riittävän tarkan luotettavuusdatan puutteen vuoksi. Päivitetty RCM-analyysin päätöslomake on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä E. Päivitykset vuoden 2005 RCM-analyysin on merkattuina punaisella värillä.

7.2 Vikatilastot

Vuosien 1997–2014 vikatilastoista löytyi 236 sarjakondensaattoreille kohdistettua vikailmoitusta, joista varsinaisiksi vioiksi kirjattuja oli 223. Suurin osa vioista osoittautui minor-vioiksi, eli ei välittömiä toimenpiteitä vaativiksi vioiksi. Noin neljännes kaikista vikailmoituksista oli kirjattu keskeytyksen aiheuttaneeksi major-viaksi. Vikailmoitusten tarkempi jaottelu vakavuusasteen mukaan on esitettyä taulukossa 7.1.

Taulukko 7.1 Sarjakondensaattorien laitevikailmoitusten jakauma vakavuusasteittain (1997–2014).

| Laitevian aste | Lukumäärä [kpl] | Osuus [%] |
|----------------|-----------------|-----------|
| Ei laitevika | 2 | 0,9 |
| Havainto | 11 | 4,7 |
| Minor | 163 | 69,1 |
| Major | 60 | 25,4 |
| Yhteensä | 236 | 100,0 |

Ei laitevikaa -luokitellut laitevikailmoitukset sisältävät tiedon huoltojen yhteydessä hajonneista komponenteista. Havainto -luokituksen saaneet laitevikailmoitukset sisältävät nimensä mukaisesti havaintoja sarjakondensaattorien kunnosta. Havainnoiksi laskettiin esimerkiksi laitteiden tunnistekilpien huono kunto.

Major- ja minor-vikojen tarkempi analysointi osoitti, että vikojen aiheuttajat ovat keskittyneet hyvin vahvasti järjestelmän tiettyihin osiin. Ylivoimaisesti suurin osa major- ja minor-vioista on aiheutunut suojaus- ja ohjausjärjestelmästä. Varistorien ja kondensaattoriyksiköiden suuren määrän vuoksi, myös näiden osien vikaantumiset nousevat esiin tilastossa. Vikojen aiheuttaneiden komponenttien jakauma on esitetty taulukossa 7.2.

Taulukko 7.2 Sarjakondensaattorien osien vikajakaumat (1997–2014).

| Vioittunut osa | Major-viat | | Minor-viat | | Viat yhteensä | |
|-----------------------|------------|-------|------------|-------|---------------|-------|
| | lkm | % | lkm | % | lkm | % |
| Kipinäväli | 2 | 3,3 | 5 | 3,1 | 7 | 3,1 |
| Kondensaattoriyksikkö | 0 | 0,0 | 16 | 9,8 | 16 | 7,2 |
| Rakenne | 0 | 0,0 | 3 | 1,8 | 3 | 1,4 |
| Suojaus ja ohjaus | 53 | 88,3 | 104 | 63,8 | 157 | 70,4 |
| Tukieristin | 0 | 0,0 | 9 | 5,5 | 9 | 4,0 |
| Vaimennuskela | 0 | 0,0 | 3 | 1,8 | 3 | 1,4 |
| Valopilari | 0 | 0,0 | 8 | 4,9 | 8 | 3,6 |
| Varistori (MOV) | 5 | 8,3 | 12 | 7,4 | 17 | 7,6 |
| Virtamuuntaja | 0 | 0,0 | 1 | 0,6 | 1 | 0,5 |
| Luokittelematon | 0 | 0,0 | 2 | 1,2 | 2 | 0,9 |
| Yhteensä | 60 | 100,0 | 163 | 100,0 | 223 | 100,0 |

Major-vikojen esiintymisen osalta on tärkeää huomata, että viat ovat aiheutuneet ainoastaan kipinävälin, varistorien tai suojaus- ja ohjausjärjestelmän vikaantumisesta. Muiden osien vikaantumiset on pystytty havaitsemaan ennen sarjakondensaattorin toiminnalle kriittisen vian syntymistä. Esimerkiksi kondensaattoriyksiköiden 16 minor-vikaa ovat pieniä kyllästysnestevuotoja tai sulakepaloja, jotka oikein ajoitetulla kunnossapidolla eivät pääse aiheuttamaan ongelmia sarjakondensaattorin toiminnalle.

Suojaus- ja ohjausjärjestelmän osalta major-viat ovat aiheutuneet pääsääntöisesti lavatehonsyötön ja signaalinsiirron ongelmista sekä tarkemmin määrittelemättömistä suojauksen virhetoiminnoista. Yksi esimerkki suojaus- ja ohjausjärjestelmän virhetoiminnasta on kipinävälin virheellinen syttyminen. Kyseisissä virhetilanteissa suojaus- ja ohjausjärjestelmältä ei ole tullut ohituskäskyä, vaan kipinäväli on syttynyt mahdollisen häiriöpulssin tai muun tuntemattoman syyn takia. Suojaus- ja ohjausjärjestelmän minor-vikoja on aiheutunut signaalinsiirron ongelmista, virhetoiminnoista sekä piirikorttien rikkoutumista. Suojaus- ja ohjausjärjestelmän major- ja minor-vioista huomioitavaa on, että noin joka neljännen vian aiheuttaja on tuntematon.

Valopilareille kohdistetuista vioista seitsemän oli komposiittieristimen ja metallisen päätykappaleen välissä olevan posliinieristimen halkeamisia. Vastaavia ongelmia ei ollut havaittavissa valopilareissa, joissa eristin on kokonaan posliinia tai kokonaan komposiittia. (Kuva 7.1).



Kuva 7.1 Vasemmalla vioittunut komposiittieristeisen valopilarin posliininen liitokappale ja oikealla ehjä posliinieristeinen valopilari.

Sarjakondensaattoreissa ilmenneiden major-vikojen kesto on keskimäärin suhteellisen pitkä verrattuna viasta aiheutuneen ohituksen kestoan. Suojaus- ja ohjausjärjestelmän kahdennuksen ansiosta sarjakondensaattori pystytään kytkemään takaisin verkkoon, vaikka toisen järjestelmän vikaa ei vielä olisikaan korjattu. Toisin sanoen sarjakondensaattorin ohituksen kesto lyhenee, kun tarvittavat korjaustoimenpiteet voidaan tehdä sarjakondensaattorin ollessa verkossa. Vikailmoituksista laskettujen ohitusten kestojen keskihajonta on 35,7 tuntia, joten tilastollisesti tarkasteltuna ohitusten kestot vaihtelevat suuresti. Lyhimmillään sarjakondensaattorien ohitukset ovat olleet kestoltaan vain minuutteja, kun taas pisimmät ohitukset ovat kestäneet yli viikon. Minor-viat taas eivät vaadi

välittömiä kunnossapitotoimenpiteitä, joten korjaukset voidaan ajoittaa verkon kannalta vähiten haittaa aiheuttavaan hetkeen, esimerkiksi vuosihuoltojen yhteyteen. Minor-vikojen kesto onkin keskimäärin yli kuusinkertainen verrattuna major-vikoihin. Vikojen ja korjausten kestot on esitetty tarkemmin taulukossa 7.3. Ohituksen keskimääräisessä kestossa ei ole huomioitu pikajälleenkytkentöjä. Ohituksen keskimääräistä kestoja hyödynnetään luvussa 7.7 laskettaessa ohituksesta aiheutuvia vastaostotarpeita.

Taulukko 7.3 Sarjakondensaattorivikojen ja korjausten keskimääräiset kestot (1997–2014).

| Laitevian aste | Major | Minor |
|-----------------------|--------------|--------------|
| Vian kesto | 18 d | 116 d |
| Korjauksen kesto | 17 h 58 min | 28 h 24 min |
| Ohituksen kesto | 16 h 6 min | - |

Keskimääräiset vikataajuudet yksittäiselle sarjakondensaattorille saatiin laskettua jakamalla vikaantuneiden osien kokonaismäärät sarjakondensaattorien yhteenlasketuilla käyttövuosilla. Yksittäisen sarjakondensaattorin major-, minor ja kokonaisvikataajuus on esitetty taulukossa 7.4.

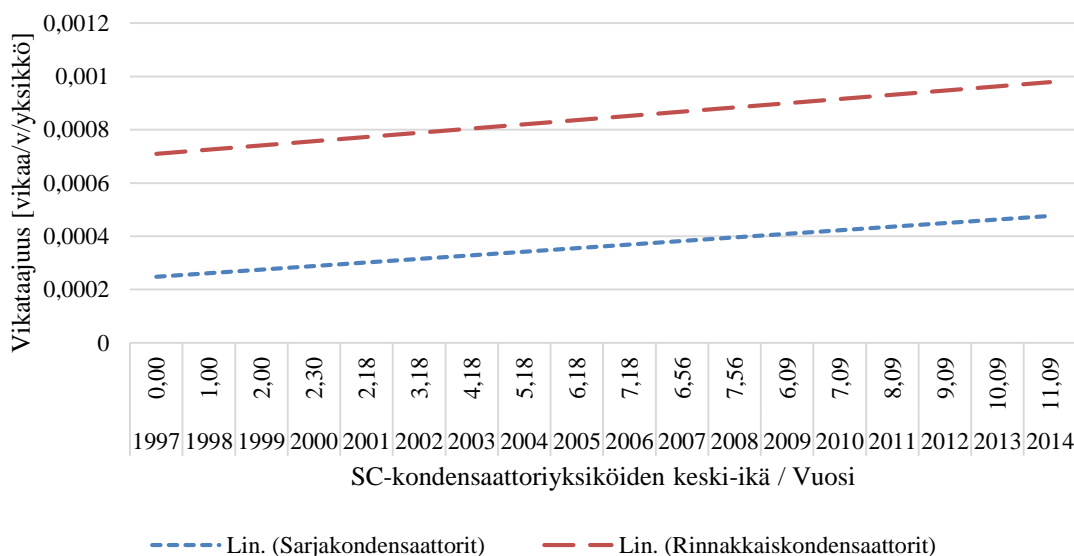
Taulukko 7.4 Keskimääräiset vikataajuudet yhdelle sarjakondensaattorille (1997–2014).

| Osaryhmä | Major-vikataajuus [vikaa/v] | Minor-vikataajuus [vikaa/v] | Kokonaisvikataajuus [vikaa/v] |
|-----------------------|--|--|--|
| Kipinäväli | 0,018 | 0,045 | 0,063 |
| Kondensaattoriyksikkö | 0,000 | 0,144 | 0,144 |
| Rakenne | 0,000 | 0,027 | 0,027 |
| Suojaus ja ohjaus | 0,477 | 0,937 | 1,235 |
| Tukieristin | 0,000 | 0,081 | 0,081 |
| Vaimennuskela | 0,000 | 0,027 | 0,027 |
| Valopilari | 0,000 | 0,072 | 0,072 |
| Varistori (MOV) | 0,045 | 0,108 | 0,153 |
| Virtamuuntaja | 0,000 | 0,009 | 0,009 |
| Luokittelematon | 0,000 | 0,018 | 0,018 |
| Yhteensä | 0,540 | 1,468 | 2,008 |

Vikataajuuksista voidaan laskea, että yksittäiselle sarjakondensaattorille sattuu ohitukseen johtava vika 1,9 vuoden välein. Pitkäkestoisia ohituksia, jotka vaativat sarjakondensaattorin manuaalisen takaisinkytkennän verkkoon tapahtuu keskimäärin 2,8 vuoden välein. Vastaavan vikataajuuden arvo on 0,360 vikaa vuodessa, jota hyödynnetään myöhemmin luvussa 7.7 arvioitaessa vuosittaisten vastaostojen todennäköisyyttä. Todennäköisin ohitukseen johtava vika on suojaus- ja ohjausjärjestelmän vika, joka tapahtuu keskimäärin 2,1 vuoden välein. Minor-vikojen esiintyminen on noin kolminkertainen määrä samassa

ajassa kuin major-vikoja. Minor vikoja esiintyy keskimäärin 8,2 kuukauden välein, joista niin ikään todennäköisin on suojaus- ja ohjausjärjestelmänvika. Suojaus- ja ohjausjärjestelmän major- ja minor-vikojen yhdistetty vikataajuus on 1,235 vikaa vuodessa, joten vikoja ilmenee keskimäärin 9,7 kuukauden välein. Kokonaisvikataajuus sarjakondensaattorilla on 2,008, joka vastaa yhtä vikaa puolessa vuodessa.

Sarjakondensaattorien pienen määrän ja suhteellisen nuoren laitekannan vuoksi ikääntymisen vaikutusta vikataajuuteen on vaikea arvioida. Kondensaattoriyksiköiden osalta vikataajuutta pystyttiin vertailemaan rinnakkaiskondensaattoreissa käytettyjen samanlaisien kondensaattoriyksiköiden vikataajuuksiin (Liite B). Sarjakondensaattoreissa käytettyjen kondensaattoriyksiköiden keski-ikä vuonna 2014 oli 11,09 vuotta ja rinnakkaiskondensaattoreissa 24,96 vuotta. Rinnakkaiskondensaattoreissa käytettyjen kondensaattoriyksiköiden vikataajuus oli 129 % korkeampi kuin sarjakondensaattoreissa, joten vikataajuuden kasvaminen sarjakondensaattorien ikääntyessä on mahdollista. Sarjakondensaattoreissa ja rinnakkaiskondensaattoreissa käytettyjen kondensaattoriyksiköiden vikataajuuden kehittyminen on esitetty kuvassa 7.2. Kuvaan ei ole merkitty rinnakkaiskondensaattoreissa käytettyjen kondensaattoriyksiköiden keski-ikä, koska jo käytöstä poistettujen kondensaattoriyksiköiden ikää ei ole tilastoitu. Vanhempaa laitekantaa omaavan energiayhtiö Pacific Gas and Electric Companyn tutkimusten mukaan 28 vuoden ikäiset sarjakondensaattoreissa käytetyt kondensaattoriyksiköt ovat kuitenkin keskimäärin vielä sähköisesti hyvässä kunnossa, eivätkä kondensaattoriyksiköt ole vielä lähellä elinkaarensa loppua [36].



Kuva 7.2 Sarjakondensaattoreissa ja rinnakkaiskondensaattoreissa käytettyjen kondensaattoriyksiköiden vikataajuuden kehittyminen vuosina 1997–2014 kuvattuna lineaarisin trendiviivoin.

Pohjoismaisella tasolla tarkasteltuna sarjakondensaattorien vikataajuudessa on suuria eroja. Taulukossa 7.5 esitettyjen maakohtaisten vikataajuuksien perusteella Ruotsissa sarjakondensaattoreiden major-vikojen vikataajuus on kolminkertainen Suomeen verrattuna. Norjassa major-vikojen ei ole tarkastelujakson aikana ilmennyt yhtään ja Islannissakin vikataajuus on 0,1. Syitä vikataajuuksien maakohtaisten eroavaisuuksiin ei tämän työn yhteydessä selvitetty.

Taulukko 7.5 Ohitukseen johtaneet sarjakondensaattoriviat (major) Suomessa, Islannissa, Norjassa ja Ruotsissa vuosina 2004–2013. [37]

| Maa | Laitteiden määrä 2013 | Vikojen määrä 2013 | Vikataajuus /laite | | Viat jaoteltuina aiheuttajan mukaan vuosilta 2004–2013 [%] | | | | | | |
|---------|-----------------------|--------------------|--------------------|-----------|--|-------------------------|--------------|------------------------|----------------|------|------------|
| | | | 2013 | 2004–2013 | Ukkonen | Muu ympäristöllinen syy | Ulkoisen syy | Käyttö ja kunnossapito | Tekninen laite | Muu | Tuntematon |
| | | | | | | | | | | | |
| Suomi | 9 | 3 | 0,333 | 0,500 | 0,0 | 2,5 | 5,0 | 7,5 | 47,5 | 0,0 | 37,5 |
| Islanti | 1 | 0 | 0,000 | 0,100 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Norja | 3 | 0 | 0,000 | 0,000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Ruotsi | 12 | 4 | 0,333 | 1,500 | 0,6 | 0,6 | 0,0 | 1,1 | 15,6 | 76,1 | 6,1 |
| Yht. | 25 | 7 | 0,280 | 0,921 | 0,5 | 1,4 | 0,9 | 2,3 | 21,3 | 62,0 | 11,8 |

Sarjakondensaattorien osalta vikaraportointi osoittautui epätarkaksi ja epäjohtonmukaiseksi. Vikatilastojen muodostaminen vikailmoituksista vaatii merkittävän määrän manuaalista työtä. Vikailmoituksista ei läheskään aina selvinnyt vian aiheuttajaa riittävällä tarkkuudella, joten kaikkea vioista mahdollisesti saatavaa tietoa ei tällä hetkellä kerätä talteen.

7.3 Vikapuuanalyysi

Sarjakondensaattorien vikaantumiskäyttäytymistä pyrittiin tarkastelemaan RCM-analyysin lisäksi Vikapuuanalyysillä. Vikapuuanalyysi toteutettiin RiskSpectrum PSA -ohjelmistolla. Vikapuuanalyysin tuloksena saatiin muodostettua graafinen esitys sarjakondensaattorissa esiintyvien vikojen vaikutuksesta sarjakondensaattorin toimintaan. Vikapuuanalyysin huipputapahtumaksi valittiin *Sarjakondensaattorin ohittuminen*, joka kuvaa major-vikaa. Vikapuussa kuvatut toimintojen vikaantumiset sekä vikamuodot mukailevat RCM-analyysistä saatuja tuloksia. Sarjakondensaattorin vikapuu on esitettyinä liitteessä C.

Muodostettu vikapuu on hierarkisesti hyvin matala. Jokainen vikapuussa esitetty alkutapahtuma johtaa joko suoraan tai redundattisuuden vähenemisen kautta huipputapahtumaan. Vikapuuanalyysin keskeisin havainto on, että toisiojärjestelmässä kahdennus ei välttämättä tarkoita järjestelmän vikaantumistodennäköisyyttä pienentävää JA-porttia. Vika toisessa toisiojärjestelmästä voi yksinään aiheuttaa sarjakondensaattorin ohituksen, joten kahdennusta kuvataan TAI-portilla.

Vikapuuanalyysin kvantitatiivinen analysoiminen sisälsi liian paljon epävarmuustekijöitä. Vikadatan vähäisen määrän ja laitekannan nuoren iän vuoksi vikaantumistodennäköisyyksien arviointia ei pystytty tekemään riittävän tarkasti, jotta saadut tulokset olisivat luotettavia. Myös laitevalmistajien vikatilastot takuuajan ulkopuolelta osoittautuivat puutteellisiksi, joten kokonaisvaltaisempien vikatilastojen laatiminen vaatisi laajaa yhteistyötä tilastoinnissa samaa laitekantaa omaavien verkkoyhtiöiden kesken. Virheellisen tiedon pohjalta tehdyt päätökset kunnossapidon kehittämiseksi mahdollisesti vain huonontaisivat tilannetta, joten analyysi jätettiin kvalitatiiviselle tasolle.

7.4 Kipinävälistä luopuminen

Fingridillä on ollut ongelmia kipinävälien virhetoimintojen kanssa, etenkin kahteen rinnakkaiseen siirtojohtoon asennetuissa sarjakondensaattoreissa. Sarjakondensaattorit ovat kärsineet ongelmista, joissa kipinäväli on syttynyt itsestään huomattavasti alhaisemmalla jännitteellä mitä kuuluisi. Näissä tilanteissa suojausjärjestelmältä ei ole tullut ohituskäskyä, vaan kipinäväli on syttynyt itseksensä ulkoisen häiriösignaalin tai muun syyn takia. Virheellisen toiminnan syytä selvitetään parhaillaan. Virhetoiminnon takia P1-leikkauksen siirtokyklaskelmissa on huomioitava kahden yhtäaikaisen ohituksen vaikutus siirtokapasiteettiin kunnes ongelma on korjattu. Toisin sanoen virhetoiminnon takia P1-leikkauksen siirtorajaa on jouduttu laskemaan.

Kipinävälistä luopumisen isoin hyöty on suojausjärjestelmän yksinkertaistuminen ja suojausjärjestelmän aiheuttamien ongelmien väheneminen. Pakkoliipaistavasta kipinävälistä luovuttaessa suojausjärjestelmästä poistuu jokaiselta vaiheelta trigatron, kytkentäkondensaattorit sekä lavalla sijaitseva kahdennettu pakkoliipaisujärjestelmä. CapThorista luovuttaessa taas päästään eroon kytkentäkondensaattoreista sekä ohjaus- ja valvontayksiköistä. Osa verkkoyhtiöistä onkin luopunut sarjakondensaattorien kipinäväleistä parantaakseen luotettavuutta [38].

Kipinävälille tilastoituja major-vikoja löytyy vain kaksi kappaletta, jotka ovat ylägrafiittipallon halkeamisia. Suojaus- ja ohjausjärjestelmän Major-vioiksi on tilastoitu viisi kipinävälin virheellistä syttymistä ja yksi halutun syttymisen jälkeinen virheellinen lukittu ohitus. Kipinävälistä johtuvia vikoja ei siis määrällisesti ole paljon, mutta jo virhetoiminnon uhka vaikuttaa siirtokyklaskelmiin.

Vian aikana varistorit absorboivat vian aiheuttaman energian, kunnes kipinäväli syttyy. Kipinävälistä luovuttaessa varistorit joutuvat absorboimaan energiaa ohituskatkaisijan toimintaan saakka. Katkaisijan toiminta-aika on noin 20–30 ms ja kipinävälin toiminta-aika vain noin 1 ms. Kipinävälistä luopumisen yhteydessä on siis lisättävä varistorien määrää, jotta vikaenergiaa pystyttäisiin absorboimaan riittävästi. Vanhojen sarjakondensaattorien tapauksessa varistorien määrää lisätessä tulee huomioida vanhojen varistorien toiminta-arvojen mahdollinen muuttuminen.

Perinteisesti on oletettu, ettei eri aikaan asennettuja varistoreja voida käyttää sarjakondensaattorien suojauksessa. Varistorien toiminta-arvojen on oletettu muuttuvan käytön myötä ja uusien varistorien asentaminen käytettyjen joukkoon aiheuttaisi ongelmia epätasaisen vikavirran jakautumisen takia. Varistoreiden lisääminen on siis käytännössä tarkoittanut vanhojen varistorien poistamista ja korvaamista suuremmalla määrällä uusia varistoreita. Vuonna 2015 julkaistun Darmstadtin teknillisen yliopiston tutkimuksen mukaan tutkitut varistorit palautuivat jänniterasituksesta 1–2 päivän aikana. Tutkimusten johtopäätösten mukaan vanhojen varistorien joukkoon voikin asentaa uusia varistoreja, mikäli ne vastaavat toiminta-arvoiltaan aikaisemmin asennettuja varistoreja. [39]

Mikäli tutkimuksen tulokset pystyttäisiin toistamaan Fingridin sarjakondensaattorien varistoreilla, pystyttäisiin jo olemassa olevien sarjakondensaattorien kipinävälistä luopumiseen toteuttamaan pelkällä varistorien lisäyksellä. Kustannusten kannalta tämä olisi merkittävästi edullisempaa kuin koko tarvittavan varistorimäärän hankkiminen uutena. Lisäksi jos vanhojen varistorien joukkoon pystyttäisiin asentamaan jälkikäteen uusia varistoreita, voitaisiin asennettavan 10 % varakapasiteetin osuutta pienentää ja vaihtaa vioittuneita varistoriyksiköitä tarpeen mukaan. Toisaalta kipinävälistä luopumisen aiheuttama varistorien kokonaismäärän lisäys mahdollisesti lisäisi myös varistorien hajoamisesta aiheutuvia major-vikoja, joita tähän mennessä on ollut vain viisi.

Yksi keskeinen syy kipinävälin säilyttämiseksi on palaavan transienttijännitteen (TRV, Transient Recovery Voltage) suuruuteen liittyvät riskit. Vuonna 2008 toteutetun Fingridin sisäisen selvityksen mukaan sarjakondensaattorit on pystyttävä ohittamaan 5 ms ennen johtokatkaisijoiden toimintaa [40]. Kipinävälin korvaaminen varistorien lisäyksellä hidastaa sarjakondensaattorin ohitusta ja kasvattaa riskiä, että TRV-taso ylittää katkaisijoiden mitoitusarvon. Suurjännitekatkaisijoiden palaavan transienttijännitteen kestoisuusvaatimukset on määritelty IEC-standardissa 62271-100 [41]. Standardissa määritellyt arvot ovat lähellä sarjakompensoimattoman verkon TRV-tasoja, joten palaavan jännitteen nousu voi muodostaa ongelmia käytettäessä tavallisia katkaisijoita. Nykyisin sarjakompensoituilla johdoilla käytössä olevat uudet erottavat katkaisijat ovat mahdollisesti TRV-kestoisuudeltaan parempia, kuin selvityksen aikaiset tavalliset katkaisijat. Käytössä olevat erottavat katkaisijat ovat rungoltaan 420 kV katkaisijoita varustettuna 550 kV katkaisukammioilla. Katkaisijoiden TRV-tasot on kuitenkin testattu vain 420 kV:n standardin mukaisesti, joten mahdollisesti parempaa TRV-kestoisuutta ei ole varmistettu. Standardin mukaan 420 kV:n katkaisijan TRV-kestoisuuden tulee olla 624 kV ja 550 kV:n katkaisijan 817 kV. Kipinävälistä luopumista selvitetessä pitää tutkia onko TRV-kestoisuus kasvanut ja riittääkö mahdollisesti kasvanut TRV-kestoisuus kompensoimaan kipinävälistä luopumisen aiheuttaman TRV-riskin kasvun.

Viimeisimpien sarjakondensaattorihankintojen hintatason pohjalta arvioituna kipinävälistä luopumisen ja kipinävälistä luopumisen suojausjärjestelmän hankintahinnassa ei ole merkittävää eroa. Pelkillä varistoreilla toteutettu ratkaisu tulee hankintahetkellä sitä kannattavammaksi, mitä pienempi tarvittava varistorien lisäys on. Simulointien perusteella on arvioitu, että

kipinävälittömän suojausten varistoritarve on noin kaksinkertainen verrattuna kipinävälilliseen suojausratkaisuun. Varistorien hankintahinta vaihtelee toimittajasta riippuen välillä 2000–4000 €/MJ. Kipinävälin arvioitu hankintahinta kolmelle vaiheelle on noin 200 000 €. Kyseisillä hinnoilla hankintakustannus muodostuu samansuuruisiksi, mikäli varistorien lisäys on yhteensä 17–33 MJ. Esimerkiksi Hirvisuon tulevien kipinävälillä suojattujen sarjakondensaattorien varistorien energiamitoitukset ovat 18 MJ ja 26,5 MJ, joten hankintakustannus muodostuisi kummallakin ratkaisulla suurusluokaltaan samaksi.

7.5 Sarjakondensaattorien elinkaari ja perusparannukset

Energiaviraston nykyisessä valvontamallissa sarjakondensaattorien pitoajaksi on määritetty 40 vuotta ja ensimmäisten suuntaviivojen mukaan pitoaika pysyisi samana ainakin kahden seuraavan valvontajakson aikana [42]. Nykyisten vikatilastojen perusteella sarjakondensaattorien suurjännitekomponenttien voidaan olettaa kestävän koko 40 vuoden pitoajan. Suojaus- ja ohjausjärjestelmälle sitä vastoin 40 vuotta on liian pitkä pitoaika.

Passiivisten suurjännitekomponenttien tekninen kehitys on verrattain hidasta ja komponenttien elinikä on pitkä. Elektroniikkakomponentit sitä vastoin kehittyvät nopeasti, eivätkä ne kestä koko sarjakondensaattorin pitoaika. Tekniikan kehittymisestä johtuen vanheneviin toisiojärjestelmiin voi olla haastavaa ja kallista löytää tarvittavia varaosia. Varaosien saatavuuden lisäksi ongelmaksi voi muodostua vanhojen järjestelmien vaatiman erikoisosaamisen löytäminen. Fingridin vanhimmilla, vuonna 1997 rakennetuilla sarjakondensaattoreilla on jo havaittavissa kyseisiä haasteita.

Sarjakondensaattorien ja HVDC-yhteyksien toisiojärjestelmissä käytetään paljon erilaisia piirikortteja. Tunnusomaista piirikorteille on huono vaihdettavuus eri korttisukupolvien välillä sekä lyhyt tuotannossaoloaika [43]. Tämän takia jo toisiojärjestelmän hankintavaiheessa tulee huomioida koko elinkaaren aikainen piirikorttien tarve ja saatavuus. Väärin arvioitu piirikorttien tarve voi johtaa varakorttien loppumiseen, jolloin toisiousintaa joudutaan mahdollisesti aikaistamaan.

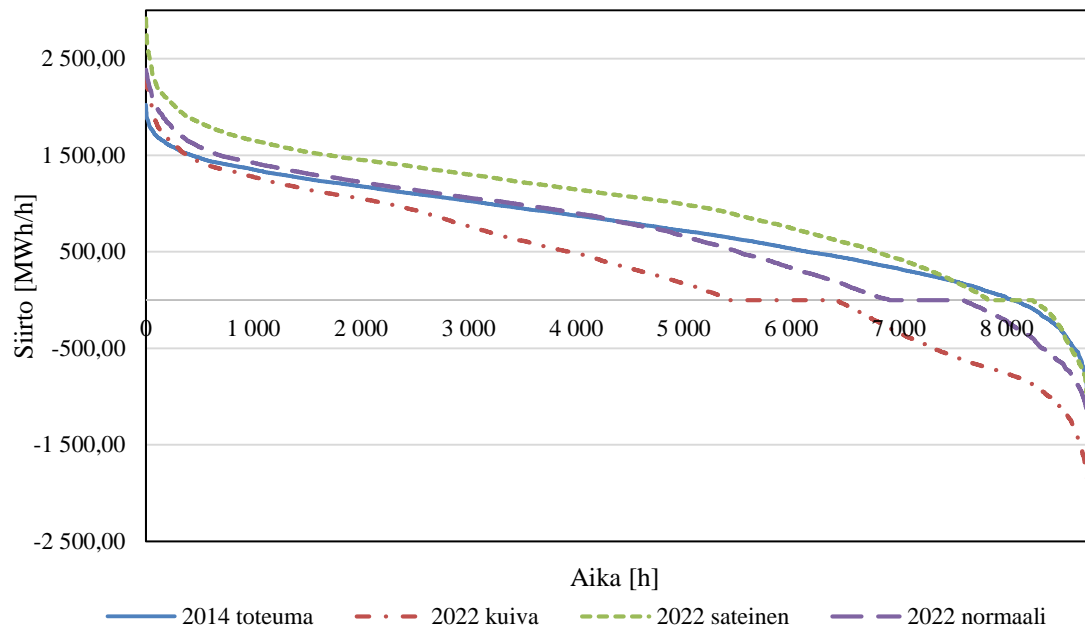
Taloudellisesti kannattavaksi toisiousinta tulee, mikäli sen avulla pystytään estämään suuria vastaostokustannuksia aiheuttavia vikoja. Kyseiset viat ovat suuren P1-tuonnin aikana tapahtuvia pitkäkestoisia vikoja, jolloin myös häviökustannukset nousevat merkittävästi. Vian korjauksen pitkittyminen voi johtua varaosien ja osaavan työvoiman puutteesta.

Energiaviraston valvontamallin kannalta toisiojärjestelmän uusiminen ennen pitoajan täyttymistä on ongelmallista. Toisiousinta on sarjakondensaattorin kokonaishintaan verrattuna kallis investointi, mutta se ei lisää verkon nykykäyttöarvoa. Toisin sanoen investointia ei voi sisällyttää siirtotariffiin. Toisaalta tähänastisten vikatilastojen perusteella toisiojärjestelmissä esiintyy merkittävästi vikoja riippumatta toisiojärjestelmän iästä.

Toisiousintaa ei siis voida perustella vikataajuuden pienentämisellä. Peruste toisiousinnan toteuttamiselle tulee vian aiheuttamasta pitkäaikaisesta sarjakompensoinnin menetyksestä, koska vanhojen toisiojärjestelmien korjaamiseen tarvittavia varaosia ja osamista ei löydy. Vaihtoehtona kalliille toisiousinnalle on kevennetty toisiousinta, jossa vaihdetaan vain suojaus- ja ohjausjärjestelmän toiminnallisena ytimenä oleva suojaus- ja ohjaustietokone [44]. Suojaus- ja ohjaustietokoneen vaihto mahdollistaa samalla siirtymisen uudempiin suojausohjelmistoihin.

7.6 Siirtokykyanalyysi

Siirtokykyanalyysin avulla selvitettiin yksittäisen sarjakondensaattorin ohituksen vaikutusta P1-leikkauksen siirtokapasiteettiin. Siirtokykyanalyysi aloitettiin määrittelemällä tarkasteluvuodelle 2022 P1-siirtorajat PSS/E -verkostolaskentaohjelmalla. Vertaamalla saatuja siirtorajoja vuoden 2022 pysyvyyskäyriin (Kuva 7.3) saatiin määriteltyä siirtokykytarkastelun kannalta kiinnostavat siirtotilanteet. Siirtokykytarkastelun kannalta kiinnostavimmiksi tilanteiksi osoittautuivat sarjakondensaattorien ohitukset P1-tuontitilanteissa sekä P1-vientitilanteessa kuivana vuonna. Näissä tilanteissa pysyvyyskäyrien ääriarvot ovat lähellä siirtorajoja, joten yksittäisen sarjakondensaattorin ohituksen voitiin olettaa aiheuttavan vastaostoja. Normaalin ja sateisen vuoden P1-viennin maksimisiirrot vastaavasti ovat kaukana siirtorajasta, joten yksittäisen sarjakondensaattorin ohitus ei aiheuta vastaostoja verkon ollessa muuten ehjä. Toisin kuin P1-leikkaus, RAC-leikkaus yhdistää kaksi eri hinta-aluetta. Sähkömarkkinoiden toimivuuden takaamiseksi hinta-alueiden sisäisistä vioista aiheutuneita siirtokapasiteetin rajoituksia ei pääsääntöisesti saa siirtää rajoittamaan RAC-siirtoa, joten sarjakondensaattorien lyhytaikaisilla ohituksilla ei ole vaikutusta RAC-leikkauksen siirtokapasiteettiin. Toisin sanoen vain hinta-alueen sisäiset rajoitukset aiheuttavat tarkastelussa vastakauppaa.



Kuva 7.3 Suomen pohjois-eteläsuuntaisen siirron (P1-leikkaus) pysyvyyskäyrä vuonna 2014 sekä vuoden 2022 simuloidut pysyvyyskäyrät. Kuvassa positiivisilla arvoilla kuvataan siirtoa pohjoisesta etelään. [45]

Vuoden 2015 alussa julkaistiin nykyisin voimassa olevat kaupalliset enimmäissiirtokapasiteetit P1-leikkaukselle. Tuontitilanteessa P1-leikkauksen kaupallinen enimmäissiirtokapasiteetti on 2300 MW ja vientitilanteessa 1500 MW [46]. P1-siirto ei nykyisessä tilanteessa ole pääsääntöisesti lähellä siirtokapasiteetin rajaa, joten yksittäisen sarjakondensaattorin ohituksen aiheuttama siirtokapasiteetin pieneneminen ei rajoita siirtoa verkon ollessa muuten ehjä.

Yksittäisen sarjakondensaattorin ohituksen vaikutus P1-siirtokykyyyn vuonna 2022 simuloitiin asettelemalla sarjakondensaattorit yksitellen ohitukseen ja vertaamalla alentunutta siirtokykyyä ehjän verkon siirtokykyyyn. Saadut tulokset on esitettyinä taulukossa 7.6. Siirtokyvyn laskun vaikutusta vastaostettavan energian määrään on tutkittu luvussa 7.7.

Taulukko 7.6 Yksittäisen sarjakondensaattorin ohituksen vaikutus P1- siirtokykyyn.

| Sarjakondensaattori | Talvi | | Kesä | |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|
| | Tuonti | Vienti | Tuonti | Vienti |
| Keminmaa L | -14 % | -12 % | -9 % | -14 % |
| Keminmaa I | -14 % | -12 % | -11 % | -14 % |
| Tuomela | -5 % | -6 % | -4 % | -5 % |
| Asmunti | -2 % | -3 % | -2 % | -3 % |
| Vuolijoki E | -7 % | -3 % | -7 % | -3 % |
| Vuolijoki P | -10 % | -3 % | -9 % | -3 % |
| Hirvisuo E | -5 % | -6 % | -4 % | -5 % |
| Hirvisuo P | -7 % | -6 % | -4 % | -5 % |
| Uusnivala L (1) | -7 % | -6 % | -7 % | -5 % |
| Uusnivala L (2) | -7 % | -6 % | -7 % | -5 % |
| Uunivala I | -10 % | -6 % | -7 % | -5 % |

Taulukon 7.6 sarjakondensaattorikohtaisista tuloksista nähdään, että siirtokapasiteetin kannalta merkittävimmät sarjakondensaattoriyksiköt ovat Keminmaan itäinen ja läntinen yksikkö. Vähiten merkitystä siirtokapasiteettiin on Asmuntin ja Tuomelan yksiköillä, joiden tarkoituksena on jakaa tehoa P1-leikkauksen johtojen välillä tasaisesti. Simuloinnin lähtötiedot sisältävät oletuksia verkon tilasta vuonna 2022, joten oletusten vastaiset muutokset verkossa voivat vaikuttaa siirtokapacityanalyyysin tuloksiin.

7.7 Vastaostotarpeet

Vastaostotarpeiden laskeminen yhdistää luvussa 7.2 esitetyn RCM-prosessin yhteydessä lasketun keskimääräisen ohituksen keston ja luvussa 7.6 esitetyn ohituksen siirtokapacityvaikutuksen vuoden 2022 siirtotarpeiden simulointeihin. Vastaostotarpeet arvioitiin 16 tunnin, yhden viikon sekä yhden kuukauden mittaisten ohitusten tapauksessa. 16 tunnin mittaisella ohituksella kuvattiin taulukossa 7.3 esitettyä keskimääräistä ohituksen kestoja ja pidemmällä ohituksella vaikeasti korjattavaa pitkäkestoista vikaa. Vastaostotarpeiden laskemista varten simuloitiin vuoden jokaisen tunnin P1-siirron suuruus oletetulla vuoden 2022 siirtoverkolla.

Sarjakondensaattorin ohituksesta aiheutuvat vastaostotarpeet on kuvattu aikasarjoilla ja pysyvyyskäyrillä. Aikasarjoilla on esitetty vastaostojen ajallinen sijoittuminen kalenterivuonna. Pysyvyyskäyrillä tuntikohtaiset vastaostot on järjestetty suuruusjärjestykseen, jolloin nähdään vastaostotarpeen kokonaiskesto. Yksi vastaostotarpeeseen vaikuttava tekijä on vuotuinen sademäärä, joten normaalia, sateista ja kuivaa vuotta varten on muodostettu omat aikasarjat ja pysyvyyskäyrät. Eri sarjakondensaattorien ohitusta mallinnettiin kolmelle erisuuruuselle siirtokapasiteetin rajoituksella: A, B ja C. Rajoitukset ovat suuruudeltaan 3–14 % siirtokapasiteetista ja niillä kuvataan taulukon 7.6 mukaisia vaiku-

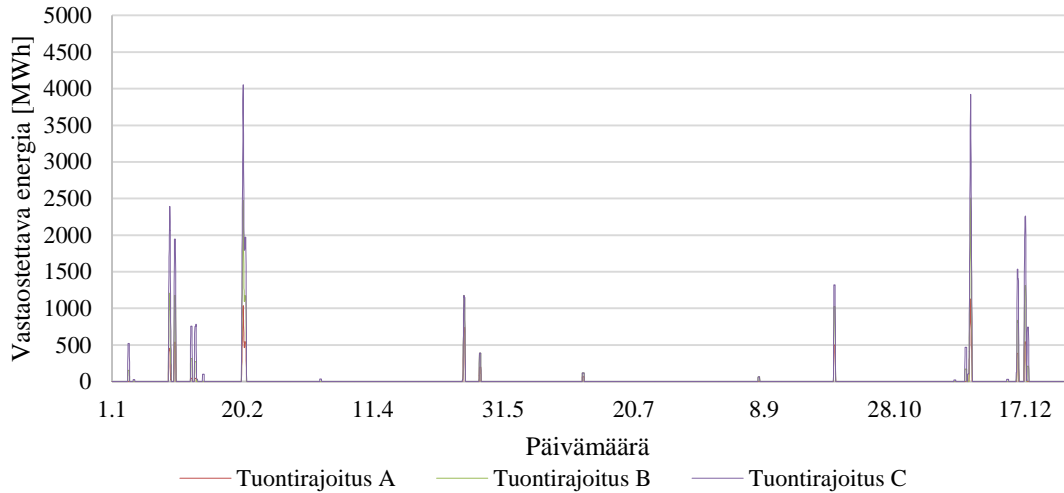
tuksia siirtokapasiteettiin. Sarjakondensaattoreita vastaavat rajoitukset on esitetty taulukossa 7.7. Rajoituksella C simuloitiin tilannetta, jossa sarjakondensaattorin ohituksen vaikutus siirtokykyyn on suurin ja vastaavasti rajoituksella A tilannetta, jossa vaikutus siirtokykyyn on vähäisin. Rajoituksien A, B ja C prosentuaalinen vaikutus siirtokapasiteettiin on esitetty liitteessä D.

Taulukko 7.7 Vastaostotarpeen arvioinnissa käytetyt sarjakondensaattorien ohitusta kuvaavat laskentatilanteet.

| Sarjakondensaattori | Ohitusta kuvaava siirtokapasiteetin rajoitus |
|---------------------|--|
| Keminmaa L | C |
| Keminmaa I | C |
| Tuomela | A |
| Asmunti | A |
| Vuolijoki E | B |
| Vuolijoki P | B |
| Hirvisuo E | A |
| Hirvisuo P | A |
| Uusnivala L (1) | B |
| Uusnivala L (2) | B |
| Uunivala I | B |

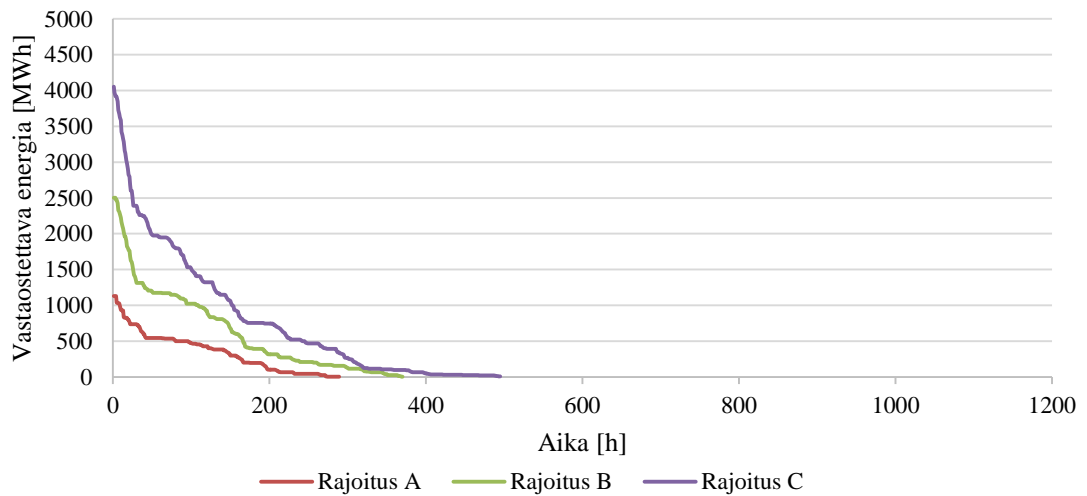
Saatujen tulosten perusteella ohitusten aiheuttamat vastaostotarpeet ajoittuvat vähäiselle määrälle vuoden tunteja. Vuotuisella sademäärällä ei havaittu olevan suurta merkitystä vastaostettavan energian maksimiarvoihin. Sitä vastoin vuotuisen sademäärän muutos vaikuttaa ohituksen aiheuttamien vastaostojen todennäköisyyteen.

Kuvassa 7.4 on esitetty sarjakondensaattorin ohituksen aiheuttaman vastaostotarpeen aikasarjat normaalina vesivuonna. Ohituksesta aiheutuvat vastaostotarpeet muodostuvat luvun 7.6 mukaisesti pelkästään tuontitilanteessa. Vastaostotarpeet ovat ajoittuneet lyhyille ajanjaksoille pääsääntöisesti talviaikaan, jolloin tuontiraja on kesäaikaa alempana. Normaalina vesivuonna vastaostotarpeen pahimmat piikit C-tuontirajoituksella ovat suuruudeltaan noin 4 000 MWh:a. B-tuontirajoituksella vastaavat piikit ovat suuruudeltaan noin 2 500 MWh:n suuruisia ja A-tuontirajoituksella noin 1 100 MWh:n suuruisia. Erisuuruisien rajoitusten aiheuttamat vastaostotarpeet muodostavat keskenään samanmuotoiset aikasarjat, joissa huippuarvo vaihtelee. Selkeämmän kuvan rajoitusten vaikutuksesta aikasarjan maksimiarvoon saa tutkimalla aikasarjoista muodostettuja pysyvyysskäyriä (Kuva 7.5).



Kuva 7.4 Sarjakondensaattorin ohituksen aiheuttaman vastaostotarpeen aikasarjat normaalina vesivuonna.

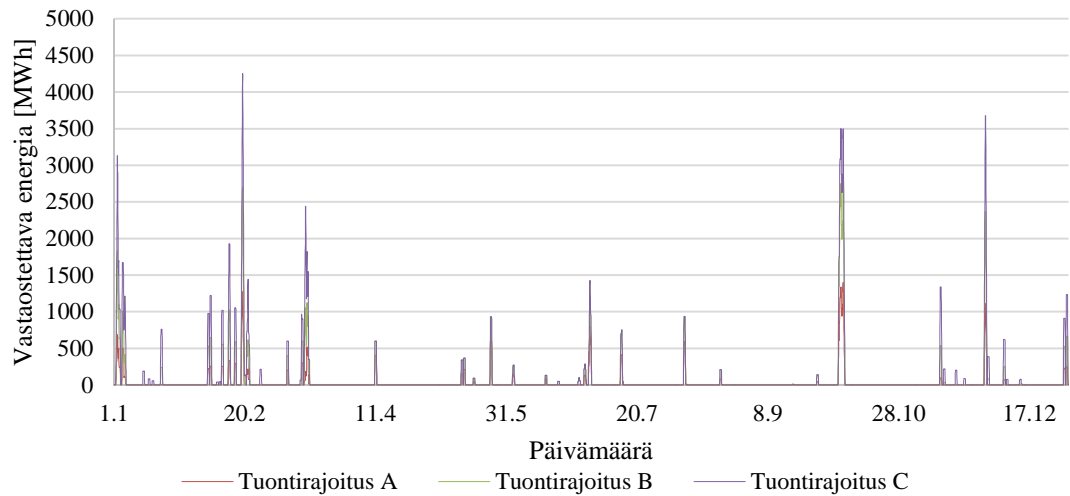
Normaalin vesivuoden pysyvyyskäyristä nähdään, että C-rajoituksella sarjakondensaattorin ohitus aiheuttaa toteutuessaan vastaostoja noin 500 tunnin kohdalla. Pienimmällä rajoituksella vastaostotarvetta syntyy vain noin 300 tunnin kohdalla.



Kuva 7.5 Sarjakondensaattorin ohituksen aiheuttaman vastaostotarpeen pysyvyyskäyrät normaalina vesivuonna.

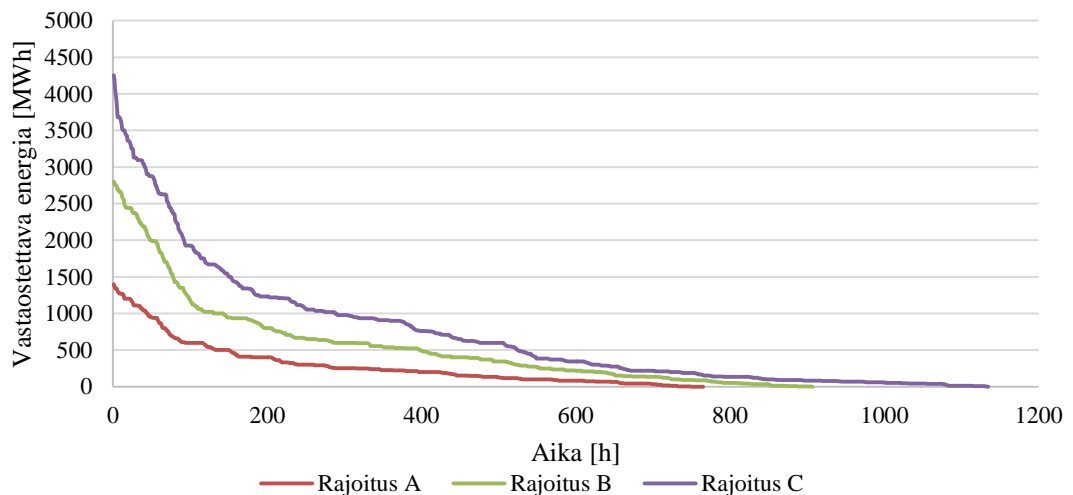
Sateisen vesivuoden aikasarjat (Kuva 7.6) noudattelevat pitkälti normaalin vesivuoden aikasarjaa, mutta vastaostotarvetta kuvaavia piikkejä on enemmän. Normaalin vesivuoden tapaan, myös sateisen vesivuoden vastaostotarpeet muodostuvat ainoastaan tuontilanteessa. Sateisena vuonna etenkin kesän vastaostotarpeen todennäköisyys kasvaa verrattuna normaaliin vesivuoteen. Sateisena vuonna vesivoimatuotanto on normaalia vesivuotta suurempaa, jolloin Pohjois-Suomessa sijaitsevilta vesivoimaloilta on tarvetta siirtää normaalia vesivuotta enemmän sähköenergiaa P1-leikkauksen läpi Etelä-Suomeen.

Kasvanut siirtotarve lisää luonnollisesti myös ohituksesta aiheutuvien vastaostotarpeiden todennäköisyyttä.



Kuva 7.6 Sarjakondensaattorin ohituksen aiheuttaman vastaostotarpeen aikasarjat sateisena vuonna.

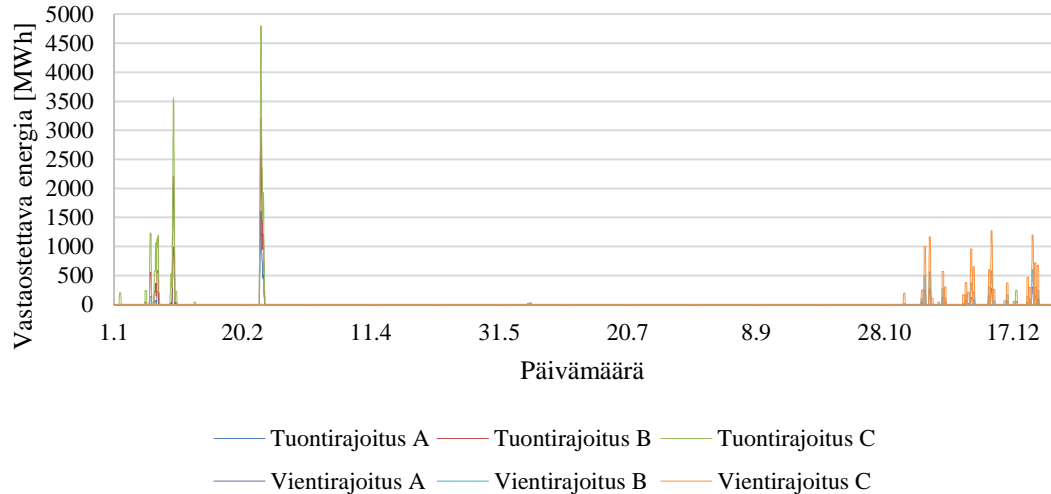
Verrattaessa sateisen vuoden pysyvyyskäyriä (Kuva 7.7) normaalin vuoden pysyvyyskäyriin, voidaan havaita selkeästi ohituksen aiheuttaman vastaostotarpeen todennäköisyyden kasvu. Normaalina vesivuonna vastaostoja aiheuttavia tunteja on rajoituksesta riippuen noin 300–500. Sateisena vuonna vastaostoja aiheuttavia tunteja kertyy vastaavasti noin 750–1 100.



Kuva 7.7 Sarjakondensaattorin ohituksen aiheuttaman vastaostotarpeen pysyvyyskäyrät sateisena vuonna.

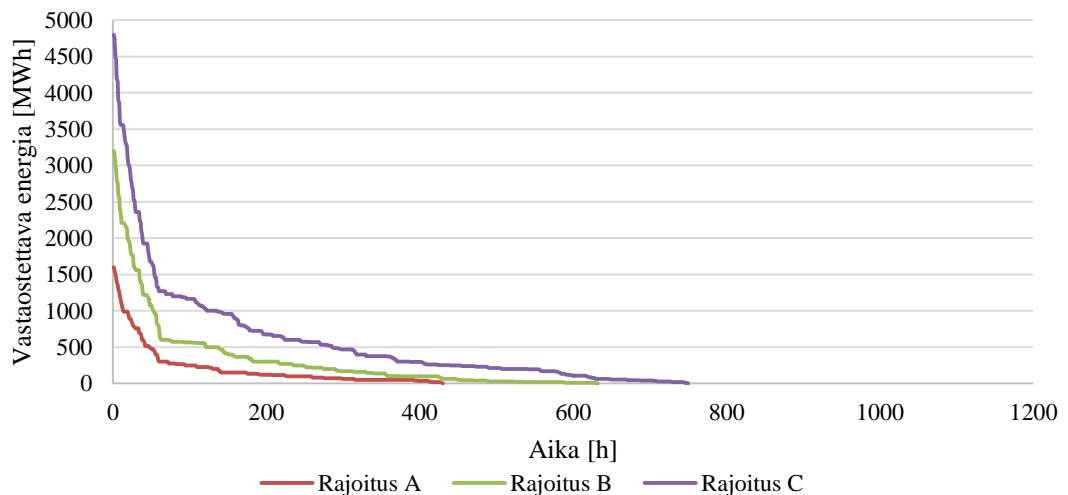
Kuivana vuonna vastaostotarpeita syntyy sekä tuonti- että vientitilanteissa (Kuva 7.8). Kuivana vuonna Pohjois-Suomen ja Pohjois-Ruotsin vesivoimat tuotanto on vähäistä, jol-

loin P1-leikkauksen läpi etelään siirrettävä energiamäärä on normaalia vesivuotta vähäisempi. Kuivana vuonna esiintyy myös tilanteita, jolloin sähköä vietään P1-leikkauksen läpi pohjoiseen. Kyseiset tilanteet ovat niin ikään seurausta vesivoimatuotannon vähyydestä.



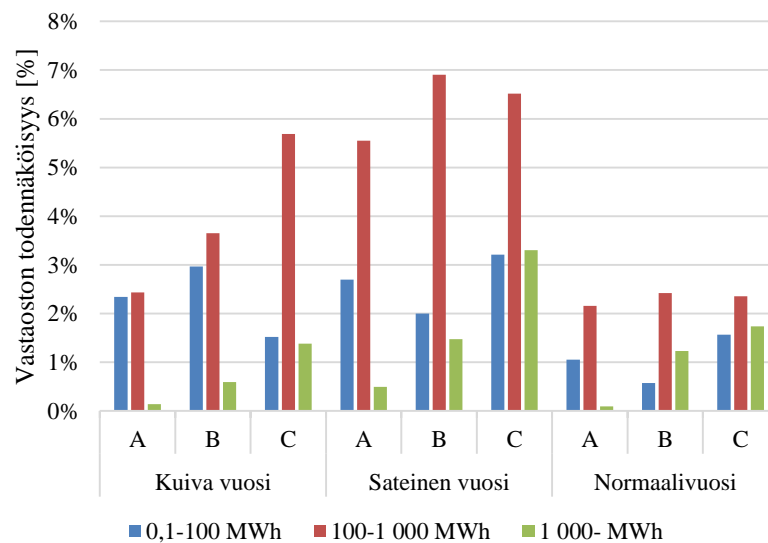
Kuva 7.8 Sarjakondensaattorin ohituksen aiheuttaman vastaostotarpeen aikasarjat kuivana vuonna.

Kuivan vesivuoden pysyvyyskäyrät (Kuva 7.9) ovat normaaliin ja sateiseen vuoteen verrattuna jyrkät. Pahimmillaan 16 tunnin ohitus tuontitilanteessa aiheuttaa kuivana vuonna enemmän vastaostoja kuin 16 tunnin ohitus normaalina tai sateisena vuonna. Kuivana vuonna vastaostojen aiheutumisen todennäköisyys on myös normaalia vuotta suurempi. Vastaostoja aiheuttavia tunteja kuivana vuonna kertyy noin 400–700 riippuen ohituksen aiheuttaman rajoituksen suuruudesta.



Kuva 7.9 Sarjakondensaattorin ohituksen aiheuttaman vastaostotarpeen pysyvyyskäyrät kuivana vuonna.

Kuvassa 7.10 on esitetty aikasarjojen ja pysyvyysskäyrien sisältämä data todennäköisyysjakaumana. Todennäköisyysjakauman perusteella voidaan arvioida vastaostojen toteutumisen riskiä sarjakondensaattorin ohitussa. Keskimääräinen 16 tunnin sarjakondensaattorin ohitus ei todennäköisimmin aiheuta vastaostotarvetta. Ohituksen aiheuttaessa vastaostotarpeen, on todennäköisin vastaoston suuruus 100–1 000 MWh. Vastaostokustannuksen ollessa esimerkiksi 70 €/MWh ohituksen aiheuttamaksi kokonaisvastaostokustannukseksi tulisi 7 000–70 000 €. Normaali vuoden pahin tilanne aiheuttaisi 70 €/MWh vastaostokustannuksella 283 500 €:n suuruiset vastaostot. Esimerkkinä käytetty 70 €/MWh kuvastaa vuoden 2014 keskimääräistä vastaostokustannusta [47]. Vastaostokustannuksen suuruuden arvioinnissa on suuria epävarmuustekijöitä. Vastaostettavan energian hintaan vaikuttaa markkinatilanne sekä vastaoston suuruus ja kesto.



Kuva 7.10 Sarjakondensaattorin ohituksesta aiheutuvan vastaostotarpeen todennäköisyysjakauma eri vesivuosina 16 tunnin ohituksen aikana.

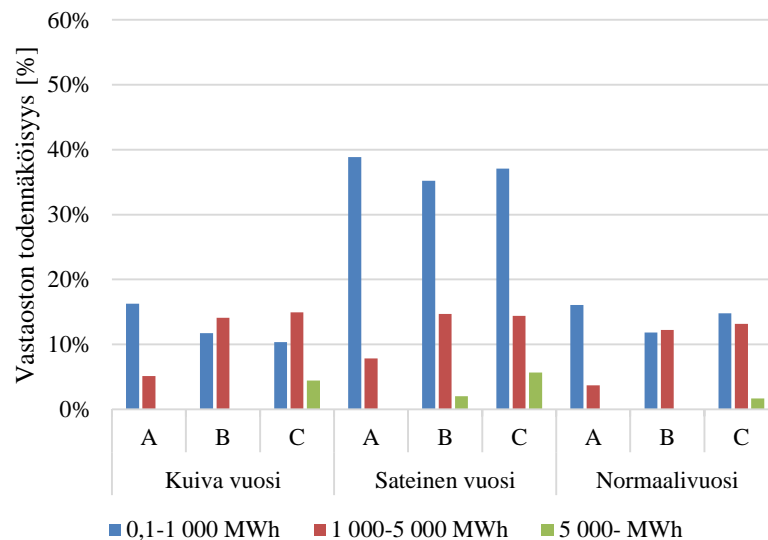
Vastaostojen toteutumisen vuosittaiset todennäköisyydet laskettiin muodostamalla kutakin rajoitusta vastaava yhdistetty vikataajuus (λ) ja kertomalla saatu vikataajuus kuvan 7.10 esittämällä esiintymistodennäköisyyksillä. Yhdistetty vikataajuus laskettiin kertomalla luvussa 7.2 esitetty Major-vikataajuus 0,36 vikaa vuodessa sarjakondensaattorien lukumäärällä. Normaalin vesivuoden esiintymistodennäköisyydeksi arvioitiin historiatietojen perusteella 80 % ja sateisen ja kuivan vuoden todennäköisyyksiksi 10 %. Laskelmien tulokset on esitetty taulukossa 7.8

Taulukko 7.8 Vastaostojen toteutumisen todennäköisyydet yhden vuoden aikana.

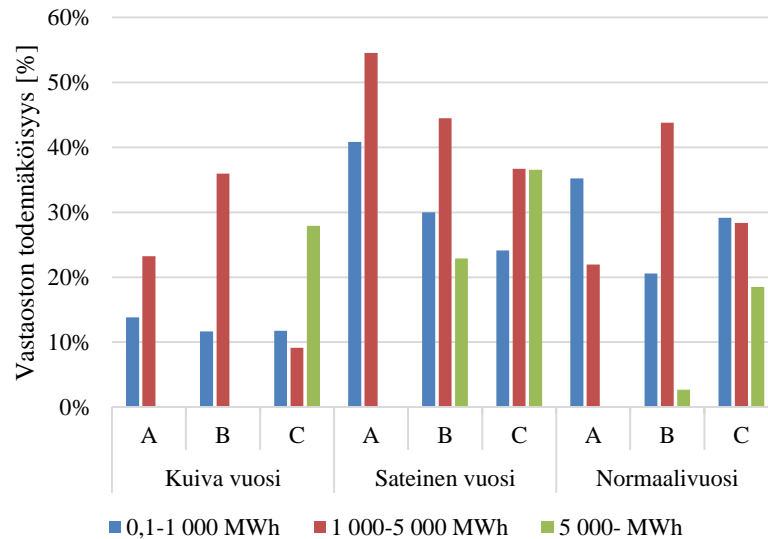
| Rajoitus | SC-määrä | λ. [vikaa/v] | Todennäköisyys [%] | | | | | | | | |
|----------|----------|--------------|--------------------|---------------|------------|-------------|---------------|------------|-------------|---------------|------------|
| | | | Normaali | | | Sateinen | | | Kuiva | | |
| | | | 0,1-100 MWh | 100-1 000 MWh | 1 000- MWh | 0,1-100 MWh | 100-1 000 MWh | 1 000- MWh | 0,1-100 MWh | 100-1 000 MWh | 1 000- MWh |
| A | 4 | 1,44 | 1,58 | 3,17 | 0,13 | 3,89 | 7,92 | 0,70 | 3,37 | 3,50 | 2,02 |
| B | 5 | 1,80 | 1,02 | 4,33 | 2,15 | 3,60 | 12,43 | 2,70 | 5,35 | 6,58 | 1,08 |
| C | 2 | 0,72 | 1,15 | 1,73 | 1,22 | 2,30 | 4,68 | 2,38 | 1,09 | 4,09 | 0,99 |
| yht. | 11 | 3,96 | 3,75 | 9,23 | 3,50 | 9,79 | 25,03 | 5,78 | 9,81 | 14,17 | 4,09 |

Laskemalla yhteen normaalin vesivuoden vastaostojen toteutumisen todennäköisyydet, saatiin vastaostojen toteutumisen todennäköisyydeksi 16,48 % vuodessa. Kun laskuissa huomioitiin eri vesivuosien painoarvot, todennäköisyydeksi saatiin 20,05 %.

Ohituksen pitkittyessä vastaostojen todennäköisyys ja vastaostettavan energian määrä kasvaa huomattavasti. Kuvassa 7.11 on esitettyä yhden viikon ja kuvassa 7.12 yhden kuukauden pituisen ohituksen aiheuttamien vastaostojen todennäköisyysjakauma. Keskimääräistä ohitusta pidemmät ohitukset voivat kuvata esimerkiksi tilannetta, jossa sarjakondensaattorin vikaantumista ei saada korjattua varaosien saatavuusongelmien takia. Tilanne on mahdollinen esimerkiksi Keminmaan sarjakondensaattorien kohdalla, joiden toisiojärjestelmiin on haastavaa löytää varaosia vanhentuneen tekniikan takia. Keminmaan sarjakondensaattorien merkitys P1-siirtokykyyn on suuri, eli ohitusta kuvaa rajoitus C. 16 tunnin mittainen ohitus aiheuttaa normaalina vesivuonna C-rajoituksella alle 2 % todennäköisyydellä yli 1 000 MWh:a vastaostoja. Ohituksen keston pidentyessä viikkoon nousee yli 1 000 MWh:n vastaostojen todennäköisyys yli 15 %:iin.

**Kuva 7.11** Sarjakondensaattorin ohituksesta aiheutuvan vastaostotarpeen todennäköisyysjakauma eri vesivuosina yhden viikon ohituksen aikana.

Ohituksen keston pidentyessä kuukauteen vastaostojen todennäköisyys kasvaa entisestään. Normaalivuonna kuukauden mittainen ohitus C-rajoituksella aiheuttaa lähes 50 % todennäköisyydellä yli 1 000 MWh:n vastaostot ja lähes 20 % todennäköisyydellä yli 5 000 MWh:n vastaostot. Tarkastelemalla 16 tunnin, viikon ja kuukauden mittaisten ohituksia, voidaan havaita vastaostojen todennäköisyyden kasvavan tarkasteluvälillä melko lineaarisesti.



Kuva 7.12 Sarjakondensaattorin ohituksesta aiheutuvan vastaostotarpeen todennäköisyysjakauma eri vesivuosina yhden kuukauden ohituksen aikana.

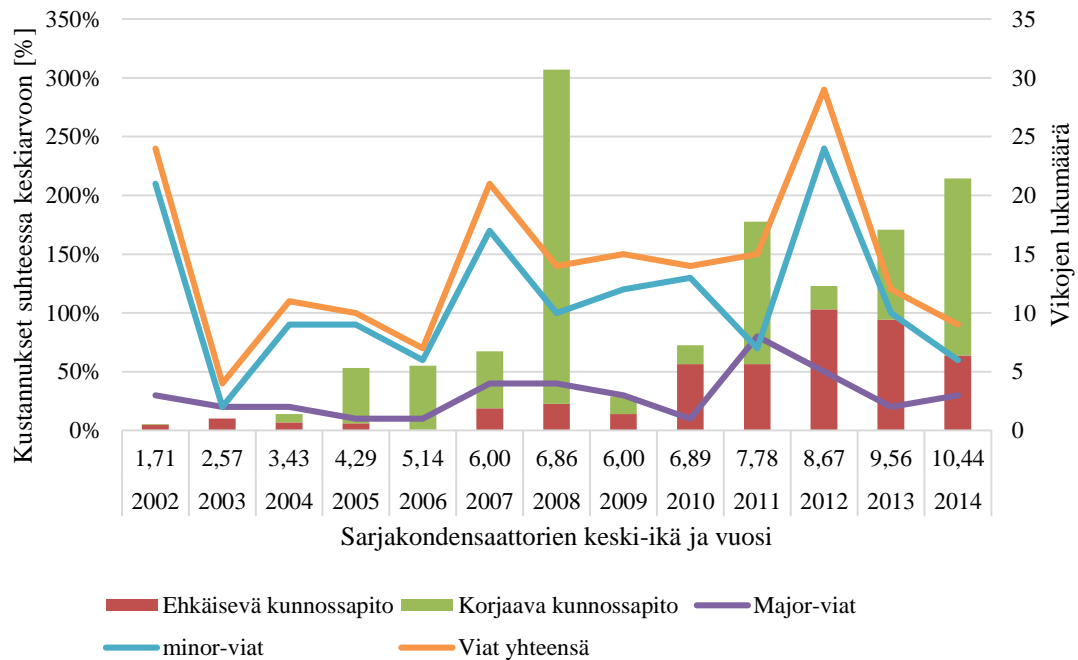
Vastaostokustannusten lisäksi verkon häviösähkökustannukset kasvavat sarjakondensaattorin ohituksen myötä. Sarjakompensoinnin hyöty verkon häviöiden pienentämisessä korostuu siirtojen ollessa suurimmillaan eli samoissa tilanteissa, joissa ohitus aiheuttaa suurimmat vastaostokulut. Hirvisuon sarjakondensaattorien suunnittelun yhteydessä suoritettiin taustalaskelmia, joilla arvioitiin sarjakondensaattorien vaikutusta häviöihin. Laskelmien perusteella Hirvisuon sarjakondensaattorien vaikutus häviöihin P1-tuonnin ollessa maksimissaan on suuruusluokaltaan 8–9 MW, kun taas keskimääräisellä P1-tuonnilla vaikutus on 0–1 MW.

Vastaostotarpeiden laskeminen pohjautuu suureen määrään oletuksia sähköverkon, kulutuksen, tuotannon ja markkinoiden kehityksestä. Analyysin pohjana on ennuste vuoden 2022 tilanteesta, joten markkinamalliin syötetyt parametrit ovat arvioita. Nämä epävarmuustekijät tulee huomioida tulosten tulkinnassa ja tuloksia tulee käyttää vain suuntaa antavana ja kuvaamaan ohituksesta aiheutuvan haitan suuruusluokkaa. Analyysin syventämiseksi tulisi tutkia sademäärän lisäksi myös muiden muuttujien vaikutusta saataviin tuloksiin.

7.8 Kunnossapidon kustannukset

Sähköverkkoliiketoiminnan luonteen mukaisesti Fingridin sarjakondensaattorien kunnossapitokustannukset ovat alhaiset verrattuna sarjakondensaattorien hankintahintaan. Yhden sarjakondensaattorin hankintakustannus on aikaisempien hankintojen perusteella suuruusluokaltaan 3,5–5 miljoonaa euroa. Elinkaaren aikaiset kunnossapitokustannukset sarjakondensaattorilla ovat noin 10–15 % verrattuna sarjakondensaattorin hankintahintaan. Lisäksi elinkaarikustannuksiin tulee lisätä toisiojärjestelmän perusparannus, jota ei lasketa osaksi kunnossapitokustannuksia.

Sarjakondensaattorien vuosittaisissa kunnossapitokustannuksissa on havaittavissa suuria vaihteluja. Kunnossapitokustannukset muodostuvat vuosihuolloista ja varallaoloista sekä vikojen korjauksista. Kuvassa 7.12 on esitetty sarjakondensaattoreille vuosina 2002–2014 kohdistetut kunnossapitokustannukset sekä vuosittaiset vikamäärät. Vaaka-akselilla on lisäksi esitetty laitekannan keski-ikä kunkin tarkasteluvuoden kohdalla.



Kuva 7.13 Kunnossapitokustannukset ja vikamäärät (2002–2014). Kustannukset ilmoitettu suhteellisina vuosittaisen kunnossapitokustannusten keskiarvoon nähden.

Fingridin yhdeksästä sarjakondensaattorista seitsemän on rakennettu vuosina 1997–2001. Sarjakondensaattorin komponenttien takuuajat ovat 3–5 vuotta, joka selittää vuosien 2002–2004 alhaiset kunnossapitokustannukset. Vuodesta 2005 alkaen vikojen korjauskustannukset ovat kasvaneet takuuajojen loppuessa. Sarjakondensaattorien tapauksessa vikojen lukumäärillä ja kunnossapitokustannuksilla ei havaittu voimakasta korrelaatiota. Esimerkiksi panostukset varallaoloon eivät näy vähentyneinä vikamääränä vaan lyhenyneinä ohitusaikoina, koska ostettava palvelu on viankorjausvalmius. Viankorjausval-

miuden hinta on kiinteä, mutta aiheutuneiden vikojen korjauskustannukset näkyvät korjaavan kunnossapidon kustannuksissa. Suurin osa vioista on suojaus- ja ohjausjärjestelmän aiheuttamia, jolloin korjaustoimenpiteet eivät ole vaatineet merkittävästi työtunteja tai varaosia. Vuosien 2008 ja 2011 korjaavan kunnossapidon kustannukset muodostuvat pääosin valopilareiden uusimisista, vaikka valopilareista johtuvien vikojen lukumäärä on vain 3,59 % vikojen kokonaismäärästä. Valopilareiden uusimisen taustalla oli luvussa 7.2 esitetty posliinisten liitoskappaleiden halkeamiset. Kunnossapitokustannusten ja vikamäärien väliset korrelaatiokertoimet on esitettyinä taulukossa 7.9. Korrelaatiokertoimien laskemisessa ei huomioitu vuosia 2002–2004, jolloin korjaukset ovat kuuluneet takuun piiriin.

Taulukko 7.9 *Kunnossapitokustannusten ja vikamäärien väliset korrelaatiokertoimet (2005–2014). Taulukon positiiviset arvot kuvaavat kunnossapitokustannusten kasvattamisen lisäävän vikamäärää.*

| | Kunnossapito yht. | Korjaava kunnossapito | Ehkäisevä kunnossapito |
|------------|-------------------|-----------------------|------------------------|
| Viat yht. | 0,45 | -0,25 | 0,45 |
| Major-viat | 0,13 | 0,30 | 0,31 |
| Minor-viat | 0,30 | -0,41 | 0,40 |

Suojaus- ja ohjausjärjestelmässä esiintyvät viat ovat luonteeltaan yllättäviä, nopeasti kehittyviä ja vaikeasti ennustettavia. Tämän vuoksi ehkäisevän kunnossapidon panostukset toisiojärjestelmiin eivät voimakkaasti vähennä vikamäärää.

Kunnossapidon kokonaiskustannusten jakautuminen korjaavan ja ehkäisevän kunnossapidon välillä sisältää epätarkkuuksia. Esimerkiksi vuosihuoltojen yhteydessä suoritettujen minor-vikojen korjaukset on joissain tapauksissa sisällytetty ehkäisevän kunnossapidon työnumeroille kohdistettuihin töihin. Kustannusten täsmällinen tarkastaminen ja uudelleen kohdistaminen oikealle kunnossapitolajille on jälkikäteen haastavaa puutteellisten laskutustietojen takia.

8. JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Sarjakondensaattorien laitevikailmoituksista muodostettujen vikatilastojen perusteella sarjakondensaattorien luotettavuusongelmat johtuvat pääsääntöisesti suojaus- ja ohjausjärjestelmän vioista ja virhetoiminnoista. Suojaus- ja ohjausjärjestelmän viat ovat pääsääntöisesti aiheutuneet signaalinsiirto- ja tehölähdevioista. Lisäksi suuressa osassa vioista aiheuttaja on jäänyt tuntemattomaksi. Suojaus- ja ohjausjärjestelmän viat osoittautuivat luonteeltaan nopeasti kehittyviksi, joten vioittumisen havaitseminen ennen toiminnallista vikaa on haastavaa. Nykyisellä vuosihuoltoihin perustuvalla kunnossapitomallilla vikaantumista ei pystytä havaitsemaan riittävän usein ennen toiminnallista vikaa. Vikaantumisen havainnointia voidaan mahdollisesti parantaa lisäämällä suojaus- ja ohjausjärjestelmän itsediagnostiikkaa sekä online-valvontaa. Lisäksi vikaraportoinnin kehittämällä voitaisiin tunnistaa vikaantumiseen vaikuttavat tekijät tehokkaammin. Tällä hetkellä suojaus- ja ohjausjärjestelmän vikojen aiheuttajia ei luokitella, joten tarkkojen vikatilastojen muodostaminen vaatii paljon manuaalista työtä. Suojaus- ja ohjausjärjestelmän vikojen luokittelu esimerkiksi RCM-luokittelun mukaisesti mahdollistaisi vikaantumisen tehokkaamman seuraamisen ja kunnossapidon keskittämisen entistä tarkemmin ongelmakohtiin.

Sarjakondensaattorien suojaus- ja ohjausjärjestelmän virhetoiminnot ovat luvun 7.2 vikatilastojen perusteella yksi merkittävä ongelma luotettavuuden kannalta. Yksi mahdollinen ratkaisu virhetoimintojen vähentämiseksi olisi suojaus- ja ohjausjärjestelmän kehittäminen niin, etteivät yksittäiset ulkoiset häiriöpulssit aiheuttaisi sarjakondensaattorin virheellistä ohittumista. Suojauslogiikan virheistä johtuvien vikojen vähentämiseksi sarjakondensaattorien tehdastestausta (FAT, Factory Acceptance Test) ja käyttöönottestausta (SAT, Site Acceptance Test) tulisi kehittää. Tehdastesteissä käytettävät testisekvenssit tulisi suunnitella niin, että suojaus- ja ohjausjärjestelmässä ilmenevät poikkeustilanteet tulisi testatuksi mahdollisimman kattavasti. RTDS-testauksen (Real Time Digital Simulator) käyttöönotolla pystyttäisiin testaamaan suojauslogiikan toimivuutta ja havaitsemaan mahdollisia logiikkavirheitä jo ennen sarjakondensaattorin käyttöönottoa. RTDS-testauksen yhteyteen olisi myös mahdollista yhdistää johtosuojauksen toiminnan testaus sarjakondensaattorivioissa, jota tällä hetkellä ei toteuteta lainkaan. Saatujen tulosten seurauksena Fingrid tulee kehittämään omia vaatimuksiaan suojaus- ja ohjausjärjestelmän testauksessa.

Sarjakondensaattorien hankintavaiheessa voidaan osittain ehkäistä elinkaaren aikana ilmeneviä vikoja. Sarjakondensaattorien kunnossapitokustannuksissa piikkeinä näyttäytyvät valopilarien uusimiset voisivat olla vältettävissä, mikäli hankintavaiheessa pystyttäisiin hylkäämään vikaantumisherkiksi osoittautuneita ratkaisuja. Toisin sanoen sarjakon-

densaattorien hankintaspesifikaatiossa määriteltäisiin kielletyt ratkaisut. Vikaraportoinnin kokonaisvaltainen kehittäminen mahdollistaisi muidenkin tyyppivikojen tarkemman määrittämisen, jolloin mahdollisiin ongelmakohtiin voitaisiin kiinnittää enemmän huomiota jo hankintavaiheessa. Suojaus- ja ohjausjärjestelmän osalta tyyppihyväksyntämenettelyn käyttöönotto voisi vähentää vikoja, mutta toisaalta myös lisätä hankintavaiheen resurssitarvetta. Tyyppihyväksyntämenettelyn käyttöönottoa tullaan selvittämään tulevaisuudessa. Tällä hetkellä sarjakondensaattoreissa käytettyjen ratkaisujen toimivuus mitataan osittain toimittajan referenssien perusteella. Liiallisten referenssien vaatiminen voi toisaalta johtaa tilanteeseen, jossa tarjottavat järjestelmät eivät edusta viimeisintä tekniikkaa.

Tämän hetkisten vikatilastojen perusteella sarjakondensaattorien suurjännitelaitteet ovat hyvässä kunnossa ja suunnitellun 40 vuoden käyttöiän saavuttaminen vaikuttaa realistiselta. Toisiojärjestelmien osalta käyttöikä näyttäisi jäävän noin 20 vuoteen. Suojaus- ja ohjausjärjestelmä vaatii koko elinkaarensa ajan varaosia, lähinnä erilaisia piirikortteja. Piirikorttien ja tarvittavan osaamisen saatavuus on osoittautunut haastavaksi laitekannan vanhetessa, sillä yksittäinen suojaus- ja ohjausjärjestelmätyyppi on tuotannossa vain lyhyen ajan suhteessa koko sarjakondensaattorin elinkaareen. Suojaus- ja ohjausjärjestelmän hankintavaiheessa olisi hyvä pystyä arvioimaan varaosien saatavuus ja tarve koko järjestelmän käyttöäksi. Varaosien saatavuutta tulisi myös seurata aktiivisesti, jotta mahdollisiin saatavuusongelmiin pystyttäisiin reagoimaan mahdollisimman tehokkaasti. Tällä hetkellä kukin valmistaja käyttää erilaista väyläratkaisua, joten varaosat eri valmistajien tai edes saman valmistajan eri-ikäisten komponenttien osalta eivät ole vaihtokelpoisia. Yksi mahdollinen lyhyen tähtäimen ratkaisu varaosien saatavuusongelman ratkaisemiseksi voisi olla samanlaista laitekantaa omaavien verkkoyhtiöiden varaosapankin perustaminen. Suojaus- ja ohjausjärjestelmän kahdennuksen ansiosta sarjakondensaattori pysyy verkossa yhdelläkin järjestelmällä, jolloin vioittuneiden piirikorttien tilalle tulevien korttien toimituksesta aiheutuva viive ei muodostu ongelmaksi.

Siirtokyky- ja siirtotarveanalyysien hyödyntäminen vikojen epäsuorien kustannusten arvioinnissa osoittautui kehityskelpoiseksi menetelmäksi. Menetelmän soveltaminen laajemmin vaatisi herkkyytarkastelua erilaisten muuttujien vaikutuksesta simulointituloksiin. Diplomityössä käytetyin reunaehdoin toteutettujen siirtokyky- ja siirtotarveanalyysien perusteella Keminmaan sarjakondensaattorit ovat siirtokyvyn kannalta Fingridin tärkeimmät sarjakondensaattorit. Ehjän verkon tilanteessa, P1-siirron pisyvyyskäyrät huomioiden, yksittäisen sarjakondensaattorin keskimääräinen 16 tunnin ohitus ei aiheuta merkittävää riskiä vastaostoista. Sarjakondensaattorien merkitys kuitenkin korostuu RAC- ja P1-leikkausten suunniteltujen ja suunnittelemattomien johtokeskeytysten aikana. Lisäksi vastaostojen todennäköisyys kasvaa ohitusajan pidentyessä melko lineaarisesti, joten epäkäytettävyyssajan pitäminen lyhyenä on tärkeää. Vastaostokustannusten syntymisen riskiä voidaan pienentää hyödyntämällä peruskunnossapitäjien lyhyttä vastaaikaa ehtiä sähköasemalle. Perehdyttämällä peruskunnossapitäjät sarjakondensaattorien

toimintaan nykyistä syvällisemmin saadaan sarjakondensaattori nykyistä todennäköisemmin palautettua nopeasti takaisin verkkoon. Kahdennetun suojausten ansiosta sarjakondensaattori voi olla verkossa vaikka toisessa suojaus- ja ohjausjärjestelmässä ilmennyttä vikaa ei vielä olisikaan korjattu. Tällöin ohituksen kesto ei veny erikoiskunnossapitohenkilöstön saapumiseen asti.

Vuoden 2005 RCM-analyysi osoittautui edelleen olevan hyvin ajan tasalla ja analyysin päivitys rajoittui hienosäätöön. RCM-prosessissa saadun tiedon pohjalta esiintyneiden vikojen ehkäisy on haastavaa, mutta vaikutusten vähentäminen viankorjausvalmiutta parantamalla mahdollista. Näiden tietojen pohjalta sarjakondensaattorien viankorjausvalmiuteen ja peruskunnossapitäjien osaamiseen tullaan jatkossa panostamaan. RCM-analyysiin pohjautuva vikapuuanalyysi jäi vikatodennäköisyyksien osalta suorittamatta. Vikatodennäköisyyksien arvioiminen käytettävissä olevan datan pohjalta osoittautui liian epävarmaksi, jotta tulosten pohjalta voisi tehdä luotettavia päätelmiä. Vikapuuanalyysin käyttö ei sovellu järjestelmän vikaantumisen todennäköisyyden arviointiin, jos tarkkaa vikadataa ei ole saatavissa.

Sarjakondensaattorien suorien kunnossapitokustannusten ja vikojen määrän välillä ei havaittu korrelaatiota. Yksi selittävä tekijä on suojaus- ja ohjausjärjestelmän ennakoimaton vikaantuminen. Myös kalliit yksittäiset korjaukset näkyvät piikkeinä kunnossapitokustannuksissa. Sarjakondensaattorien kunnossapitokustannukset eivät siis nykyisellä kunnossapitomallilla noudattele luvussa 4.3 esitettyä kunnossapidon kokonaiskustannusten optimoinnin mallia. Jos vikoja ei pystytä vähentämään ehkäisevään kunnossapitoon panostamalla, on kannattavampaa siirtää lisäpanostukset viankorjausvalmiuden parantamiseen.

9. YHTEENVETO

Tässä diplomityössä käsiteltiin sarjakondensaattorien luotettavuutta ja kunnonhallintaa. Yksi Fingridin strategisista hankkeista on rajasiirtoyhteyksien luotettavuuden parantaminen, joka asettaa lisävaatimuksia myös sarjakondensaattorien luotettavuudelle. Fingridin sarjakondensaattorit ovat historiallisesti vikaantuneet usein, mutta epäkäytettävyysajat ovat pysyneet lyhyinä.

Sarjakompensoinnin merkityksen selvittämiseksi lukijalle työssä esitettiin sähkötekniinen perusta sarjakompensoinnin toiminnalle. Työssä esiteltiin siirtojohdon tehokulmayhtälön ja siirtojohdon loistehotaseen muodostuminen sekä sarjakompensoinnin vaikutus transienttistabiiliuteen, jännitestabiiliuteen ja siirtokapasiteettiin.

Sarjakondensaattorin vikaantumisen ymmärtämiseksi tulee tuntea sarjakondensaattorin fyysinen rakenne, joten työssä esiteltiin sarjakondensaattorin pääkomponentit. Komponentit esiteltiin työn ymmärtämisen kannalta oleellisella tasolla.

Sarjakondensaattorien nykyinen kunnossapito-ohjelma pohjautuu vuonna 2005 laadittuun RCM-analyysiin. Työssä esiteltiin RCM-viitekehyksen yleiset soveltamisperiaatteet sekä vikapuuanalyysin käyttö vikaantumisen analysoinnissa. Lisäksi esiteltiin Fingridin käyttämä kunnossapitomalli sekä kunnossapidon yleisiä periaatteita.

Teoriaosuuden jälkeen esiteltiin tutkimuksen tausta-aineisto, joka muodostui laitteiden teknisistä tiedoista ja vikailmoituksista, kustannustiedoista, siirtokyky- ja siirtotarveanalyyyseistä sekä sarjakondensaattorien huolto-ohjelmista.

Diplomityön keskeisenä tuloksena saatiin määritettyä vikojen pääasialliseksi syyksi suojaus- ja ohjausjärjestelmän viat ja virhetoiminnot. Viat osoittautuivat luonteeltaan vaikeasti ehkäistäviksi. Suojaus- ja ohjausjärjestelmän viat olivat aiheutuneet pääsääntöisesti signaalinsiirto- ja teholähdevioista sekä tuntemattomista syistä. Vuoden 2005 RCM-analyysi osoittautui edelleen pääpiirteittäin ajantasaiseksi, mutta vikojen vaikean ehkäisyn vuoksi viankorjausvalmiuteen tullaan jatkossa panostamaan. Tulevaisuudessa virhetoimintoja pyritään vähentämään kehittämällä suojaus- ja ohjausjärjestelmän FAT- ja SAT-testausta sekä tyyppi hyväksyntämenettelyä.

Työssä sarjakondensaattorin ohituksen vaikutusta arvioitiin siirtokyky- ja siirtotarveanalyyyseihin pohjautuvalla menetelmällä. Menetelmän avulla määriteltiin sarjakondensaattorien ohitusten aiheuttamien vastaostotarpeiden todennäköisyyksien suuruusluokat. Vaikka sarjakondensaattorin ohituksen vaikutus siirtokapasiteettiin on merkittävä, ei ohitus todennäköisesti aiheuta vastaostoja keskimääräisillä ohitusajoilla. Ohitusajan kasvassa vastaostojen todennäköisyys kuitenkin kasvaa melko nopeasti, joten nopea viankorjaus on tärkeää.

LÄHTEET

- [1] Fingrid Oyj, Vuosikertomus 2014, Helsinki, 2015, 167 s.
- [2] R. B. Jones, Risk-Based Management: A Reliability-Centered Approach, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, USA 1995, 282 p.
- [3] L. Bertling, Reliability Centered Maintenance for Electric Power Distribution Systems, dissertation, Royal Institute of Technology, 2002, 429 p.
- [4] P. Yli-Salomäki, Suurjännitelaitteiden luotettavuuskeskeinen kunnossapito, liseniaatintyö, Teknillinen Korkeakoulu, 2002, 79 s.
- [5] P. Yli-Salomäki, T. Kiiveri, Reliability Centered Maintenance of Substation Equipment in Fingrid Oyj, CIGRÉ, 2004, 5 p.
- [6] J. Elovaara, L. Haarla, Sähköverkot I, Otatiето, Helsinki, 2010, 520 s.
- [7] L. Ängquist, Synchronous Voltage Reversal Control of Thyristor Controlled Series Capacitor, dissertation, Royal Institute of Technology, 2002, 211 p.
- [8] P. M. Anderson, R. G. Farmer, Series Compensation of Power Systems, PBLSH! Inc., Encinitias, California, USA, 1996, 559 p.
- [9] CIGRÉ, JWG C4/B5.41 Challenges with series compensation application in power systems when overcompensating lines, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 2.10.2015): <http://c4.cigre.org/WG-Area/JWG-C4-B5.41-Challenges-with-series-compensation-application-in-power-systems-when-overcompensating-lines>
- [10] P. Kundur et al., Definition and Classification of Power System Stability, IEEE Transactions on Power Systems, Vol 19, No 2, 2004, pp. 1387–1401.
- [11] Kantaverkon käsikirja, Fingrid Oyj, 2011, 682 s. [Rajoitettu saatavuus]
- [12] J. Jyrinsalo, R. Hirvonen, Increasing the Utilisation of the Finnish 400 kV Grid, IEEE, Singapore, 1995, 6 p.
- [13] IEC 60143-1, Series capacitor for power systems - Part 1: General, Fourth edition, International Electrotechnical Commission, 2004, 119 p.

- [14] IEEE 824-2004, Standard for Series Capacitor Banks in Power Systems, New York, USA, 2005, 53 p.
- [15] Nord Pool Spot, Trading Capacities, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 8.7.2015): <http://www.nordpoolspot.com/TAS/Day-ahead-market-Elspot/Trading-capacities/>
- [16] Fingrid Oyj, Siirtojen hallintapolitiikka, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 7.7.2015): <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/markkinaliitteet/Rajakapasiteetit%20ja%20siirrot/Siirtojen%20hallintapolitiikka.pdf>
- [17] T. Rauhala, J. Jyrinsalo, H. Kuisti, Enhancing the Transmission Capability Using Facts: The Finnish Experience, IEEE, London, UK, 2010, 5 p.
- [18] J. Elovaara, L. Haarla, Sähköverkot II, Otatieto, Helsinki, 2011, 550 s.
- [19] ABB, Series Compensation: Boosting transmission capacity, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 29.5.2015): <http://new.abb.com/facts/fixed-series-compensation>
- [20] Electrical Engineering Portal, Providing capacitive reactive compensation with shunt capacitor banks, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.8.2015): <http://electrical-engineering-portal.com/providing-capacitive-reactive-compensation-with-shunt-capacitor-banks>.
- [21] J. Redlund, J. Fecteau, L. Paulsson ja L.-P. Rollin, A New Fast Protective Device for High Voltage Series Capacitor, IEEE, Montreal, Quebec, Canada , 2006, 7 p.
- [22] IEC 60143-2, Series capacitor for power systems - Part 2: Protective equipment for series capacitor banks, Edition 2.0, International Electrotechnical Commission, 2012, 112 p.
- [23] R. Gruenbaum, J. Rasmussen, C. Li, Series Capacitors for Increased Power Transmission Capability of a 500 kV Grid Intertie, IEEE, London, Ontario, Canada 2012, 6p.
- [24] SFS-EN 13306, Kunnossapidon terminologia, Suomen Standardisoimisliitto, Helsinki, 2001, 56 s.
- [25] Sähköturvallisuuslaki, L 14.6.1996/410, 1996. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1996/19960410>

- [26] KTMp 517/1996, Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös sähkölaitteistojen käyttöönotosta ja käytöstä, 1996. Saatavissa:
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1996/19960517>
- [27] M. Aro, Sähkölaitteiden kunnonvalvonta, Teknillinen korkeakoulu, Suurjännitetekniikan laboratorio, Espoo, 1998, 236 s.
- [28] J. Moubray, Reliability-centered Maintenance, Second Edition toim., Industrial Press Inc., New York, USA, 1997, 423 p.
- [29] National Aeronautics and Space Administration, RCM Guide For Facilities and Collateral Equipment, 2008, 472 p.
- [30] T. M. Allen, U.S. Navy Analysis of Submarine Maintenance Data and the Development of Age and Reliability Profiles, Portsmouth, New Hampshire, USA, 2001, 15 p.
- [31] SFS-IEC 50 191, Sähkötekniillinen sanasto. Luotettavuus ja palvelun laatu, Suomen standardisoimisliitto, Helsinki, 1996, 143 s.
- [32] M. Stamatelatos, W. Vesley, Fault Tree Handbook with Aerospace Applications, National Aeronautics and Space Administration, Washington D.C., USA, 2002, 203 p.
- [33] Suomen virallinen tilasto (SVT): Rakennuskustannusindeksi , verkkosivu. Saatavissa (viitattu 18.6.2015):
http://www.stat.fi/til/rki/2015/05/rki_2015_05_2015-06-16_tie_001_fi.html
- [34] BID3 - Pöyry's Power Market Model, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 24.6.2015):
<http://www.poyry.com/BID3>
- [35] RiskSpectrum PSA, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 28.9.2015):
http://www.riskspectrum.com/en/risk/Meny_2/RiskSpectrum_PSA/
- [36] A. Kong, Predicting Life from Analysis of Field Aged 500 kV Series Capacitors, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 12, No. 3, 1997, pp. 1374-1378
- [37] ENTSO-E, Nordic Grid Disturbance Statistics 2013, Brussels, Belgium, 2014, 64 p.
- [38] K. Nepola, asiantuntija, Fingrid Oyj, Helsinki. Haastattelu 18.8.2015

- [39] M. N. Tuzek, M. Bröker, V. Hinrichsen, R. Göhler, Effects of Continuous Operating Voltage Stress and AC Energy Injection on Current Sharing Among Parallel-Connected Metal–Oxide Resistor Columns in Arrester Banks, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 30, No. 3, 2015, pp. 1331–1337
- [40] T. Rauhala, On factors affecting TRV in Finnish series compensated 400 kV network, unpublished report, 2008, 34 p.
- [41] IEC 62271-100: High-Voltage Switchgear - Part 100: High-Voltage alternating-current circuit breakers, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland 2005, 696 p.
- [42] Energiavirasto, 1. suuntaviivat valvontamenetelmiksi neljännellä 1.1.2016 - 31.12.2019 ja viidennellä 1.1.2020 - 31.12.2023 valvontajaksolla, 2015, 85 s.
- [43] J. Lehtimäki, erikoisasiantuntija, Fingrid Oyj, Hämeenlinna. Haastattelu 26.8.2015
- [44] Alstom Grid Oy, asiantuntijatapaaminen, Tampere, 10.9.2015
- [45] Fingrid Oyj, P1-siirron historiatiedot, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.7.2015): <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/rajakapasiteetit/Sivut/Suomi-p-e-siirto.aspx>
- [46] Fingrid Oyj, Siirtokapasiteetin määrittäminen, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 27.8.2015): <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/markkinaliitteet/Rajakapasiteetit%20ja%20siirrot/Siirtokapasiteetin%20m%C3%A4%C3%A4ritt%C3%A4minen%202015.pdf>
- [47] Fingrid Oyj, Säätosähkön hinta, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 30.9.2015): <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/saatosahko/Sivut/Saatosahkon-hinta.aspx>
- [48] Fingrid Oyj, Voimansiirtoverkko, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.7.2015): <http://www.fingrid.fi/fi/yhtio/esittely/voimansiirtoverkko/Sivut/default.aspx>.

LIITE A: FINGRID OYJ:N VOIMANSIIRTOVERKKKO

FINGRID OYJ:N VOIMANSIIRTOVERKKKO

1.1.2015

- 400 kV kantaverkko
- 220 kV kantaverkko
- 110 kV kantaverkko
- tasavirtayhteys
- muiden verkko



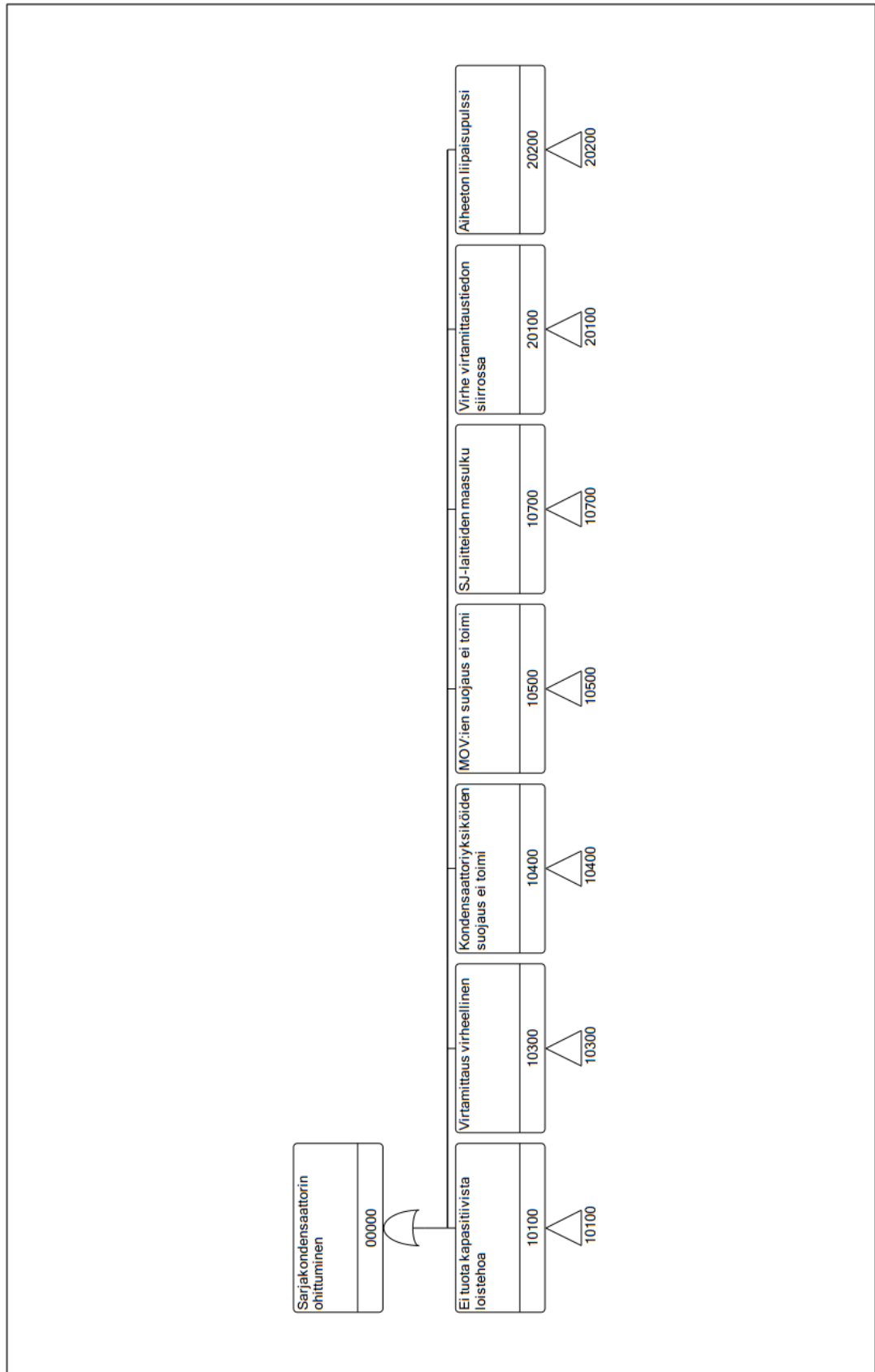
Kuva A.1 Fingrid Oyj:n voimansiirtoverkko. [48]

LIITE B: KONDENSAATTORIYKSIKÖIDEN VIKATAAJUUDET SARJAKONDENSAATTOREISSA JA RINNAKKAISKONDEN- SAATTOREISSA

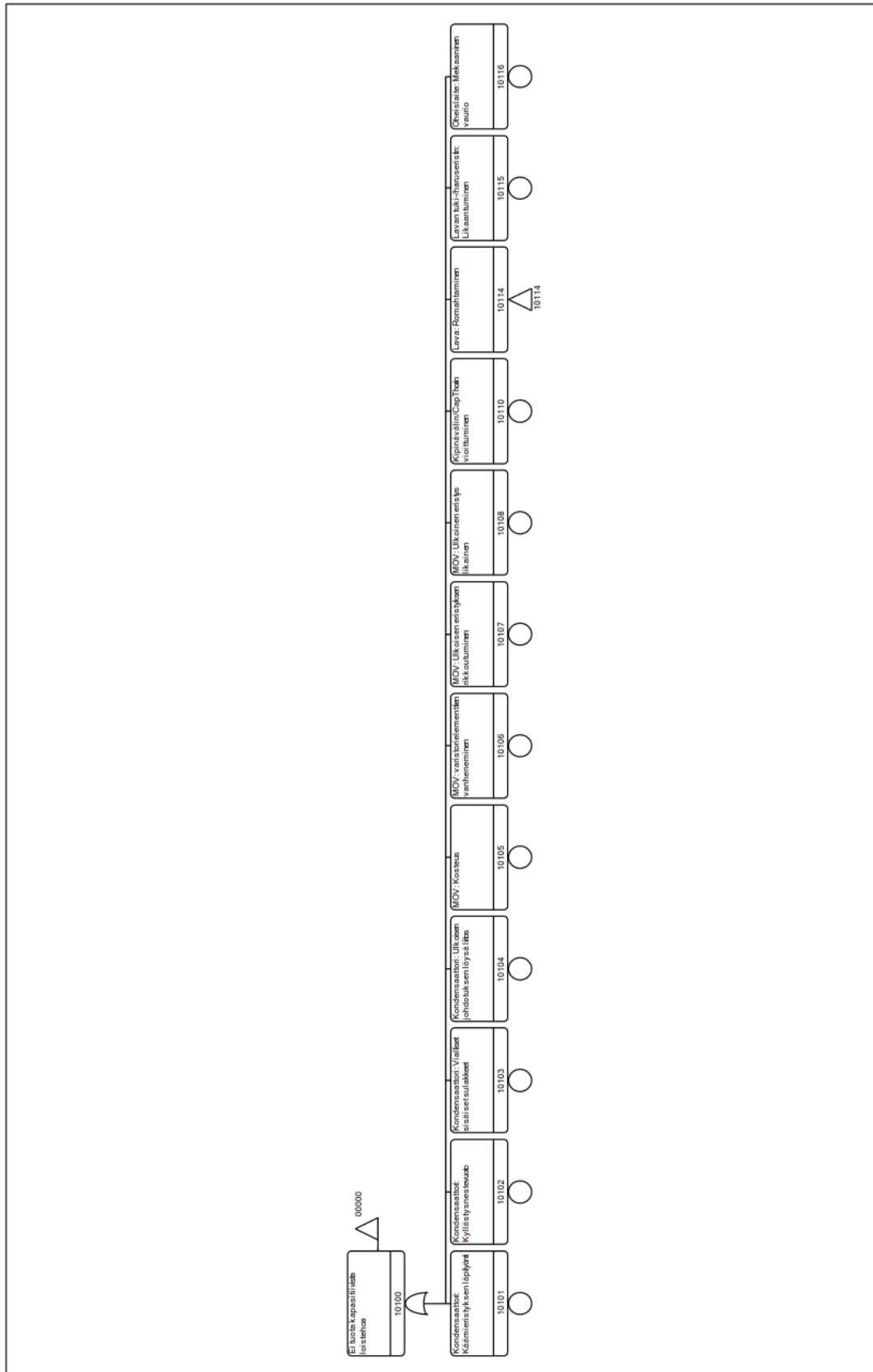
Taulukko B.1 Kondensaattoriyksiköiden vikataajuudet.

| Vuosi | Kondensaattoriyksiköiden määrä | |
|-------------|--------------------------------|---------------------------|
| | Sarjakondensaattorit | Rinnakkaiskondensaattorit |
| 1997 | 864 | 3540 |
| 1998 | 864 | 3540 |
| 1999 | 864 | 3540 |
| 2000 | 1128 | 3540 |
| 2001 | 1704 | 3540 |
| 2002 | 1704 | 3444 |
| 2003 | 1704 | 3492 |
| 2004 | 1704 | 3492 |
| 2005 | 1704 | 3492 |
| 2006 | 1704 | 3492 |
| 2007 | 2124 | 3462 |
| 2008 | 2124 | 3462 |
| 2009 | 2988 | 3276 |
| 2010 | 2988 | 3096 |
| 2011 | 2988 | 3096 |
| 2012 | 2988 | 3096 |
| 2013 | 2988 | 3000 |
| 2014 | 2988 | 3000 |
| Keskiarvo | 2006,67 | 3366,67 |
| Keski-ikä | 11,09 | 24,96 |
| Vikoja | 13 | 50 |
| Vikataajuus | 0,00038 | 0,00087 |

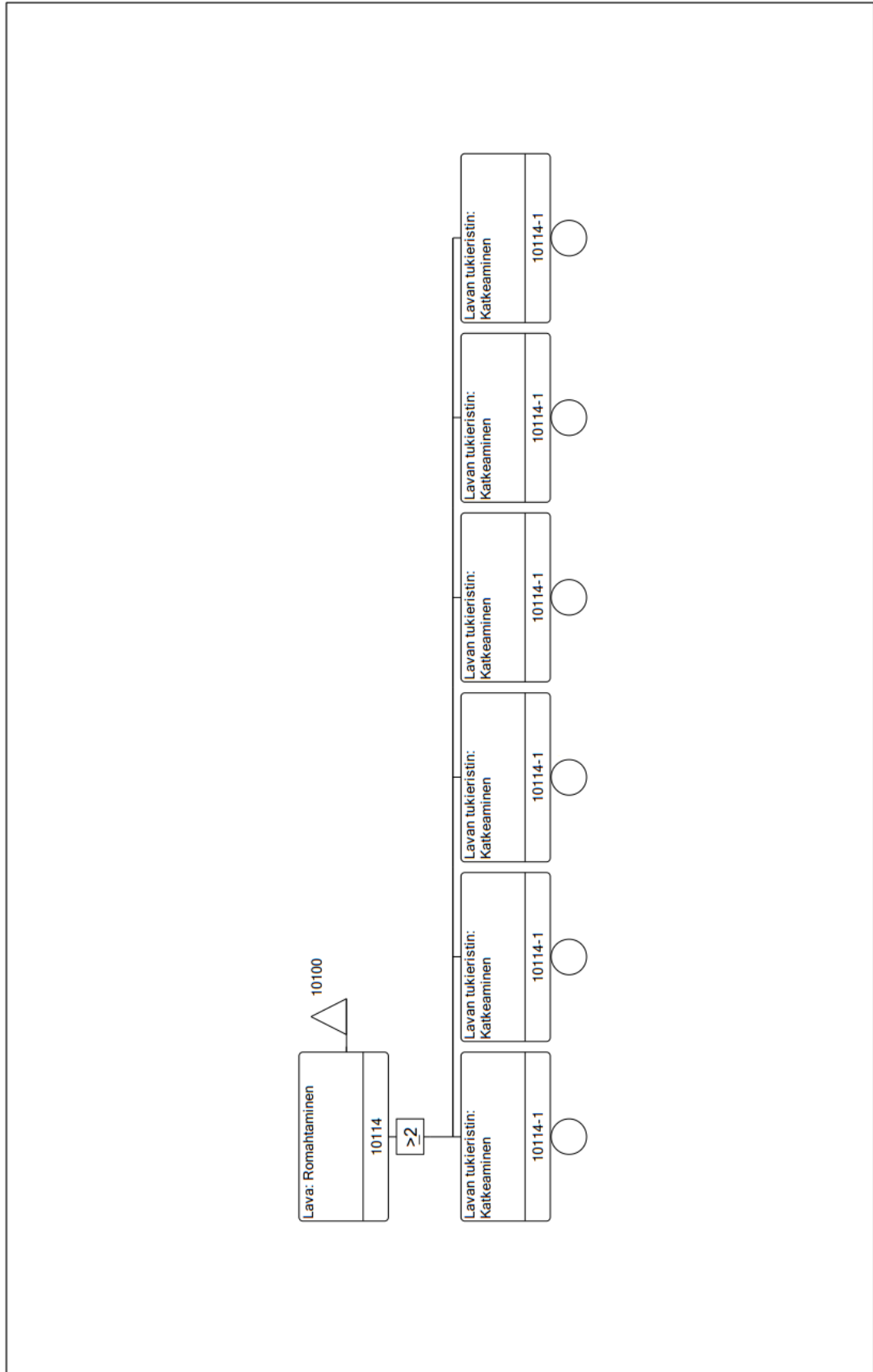
LIITE C: VIKAPUUNALYYSI



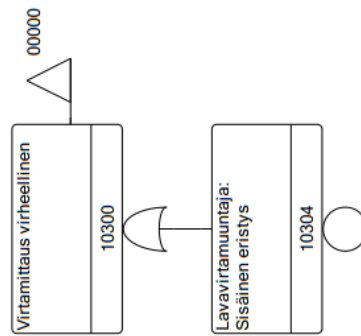
Kuva C.1 Vikapuuanalyysi: Sarjakondensaattorin ohittuminen.



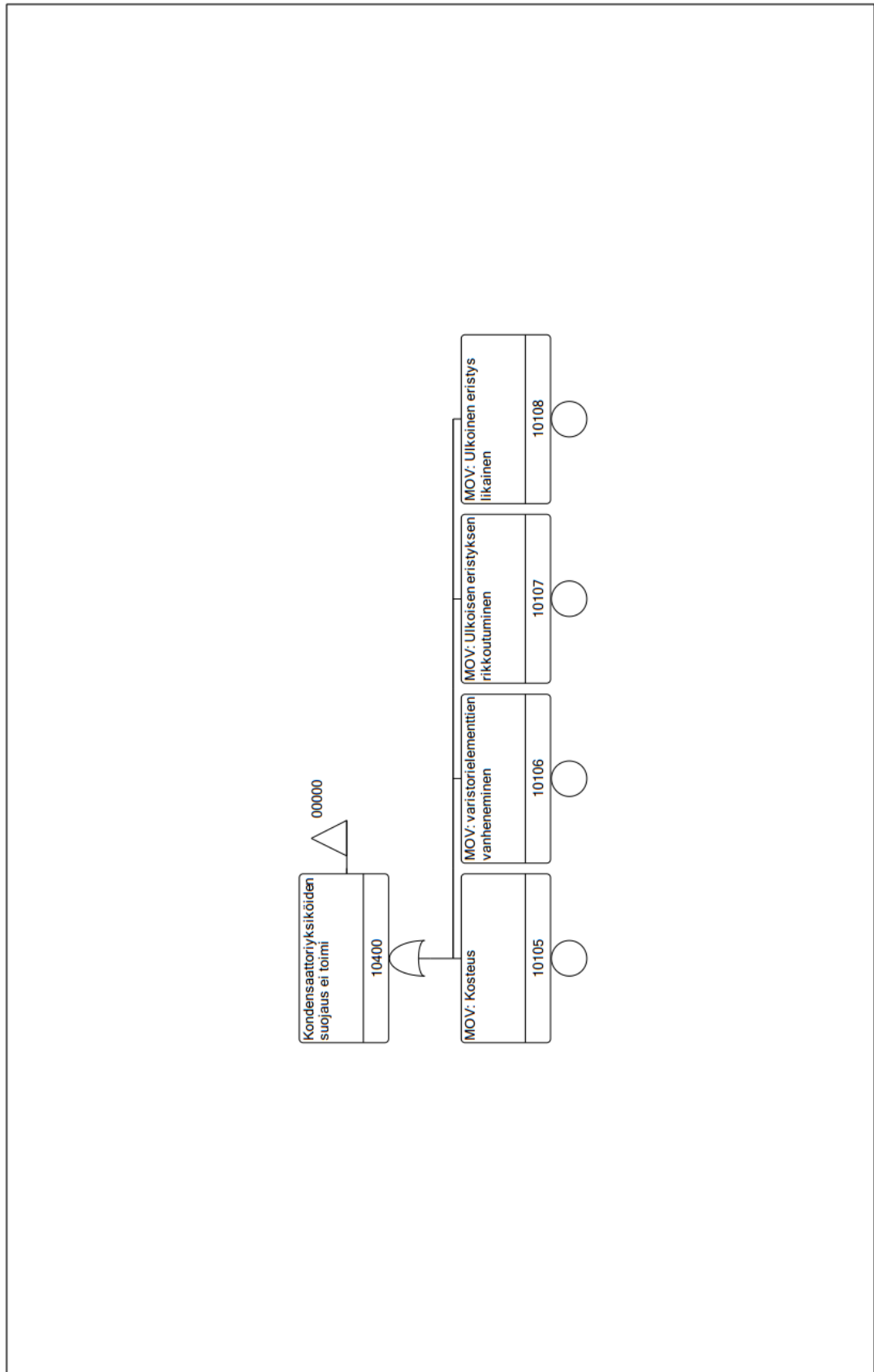
Kuva C.2 Vikapuuanalyysi: Ei tuota kapasitiivista loistehoa.



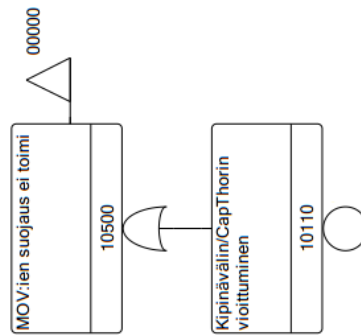
Kuva C.3 Vikapuuanalyysi: Lavan romahtaminen.



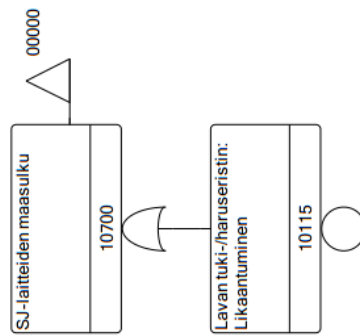
Kuva C.4 Vikapuuanalyysi: Virtamittaus virheellinen.



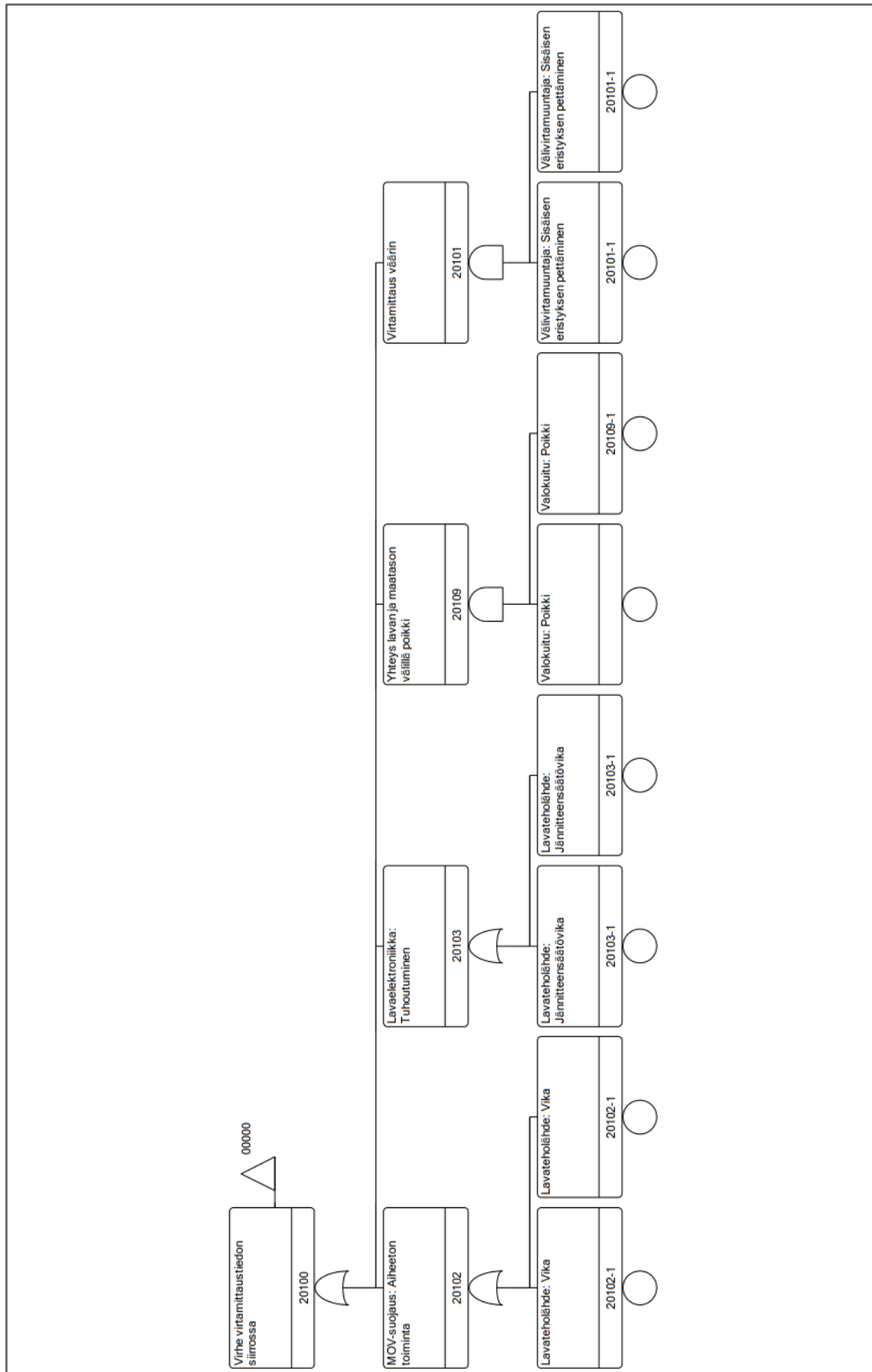
Kuva C.5 Vikapuuanalyysi: Kondensaattoriyksiköiden suojaus ei toimi.



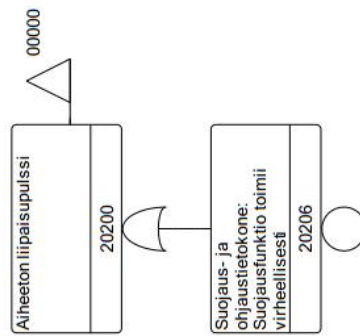
Kuva C.6 Vikapuuanalyysi: MOV:ien suojaus ei toimi.



Kuva C.7 Vikapuuanalyysi: SJ-laitteiden maasulku.



Kuva C.8 Vikapuuanalyysi: Virhe virtamittaustiedon siirrossa.



Kuva C.9 Vikapuuanalyysi: Aiheeton liipaisupulssi.

LIITE D: VASTAOSTOTARPEIDEN MÄÄRITTELYSSÄ KÄYTETYT SIIRTOKAPASITEETIN TUONTI- JA VIENTIRAJOITUKSET

Taulukko D.1 Sarjakondensaattorien ohitusta kuvaavat siirtokapasiteetin rajoitukset A, B ja C tuonti- ja vientitilanteissa. Taulukossa sinisellä kuvatut kuukaudet kuvaavat talvitilannetta ja oranssilla kuvatut kesätilannetta.

| Kuukausi | Tuontirajoitus | | | Vientirajoitus | | |
|-----------|----------------|-------|-------|----------------|------|-------|
| | A | B | C | A | B | C |
| Tammikuu | -5 % | -10 % | -14 % | -3 % | -6 % | -12 % |
| Helmikuu | -5 % | -10 % | -14 % | -3 % | -6 % | -12 % |
| Maaliskuu | -5 % | -9 % | -14 % | -3 % | -6 % | -11 % |
| Huhtikuu | -4 % | -7 % | -7 % | -3 % | -5 % | -14 % |
| Toukokuu | 4 % | -7 % | -7 % | -3 % | -5 % | -14 % |
| Kesäkuu | -4 % | -7 % | -7 % | -3 % | -5 % | -14 % |
| Heinäkuu | -4 % | -7 % | -7 % | -3 % | -5 % | -14 % |
| Elokuu | -4 % | -7 % | -7 % | -3 % | -5 % | -14 % |
| Syyskuu | -4 % | -7 % | -7 % | -3 % | -5 % | -14 % |
| Lokakuu | -5 % | -9 % | -11 % | -3 % | -6 % | -11 % |
| Marraskuu | -5 % | -10 % | -14 % | -3 % | -6 % | -12 % |
| Joulukuu | -5 % | -10 % | -14 % | -3 % | -6 % | -12 % |

LIITE E: RCM-ANALYYSI

| Osajärjestelmä | | Lavan suurjännitejärjestelmä | | VIKAMUOTO | | VIAN VAIKUTUS | | KRIITTISYYS | | | | Ensisijainen tehtävä | | Toistoväli | | Huom | | Varaosa-tyyppi | |
|----------------|---|------------------------------|------------------------|--|----------|---|--|--|---|---------------------------------|---|----------------------|---|--|-----|------|--|---|--|
| TOIMINTO | | TOIMINTOVAIK | | TOIMINTOVIAN AIHEUTTANUT LAITE | | VIAN SYY | | Järjestelmä | | Sarjakondensaattoriparisto | | | | | | | | | |
| Indeksi | Kuvaus | Tomiminnan epäonnistuminen | Teho = 0 | Indeksi | Vian syy | Paikallinen | Järjestelmä | Sarjakondensaattoriparisto | A | B | C | D | | | | | | | |
| 10100 | Tuottaa kapasitiivista loistehoa nimellisteholla | A | Teho = 0 | Kondensaattori | 10101 | Käämityksen läpilyönti | Sisäisiä sulakeita palaa | Epäbalanssivirta kasvaa (jos ei täsmälleen sama määrä sulakepaljoja eri haaroissa) | | x | | | Kondensaattorisyksiköiden kapasitanssimittaus | Häilyksen tultua, epäbalanssivirran muutosnopeus riittävän suur(3a) | | | | | |
| 10100 | | | | | 10102 | Kyllästystuotevoito (läpivientieristin, hitsaussaumaus) | Käämityksen jännitehuuho heikenee -> käänin läpilyönti -> yksiköt tuhoutuminen | Epäbalanssivirta kasvaa | | | | x | Kondensaattorisyksiköiden silmämerkinnän tarkastus | 1 a | | | | Maasta käsin ei näe. | |
| 10100 | | | | | 10103 | Vialliset sisäiset sulakkeet | Käämitysviat eivät kytkä viallista käämiä pois -> kapasitanssi kasvaa -> virta ja paine kasvavat -> yksiköt tuhoutuu | Epäbalanssivirta kasvaa. Lähistöllä olevat yksiköt voivat tuhoutua | | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10100 | | | | | 10104 | Loysä liitos | Ylimenovastus kasvaa | Epäbalanssivirta kasvaa | | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | Lämpökuvaus, momentin tarkastus. Kondensaattorien sijoitus siten, että lämpökuvaus mahdollinen | |
| 10100 | | | | | 10105 | MOV | Vuotovirta kasvaa, lopulta MOVin läpilyönti | Kondensaattorisyksiköt ohitetaan | | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | Varayksiköiden saatavuus? Vaihdettavuus vaiheiden kesken (energiakertymä, vikavirrat)? | |
| 10100 | | | | | 10106 | Varistorielementtien vanheneminen | Varistoelementti lyö läpi, jolloin muiden elementtien jännitearitus kasvaa. Lopulta MOV lyö läpi | Kondensaattorisyksiköt ohitetaan | | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10100 | | | | | 10107 | Ulkoinen eristys rikkoutunut | Kosteutta pääsee suojan sisään, heikentynyt ylilyöntihuuhoo | " | | | | x | MOVien silmämerkinnän tarkastus | 1 a | | | | Keminmaalla 4 MOVin eristintä haljennut (2x-99,-00,-04, huomattu lavalla) | |
| 10100 | | | | | 10108 | Ulkoinen eristys likainen | Epätasainen jännitejakautuma, heikentynyt ylilyöntihuuhoo | Jos ylilyönti, sarjassa oleva MOV rasittuu enemmän ja lyö läpi. Kondensaattorisyksiköt ohitetaan | | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10100 | | | | | 10109 | Sisäinen eristys | Virheellinen mittaustulos, lopulta laite tuhoutuu | Yhän mittaus ei tule (toisio kahdennettu). Jos johtovirtamuuttaja, kaukokäytössä huomataan kun I=0 | | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10100 | | | | | 10110 | Kipinäväli* | Kipinä vuoto | Jännitehuuho muuttuu -> kipinävälivirtaa | Kondensaattorisyksiköt ohitetaan | | | | x | Kipinävälivirran silmämerkinnän tarkastus | 1 a | | | | |
| 10100 | | | | | 10111 | Eläin kopissa | " | " | | | | x | Kipinävälivirran silmämerkinnän tarkastus | 1 a | | | | | |
| 10100 | | | | | 10112 | Mekaaninen muodonmuutos tai vaurio | Jännitehuuho muuttuu -> kipinävälivirtaa | Kondensaattorisyksiköt ohitetaan | | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10100 | | | | | 10112 | Cap Thor* | Jännitehuuho muuttuu -> kipinävälivirtaa | Kondensaattorisyksiköt ohitetaan | | | | x | Tomintatestaus | 3 a | | | | | |
| 10100 | | | | | 10113 | Liitokset | Loysä liitos | Liitos sulaa | Virta ei kulje | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | Reunoilla olevat liitokset voivat näkyä lämpökuvaussessa | |
| 10100 | | | | | 10114 | Mekaaninen vaurio | Tuki-harusieristin | Järjestelmä kestää yhden eristimen katkeamisen | Yhden vaiheen kompensointivaikutus häviää | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10100 | | | | | 10115 | Eristimen likaantuminen | Heikentynyt ylilyöntihuuhoo | Maasulku | Pyssyvä ohitus | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10100 | | | | | 10116 | Mekaaninen vaurio | Oheislaitte (nosturi, tikkaat) | Laite tai sen osa irtoaa | Pyssyvä ohitus | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10200 | Syöttää elektronikkajärjestelmän tarvitsema teho | A | Teho = 0 | Lavavirtamuuttaja | 10201 | Sisäinen eristys | Laite tuhoutuu | Ei tehonsyöttöä | | | x | | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10200 | | | | | 10202 | Mekaaninen vaurio | Lavakaapelointi | Kaapeli ei johda virtaa | Ei tehonsyöttöä | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10200 | | | | | 10203 | Mekaaninen tai sähköinen vaurio | Huoltosähkökotelot | Lavalla ei sähköä | Pakkolipaisuun testaus ei onnistu, lämmitysastus ei päällä | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10300 | Mittaa virtoja | A | Ei mittaa virtaa | Lavavirtamuuttaja | 10301 | Sisäinen eristys | Virheellinen mittaustulos, lopulta laite tuhoutuu | Yksi mittaus puuttuu (toisio kahdennettu). Jos johtovirtamuuttaja, kaukokäytössä huomataan kun I=0 | | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10300 | | | | | 10302 | Kytkeäntekotolon löysä liitos | Liitos kumenee ja sulaa, laite voi lopulta tuhoutua | " | | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10300 | | | | | 10303 | Mekaaninen vaurio | Lavakaapelointi | Kaapeli ei johda virtaa | " | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10300 | | B | Mittaa väärin | Lavavirtamuuttaja | 10304 | Sisäinen eristys | Virheellinen mittaustulos | Yksi mittaus näyttää väärin | | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10300 | | | | | 10305 | Kytkeäntekotolon löysä liitos | Ks. 10300 A | " | | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10400 | Suojata kondensaattori-yksiköitä | A | MOV hajoaa | MOV | 10401 | Kosteus | Vuotovirta kasvaa, lopulta MOVin läpilyönti | Kondensaattorisyksiköt ohitetaan | | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | Varayksiköiden saatavuus? Vaihdettavuus vaiheiden kesken (energiakertymä, vikavirrat)? | |
| 10400 | | | | | 10402 | Varistorielementtien vanheneminen | Varistoelementti lyö läpi, jolloin muiden elementtien jännitearitus kasvaa. Lopulta MOV lyö läpi | Kondensaattorisyksiköt ohitetaan | | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10400 | | | | | 10403 | Ulkoinen eristys rikkoutunut | Kosteutta pääsee suojan sisään, heikentynyt ylilyöntihuuhoo | " | | | | x | MOVien silmämerkinnän tarkastus | 1 a | | | | Keminmaalla 4 MOVin eristintä haljennut (2x-99,-00,-04, huomattu lavalla) | |
| 10400 | | | | | 10404 | Ulkoinen eristys likainen | Epätasainen jännitejakautuma, heikentynyt ylilyöntihuuhoo | Jos ylilyönti, sarjassa oleva MOV rasittuu enemmän ja lyö läpi. Kondensaattorisyksiköt ohitetaan | | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10500 | Suojata MOV-ja | A | Ei suojaa | Transientsuppressor | 10501 | Korttivika | Ei liipaisuulussa trigatronille | Kipinäväli ei syty | MOVit tuhoutuvat | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | Silmämääräinen tarkastus (kortin mustuminen), kipinävälipiirin toimintakoostus | |
| 10500 | | | | | 10502 | Trigatron | Suojakaasu(=tyyppi)vuoto | Syttyminen epästabiliksi | Kipinäväli voi syttyä liian aikaisin | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | Vika ei havaittavissa eikä kentällä tehtävää tehtävää, seurattava van kipinävälin toimintaa | |
| 10500 | | | | | 10503 | Kipinävälin muutos | Syttymisjännite muuttuu | Kipinävälin syttyminen muuttuu | Ohitus (pyssyvä, jos kipinävälivirtaa > 200 ms) | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10500 | | | | | 10504 | Kipinävälin vaimennus-vastus | Resistanssi kasvaa (voi jopa katketa) | Jännitejakokondensaattorin purkautumisaika kasvaa | Kipinäväli ei syty | MOVit tuhoutuvat | | x | Kipinävälin vaimennusvastuksen resistanssimittaus | 1 a | | | | | |
| 10500 | | | | | 10505 | Jännitejakokondensaattori | Sisäinen eristys | Kapasitanssi pienenee | Jännitejakokondensaattorin välillä muuttuu ja kipinäväli voi syttyä aiheuttomasti suuremmalla johtovirralla | Ohitus | | x | Jännitejakokondensaattorin kapasitanssimittaus | 1 a | | | | Helppo tehdä. ESLE-kondensaattoreissa ollut vikoja, mutta niissä ei ole jatkuvaa valvontaa kuten muissa kondensaattoreissa. | |
| 10500 | | | | | 10506 | Läpivientieristimet | Täyteainevuoto | Eristystaso muuttuu | Lavasulku | Pyssyvä ohitus | | x | Läpivientieristimen silmämerkinnän tarkastus | 1 a | | | | | |
| 10500 | | | | | 10507 | Kipinävälit | Mekaaninen vaurio tai muodonmuutos | Syttymisjännite muuttuu | Kipinävälin syttyminen muuttuu | Ohitus | | x | Kipinävälin välitysmitaus | 1 a | | | | | |
| 10600 | Suojata vikatilanteessa ohituskatkaisija tai kondensaattorisyksiköitä | A | Ei suojaa | Vaimennuskela | 10601 | Sisäinen eristys | Kierroskoosulut pienentävät kelan induktanssia | Vaimennus heikenee | Ohituskatkaisija voi vaurioitua | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | Maalin lohkeilu voi johtaa isompiin ongelmiin esim. veden lähtymisen seurauksena | |
| 10600 | | | | | 10602 | Ristikkoiltojen vaurio | Kela pois kytketty | " | " | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10600 | | | | | 10603 | Vaimennusvastus | Rinnakkaisen elementtien vaurioituminen suurentaa resistanssia | Vaimennuspiirin kipinäväli syttyy myöhemmin | Kondensaattori rasittuu enemmän vikatilanteissa, joissa vaimennuspiiri pitäisi toimia | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10600 | | | | | 10604 | Vaimennuspiirin kipinäväli | Mekaaninen muodonmuutos tai vaurio | Jännitehuuho muuttuu | Jos jännitehuuho pienenee, vaimennuspiiri ei sammu kondensaattorivirran purkauksen jälkeen | Ohituskatkaisija voi vaurioitua | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10600 | | | | | 10605 | Kotelon vuoto | Jännitehuuho muuttuu | " | " | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10600 | | | | | 10606 | Mekaaninen vaurio | " | " | " | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10700 | Eristää sj laitteet maasta | A | Eristys pettä | Tukieristin | 10701 | Mekaaninen vaurio | Ks. 10100 A | " | " | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10700 | | | | | 10702 | Apulaitteet | Unohtuneet apulaitteet | Maasulku | Pyssyvä ohitus | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10700 | | | | | 10703 | Mekaaninen vaurio | " | " | " | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 10800 | Pitää ympäristölle haitalliset eristysaineet laitteiden sisällä | A | Eristysaineet vuotavat | Kondensaattori | 10801 | Kyllästystuotevoito (läpivientieristin, hitsaussaumaus) | Ks. 10100 A | " | " | | | | | | | | | | |
| 10800 | | | | | 10802 | Läpivientieristimet | Täyteainevuoto | " | " | | | | | | | | | | |
| 10900 | Nostaa kondensaattorisyksiköitä tavara | | Nostoa ei voi tehdä | Nosturi | 10901 | Mekaaninen tai sähköinen vaurio | Nosturi ei toimi | Nostaja ei voi tehdä keskeytyksen aikana | Keskeytyksessä vaurioituu | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | | | |
| 11000 | Johtaa maavirta maahan | | Ei johda | Maadoitusjohdin (aloesien metalliosat) | 11001 | Poikki, irronnut | Ei maakosketusta | Indusoituu vaarallinen jännite | | | | x | Maadoitusten eheyttä | 12 a | | | | | |
| 11000 | | | | | 11002 | Loysä | Huono maakosketus | " | " | | | x | Maadoitusjohtimen kiinnityksen silmämerkinnän tarkastus | 3 a | | | | | |

Kuva E.1 RCM-päätöslomake: Lavan suurjännitejärjestelmä.

| Osajärjestelmä | | Kytkinlaitteet | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|--|----------------|---------------------------|--------------------------------|--|-----------|----------------------|---|------------------------|--|---|---|---|----------------------|-------------------------------|------|--------------|----------|--|
| TOIMINTO | | TOIMINTOVIKA | | TOIMINTOVIAN AIHEUTTANUT LAITE | | VIKAMUOTO | | VIAN VAIKUTUS | | KRIITTISYYS | | | | Ensisijainen tehtävä | Toistoväli | Huom | Varaosatarve | | |
| Indeksi | Kuvaus | Toiminnan | | | | Indeksi | Vian syy | Paikallinen | Järjestelmä | Sarjakondensaattoriparisto | A | B | C | D | | | | | |
| 30100 | Siirtää tilatieto | A | Ei siirry | Katkaisija | | | Tilatiedon välirele | Rele tuhoutuu | Hälytys | Katkaisijan vikasuojaus toimii. Antaa laukaisukäskyn johtokatkaisijoille | | | | x | tarkastus | 5 a | | vararele | |
| 30200 | Erottaa/kytkää sarjakondensaattori | A | Ei ohjaudu | Erotin | | | Ohjausrele | Rele tuhoutuu | | Ohjaus ei onnistu. Kytkenät pitkiytyvät. | | | | x | tarkastus | 5 a | | vararele | |
| 30200 | | B | Ohjautuu epätäydellisesti | Erotin | | | Mekaaninen muutos | Koskettimet eivät mene yhteen | | Ohjaus ei onnistu. Kytkenät pitkiytyvät. | | | | x | yleistarkastus | 1 a | | | |
| 30300 | | A | Ei ohjaudu | Katkaisija | | | Ohjausrele | Ei välitä ohjauskäskyä | Hälytys | Ohjaus ei onnistu. Sarjakondensaattorin takaisinkytkentä verkkoon pitkiytyy. | | | | x | tarkastus | 5 a | | vararele | |
| Osajärjestelmä | | Kaukokäyttö | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TOIMINTO | | TOIMINTOVIKA | | TOIMINTOVIAN AIHEUTTANUT LAITE | | VIKAMUOTO | | VIAN VAIKUTUS | | KRIITTISYYS | | | | Ensisijainen tehtävä | Toistoväli | Huom | Varaosatarve | | |
| Indeksi | Kuvaus | Toiminnan | | | | Indeksi | Vian syy | Paikallinen | Järjestelmä | Sarjakondensaattoriparisto | A | B | C | D | | | | | |
| 40100 | Välittää tietoa sarjakondensaattorin ja valvomon välillä | A | Välitetty tieto väärin | GWS | | 40101 | ohjelmisto | | | Sarjakondensaattorin hälytystiedot virheelliset | | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | |
| 40100 | | B | Yhteys ei toimi | GWS | | 40102 | ohjelmisto | | | Kaukokäyttö ei mahdollista | | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | |
| 40100 | | | | GWS | | 40103 | kuituvika/ohjelmisto | jos liikenne ei kokonaan poikki, kanava ei vaihdu | Kaukokäyttö ei päivity | Kaukokäyttö ei mahdollista | | | | x | Ei säännöllistä kunnossapitoa | | | | |

Kuva E.3 RCM-päätöslomake: Kytkinlaitteet ja kaukokäyttö.