



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

OLLI-PEKKA JANHUNEN
SARJAKONDENSAATTORIN YLIJÄNNITESUOJAUKSEN
TOTEUTUS SUOMEN KANTAVERKOSSA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Sami Repo
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 31. tammi-
kuuta 2018

TIIVISTELMÄ

OLLI-PEKKA JANHUNEN: Sarjakondensaattorin ylijännitesuojauksen toteutus Suomen kantaverkossa

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 100 sivua, 17 liitesivua

Maaliskuu 2018

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Sähköverkot ja markkinat

Tarkastaja: professori Sami Repo

Avainsanat: TRV, metallioksidivaristori, kipinävälitön sarjakondensaattori, palaava jännite, varistorien energiamitoitus, sarjakompensointi

Diplomityössä tutkittiin mahdollisuutta siirtyä käyttämään kipinävälitöntä sarjakondensaattoria Suomen kantaverkossa. Kipinävälittömällä sarjakondensaattorilla halutaan parantaa sarjakondensaattorin luotettavuutta. Kipinävälittömyys aiheuttaa sarjakondensaattorin ohitusajan pidentymisen, joka lisää ylijännitesuojana toimivien metallioksidivaristorien tarvittavaa määrää ja kasvattaa johtokatkaisijoiden palaavan jännitteen riskiä.

Kipinävälittömyys on työn tulosten perusteella investointikustannusten näkökulmasta kannattava ratkaisu, kun uusi sarjakondensaattori rakennetaan keskelle johtoa tai johdon päähän asemalle, jolta on maksimissaan kaksi 400 kV:n johtolähtöä. Kun sarjakondensaattori rakennetaan johdon päähän asemalle, jolta on useampi kuin kaksi 400 kV:n johtolähtöä, kipinävälittömyyden kannattavuus investointikustannusten näkökulmasta riippuu projektikohtaisista varistorien ja kipinävälidikomponenttien hinnoista.

Kipinävälittömään sarjakondensaattoriin kannattaa siirtyä suojaus- ja ohjausjärjestelmäusinnan yhteydessä, mikäli varistorien energiakapasiteetti on riittävä myös kipinävälittömälle sarjakondensaattorille. Tällöin kipinävälittömään sarjakondensaattoriin siirtyminen aiheuttaa lisäkustannuksia ainoastaan sarjakondensaattoreilla, joiden nykyiset ohituskatkaisijat ovat selvästi hitaampia kuin markkinoiden nopeimmat ohituskatkaisijat.

Sarjakondensaattorin kipinävälittömyyden aiheuttama johtokatkaisijoiden palaavan jännitteen (TRV, Transient Recovery Voltage) riskin kasvu on työn tulosten perusteella mahdollista kompensoida käyttämällä suurempia 550 kV:n johtokatkaisijoita. Tulosten perusteella ohituskatkaisijan hidastuminen kasvattaa TRV-riskiä ja varistorien energiakertymää sisäisissä vioissa, minkä vuoksi kipinävälittömän sarjakondensaattorin ohituskatkaisijan toimintaviive kannattaa minimoida. Johtokatkaisijan toiminnan hidastuminen pienentää TRV-riskiä, mutta aiheuttaa suuremman riskin sarjakondensaattorin ohittumiselle ulkoisessa viassa epäonnistuneen jälleenkytkennän tai johtokeskeytystilanteen takia.

Kipinävälittömän sarjakondensaattorin lisäksi työssä pohdittiin sarjakondensaattorien varistorien mitoituseriaatteita verkkotilanteen, vika-ajan, jälleenkytkentöjen ja keskeytyksen näkökulmasta. Tulosten perusteella mitoitukseseen kannattaa käyttää ulkoisessa viassa 70 ms:n vika-aikaa. Epäonnistuneita jälleenkytkentöjä ei ole tarpeellista huomioida mitoituksessa. Mitoitukseseen on suositeltavaa käyttää verkkomallia, joka kuvaa keskimääräisen kesäpäivän oikosulkutehoa. Mitoituksessa ei ole tarpeellista huomioida keskeytyksiä.

ABSTRACT

OLLI-PEKKA JANHUNEN: Overvoltage Protection Implementation of a Fixed Series Capacitor in Finnish Power System

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 100 pages, 17 Appendix pages

March 2018

Master's Degree Program in Electrical Engineering

Major: Power Systems and markets

Examiner: Professor Sami Repo

Keywords: transient recovery voltage, TRV, gapless series capacitor, series compensation

In this thesis, a possibility to use gapless overvoltage protection implementation in fixed series capacitors (FSC) in the Finnish Power System was studied. The aim of using gapless FSC is to improve reliability of series capacitors. Gapless implementation causes longer bypass time to the capacitor, which creates a need to increase the amount of metal-oxide-varistors and increases transient recovery voltage (TRV) risk of line breakers.

Based on the results of this thesis, gapless FSC has lower capital costs than FSC with a protective gap, when a new FSC is built into middle of a transmission line or into end of a line, which has maximum two 400 kV feeder bays. If FSC is built into end of a line into a substation, which has more than two 400 kV feeder bays, cost-effectiveness of a gapless implementation depends on project dependable prices of the varistors and the protective gap.

In case of control and protection system renewal, transfer to the gapless overvoltage implementation is recommendable, if varistor's installed energy capability is sufficient for gapless FSC. In this case, the only additional cost is caused by change of bypass switches in those FSCs, where current bypass switches are significantly slower than the fastest available bypass switches.

Based on the studies, the TRV-risk in lines containing series capacitor with protective gap and 420 kV line circuit breakers is approximately equal to TRV-risk in lines containing gapless series capacitor and 550 kV circuit breakers. Slower bypass switch had higher TRV-risk and varistor's accumulated energy in internal faults than fast bypass switch, thus operation delay of gapless FSC's bypass switch is recommended to be minimized. Slower line circuit breaker was found to decrease TRV risk of line circuit breakers. However, slower circuit breaker increases risk of capacitor bypass in external faults caused by failed auto-reclose or transmission line outage contingency.

Additionally, energy capacity design principles of series capacitor's varistors were discussed in the thesis. Based on the studies, it is recommended to use 70 ms fault time in external faults, when calculating varistors accumulated energy. Accumulated energy shall be calculated by using grid model, in which short-circuit current level represents typical summer day's short-circuit current level. Transmission line contingencies or failed auto-reclose cycles shall not be required.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Fingrid Oyj:lle HVDC ja FACTS -yksikköön. Työn tarkastajana oli professori Sami Repo Tampereen teknillisestä yliopistosta ja ohjaajana DI Kimmo Nepola Fingrid Oyj:stä. Työni ohjausryhmään kuuluivat Fingrid Oyj:stä Kimmo Nepola, Tuomas Rauhala, Antti Harjula, Juho Tuominen ja Tuomas Laitinen.

Työni ohjausryhmää haluan kiittää hyvästä ohjauksesta ja mielenkiinnosta työtäni kohtaan. Erityiskiitoksen ansaitsee työni ohjaaja Kimmo Nepola, joka oli aina valmis auttamaan ongelmasta riippumatta. Kiitos myös työni tarkastajalle professori Sami Revolle laadukkaasta työn kommentoinnista.

Helsingissä, 17.3.2018

Olli-Pekka Janhunen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen tausta	1
1.2	Tutkimuskysymykset ja diplomityön tavoitteet	1
1.3	Diplomityön rakenne	2
2.	SARJAKOMPENSOINTI	3
2.1	Sarjakondensaattorin toimintaperiaate	3
2.2	Sarjakompensoinnin vaikutus Suomen voimajärjestelmään	4
2.2.1	Sarjakondensaattorit kantaverkossa	4
2.2.2	Sarjakompensoinnin vaikutus kantaverkon siirtokapasiteettiin	6
2.3	Sarjakondensaattorin komponentit	8
3.	SARJAKONDENSAATTORIN YLIJÄNNITESUOJAUS KANTAVERKOSSA	10
3.1	Ylijännitesuojauksen vaatimukset kantaverkossa	10
3.2	Varistorit	11
3.2.1	Metallioksidisuojaajan toimintaperiaate	11
3.2.2	Varistorien energiamitoitus	13
3.3	Suojaus- ja ohjausjärjestelmä	16
3.4	Kipinäväli	18
3.4.1	Perinteinen pakkoliipaistava kipinäväli	18
3.4.2	Nopea ohituskytkin	19
3.4.3	Kipinävälin apulaitteet	20
4.	NYKYISEN YLIJÄNNITESUOJAUSTOTEUTUKSEN ONGELMAT	22
4.1	Kipinävälin aiheuttamat luotettavuusongelmat	22
4.2	Varistorien mitoituseriaatteet	23
4.3	Palaava jännite	24
4.3.1	Palaavan jännitteen muodostuminen	24
4.3.2	Suurjännitekatkaisijoiden palaavan jännitteen kestoisuusvaatimukset	27
4.3.3	Vaikuttavat tekijät	28
4.3.4	Aiemmat tutkimukset TRV-riskin määrittämiseksi sarjakompensoidussa verkossa	31
5.	YLIJÄNNITESUOJAUKSEN VAIHTOEHTOISET TOTEUTUSTAVAT JA HUOMIOITAVAT RISKIT	34
5.1	Kipinävälittömyyden vaikutukset sarjakondensaattorin rakenteeseen ja ylijännitesuojauksen toteutukseen	34
5.1.1	Kipinävälittömyyden edut	34
5.1.2	Kipinävälittömyyden riskit ja haasteet	35
5.2	Varistorien ulkoisen vian vika-ajan määrittäminen	37
5.2.1	Johdonsuojareleen toimintaviiveen määrittäminen	37
5.2.2	Johtokatkaisijan toimintaviiveen määrittäminen	39

5.2.3	Johtokatkaisijan avautumisajanhetki.....	41
5.3	Sarjakondensaattorin ohituksen koordinointi johtosuojauksen kanssa	43
5.4	Palaavan jännitteen rajoitusmenetelmät	47
6.	TUTKIMUSMENETELMÄT	49
6.1	Komponenttien mallintaminen	49
6.2	PSCAD-malli	50
6.3	Varistorien mitoituseriaatteet	51
6.3.1	Vikasekvenssi ja vikapaikat	51
6.3.2	Jälleenkytkentöjen huomioiminen energiamitoituksessa.....	53
6.3.3	Keskeytysten huomioiminen energiamitoituksessa	53
6.3.4	Mitoituksessa käytettävän verkkomallin oikosulkuteho	54
6.4	TRV-tarkastelu	54
6.4.1	Tutkimuksessa tehdyt valinnat.....	55
6.4.2	Sarjakondensaattorin suojauksen mallinnus	55
6.4.3	Johtosuojauksen toimintasekvenssin mallinnus.....	57
6.4.4	Simulointitulosten käsittely.....	58
7.	TULOKSET	60
7.1	Varistorien mitoitus.....	60
7.1.1	Kipinävälittömyyden vaikutus varistorien energiamitoitukseen ja kustannuksiin.....	60
7.1.2	Energiamitoitukseen käytettävän ulkoisen vian vika-ajan ja epäonnistuneiden jälleenkytkentöjen vaikutus energiamitoitukseen ja kustannuksiin.....	64
7.1.3	Johtokeskeytysten huomioiminen energiamitoituksessa	69
7.1.4	Energiamitoituksessa käytettävän verkkomallin oikosulkuteho	71
7.1.5	Toiminta-aikojen määrittämiseen liittyvien epävarmuuksien vaikutus energiakertymään.....	73
7.1.6	Mitoitukseen ja riskiarvioihin liittyvät epävarmuudet.....	76
7.2	Johtokatkaisijoiden TRV-riski sarjakompensoidussa verkossa	77
7.2.1	Kipinävälittömyyden vaikutus TRV-riskiin.....	77
7.2.2	Johtokatkaisijan toiminta-ajan vaikutus TRV-riskiin	80
7.2.3	Ohituskatkaisijan toiminta-ajan vaikutus TRV-riskiin	82
7.2.4	Johtokatkaisijan nimellisjännitteen vaikutus TRV-riskiin.....	84
7.2.5	TRV-riskiarvioon liittyvät epävarmuudet.....	85
7.3	Tulosten yhteenveto	87
8.	JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUSAIHEET	91
8.1	Johtopäätökset	91
8.2	Suosittelavat jatkotutkimusaiheet.....	92
9.	YHTEENVETO	94
	LÄHTEET.....	95

LIITE A: SUOMEN 400 KV:N KANTAVERKKO

LIITE B: JOHTOVIKOJEN LUKUMÄÄRÄ JA JAKAUTUMINEN 400 KV:N KANTAVERKOSSA

LIITE C: KANTAVERKON SARJAKONDENSAATTORIEN SUOJAUSTASON JA VAIMENNUSPIIRIN ARVOT

LIITE D: PSCAD-MALLI

LIITE E: MOV-MITOITUSPERIAATTEIDEN TUTKIMISEEN KÄYTETYT VI-KAIPAUKSET, KESKEYTYSTILANTEET JA JÄLLEENKYTKENTÖJEN SUUNNAT

LIITE F: KIPINÄVÄLITTÖMÄN JA KIPINÄVÄLILLISEN SARJAKONDENSAATTORIN TRV-TULOKSET

LIITE G: JOHTOKATKAISIJAN JA OHITUSKATKAISIJAN TOIMINTA-AJAN VAIKUTUS TRV-RISKIIN

LYHENTEET JA MERKINNÄT

LYHENTEET

1phg	Yksivaiheinen maasulku.
2ph	Kaksivaiheinen oikosulku.
2phg	Kaksivaiheinen oikosulku maakosketuksella.
3ph	Kolmivaiheinen oikosulku.
3phg	Kolmivaiheinen oikosulku maakosketuksella.
AJK	Aikajälleenkytkentä.
API	Arc Plasma Injector, Cap-Thor-kipinävälin plasmakytin.
CAN	Controller Area Network, automaatioväylä.
DC	Direct Current, tasavirta.
FC	Fast Connector, Cap-Thor-kipinävälin mekaaninen kytkin.
FPD	Fast Protective Device, sarjakondensaattoreiden suojaamiseen käytettävä pakkoliipaistava kipinäväli. Termiä käytetään työssä kuvaamaan yleisesti kipinäväliä.
FSC	Fixed Series Capacitor, sarjakondensaattori.
GE	General Electric, sarjakondensaattorivalmistaja.
ERoR	Energy Rate of Rise, varistorien energian nousunopeus.
HV	High voltage, korkeajännite.
I/O-rack	Ristikytkentäkaappi.
K1	Ylijännitesuojaustoteutus, joka koostuu suojakipinävälistä ja ohituskatkaisijasta.
kAp	Peak kiloampere.
km	Kilometri.
kVp	Peak kilovoltage.
LV	Low Voltage, pienjännite.
M1	Ylijännitesuojaustoteutus, joka koostuu varistoreista ja ohituskatkaisijasta.
M2	Ylijännitesuojaustoteutus, joka koostuu varistoreista ja ohituskatkaisijasta ja pakkoliipaistavasta kipinävälistä.
MJ	Megajoule.
MOV	Metal Oxide Varistor, metallioksidivaristorisuoja, jota käytetään esimerkiksi sarjakondensaattorin ylijännitesuojaukseen.
ms	Millisekunti.
MV	Medium Voltage, keskijännite.
NC	Nokia Capacitor, entinen sarjakondensaattorivalmistaja. Nykyisin osa GE Grid Solutions yhtiötä.
OSU	Operation and Supervision Unit, CapThorin-kipinävälin suojaus- ja valvontayksikkö, joka sisältää kipinävälin liipaisuun tarvittavan elektroniikan.
P1	Pohjois- ja Etelä Suomen välinen leikkaus.
PFRV	Power Frequency Recovery Voltage, palaavan jännitteen perusosa.
PJK	Pikajälleenkytkentä.
POW	Point of Wave. Termiä käytetään kuvaamaan vian alkuajanhetkeä.
RAC	Ruotsin ja Suomen välinen leikkaus.
RRRV	Rate of Rise of Recovery Voltage, palaavan jännitteen nousunopeus.

T10	Katkaisijan läpi katkaisuhetkellä kulkevan virran tehollisarvo on 10 % katkaisijan nimellisvirran tehollisarvosta. Kantaverkon 420 kV katkaisijoilla 4 kA.
T100	Katkaisijan läpi katkaisuhetkellä kulkevan virran tehollisarvo on 100 % katkaisijan nimellisvirran tehollisarvosta. Kantaverkon 420 kV katkaisijoilla 40 kA.
T30	Katkaisijan läpi katkaisuhetkellä kulkevan virran tehollisarvo on 30 % katkaisijan nimellisvirran tehollisarvosta. Kantaverkon 420 kV katkaisijoilla 12 kA.
T60	Katkaisijan läpi katkaisuhetkellä kulkevan virran tehollisarvo on 60 % katkaisijan nimellisvirran tehollisarvosta. Kantaverkon 420 kV katkaisijoilla 24 kA.
μs	Mikrosekunti.
TRV	Transient recovery voltage, palaavan jännitteen transienttiosa.
ZnO	Sinkkioksidi.

MERKINNÄT

α	Gammajakauman ensimmäinen parametri
β	Gammajakauman toinen parametri
E_{MOV}	Varistorien energiakertymä
$f_{1\text{phg-Ohi_AJK}}$	1phg-johtoviat 400 kV:n verkossa vuodessa/100 km: Ohi AJK:lla
$f_{1\text{phg-pysyvä}}$	1phg-pysyvät johtoviat 400 kV:n verkossa vuodessa/100 km
$f_{3\text{phg}}$	3phg-johtoviat 400 kV:n verkossa vuodessa/100 km
FPD_{on}	Kipinäväli käytössä
I	Johdon kuormitusvirta
i_{line}	Sarjakondensaattorin linjavirta
k	Sarjakompensoidun voimajohdon kompensointiaste
$l_{1\text{phg-AJK}}$	Epäonnistuneen AJK:n riskialue 1phg-viassa
$l_{1\text{phg-PJK}}$	Epäonnistuneen PJK:n riskialue 1phg-viassa
$l_{3\text{phgPE-TO}}$	Kondensaattoriohituksen riskialue PE-TO-johdolla 3phg-viassa
$l_{3\text{phgPR-PS}}$	Kondensaattoriohituksen riskialue PR-PS-johdolla 3phg-viassa
$P_{1\text{phg}}$	Ohituksen todennäköisyys vuoden aikana 1phg-viassa
$P_{3\text{phg}}$	Ohituksen todennäköisyys vuoden aikana 3phg-viassa
Q_{sc}	Sarjakondensaattorin tuottama loisteho
t	Ajanhetki
$t_{\text{BP-sw}}$	Ohituskatkaisijan kokonaistoimintaviive
t_{Flt}	Vian alkuaianhetki
t_{FPD}	Kipinävälin kokonaistoimintaviive
t_{Relay}	Johdonsuojareleen havahtumisviive
t_{SVY}	Johdonsuojareleiden välinen SVY-viive
$t_{\text{SVY_FSC}}$	Ulkoisen ohitussignaalin SVY-viiveen
trip	Ohitussignaali
U_{CB}	Johtokatkaisijan yli oleva jännite
U_{line}	Johtokatkaisijan voimajohdon puoleisen navan jännite maata vasten
U_{src}	Johtokatkaisijan ulkoisen verkon puolen jännite maata vasten
X_L	Voimajohdon reaktanssi
X_{sc}	Sarjakondensaattorin reaktanssi

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Suomessa kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj (jatkossa Fingrid) vastaa voimajärjestelmään liitettyistä sarjakondensaattoreista, joiden merkittävimpana tehtävänä on lisätä Suomen ja Ruotsin sekä Pohjois- ja Etelä-Suomen välistä siirtokapasiteettia [1]. Sarjakondensaattorin luotettava toiminta verkon vikatilanteissa on tärkeä asia siirtokyvyn säilymisen kannalta. Kondensaattorin virheellinen ohittuminen saattaa aiheuttaa merkittäviä kustannuksia, ja jo mahdollisuus kondensaattorin ohittumiselle saattaa joissain tilanteissa johtaa siirtokyvyn rajoittamiseen [2], [3].

Fingridin aiemmassa sarjakondensaattoriselvityksessä [3] sekä käytännön kokemusten kautta [4], [5] on todettu, että merkittävä osa sarjakondensaattorin virhetoiminnoista aiheutuu suojaus- ja ohjausjärjestelmästä sekä kipinävälin virhetoiminnoista. Eräänä vaihtoehtona parantaa kondensaattorien luotettavuutta on ehdotettu kipinävälistä luopumista, jolloin kondensaattorin ohitus vikatilanteessa tapahtuisi kipinävälin sijaan ohituskatkaisijan avulla. Tällöin sarjakondensaattorin rakenne yksinkertaistuisi, mikä vähentäisi mahdollisten vikaantuvien komponenttien ja virhetoimintojen määrää. Toisaalta verkon vikatilanteessa kondensaattorin ohitusaika kasvaisi kipinävälin toiminta-ajasta, eli noin 1–2 millisekunnista [6], ohituskatkaisijan toiminta-aikaan, eli noin 20–50 millisekuntiin [5], [7], [8]. Tämän vuoksi ensisijaisena kondensaattorin ylijännitesuojana toimivien metallioksidivaristorien määrää pitäisi kasvattaa [9, s. 50]. Uutta sarjakondensaattoria rakennettaessa osa varistorien lisäämisen aiheuttavista investointikustannuksista on mahdollista kustantaa kipinävälikomponenttien hinnalla [4].

Eräs mahdollinen este sarjakondensaattorin kipinävälittömyydelle on johtokatkaisijoiden yli vaikuttavan palaavan transienttiylijännitteen (TRV, Transient Recovery Voltage) kestoisuus. Aiemmissa sarjakompensoidulle verkolle tehdyissä TRV-tarkasteluissa on havaittu, että sarjakondensaattorin ohittaminen selvästi ennen johtokatkaisijoiden avautumista pienentää TRV-riskiä selvästi [10], [11], [12]. Toisaalta aiemmin aiheesta tehtyjä tarkasteluja ei voida pitää riittävän laajoina, jotta riskitasoa myöskään kipinävälillisen sarjakondensaattorin sisältämällä voimajohdoilla voitaisiin arvioida luotettavasti.

1.2 Tutkimuskysymykset ja diplomityön tavoitteet

Diplomityön tavoitteena on selvittää, millä teknistaloudellisilla reunaehdoilla kipinävälittöntä sarjakondensaattoria on mahdollista siirtää käyttämään Suomen kantaverkossa.

Diplomityön tutkimusosuus jakautuu kahteen osaan, joista ensimmäisessä tehdään kipinävälillisen ja kipinävälittömän sarjakondensaattorin metallioksidivaristorille energiamitoitus. Varistorien energiamitoituksen kustannusvaikutusta verrataan kipinävälittömyydestä saataviin säästöihin. Työssä on lisäksi tavoitteena ottaa kantaa, kuinka ja millä suunnitteluperiaatteilla varistorien mitoitusta tulisi tulevaisuudessa kantaverkossa tehdä. Esimerkiksi energiamitoitukseen käytetty ulkoisen vian vika-aika, epäonnistuneet jälleenytkennät, verkkomallin oikosulkuteho ja johtokeskeytystilanteet vaikuttavat varistorien mitoitukseen ja investointikustannuksiin.

Tutkimusosion toisessa osassa tarkastellaan johtokatkaisijoiden TRV-riskiä sarjakompensoidussa verkossa. Keskeisin työssä tutkittava parametri on kondensaattorin ohitusajankohta, joka kipinävälittömyyden vuoksi siirtyisi lähemmäs johtokatkaisijan toimintahetkeä. Diplomityössä pyritään vertaamaan kipinävälittömän ja kipinävälillisen sarjakondensaattorin aiheuttamaa TRV-riskitasoa Suomen 400 kV:n sarjakompensoidussa kantaverkossa. Riskitasolle tehdään työssä herkkyystarkastelu TRV:n kannalta keskeisiä muuttujia varioimalla. TRV-riskitason mittarina käytetään katkaisijastandardin IEC-62271-100 [13] määrittämiä TRV-verhokäyriä.

1.3 Diplomityön rakenne

Diplomityön luvussa 2 esitellään sarjakompensoinnin toimintaperiaate ja sarjakondensaattorin sisältämät komponentit. Lisäksi luvussa esitellään kantaverkon sarjakondensaattorit ja niiden vaikutus kantaverkon siirtokapasiteettiin. Luvussa 3 käsitellään sarjakondensaattorin ylijännitesuojauksen vaatimuksia sekä ylijännitesuojauksen nykyistä toteutustapaa.

Luvussa 4 käsitellään nykyisen ylijännitesuojaustoteutuksen ongelmia, joita ovat esimerkiksi kipinävälin sekä suojaus- ja ohjausjärjestelmän aiheuttamat luotettavuusongelmat, varistorien nykyiset mitoituseriaatteet ja johtokatkaisijoiden palaavan jännitteen riski sarjakompensoidussa verkossa. Luvussa 5 esitetään vaihtoehtoisia ylijännitesuojauksen toteutustapoja, joilla luvussa 4 esitetyistä ongelmista päästäisiin eroon. Luvussa käsitellään muun muassa kipinävälittömän sarjakondensaattorin etuja ja haasteita, varistorien mitoituksessa käytettävää vika-aikaa sekä palaavan jännitteen rajoitusmenetelmiä.

Luvussa 5 esitellään varistorien energiamitoituksen ja palaavan jännitteen tutkimiseen työssä käytetyt tutkimusmenetelmät. Luvun 5 tutkimusmenetelmillä tuotetut tulokset esitellään luvussa 6. Luvussa 7 tehdään työn tulosten perusteella johtopäätökset ja suositellaan jatkotutkimuskohteita. Lopuksi luvussa 8 on yhteenveto työn keskeisistä asioista.

2. SARJAKOMPENSOINTI

Luvun 2 keskeisimmät tavoitteet ovat luoda lukijalle yleiskuva sarjakondensaattorin toiminnasta, sarjakompensoinnin hyödyistä sekä kantaverkon sarjakondensaattoreista. Luvussa 2.1 kerrotaan sarjakondensaattorin toimintaperiaatteesta ja kompensointiasteen valinnasta. Luvussa 2.2 esitellään kantaverkon sarjakondensaattorit ja niiden vaikutus siirtokapasiteettiin. Luvussa 2.3 käsitellään sarjakondensaattorin sisältämiä komponentteja.

2.1 Sarjakondensaattorin toimintaperiaate

Sarjakondensaattori on kompensoitavan johdon kanssa sarjaan kytkettävä laite, jonka tehtävänä on kompensoida pitkän siirtoyhteyden induktiivista reaktanssia, ja näin pienentää johdon sähköistä pituutta. Sarjakondensaattori pienentää johdon päiden välistä kulmaeroa tuottamalla osan johdon kuluttamasta loistehosta. Sarjakondensaattori parantaa verkon kulma- ja jännitestabiiliutta sekä pienentää johdon kuormitushäviöitä. [14, s. 232]

Sarjakondensaattoripariston tuottama loisteho Q_{sc} on verrannollinen johdon kuormitusvirran I neliöön sekä pariston reaktanssiin X_{sc} yhtälön

$$Q_{sc} = 3X_{sc}I^2 \quad (1)$$

mukaisesti, jolloin kondensaattoripariston tuottama loisteho muuttuu johdon loistehotarpeen mukaan. Sarjakompensoinnin yhteydessä keskeinen käsite on kompensointiaste k , joka kuvaa kuinka suuren osan voimajohdon induktiivisesta reaktanssista sarjakondensaattori kompensoi. [14, ss. 232-233] Kompensointiaste lasketaan kondensaattoripariston reaktanssin X_{sc} suhteena johdon reaktanssiin X_L yhtälön

$$k = \frac{X_{sc}}{X_L} \quad (2)$$

mukaisesti. Voimajohdon kompensointiaste vaihtelee standardin IEC-60143-1 [15, s. 43] mukaan tyyppillisesti välillä 20–80 %.

Kompensointiasteen nostaminen lisää johdon stabiiliutta ja jänniteprofiilia, mutta käytännössä siirtoyhteyttä ei kannata ylikompensoida. Johdon keskelle sijoitettu sarjakondensaattori aiheuttaa jännitteen askelmaisen kasvun, mikä saattaa aiheuttaa ylijänniteongelmia suurilla kompensointiasteilla. Jännitteen askelmainen nousu aiheuttaa myös ongelmia johtosuojauksen toteutukselle. Suurilla kompensointiasteilla kondensaattori saattaa muuttaa verkon ominaistajuuden alueelle, joka on lähellä turbogeneraattorin akselin ominaistajuuden kanssa. Tällöin generaattorin akseli voi joutua sarjaresonanssiin verkon reaktanssin kanssa, mistä käytetään nimitystä aliharmoninen resonanssi (SSR, Subsynchron-

ronous Resonance). Resonanssitilanteen aiheuttama hallitsematon värähtely aiheuttaa riskin turbogeneraattorin akselin rikkoutumiselle. [14, ss. 235-236], [15, ss. 10, 43] Lisäksi sarjakompensoidun voimajohdon johtokatkaisijoiden TRV-riski kasvaa kompensointias-teen kasvaessa [12].

2.2 Sarjakompensoinnin vaikutus Suomen voimajärjestelmään

Suomen kantaverkossa on asennettuna 11 sarjakondensaattoria, joiden tarkoituksena on kasvattaa Pohjois- ja Etelä-Suomen sekä Suomen ja Ruotsin välisten pullonkaulojen siirtokapasiteettia. Sarjakompensoinnin on havaittu olevan tehokas tapa kyseisten pullonkaulojen siirtokapasiteetin kasvattamiseen pitkien välimatkojen vuoksi. Tulevaisuudessa sarjakompensoinnin merkitys kasvanee kantaverkossa entisestään uuden Ruotsin ja Suomen välisen rajasiirtoyhteyden, uusien ydinvoimalahankkeiden sekä lisääntyvän tuulivoi-man vuoksi. [1], [16], [17]

2.2.1 Sarjakondensaattorit kantaverkossa

Suomen kantaverkossa ja sen yhteyksissä naapurimaihin on kaksi keskeistä siirtokykyä rajoittavaa pullonkaulaa: Pohjois-Suomen ja Pohjois-Ruotsin välinen RAC-leikkaus sekä Pohjois- ja Etelä-Suomen välinen P1-leikkaus. Suomen kantaverkossa sarjakondensaattorien tärkeimpänä tehtävänä on lisätä Pohjois-Suomen ja Pohjois-Ruotsin sekä Pohjois- ja Etelä-Suomen välistä siirtokapasiteettia. RAC-leikkaus koostuu kahdesta sarjakompensoidusta voimajohdosta sekä P1-leikkaus neljästä 400 kV:n sarjakompensoidusta ja kahdesta 220 kV:n sarjakompensoimattomasta voimajohdosta. Fingrid ja Svenska kraftnät (SvK) ovat sopineet kolmannen vaihtosähköyhteyden RAC3:n toteuttamisesta. Voimajohdon on suunniteltu kulkevan Ruotsin Messauresta Suomen puolelle Keminmaan kautta Pyhänselkään. Johtoyhteys on tavoitteena saada käyttöön vuonna 2025. [18]

Sähkön tuonnin kasvu, tuulivoiman lisääntyminen Pohjois-Suomessa sekä mahdollinen Fennovoiman ydinvoimalaitos edellyttävät viidettä 400 kV:n johtoa P1-leikkaukseen. Nykyinen suunnitelma on rakentaa uusi 400 kV:n johto nykyisen 220 kV:n voimajohdon tilalle Pyhänselästä Petäjävedelle. Viides P1-johto eli Metsälinja on suunniteltu valmistuvaksi vuonna 2022. [17, s. 27], [19] Metsälinja on suunniteltu kompensoitavaksi yhdellä sarjakondensaattorilla (Kivijärvi) sekä 3. RAC-johto kahdella sarjakondensaattorilla (Tuomela 2 ja Isovaara 2). Isovaara 2-sarjakondensaattori tullaan rakentamaan Ruotsin puolelle, jonka vuoksi kondensaattori tulee olemaan SvK:n omistama. [20]

Tällä hetkellä Suomen kantaverkkoon on asennettu 11 sarjakondensaattoria (FSC, Fixed Series Compensator), joista seitsemän on Nokia Capacitorsin (NC), kaksi ABB:n ja kaksi Siemensin valmistamia. Näiden lisäksi toinen RAC-leikkauksen 400 kV:n voimajohdoista (Isovaara) on sarjakompensoitu, mutta kondensaattori sijaitsee Ruotsin puolella ja on SvK:n omistama. Kokonaisuudessaan elokuun 2017 loppuun mennessä Fingridin

omistuksessa oli noin 5279 km 400 kV:n voimajohtoa, joista noin 1304 km oli sarjakompensoitua [5]. Taulukossa 2.1 on esitetty kantaverkon nykyiset yksitoista sarjakondensaattoria ja kaksi suunnitteilla olevaa sarjakondensaattoria. Kartta Suomen 400 kV:n kantaverkon voimajohdoista ja sarjakondensaattoreista on esitetty liitteessä A.

Taulukko 2.1 *Fingridin omistamien ja suunniteltujen sarjakondensaattorien tiedot. Voimajohto, voimajohdon pituus ja kompensointiasteet on esitetty taulukossa katkaisijoiden rajaamana alueena. Muokattu lähteistä [3], [5], [21], [20].*

FSC	Lyhenne	Voimajohto	Valmistaja	Valmistusvuosi	Voimajohdon pituus (km)	Reaktanssi (Ω)	Nimellisvirta (A)	Kompensointiaste (k)
Keminmaa Länsi	KIL ¹	DJ-KI	NC	1997	67	31	1800	140
Keminmaa Itä	KII	KI-PR	NC	1997	141	31	1800	70
Vuolijoki Pohjoinen	VJP	PS-VJ	NC	2000	103	25,5	1400	75
Vuolijoki Etelä	VJE	VJ-AP	NC	2000	105	25,5	1400	76
Uusnivala Itä	UNI	PS-AJ	NC	2001	246	54	1400	69
Uusnivala Etelä	UNE ²	PR-AJ	NC	2001	225	27	1400	74
Uusnivala Pohjoinen	UNP ²	PR-AJ	NC	2001	225	27	1400	74
Tuomela	TE	PT-IK	ABB	2009	116	31	1800	82
Asmunti	AS	PI-PR	ABB	2009	172	38	1800	68
Hirvisuo Pohjoinen	HSP	JY-HS	Siemens	2016	81	16,4	1800	73
Hirvisuo Etelä	HSE	HS-TU	Siemens	2016	110	23,8	1800	75
Tuomela 2	TE2 ³	PS-SM	-	-	114	30	3150	70
Kivijärvi	KJ ³	PE-PS	-	-	303	60	3150	75

Vanhimmat kantaverkkoon asennetut sarjakondensaattorit sijaitsevat Keminmaalla, jonne tehtiin vuonna 2017 suojaus- ja ohjausjärjestelmien uusinta. Tyypillisesti suojaus- ja ohjausjärjestelmän uusinta pyritään tekemään kantaverkon kondensaattoreille 20 vuoden käytön jälkeen [22, s. 28] niiden elinkaaren puolivälissä [23, s. 81].

¹ Osa DJ-KI-voimajohdosta sijaitsee Ruotsin puolella [5]. Voimajohdon korkea kompensointiaste johtuu Djuptdjärnin sähköasemasta, joka on rakennettu voimajohdolle sarjakondensaattorin valmistumisen jälkeen [20]. Sarjakompensoidun Svartby-Keminmaa-siirtoyhteyden kompensointiaste on 70 % [21].

² Uusnivala Läntinen (UNL) sarjakondensaattori koostuu UNE- ja UNP-sarjakondensaattoreista, joiden välissä ei ole johtokatkaisijoita.

³ Taulukossa TE2- ja KJ-sarjakondensaattoreille esitetyt arvot ovat arvioita. Sarjakondensaattorin nimellisvirtana on käytetty voimajohdon komponenteille suunniteltua nimellisvirtaa.

2.2.2 Sarjakompensoinnin vaikutus kantaverkon siirtokapasiteettiin

Siirtokapasiteetilla tarkoitetaan voimajärjestelmän kahden pisteen tai alueen välille määritettyä pätötehon siirtokykyä. Pohjoismaisessa voimajärjestelmässä siirtokapasiteetin määrittämiseksi käytetään N-1-käyttövarmuusperiaatetta, jonka mukaan järjestelmä kestää tavanomaiset yksittäiset viat ja vikaantuneen komponentin irtoamisen ilman tuotannolle tai kulutukselle aiheutuvaa keskeytystä. Termiä ”mitoitettava vika” käytetään kuvaamaan vikaa, joka on voimajärjestelmän sähkön toimitusvarmuuden kannalta kriittisin vika. Pohjoismaisessa voimajärjestelmässä on vaatimus siitä, että mitoitettavan vian jälkeen järjestelmä tulee pystyä palauttamaan 15 minuutissa tilaan, jossa se kestää jälleen uuden mitoitettavan vian. [14, s. 74], [24, s. 7]

Verkon siirtokapasiteettia rajoittavia tekijöitä ovat muun muassa voimajohtojen ja siirtoverkon komponenttien terminen kuormitettavuus sekä siirtoverkon stabiilius. Nykyisessä markkinatilanteessa tehoa siirtyy pääasiallisesti Pohjois-Ruotsista Etelä-Suomeen, jolloin tyypillisesti siirtoa rajoittaa jännitestabiilius [1]. Tulevaisuudessa Olkiluoto 3-reaktorin valmistuttua on mahdollista, että tehoa siirtyy useammin myös Suomesta Ruotsiin päin. Kun tehoa siirretään suuria määriä Suomesta Ruotsiin, saattaa Etelä-Suomen ja Etelä-Ruotsin generaattoreiden välille syntyä heikosti vaimenevia tehoheilahteluja [1]. Heilahtelujen vaimentuminen on tyypillisesti siirtokapasiteettia rajoittava tekijä, kun tehoa siirretään Suomesta Ruotsiin [1].

Sarjakompensoinnin on havaittu olevan kustannustehokas tapa kasvattaa Suomen ja Ruotsin välistä siirtokapasiteettia. Sarjakondensaattorin avulla voidaan parantaa siirtoyhteyden kulmastabiiliutta ja jännitestabiiliutta, minkä vuoksi se soveltuu hyvin kantaverkon siirtokapasiteetin parantamiskeinoksi. Sarjakondensaattorien avulla voimajohtoja pystytään käyttämään lähempänä niiden termistä kapasiteettia, jolloin monessa tapauksessa vältytään uusien voimajohtojen rakentamiselta. [16]

Sarjakondensaattorin luotettava toiminta verkon vikatilanteissa on tärkeää siirtokapasiteetin varmistamisen kannalta. Sarjakondensaattorin verkosta irtoamisella eli virheellisellä ohittumisella on vaikutusta verkon siirtokapasiteettiin. Taulukossa 2.2 on esitetty yksittäisen sarjakondensaattorin ohittumisen vaikutusta P1-leikkauksen siirtokapasiteettiin. Kokonaisuudessaan yksittäisen sarjakondensaattorin ohittumisen vaikutus P1-leikkauksen siirtokapasiteettiin on noin 3–14 %. Eniten P1-leikkauksen siirtokapasiteettiin vaikuttaa RAC-yhdysjohdon KIL- ja KII-sarjakondensaattorit. [3, ss. 52-53]

Kondensaattorin virheellinen ohittuminen saattaa aiheuttaa tarpeen vastaostoille, joiden avulla pyritään palauttamaan siirtotilanne määritellyn siirtokapasiteetin mukaiseksi. Vastaostoja ei tarvitse tehdä, mikäli siirrot eivät ylitä siirtokapasiteettia. Tyypillisesti sarjakondensaattorin virheellinen ohittuminen normaalissa käyttötilanteessa ei aiheuta tarvetta vastaostoille, koska P1-leikkauksen siirrot ovat harvoin lähellä siirtorajoja. [3, ss. 52-53]

Taulukko 2.2 Sarjakondensaattorin ohittumisen vaikutus P1-leikkauksen siirtokapasiteettiin. Muokattu lähteestä [3, s. 52].

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 P	-7 %	-6 %	-7 %	-5 %
Uusnivala E	-7 %	-6 %	-7 %	-5 %
Uunivala I	-10 %	-6 %	-7 %	-5 %
Keskimäärin	-8 %	-6 %	-6 %	-6 %

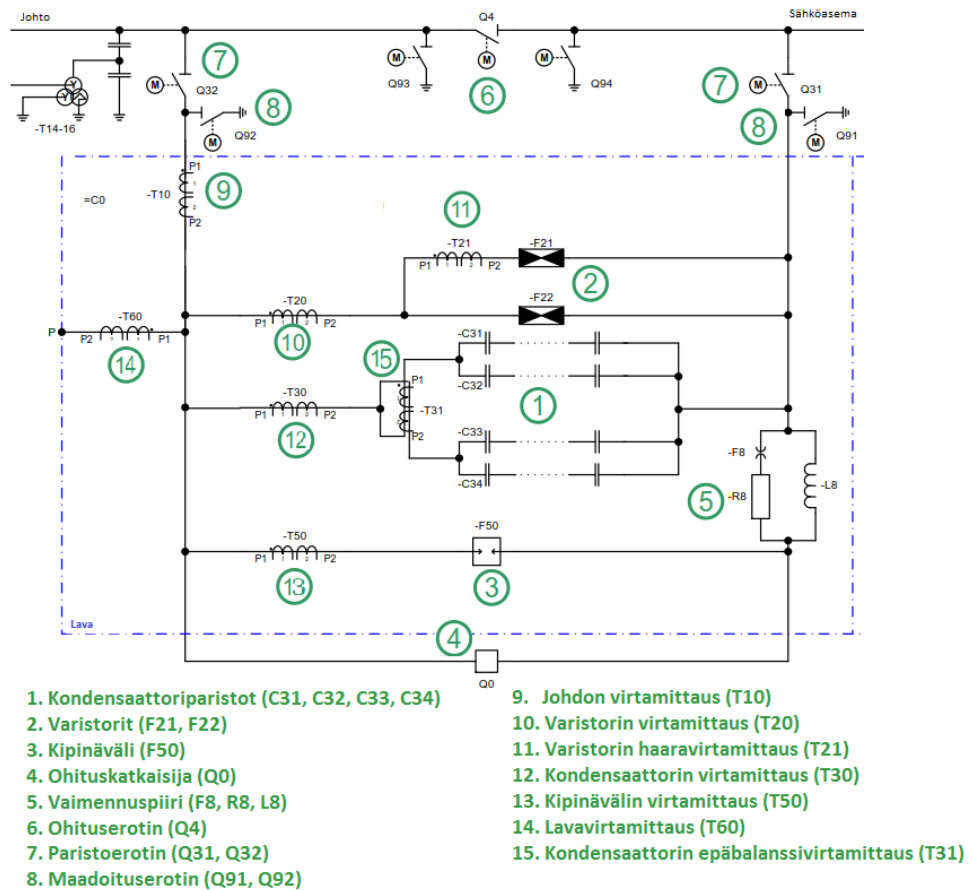
Sarjakondensaattorin ohittuminen esimerkiksi rinnakkaisen voimajohdon pysyvässä viassa sen sijaan aiheuttaa suuremman vastaostotarpeen todennäköisyyden, koska tällöin sarjakondensaattorin lisäksi häviää myös rinnakkaisen voimajohdon tarjoama siirtokapasiteetti [4]. Johtokeskeytystilanteessa P1-leikkauksen siirto on useammin lähellä siirtorajaa, joten sarjakondensaattorin virheellinen ohittuminen keskeytystilanteessa pysyvän vian yhteydessä aiheuttaa useammin vastaostoja kuin normaalin käyttötilanteen yhteydessä [2]. Pysyvän vian yhteydessä tapahtuva kondensaattorin ohittuminen on järjestelmän kannalta N–2-vika ja saattaa joissain tilanteissa vaarantaa verkon stabiiliuden [20].

Jotta sarjakondensaattorin ohittuminen pysyvän johtovian seurauksena aiheuttaisi stabiiliusongelmia, täytyisi P1-siirron ennen vikaa lähellä siirtorajaa. Suurimman osan ajasta P1-siirto on nykyisin normaalissa käyttötilanteessa kaukana siirtorajasta [3, s. 51]. Tämän vuoksi stabiiliusongelmien syntyminen yhden sarjakondensaattorin ohittumisen seurauksen pysyvässä johtoviassa voidaan arvioida olevan epätodennäköistä. Toisaalta tulevaisuuden siirtoennusteissa P1-siirron on arvioitu olevan useammin lähellä siirtorajaa [20].

Stabiiliusongelmia todennäköisemmin sarjakondensaattorin virheellinen ohittuminen verkon vikatilanteessa aiheuttaa vastaostokustannuksia. Mahdollista menetettävää P1-leikkauksen siirtokapasiteettia voidaan havainnollistaa käyttämällä taulukossa 2.2 esitettyä kantaverkon sarjakondensaattorien keskimääräistä 6 %:n vaikutusta P1-leikkauksen siirtokapasiteettiin kesän tuontitilanteessa. Kesän tuontitilanne kuvaa parhaiten vastaostojen riskiä, koska nykyisellä markkinatilanteella tehoa siirtyy suurimman osan ajasta Ruotsista Suomeen, ja viat tapahtuvat tyypillisesti kesällä (ks. liite B). P1-leikkauksen enimmäissiirtokapasiteetti on kesällä 2300 MW [3, s. 51], joten sarjakondensaattorin ohittumisen vaikutus on keskimäärin noin 138 MW. Vuoden 2014 keskimääräisellä 70 €/MWh vastaostokustannuksella [3, s. 57] ja tunnin sarjakondensaattorin epäkäytettävyydellä vastaostojen kustannuksiksi voidaan arvioida noin 10 400 €.

2.3 Sarjakondensaattorin komponentit

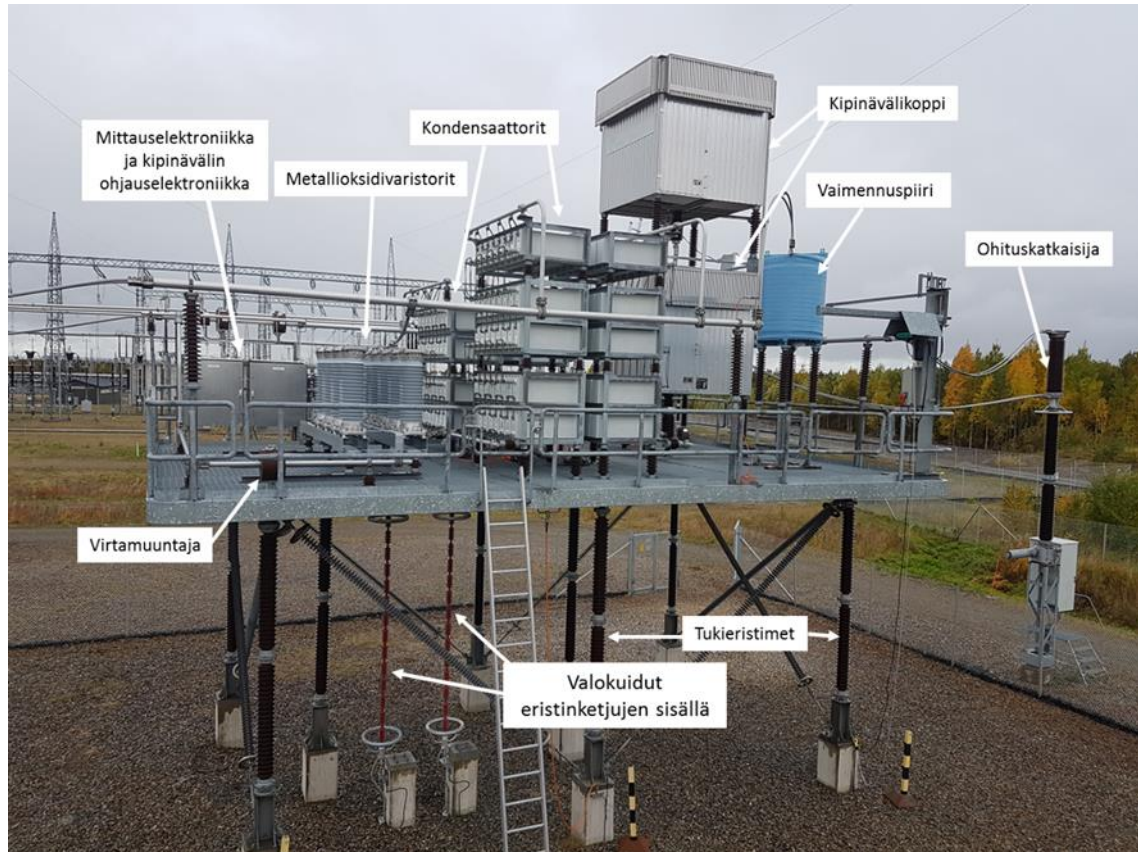
Sarjakondensaattori on johdon kanssa vaihekohtaisesti kuvan 2.1 mukaisesti sarjaan kytkettävä laite. Sarjakondensaattorin kondensaattoriparistot muodostuvat useista rinnankytketyistä osaparistoista (C31–C34) [9, s. 43]. Osaparistot taas koostuvat sarjaankytketyistä kondensaattorielementeistä [25]. Sarjakondensaattorin rinnalle kytketään ohituskatkaisija (Q0) ja ohituserotin (Q4) sekä sarjaan paristoerottimet (Q31, Q32), koska kondensaattori on pystyttävä erottamaan verkosta tarvittaessa. Ohituskatkaisija on normaalisti auki, ja virta kulkee kondensaattorin läpi. Kun kondensaattori halutaan ohittaa, katkaisija suljetaan ja virta siirtyy kulkemaan suljetun katkaisijan läpi. [14, ss. 232-235] Ohituskatkaisijan eristystaso on maata vasten sama kuin muillakin 400 kV:n katkaisijoilla, mutta katkaisupäiden jännitelujuuden suuruudeksi riittää sarjakondensaattorin suojausjännite, jonka suuruus kantaverkon sarjakondensaattoreilla on 96–246 kV [5].



Kuva 2.1 Sarjakondensaattorin yhden vaiheen piirikaavio. Muokattu lähteestä [26].

Kondensaattorin rinnalle kytketään pääasiallisena ylijännitesuojana toimivat metallioksidivaristorit (F21 ja F22) sekä pakkoliipaistava kipinäväli (F50). Jos varistorien energianpurkauskkyky uhkaa ylittyä, kondensaattori ohitetaan pakkoliipaistavan kipinävälin ja ohituskatkaisijan (Q0) avulla. Pakkoliipaistavan kipinävälin ja ohituskatkaisijan kanssa on kytketty sarjaan vaimennuspiiri, koska kondensaattorin ohittumisen aiheuttavan purkaus-

virran huippuarvoa halutaan rajoittaa ja vaimentumista parantaa kondensaattoriyksiköiden mitoituksen vuoksi. Vaimennuspiiri koostuu rinnankytketyistä vaimennuskelasta (L8) sekä vaimennusvastuksesta (R8). [9, ss. 43-44], [14, ss. 232-235] Vaimennusvastuksen kanssa sarjassa on erillinen purkauskipinäväli (F8), jonka on tarkoitus johtaa ainoastaan kondensaattorin ohitushetkellä, koska vastus aiheuttaisi kuormitusvirralla turhia häviöitä kondensaattorin pidempiaikaisen ohituksen yhteydessä [27, s. 48].



Kuva 2.2 Keminmaan sarjakondensaattorin T-vaiheen lava

Koska sarjakondensaattori on johdon kanssa sarjassa, se tulee varustaa johtoa vastaavalla eristystasolla maata vasten. Tämän vuoksi sarjakondensaattori suojalaitteineen on sijoitettu yksivaiheisesti tukieristimien varassa seisoville lavoille kuvan 2.2 mukaisesti. Kipinävälin liipaisukäskyn antaa sarjakondensaattorin suojaus- ja ohjausjärjestelmä. Sarjakondensaattorin suojaus- ja ohjausjärjestelmä tarvitsee toimiakseen monesta eri sijainnista virtamittaukset. Virtamittaukset tarvitaan muun muassa johdolta (T10), sarjakondensaattorilta (T30, T31), varistoreilta (T20, T21), kipinäväliltä (T50) sekä lavalta (T60). Lavalla mitatut virtasignaalit siirretään maatasoon, jossa ohjaus- ja suojausjärjestelmä käsittelee signaalit ja tarvittaessa lähettää kipinävälille liipaisu- ja ohituskatkaisijalle sulkeutumiskäskyn. Tiedonsiirto lavan ja maan välillä tapahtuu erillisten eristinketjun sisällä kulkevien valokuitujen avulla. Apusähkö otetaan lavalta joko virtamuuntajan avulla johdolta tai syötetään maan pinnalta lavalle lasersäteiden avulla. [14, ss. 232-235], [9, s. 10]

3. SARJAKONDENSAATTORIN YLIJÄNNITESUOJAUS KANTAVERKOSSA

Luvun 3 keskeisimmät tavoitteet ovat antaa lukijalle tietoa kantaverkon sarjakondensaattorien nykyisestä ylijännitesuojauksen toteutustavasta, varistorien mitoitusperiaatteista ja nykyisen ylijännitesuojauksen toteutustavan ongelmista. Työn tutkimusosion ymmärtämisen kannalta on erityisen tärkeää ymmärtää ulkoisen ja sisäisen vian ero sekä Fingridin sarjakondensaattorien varistorien mitoitusperiaatteet.

Kantaverkossa sarjakondensaattorin ylijännitesuojaukselle on asetettu tarkkoja vaatimuksia, joita käsitellään luvussa 3.1. Luvuissa 3.2–3.4 esitellään sarjakondensaattorien ylijännitesuojauksen tärkeimmät komponentit, joita ovat varistorit (luku 3.2), pakkoliipaistava kipinäväli (luku 3.4), ohituskatkaisija sekä ohjaus- ja suojausjärjestelmä (luku 3.3).

3.1 Ylijännitesuojauksen vaatimukset kantaverkossa

Sarjakondensaattori on nimensä mukaisesti liitetty sarjaan kompensoitavan johdon kanssa, minkä vuoksi sarjakompensoiduilla johdoilla tai sen lähistöllä sattuvien vikojen aiheuttamat vikavirrat kulkevat sarjakondensaattorin läpi. Sarjakondensaattori täytyy siis suunnitella kestämaan suurimman hetkellisen vian aiheuttaman ylijännitteen ja vikavirran. Teoriassa kondensaattori voitaisiin mitoittaa kestämaan kaikki verkossa tapahtuvat viat ilman erillistä ylijännitesuojausta. Tällöin verkon vikavirrat kasvaisivat kuitenkin suuriksi, jolloin verkon komponenttien oikosulkuvirrankestoisuutta pitäisi mahdollisesti kasvattaa. Sarjakondensaattorin komponenttien ja eristysten mitoittaminen kestämaan kaikki vikavirrat ei olisi myöskään teknistaloudellisesti järkevä ratkaisu, koska tämä edellyttäisi sarjakondensaattorin mitoitusjännitteen ja eristystason kasvattamisen. [4], [14, ss. 232-233], [15, s. 42]

IEC-60143-1- sekä IEC-60143-2-standardit [15, ss. 17-18], [27, ss. 15-16] vaativat sarjakondensaattorin ylijännitesuojauksen olevan riittävän nopea, jotta se rajoittaa vikatilanteissa kondensaattorin yli vaikuttavan jännitteen sallitulle tasolle. Standardeissa esitellään kolme vaihtoehtoa ylijännitesuojaukselle:

- Suojakipinäväli ja ohituskatkaisija (tyyppi K1)
- Varistorit ja ohituskatkaisija (tyyppi M1)
- Varistori, pakkoliipaistava kipinäväli ja ohituskatkaisija (tyyppi M2),

joista Suomen kantaverkossa on nykyisin käytössä tyyppi M2. Tällä hetkellä selvitetään mahdollisuutta siirtä kantaverkossa tyyppi M1-ylijännitesuojaukseen.

Sarjakondensaattorin ylijännitesuojauksen oikeanlainen toiminta on tärkeää verkon luotettavuuden kannalta, mikä johtaa useisiin sarjakondensaattorin suojauslogiikan vaatimuksiin. Verkon vikatilanteessa vikaantunut voimajohto on joka tapauksessa erotettava muusta verkosta, jolloin myöskään vikaantuneella siirtoyhteydellä sijaitsevasta sarjakondensaattorista ei ole hyötyä verkon stabiiliuden ja siirtokyvyn kannalta. Vikaantuneella siirtoyhteydellä sijaitsevan sarjakondensaattorin kannalta kyseinen vika on sisäinen vika. Sisäisessä viassa kondensaattori kyetään ohittamaan mahdollisimman nopeasti. Jos kondensaattori ei sijaitse vikaantuneella siirtoyhteydellä, kutsutaan vikaa sarjakondensaattorin kannalta ulkoiseksi viaksi. Ulkoisessa viassa sarjakondensaattorin halutaan pysyvän aina verkossa, koska tällöin kondensaattorista on hyötyä järjestelmän stabiiliuden kannalta. [9, s. 71], [27]

3.2 Varistorit

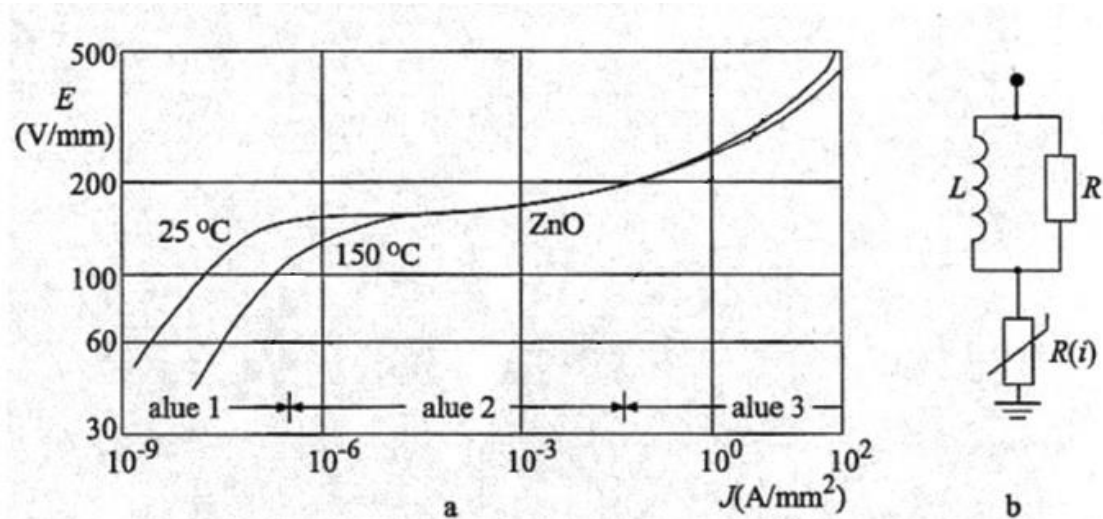
Sarjakondensaattorin rinnalle asennettavat metallioksidivaristorit (MOV, Metal Oxide Varistor) toimivat kondensaattorin pääasiallisena ylijännitesuojana tyyppien M1- ja M2-ylijännitesuojaustoteutuksessa. Varistorien tehtävänä on rajoittaa verkon vikatilanteessa sarjakondensaattorin yli oleva jännite aseteltuun suojausjännitteeseen. Suojausjännitteellä (protective level voltage) tarkoitetaan suurinta sallittua sarjakondensaattorin yli vaikuttavan jännitteen huippuarvoa. [15]

3.2.1 Metallioksidisuojan toimintaperiaate

Metallioksidisuojista puhuttaessa käytettävään terminologiaan on syytä kiinnittää huomiota. Varistoreista (varistor) puhuttaessa metallioksidisuojoihin keskittyvä standardi IEC 60099-4 [28] tarkoittaa yhtä metallioksidielementtiä. Metallioksidisuojasta (arrester) puhuttaessa standardi tarkoittaa yhtä vastuselementtiä ja metallioksidisuojaparistolla (arrester bank) useampaa rinnan ja sarjaan kytkettyä vastuselementtiä. Sarjakondensaattoreihin keskittyvä standardi IEC 60143-2 [27] taas käyttää termiä varistori tarkoittamaan koko metallioksidisuojaparistoa. Tässä työssä termejä varistori ja MOV käytetään kuvaamaan koko suojaparistoa sarjakondensaattoristandardin mukaisesti.

Metallioksidivaristorin käyttö ylijännitesuojauksessa perustuu sen epälineaariseen virtajännite-käyrään. Täysin ideaalinen ylijännitesuoja ei vaikuttaisi normaalitilanteessa verkon käyttäytymiseen millään tavalla. Jännitteen noustessa yli käyttöjännitteen huippuarvon, suojan johtavuus kasvaisi äärettömän suureksi ja päästäisi vikavirran purkautumaan ilman jännitteen nousua suojattavassa kohteessa. Heti vian poistuttua, suoja palautuisi täysin johtamattomaan tilaan. Tärkein ja tämän työn kannalta merkittävin ero todellisen metallioksidivaristorin ja ideaalisen ylijännitesuojan välillä on metallioksidivaristorin rajallinen energian purkauskkyky, minkä vuoksi suoja soveltuu vain lyhytaikaisten ylijännitteiden rajoittamiseen. Suoja ei myöskään ala purkaa ylijännitettä viiveettä eikä suojaus-

taso ole purkausvirrasta riippumaton. Lisäksi lepotilassakin suojan läpi kulkee pieni milliampeerin suuruusluokkaa oleva vuotovirta. Vastuselementin sähköinen sijaiskytkentä on esitetty kuvassa 3.1b. Sijaiskytkentä sisältää epälineaarisen vastuksen lisäksi myös induktiivisen ja resistiivisen komponentin. [29, ss. 335-338]



Kuva 3.1 Metallioksidivaristorin a) ominaiskäyrä b) sijaiskytkentä [29, s. 338]

Metallioksidivaristorin pääasiallisena materiaalina on sinkkioksidi (ZnO), jonka lisäksi vastukseen on lisätty pieniä määriä muita metallioksiedeja. Metallioksidijyväsistä koostuva massa sintrataan lieriömäisiksi metallioksidielementeiksi. Metallioksidivaristori koostuu päällekkäin ladotuista sylinterimäisistä vastuselementeistä, jotka päällystetään kosteudelta ja kemiallisilta vaikutuksilta suojaavalla kerroksella ja päädyt metalloidaan. Vastuselementti suljetaan posliinista tai polymeeristä valmistettuun eristinkuoreen. Onton posliinisen eristimen väliin jätetään kaasutila eristimen ja vastuselementin sisään. Polymeerikuori voidaan joko valaa tiiviisti kiinni vastuselementtiin tai jättää kuoren ja elementin väliin kaasutila. Vastuselementtejä kytketään sarjaan ja tarvittaessa rinnakkain kuvan 3.2 mukaisesti, jotta suojan haluttu suojausjännite saavutetaan. [14, s. 239]

Kuvassa 3.1a on esitetty tyypillinen metallioksidivaristorin ominaiskäyrä, jossa suojan yli olevan jännitteen riippuvuutta sen läpi kulkevaan virtaan on kuvattu kentänvoimakkuus-virrantiheys-ominaiskäyrällä. Kuvaan piirretyt kolme toiminta-aluetta selittyvät virran kululla vastusmateriaalin eri ainesosissa. Alueessa 1 metallioksidijyväsien huonosti johtava pintakerros määrää virran suuruuden, jolloin materiaalin resistiivisyys on hyvin suuri. Alueessa 2 sinkkijyväsiin alkaa tunkeutua enemmän virtaa, jolloin materiaalin johtavuus kasvaa. Alueessa 3 virta kulkee sinkkijyväsien sisuksissa, jolloin materiaalin resistiivisyys on hyvin pieni. Jos suoja joutuu johtamaan purkauskykyään suuremman virran, suojan yli saattaa syntyä niin suuri jännite, että sen sisällä syntyy valokaari vastuselementtien yli. [29, ss. 337-338]



Kuva 3.2 Sarjakondensaattorilavalle sijoitetut varistorit [26]

3.2.2 Varistorien energiamitoitus

Sarjakondensaattorin suojaamiseen tarkoitettujen metallioksidivaristorien tarvittavien vastuselementtien lukumäärän määräävät varistorien energiakertymä ja vastuselementin energianpurkauskyky. Tässä työssä varistorien hinnan oletetaan määräytyvän ainoastaan varistorien energiakertymän perusteella. Varistorien hinnan oletetaan olevan välillä 2000–4000 €/MJ. Arvio perustuu Fingridin sarjakondensaattoriprojekteissa eri valmistajien esittämiin hintoihin. Varistorien tarkka hinta vaihtelee projektikohtaisesti, joten tarkempaa hinta-arviota ei työssä kannata tehdä. Varistorien energiakertymästä puhuttaessa työssä tarkoitetaan aina yksivaiheista energiakertymää ja hinnasta puhuttaessa kolmivaiheista kokonaishintaa.

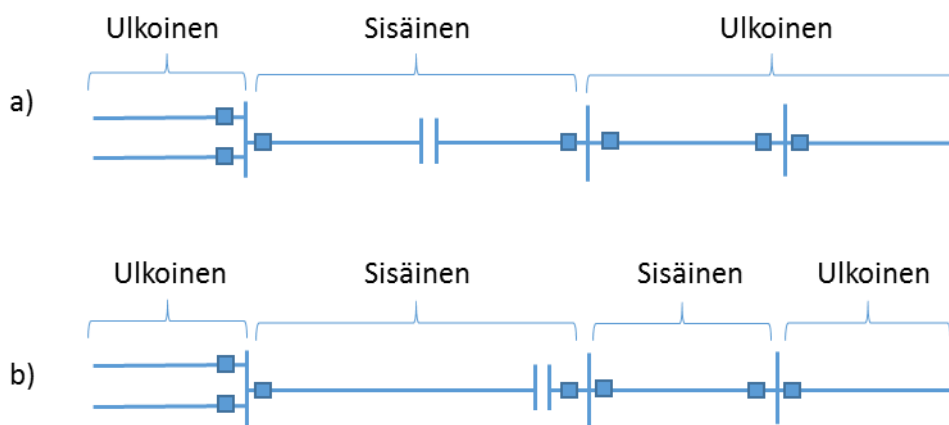
Fingridin sarjakondensaattorien varistorien mitoitus tehdään määrittämällä varistorien energiakertymä transienttilaskentaohjelmistolla ulkoisessa ja sisäisessä viassa, joissa energiakertymät ovat suurimmat. Suurin ulkoisen vian energiakertymä oletetaan tyypillisesti esiintyvän sisäisen vika-alueen rajaavassa vasta-aseman kiskoviassa. Sisäisissä vi-oissa suurimman energiakertymän oletetaan tapahtuvan sarjakondensaattorin terminaali-viassa, koska impedanssi sarjakondensaattorin läpi vikavirtaa syöttävän verkon ja vika-paikan välillä on pienin. [4], [30]

Varistorit absorboivat energiaa aina, kun kondensaattorin läpi kulkevan virran aiheuttama jännitehäviö ylittää kondensaattorille ja varistoreille määrätyn suojausjännitteen. Vuo-

tovirtaa varistorin läpi esiintyy jo alle suojausjännitteen suuruisilla jännitteillä, mikä rajoittaa suojaustason alarajaa. Suojaustaso määritellään suojausjännitteen ja kondensaattorin suurimman jatkuvan käyttöjännitteen huippuarvon suhteena. [3], [14, ss. 241-242] [31], [32] Kantaverkon sarjakondensaattoreiden suojaustaso on noin 2,3 [5]. Standardi IEC-60143-1 antaa luokkien M1- ja M2-ylijännitesuojaukselle mahdolliseksi suojaustasoksi välin 2,0–2,5 [15, ss. 13, 46].

Suojaustason lisäksi varistorien energiakertymään vaikuttavat varistorien läpi kulkevan vikavirran suuruus ja vika-aika. Varistorien läpi kulkevan vikavirran suuruus määräytyy vikapaikan ja ulkoisen verkon oikosulkutehon perusteella. Kun vikapaikka on lähellä kondensaattoria, on impedanssi sarjakondensaattorin läpi vikavirtaa syöttävän verkon ja vikapaikan välillä pienin. Tällöin varistorien läpi kulkeva vikavirta on suurempi kuin kaukana kondensaattoria tapahtuvissa vioissa. Ulkoisen verkon oikosulkutehoon vaikuttavat muun muassa ympäröivän verkon topologia, verkon käyttötilanne sekä oikosulkutehoa syöttävien generaattorien syöttämä teho ja etäisyys vikapaikasta.

Fingrid on aiemmissa sarjakondensaattoriprojekteissa määritellyt ulkoisen ja sisäisen vika-alueen määrittävän siirtoyhteyden tapauskohtaisesti. Tyypillisesti sisäisen vian alue on pyritty pitämään mahdollisimman lyhyenä ja sarjakondensaattorin sallittu ohittuvan vikapaikoissa, joissa kondensaattoreista ei ole nähty olevan järjestelmän kannalta hyötyä. [20] Pääperiaatteena sarjakompensoiduksi siirtoyhteydeksi on valittu kuvan 3.3a mukaisesti johtokatkaisijoiden rajaama voimajohto, jos kondensaattori sijaitsee keskellä voimajohtoa. Kiskovian oletetaan poistuvan duplex-kiskorakenteen ansiosta, joten sarjakondensaattori ei saa ohittua vasta-aseman kiskovian vuoksi. Jos kondensaattori sijaitsee johdon päässä asemalla, sisäistä vika-aluetta on kuvan 3.3b mukaisesti myös aseman toisella puolella sijaitseva voimajohto. Tällä saavutetaan se hyöty, ettei sarjakondensaattorin varistorreja tarvitse mitoittaa kestäämään johtokatkaisijoiden aukeamiseen asti aseman kiskossa tai heti voimajohdon alussa tapahtuvaa suurivirtaista oikosulkua, vaan kondensaattorin sallitaan ohittuvan [22]



Kuva 3.3 Ulkoisen ja sisäisen vikojen tyypillinen vika-alueääritys, kun sarjakondensaattori on a) keskellä johtoa b) johdon päässä asemalla. Muokattu lähteestä [22].

Vuosina 1997–2017 rakennettujen Fingridin sarjakondensaattorien hankintaspesifikaatioissa sarjakondensaattorien on vaadittu kestävän ulkoista vikaa ohittumatta 100 ms:n ajan. Projektien hankintaspesifikaatioissa ei ole vaadittu epäonnistuneiden jälleenkytkentöjen tai johtokeskeytystilanteiden huomioimista energiamitoituksessa. [33]

Ulkoisessa viassa sarjakondensaattorin ja varistorien kokema vika-aika määräytyy viikaantuneen johdon erottamiseen kuluva viiveestä eli käytännössä johtosuojauksen toimintaviiveestä. Nykyisten kantaverkon sarjakondensaattorien varistorien mitoituksessa on käytetty ulkoisen vian 100 ms:n vika-aikaa. Varistorien ulkoisen vian energiamitoitus on tehty valmistajasta riippuen poistamalla vika verkosta tai ohjaamalla johtokatkaisijoita 100 ms vian alkamisajankohdan jälkeen. [34] [30].

Johtosuojauksen toiminta-ajalla ei ole sisäisessä viassa merkitystä varistorien energiamitoituksen kannalta, koska sarjakondensaattorin kokema sisäisen vian vika-aika määräytyy ohituksen suorittavan laitteen eli käytännössä ohituskatkaisijan tai pakkoliipaistavan kipinävälin toimintaviiveestä. Kaikki kantaverkon sarjakondensaattorit ovat kipinävälillisiä eli ohitusviive on kipinävälin toiminta-aika, jonka määrittää sarjakondensaattorivalmistaja. Tyypillisesti kipinävälin toiminta-ajaksi (sisältäen suojaus- ja ohjausjärjestelmän viiveet) on edellisissä sarjakondensaattoriprojekteissa määritelty 1,2–1,5 ms. Sisäisen vian aikana kertynyt energia on laskettu energian nousunopeuden huippuarvon avulla kertomalla saatu huippuarvo kipinävälin toiminta-ajalla. [6], [30], [34], [35]

Energiamitoitusta tehtäessä oletetaan ensin tapahtuvan sarjakondensaattorin varistorien energiakertymän kannalta pahin ulkoinen vika, sekä heti perään pahin sisäinen vika [33]. Varistorit ovat pahimman ulkoisen vian jälkeen kondensaattorin energiasuojan (ks. luku 3.3) rajalla, minkä jälkeen seuraava sisäinen tai ulkoinen vika saa aiheuttaa välittömästi kondensaattorin ohittumisen. Varistorit on Fingridin mitoitusperiaatteen mukaan mitoitettava kestämään vielä tämän ohitusviiveen aikana kertyvä suurin mahdollinen energiakertymä. [4]

Ulkoisen vian mitoitusperiaate liittyy kantaverkon N–1-käyttövarmuusperiaatteeseen. Sisäisen vian mitoitusperiaate on puolestaan Fingridin sarjakondensaattorien komponenttien mitoitusperiaate, jolla minimoidaan varistorien tuhoutumisriski. Varistorien hitaan viilenemisen vuoksi sisäinen vika aiheuttaisi varistorien hajoamisriskin suhteellisen pitkänkin ajan jälkeen ulkoisen vian tapahtumisesta, ellei ulkoisen vian jälkeen tapahtuvaa sisäistä vikaa huomioitaisi varistorien mitoituksessa. [4]

Nykyisten kantaverkon sarjakondensaattorien varistorien mitoitus on tehty maksimioikosulkutehotilannetta kuvaavalla talven oikosulkutehotilanteen verkkomallilla. Talvella oikosulkuteho ja kondensaattorin läpi kulkevat vikavirrat ovat tyypillisesti suurempia kuin kesällä, koska verkossa on enemmän vikavirtaa syöttäviä generaattoreita. Lisäksi Fingrid on hankintaspesifikaatioissa vaatinut varayksikköjen lisäämisen kondensaattorilavalle. Varayksiköiden määrän on vaadittu olevan 10 % lasketusta MOV-energiakertymästä tai

kolme MOV-yksikkö vaihetta kohden riippuen kumpi on suurempi. Varayksiköillä varaudutaan verkon vikavirtatasojen mahdolliseen kasvuun ja varistoriyksiköiden hajoamiseen. Varayksiköistä saatavaa energiamarginaalia on mahdollista pienentää kondensaattorin eliniän aikana, mutta suojaus- ja ohjausjärjestelmäusintojen yhteydessä energiämitoituksen riittävyys tarkistetaan ja tarvittaessa lisätään. [4], [30]

3.3 Suojaus- ja ohjausjärjestelmä

Sarjakondensaattorin suojaus- ja ohjausjärjestelmän tehtävänä on valvoa sarjakondensaattorin toimintaa käyttötilanteessa sekä suojata tarvittaessa sarjakondensaattoria ja kondensaattorin rinnalle kytkettyjä metallioksidivaristoreja ohjaamalla kondensaattorin suojalaitteita eli kipinäväliä ja ohituskaisijaa. Sarjakondensaattorin luotettavuuden ja käytettävyyden parantamiseksi suojausjärjestelmä on täysin kahdennettu ja fyysisesti erotettu omiin suojauskaappeihin. [9, ss. 65-66], [33, s. 22]

Suojaus- ja ohjausjärjestelmän vastuulla on johdon vikatilanteessa päätellä, onko kyseessä kondensaattorin näkökulmasta sisäinen vai ulkoinen vika ja tiedon perusteella ohittaa kondensaattori tarvittaessa [9, s. 71]. Suojaus- ja ohjausjärjestelmä koostuu erilaisista valmistajasta riippuvista suojaustoiminnoista, joiden perusteella kondensaattori ohitetaan. Kaikki suojausfunktiot mittaavat vaihekohtaisia arvoja, jota verrataan suojausfunktion asetusarvoon. Jos jonkin suojausfunktion asetusarvo ylittyy, lähettää suojaus- ja ohjausjärjestelmä ohituskäskyn sarjakondensaattorin kaikkien vaiheiden suojalaitteille.

Sarjakondensaattorin suojaus- ja ohjausfunktiot on mahdollista jakaa kahteen osaan vian aiheuttajan mukaan. Ensimmäinen osa käsittää erilaiset voimajärjestelmän viat ja toimintatilanteet, joissa suojaus- ja ohjausjärjestelmä toimii kondensaattorin ja varistorien suojelemiseksi. Osa suojausfunktioista taas liittyy sarjakondensaattorin komponenttien vikaantumiseen. [9, s. 67] Tässä luvussa keskitytään verkon aiheuttamiin vikoihin, koska työn tarkoituksena on tutkia sarjakondensaattorin ylijännitesuojausta verkon vikatilanteissa.

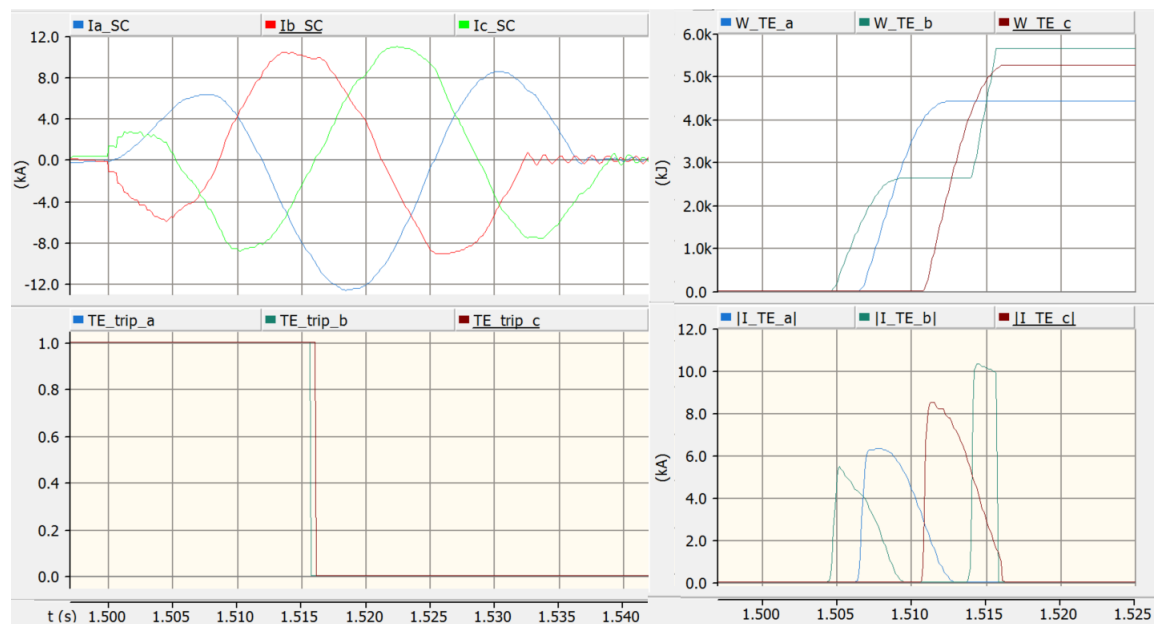
Energiasuoja on pääasiallinen kondensaattoria ja varistoreja verkon vioilta suojaava suojausfunktio. Siemens ja ABB käyttävät varistorien energiasuojaukseen lämpömallia, jossa varistorien läpi kulkevasta virrasta arvioidaan varistorien lämpenemä. Ulkolämpötilaa ei mallissa huomioida. General Electricin (GE, entinen Nokia Capacitors) valmistamien sarjakondensaattorien energiasuojassa varistorien läpi kulkevasta virrasta lasketaan varistoreihin absorboitunut energia, jota käytetään suojaukseen. [36], [37], [38]

Energiasuojan oletetaan olevan laukaiseva suoja varistorien mitoitusta tehtäessä. Energiasuojan asettelu onkin oltava sellainen, että varistorien energiakapasiteetti on riittävä kestävänsä pahimman sisäisen vian energiasuojan toiminnan jälkeen. Toisaalta energiasuoja ei saa toimia suurimman energiakertymän aiheuttavassa 100 ms kestävässä ulkoisessa viassa. Fingridin sarjakondensaattoreille energiasuojan asetteluarvo määritetään

100 ms:n aikana kertyvän ulkoisen vian aiheuttaman energiakertymän perusteella, johon on aiemmissa sarjakondensaattoriprojekteissa lisätty tyypillisesti 10 %:n lisämarginaali, jotta voidaan varmistua siitä, ettei kondensaattoriohitusta tapahdu ulkoisessa viassa. Energiasuojan asetteluun on aiemmissa sarjakondensaattoriprojekteissa käytetty talven maksimioikosulkutehotilanteeseen perustuvaa verkkomallia. [30], [36, s. 23]

Ylivirtasuojauksen tehtävänä on erotella, onko kyseessä sisäinen tai ulkoinen vika. Ylivirtasuojaja on kaikilla valmistajilla pääasiainen suurivirtaisissa sisäisissä vioissa kondensaattorin nopean ohituksen suorittava suoja. Ylivirtasuojauksen asetusarvo asetellaan niin, ettei se toimi normaalissa käyttötilanteessa virran kannalta pahimmassa mahdollisessa ulkoisessa viassa. Ylivirtasuojaus on toteutettu valmistajasta riippuen joko johdolla kulkevaa virtaa eli linjavirtaa (GE) tai varistorien läpi kulkevaa MOV-virtaa (Siemens ja ABB). [36, s. 24], [37, s. 13], [38]

Kuvassa 3.4 on esitetty tilanne, jossa Tuomelan sarjakondensaattorin ylivirtasuojaus ohittaa kondensaattorin, kun kondensaattorin terminaalissa tapahtuu hetkellä 1,5 s 3-vaiheinen oikosulku maakosketuksella. Tuomelan kondensaattori on ABB:n toimittama, joten kondensaattorin ylivirtasuojaus perustuu MOV-virtaan (I_{TE}), jonka asetteluarvo on 8,92 kAp.



Kuva 3.4 Tuomelan sarjakondensaattorin varistorien energiakertymät (W_{TE}), varistorien läpi kulkevan virran itseisarvo ($|I_{TE}|$), kondensaattorin linjavirrat (I_a) ja kondensaattorin ohitusignaali (trip), kun kondensaattorin terminaaliiin simuloitiin 3phg-vika ajanhetkellä 1,5 s. Johtosuojauksen toiminta-aika oli 30 ms.

Kuvasta havaitaan, että varistorien läpi kulkeva virta ylittää asetteluarvon noin ajanhetkellä 1,514 s. Tämän jälkeen suojaus- ja ohjausjärjestelmä lähettää liipaisukäskyn kipinävälille, joka ohittaa kondensaattorin. Suojaus- ja ohjausjärjestelmän ja kipinävälin kokonaistoimintaviiveeksi on tässä esimerkissä oletettu 1,5 millisekuntia. Kondensaattorin

ohittuminen tapahtuu noin ajanhetkellä 1,5155 s (trip-signaali), jonka jälkeen varistorien läpi ei enää kulje virtaa. Esimerkissä johtosuojauksen toiminta-ajaksi oli määritetty 30 ms. Johtosuojauksella ei ole varistorien energiakertymän kannalta tilanteessa merkitystä, koska kondensaattorin ohituttua, varistorien läpi ei kulje virtaa.

Ylivirtasuojauksen ja energiasuojauksen lisäksi GE käyttää varistorin energian nousunopeudelle omaa suojausfunktiota. GE:llä energian nousunopeutta (ERoR, Energy Rate of Rise) käytetään ylivirtasuojauksen lisäksi erottamaan sisäistä ja ulkoista vikaa. Siemensillä ja ABB:llä ei vastaavaa suojausfunktiota ole. [36], [37], [38]

Kaikki valmistajat ovat Fingridin toiveesta toteuttaneet kondensaattorin varasuojauksen pienivirtaisten sisäisten vikojen varalle. Sisäisissä vioissa, joissa sarjakondensaattorin linja- tai MOV-virta ei ylitä ylivirtasuojan virtarajaa, ei kondensaattoria saada ohitettua virtasuojauksen avulla. Tällöin ohituskäskyn (External Bypass Command) kipinävälille ja ohituskatkaisijalle lähettää johdonsuojarele. Tällä varmistutaan siitä, että kondensaattori saadaan ohitettua kaikissa sisäisissä vioissa myös silloin, kun kondensaattorin sisäisen suojauksen asetteluarvot eivät ylity. [36], [37], [38]

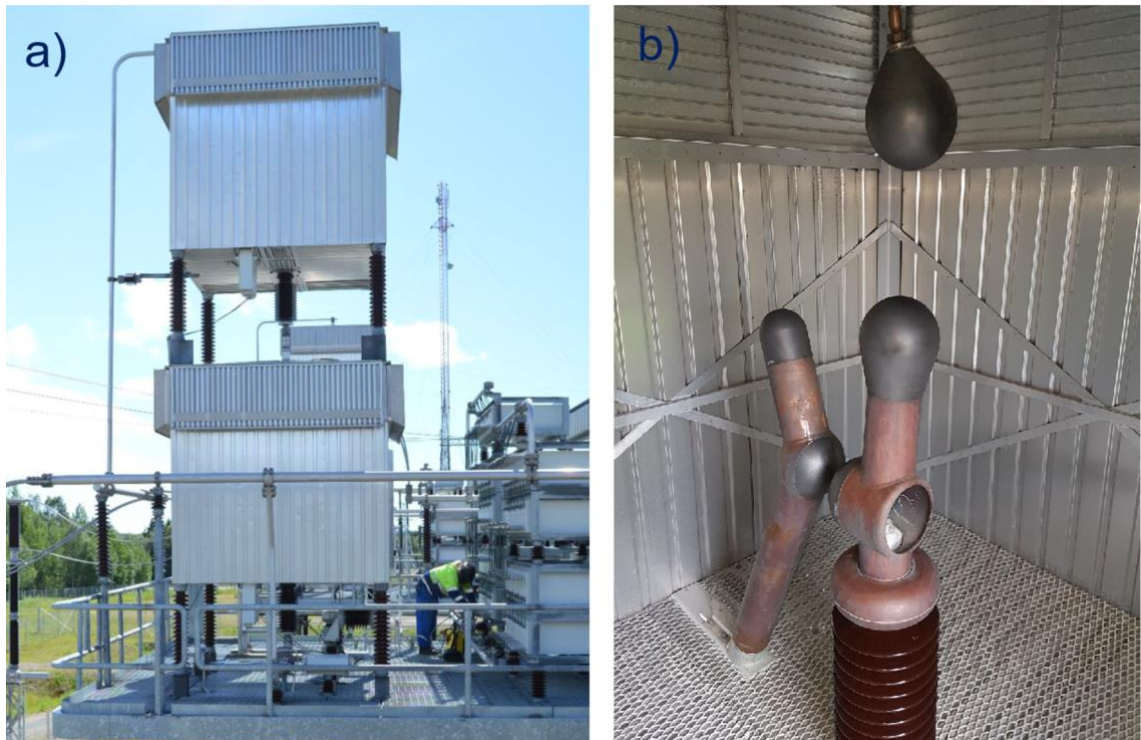
3.4 Kipinäväli

Kantaverkossa käytössä olevassa tyyppin M2-ylijännitesuojaustoteutuksessa kipinävälin tarkoituksena on suojata sarjakondensaattoria ja varistoreja ylijännitteiltä. Lisäksi kipinävälin nopealla ohituksella voidaan rajoittaa johtokatkaisijoiden yli vaikuttavaa palavaa jännitettä verkon vikatilanteissa. Kipinävälin sytytys tapahtuu sarjakondensaattorin suojaus- ja ohjausjärjestelmän lähettämän ohituskäskyn perusteella. [27], [39]

3.4.1 Perinteinen pakkoliipaistava kipinäväli

Kondensaattorien rinnalle on nykyisessä ylijännitesuojaustoteutuksessa kytkettynä pakkoliipaistava kipinäväli, jonka tehtävänä on ohittaa kondensaattori nopeasti sisäisissä vioissa. Perinteisessä kipinäväliratkaisussa käytetään graffiittipalloja, joiden välissä on ilmapäli. Kipinävälin sytyttämiseen käytetään apukipinävälejä eli trigatroneja. Kipinäväli-elektrodit ja niiden etäisyys täytyy valita niin, että elektrodien välinen jännitekestoisuus on riittävä, ettei kipinäväli syty ilman liipaisupulssia. Toisaalta kipinävälin tulisi syttyä liipaisupulssin saadessaan olosuhteista riippumatta. [29, ss. 33-35, 104], [40]

Kipinäväli sijoitetaan suljettuun kipinävälidikoppiin (kuva 3.5), jotta ympäristöolosuhteiden vaikutusta kipinävälin toimintaan saataisiin pienennettyä. Perinteisissä kipinäväliratkaisuisissa kipinävälin kaasutilaa ei ole kuitenkaan hermeettisesti suljettu, joten ympäristöolosuhteiden, esimerkiksi ilman kosteuden, paineen sekä mahdollisten epäpuhtauksien vaikutusta ei pystytä täysin eliminoimaan. [41]



Kuva 3.5 Keminmaan pakkoliipaistavan kipinävälin a) kipinäväläkoppi [6] b) elektrodit

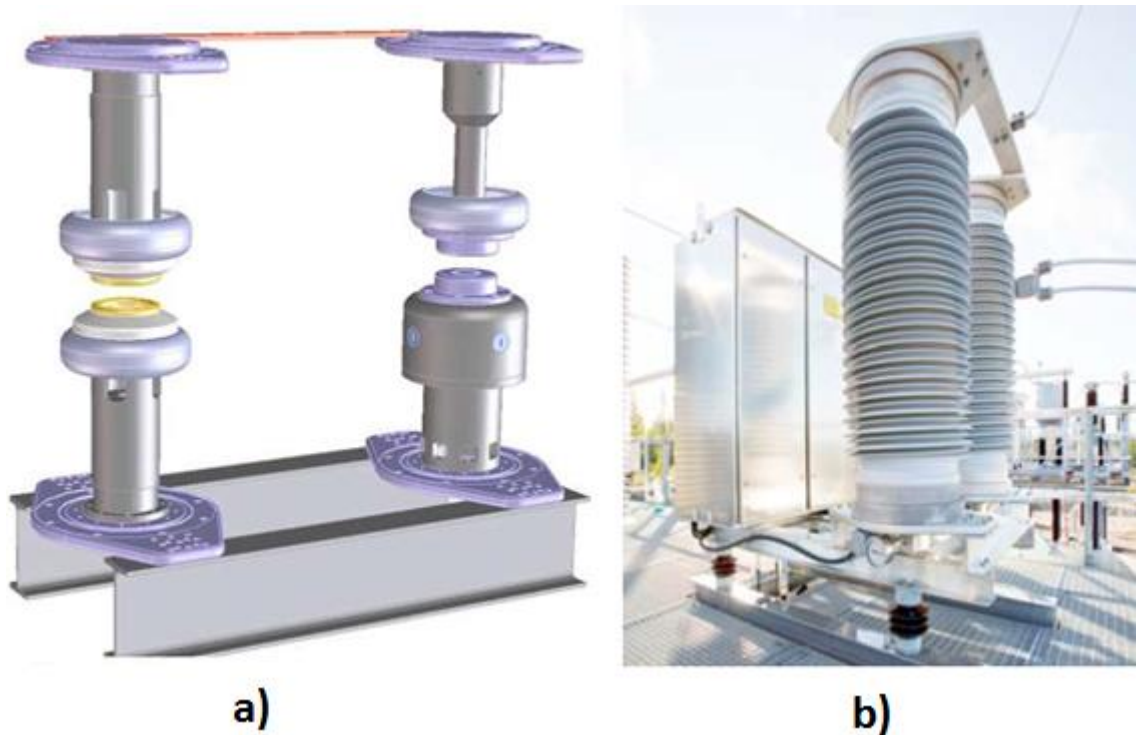
Kipinävälille määritellään minimisyytysvirta, joka kondensaattorin läpi täytyy vähintään kulkea, jotta kipinäväli saadaan sytytettyä. Sytytysvirta määritellään kondensaattorille määritellyssä minimoimintalämpötilassa, joka Suomen kantaverkossa on määritetty olevan -40 tai -50 astetta. Jos kondensaattorin linjavirta on pienempi kuin määritetty sytytysvirta, kondensaattorin suojausfunktio (Refused to trigger) estää sytytyspulssin lähettämisen kipinävälille. Käytännössä tämä tarkoittaa, ettei kipinäväliä saada sytytettyä kaukana kondensaattoria tapahtuvissa vioissa, joissa kondensaattorin linjavirta on pieni. Tällöin ohitus tapahtuu ohituskatkaisijan toimesta. [6], [36, s. 22]

3.4.2 Nopea ohituskytkin

ABB:n patentoimasta CapThor-kipinäväliratkaisusta käytetään nimitystä nopea ohituskytkin (FPD, Fast Protective Device) [41]. Tässä työssä lyhennettä FPD käytetään kuvaamaan yleisemmin pakkoliipaistavaa kipinäväliä riippumatta, että onko kyseessä perinteinen pakkoliipaistava kipinäväli vai CapThor. Viitattaessa ABB:n patentoimaan ratkaisuun, käytetään työssä nimitystä CapThor.

CapThorissa ohitus saadaan aikaan ylipaineisessa kaasussa tapahtuvalla läpilyönnillä (API, Arc Plasma Injector) sekä rinnankytketyllä nopealla mekaanisella kytkimellä (FC, Fast Contact), jotka on esitetty kuvassa 3.6. Toisin kuin perinteinen kipinäväli, API-moduuli on täytetty ylipaineistetulla kaasulla ja suljettu hermeettisesti, jotta ympäristöolosuhteet vaikuttaisivat sen toimintaan mahdollisimman vähän. FC-moduuli on magneetti-

sesti ylös-alas liikkuva metallikontaktori, jonka tehtävä on lyhentää plasmakytkimen johtavuusaikaa, lyhentää CapThorin deionisaatioaikaa sekä varmistaa kipinävälin toiminta pienilläkin kipinävälin yli vaikuttavilla jännitteen arvoilla. API:n ja FC:n lisäksi kondensaattorilavalle on sijoitettu kipinävälin suojaus- ja ohjausjärjestelmä OSU (Operation and Supervision Unit), joka sisältää kipinävälin liipaisuun tarvittavan elektroniikan. API:n sytyttämiseen sekä FC:n sulkemiseen ja avaamiseen käytetään kondensaattorilavalle sijoitettua ulkoista teholähdettä, joka on osa OSU-moduulia. [41], [35]



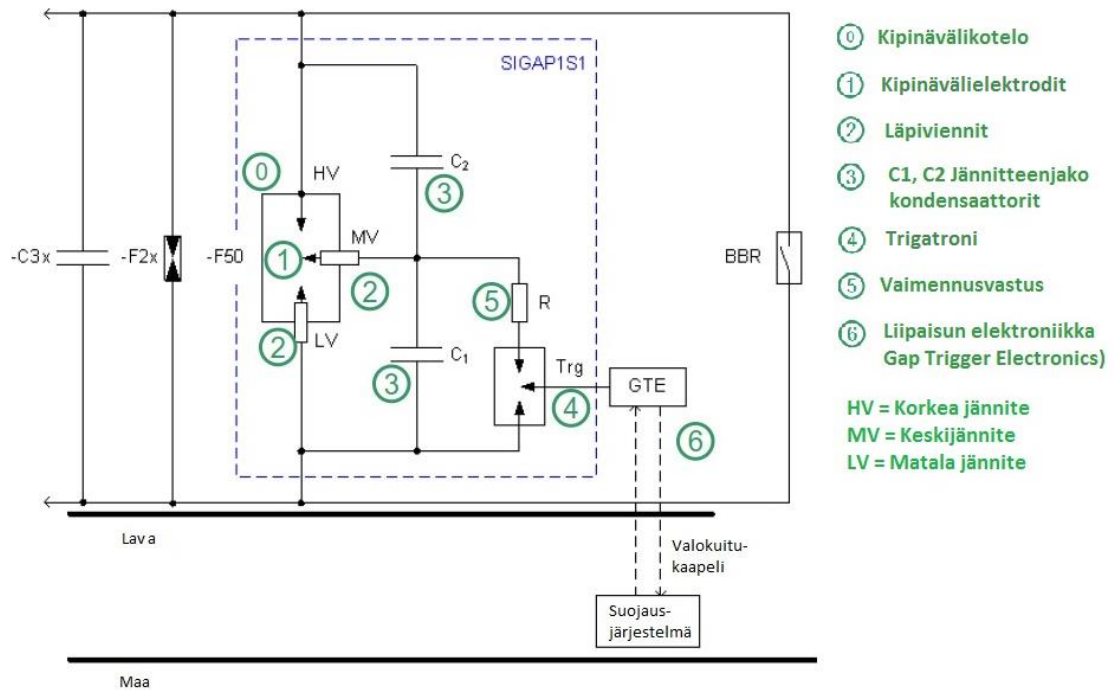
Kuva 3.6 ABB:n valmistama CapThor-pakkoliipaistavan kipinävälin a) sisäinen näkymä b) ulkoinen näkymä asennettuna kondensaattorilavalle. Vasemmalla kuvissa on plasmakytkin Arc Plasma Injector (API) ja oikealla mekaaninen ohituskytkin Fast Contact (FC). B) kuvassa kipinävälielektrodien takana sijaitseva ohjaus- ja valvontayksikkö (OSU) sisältää ulkoisen teholähteen sekä kipinävälin ohjauselektroniikan. [42]

API-plasmakytkin siirtyy täysin johtavaan tilaan 0,3–1,0 millisekunnissa saadusta ulkoisesta liipaisusignaalista. FC:n maksimitoiminta-ajaksi on määritelty 5–6 ms. Vanhemmassa CapThorin versiossa 1 kondensaattorin nopea ohitus, eli API-plasmakytkimen sytyttäminen, onnistuu jännitteen arvolla 2 kVp ja uudemmalla versio 2:lla arvolla 20 kVp. Asmuntiin ja Tuomelaan asennetut kipinävälit ovat CapThorin versiota 1. Jos kondensaattorin nopean ohituksen ehdot eivät täyty, toiminta-aika määräytyy mekaanisen FC-kytkimen toiminta-ajasta. [35], [41]

3.4.3 Kipinävälin apulaitteet

Siemensin valmistaman pakkoliipaistavan kipinävälin piirikaavio on esitetty kuvassa 3.7. SIGAP1S1-kipinäväliä on käytetty muun muassa Hirvisuon sarjakondensaattorien suojaamiseen. GE:n toimittamien kipinävälien toimintaperiaate on käytännössä identtinen

kuin SIGAP1S1-kipinävälin. Kyseistä kipinäväliä voidaan käyttää ainoastaan tietylle suojausjännitteelle asti. Jos suojausjännite on suurempi, joudutaan käyttämään kahta kipinäväliekoppia ja trigatronia, jolloin käytännössä jokaista komponenttia tarvitaan kaksinkertainen määrä. Erittäin suurilla suojausjännitteillä voidaan joutua käyttämään jopa kolmea kipinäväliekoppia ja trigatronia. [26] Fingridin kaikki perinteiset kipinävälit ovat yksi- tai kaksikoppisia [5].



Kuva 3.7 SIGAP1S1 pakkoliipaistavan kipinävälin komponentit [26]

Kun perinteinen kipinäväli halutaan liipaista, suojaus- ja ohjausjärjestelmä lähettää liipaisuelektronikkaa sisältävälle ohjausyksikölle GTE:lle (Gap Triggering Electronics) liipaisukäskyn. GTE:n antama jännitepulssi syyttää apukipinävälin, jolloin kondensaattori C_1 purkautuu vaimennusvastuksen R läpi. Tämän johdosta jännite kondensaattorin C_2 yli kasvaa, mikä tarkoittaa MV- ja HV-elektrodien välisen potentiaalieron kasvua, joiden välisessä kipinävälissä tapahtuu läpilyönti. Tämän seurauksena MV- ja LV-elektrodien välille muodostuu potentiaaliero, missä tapahtuu läpilyönti. Tällöin kipinäväli siirtyy täysin johtavaksi ja virralle muodostuu kulkureitti kondensaattorin ohi vaimennuspiirin läpi. Ohituskatkaisijan sulkeutuminen sammuttaa kipinävälin. [9, ss. 45-47], [43]

Kipinävälin rinnalle kytketään ohituskatkaisija, jolle annetaan sulkemiskäsky aina kipinävälin liipaisun yhteydessä. Ohituskatkaisijan tehtävänä on sammuttaa kipinäväli mahdollisimman nopeasti, koska perinteisen kipinävälin grafiittipallot eivät kestä liian pitkää johtavuusaikaa. Lisäksi ohituskatkaisija kytkee sarjakondensaattorin takaisin verkkoon vikatilanteen jälkeen. [9, s. 44] Perinteisen kipinävälin syytysvirta ei ole myöskään aina riittävä kipinävälin syyttämiseen, jolloin sarjakondensaattorin ohitus tapahtuu ainoastaan ohituskatkaisijan avulla.

4. NYKYISEN YLIJÄNNITESUOJAUSTOTEUTUKSEN ONGELMAT

Luvun 4 keskeisimmät tavoitteet on esitellä kantaverkon sarjakondensaattorien nykyisen ylijännitesuojaustoteutuksen epäkohdat. Kipinävälin aiheuttamia luotettavuusongelmia käsitellään luvussa 4.1. Varistorien mitoitusperiaatteiden epäkohdat liittyvät epäonnistuneiden jälleenkytkentöjen ja johtokeskeytystilanteiden sivuuttamiseen varistorien energiamitoitusta tehtäessä (luku 4.2). Muut varistorien mitoitukseen liittyvät epäkohdat liittyvät mitoituksessa käytettävään ulkoisen vian vika-aikaan ja verkkomallin oikosulkutehoon. Lisäksi luvussa 4.3 käsitellään johtokatkaisijoiden palaava jännitettä, minkä riskitasoa ei ole Suomen sarjakompensoidussa kantaverkossa tutkittu kattavasti. Luvussa esitellään palaava jännite ilmiönä ja tutustutaan aiemmin aiheesta tehtyihin tutkimuksiin.

4.1 Kipinävälin aiheuttamat luotettavuusongelmat

Kantaverkon sarjakondensaattorien käytettävyyden on historiallisesti tarkasteltuna ollut hyvä, mutta luotettavuus heikko. Eli sarjakondensaattoreiden vikaantumistiheys on ollut suuri, mutta vikojen korjausajat ovat olleet lyhyitä. Suurin osa sekä keskeytyksen vaatineista major-vioista että keskeytystä vaatimattomista minor-vioista on vuosina 1997–2004 aiheutunut suojaus- ja ohjausjärjestelmän vioista (taulukko 4.1). Luotettavuuden kannalta merkittäviä major-vikoja ovat aiheuttaneet suoja- ja ohjausjärjestelmän lisäksi varistorit ja kipinäväli. [3, ss. 42-43]

Taulukko 4.1 Sarjakondensaattorien vikaantuneet komponentit (1997–2014). Kipinävälin itsesyttymiset on kirjattu suojaus- ja ohjausjärjestelmän viaksi, vaikka todellisuudessa syy on kipinävälin virhetoiminto. Muokattu lähteestä [3, s. 42].

Vioittunut komponentti	Major-viat		Minor-viat		Viat yhteensä	
	lkm	%	lkm	%	lkm	%
Suojaus- ja ohjaus	53	88,3	104	63,8	157	70,4
Varistorit	5	8,3	12	7,4	17	7,6
Kipinäväli	2	3,3	5	3,1	7	3,1
Muut	0	0,0	42	25,7	42	18,8
Yhteensä	60	100,0	163	100,0	223	100,0

Suojaus- ja ohjausjärjestelmän major-viat ovat pääsääntöisesti aiheutuneet lavatehonsyötön ja signaalinsiirron ongelmista sekä tuntemattomista suojaus- ja ohjausjärjestelmän virhetoiminnoista. Esimerkiksi kipinävälin itsesyttyminen on kirjattu järjestelmään suojaus- ja ohjausjärjestelmän tuntemattomaksi virhetoiminnoiksi. Kyseisissä tilanteissa suojaus- ja ohjausjärjestelmältä ei ole tullut kipinävälille ohituskäskyä, vaan kipinäväli on syyntynyt mahdollisesti

häiriöpulssin tai muun tuntemattoman syyn takia ulkoisessa viassa. [3, s. 43] Todennäköisesti syynä itsesyttymisille ovat huonot kipinävälielektrodien asetellut, jonka vuoksi ionisoituneen ilman jännitekestoisuus ei ole ollut kaikissa olosuhteissa riittävä [40].

Itsesyntyminen ei itsessään ole järjestelmän kannalta kriittinen vika, koska suojausjärjestelmä tekee itsesyttymisen jälkeen automaattisen kondensaattorin verkkoon palautuksen. Automaattinen palautus on kuitenkin ollut kondensaattoreille aseteltuna liian nopeaksi, jonka vuoksi kipinäväli on tilanteissa syttynyt uudelleen. Uudelleen syttymisen seurauksena suojaus- ja ohjausjärjestelmä tulkitsee kipinävälin vialliseksi ja asettaa sarjakondensaattorin lukittuun ohitukseen. [44] Lukuisten kipinävälien itsesyttymisten takia mahdollisuus kondensaattorin ohittumiseen on jouduttu tietyissä tilanteissa huomioimaan P1-leikkauksen siirtokykykaskelmissa [2].

Viime vuosina luotettavuusongelmia on aiheuttanut myös Tuomelaan ja Asmuntiin asennetut CapThor-kipinävälit. Vuosina 2016–2017 CapThorien hajoamisia oli yhteensä kolme kappaletta, joista kaksi johtui API-yksiköstä ja yksi FC-yksiköstä. Lisäksi CapThorin ohjaus- ja valvontayksikössä eli OSU:ssa on ollut sarjakondensaattorin elinaikana lukuisia vikoja. Viat ovat tyypillisesti tulleet esiin vasta sarjakondensaattorille tehtävässä vuosihuollossa, joten kondensaattorit ovat saattaneet joissain tilanteessa olla verkossa ilman, että kipinäväli olisi toiminut tarvittaessa. [44]

4.2 Varistorien mitoitusperiaatteet

Nykyisten sarjakondensaattorien energiamitoitusta tehtäessä on luvun 3.2.2 mukaisesti oletettu tapahtuvan sarjakondensaattorin varistorien energiakertymän kannalta pahin 100 ms kestävä ulkoinen vika, sekä heti perään pahin sisäinen vika. Keskimääräisen vika-ajan voidaan kantaverkossa arvioida luvun 5.2.3 mukaisesti olevan noin 50 ms, joka on puolet mitoituksessa käytettävästä 100 ms:n vika-ajasta. Varistorien mitoituksessa käytettävä vika-aika vaikuttaa luvun 3.2.2 mukaisesti varistorien energiakertymään ja kustannuksiin, joten mitoituksen käytettävän 100 ms:n ulkoisen vian vika-aikavaatimuksen vaihtaminen realistisempaan vika-aikaan säästäisi varistorien investointikustannuksissa.

Kantaverkon sarjakondensaattorien varistorien energiamitoituksessa ei ole huomioitu epäonnistuneita jälleenkytkentöjä [33]. Ulkoisen vian yhteydessä tapahtuva epäonnistunut jälleenkytkentä saattaa joissain tapauksissa aiheuttaa riskin sarjakondensaattorin ohittumiselle, jos epäonnistuneen jälleenkytkennän aiheuttama vikavirta kulkee kondensaattorin läpi. Sisäisessä viassa epäonnistuneet jälleenkytkennät eivät aiheuta varistoreille energiakertymää, koska sarjakondensaattorin verkkoon palautuksen viive on aseteltu suuremmaksi kuin epäonnistuneiden jälleenkytkentöjen viiveet [36]. Sarjakondensaattori on siis sisäisen vian jälleenkytkentöjen aikana ohitettuna.

Mitoitusperiaatetta voidaan perustella sillä, että voimajohtojen jälleenkytkentöjen jännitteenannon suunnat eli jälleenkytkennän tekevä katkaisija (ks. luku 5.2.1) on kantaverkossa pyritty valitsemaan niin, ettei mahdollisen epäonnistuneen jälleenkytkennän aiheuttama vikavirta kulje sarjakondensaattorin läpi [22]. Sarjakompensoinnin lisääntymisen myötä silmukoidun 400 kV:n verkon jälleenkytkentöjen jännitteenannon suuntia ei ole kuitenkaan aina mahdollista suunnitella niin, ettei epäonnistuneen jälleenkytkennän aiheuttama vikavirta kulje minkään sarjakondensaattorin läpi [22]. Pysyvän vian aikana sarjakondensaattorin (ks. luku 2.2.2) verkossa pysyminen olisi järjestelmän kannalta tärkeää. Jälleenkytkentöjen epäonnistuminen on kuitenkin liitteen B mukaan 400 kV:n verkossa harvinaista.

Varistorien mitoitus on tyypillisesti tehty kantaverkon sarjakondensaattoreille ainoastaan normaalissa käyttötilanteessa huomioimatta johtokeskeytystilanteita. Keskeytystilanne aiheuttaa verkon tehonjaon ja vikavirtojen muuttumisen, joilla on vaikutusta myös varistorien energiakertymiin. Keskeytystilanne voi siis aiheuttaa riskin kondensaattorin ohitumiselle ulkoisessa viassa ja varistorien tuhoutumiselle sisäisessä viassa. Jos kondensaattorin haluttaisiin pysyvän verkossa jokaisessa ulkoisessa viassa, tulisi mitoituksessa huomioida myös keskeytysten aikaiset epäonnistuneiden jälleenkytkentöjen aiheuttamat energiakertymät. Keskeytyksiä on tyypillisesti voimajohtolla keskimäärin suunnilleen päivä vuodessa [2], joten energiakertymän kannalta pahimman ulkoisen vian sattuminen keskeytyksen yhteydessä on pidetty harvinaisena. Toisaalta keskeytyksen aikana sattuvan pysyvän vian aikana olisi verkon stabiiliuden ja siirtokyvyn varmistamisen kannalta kondensaattorin verkossa pysyminen tärkeää (ks. luku 2.2.2). Lisäksi keskeytykset ajoitetaan tyypillisesti kesälle [5], jolloin suurin osa 400 kV:n vioista tapahtuu (ks. liite B).

Varistorien mitoitukseen on kantaverkon sarjakondensaattoreille käytetty talven maksimioikosulkutehotilanteeseen perustuvaa verkkomallia, jolla simuloidut varistorien energiakertymät ovat tyypillisesti suurempia kuin kesällä tapahtuvassa todellisessa vikatilanteessa. Liitteen B mukaan suurin osa vioista tapahtuu kesällä pienemmän oikosulkutehotilanteen aikaan. Lisäksi varistorien energianabsorbointikyky on riippuvainen ulkolämpötilasta. Varistorien energianabsorbointikyky on mitoitettu 40 °C ulkolämpötilalle [36]. Talven maksimioikosulkutehotilanteessa ulkolämpötila on tyypillisesti alle 0 °C. 40 asteen lämpötilaero antaa varistoreille ylimääräistä energiakapasiteettia noin 13–15 MJ ennen niiden termistä tuhoutumista [36, s. 23]. Varistorien mitoittaminen kesän oikosulkutehotilanteessa säästäisi varistorien investointikustannuksissa.

4.3 Palaava jännite

4.3.1 Palaavan jännitteen muodostuminen

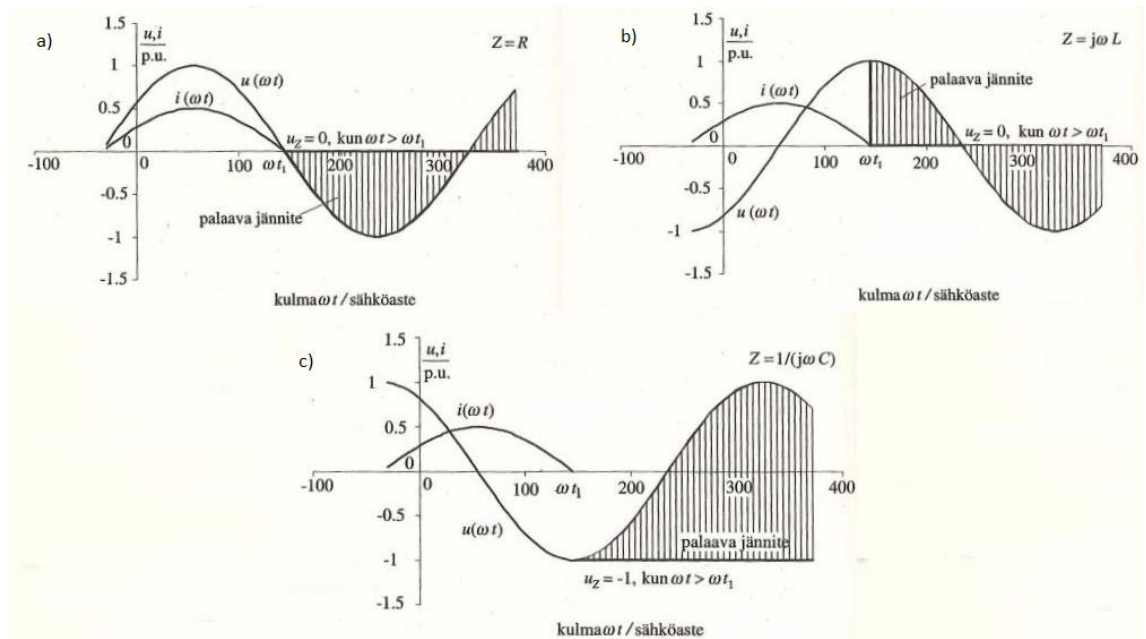
Katkaisutapahtumassa virta ei katkea välittömästi katkaisijan koskettimien avautuessa, vaan virtapiiri pysyy suljettuna pienivastuksisen valokaaren välityksellä. Valokaari sallii

koskettimien etääntymisen varsin kauas toisistaan, jolloin avausväli kestää täyden jännitteen valokaaren sammuttua. Virran pienessä valokaaren vastus kasvaa nopeasti. Muutamia mikrosekunteja virran nollakohdan jälkeen valokaaren resistanssi kasvaa noin miljoonaan ohmiin, jolloin virran kulku katkaisunapojen läpi katkeaa. Jotta katkaisu tapahtuisi helpommin, valokaarivastusta kasvatetaan jakamalla valokaari osiin ja jäähdyttämällä sitä eristeaineen virtauksella. Suurjännitekatkaisijoiden katkaisukammioissa käytetään eristeväliaineena lähes poikkeuksetta rikkiheksafluoridia (SF₆). [14, ss. 163, 170]

Vikavirran katkaisun yhteydessä katkaisijan koskettimien välille syntyy niin kutsuttu palaava jännite (recovery voltage). Katkaisijan yli vaikuttava palaava jännite määritetään katkaisijan syöttävän verkon puoleisen ja kuorman puoleisen verkon jännitteiden erotuksena. Palaavan jännitteen suuruus ja nousunopeus määräävät, onnistuuko katkaisutapahtuma vai tapahtuuko katkaisuvälissä jälleen- tai uudelleensyttyminen. Jos palaavan jännitteen suuruus ylittää avausvälin jännitelujuuden, tapahtuu läpilyönti, joka saattaa aiheuttaa katkaisijan tuhoutumisen. Muutamien ensimmäisten mikrosekuntien ajan katkaisijan palaavan jännitteen kestoisuus on riippuvainen valokaaren energiatasapainosta. Tätä vaihetta kutsutaan termiseksi katkaisuvaiheeksi (thermal phase of interruption). Termisen katkaisuvaiheen jälkeen palaavan jännitteen kestoisuus on riippuvainen koskettimien välisestä jännitelujuudesta (dielectric phase of interruption). Läpilyönti määritellään uudelleensyttymiseksi (reignition), kun purkaus tapahtuu alle 5 ms virran nollakohdasta. Tämän jälkeen tapahtuvat läpilyönnit määritellään jälleensyttymiseksi (restrike), jolloin myös syntyvät ylijännitteet ovat suurempia. Tyypitesteissä standardit vaativat, että katkaisijan on kestävä 300 ms ajan palaavaa jännitettä. [29, s. 305], [45, ss. 16-18, 32]

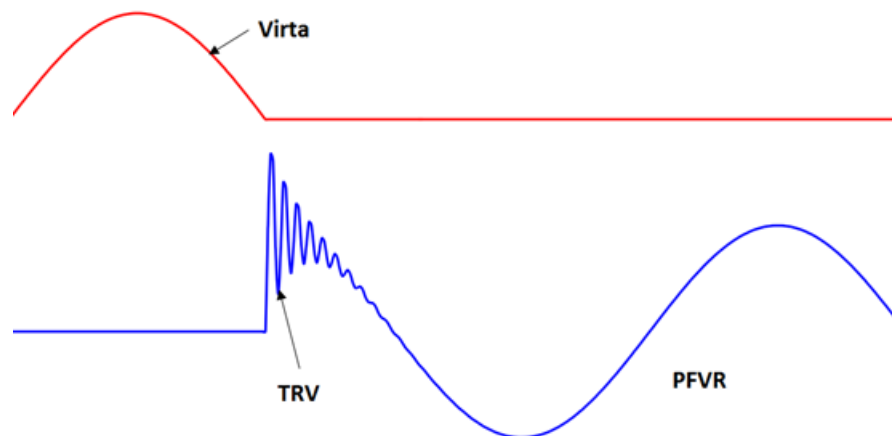
Palaavan jännitteen muoto riippuu syöttävästä verkosta sekä varsinkin kuormituksen ominaisuuksista voimakkaasti. Äärimmillen yksinkertaistetussa tapauksessa syöttävää verkkoa voidaan kuvata vaihtojännitelähteenä, joka syöttää täysin resistiivistä kuormaa (kuva 4.1a). Tällöin virran ja jännitteen välillä ei ole vaihesiirtoa. Kun virta katkeaa nollakohdassaan, kuorman puoleinen jännite jää arvoon nolla, ja katkaisijan yli vaikuttava palaava jännite on sinimuotoisen verkkojännitteen suuruinen. Jos kuorman oletetaan olevan puhtaasti induktiivinen (kuva 4.1b), jännite on 90 astetta virtaa edellä, jolloin virran nollakohdassa jännite on huippuarvossaan, joka on myös palaavan jännitteen huippuarvo heti katkaisun jälkeen. Palaavan jännitteen kasvunopeus on tällöin erittäin suuri, mutta sen huippuarvo on edelleen syöttävän verkon huippuarvo. [29, ss. 305-307]

Jos kuorman oletetaan olevan puhtaasti kapasitiivinen (kuva 4.1c), on jännite 90 astetta virtaa perässä, jolloin virran saavuttaessa nollakohdan on jännite negatiivisessa huippuarvossaan. Kuormituksen katketessa jää kondensaattoriin virran katkeamishetkellä vaikuttaneen jännitteen varaus. Ilmiö johtuu kondensaattorin ominaisuudesta varastoida varauksia. Tällöin palaava jännite kasvaa puolijakson, eli noin 10 millisekunnin aikana, arvosta nolla syöttöjännitteen kaksinkertaiseen maksimiin. [29, s. 307]



Kuva 4.1 Verkkotaajuksen katkaisijan yli olevan palaavan jännitteen muoto katkaistessa impedanssin Z muodostama virta, kun impedanssi on a) pelkkä resistanssi, b) puhdas induktanssi ja c) puhdas kapasitanssi. [29, s. 306]

Palaava jännite jaetaan transienttiosaan (TRV, Transient Recovery Voltage) ja perusosaan (PFVR, Power Frequency Recovery Voltage) (kuva 4.2). Välittömästi katkaisutapahtuman jälkeen katkaisijan yli vaikuttaa palaavan jännitteen transienttiosa, jonka aiheuttaa katkaisijan avautumisesta aiheutuvasta muutosvoimajärjestelmän tilassa. Transientin tasaannuttua katkaisijan yli vaikuttava palaava jännite muuttuu verkkotaajuiseksi. Katkaisutapahtumaa voidaan pitää onnistuneena, jos katkaisija kestää sekä palaavan jännitteen TRV-osan että PFVR-osan. Käytännössä katkaisijoiden palaavan jännitteen kestoisuuden määrittää yleensä TRV:n huippuarvo sekä nousunopeus. [46], [47, ss. 1, 17]



Kuva 4.2 Palaavan jännitteen jako transienttiosaan (TRV) ja perusosaan (PFVR). Kuvassa katkaistavana on ollut induktiivinen virta. Muokattu lähteestä [45, s. 20].

Palaavan jännitteen transienttiosan muoto riippuu merkittävästi syöttävästä verkosta ja on usein vaikeasti kuvattava. TRV:n hallitseva muoto voi olla joko oskilloiva, eksponentiaalinen tai kolmiomainen. Eksponentiaalinen TRV syntyy tyypillisesti, kun vähintään yksi muuntaja ja voimajohto ovat vikaantumattomalla puolella katkaisijaa. Tällöin verkosta voidaan tehdä RLC-ekvivalentti, joka pitää paikkansa ennen kuin vasta-asemalta tulevat heijastukset saavuttavat katkaisijan. Oskilloiva TRV taas syntyy tyypillisesti, kun vian ja syöttävän verkon välissä on muuntaja. Kolmiomainen TRV syntyy, kun vian ja katkaisijan välissä on lyhyt voimajohto (short-line fault). [48, ss. 17-18, 40]

4.3.2 Suurjännitekatkaisijoiden palaavan jännitteen kestoisuusvaatimukset

Korkeajännitekatkaisijoiden TRV-kestoisuusvaatimuksia käsittelevässä standardissa IEC-62271-100 [13] määritellään kahden ja neljän parametrin mallilla vaatimukset katkaisijan TRV-kestoisuudelle. Katkaisijan TRV-kestoisuuteen vaikuttaa katkaistavan vikavirran suuruus, koska katkaisunapojen läpi kulkeva virta vaikuttaa katkaisuvaiheen ionisaation voimakkuuteen. Korkeammalla vikavirralla ionisaatio on voimakkaampaa, jonka vuoksi katkaisijan TRV-kestoisuus on heikompi. Standardissa TRV-kestoisuudet on määritelty neljän eri vikavirran (T100, T60, T30 ja T10) suhteen, missä esimerkiksi T100 tarkoittaa 100 %:n vikavirtaa [13], jonka on Suomen kantaverkossa määritetty olevan 40 kA. Tässä työssä standardissa esitettyjä verhoikäyriä käytetään seuraavalla tavalla

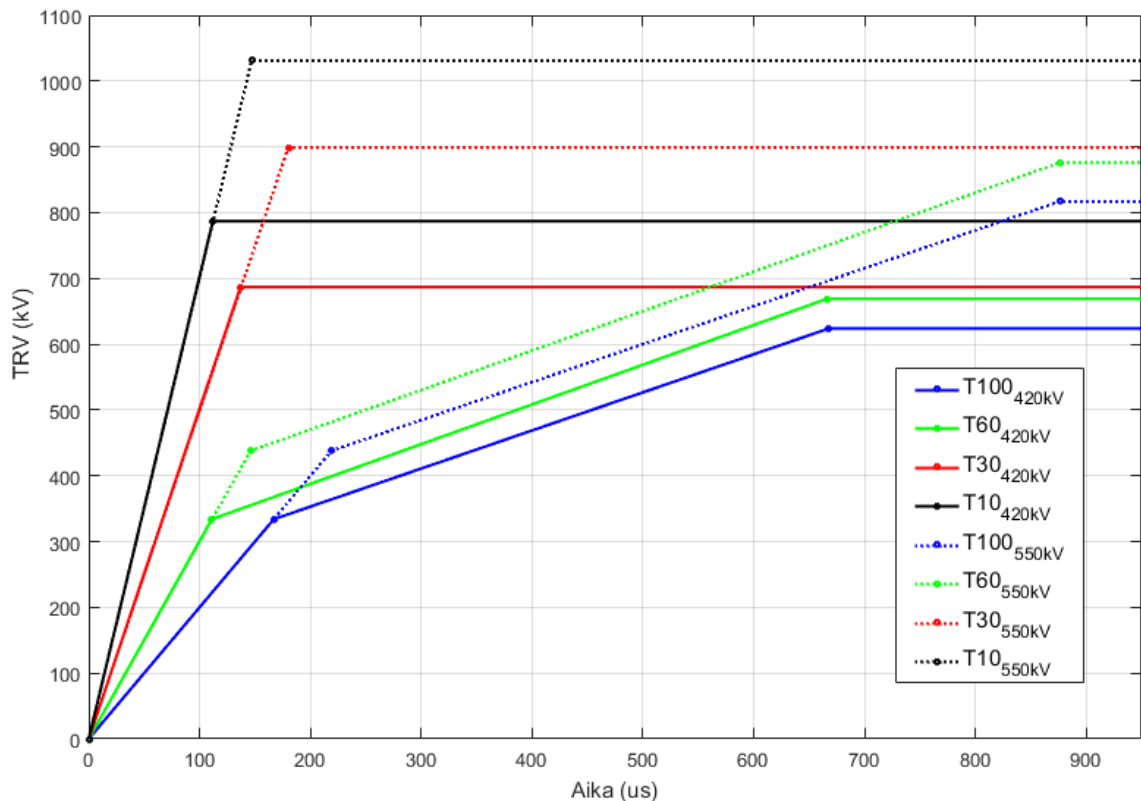
- T10-verhokäyrä, kun $I_{f_BRK} \leq 4$ kA
- T30-verhokäyrä, kun $4 \text{ kA} < I_{f_BRK} \leq 12$ kA
- T60-verhokäyrä, kun $12 \text{ kA} < I_{f_BRK} \leq 24$ kA
- T100-verhokäyrä, kun $24 \text{ kA} < I_{f_BRK} \leq 40$ kA,

missä I_{f_BRK} on katkaisijan läpi katkaisuhetkellä kulkevan virran tehollisarvo.

Verhokäyriä olisi mahdollista interpoloida myös kyseisen vikatilanteen tarkkaa katkaisijan läpi kulkevaa oikosulkuvirtaa vastaavaksi [48]. Edellä esitetty tapa tuottaa interpoloituihin verhokäyriin verrattuna hieman pessimistisiä TRV-kestoisuuksia katkaisijoille. Esimerkiksi vikavirralla 4,1 kA saatua TRV-lukemaa verrattaisiin työssä T30-verhokäyrään, jolloin katkaisijan maksimi TRV-kestoisuus olisi lähes 100 kV alhaisempi kuin interpoloitua verhokäyriä käytettäessä [13, s. 130], [48].

Standardissa yli 100 kV:n nimellisjännitteellä toimivien katkaisijoiden yli vaikuttavan TRV:n standardiarvot T100 ja T60 määritellään neljän ja standardiarvot T30 ja T10 kahden parametrin mallilla. Neljän parametrin mallissa TRV pilkotaan kahden niin kutsutun polvipisteen avulla kahdeksi lineaarisesti ajan suhteen nousevaksi suoraksi. Kahden parametrin mallissa TRV muodostetaan yhden polvipisteen eli yhden nousevan suoran

avulla. [13, s. 130] Kuvassa 4.3 on esitetty 420 kV:n ja 550 kV:n nimellisjännitteisten katkaisijoiden standardoidut TRV-kestoisuudet.



Kuva 4.3 IEC-62271-100-standardissa esitetyt TRV-verhokäyrät 420 kV:n ja 550 kV:n nimellisjännitteisille katkaisijoille. Muokattu lähteestä [13, s. 130].

Suurimmat palaavan jännitteen arvot saavutetaan tyypillisesti ensimmäisessä avautuvassa katkaisijan navassa kolmivaiheisissa symmetrisissä vioissa, jotka eivät sisällä maakosketusta, kun järjestelmän jännite on suurimmillaan. Standardissa oletetaan kuitenkin 3-vaiheisten oikosulkujen ilman maakosketusta (3ph) olevan erittäin harvinaisia, jonka vuoksi standardoidut lukemat perustuvat maakosketuksen sisältäviin 3-vaiheisiin vikoihin (3phg). [46] Sarjakompensoimattomassa 400 kV:n verkossa voidaan standardin mukaan olettaa, ettei katkaisijan yli vaikuttava palaava jännite ylitä kuvassa 4.3 esitettyjä TRV-verhokäyriä, kun maakosketusta sisältämättömiä vikoja (2ph- ja 3ph-viat) ei huomioida [13, s. 49]. Sarjakompensoinnin tiedetään nostavan TRV-tasoa kondensaattorin varauksen varastointikyvyn vuoksi [11], jonka vuoksi sarjakompensoitujen johtojen katkaisijoiden TRV-kestoisuutta määrittäessä onkin palaavaa jännitettä tutkittava aina tapauskohtaisesti [13, s. 50].

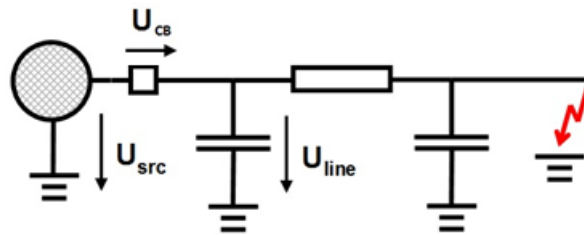
4.3.3 Vaikuttavat tekijät

Kun tutkitaan palaavan jännitteen suuruutta, voidaan katkaisijan yli vaikuttavaa palaavaa jännitettä arvioida tarkastelemalla kummankin navan puolta erikseen [46, s. 162]. Kuvassa 4.4 on esitetty sarjakompensoimattomalla johdolla tapahtuva vika, jossa katkaisijan

ulkoisen verkon puoleisen navan jännite maata vasten on U_{src} sekä voimajohdon puoleisen navan jännite maata vasten U_{line} . Katkaisijan yli oleva jännite U_{CB} voidaan määrittää verkon puolen jännitteen U_{src} ja johdon puolen jännitteen U_{line} erotuksena yhtälön

$$U_{CB} = U_{src} - U_{line} \quad (3)$$

mukaisesti. Ennen vikaa katkaisija on suljettu, joten U_{src} ja U_{line} ovat yhtä suuret, kun katkaisijan resistanssin oletetaan olevan nolla. Kun johdolla tapahtuu vika, katkaisija aukeaa, ja sen yli oleva palaava jännite U_{CB} voidaan määrittää katkaisijan napojen välisten jännitteiden erotuksena yhtälön (3) mukaisesti.



Kuva 4.4 Verkossa tapahtuvan vian vaikutus katkaisijan palaavaan jännitteeseen kompensoimattomassa verkossa. Muokattu lähteestä [49].

Sarjakompensoimattoman johdon johtokatkaisijoiden yli vaikuttavaan TRV-käyrämuotoon vaikuttavat lähteiden [10] [49] [47] mukaan muun muassa:

1. Vikavirran suuruus [49], [10, s. 2]
2. Nollaverkon rakenne [47, ss. 4, 12]
3. Järjestelmän induktanssi ja kapasitanssi [10, s. 2]
4. Asemalta lähtevät voimajohdot [47, s. 5]

Vikavirran kasvaminen kasvattaa TRV:n huippuarvoa ja RRRV:n suuruutta [47]. Vikavirran suuruus määräytyy pääasiassa vikatyypistä, vikaantuneen johdon rakenteesta sekä vikavirtaa syöttävän verkon oikosulkutehosta [49].

Nollaverkon rakenne vaikuttaa U_{src} jännitteen käyrämuotoon ja erityisesti sen värähtelyn vaimenemisnopeuteen epäsymmetrisissä vioissa. Nollaverkon rakenne määräytyy pääasiassa vikatyypistä, verkossa olevasta kuormitustilanteesta ennen vikaa sekä vikavirtaa syöttävän verkon rakenteesta. Vaiheiden väliset keskinäisimpedanssit, tähtipisteen maadoitukset sekä maajohtimien rakenne vaikuttavat epäsymmetristen vikojen aiheuttamiin palaaviin jännitteisiin. [49, ss. 6, 10] Käytännössä TRV:n huippuarvo on suurempi vioissa, jotka eivät sisällä maakosketusta. Sama pätee myös järjestelmän maadoitukseen; maadoittamattomassa verkossa TRV:n huippuarvo on suurempi kuin tehollisesti maadoitetussa verkossa. [47, s. 4]

Järjestelmän induktanssi ja kapasitanssi vaikuttavat vikavirran kulmaan, joka kuvan 4.1 mukaisesti vaikuttaa sekä RRRV:n että TRV:n huippuarvon suuruuteen. Asemalta lähtevien voimajohtojen lukumäärä, pituus ja rakenne vaikuttavat U_{src} -jännitteeseen summautuvien kulkuaaltojen muotoon ja suuruuteen. [49], [47]

Kun sarjakondensaattori sijaitsee katkaisijan syöttävän verkon välissä ja sarjakondensaattorin oletetaan pysyvän verkossa johtokatkaisijan aukeamiseen asti, kondensaattorin voidaan ajatella vaikuttavan palaavaan jännitteeseen seuraavilla tavoilla:

1. Sarjakondensaattorin yli oleva jännite summautuu johdon puolen jännitteeseen U_{line} . Varistorit rajoittavat kondensaattorin yli olevan jännitteen suuruuden maksimissaan suojausjännitteen suuruudeksi. [10], [49]
2. Sarjakondensaattori lisää johdon syöttämää vikavirtaa, jonka kasvu aiheuttaa TRV:n huippuarvon ja RRRV:n kasvamisen [49].
3. Sarjakondensaattori lisää järjestelmän kapasitanssia, joka vaikuttaa virran kulmaan [49].

Kun tutkitaan sarjakompensoidun verkon johtokatkaisijoiden yli vaikuttavaa TRV-jännitettä, lähteen [10] mukaan tärkeimmät verkon ja sarjakondensaattorin rakenteessa huomiioon otettavat ovat:

- 1) Voimajohdon rakenne (sekä maadoitus)
- 2) Sarjakondensaattorin kompensointiaste
- 3) Sarjakondensaattorin sijainti
- 4) Sarjakondensaattorin suojausjännite

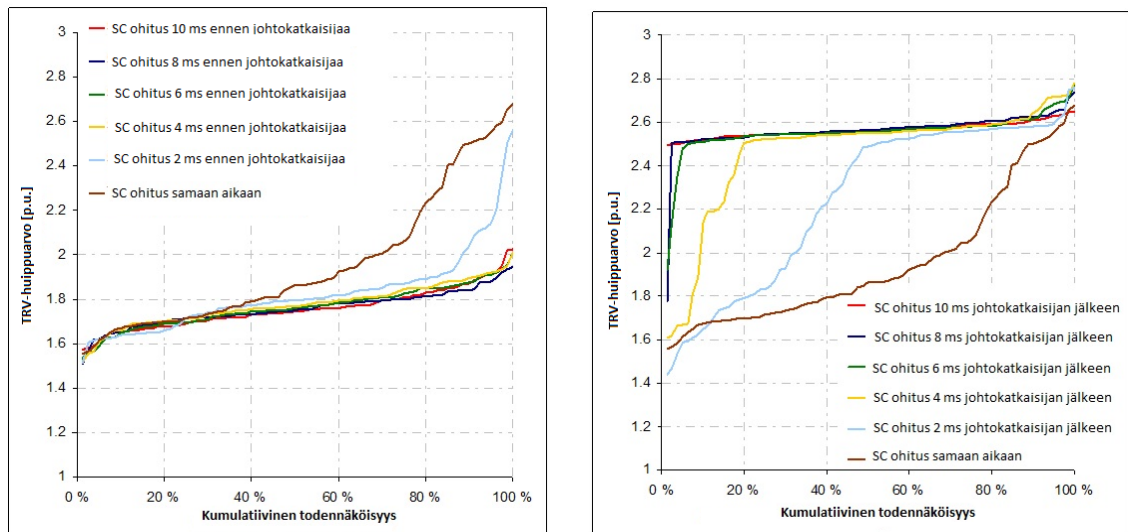
Suurimmat TRV:n huippuarvot on tutkimuksissa saatu silloin, kun johdon pituus, sarjakondensaattorin suojausjännite sekä kompensointiaste olivat suurimmat ja kondensaattori sijaitsi keskellä johtoa [10], [11]. Voimajohto tulee tutkimuksissa kuvata taajuusriippuvalla mallilla, niin että myös rinnakkaisten johtojen keskinäisimpedanssit huomioidaan. Tutkimukset olisi optimaalista tehdä sekä johdolle, jossa sarjakondensaattori on sijoitettu keskelle johtoa, että johto-osuuksille, jossa sarjakondensaattori sijaitsee asemalla.

Kuten edellä on esitetty, palaavan jännitteen suuruuteen vaikuttavat monet tekijät, jotka vaihtelevat vikatilanteiden välillä. Kun sarjakondensaattorin oletetaan pysyvän ohittamattomana viassa, lähteen [10] mukaan tärkeimmät varioitavat parametrit sarjakompensoidussa verkossa ovat:

- 1) Vikatyyppe
- 2) Vikapaikka
- 3) Vian alkuajankohta (POW, Point of Wave)
- 4) Johtokatkaisijan aukeamisajankohta

Vikatyypin vaikutus vikavirran suuruuteen ja nollaverkon rakenteeseen. Vikapaikka vaikuttaa vikaimpedanssin takia vikavirtaan merkittävästi. Lisäksi vikapaikka vaikuttaa palaavan jännitteen dominoivaan purkaustaajuuteen. Käytännössä palaavan jännitteen taajuus on pienempi, kun vika tapahtuu voimajohdon lopussa. Vikavirran suuruus vaikuttaa palaavan jännitteen lisäksi myös merkittävästi kondensaattoriohituksen ajankohtaan. Lisäksi vikavirta vaikuttaa myös katkaisijan TRV-kestoisuuteen (ks. luku 4.3.2). Vian alkamisajankohtaa varioimalla pystytään vaikuttamaan virtojen ja jännitteiden hetkellisarvoihin vikahetkellä. Johtokatkaisijan aukeamisajankohta vaikuttaa virtojen ja jännitteiden hetkellisarvoihin katkaisuhetkellä. [10], [49]

Tämän tutkimuksen kannalta tärkein muuttuja, joka on lähteessä [10] jätetty huomiotta, on sarjakondensaattorin ohitusajankohta ja erityisesti kondensaattorin ohitusajankohta suhteessa johtokatkaisijan toiminta-aikaan. Sarjakondensaattorin ohittaminen ennen johtokatkaisijoiden aukeamista on tutkimuksissa [49], [50], [51], [52] havaittu pienentävän TRV-riskiä. Ohituksen vaikutusta TRV:n huippuarvoon on havainnollistettu kuvassa 4.5, josta havaitaan, että sarjakondensaattorin vaikutus TRV:n huippuarvoon pienenee merkittävästi, kunhan ohitus tapahtuu ennen johtokatkaisijan aukeamista.



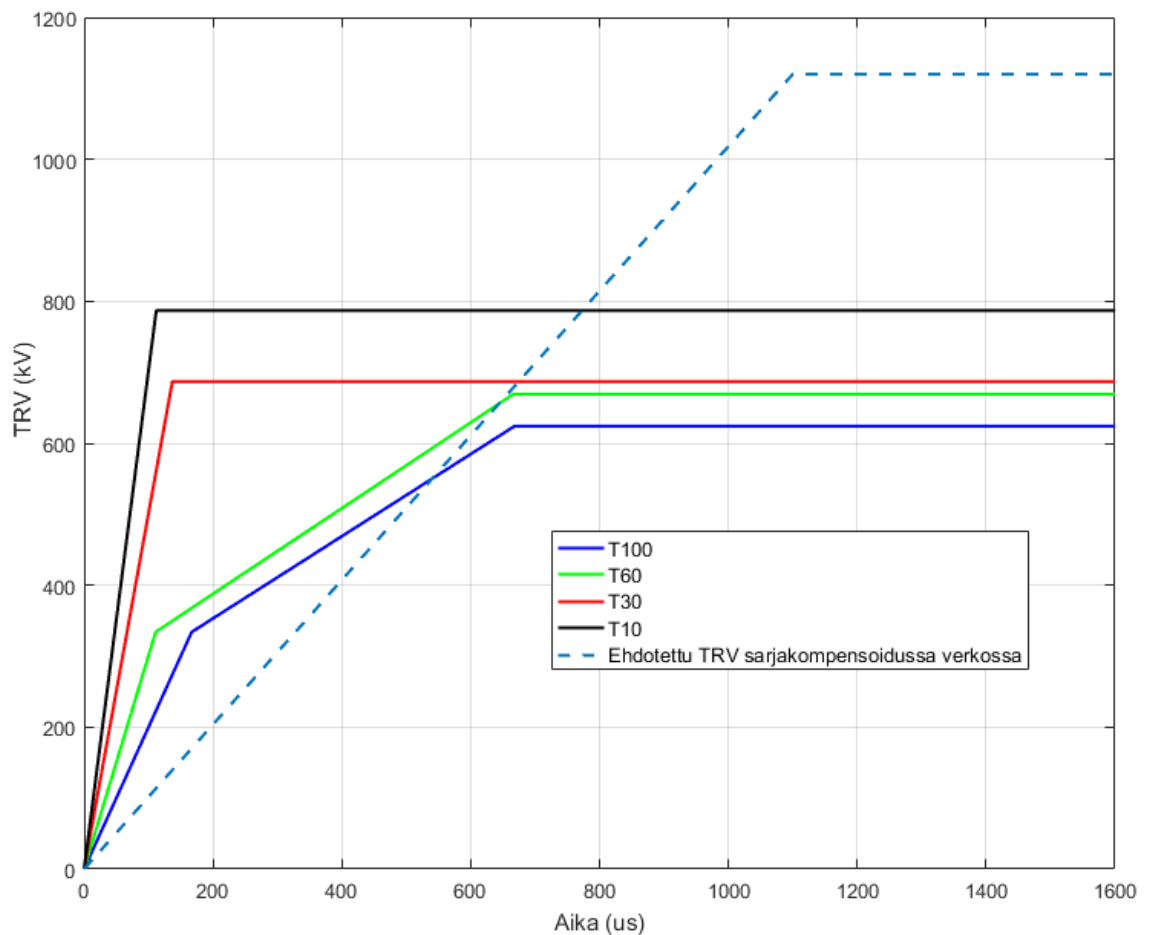
Kuva 4.5 Sarjakondensaattorin ohitusajan vaikutus TRV-huippuarvoon 3phg-viassa. Muokattu lähteestä [49].

4.3.4 Aiemmat tutkimukset TRV-riskin määrittämiseksi sarjakompensoidussa verkossa

Tutkimuksessa [10] on tehty standardointiehdotus katkaisijoiden TRV-kestoisuudelle sarjakompensoidussa verkossa. Ehdotuksessa on varioitu kaikkia luvussa 4.3.3 mainittuja TRV:n suuruuteen vaikuttavia parametreja, mutta kondensaattoriohitusta ei tutkimuksessa huomioitu. Sarjakondensaattorien kompensointiasteena käytettiin 70 %, joka edus-

taa hyvin Fingridin sarjakondensaattorien kompensointiasetta. Kondensaattorin suojausjännitteeksi oli määritetty 363 kV, joka on huomattavasti Fingridin nykyisiä sarjakondensaattoreita suurempi jännite.

Tutkimuksessa saadut simulaatiotulokset skaalattiin eri vikatyypin esiintymistodennäköisyyksien mukaan, jolloin saatiin TRV:n huippuarvolle sekä RRRV:lle todennäköisyysjakaumat. Jakaumasta valittiin huippuarvolle lukema, joka kattaa 90 % tapauksista. RRRV:n suhteen valittiin lukema 1,0 kV/ μ s, jonka todettiin kattavan suurin osa tapauksista. Ehdotettu standardointi sarjakompensoidun 420 kV:n verkon TRV-verhokäyrälle on esitetty kuvassa 4.6. Ehdotettu standardointi sisältää ainoastaan tilanteet, joissa sarjakondensaattorin läpi kulkeva vikavirta on maksimissaan 15 % määritellystä maksimioikosulkuvirrasta [10] eli kantaverkon tapauksessa 6 kA. Eräs tulkinta tälle määrittelylle on, että kondensaattorin sisäisen suojauksen oletetaan toimivan nopeasti ja ohittavan kondensaattorin selvästi ennen katkaisijoiden aukeamista tilanteissa, joissa kondensaattorin linjavirran tehollisarvo on vähintään 6 kA.



Kuva 4.6 Ehdotus 420 kV:n sarjakompensoidun verkon katkaisijatestaukseen käytettävästä TRV-verhokäyrästä. Vertailuna on esitetty 420 kV:n nimellisjännitteisen katkaisijan TRV-verhokäyrät. Muokattu lähteestä [10].

Muita tutkimuksia aiheesta on tehty Brasilian 500 kV:n [50], Kiinan 1100 kV:n [53] ja Turkin 420 kV:n [11] sarjakompensoiduissa siirtoverkoissa. Turkin siirtoverkon tutkimuksessa 3ph-vika aiheutti suurimmillaan noin 1400 kV:n suuruisen TRV:n huippuarvon, mutta RRRV:n suuruus jäi alle selvästi alle standardin raja-arvojen. Tutkimuksessa kondensaattoriohitusta ei oltu toteutettu. Kondensaattoriohituksen puuttuminen sekä 3ph-vian sisällyttäminen tutkimukseen selittävät suuren TRV:n huippuarvon. Tutkimuksen tulosten perusteella TRV:n suuruutta rajoitettiin katkaisijan rinnalle asennettavalla metallioksidisuojoilla.

Kiinan 1100 kV:n siirtoverkolle tehdyssä tutkimuksessa [53] on huomioitu myös kondensaattoriohitus kipinävälillä ja sarjakondensaattorin sisäisen suojauksen kattavuus. Tutkimuksesta havaitaan kondensaattorin sisäisen suojauksen kattavuuden merkitys; suurimmat TRV:n huippuarvot löytyivät, kun vikapaikka sijaitsi pitkän johdon päässä kaukana sarjakondensaattorista, jolloin kondensaattorin sisäinen suojaus ei ollut toiminut. Kun tutkimuksessa saadut TRV:n huippuarvot skaalataan suhteellisarvoja käyttäen 420 kV:n verkolle, saadaan yksivaiheiselle maasululle (1phg) 932 kV, kaksivaiheiselle oikosululle maakosketuksella (2phg) 1021 kV ja 3phg-vialle 1066 kV. RRRV:n suuruuden ei todettu tässäkään tutkimuksessa ylittävän IEC-standardin määrittämiä raja-arvoja. Sarjakondensaattorin kompensointiaste oli 40 %, joka on selvästi pienempi kuin Suomen kantaverkon kondensaattoreiden kompensointiaste.

Brasilian siirtoverkolle tehdyssä tutkimuksessa [50] todettiin, että kriittisimmät vikapaikat TRV:n huippuarvon suhteen sijaitsevat ennemmin kaukana kondensaattorista kuin kondensaattorin terminaalissa. TRV:n huippuarvo oli tyypillisesti suurin, kun kondensaattori sijaitsi katkaisijan ja vikapaikan välissä. Suuria TRV:n huippuarvoja esiintyy harvoin, noin 2 % simulaatiotapauksista ylitti standardin vaatimukset.

Suomen sarjakompensoidulle siirtoverkolle suoritettiin aiheesta tutkimukset [52], [54]. Tutkimus [52] suoritettiin kipinävälin kanssa johtoväleille AJ-PR, KI-PR, PR-PI. Tutkimuksessa suurin TRV:n huippuarvo tapahtui PR-AS-johtokatkaisijalla 1359 kV kaksivaiheisella oikosululla (2ph-vialla). IEC-verhokäyrän ylityksiä tapahtui johtovälistä ja johtokatkaisijasta riippuen noin 2,9–22,1 %:ssa johtokatkaisijan navoista. Keskimääräinen ylitysprosentti oli 13,4 %. Tutkimuksessa huomioitu johdonsuojareleeltä tulevaa ulkoista ohitussignaalia, mikä selittää osittain tulosten korkean IEC-verhokäyrän ylitysprosentin. Toisaalta TRV:n suuruutta oli tarkasteltu vain 2 ms katkaisijan navan avautumisen jälkeen, vaikka osassa tapauksista TRV:n todellisen huippuarvo olisi esiintynyt vasta tarkastelujakson jälkeen.

5. YLIJÄNNITESUOJAUKSEN VAIHTOEHTOISET TOTEUTUSTAVAT JA HUOMIOITAVAT RISKIT

Merkittävä osa kantaverkon sarjakondensaattorien luotettavuusongelmista voitaisiin luvun 4.1 mukaan ratkaista rakentamalla sarjakondensaattorit ilman kipinäväliä. Keskeisimmät tavoitteet luvussa 5.1 on arvioida kipinävälittömyyden hyötyjä ja haittoja teknisestä ja taloudellisesta näkökulmasta sekä kipinävälittömyyden vaikutusta MOV-mitointukseen. Luvussa 5.2 pohditaan johtosuojausten toiminta-aikojen avulla sitä, millaista ulkoisen vian vika-aikaa varistorien mitoituksessa tulisi käyttää. Luvussa 5.3 käsitellään sarjakondensaattorin ohitusviiveitä suhteessa johtokatkaisijan toiminta-aikoihin. Toiminta-aikojen avulla pystytään arvioimaan kipinävälittömyyden vaikutusta johtokatkaisijoiden TRV-riskiin. TRV-riskin rajoitusmenetelmiä käsitellään luvussa 5.4.

5.1 Kipinävälittömyyden vaikutukset sarjakondensaattorin rakenteeseen ja ylijännitesuojauksen toteutukseen

5.1.1 Kipinävälittömyyden edut

Fingridin omistamien sarjakondensaattoreiden luotettavuuden todettiin luvussa 4.1 olevan heikko. Merkittävä osa sarjakondensaattorin virhetoiminnoista aiheutuu suojaus- ja ohjausjärjestelmän ja kipinävälin virhetoiminnoista. Eräänä toimenpiteenä sarjakondensaattorien luotettavuuden parantamiselle on ehdotettu kipinävälistä luopumista. Tällöin sarjakondensaattorin rakenne yksinkertaistuisi, mikä oletettavasti (luku 4.1) vähentäisi kondensaattorin virhetoimintoja ja vikoja.

Kipinävälittömän sarjakondensaattorin ylijännitesuojaustoteutuksen merkittävin ero nykyiseen ylijännitesuojaustoteutukseen on, että kipinäväli oheislaitteineen korvataan lisäämällä varistorien määrää. Kipinävälistä luopumalla päästäisiin eroon suuresta määrästä komponentteja, jolloin lavalta säästyisi tilaa. Esimerkiksi Kemimaalla kaksi päällekkäin olevaa kipinävälilikoppia painavat yhteensä 2200 kg [5] ja vievät lavalta huomattavan osan tilasta (kuva 3.5). Lavan kokoa olisi todennäköisesti mahdollista optimoida pienemmäksi siirtymällä kipinävälittömään sarjakondensaattoriin.

GE:n sekä Siemensin yksikoppisissa kondensaattoriratkaisuissa päästäisiin eroon kuvassa 3.7 näkyvistä jännitteenjakokondensaattoreista C_1 ja C_2 , kipinävälielektrodeista, vaimenusvastuksesta, apukipinävälistä, kipinävälin liipaisuelektroniikasta sekä kipinävälilikopista. Lisäksi kuvassa 2.1 näkyvää T50-kipinävälivirtamuuntajaa ei enää tarvittaisi. ABB:n kondensaattoriratkaisuissa päästäisiin eroon API-, FC- ja OSU-moduuleista sekä

kipinävälivirtamuuntajasta. Lisäksi kaikkien kolmen valmistajan kondensaattoriratkaisuissa suojaus- ja ohjausjärjestelmän logiikka yksinkertaistuisi sekä tarvittavien signaalinsiirtojen määrä vähenisi huomattavasti. [4], [36]

Kipinävälin ohjaustoimenpiteet tapahtuvat lavalla johdon potentiaalissa, mutta itse ohjausautomaatiikka sijoitetaan maan potentiaaliin. Tämän vuoksi ohjaus- ja tiedonsiirtosignaali tulee pystyä siirtämään maasta lavalle. Lavan ja maan välillä tapahtuvista kipinäväliin liittyvistä signaalien ja tehon siirroista päästäisiin eroon kipinävälistä luopumalla. Kipinävälin liipaisemiseen käytettävästä lavateholähteestä päästäisiin myös eroon, ja näin ulkoisena tehollähteenä toimivia tehonsyöttölasereita tai kytkentäkondensaattoreita ei enää tarvittaisi. Kipinävälittömyyden vuoksi optiset virtamuuntajat olisivat myös mahdollinen ratkaisu. Optisten virtamuuntajien suurin hyöty verrattuna nykyisiin virtamuuntajiin on tarvittavien signaalimuunnosten vähäisempi määrä. [4], [55]

Kokonaisuudessaan kipinävälittömyyden myötä poistuvien kipinävälikomponenttien kustannusvaikutuksen voidaan arvioida olevan noin 150–250 t€. Arvio perustuu Fingridin sarjakondensaattoriprojekteissa eri valmistajien esittämiin hintoihin. Kipinävälikomponenttien tarkka hinta vaihtelee projektikohtaisesti, joten tarkempaa hinta-arviota ei työssä kannata tehdä.

Kipinävälittömän sarjakondensaattorin kondensaattorin rakenne ja rajapinnat ovat kipinävälillistä sarjakondensaattoria yksinkertaisempi, minkä vuoksi kondensaattorin suojausjärjestelmäusinnat olisivat entistä helpommin kilpailutettavissa. Lisäksi sarjakondensaattorin työturvallisuus parantuisi, kun lavalla tehtävät huoltotoimenpiteet vähentyisivät kipinävälin poistumisen vuoksi. CapThorissa työturvallisuusriskin aiheuttaa huoltojen ja korjausten yhteydessä sen korkea paine. Perinteisessä kipinävälissä aiheutuu riskejä, kun huolletaan korkealla olevaa kaksikoppista kipinäväliä. [4]

5.1.2 Kipinävälittömyyden riskit ja haasteet

Kipinävälin poistaminen kasvattaa sarjakondensaattorin läpi kulkevan vikavirran vika-aikaa, koska sarjakondensaattorin ohittuminen sisäisessä viassa tapahtuu kipinävälin toiminnan sijaan ohituskatkaisijan sulkeutumisella. Kipinävälin toiminta-aika on luvun 3.2.2 mukaisesti noin 1–2 ms ja ohituskatkaisijan toiminta-aika noin 20–50 ms. Sisäisen vian vika-ajan kasvamisen vuoksi varistorien energiamitoitusta pitää kasvattaa kipinävälistä luovuttaessa.

Varistorien mitoituksessa sisäisen vian energiakertymä on kipinävälillisillä sarjakondensaattoreilla määritetty suurimman energian nousunopeuden avulla kertomalla se valmistajan määrittämällä vika-ajalla (ks. luku 3.2.2). Kipinävälin poistamisen vaikutusta varistorien energiamitoitukseen voidaan arvioida tekemällä mitoitus energian maksimisuusnopeuden avulla kipinävälittömälle sarjakondensaattorille. Tällöin tulokseksi saadaan konservatiivinen arvio sisäisen vian energiakertymästä. Sarjakondensaattorin kokemaksi

sisäisen vian vika-ajaksi on laskelmassa oletettu 30 ms kipinävälittömälle ja 1,2 ms kipinävälilliselle sarjakondensaattorille. Varistorien hintana on käytetty luvussa 3.2.2 esiteltyä hintaväliä 2000–4000 €/MJ. Energiakertymät on taulukossa esitetty yksivaiheisena energiakertymänä ja hinta kolmivaiheisena kokonaishintana.

***Taulukko 5.1** Varistorien sisäisen vian energiakertymän määrittäminen kipinävälilliselle ja kipinävälittömälle sarjakondensaattorille nykyisellä sisäisen vian mitoitusperiaatteella Keminmaan MOV-tutkimuksen [30] energian nousunopeuden perusteella.*

FSC	Energian nousunopeus (MJ/ms)	Energia-kertymä 1,2 ms (MJ)	Energia-kertymä 30 ms (MJ)	Energia-kertymien erotus (MJ)	Hintaero (t€)
KIL	2,40	2,9	72,0	69,1	415-829
KII	2,22	2,7	66,6	63,9	384-767

Energian nousunopeuteen perustuvalla laskentatavalla kipinävälittömyyden vaikutukset varistorien investointikustannuksiin olisivat noin 384–829 t€. Kyseinen mitoitusperiaate ei ole kuitenkaan soveltuva kipinävälittömälle sarjakondensaattorille, koska energiaa ei varistoreihin kerry jatkuvasti maksimaalisella energian nousunopeudella (kuva 3.4). Tarkka kipinävälittömän sarjakondensaattorin sisäisen suojauksen varistorien mitoitus on tehtävä simuloimalla vikoja transienttilaskentaohjelmistolla ja ohittamalla sarjakondensaattori ohituskatkaisijalla määritetyn toiminta-ajan jälkeen.

Ohitusajan pidentyminen sisäisessä viassa vaikuttaa varistorien energiakertymän lisäksi myös sarjakompensoidun verkon johtokatkaisijoiden TRV-riskiin. Aiemmin aiheesta tehdyissä tutkimuksissa on havaittu sarjakondensaattorin nopean ohituksen pienentävän sarjakompensoitujen voimajohtojen johtokatkaisijoiden TRV-riskiä. Kun sarjakondensaattorin ohitus tapahtuu sisäisissä vioissa kipinävälin sijaan ohituskatkaisijan avulla (ks. luku 5.3), saattaa johtokatkaisija aueta joissain tilanteissa ennen kuin kondensaattori on ohittunut. Tällaisissa tilanteissa johtokatkaisijoiden TRV-riski saattaa olla huomattava (ks. luku 4.3.4).

Kondensaattorin ohitusajan pidentymisen lisäksi kipinävälin poistumisen takia ohituksen luotettavuus saattaa heiketä. Kipinävälittömällä sarjakondensaattorilla ohituksen onnistuminen on täysin riippuvainen ohituskatkaisijan toiminnasta. Kun kipinäväli on käytössä, toimii ohituskatkaisija samalla kipinävälin varalaitteena, jolloin ohitus on tavallaan kahdennettu. Tietyntyyppisena varalaitteena ohituskatkaisijalle toimii varistorien kannalta kuitenkin myös johdonsuojakatkaisijat, jotka erottavat vian verkosta keskimäärin noin 50 ms:n vika-ajalla (ks. luku 5.2.3).

5.2 Varistorien ulkoisen vian vika-ajan määrittäminen

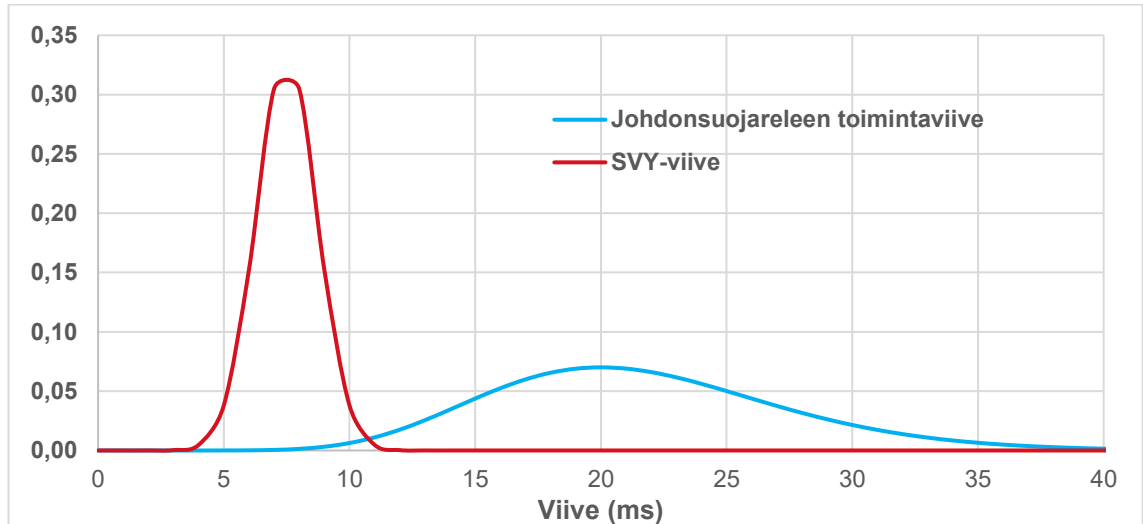
5.2.1 Johdonsuojareleen toimintaviiveen määrittäminen

Sarjakompensoidun johdon suojaamiseen käytetään Suomen kantaverkossa aina kahta pääsuojarelettä: ensimmäisenä pääsuojana toimivaa differentiaalirelettä ja toisena pääsuojana toimivaa distanssirelettä. Johtosuojaus on siis kahdennettu kahdella eri tyyppisellä releellä, joista kummatkin ovat siirtoviestiyhteydellä eli SVY:llä varustettuja. 400 kV:n sarjakompensoimattoman voimajohdon suojaus on toteutettu kahdella distanssireleellä, joista kummallakin on SVY-yhteydet vasta-asemille. Johtosuojaus on täydellisesti kahdennettu käyttämällä esimerkiksi käyttämällä eri valmistajien releitä ja kahta SVY-yhteyttä. [14, ss. 351-367] Vikatilanteessa sekä sarjakompensoimattomalla että sarjakompensoidulla johdolla releen havahtumisviive on joko distanssireleen tai differentiaalireleen laskentaviiveen suuruinen. Releen laukaisukäskyn viive sisältää releen laskentaviiveen lisäksi myös SVY-viiveen. [56]

Distanssireleellä käytetään niin kutsuttua sallivaa yliulottuvaa viestiyhteystoimintoa, eli SVY-vyöhykkeen reaktanssin asettelu on suurempi kuin sarjakompensoidun voimajohdon reaktanssi. Rele kuitenkin lähettää laukaisukäskyn vain, jos se mittaa vian yliulottuvalla vyöhykkeellä ja saa vasta-asemalta SVY-signaalin. Johto siis laukaistaan irti vain, jos johdon kummankin pään distanssireleet havaitsevat vian suojattavalla johdolla. [56], [14, ss. 366-367]

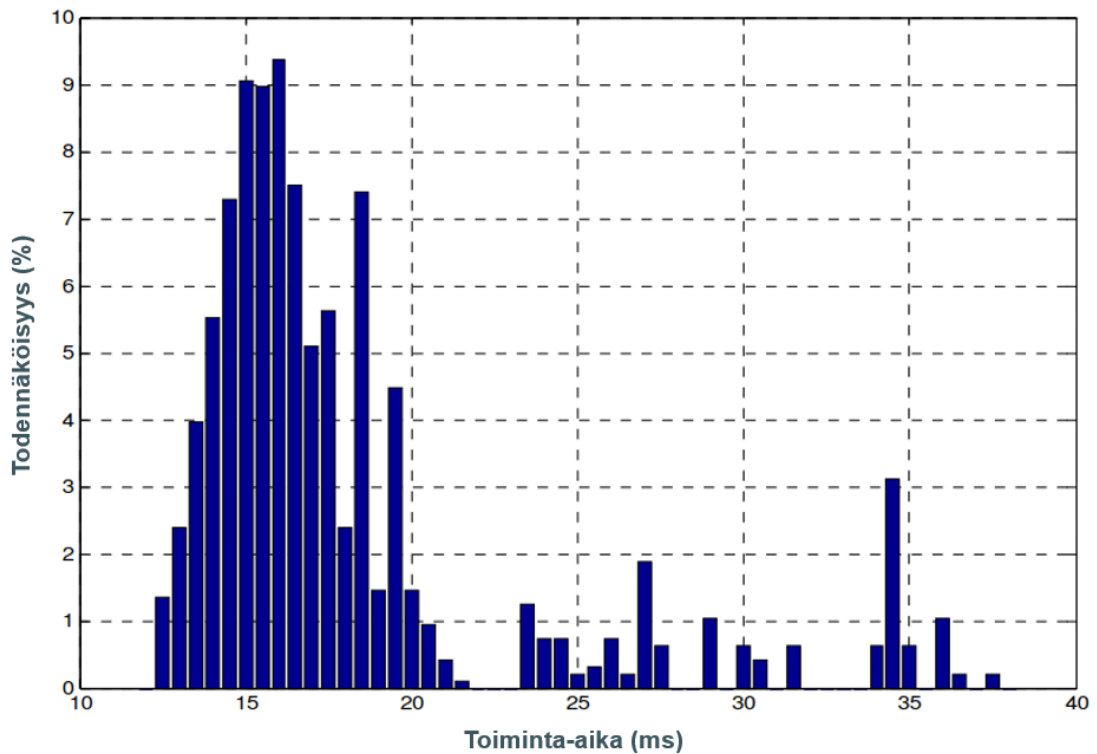
Fingridin vuoden 2018 voimajärjestelmään liityntävaatimuksissa vaaditaan 400 kV:n verkkoon liittyviltä voimalaitoksilta kykyä kestää lähivikaa 200 ms:n ajan [57], joten 400 kV:n verkon pitkittyneessä verkon stabiilius saattaisi vaarantua. Distanssireleen toisen vyöhykkeen hidastus on tyypillisesti 400 ms, joten vikatilanteessa laukaisun venyminen distanssireleen toiselle vyöhykkeelle olisi koko verkon stabiiliuden kannalta erittäin kriittinen vika. Molempien pääsuojien toimimattomuus voisi aiheutua esimerkiksi releasettelijan tekemästä asetteluvirheestä. Molempien pääsuojien samanaikaiset suojausviat ovat aina N-2-vikoja, joita kantaverkossa pyritään ehkäisemään käyttämällä eri valmistajien tai eri mittausperiaatteiden releitä. [56] Tässä työssä oletetaan releen havahtumisen tapahtuvan 400 kV:n verkossa aina hidastamattomasti joko differentiaalireleen tai distanssireleen ensimmäisen vyöhykkeen toimesta.

Differentiaalireleen ja distanssireleen ensimmäisen vyöhykkeen toimintaviiveen voidaan olettaa olevan välillä 10–40 ms ja siirtoviestiyhteyden viiveen välillä 5–10 ms. Tässä työssä johdonsuojareleen viiveen oletetaan olevan gammajakautunut arvoilla $\alpha = 13,5$ ja $\beta = 1,6$. Siirtoviestiyhteyden viiveen taas oletetaan olevan normaalijakautunut keskiarvolla 7,5 ms ja hajonnalla 1,2 ms. [56] Rakennettujen jakaumien tiheysfunktiot on esitetty kuvassa 5.1.



Kuva 5.1 Johdonsuojareleen ja -releiden välisen siirtoviestiyhteyden mallinnettujen viivejakaumien tiheysfunktiot

Eräänä esimerkkinä distanssireleen toiminta-aikajakaumasta on kuvassa 5.2 esitetty ABB:n REL670-suojareleen mitattu toiminta-aikajakauma, jonka muodostamiseksi testattiin 960 vikaa pitkälle ja lyhyelle johdolle viidellä eri vian alkuaianhetkellä. 1phg-vikoja tehtiin testissä kuusinkertainen ja 2phg-vikoja kaksinkertainen määrä suhteessa 2ph- ja 3phg-vikoihin. Jakaumasta havaitaan, että suurin osa havahtumisviiveistä jää alle 20 millisekunnin keskiarvon ollessa 18,25 ms. Pisimmillään releen havahtuminen on kestänyt noin 37,5 ms ja lyhimmillään noin 12,5 ms. [58, s. 9] Jakauman muoto noudattelee kuvassa 5.1 esitettyä gammajakautunutta johdonsuojareleen havahtumisviivettä.



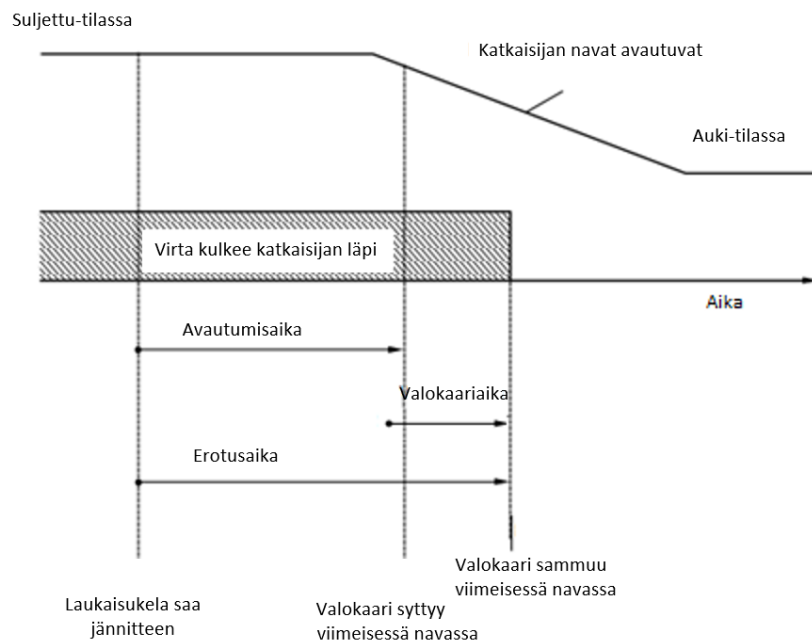
Kuva 5.2 REL670-distanssireleen toiminta-aikajakauma. Muokattu lähteestä [58, s. 9].

Kantaverkossa on 400 kV:n avojohdoilla käytössä pikajälleenkytkennät ja aikajälleenkytkennät. Releen jälleenkytkentätoiminnon tavoitteena on saada hetkellinen vika poistumaan verkosta jännitteettömän väliajan kulussa. Suomen 400 kV:n verkossa johdon automaattinen pikajälleenkytkentä tehdään johdon toisesta päästä 2,4 sekuntia vian jälkeen ja jännite yhdistetään toiselta asemalta 0,2 sekuntia myöhemmin, mikäli vika on poistunut. Mikäli johdolla on edelleen vika, jännitteen antanut katkaisija avautuu uudelleen. Tällöin releen jälleenkytkentätoiminto suorittaa AJK:n 30–60 sekunnin jännitteettömän väliajan jälleen. Mikäli myös AJK epäonnistuu, tulkitsee rele vian pysyväksi. [14, s. 372] Pika- ja aikajälleenkytkennän tapauksessa rele ei tarvitse vasta-aseman releeltä lupaa laukaisuun, joten toiminta-aika koostuu ainoastaan releen havahtumisviiveestä [56].

5.2.2 Johtokatkaisijan toimintaviiveen määrittäminen

Releen lähetettyä laukaisukäskyn johtokatkaisijalle kuluu vielä katkaisijalle ominainen erotusaika, jonka jälkeen vika on erotettu verkosta. Katkaisijavalmistajat ilmoittavat tyyppillisesti katkaisijatyypille ominaisen avautumisajan, joka esimerkiksi Siemensin 3AP2-katkaisijalle on 21 ± 2 ms [59, s. 13] ja ABB:n HPL-katkaisijalle 18 ± 2 ms [60]. Avautumisajalla tarkoitetaan aikaa siitä, kun katkaisijan laukaisukela on saanut jännitteen, kunnes valokaari on syttynyt viimeisenkin vaiheen koskettimien välillä.

Katkaisutapahtumassa virta ei katkea välittömästi katkaisijan koskettimien avauduttua, vaan virtapiiri pysyy suljettuna pienivastuksisen valokaaren välityksellä. Hetkestä, jolloin valokaari syntyy ensimmäisen vaiheen koskettimien välille, alkaa valokaariaika, joka kestää siihen asti, kunnes viimeisenkin vaiheen koskettimet ovat erkaantuneet riittävästi, että valokaari on saatu sammumaan. [59, s. 13] Valokaariaika on riippuvainen vikavirrasta. ABB:n HPL-katkaisijalle valokaariaika on 50 kA:n symmetrisellä vikavirralla (3-vaiheinen oikosulku) 11,5–20 ms ja 20 kA:n vikavirralla 8–17 ms [60]. Valokaari syttyy kuitenkin valokaarikoskettimien välille jo ennen kuin katkaisijan navat ovat täysin avautuneet (kuva 5.3).

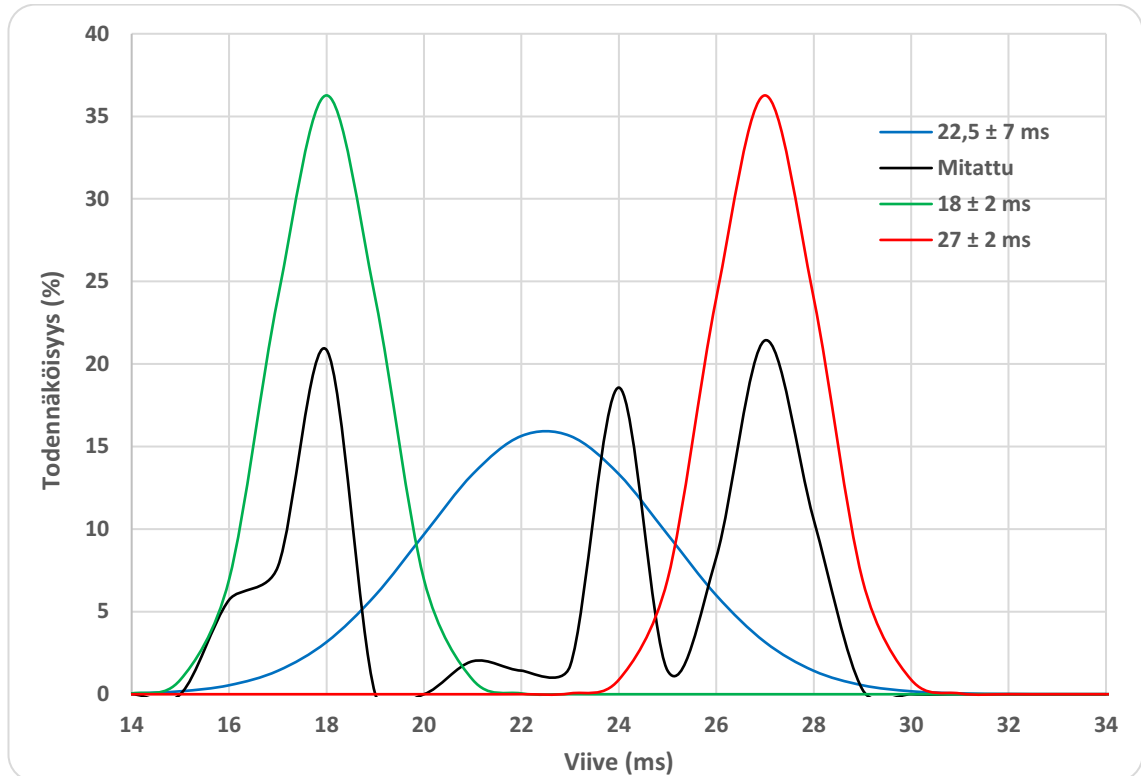


Kuva 5.3 Katkaisijan avautumisen toimintasykli. Muokattu lähteestä [61, s. 165]

Jos oletetaan valokaariajan alkavan vasta, kun valokaari on syttynyt viimeisessäkin navassa, voitaisiin HPL-katkaisijalle erotusajan arvioida olevan välillä 24–40 ms. Käytännössä tämä tarkoittaisi pisimpien valokaariaikojen kohdalla, että virta ei katkeaisi ensimmäisessä nollakohdassaan. Fingridin katkaisija-asiantuntijan [62] arvion mukaan tällainen katkaisutapahtuma esiintyisi maksimissaan 10 %:ssa tapauksista. Tässä työssä oletetaan valokaaren katkeavan aina ensimmäisessä nollakohdassaan. Lisäksi tutkimuksessa oletetaan, ettei katkaisijan katkaisunapojen läpi kulje virtaa ennen kuin valokaari on sammunut napojen välillä, koska valokaari muodostaa virralle pieniresistanssisen kulkutien napojen välille [14, s. 163].

Kantaverkon testattujen 400 kV:n johtokatkaisijoiden mitatut aukeamisajat on haettu Fingridin omaisuudenhallintatietokannasta [5]. Katkaisijoiden mitatut aukeamisviiveet asettuivat välille 15,5–29,5 ms kuvan 5.4 mukaisesti. Lisäksi kuvassa on esitetty todellisten mitattujen avautumisaikojen perusteella tehty normaalijakauma (keskiarvo 22,5 ms ja hajonta 2,5 ms).

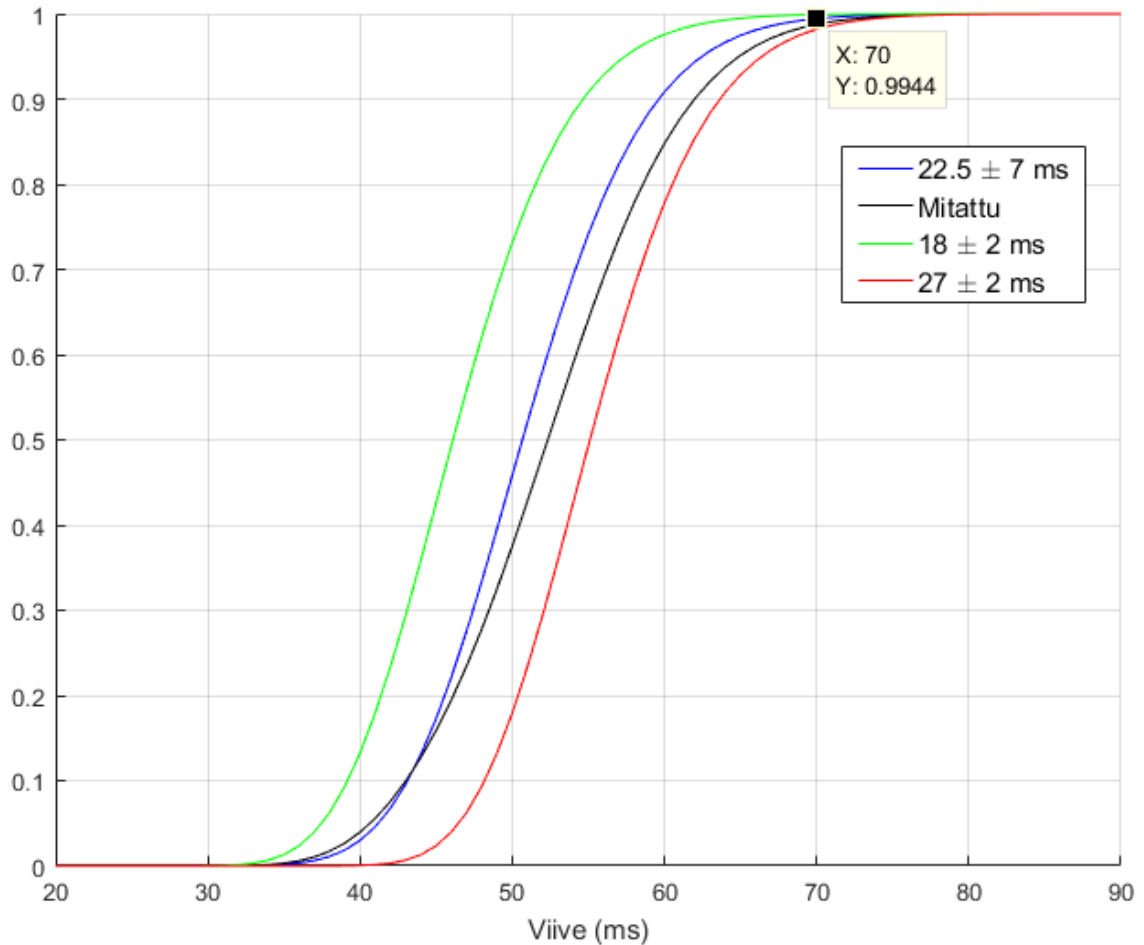
Kuvan 5.4 mitattua johtokatkaisijan aukeamisajakajakaumaa tarkastelemalla havaitaan jakauman sisältä löytyvän kolme jakaumaa. Mittausdatan perusteella havaittiin johtokatkaisijan toiminta-ajan olevan tietyllä katkaisityypillä muutaman millisekunnin tarkkuudella aina sama. Tehtyjen toiminta-aikamittausten mukaan esimerkiksi HGF116/2B-johtokatkaisijan avautumisajan havaittiin olevan välillä 25,1–28,3 ms ja HPL-johtokatkaisijan avautumisajan välillä 17,1–18,4 ms [5]. Mitatun ja normaalijakaumalla mallinnetun johtokatkaisijan aukeamisajakajakauman lisäksi kuvaan 5.4 mallinnettiin HPL-katkaisija normaalijakaumalla, jonka keskiarvo on 18 ms ja hajonta 1,1 ms sekä HGF116/2B-katkaisija normaalijakaumalla, jonka keskiarvo on 27 ms ja hajonta 1,1 ms.



Kuva 5.4 Suomen 400 kV:n verkossa käytössä olevien johtokatkaisijoiden mitatun aukeamisajan ja normaalijakaumalla mallinnetun katkaisijan aukeamisajan tiheysfunktiot. Mitattu toiminta-aikajakauma sisältää kantaverkon 400 kV:n johtokatkaisijat, joille on tehty toiminta-aikamittaukset. $22,5 \pm 7$ ms -jakauma kuvaa koko mittausdatan perusteella mallinnettua jakaumaa, 18 ± 2 ms -jakauma HPL-johtokatkaisijaa ja 27 ± 2 ms -jakauma HGF116/2B-johtokatkaisijaa.

5.2.3 Johtokatkaisijan avautumisajanhetki

Suomen 400 kV:n verkossa vika-aika voidaan määrittää suojareleen havahtumisviiveen, -releiden välisen SVY-viiveen ja johtokatkaisijan aukeamisajan summuna [56]. Vika-ajan pituuden voidaan lukujen 5.2.1 ja 5.2.2 perusteella arvioida olevan keskimäärin noin 50 ms vaihteluvälillä 30,5–79,5 ms. Vika-ajan pituutta voidaan arvioida tarkemmin yhdistämällä kuvissa 5.1 ja 5.4 esitetyt jakaumat johdonsuojareleen, SVY:n ja johtokatkaisijan viiveistä yhdeksi kertymäfunktioksi. Kuvassa 5.5 esitetty vika-ajan kertymäfunktio on esitetty neljällä eri (kuva 5.4) johtokatkaisijan toiminta-aikajakaumalla, koska johtokatkaisijan toiminta-ajan havaittiin riippuvan pitkälti katkaisijatyypistä (luku 5.2.2). Jotta kertymäfunktio on mahdollista muodostaa, on suojareleen havahtumisviive, releiden välinen SVY-viive ja johtokatkaisijan aukeamisaika oletettava toisistaan riippumattomiksi. Toiminta-aikaviiveillä ei lukujen 5.2.1 ja 5.2.2 mukaan ole riippuvuussuhteita, joten oletusta voidaan pitää validina.



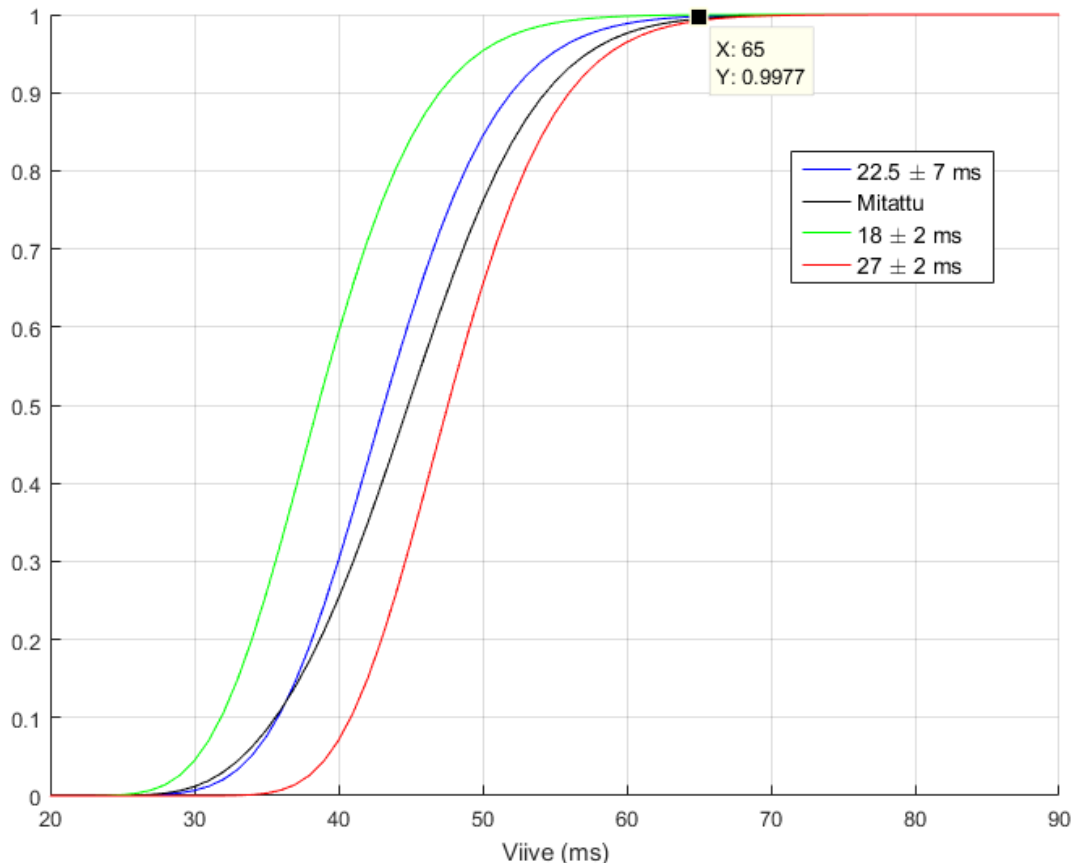
Kuva 5.5 Vika-ajan kumulatiivinen todennäköisyys 400 kV:n kantaverkossa neljällä eri johtokatkaisijan toimintaviiveellä.

Kuvaan 5.5 on merkitty 70 ms:n vika-ajan kertymä tilanteessa, jossa johtokatkaisijan toimintaviiveen on oletettu olevan $22,5 \pm 7$ ms. Kuvan mukaisesti 70 ms:n vika-ajan kumulatiivinen todennäköisyys on noin 99,4 %. Vaikka kertymäfunktio muodostetaan jollain toisella kuvassa 5.4 esitetyllä johtokatkaisijan toiminta-aikajakaumalla ei tällä ole kuvan 5.5 mukaisesti merkittävää vaikutusta 70 ms:n vika-ajan kumulatiiviseen todennäköisyyteen.

Kuten luvussa 3.2.2 esiteltiin, varistorien ulkoisen vian energiakertymä on määritetty nykyisille kantaverkon sarjakondensaattoreille 100 ms:n vika-ajalla. Kyseinen vika-aika ei kuvan 5.5 mukaan vaikuta todennäköiseltä. 70 ms:n vika-ajan voidaan arvioida esittävän vika-aikaa, joka kattaa noin 99 % vikatapauksista. Kun mitoitus tehdään transienttilaskentaohjelmistolla johtokatkaisijoita ohjaamalla, on katkaisijan valokaariaikakin mahdollista huomioida mitoituksessa. Tällöin täytyy tehdä oletus siitä, että virta katkeaa katkaisijan ensimmäisessä nollakohdassa (ks. luku 5.2.2).

PJK:n ja AJK:n vika-aika on luvun 5.2.1 mukaisesti SVY-viiveen verran kuvassa 5.5 esitettyä ulkoisen vian vika-aikaa lyhyempi. Epäonnistuneen PJK:n ja AJK:n vika-ajan ker-

tymäfunctiot on esitetty kuvassa 5.6 neljällä (ks. kuva 5.4) johtokatkaisijan toiminta-aikajakaumalla. Kuvan 5.6 mukaisesti epäonnistuneen PJK:n tai AJK:n 65 ms:n vika-ajan kumulatiivinen todennäköisyys on kantaverkossa noin 99,8 %, kun käytetään johtokatkaisijalle $22,5 \pm 7$ ms:n toiminta-aikajakaumaa. Vaikka kertymäfunctio muodostetaan jollain toisella kuvassa 5.4 esitetyllä johtokatkaisijan toiminta-aikajakaumalla, on 65 ms:n vika-ajan kumulatiivinen todennäköisyys aina yli 99 %. 65 ms:n vika-ajan voidaan siis arvioida esittävän epäonnistuneen PJK:n ja AJK:n vika-aikaa, joka kattaa yli 99 % vikatapauksista.



Kuva 5.6 Epäonnistuneen pikajälleenkytkennän tai aikajälleenkytkennän yhteydessä johtokatkaisijan kumulatiivinen aukeamisaika 400 kV:n kantaverkossa neljällä eri johtokatkaisijan toimintaviiveellä.

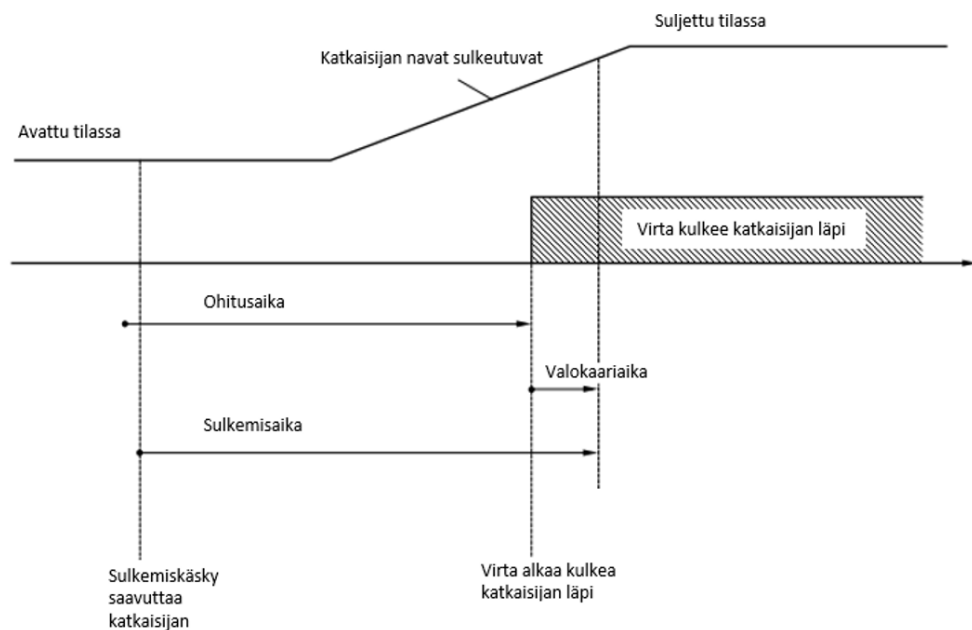
5.3 Sarjakondensaattorin ohituksen koordinointi johtosuojauksen kanssa

Johtokatkaisijan aukeamisajankohdan lisäksi työssä kiinnostava ajanhetki on sarjakondensaattorin ohittumisajankohta. Sarjakondensaattorin ohittuminen tapahtuu suojaus- ja ohjausjärjestelmän tai johdonsuojareleen lähettämän käskyn perusteella kipinävälin tai ohituskatkaisijan toimesta (ks. luku 3.3). Kondensaattorin sisäisen suojauksen havahtumisviive muodostuu sisäisen suojauksen laskentaviiveistä sekä suojauksen sisäisistä tiedonsiirtoviiveistä. Tässä työssä sisäisen suojauksen havahtumisviiveen oletetaan olevan

kipinävälille 1,0 ms ja ohituskatkaisijalle 2,5 ms. Kyseiset viiveet ovat ilmoitettu ABB:n sarjakondensaattorin suojausjärjestelmän toiminnalle (kipinävälän suojauksen havahtumisviive pyöristetty 0,95 millisekunnista 1,0 millisekuntiin) [34, s. 8]. ABB:n järjestelmässä suojausjärjestelmän komennot tuodaan suoraan ristikytkentäkaapin (I/O-rack) piirikortin kautta kipinävälille. Sen sijaan ohituskatkaisijalle suojausjärjestelmän komennot tuodaan CAN-väylän kautta, mikä tuottaa ylimääräisen viiveen. [42]

Kipinävälän toiminta-ajan oletetaan työssä olevan 0,5 ms, joten kipinävälän kokonaistoiminta-ajaksi saadaan noin 1,5 ms [34, s. 8]. Pienivirtaisissa sisäisissä vioissa sarjakondensaattorin ohitus tapahtuu johdonsuojareleeltä tulevan ohituskäskyn perusteella. Tällöin kondensaattorin ohitusaika määräytyy releen havahtumisajan, releiden välisen SVY-viiveen, kipinävälän kokonaistoiminta-ajan (1,5 ms) summana. Jos kondensaattori sijaitsee keskellä johtoa, summautuu ohitusaikaan myös SVY-viive johtosuojaukselta lähtevän signaalin kulkeutumisesta kondensaattorin suojausjärjestelmälle. [56]

Kipinävälittömällä sarjakondensaattorilla kondensaattoriohitus sisäisissä vioissa tapahtuu ohituskatkaisijan avulla. Katkaisijavalmistaja määrittää ohituskatkaisijalle tyypillisesti sulkeutumisaajan, joka esimerkiksi ABB:n valmistamalle Asmuntissa käytetylle LTB1/170/500E1-katkaisijalle (moottorin ohjaimella BLG1002AS) on 21 ms. Asmuntin tyyppitestiraporteissa sulkeutumisaikojaksi on saatu tuloksia väliltä 19,2–20,0 ms. [7, s. 36], [8] Muita Fingridin sarjakondensaattoreilla käytössä olevia ohituskatkaisijoita ovat Hirvisuolla käytössä oleva Siemensin valmistama 3APIF1- sekä Keminmaalla, Uusnivalassa ja Vuolijoenlaaksoilla käytössä oleva ABB:n valmistama HPL-katkaisija 145/420/31A1S. Hirvisuon projektidokumentaatiossa ohituskatkaisijan sulkeutumisaikaksi on määritetty 29 ± 3 ms [63]. Keminmaan, Uusnivalan ja Vuolijoen ohituskatkaisijoille on huoltojen yhteydessä tehty toiminta-aikatestit, joiden tulokset ovat olleet 40 ± 1 ms [5].



Kuva 5.7 Ohituskatkaisijan toimintasykli. Muokattu lähteestä [61, s. 165].

Ohituskatkaisijan sulkeutumisaajan määritellään olevan hetki, jolloin valokaari on sammunut ohituskatkaisijan navassa (kuva 5.7). Käytännössä ohituskatkaisijan läpi kulkee virtaa jo aiemmin koska hetkellä, jolloin valokaari syttyy ohituskatkaisijan katkaisunapojen välissä, alkaa virta kulkea katkaisijan läpi. Sarjakondensaattorin ohittuminen tapahtuu itseasiassa valokaariajan verran aiemmin kuin ohituskatkaisijan valmistajan määrittämä sulkeutumisaika. [61, s. 165] Katkaisijavalmistaja ei kuitenkaan määrittele katkaisijan ohitusaikaa, joten kondensaattoriohituksessa käytettäväksi ohituskatkaisijan viiveeksi käytetään tässä työssä LTB1/170/500E1-katkaisijan 21 ms:n sulkeutumisaikaa. Kun valokaaren oletetaan olevan täysin johtamaton, kasvaa sarjakondensaattorin ohitusaika valokaariajan verran. Oletuksen vaikutuksia työn tuloksiin pohditaan luvuissa 7.1.6 ja 7.2.5.

Kipinävälittömän sarjakondensaattorin ohitusajankohta määräytyy sarjakondensaattorin sisäisen suojausajan toimiessa sisäisen suojausajan havahtumisviiveestä (2,5 ms) ja ohituskatkaisijan toimintaviiveestä (21 ms). Kun ohituskäskyn antaa pienivirtaisissa sisäisissä vioissa johdonsuojarele, määräytyy kondensaattorin ohitusviive releen havahtumisaikaan, releiden välisen SVY-viiveen, sisäisen suojausajan viiveen sekä ohituskatkaisijan toimintaviiveen summana. Lisäksi, kuten kipinävälillisen kondensaattorin kanssa, keskellä johtoa olevan kondensaattorin ohitusaikaan summautuu SVY-viive johtokatkaisijalta lähtevän signaalin kulkeutumisesta kondensaattorin suojausjärjestelmälle. Johtokatkaisijan avautumisajankohdan ja kondensaattoriohituksen erilaisia mahdollisia toimintasekvenssejä on havainnollistettu kuvassa 5.8. Kuvassa esitetyt viiveet on esitelty taulukossa 5.2.

Taulukko 5.2 Työssä käytetyt johtosuojausajan ja kondensaattorin suojausajan viiveet

Viive	Keskiarvo (ms)	Minimi (ms)	Maksimi (ms)
Johdonsuojarele	20 ms	10 ms	40 ms
Releiden välinen SVY	7,5 ms	5 ms	10 ms
Johtokatkaisija	22,5 ms	15,5 ms	29,5 ms
SVY johdonsuojareleeltä sarjakondensaattorille	7,5 ms	5 ms	10 ms
Sarjakondensaattorin suojausajan havahtuminen (ohituskatkaisija)	2,5 ms	-	-
Ohituskatkaisija (sisäinen suojaus)	21 ms	-	-
Kipinäväli (sisäinen suojaus)	1,5 ms	-	-

Kipinävälittömällä (tai kipinävälillisellä jos sytytysvirta ei ole riittävä) sarjakondensaattorilla ohitusajanhetki tapahtuu minimissään 28,5 ms ja maksimissaan 33,5 ms (ks. taulukko 5.2) siitä, kun ulkoinen ohituskäsky lähtee johdonsuojareleeltä. Kipinävälittömän sarjakondensaattorin ohitus pienivirtaisissa sisäisessä viassa tapahtuu siis ulkoisen ohitussignaalin avulla tyypillisesti vasta johtokatkaisijan aukeamishetken jälkeen. Johtokatkaisijan napojen läpi kulkeva virta katkeaa kuitenkin jokaisen vaiheen nollakohdassa, joten joissain tilanteissa kipinävälitön sarjakondensaattori saattaa ulkoisen ohitussignaalin avulla ehtiä ohittua ennen virran katkeamista.

5.4 Palaavan jännitteen rajoitusmenetelmät

Selvästi tehokkain TRV-rajoitusmenetelmä on sarjakondensaattorin ohittaminen selvästi ennen johtokatkaisijan avautumista (ks. kuva 4.5). Kipinävälillisellä sarjakondensaattorilla ohittumisen arvioitiin luvussa 5.3 tapahtuvan selvästi ennen johtokatkaisijan avautumista tilanteissa, joissa kipinävälin sytytysvirta ylittyy. Kipinävälittömällä sarjakondensaattorilla ohitus tapahtuu tyypillisesti vasta johtokatkaisijan aukeamisen jälkeen, jos kondensaattorin sisäinen suojaus ei havaitse vikaa (ks. kuva 5.8).

Sarjakondensaattorin ohittuminen ennen johtokatkaisijoiden toiminta voitaisiin varmistaa sillä, että johtokatkaisija odottaisi ohituskatkaisijalta luvan aukeamiseen. Verkon peruskäyttöperiaatteisiin kuuluu kuitenkin, että vika pyritään poistamaan verkosta mahdollisimman nopeasti [56]. Johtosuojauksen toiminnan tarkoituksellinen hidastaminen saattaa aiheuttaa riskin 400 kV:n verkkoon liittyneiden voimalaitosten ja tehtaiden verkosta puotomiselle (ks. luku 5.2.1). Ylimääräisen siirtoviestiyhteyden luotettavuus tulisi myös saada äärimmäisen hyväksi, koska johtosuojauksen toimimattomuus 400 kV:n verkon viikatilanteessa aiheuttaa verkon stabiiliuden vaarantumisen. [14, s. 343] Sarjakondensaattoreille vika-ajan pidentyminen aiheuttaa suuremman varistorien energiakertymän ulkoisessa viassa. Samalla riski kondensaattorin ohittumiselle ulkoisessa viassa esimerkiksi epäonnistuneen jälleenkytkennän tai johtokeskeytystilanteen vuoksi kasvaa.

Toinen tapa varmistaa sarjakondensaattorin ohittuminen mahdollisimman usein ennen johtokatkaisijoita, on asetella sarjakondensaattorin ylivirtasuojauksen ja energian nousu-nopeussuojauksen asetusarvot mahdollisimman alhaisiksi. Riittävän alhaisilla sisäisen suojauksen asetteluilla sarjakondensaattorin suojaus kattaisi koko sarjakompensoidun voimajohdon. Tällöin sarjakondensaattorin ohittumisia saattaisi kuitenkin tapahtua myös ulkoisissa vioissa virtasuojauksen tai energian nousu-nopeussuojauksen takia.

Kondensaattorihitukseen lisäksi muita palaavan jännitteen rajoituskeinoja ovat:

- 1) Vaimennuspiirin vaimennuksen parantaminen [54]
- 2) Katkaisijan rinnalle asennettava metallioksidivaristori [11], [51]
- 3) Sarjakondensaattorin jako useampaan osaan [51]
- 4) Sarjakondensaattorin kompensointiasteen tai suojaustason laskeminen [10], [12]

Sarjakondensaattorin jakaminen useaan osaan ei ole yleensä kustannustehokas TRV:n rajoitusvaihtoehto. Tutkimuksessa [51] jaettiin 40 % kompensointiasteella olevan johdon kondensaattori kahteen osaan, jolloin TRV:n huippuarvo pieneni noin 8 % ja RRRV noin 17 %. Katkaisijan rinnalle asennettava metallioksidivaristori pienensi tutkimuksessa, kompensointiasteesta riippuen, TRV:n huippuarvoa noin 5–10 % ja RRRV:n maksimia noin 5–20 %, kun katkaisijan suojaustasona käytettiin arvoa 1,85. Rajoitusmenetelmän ongelmana on katkaisijan rinnalle asennettavien varistorien energiakertymä, jonka vuoksi varistorit aiheuttaisivat ylimääräisen kustannuksen.

Jos sarjakondensaattorin ohitus tapahtuu muutaman millisekunnin sisällä johtokatkaisijan aukeamisesta, saattaa sarjakondensaattorin ohittumisesta aiheutuva purkausvirta vaikuttaa TRV:n käyrämuotoon. Sarjakondensaattorin purkausvirtaan vaikuttavat vaimennuspiirin kela ja kondensaattorin kapasitanssi, jotka määrittävät kondensaattorin purkaustaajuuden, kun taas vaimennusvastus määrää purkausvirran vaimenemisnopeuden. Vaimennuspiiri muodostaa kondensaattorin kanssa rinnankytketyn RLC-piirin, jolla on tietty resonanssitaajuus, joka määrytyy vaimennusinduktanssin ja sarjakondensaattorin kapasitanssin perusteella. [49], [64] Vaimennuspiirin vaimennusta parantamalla on mahdollista vaikuttaa TRV:n käyrämuotoon joissain tilanteissa, mutta tutkimuksen [54] mukaan sen vaikutus TRV-riskiin on marginaalinen.

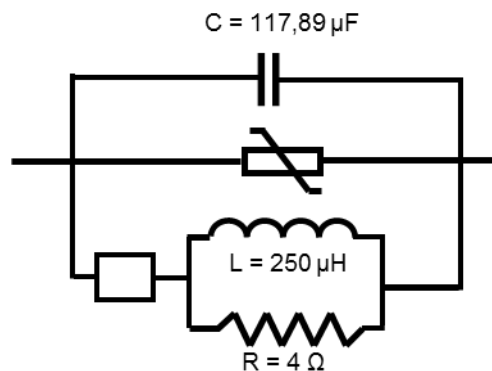
TRV-riskiä voidaan madaltaa myös hankkimalla nykyistä suuremmalla palaavan jännitteen kestoisuudella olevia katkaisijoita sarjakompensoiduille voimajohdoille. Eräs viime vuosina yleistynyt ratkaisu on ollut yhdistää erotin ja katkaisija hankkimalla erottava katkaisija. Erottavissa 420 kV:n katkaisijoissa käytetään usein yhtä IEC-luokkaa suurempia eli 550 kV:n katkaisijakammioita, jonka ansiosta myös niiden palaavan jännitteen kestoisuus on perinteistä 420 kV katkaisijaa suurempi. [14, ss. 168-185] Fingridin omistamien erottavien katkaisijoiden TRV-kestoisuutta ei ole kuitenkaan testattu IEC-62271-100-standardin 550 kV:n nimellisjännitteiselle katkaisijalle vaadittavilla TRV-testeillä [62].

6. TUTKIMUSMENETELMÄT

Kipinävälittömän sarjakondensaattorin toteutukseen liittyvät suurimmat epävarmuudet liittyvät luvun 5.1.2 mukaisesti varistorien energiamitoitukseen ja sarjakompensoiduilla johdoilla sijaitsevien johtokatkaisijoiden TRV-riskiin. Tässä luvussa esitellään työssä käytetyt menetelmät, joiden avulla kipinävälillisen ja kipinävälittömän sarjakondensaattorin varistorien energiamitoitusta sekä johtokatkaisijoiden TRV-riskiä vertaillaan. Muut luvun tutkimusmenetelmät liittyvät varistorien energiamitoituksessa käytettävän ulkoisen vian vika-ajan, jälleenkytkentäsyklin, johtokeskeytysten ja mitoituksessa käytettävän verkkomallin oikosulkutehon aiheuttamien kustannusvaikutusten ja riskien arvioimiseen.

6.1 Komponenttien mallintaminen

Sarjakondensaattorit on työssä mallinnettu transienttilaskentaohjelmisto PSCAD:iin kuvan 6.1 esittämällä tavalla. Kondensaattori on mallinnettu määrittämällä sille vaihekohmainen kapasitanssia kuvaava arvo. Muita sarjakondensaattorin mallinnettuja komponentteja ovat kipinäväli, ohituskatkaisija, varistorit, vaimennusvastus ja vaimennuskela.



Kuva 6.1 UNE- ja UNP-sarjakondensaattorin mallinnustapa

Sarjakondensaattorin kipinäväli ja ohituskatkaisija on mallissa kuvattu ulkoisesti ohjattavalla katkaisijalla. Katkaisija on määritelty olevan ohitussignaaliin asti auki-tilassa ja sulkeutuvan välittömästi ohitussignaalin saatuaan. Kipinävälin ja ohituskatkaisijan valokaari on jätetty tutkimuksissa huomioimatta. Täten kipinäväli ja ohituskatkaisija tulkitaan tutkimuksissa ideaalisiksi laitteiksi, jotka alkavat johtaa äärettömän nopeasti ohitussignaalin saatuaan. Katkaisijan kanssa on kytketty sarjaan vaimennuspiiri, joka koostuu vaimennuskelasta ja vaimennusvastuksesta. Vaimennuskelalle ja -vastukselle määritettiin jokaiselle sarjakondensaattorille induktanssi ja resistanssi.

Sarjakondensaattorin rinnalle liitetyt metallioksidivaristorit on mallissa kuvattu määrittämällä varistoreille suojausjännite ja IV-käyrä. Varistorin IV-käyränä on mallissa käytetty

kaikilla asemilla samaa IV-käyrää, mutta suojausjännite on määritetty jokaiselle sarjakondensaattorille erikseen. Työssä käytetyt sarjakondensaattorien suojausjännitteen ja vaimennuspiirin arvot on esitetty liitteessä C.

Asemien väliset voimajohdot on kuvattu taajuusriippuvalla mallilla. Voimajohdoille on määritetty malliin johtimen tyyppin mukaiset resistanssin ja induktanssin arvot. Myös maadoitusjohtimet, maan resistanssi, vaihejohtimien väliset etäisyydet toisiinsa ja maahan, osajohtimien etäisyydet toisiinsa sekä voimajohtojen väliset keskinäisinduktanssit on määritetty malliin. Lyhimmät alle 5 km:n voimajohto-osuudet mallinnettiin π -sijaiskytkennällä, koska lyhyet taajuusriippuvat voimajohdot rajoittavat simuloinnin aika-askelta ja pidentävät simulointiaikaa.

Johtokatkaisijat on työssä mallinnettu katkaisijalla, jonka resistanssiksi on kiinni-tilassa määritelty olevan $5 \text{ m}\Omega$ ja auki-tilassa $100 \text{ M}\Omega$. Katkaisija on määritelty olevan laukaisusignaaliin asti kiinni-tilassa. Virran kulku katkaisijan napojen läpi katkeaa jokaisen vaiheen nollakohdassa. Johtokatkaisijan valokaaren on täten tutkimuksessa oletettu olevan äärettömän johtava ja virran katkeavan aina ensimmäisessä nollakohdassaan.

Vikavirtaa syöttävät generaattorit kuvattiin työssä Theveninin jännitelähde-ekvivalenteilla, joille on määritetty myötä- ja nollaverkon impedanssiarvot. Samoin osa voimansiirtoverkosta on mallinnettu jännitelähde-ekvivalenteilla. Jännitelähde-ekvivalenttien myötä- ja vastaverkon impedanssiarvot on määritetty iteroimalla niin, että mallin vikavirtatasot vastaavat tehonjako-ohjelmisto PSS/E:n koko verkkoa kuvaavan mallin vikavirtatoja, missä myös generaattorit on kuvattu tarkemmalla mallilla. PSS/E verkkomallin vikavirtatasojen suuruuteen vaikuttaa verkkoon kytkeytyneiden generaattorien lukumäärä ja teho. Kesän minimioikosulkutehotilannetta kuvaava verkkomalli on määritetty tiedosta, mitkä generaattorit ovat liittyneenä verkkoon vuoden 2016 juhannusyönä. Talven maksimioikosulkutehotilannetta kuvaavassa verkkomallissa, verkossa ovat generaattorit, jotka olivat liittyneenä verkkoon vuoden 2017 talven kulutushuipun aikaan. [65]

6.2 PSCAD-malli

Tutkimuksessa käytettiin Fingridin laatimaa Pohjois-Suomen 400 kV:n verkon kuvaavaa PSCAD-mallia. Samaa verkkomallia käytettiin sekä varistorien mitoituseriaatteiden tutkimiseen että TRV-tarkastelussa. Etelä-Suomen siirtoverkko kuvattiin Ulvilaan, Kangasalaan sekä Huutokoskeen liittyvillä jännitelähde-ekvivalenteilla. Vastaavasti suurin osa alempien jännitetasojen verkosta kuvattiin muuntajan taakse kytkeytyvillä ekvivalenteilla. Ruotsin puolella sijaitseva sähkönsiirtoverkko kuvattiin Djuptdjärniin, Svartbyhyn, Letsiin, Messaureen, Liggaan ja Harsprångetiin liittyvillä ekvivalenteilla. Tutkimuksessa käytetty PSCAD-malli on esitetty liitteessä D.

Tutkimuksen ekvivalentit on aseteltu kesän oikosulkutehotilannetta kuvaavaksi, jolloin tilanne vastaa vikavirroiltaan verkossa vallitsevaa minimioikosulkuvirtatilannetta. Työn

tutkimuksiin käytettiin kesän oikosulkutehotilannetta, koska suurin osa vioista tapahtuu kesällä (ks. liite B, taulukko B.2). Toisaalta varistorien mitoitus on tyypillisesti suoritettu verkon maksimioikosulkutehotilanteen mukaisella verkkomallilla. Oikosulkutehon vaikutusta varistorien energiakertymään tarkasteltiin työssä herkkyystarkastelutekijänä. TRV-tarkastelut suoritettiin ainoastaan kesän oikosulkutehohon perustuvalla mallilla.

6.3 Varistorien mitoituseriaatteen

Tässä luvussa esitellään varistorien mitoituseriaatteen sekä kipinävälittömän ja kipinävälillisen sarjakondensaattorin varistorien energiakertymiin liittyvät tutkimusmenetelmät. Kaikki luvussa esitetyt tutkimukset suoritettiin 1phg-, 2ph-, 2phg- ja 3phg-vikatyypeillä paitsi erilaisiin keskeytystilanteisiin keskittyvät tutkimukset, jotka suoritettiin ainoastaan 3phg-vialla, koska 3phg-vikatyypillä energiakertymän havaittiin lähes poikkeuksetta olevan suurin. Vian alkuajanhetkeä varioitiin välillä 3,0–3,008 s. Jokaisessa vikapaikassa viat tehtiin viidellä eri vian alkuhetkellä (POW:lla) 2 ms:n välein.

6.3.1 Vikasekvenssi ja vikapaikat

Lukujen 3.2.2 ja 5.3 mukaisesti kipinävälillisen sarjakondensaattorin energiamitoitusta tutkittaessa voidaan kondensaattorin olettaa ohittuvan sisäisessä viassa viimeistään 1,5 ms vikahetken jälkeen. Kipinävälittömän sarjakondensaattorin ohitushetki riippuu ohituskatkaisijan toiminta-ajasta ja aseman sisäisestä tiedonsiirtoviiveestä. Tähän tutkimukseen on valittu nopeimman markkinoilla olevan ohituskatkaisijan toiminta-ajan (21 ms) ja sarjakondensaattorin sisäisen suojauksen tiedonsiirtoviiveen (2,5 ms) summa 23,5 ms. Ohituskatkaisijan herkkyyttä energiamitoitukseen tutkittiin käyttämällä vertailuna Uusnivalan ja Vuolijoen ohituskatkaisijan mitatun toiminta-ajan (41 ms) ja arvioitun sisäisen suojauksen tiedonsiirtoviiveen (2,5 ms) summaa 43,5 ms (ks. luku 5.3).

Sisäisissä vioissa suurimman energiakertymän oletettiin tapahtuvan aina sarjakondensaattorin terminaaliviassa, koska impedanssi sarjakondensaattorin läpi vikavirtaa syöttävän verkon ja vikapaikan välillä on pienin. Käytännössä tämä tarkoitti kahta vikapaikkaa yhtä sarjakondensaattoria kohden. Kaksiosaisilla sarjakondensaattoriasemilla (Vuolijoki, Uusnivala Läntinen, Hirvisuo ja Keminmaa) vikapaikkoja oli kolme: kondensaattoreiden välissä ja kummankin kondensaattorin johdon puolen terminaalissa. Yhteensä sisäisiä vikapaikkoja oli tutkimuksessa 22 kappaletta (vikapaikat 15–36, ks. liite E).

Sisäisissä vioissa vikaa ei poistettu verkosta vaan kondensaattori ohitettiin nopeammalla ohituskatkaisijalla 23,5 ms tai hitaammalla ohituskatkaisijalla 43,5 ms vikahetken jälkeen. Johtosuojaukselta ei sisäisten vikojen tutkimista varten ollut tarvetta mallintaa, koska sillä ei ole vaikutusta varistorien energiakertymään sisäisessä viassa (ks. kuva 3.4). Kipinävälillisen sarjakondensaattorin sisäisen vian energiakertymä laskettiin nykyisten mi-

toitusperiaatteiden mukaisesti kondensaattorin kokeman vika-ajan (1,5 ms) ja simuloinneissa saadun suurimman energian nousunopeuden tulona (ks. luku 3.2.2). Kipinävälittömillä sarjakondensaattoreilla sisäisen vian energiakertymä määritettiin simuloinneissa saatuna suurimpana mahdollisena todellisena energiakertymänä (ks. luku 5.1.2)

Ulkoisissa vioissa suurimman energiakertymän oletettiin aiheuttavan sarjakondensaattorin vasta-aseman kiskovika. Kiskovika mallinnettiin katkaisijan johdon puolelle katkaisijan terminaaliin, jolloin oli mahdollista huomioida myös johtojen epäonnistuneet jälleenytkennät. Varistorien ulkoisten vikojen energiakertymien laskemiseksi malliin lisättiin 14 vikapaikkaa (vikapaikat 1–14, ks. liite E). Nykyisin energiasuojan ja varistorien mitoituksessa käytetyksi ulkoisen vian vika-ajaksi on määritetty 100 ms, joka ei luvun 5.2.3 mukaan kuvaa katkaisijoiden todellista aukeamisajanhetkeä. Tämän vuoksi tutkimukset suoritetaan 100 ms:n vika-ajan lisäksi myös 70 ms:n vika-ajalla. Vika poistettiin verkosta ohjaamalla johtokatkaisijoita.

Energiakertymän herkkyyttä ohituskatkaisijan ja johtosuojauksen lisäviiveille havainnollistettiin työssä tutkimalla Kivijärven sarjakondensaattorin varistorien energiakertymää etäisyyden funktiona sisäisissä ja ulkoisissa vioissa. Ulkoisissa vioissa johtokatkaisijalle käytettiin 70 ms:n ja 100 ms:n aukeamisviivettä ja ohituskatkaisijalle 23,5 ms:n ja 26 ms:n sulkeutumisviivettä. Ohituskatkaisijan 2,5 ms:n lisäviive valittiin kuvaamaan ylimääräistä kondensaattorin energiasuojan ja ohituskatkaisijan välistä tiedonsiirtoviivettä tai mahdollista ohituskatkaisijan hidastumista.

Tutkimuksessa Pyhänselkä-Kivijärvi (PS–KJ) -voimajohto jaettiin kuvan 6.2 mukaisesti kymmeneen yhtä suureen osaan, jolloin vikoja tehtiin voimajohdolle 20,4 km:n välein. Kivijärvi-Petäjävesi (KJ–PE) -voimajohto puolestaan jaettiin viiteen yhtä suureen osaan, jolloin vikoja tehtiin 19,8 km:n välein. Ulkoisissa vioissa Kivijärven kondensaattorin pohjoiselta vasta-asemalta lähtevä Pyhänselkä–Pikkarala (PS–PR) -voimajohto jaettiin kahteen 9,5 km:n ja eteläiseltä vasta-asemalta lähtevä Petäjävesi–Toivila (PE–TO) -voimajohto neljään 10,175 km:n pituiseen osaan. Voimajohdot valittiin tarkasteluun, koska kyseisillä voimajohdoilla tapahtuvissa vioissa energiakertymien havaittiin pienenevän etäisyyden kasvaessa hitaammin kuin muilla rinnakkaisilla johdoilla. Tehdyllä valinnalla saadaan energiakertymän pienemisestä etäisyyden funktiona konservatiivinen arvio.



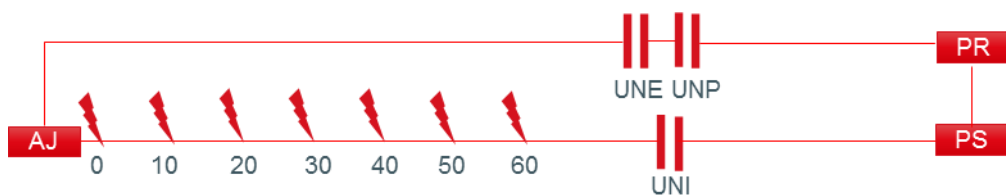
Kuva 6.2 KJ-sarjakondensaattorin energiakertymän tutkimiseen käytetyt vikapaikat

6.3.2 Jälleenkytkentöjen huomioiminen energiamitoituksessa

Epäonnistuneiden jälleenkytkentöjen vaikutusta energiakertymään on havainnollistettu simuloimalla epäonnistunut PJK 65 ms:n vika-ajalla (ks. luku 5.2.3). Epäonnistunutta pikajälleenkytkentää tutkittaessa simuloitiin ensin 70 ms:n ulkoinen vika, jonka jälkeen jännitteenannon antava katkaisija ohjattiin kiinni jännitteettömän väliajan jälkeen ja avattiin jälleen 65 ms:n jälkeen. Jännitteetön väliaika oletettiin simulointiajan lyhentämiseksi tutkimuksessa 300 ms:n suuruiseksi. Epäonnistuneet PJK:t simuloitiin kaikilla voimajohtoilla, joilla sarjakondensaattorin vasta-aseman johtokatkaisija tekee jälleenkytkennän ulkoisessa viassa (vikapaikat 1–7 ja 12, ks. liite E).

Epäonnistuneen aikajälleenkytkennän aiheuttamaa varistorien energiakertymää arvioitaessa simuloiteja ole tarvetta suorittaa. Epäonnistuneen AJK:n aikana syntyvän lisäenergiakertymän voidaan olettaa olevan identtinen epäonnistuneen PJK:n lisäenergiakertymän kanssa (ks. luku 5.2.3). Täten siis epäonnistuneen AJK:n kokonaisenergiakertymää laskiessa simuloitun 70 ms + 65 ms vika-ajan energiakertymään summataan epäonnistuneen PJK:n 65 ms:n aikana syntynyt lisäenergiakertymä.

Jälleenkytkentöjen aiheuttamaa kondensaattoriohituksen riskiä ulkoisessa viassa arvioitiin työssä simuloimalla AJ–UNI-voimajohtolle UNE- ja UNP-sarjakondensaattorin ulkoisia vikoja 0–60 km:n etäisyydelle Alajärven asemasta 10 km:n välein jokaisella vikatyypillä. Tätä varten voimajohto jaettiin Alajärven asemalta katsottuna kuvan 6.3 mukaisesti kuuteen 10 km:n osaan. Koko AJ–UNI-voimajohto on 111,2 km:n pituinen, joten johto jaettiin ainoastaan alkupäästä niin, että loppupään pituudeksi jäi 51,2 km. Johdon loppupäässä sijaitsevien vikojen aiheuttamat energiakertymät eivät aiheuta riskiä kondensaattoriohituksille, minkä vuoksi koko voimajohtoa ei ollut tutkimuksen tavoitteiden kannalta mielekäästä jakaa tasaisesti osiin.



Kuva 6.3 Jälleenkytkentöjen aiheuttaman kondensaattoriohituksen riskin tutkimiseen käytetyt vikapaikat

6.3.3 Keskeytysten huomioiminen energiamitoituksessa

Johtokeskeytysten vaikutusta varistorien energiakertymään havainnollistettiin valitsemalla yksi sarjakondensaattori (Tuomela 2), jolle simuloitiin viisi energiakertymän kannalta pahimmaksi arvioitua keskeytystilannetta neljässä eri ulkoisessa vikapaikassa (vikapaikat 3, 7, 37 ja 38, ks. liite E) sekä sarjakondensaattorin terminaalivioissa (sisäiset

vikapaikat 33 ja 34, ks. liite E). Simuloinnit tehtiin simulointiajan säästämiseksi ainoastaan 3phg-vialla, koska tällä vikatyypillä energiakertymän havaittiin lähes poikkeuksetta olevan suurin. Ulkoiset viat simuloitiin 70 ms:n, jälleenkytkennät 65 ms:n ja sisäiset viat 23,5 ms:n vika-ajalla.

Tuomela 2 päätettiin valita tutkittavaksi keskeytysten osalta, koska verkon silmukointi on runsasta sen eri puolilla. Täten erilaisia keskeytysvaihtoehtoja on useita. Lisäksi kondensaattoriin vaikuttavat Keminmaa B–Keminmaa sekä Pyhänselkä–Pikkarala voimajohtojen jälleenkytkennät. Keskeytystilanteet ja vikapaikat valittiin niin, että kondensaattorin läpi kulkeva vikavirta on mahdollisimman suuri. Kondensaattorin läpi kulkevaa vikavirran suuruutta arvioitiin erilaisissa keskeytystilanteissa simuloimalla PSS/E:llä vikoja muutamia eri vikapaikkoihin. Valitut keskeytystilanteet ja tutkimuksessa käytetyt vikapaikat on esitetty liitteessä E.

6.3.4 Mitoituksessa käytettävän verkkomallin oikosulkuteho

Fingridin nykyisten sarjakondensaattorien varistorit ja suojausfunktiot on lukujen 3.2.2 ja 3.3 mukaisesti mitoitettu käyttämällä talven oikosulkutehoa kuvaavaa mallia, joka kuvaa voimajärjestelmän maksimioikosulkutehotilannetta. Liitteen B mukaisesti suurin osa vikatilanteista tapahtuu kuitenkin kesällä, jolloin verkon oikosulkuteho on talven oikosulkutehoa alhaisempi.

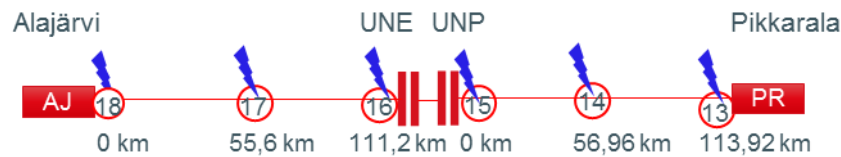
Oikosulkutehon vaikutusta varistorien energiakertymään tutkittiin muokkaamalla kesän oikosulkutehotilannetta kuvaavan PSCAD-mallin jännitelähde-ekvivalentteja vastaamaan talven oikosulkutehoa, mikä kuvaa verkon maksimioikosulkutehotilannetta. Talven oikosulkutehoa kuvaavalla mallilla tehtiin samat ulkoisten vikojen perustarkastelut (vikapaikat 1–14, ks. liite E) ja sisäisten vikojen perustarkastelut (vikapaikat 15–36, ks. liite E) kuin kesän oikosulkutehoa kuvaavalla mallilla. Jälleenkytkentöjä ja johtokeskeytystilanteita ei talven oikosulkutehoa kuvaavalla mallilla tutkittu.

6.4 TRV-tarkastelu

Tässä luvussa esitettyjen TRV-tarkastelujen tavoitteena on selvittää kipinävälittömyyden vaikutus sarjakompensoitujen voimajohtojen johtokatkaisijoiden TRV-riskiin. Kipinävälittömän sarjakondensaattorin aiheuttamalle johtokatkaisijoiden TRV-riskille tehdään herkkyysanalyysit johtokatkaisijan avautumisajan ja ohituskatkaisijan toiminta-ajan suhteen. Lisäksi parannusehdotuksena selvitetään suuremman 550 kV:n johtokatkaisijan vaikutusta sarjakompensoidun verkon TRV-riskiin.

6.4.1 Tutkimuksessa tehdyt valinnat

TRV-tarkastelu suoritettiin Alajärvi–Pikkarala (AJ–PR) voimajohtojen johtokatkaisijoille. Tutkimuksessa voimajohto jaettiin neljään osaan ja vikapaikkoja tehtiin kuusi kappaletta. Vikapaikat sijoitettiin kuvan 6.4 mukaisesti katkaisijoiden lähelle johdon päihin, jaettujen voimajohtojen keskelle ja sarjakondensaattorien johdon puolen terminaaleihin. Vian alkuaikaa vaihdettiin välillä 3,0–3,0095 s. Jokaisessa vikapaikassa viat tehtiin 20 eri vian alkuhetkellä (POW:lla) 0,5 ms:n välein. Tutkittavat katkaisijat olivat Alajärvi–Uusnivala Läntinen (AJ–UNL) ja Pikkarala–Uusnivala (PR–UN). Simulointien aika-askeleeksi valittiin 15 μ s, joka todettiin tutkimuksessa [52] TRV-tarkasteluun soveltuvaksi.



Kuva 6.4 TRV-tutkimuksessa käytetyt vikapaikat

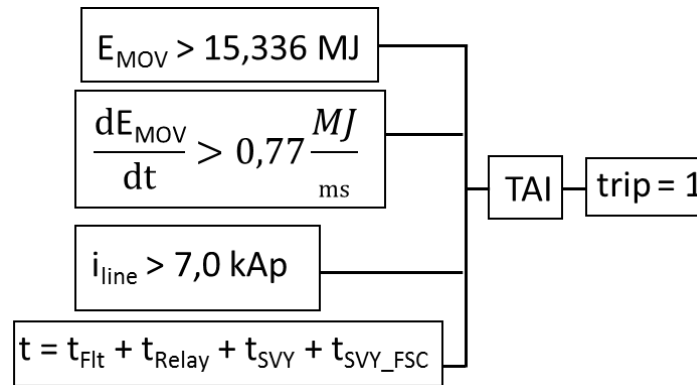
Kyseinen voimajohto valittiin tutkimuksen kohteeksi, koska sarjakondensaattorit (UNE ja UNP) sijaitsevat suunnilleen voimajohtojen keskellä. UNE- ja UNP-sarjakondensaattorien kipinävälit ovat perinteisiä kipinävälisiä, joita suurin osa kantaverkon kipinäväleistä on. Tämän vuoksi kipinävälin kanssa tehtävän TRV-riskin määrittämisen voidaan olettaa esittävän hyvin tyypillistä kantaverkon TRV-riskiä. Lisäksi Uusnivalan sarjakondensaattoreille tehdään lähivuosisuojauks- ja ohjauksjärjestelmäsuojainta, jonka yhteydessä kipinävälin poistaminen on mahdollinen vaihtoehto.

Tutkimukset suoritettiin 1phg-, 2phg-, 2ph- ja 3phg-vikatyypeillä. Tutkimuksessa oletettiin, että 3ph-vikoja ei esiinny 400 kV:n verkossa (ks. liite B), minkä vuoksi se jätettiin tutkimuksen ulkopuolelle. Tutkimuksessa tehtävät riskiarviot perustuvat eri vikatyyppien esiintymistiheyteen Suomen 400 kV:n verkossa vuosien 2000–2017 aikana (ks. liite B).

6.4.2 Sarjakondensaattorin suojausten mallinnus

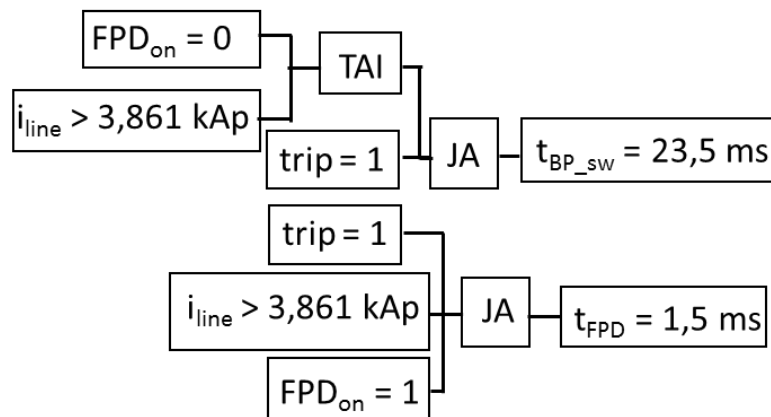
Sarjakondensaattorien suojaus on mallinnettu TRV-tutkimuksessa kuvissa 6.5 ja 6.6 esitetyillä tavoilla. Kondensaattorin sisäisestä suojauksesta on mallinnettu ylivirtasuojauks-, energian nousunopeussuojauks- ja energiasuojauks-. UNE- ja UNP-kondensaattorien ylivirtasuojauks- perustuu linjavirtaan, jonka vuoksi mallissa linjavirran itseisarvoa (i_{line}) verrataan virtasuojauksen asetteluarvoon. Toinen suojausfunktio perustuu energian nousunopeuden itseisarvoon ($\frac{dE_{MOV}}{dt}$), jota verrataan energian nousunopeussuojauksen asetteluarvoon. Kolmas suojausfunktio perustuu varistorien energiakertymään (E_{MOV}), jonka suuruutta verrataan kondensaattorin energiasuojauksen suuruuteen. Kun jokin kondensaattorin suojausfunktioista havahtuu, lähetetään sarjakondensaattorin kaikkien vaiheiden suojalaitteille (ohituskatkaisija tai kipinäväli) ohitussignaali ($trip = 1$).

Sisäisen suojauksen lisäksi malliin on lisätty ulkoinen ohitussignaali, jossa ohituskäskyn ajanhetki (t) on luvun 5.3 mukaisesti mallinnettu vikahetken (t_{Flt}), johdonsuojareleen hahtumisviiveen (t_{Relay}), -releiden välisen SVY-viiveen (t_{SVY}) ja ulkoisen ohitussignaalin SVY-viiveen (t_{SVY_FSC}) summana. Ulkoisen ohitussignaalin SVY-viiveenä on käytetty 5–10 millisekunnin tasaisesti jakautunutta satunnaisviivettä. Jokaisessa tutkimuksessa SVY-viiveenä on käytetty samoja satunnaislukugeneraattorin ensimmäiseen tutkimukseen generoimia viiveitä. Edellä esitetty sarjakondensaattorin suojauksen toimintaperiaate ja UNE- ja UNP-sarjakondensaattoreiden suojausasettelut on esitetty kuvassa 6.5.



Kuva 6.5 UNP- ja UNE-sarjakondensaattorin sisäisen suojauslogiikan ja ulkoisen ohitussignaalin toimintaperiaate

Kuvassa 6.6 on esitetty logiikka, jonka mukaan valitaan, tapahtuuko ohitus kipinävälin vai ohituskatkaisijan avulla. Jos kipinävälillisen sarjakondensaattorin ($FPD_{on} = 1$) linjavirta ylittää kipinävälin sytytysvirran, käytetään mallissa viiveenä kipinävälin viivettä (t_{FPD}). Jos linjavirta ylittää sytytysvirtarajan, pidetään kipinävälin liipaisu sallittu-tilassa 10 ms:n eli yhden virran puolijakson ajan. Jos kipinävälillisen sarjakondensaattorin sytytysvirtaraja ei ylity, käytetään mallissa ohituskatkaisijan viivettä (t_{BP_sw}). Kipinävälittömällä sarjakondensaattorilla ($FPD_{on} = 0$) käytetään aina ohituskatkaisijan viivettä. Kipinävälille käytetään 1,5 ms:n viivettä ja ohituskatkaisijalle 23,5 ms:n viivettä. Tutkimuksessa 5 (ks. luku 6.4.3, taulukko 6.1) ohituskatkaisijalle käytetään 43,5 ms:n viivettä.



Kuva 6.6 UNP- ja UNE-sarjakondensaattorin ohitusviiveen mallintaminen. Ohitussignaali trip on kuvan 6.5 ulostulosignaali.

6.4.3 Johtosuojauksen toimintasekvenssin mallinnus

Johtokatkaisijan avautumishetki määritettiin tutkimuksessa johdonsuojareleen havahtumisviiveen, -releiden välisen SVY-viiveen ja johtokatkaisijan avautumisviiveen summana kuvan 5.8 mukaisesti. Tutkimuksessa viiveet luotiin jokaiselle simulaatiokierrokselle toisistaan riippumattomasti luvussa 5.2 esitettyjen jakaumien mukaisesti. Suojareleen havahtumisviive luotiin Matlabin `gamrnd`-funktiolla, jolla luotiin satunnaisluku gammajakaumasta parametreilla $\alpha = 13,5$ ja $\beta = 1,6$ (ks. luku 5.2.1, kuva 5.1). Releen SVY-viiveen normaalijakautunut satunnaisluku luotiin Matlabin `randn`-funktiolla, jonka parametreina käytettiin odotusarvoa 7,5 ms ja hajontaa 1,2 ms (ks. luku 5.2.1, kuva 5.1). Johtokatkaisijan avautumisviive määritettiin normaalijakautuneena `randn`-funktiolla odotusarvolla 22,5 ms ja hajonnalla 2,5 ms (ks. luku 5.2.2, kuva 5.4). Satunnaislukugeneraattorin luoma releen havahtumisviive rajattiin välille 10–40 ms, releiden välinen SVY-viive välille 5–10 ms ja johtokatkaisijan avautumisviive välille 15,5–29,5 ms.

Vertailu kipinävälillisen (tutkimus 1) ja kipinävälittömän (tutkimus 2) sarjakondensaattorin välillä tehtiin edellä esitetyillä viiveillä niin, että ainoa tutkimusten välillä muuttunut parametri on kipinävälin toiminnan estäminen tutkimuksessa 2. Viiveet generoitiin tutkimuksen 1 alussa, ja samoja satunnaisgeneraattorin luomia viiveitä käytettiin sekä kipinävälillisellä että kipinävälittömällä sarjakondensaattorilla. Kummassakin tutkimuksessa tehtiin yhteensä 480 vikaa eli 80 vikaa yhtä vikapaikkaa kohden, mitkä vastaavat myös tutkimuksissa generoitujen viiveiden lukumäärää.

Johtokatkaisijan aukeamisviiveen todettiin luvussa 5.2.3 olevan riippuvainen katkaisijatyypistä. TRV:n herkkyyttä johtokatkaisijan toiminta-ajalle päätettiin tutkia katkaisijan 16 ms:n (tutkimus 3) ja 25 ms:n (tutkimus 4) avautumisviiveellä. Johtokatkaisijan avautumisviiveille määritettiin lisäksi napakohtainen 0–4 ms:n viive. Ylimääräisen viiveen tarkoituksena oli mallintaa katkaisijan napojen avautumisen lievää eriaikaisuutta. Napakohtainen viive määritettiin `randn`-funktiolla odotusarvolla 2 ms ja hajonnalla 1,1 ms (ks. luku 5.2.2, kuva 5.4). Satunnaislukugeneraattorin luoma napakohtainen viive rajattiin välille 0–4 ms. Tällöin tutkimuksessa 3 keskimääräinen navan aukeamisaika on 18 ms ja 27 ms tutkimuksessa 4. Sarjakondensaattorin oletettiin olevan kipinävälitön.

Toinen TRV-tutkimuksen herkkyytstarkastelu liittyy kipinävälittömän sarjakondensaattorin ohituskatkaisijan toiminta-aikaan. Nykyisin Uusnivalan ja Vuolijoen sarjakondensaattoreilla olevan ohituskatkaisijan toimintanopeudeksi on luvun 5.3 mukaisesti arvioitu noin 43,5 ms, joka valittiin tutkimuksen 5 ohituskatkaisijan sulkeutumisasiiviksi. Tutkimuksen tuloksen perusteella voidaan arvioida tarvetta vaihtaa ohituskatkaisija nopeatoimisempaan, jos suojaus- ja ohjausjärjestelmäusinnan yhteydessä siirrytään kipinävälittömään ratkaisuun. Johtokatkaisijan toiminta-ajaksi valittiin tutkimuksessa 3 käytetty 16 ms:n johtokatkaisijan avautumisviive 0–4 ms:n napakohtaisella lisäviiveellä. Satunnaisgeneraattorilla luodut viiveet pidettiin tutkimuksessa 3, 4 ja 5 samoina.

Tutkimuksessa 6 selvitettiin 550 kV:n johtokatkaisijan vaikutusta kipinävälittömän sarjakondensaattorin sisältämien voimajohtojen johtokatkaisijoiden TRV-riskiin. Tutkimusta 6 varten simulointeja ei ollut tarvetta suorittaa, koska kaikki tutkimuksessa 6 käytetyt viiveet vastasivat tutkimusta 3. Tiivistelmä TRV-tutkimuksessa käytetyistä johtosuojauksen sekä sarjakondensaattorin suojauksen viiveistä on esitetty taulukossa 6.1.

Taulukko 6.1 TRV-tutkimuksissa käytetyt viiveet ja johtokatkaisijan nimellisjännite. Jokaisessa tutkimuksessa tehtiin yhteensä 480 vikaa. Jokaiseen vikaan generoitiin uudet satunnaisviiveet. Suojareleen ja SVY:n viiveet pidettiin kaikissa tutkimuksissa samoina.

Tutkimus	Suojareleen havahtumisviive (ms)	SVY-viive (ms)	Johtokatkaisijan aukeamisviive (ms)	Johtokatkaisijan napakohmainen aukeamisviive (ms)	Kipinävälin toiminta- viive (ms)	Ohituskatkaisijan toiminta- viive (ms)	Johtokatkaisijan nimellisjännite (kV)
1	10–40	5–10	15,5–29,5	0	1,5	23,5	420
2	10–40	5–10	15,5–29,5	0	-	23,5	420
3	10–40	5–10	16	0-4	-	23,5	420
4	10–40	5–10	25	0-4	-	23,5	420
5	10–40	5–10	16	0-4	-	43,5	420
6	10–40	5–10	16	0-4	-	23,5	550

6.4.4 Simulointitulosten käsittely

TRV-tutkimuksessa kiinnostavia parametreja ovat Alajärvi–Uusnivala Läntinen (AJ–UNL) ja Pikkarala–Uusnivala (PR–UN) johtokatkaisijoiden yli vaikuttava TRV-jännite, katkaisijoiden läpi katkaisuhetkellä kulkevan virran tehollisarvo, johtokatkaisijoiden aukeamisajanhetki sekä UNE- ja UNP-sarjakondensaattorien ohitusajankohdat. Sarjakondensaattorin ohitusajankohdan ja johtokatkaisijan aukeamisajanhetken avulla määritetään, onko sarjakondensaattori ohittunut ennen johtokatkaisijan avautumishetkeä. Tiedon avulla voidaan vertailla ohituksen vaikutusta IEC-verhokäyrälytysten lukumäärään ja TRV:n huippuarvoon.

Tutkimuksissa johtokatkaisijoiden aukeamisajanhetken jälkeen TRV-jännitettä tarkkailtiin 100 ms:n ajan. Jos katkaistavan vaiheen virta saavutti nollakohdan tarkkailuajanjaksona, aloitettiin TRV-jännitteen tallentaminen. Jos tarkastelujaksolta saatiin jännitettä tallennettua tarkastelujakson aikana vähintään 10 ms, hyväksyttiin kyseisen navan yli vaikuttava TRV mukaan tarkasteluun. Joissain yksittäisissä tilanteissa navan sulkeutuminen viivästyi vikavirrassa esiintyvän DC-komponentin vuoksi niin, ettei tarkastelujakson pituus riittänyt. Tällöin kyseinen napa hylättiin tarkastelusta. DC-komponentin esiintyminen on todennäköisesti ainoastaan mallinustekninen ongelma, joka luultavasti liittyy kuormien ja asemien puutteelliseen mallintamiseen, joka johtaa järjestelmän heikkoon vaimennukseen [15, s. 53].

Katkaisijan TRV-kestoisuudet on IEC-standardissa luvun 4.3.2 mukaisesti määritelty neljän eri katkaisijan läpi kulkevan vikavirran tehollisarvon (T100, T60, T30 ja T10) suhteen. Katkaisijan vaihevirran tehollisarvon perusteella pääteltiin 4.3.2 on esitetyllä tavalla IEC-verhokäyrä, johon kyseisen vaiheen simuloitua TRV-jännitettä verrattiin. Tutkimuksissa 1–5 simuloitua TRV-jännitettä verrattiin 420 kV:n katkaisijan TRV-kestoisuuteen ja tutkimuksessa 6 jännitettä verrattiin 550 kV:n katkaisijaan.

7. TULOKSET

Tässä luvussa esitellään luvun 6 tutkimusmenetelmillä saadut tulokset. Luvussa 7.1 vertaillaan kipinävälillisen sekä kipinävälittömän sarjakondensaattorin investointikustannuksia ja varistorien energiakertymiä. Lisäksi luvussa vertaillaan erilaisten varistorien mitoitusperiaatteiden vaikutusta varistorien energiakertymään, investointikustannuksiin, kondensaattoriohituksen riskiin ulkoisessa viassa ja varistorien tuhoutumisriskiin. Luvussa käsitellään myös nykyisten sarjakondensaattorien varistorikapasiteetin riittävyttä erilaisilla mitoitusperiaatteilla.

Luvussa 7.2 arvioidaan kantaverkon TRV-riskiä kipinävälittömällä ja kipinävälillisellä ratkaisulla. TRV-riskin herkkyyttä tarkastellaan luvussa erilaisilla johtokatkaisijan ja ohi-tuskatkaisijan toiminta-ajoilla. TRV-riskin rajoituskeinona luvussa tutkitaan nimellisjännitteeltään suuremman johtokatkaisijoiden käyttämistä sarjakompensoidulla siirtoyhteyksillä, jotka sisältävät kipinävälittömän sarjakondensaattorin.

7.1 Varistorien mitoitus

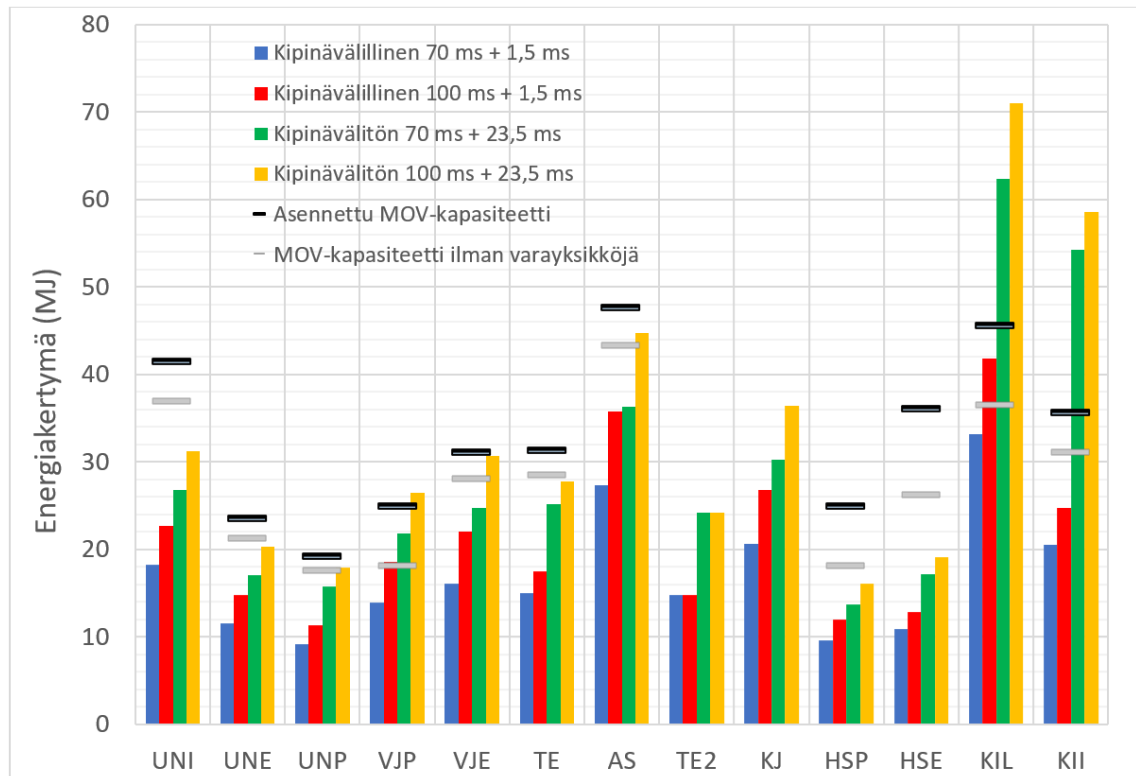
7.1.1 Kipinävälittömyyden vaikutus varistorien energiamitoitukseen ja kustannuksiin

Tässä luvussa tarkastellaan kantaverkon sarjakondensaattorien kipinävälittömyyden vaikutusta varistorien energiakertymään ja kustannuksiin. Kuvassa 7.1 on vertailtu kantaverkon kipinävälittömien (23,5 ms) ja kipinävälillisten (1,5 ms) sarjakondensaattorien varistorien energiakertymää. Vertailuun on lisäksi otettu kaksi erilaista ulkoisen vian vikaaikaa: nykyinen 100 ms:n mitoitusperiaate ja vaihtoehtoinen luvussa 5.2.3 esitelty 70 ms:n mitoitusperiaate.

Kuvassa esitetyt palkit kuvaavat simuloinneissa sarjakondensaattoreille saatuja suurimpia mahdollisia energiakertymiä erilaisilla mitoitusperiaatteilla. Energiamitoituksen periaatteista on kerrottu tarkemmin luvuissa 3.2.2 ja 5.1.2. Kuvaan on myös lisätty tieto nykyisestä asennetusta varistorien energiakapasiteetista ilman varayksikköjä ja varayksikköjen kanssa, minkä avulla voidaan arvioida nykyisen MOV-energiakapasiteetin riittävyttä vuoden 2025-verkkotilanteessa kipinävälittömällä ja kipinävälillisellä ratkaisulla. Varayksikköjen hyödyntämistä energiamitoituksessa on käsitelty luvussa 3.2.2.

Kuvasta havaitaan asennetun varistorien energiakapasiteetin olevan kaikille kipinävälillisille sarjakondensaattoreille riittävä riippumatta valitusta ulkoisen vian mitoitusperiaatteesta, kun huomioon otetaan myös varayksiköt. Kun varistoreihin kertynyttä energiaa verrataan asennettuun energiakapasiteettiin ilman varayksikköjä, huomataan asennetun

kapasiteetin jäävän kipinävälillisen sarjakondensaattorin nykyisellä 100 ms + 1,5 ms mitoitusperiaatteella alamittaiseksi kahdella (KIL ja VJP) sarjakondensaattorilla. Sen sijaan kipinävälillisille sarjakondensaattoreille vaihtoehtoisella 70 ms + 1,5 ms mitoitusperiaatteella kaikkien kantaverkon sarjakondensaattoreiden energiamitoitus on käytetyllä verkkomallilla riittävä ilman varayksiköitäkin.



Kuva 7.1 Kipinävälillisen (1,5 ms) ja kipinävälittömän (23,5 ms) sarjakondensaattorin varistorien energiamitoitusten vertailu kahdella eri ulkoisen vian vika-ajalla (100 ms ja 70 ms). Vertailuna on esitetty nykyisten sarjakondensaattoreiden asennettu MOV-energiakapasiteetti varayksikköjen kanssa ja ilman varayksiköjä. Suunnitteilla oleville sarjakondensaattoreille (TE2 ja KJ) ei varistorikapasiteettia ole päätetty.

Kun tutkitaan kipinävälittömien sarjakondensaattoreiden energiakertymiä, havaitaan nykyisen asennetun kapasiteetin, varayksikköjen kanssa, riittävän kattamaan 70 ms + 23,5 ms mitoitusperiaatteen vaatiman energiamäärän yhdeksällä (muut paitsi KII ja KIL) kantaverkon yhdestätoista nykyisestä sarjakondensaattorista. Ilman varayksiköitä asennettu kapasiteetti on 70 ms + 23,5 ms mitoitusperiaatteella kahdeksalle (muut paitsi KII, KIL ja VJP) kantaverkon nykyisestä sarjakondensaattorista riittävä. 100 ms + 23,5 ms mitoitusperiaatteella varayksikköjen kanssa mitoitus olisi riittävä kahdeksalle (muut paitsi KII, KIL ja VJP) ja ilman varayksiköjä viidelle (muut paitsi KII, KIL, VJP, VJE, AS ja UNP).

Eriyksen kiinnostava tieto nykyisen energiamitoituksen riittävydestä on Asmuntin ja Tuomelan sarjakondensaattoreille, koska asemille asennetuilla CapThor-kipinäväleillä on ollut runsaasti luotettavuusongelmia, joita on käsitelty tarkemmin luvussa 4.1. Lisäksi

asemille on asennettu tutkimuksessa käytetty nopeatoiminen ohituskatkaisija. Tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella Asmuntin ja Tuomelan sarjakondensaattoreita voidaan varistorien energiakapasiteetin puolesta käyttää turvallisesti myös ilman CapThor-kipinäväliä riippumatta käytettävästä ulkoisen vian vika-ajan mitoitusperiaatteesta. Poistettaessa kipinäväli on energiasuojan asettelu kuitenkin aina syytä tarkistaa. Energiasuojan asettelun tulee olla sellainen, että varistorien energiakapasiteetti on riittävä kestämiään pahimman sisäisen vian energiasuojan toiminnan jälkeen (ks. luku 3.3). Muiden sarjakondensaattorien käyttäminen kipinävälittömästi vaatii ohituskatkaisijan vaihtamisen nopeatoimisempaan tai sisäisen vian energiakertymän määrittämisen kondensaattorilla käytössä olevan ohituskatkaisijan toiminta-ajalla.

Kun vertaillaan taulukossa 7.1 esitettyjä kipinävälittömien ja kipinävälillisten sarjakondensaattoreiden varistorien energiakertymiä, havaitaan vaadittavan lisäenergiämäärän vaihtelevan suuresti. Pienimmillään energiakertymän ero on HSP-sarjakondensaattorilla, jolla kipinävälitön ratkaisu tarvitsisi noin 4,1 MJ enemmän varistoreja kuin kipinävälillisen ratkaisu. Suurimmillaan ero olisi KII-kondensaattorilla noin 33,8 MJ. Keminmaalla kipinävälittömien ja kipinävälillisten sarjakondensaattoreiden energiakertymien erot ovat selvästi muiden sarjakondensaattoreiden energiakertymien eroa suuremmat. Keminmaan kondensaattorit ovat, toisin kuin kaikki muut kantaverkon sarjakondensaattorit, sijoitettu johdon päähän asemalle, jolta on kolme 400 kV:n johtolähtöä. Keminmaan kummankin kondensaattorin läpi on vikatilanteessa kaksi 400 kV:n vikavirran syöttösuuntaa, mikä aiheuttaa suuren kondensaattorin läpi kulkevan vikavirran ja varistorien energiakertymän.

Kipinävälittömyyden kannalta mielenkiintoisimpia ovat Uusnivalan, Vuolijoen, Tuomela 2:n ja Kivijärven sarjakondensaattorit, joihin päätös mahdollisesta kipinävälittömyydestä on tehtävä lähivuosina. Uusnivalan ja Vuolijoen kondensaattoreilla kipinävälillisen ja kipinävälittömän sarjakondensaattorin vaikutus varistorien energiमितoitukseen on noin 5,5–8,6 MJ. Kun varistorien hinnaksi arvioidaan 2000–4000 €/MJ (ks. luku 3.2.2), saadaan kipinävälittömän ja kipinävälillisen sarjakondensaattorin varistorien kustannuseroksi Uusnivalan ja Vuolijoen kondensaattoreille taulukon 7.1 mukaisesti noin 33 000–103 000 €. TE2-kondensaattorille ero energiमितoituksessa on noin 9,4 MJ ja Kivijärven kondensaattorille noin 9,6 MJ, joten kipinävälittömyys aiheuttaa TE2- ja KJ-kondensaattoreille noin 56–115 t€:n varistorien investointikustannusten kasvun.

Uutta sarjakondensaattoria rakennettaessa kipinävälikomponenttien hinnaksi on työssä arvioitu noin 150–250 t€ (ks. luku 5.1.1). Kun taulukon 7.1 hintoja verrataan kipinävälikomponenttien hintaan havaitaan, että täysin uutta sarjakondensaattoria rakennettaessa kipinävälin hinnalla saadaan rahoitettua tarvittava varistorien lisäys kaikilla johdon keskelle sijoitetuilla sarjakondensaattoreilla. Suunnitteilla oleville uusille KJ- ja TE2-sarjakondensaattoreille kipinävälitön sarjakondensaattori on investointikustannusten näkökulmasta noin 35–194 t€ kipinävälillistä sarjakondensaattoria edullisempi. Johdon päähän

asemalle sijoitetuille KII- ja KIL-sarjakondensaattoreille kipinävälin kannattavuus investointikustannusten kannalta riippuu tarkoista valmistaja- ja projektkohtaisista varistorien hinnoista ja kipinävälittömyydestä saatavista säästöistä. Jos varistorien hinnaksi oletetaan 3000 €/MJ ja kipinävälittömyydellä saavutettaviksi säästöiksi 200 000 €, on kipinävälinen ratkaisu investointikustannuksiltaan KII-sarjakondensaattorilla noin 104 t€ ja KIL-sarjakondensaattorilla noin 63 t€ halvempi.

Taulukko 7.1 Kipinävälittömyyden ja ohituskatkaisijan toimintanopeuden vaikutus varistorien vaihekohtaiseen energiakertymään ja kolmen vaiheen yhteenlaskettuun hintaan. Varistorien hinnaksi on arvioitu 2000–4000 €/MJ.

	Kipinävälittömyyden vaikutus varistorien energiamotoitukseen ja hintaan				Ohituskatkaisijan toimintaviiveen vaikutus varistorien energiamotoitukseen ja hintaan			
	Energia-kertymä 23,5 ms (MJ)	Energia-kertymä 1,5 ms (MJ)	Energiaker-tymien erotus (MJ)	Hintaero (t€)	Energia-kertymä 43,5 ms (MJ)	Energia-kertymä 23,5 ms (MJ)	Energiaker-tymien erotus (MJ)	Hintaero (t€)
UNI	11,91	3,42	8,49	51-102	29,08	11,91	17,17	103-206
UNE	7,51	1,97	5,54	33-67	18,15	7,51	10,64	64-128
UNP	8,37	1,79	6,58	39-79	15,54	8,37	7,17	43-86
VJP	9,73	1,87	7,86	47-94	17,96	9,73	8,23	49-99
VJE	9,51	0,91	8,60	52-103	21,54	9,51	12,03	72-144
TE	13,80	3,59	10,21	61-123	31,00	13,80	17,20	103-206
AS	12,68	3,72	8,96	54-108	28,48	12,68	15,80	95-190
TE2	19,10	9,75	9,35	56-112	59,22	19,10	40,12	241-481
KJ	12,81	3,24	9,57	57-115	29,25	12,81	16,44	99-197
HSP	5,47	1,39	4,08	24-49	11,30	5,47	5,83	35-70
HSE	8,50	2,19	6,31	38-76	18,01	8,50	9,51	57-114
KIL	37,98	8,77	29,21	175-351	92,87	37,98	54,89	329-659
KII	42,59	8,82	33,77	203-405	99,88	42,59	57,29	344-687

Suojaus- ja ohjausjärjestelmäusintojen yhteydessä kipinävälin poistaminen ei tuo investointisäästöjä, joilla katettaisiin kipinävälittömyyden vaatima varistorien lisääminen, koska suojausuusinnassa ei tavallisesti uusita kipinäväliä. Toisaalta varistoreja ei ole suojausuusinnassa pakko uusida, mikäli varistorien kunto on hyvä ja energiakapasiteetti riittävä myös kipinävälittömälle ratkaisulle. Huomioitavaa on kuitenkin, että esimerkiksi Vuolijoen ja Uusnivalan sarjakondensaattoreiden suojausuusinnassa täytyy mahdollisesti uusida myös ohituskatkaisijat, jos suojausuusintojen yhteydessä poistetaan kipinäväli. Nykyisten ohituskatkaisijoiden kokonaistoiminta-ajaksi voidaan arvioida noin 43,5 ms (ks. luku 5.3). Nopeimpien ohituskatkaisijoiden kokonaistoiminta-aika on noin 23,5 ms.

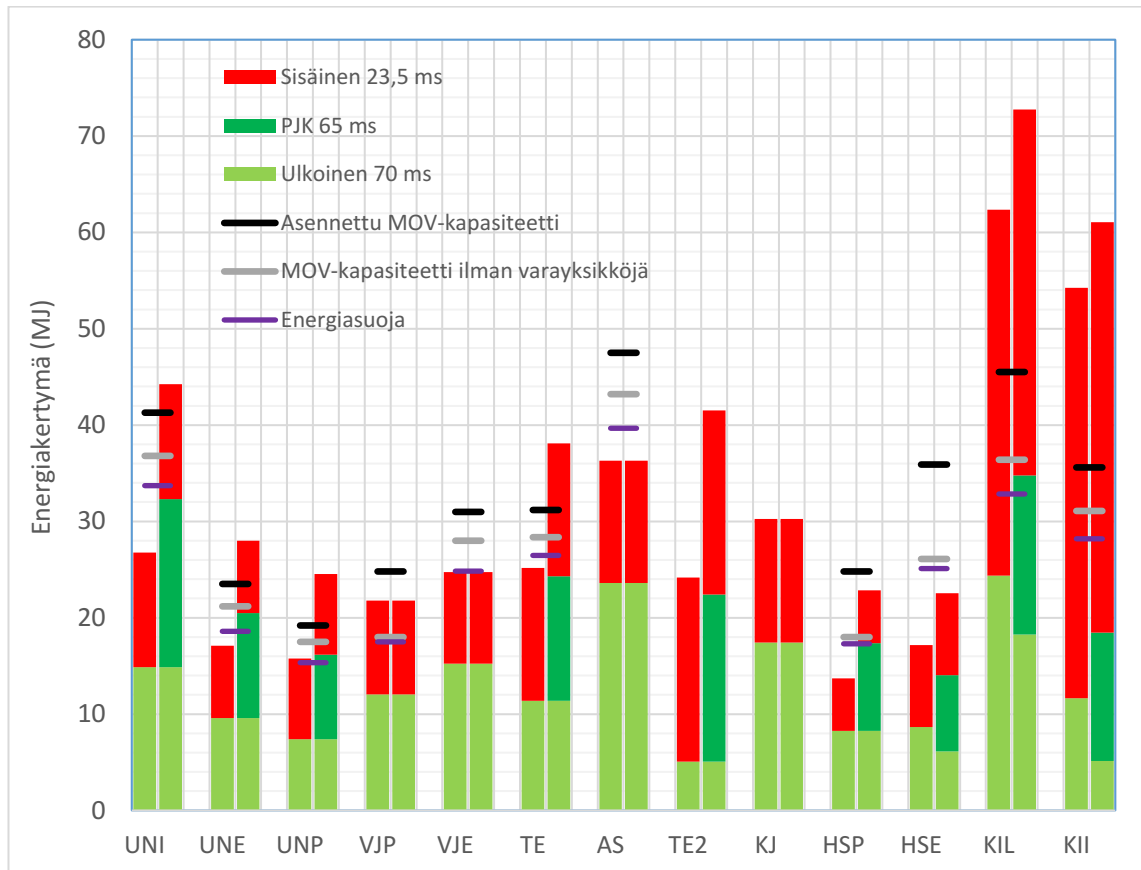
Taulukossa 7.1 on vertailtu ohituskatkaisijan toiminta-ajan vaikutusta varistorien energiakertymään ja hintaan. Uusnivalan ja Vuolijoen sarjakondensaattoreilla hitaamman ohituskatkaisijan aiheuttaman lisähinnan voidaan arvioida olevan noin 43–206 t€. Ohituskatkaisijan uusimisen hinnan voidaan arvioida olevan noin 100–150 t€ [62]. Kipinävälittömään ratkaisuun siirryttäessä ohituskatkaisijan uusimista nopeatoimisempaan ei siis investointikustannusten näkökulmasta voida kaikille kondensaattoreille suositella, mutta ohituskatkaisijan toimintanopeus saattaa vaikuttaa myös johtokatkaisijoiden TRV-riskiin sarjakompensoidussa verkossa (ks. luku 4.3.3). Tähän kysymykseen palataan myöhemmin TRV-tarkastelun yhteydessä luvussa 7.2.3.

7.1.2 Energiamitoitukseen käytettävän ulkoisen vian vika-ajan ja epäonnistuneiden jälleenkytkentöjen vaikutus energiamitoitukseen ja kustannuksiin

Kipinävälittömyyden lisäksi varistorien energiakertymään vaikuttavat muun muassa energiamitoituksessa käytettävä ulkoisen vian vika-aika ja jälleenkytkentäsykli, jotka kondensaattorin tulisi kestää ulkoisessa viassa ohittumatta. Nykyisten kantaverkon sarjakondensaattorien energiasuoja ja varistorit on mitoitettu lukujen 3.2.2 ja 3.3 mukaisesti 100 ms:n ulkoisen vian vika-ajalla huomioimatta epäonnistuneita jälleenkytkentöjä.

Epäonnistuneen PJK:n vaikutusta varistorien energiakertymään on havainnollistettu kuvassa 7.2. Kuvassa on jokaisen sarjakondensaattorin vasemmassa palkissa esitetty energiakertymän kannalta pahin ulkoinen vika 70 ms:n vika-ajalla, kun oletetaan, että vika poistuu pikajälleenkytkennällä. Oikeassa palkissa on esitetty energiakertymän kannalta pahin vika, kun oletetaan, että kondensaattori kokee ulkoisen vian perään myös epäonnistuneen PJK:n, jonka vika-aika on 65 ms. Kummassakin tapauksessa oletetaan, että pian ulkoisen vian jälkeen tapahtuu energiakertymän kannalta pahin sisäinen vika. Sarjakondensaattorin oletetaan olevan kipinävälitön. Vertailuna on esitetty nykyisten sarjakondensaattoreiden asennettu MOV-energiakapasiteetti ilman varayksikköjä ja varayksikköjen kanssa sekä energiasuojauksen asetusarvo.

Kuvasta 7.2 havaitaan epäonnistuneen PJK:n vaikutuksen energiakertymään olevan lähes jokaisella sarjakondensaattorilla merkittävä. Kaikilla sarjakondensaattoreille epäonnistunut PJK ei aiheuta energiakertymää, koska kondensaattorin vasta-asemien jälleenkytkennän jännitteenannon suunta on valittu niin, ettei jälleenkytkennän aiheuttama vikavirta kulje kondensaattorin läpi. Toisaalta esimerkiksi VJP- ja VJE-sarjakondensaattoreille PS–PR-voimajohdon epäonnistuneen PJK:n aiheuttama vikavirta kulkee sarjakondensaattorin läpi (ks. liite E, vikapaikka 3), vaikkei tätä kuvasta 7.2 voi havaita. Syynä on, että vikapaikan 13 (ks. liite E) vika aiheuttaa ilman epäonnistunutta PJK:ta suuremman energiakertymän kuin vikapaikka 3 epäonnistuneen PJK:n kanssa. Pohjois-Suomen verkossa on Etelä-Suomea enemmän vikavirtaa syöttäviä generaattoreita, minkä vuoksi vikapaikan 3 epäonnistunut PJK ei vaikuta varistorien mitoitukseen.



Kuva 7.2 Kantaverkon sarjakondensaattorien varistorien energiakertymät jaoteltuna sisäisen (23,5 ms) ja ulkoisen vian (70 ms) sekä epäonnistuneen PJK:n (65 ms) aiheuttamaan energiakertymään. Vertailuna on esitetty nykyisten sarjakondensaattoreiden asennettu MOV-energiakapasiteetti varayksikköjen kanssa ja ilman varayksikköjä sekä energiasuojan asetteluarvo. Suunnitteilla oleville sarjakondensaattoreille (TE2 ja KJ) ei varistorikapasiteettia tai energiasuojan asetteluarvoa ole päätetty.

Jos sarjakondensaattorin mitoituksessa huomioidaan ulkoisen vian lisäksi epäonnistunut PJK, tulee energiasuojan olla aseteltuna kuvassa tumman vihreän ”PJK 65 ms”-palkin yläpuolelle. Vaatimus toteutuu seitsemällä (UNI, VJP, VJE, TE, AS, HSE ja KII) kantaverkon yhdestätoista nykyisestä sarjakondensaattorista. Lopuilla sarjakondensaattoreilla epäonnistunut PJK aiheuttaa riskin kondensaattorin ohittumiselle ulkoisessa viassa.

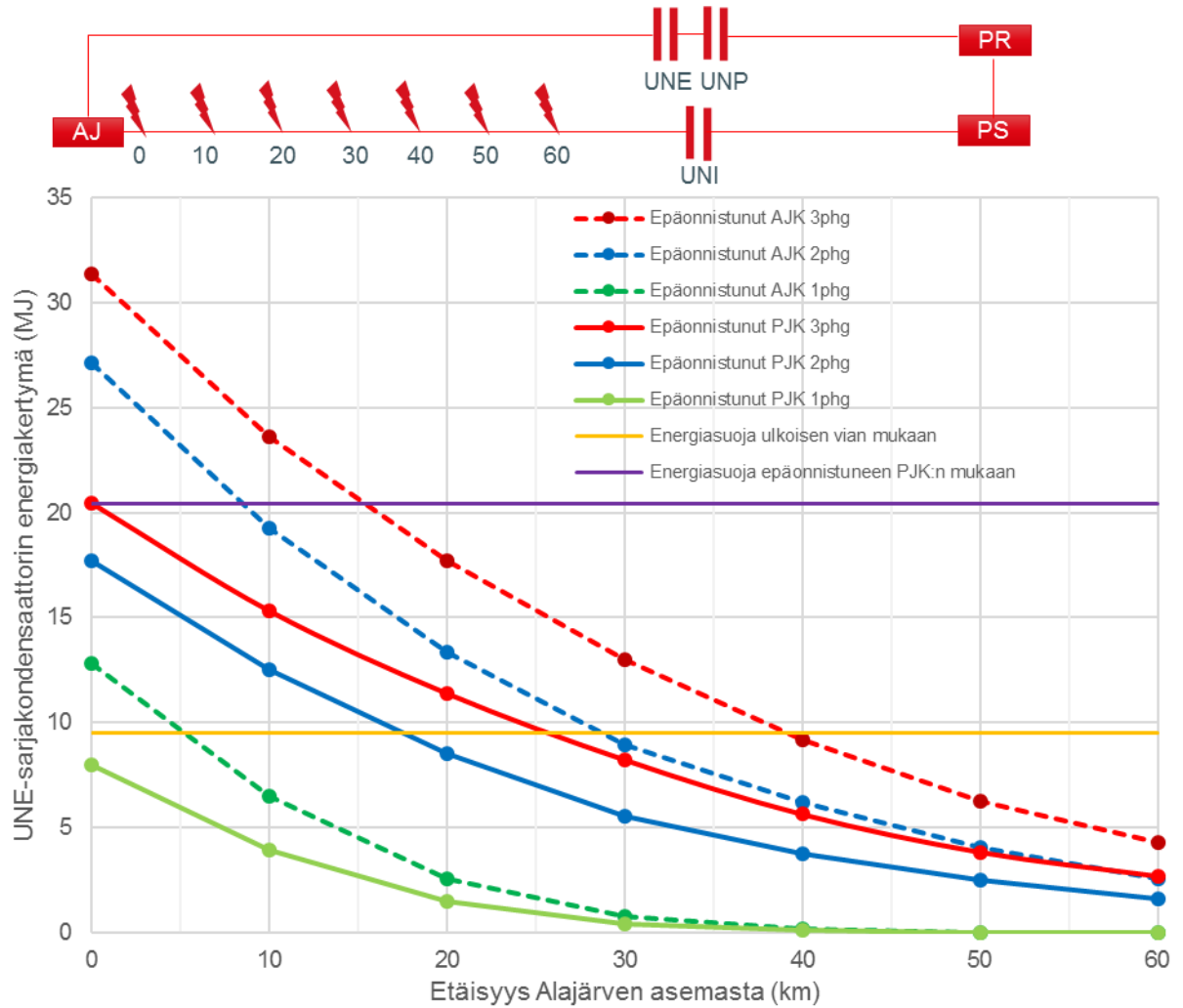
Taulukossa 7.2 on esitetty ulkoisen vian valitun vika-ajan (100 ms tai 70 ms) ja epäonnistuneen PJK:n vaikutus varistorien energiakertymään ja hintaan. Keskimäärin epäonnistuneen PJK:n vaikutus kantaverkon sarjakondensaattorin varistorien energiakertymään on noin 7,6 MJ, jolloin keskimäärin epäonnistuneen PJK:n huomioimisen hinnaksi muodostuisi kolmelle vaiheelle yhteensä noin 46–91 t€. Kaikkien kantaverkon sarjakondensaattoreiden varistorien mitoitusperiaatteen vaihtamisen yhteishinnaksi saadaan noin 0,59–1,19 M€. Toisaalta nykyinen varistorien 100 ms:n ulkoisen vian mitoitusperiaatteen vaihtaminen 70 millisekuntiin kompensoisi osan epäonnistuneen PJK:n huomioimisen lisähinnasta. Kantaverkon sarjakondensaattorien mitoitusperiaatteen vaihtaminen

100 ms:sta 70 ms:iin pienstäisi varistorien energiakertymiä keskimäärin 4,2 MJ. Varistorien investointikustannuksissa säästöä syntyisi keskimäärin 25–50 t€. Yhteensä koko sarjakompensoidulle kantaverkolle varistorien mitoitusperiaatteen vaihtaminen 70 ms:sta 100 ms:iin säästäisi noin 326–652 t€.

Taulukko 7.2 Energiamitoituksessa käytettävä ulkoisen vian vika-ajan (100 ms tai 70 ms) ja epäonnistuneen PJK:n (65 ms) vaikutus varistorien vaihekohtaiseen energiakertymään ja kolmen vaiheen yhteenlaskettuun hintaan.

	Ulkoisen vian toimintasekvenssin määrittelyn vaikutus varistorien energiamitoitukseen ja hintaan				Pikajälleenkytkennän vaikutus varistorien energiamitoitukseen ja hintaan			
	Energiakertymä 100 ms (MJ)	Energiakertymä 70 ms (MJ)	Energiakertymien erotus (MJ)	Hintaero (t€)	Energiakertymä 70 + 65 ms (MJ)	Energiakertymä 70 ms (MJ)	Epäonnistuneen PJK:n aikana kertyvä energia (MJ)	Hintaero (t€)
UNI	19,27	14,85	4,42	27-53	32,32	14,85	17,47	105-210
UNE	12,82	9,58	3,24	19-39	20,50	9,58	10,92	65-131
UNP	9,53	7,40	2,14	13-26	16,18	7,40	8,78	53-105
VJP	16,70	12,04	4,65	28-56	12,04	12,04	0	0
VJE	21,12	15,24	5,89	35-71	15,24	15,24	0	0
TE	13,94	11,38	2,56	15-31	24,30	11,38	12,92	78-155
AS	32,10	23,61	8,49	51-102	23,61	23,61	0	0
TE2	5,07	5,07	0,00	0	22,41	5,07	0	104-208
KJ	23,60	17,43	6,17	37-74	17,43	17,43	0	0
HSP	10,59	8,66	1,93	11-23	17,36	8,66	8,70	52-104
HSE	10,61	8,66	1,95	11-23	14,05	8,66	5,39	32-65
KIL	33,06	24,38	8,69	52-104	34,77	24,38	10,39	62-125
KII	15,97	11,66	4,31	26-51	18,47	11,66	6,81	41-82

Koska jälleenkytkentöjen huomioiminen energiasuojan ja varistorien mitoituksessa havaittiin aiheuttavan merkittävän kustannuslisän, selvitettiin työssä, kuinka suuri on jälleenkytkennän aiheuttama kondensaattoriohituksen riski ulkoisessa viassa. Tätä varten simuloitiin AJ–UNI-voimajohdolle vikoja 0–60 km:n etäisyydelle Alajärven asemasta 10 km:n välein (ks. luku 6.3.2). Tuloksena saatiin UNE-sarjakondensaattorin varistorien energiakertymät jokaisella vikatyypillä eri vikapaikoissa epäonnistuneen PJK:n ja epäonnistuneen AJK:n kanssa (kuva 7.3). 2ph-vikojen energiakertymiä ei ole kuvassa esitetty, koska energiakertymien havaittiin olevan lähes identtiset 2phg-vikojen energiakertymien kanssa.



Kuva 7.3 UNE-sarjakondensaattorin varistorien energiakertymät vikapaikan suhteen erilaisilla jälleenkytkentäsykleillä, kun AJ–UNI-voimajohtolla tapahtuu UNE-sarjakondensaattorin kannalta ulkoinen vika. Ulkoisen vian vika-ajaksi oletetaan 70 ms ja PJK:n sekä AJK:n vika-ajaksi 65 ms.

Jos UNE-sarjakondensaattorin energiasuojan asetteluarvo asetellaan ilman marginaalia Fingridin nykyisten mitoitusperiaatteiden mukaisesti suurimman energiakertymän synnyttävän ulkoisen vian mukaan, saadaan energiasuojan asetteluarvoksi 9,51 MJ. Kun verrataan kuvaan piirrettyjen erilaisten jälleenkytkentäsykliä aiheuttamia UNE-sarjakondensaattorin varistorien energiakertymiä energiasuojan asetteluarvoon (oranssi vaakasuora viiva), voidaan leikkauspisteestä päätellä ohittumisen riskialue (taulukko 7.3). Tietyn vikatyypin aiheuttama ohituksen todennäköisyys vuoden aikana P_{1phg} voidaan laskea esimerkiksi 1phg-vialle kaavan

$$P_{1phg} = \frac{f_{1phg-Ohi_AJK}}{100 \text{ km}} * l_{1phg-PJK} + \frac{f_{1phg-pysyvä}}{100 \text{ km}} * l_{1phg-AJK}$$

mukaisesti, missä $l_{1phg-PJK}$ on epäonnistuneen PJK:n riskialue ja $l_{1phg-AJK}$ epäonnistuneen AJK:n riskialue 1phg-viassa. $f_{1phg-Ohi_AJK}$ on esitetty liitteen B taulukossa B.2 esitetty ”Johtoviat vuodessa/100 km: Ohi AJK:lla”-sarakeessa ja $f_{1phg-pysyvä}$ ”pysyvät johtoviat

vuodessa/100 km²-saraketta. Kun vastaavat laskelmat tehdään muillekin vikatyypeille ja summataan yhteen, saadaan taulukossa 7.3 esitetty kokonaistodennäköisyys UNE-sarjakondensaattorin arvioidulle ohittumisriskille ulkoisessa viassa epäonnistuneen jälleenkytkennän seurauksena. Ohituksen esiintymisväli (vuotta) saadaan ohittumisriskin käänteislukuna.

Taulukko 7.3 UNE-sarjakondensaattorin ohittumisen riskialue ja ohittumistodennäköisyys ulkoisessa viassa epäonnistuneiden jälleenkytkentöjen seurauksena, kun energiasuoja on aseteltu pahimman ulkoisen vian energiakertymän mukaan.

Vika-tyyppi	Epäonnistunut PJK: kondensaattoriohituksen riskialue (km)	Epäonnistunut AJK: kondensaattoriohituksen riskialue (km)	Ohituksen todennäköisyys vuoden aikana (%)	Ohituksen esiintymisväli (vuotta)
1phg	0	5	0,050	1285
2ph	18	29	0,012	857
2phg	18	29	0,224	446
3phg	25	39	0,083	1205
Yhteensä	25	39	0,502	199

Taulukosta havaitaan UNE-sarjakondensaattorin ohittumisen tapahtuvan ulkoisessa viassa epäonnistuneen jälleenkytkennän seurauksena noin 200 vuoden välein, kun energiasuoja on aseteltu ulkoisen vian energiakertymän perusteella. Riskialue on sarjakondensaattorille epäonnistuneen PJK:n yhteydessä noin 25 km ja epäonnistuneen AJK:n yhteydessä noin 39 km.

Kuten luvussa 6.3.2 on esitetty, vikapaikoissa 1–7 ja 12 epäonnistunut jälleenkytkentä aiheuttaa vähintään yhdelle kantaverkon sarjakondensaattorille ohittumisriskin. Siispä epäonnistuneiden jälleenkytkentöjen aiheuttamaa kondensaattoriohituksen kokonaisriskiä koko kantaverkossa voidaan arvioida kertomalla UNE-sarjakondensaattorin ohitusriski kahdeksalla. Epäonnistuneen jälleenkytkennän seurauksena kondensaattoriohituksen voidaan ulkoisessa viassa arvioida tapahtuvan koko kantaverkossa noin 25 vuoden välein, jos energiasuojan asetetaan ulkoisen vian 70 ms:n vika-ajan mukaan. Laskelma ei huomioi sitä, ohittuuko vikatilanteessa yksi vai useampi sarjakondensaattori.

Kun UNE-sarjakondensaattorin energiasuoja aseteltiin epäonnistuneen PJK:n aiheuttaman energiakertymän mukaan (violetti vaakasuora viiva), tapahtui sarjakondensaattorin ohittuminen epäonnistuneen AJK:n vuoksi keskimäärin noin 3353 vuoden välein. Kun ohittumistodennäköisyys yleistetään koko kantaverkolle, tapahtuu kondensaattorin ohittuminen epäonnistuneen AJK:n vuoksi kantaverkossa keskimäärin 419 vuoden välein.

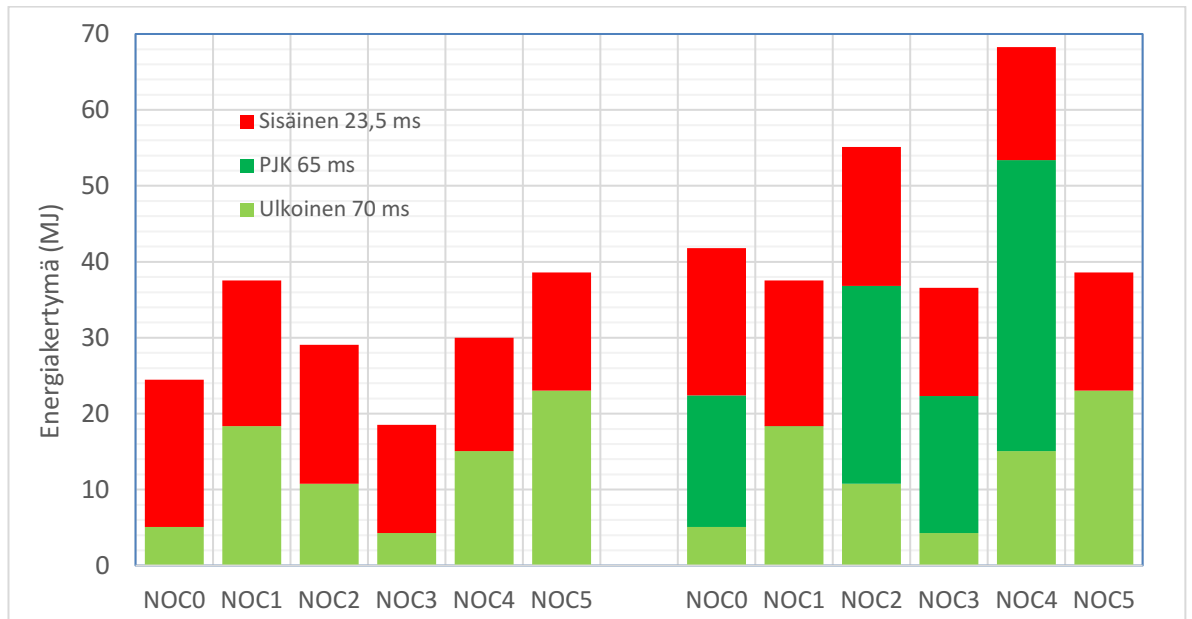
Stabiiliusongelmien esiintyminen tilanteessa, jossa yksi sarjakondensaattori ohittuu pysyvän ulkoisen johtovian vuoksi, on luvussa 2.2.2 esitettyjen perustelujen vuoksi harvi-

naista. Stabiiliusongelmien keskimääräinen esiintymisväli epäonnistuneen jälleenkytkennän aiheuttaman kondensaattoriohituksen seurauksena on siksi selvästi suurempi kuin pelkän kondensaattoriohituksen esiintymisväli. Stabiiliusriski vaikuttaisi työn tulosten perusteella olevan riittävällä tasolla, vaikkei epäonnistuneita jälleenkytkentöjä huomioitaisi energiasuojan asettelussa ja varistorien mitoituksessa.

Pysyvässä johtoviassa tapahtuva sarjakondensaattorin ohittuminen aiheuttaa sen sijaan selvästi stabiiliusongelmia suuremmalla todennäköisyydellä tarpeen vastaostoille. Sarjakondensaattorin ohittumisen pysyvän johtovian yhteydessä kesän tuontitilanteessa arviointiin luvussa 2.2.2 aiheuttavan tuntia kohden noin 10 t€:n vastaostokustannukset. Sarjakondensaattori palautetaan verkkoon automaattisesti, kun varistorit ovat viilenneet alle energiasuojan asetteluarvon [36], joten sarjakondensaattorin epäkäytettävyysajan voidaan arvioida olevan maksimissaan tunti. Sarjakondensaattorin ohittuminen aiheuttaisi siis keskimäärin noin 10 t€:n vastaostokustannukset 25 vuoden välein, kun epäonnistunut PJK:ta ei huomioida mitoituksessa. Vastaostokustannuksilla epäonnistuneen PJK:n huomioimista mitoituksessa ei siis voida perustella, koska epäonnistuneen PJK:n huomioiminen kantaverkon mitoitusperiaatteena aiheuttaisi noin 0,59–1,19 M€ kustannuksen.

7.1.3 Johtokeskeytysten huomioiminen energiamitoituksessa

Johtokeskeytysten vaikutusta energiakertymään on havainnollistettu kuvassa 7.4, jossa on esitetty Tuomela 2-sarjakondensaattorille varistorien energiakertymät ilman johtokeskeytyksiä (NOC0) sekä viidellä eri keskeytystilanteella (NOC1–5, ks. liite E). Kuvan vasemmissa palkeissa energiakertymät on esitetty ilman epäonnistunutta pikajälleenkytkentää ja oikeissa palkeissa epäonnistuneen PJK:n kanssa. Kuvasta 7.4 havaitaan tiettyjen keskeytystilanteiden vaikuttavan merkittävästi ulkoisen vian energiakertymään ja täten aiheuttavan nykyisellä mitoitusperiaattella riskin kondensaattorin ohittumiselle ulkoisessa viassa. Tulosten perusteella keskeytykset eivät kasvata sisäisten vikojen energiakertymiä, joten keskeytystilanne ei aiheuta varistorien hajoamisriskiä.



Kuva 7.4 Keskeytysten (ks. liite E) ja epäonnistuneen pikajälleenkytkennän vaikutus Tuomela 2 -sarjakondensaattorin varistorien energiakertymään 3phg-vioissa.

Taulukossa 7.4 on esitetty pahimman keskeytystilanteen energiakertymä ilman jälleenkytkentöjä (NOC5) ja epäonnistuneella PJK:lla (NOC4). Lisäksi taulukossa on esitetty energiakertymät tilanteissa, joissa myös AJK epäonnistuu. Vertailuna on esitetty normaalin käyttötilanteen (NOC0) energiakertymät ulkoisessa viassa ilman pikajälleenkytkentää, epäonnistuneella PJK:lla ja epäonnistuneella AJK:lla.

Energiakertymän kannalta pahin ulkoinen vika ilman jälleenkytkentöjä on KIB-KI-johdotkeskeytyksen (NOC5) aikana KIB-aseamalla tapahtuva kiskovika, jolloin TE2-sarjakondensaattorin energiakertymä on noin 23 MJ. Pahin ulkoisen vian vikatilanne normaalissa käyttötilanteessa (NOC0) aiheuttaa epäonnistuneen PJK:n kanssa noin 22 MJ:n energiakertymän. Huomioimalla varistorien ja energiasuojan mitoituksessa keskeytykset ilman jälleenkytkentöjä, kattaisi mitoitus tällöin myös normaalissa käyttötilanteessa epäonnistuneen PJK:n.

Taulukko 7.4 Keskeytysten ja erilaisten jälleenkytkentäsykliä varten Tuomela 2 sarjakondensaattorin varistorien ulkoisten vikojen energiakertymään ja hintaan. Ulkoisen vian vika-ajaksi oletetaan 70 ms sekä PJK:n ja AJK:n vika-ajaksi 65 ms. Sisäistä vikaa ei ole huomioitu laskelmissa.

Keskeytystilanne	Jälleenkytkentäsykli	Energiakertymä (MJ)	Hinta (€)
NOC0	Ulkoinen	5,1	30 000–61 000
	Ulkoinen + PJK	22,4	134 000–269 000
	Ulkoinen + PJK + AJK	39,8	239 000–477 000
NOC1-5	Ulkoinen	23,0	138 000–276 000
	Ulkoinen + PJK	53,4	320 000–641 000
	Ulkoinen + PJK + AJK	91,7	550 000–1 100 000

Taulukosta 7.4 havaitaan, että keskeytykset huomioiva mitoitus aiheuttaisi TE2-sarjakondensaattorille 108–215 t€ lisäkustannuksen. Jos TE2-sarjakondensaattorille saadut tulokset yleistetään koko kantaverkolle, voidaan arvioida, että keskeytykset huomioiva mitoituseriaate aiheuttaa koko kantaverkossa yhteensä noin 1,4–2,8 M€:n lisäkustannuksen.

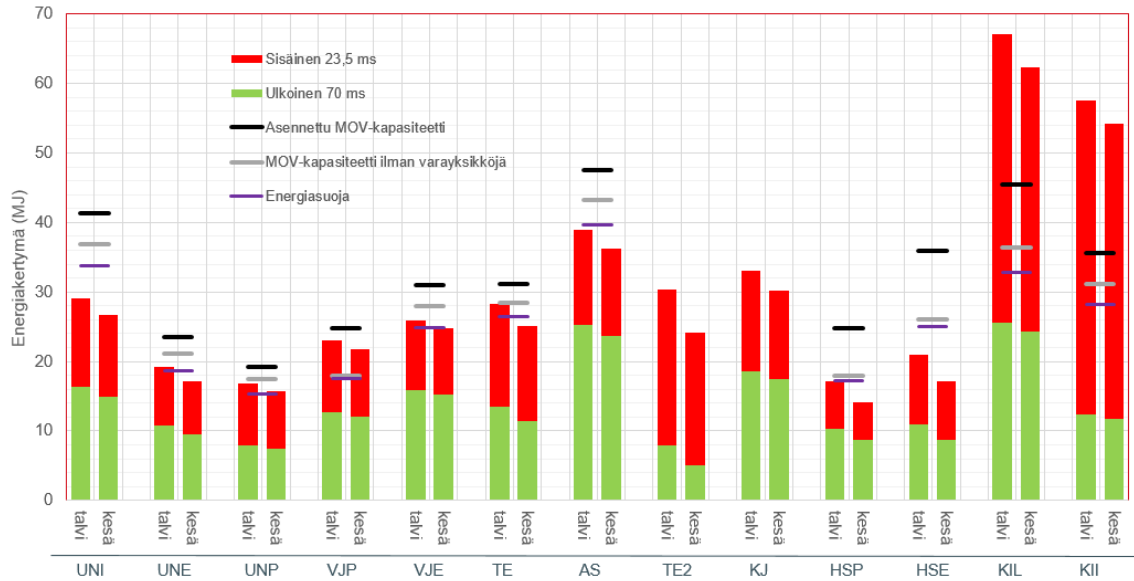
Jos mitoituksessa otetaan huomioon keskeytysten aikaiset epäonnistuneet PJK:t, on lisäkustannus TE2-sarjakondensaattorille, taulukon 7.4 mukaan, noin 290–580 t€. Koko kantaverkon mitoituseriaatteenä keskeytysten aikaisten pikajälleenkytkentöjen huomioiminen aiheuttaisi yhteensä noin 3,8–7,5 M€:n lisäkustannuksen. Jos sarjakondensaattorin haluttaisiin pysyvän aina ulkoisen vian jälkeen verkossa, tulisi varistorit mitoittaa kestämään keskeytystilanteessa tapahtuva epäonnistunut AJK. Tämän voidaan arvioida aiheuttavan koko kantaverkon mitoituseriaatteenä noin 6,4–13,5 M€:n lisäkustannuksen. Koko kantaverkolle suhteutetuissa lisähinnoissa on oletettu, että epäonnistunut jälleenkytkentä vaikuttaa kaikilla sarjakondensaattoreilla varistorien energiakertymään.

Tuloksista havaitaan, että jos keskeytysten aikaiset jälleenkytkennät huomioidaan mitoituksessa, kasvaa varistorien hinta merkittävästi. Keskeytyksiä on tyypillisesti voimajohdolla keskimäärin suunnilleen päivä vuodessa [2], joten energiakertymän kannalta pahimman ulkoisen pysyvän vian sattuminen keskeytyksen yhteydessä on erittäin harvinaista. Toisaalta erityisesti keskeytyksen aikaan sattuvassa pysyvässä viassa olisi verkon stabiiliuden kannalta ensiarvoisen tärkeää, että ulkoisen vian kokeva sarjakondensaattori pysyisi verkossa (ks. luku 2.2.2). Lisäksi keskeytykset ajoittuvat tyypillisesti kesälle [5], jolloin vikoja tapahtuu verkossa eniten.

7.1.4 Energiamitoituksessa käytettävän verkkomallin oikosulkuteho

Nykyisille kantaverkon sarjakondensaattoreille varistorien energiamitointi ja energiasuojan asettelu on tehty talven oikotehosulkuutilannetta kuvaavan verkkomallin avulla. Suurin osa vioista tapahtuu kuitenkin liitteen B taulukon B.1 mukaisesti kesäkuukausina, kun verkkoon on liittynään huomattavasti vähemmän oikosulkutehoa syöttäviä generaattoreita. Tässä luvussa tutkitaan mitoitukseen käytettävän verkkomallin oikosulkutehon vaikutusta varistorien mitoitukseen ja hintaan sekä varistorien asennetun kapasiteetin riittävyyttä talven oikosulkuteholla.

Kuvassa 7.5 on esitetty Suomen kantaverkon sarjakondensaattorien energiakertymät talven ja kesän oikosulkuutilanteella jaoteltuna sisäisen (23,5 ms) ja ulkoisen (70 ms) vian aiheuttamiin energiakertymiin. Vertailuna on esitetty nykyisten sarjakondensaattoreiden asennettu MOV-energiakapasiteetti varayksikköjen kanssa ja ilman varayksikköjä sekä energiasuojan asetteluarvo. Kuvasta havaitaan, että talven oikosulkutehotilanteessa 7/11 sarjakondensaattorista täyttää mitoituskriteerin, kun ei huomioida varayksiköitä. Kun varayksiköt huomioidaan, mitoituskriteeri täyttyy 9/11 sarjakondensaattorista.



Kuva 7.5 Kantaverkon sarjakondensaattoreiden varistorien energiakertymät jaoteltuna sisäisen (23,5 ms) ja ulkoisen vian (70 ms) aiheuttamiin energiakertymiin talven ja kesän oikosulkutehotilanteella. Vertailuna on esitetty nykyisten sarjakondensaattoreiden asennettu MOV-energiakapasiteetti varayksikköjen kanssa ja ilman varayksiköitä sekä energiasuojan asettelu-arvo.

Taulukossa 7.5 on vertailtu talven ja kesän oikosulkutehotilanteen vaikutusta kipinävälitöiden sarjakondensaattorien varistorien energiakertymiin ja hintoihin ulkoisessa ja sisäisessä viassa. Ulkoisessa viassa valitun oikosulkutehon vaikutus on 0,6–2,9 MJ ja sisäisessä viassa 0,5–3,5 MJ. Suurimmillaan ero talven ja kesän verkkomallien kokonaisenergiakertymässä on 5,1 MJ. Keskimääräinen energiakertymien ero talven ja kesän oikosulkuteholla on noin 2,9 MJ, joka tarkoittaa noin 17–34 t€ hintaeroa. Yhteensä kaikille taulukossa 7.5 esitetyille sarjakondensaattoreille hintaero kesän ja talven oikosulkutilanteella lasketuille mitoituksille on noin 220–450 t€.

Luvun 4.2 mukaisesti varistorien energiakapasiteetti määritetään +40 °C ulkolämpötilassa. Talven maksimioikosulkutehotilanteessa lämpötila on tyypillisesti alle 0 astetta. Kuten luvussa 4.2 on esitetty, varistorien voidaan olettaa saavan 40 asteen lämpötilaerosta noin 13–15 MJ lisää energian absorbointikykyä. Täten varistorien terminen tuhoutuminen ei ole simulointien perusteella riski, vaikka mitoitus tehtäisiin kesän oikosulkuteholla. Varistorin ohittuminen ulkoisessa viassa sen sijaan saattaa olla mahdollista, jos mitoitus tehdään kesän oikosulkutilanteessa ja vika tapahtuu talvella suuren oikosulkutehon aikaan.

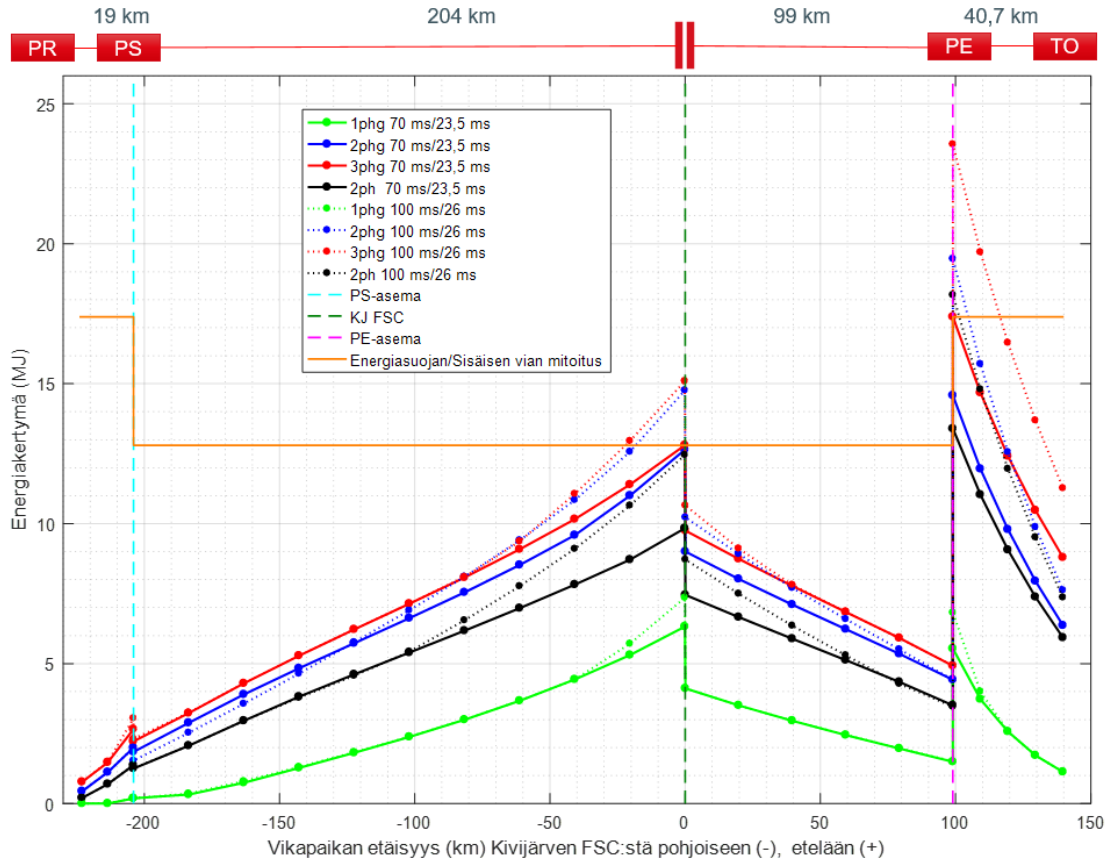
Taulukko 7.5 Sarjakondensaattorien varistorien energiakertymät ja hinnat ulkoisessa (70 ms) ja sisäisessä (23,5 ms) viassa kesän ja talven oikosulkutehotilanteessa.

	Ulkoisen vian energiakertymä 70 ms (MJ)			Sisäisen vian energiakertymä 23,5 ms (MJ)			Yhteensä	
	Talvi	Kesä	Erotus	Talvi	Kesä	Erotus	Energiakertymien erotus (MJ)	Hintaero (t€)
UNI	16,34	14,85	1,49	12,82	11,91	0,91	2,40	14-28
UNE	10,80	9,58	1,22	8,44	7,51	0,93	2,15	13-26
UNP	7,88	7,4	0,48	8,95	8,37	0,58	1,06	6-12
VJP	12,71	12,04	0,67	10,29	9,73	0,56	1,23	7-14
VJE	15,85	15,24	0,61	10,04	9,51	0,53	1,14	7-14
TE	13,44	11,38	2,06	14,77	13,80	0,97	3,03	18-36
AS	25,33	23,61	1,72	13,56	12,68	0,88	2,60	16-32
TE2	7,95	5,07	2,88	22,34	19,10	3,24	6,12	37-74
KJ	18,64	17,43	1,21	14,42	12,81	1,61	2,82	17-34
HSP	10,34	8,66	1,68	6,75	5,47	1,28	2,96	18-36
HSE	10,95	8,66	2,29	10,03	8,50	1,53	3,82	23-46
KIL	25,60	24,38	1,22	41,48	37,98	3,50	4,72	28-56
KII	12,30	11,66	0,64	45,33	42,59	2,74	3,38	20-40

7.1.5 Toiminta-aikojen määrittämiseen liittyvien epävarmuuksien vaikutus energiakertymään

Energiamitoituksessa käytetyille johtokatkaisijan ja ohituskatkaisijan toiminta-ajoille liittyy luvuissa 5.2 ja 5.3 esitettyjä epävarmuuksia. Ulkoisessa viassa vian erotus voi viivästyä esimerkiksi siksi, että valokaari ei jossain navassa katkea ensimmäisessä nollakohdassaan. Lisäksi ulkoisen vian 70 ms:n vika-aika määritettiin ottamalla kertymäfunktiosta 99 %:n kertymää kuvaava vika-aika. Sisäisessä viassa ohitushetki voi viivästyä esimerkiksi ylimääräisen sarjakondensaattorin suojausjärjestelmän sisäisen siirtoviestiyhteyksien tai signaalinkäsittelyviiveen vuoksi tai ohituskatkaisijan hidastumisen vuoksi.

Kuvassa 7.6 on esitetty Kivijärven sarjakondensaattorin varistorien energiakertymät etäisyyden funktiona ulkoisissa ja sisäisissä vioissa (ks. luku 6.3.1). Ulkoisten vikojen (Pikkarala–Pyhänselkä ja Petäjävesi–Toivila) vika-aikana on käytetty 70 ms:n ja 100 ms:n johtokatkaisijoiden aukeamisviivettä ja sisäisissä vioissa 23,5 ms:n ja 26 ms:n ohituskatkaisijan toimintaviivettä. Kuvasta havaitaan energiakertymän pienenevän nopeasti etäisyyden kasvaessa. Sisäisessä viassa energiakertymän havaitaan olevan suurimmillaan sarjakondensaattorin terminaaliviassa ja ulkoisessa viassa vasta-aseman kiskoviassa, kuten työssä tehdyissä energiamitoituksissa oli oletettu.



Kuva 7.6 Kivijärven sarjakondensaattorin varistorien energiakertymät eri vikatyypeillä vikapaikan etäisyyden suhteen sisäisissä (PS–PE) ja ulkoisissa (PR–PS ja PE–TO) vioissa. Sisäisissä vioissa on käytetty 23,5 ms:n sekä 26 ms:n vika-aikaa ja ulkoisissa vioissa 70 ms:n sekä 100 ms:n vika-aikaa.

Kuvassa 7.6 esitetty oranssi vaakasuora viiva esittää ulkoisen vian alueella suurimman ulkoisen vian 70 ms:n vika-ajan energiakertymän mukaan määritettyä energiasuojaa. Sisäisen vian alueella viiva kuvaa suurinta sisäisen vian 23,5 ms:n vika-ajan energiakertymää. Ulkoisen vian alueella oranssin viivan ja kutakin vikatyyppejä kuvaavan katkoviivan leikkauspisteestä voidaan määrittää kyseisen vikatyypin riskialue, jonka sisällä Kivijärven sarjakondensaattori voi ohittua ulkoisessa viassa 100 ms:n vika-ajan vuoksi. Vastavasti sisäisissä vioissa katkoviivan ja oranssin viivan leikkauspiste kuvaa vikatyypin riskialuetta, jonka sisällä sarjakondensaattorin varistorit voivat hajota 26 ms:n vika-ajalla. Riskialueista voidaan johtaa keskimääräinen esiintymisväli Kivijärven sarjakondensaattorin varistorien tuhoutumiselle ja sarjakondensaattorin ohittumiselle ulkoisessa viassa käyttämällä liitteessä B esitettyjä johtovikojen lukumääriä. Riskialueet ja keskimääräiset esiintymisvälit on esitetty taulukossa 7.6.

Tietyn vikatyypin aiheuttama kondensaattorin ohittumisen todennäköisyys ulkoisessa viassa vuoden aikana P_{3phg} voidaan laskea esimerkiksi 3phg-vialle kaavan

$$P_{3phg} = \frac{f_{3phg}}{100 \text{ km}} * (l_{3phg_{PR-PS}} + l_{3phg_{PE-TO}})$$

mukaisesti, missä $l_{3phg_{PR-PS}}$ on ulkoisen 3phg-vian riskialue (0 km) PR–PS-voimajohdolla ja $l_{3phg_{PE-TO}}$ ulkoisen 3phg-vian riskialue (19 km) PE–TO-voimajohdolla. f_{3phg} on liitteen B taulukossa B.1 esitetty ”Johtoviat vuodessa / 100 km”-sarakkeessa 3phg-vian esiintymistodennäköisyys. Kun vastaavat laskelmat tehdään muillekin vikatyypeille ja summataan yhteen, saadaan todennäköisyys sarjakondensaattorin arvioidulle ohittumisriskille ulkoisessa viassa. Ohituksen esiintymisväli (vuotta) saadaan esiintymistodennäköisyyden käänteislukuna. Varistorien hajoamisriski sisäisessä viassa on laskettu vastaavalla tavalla käyttämällä PS–KJ- ja KJ–PE-voimajohdon sisäisen vian riskialuetta.

Taulukko 7.6 Sisäisen vian riskialue kuvaa 26 ms:n sisäisen vian vika-ajan aiheuttamaa KJ-sarjakondensaattorin varistorien hajoamisriskin aluetta, kun sisäisen vian mitoitus tehdään 23,5 ms:n vika-ajalla. Vastaavasti ulkoisen vian riskialue kuvaa riskialuetta, jossa sarjakondensaattori voi 100 ms:n vika-ajan vuoksi ohittua ulkoisessa viassa, kun energiasuoja on aseteltu 70 ms:n vika-ajan mukaan.

Vika- tyyppi	Sisäisen vian riskialue (km)		Ulkoisen vian riskialue (km)		Esiintymisväli (vuotta)	
	PS-KJ	KJ-PE	PR-PS	PE-TO	Varistorien hajoaminen	FSC:n ohittuminen ulkoisessa viassa
1phg	0	0	0	0	-	-
2ph	0	0	0	2	-	4274
2phg	20	0	0	6	107	355
3phg	20	0	0	19	427	450
Yhteensä	20	0	0	19	86	190

Kun sisäisille vioille esitetty 86 vuoden keskimääräinen esiintymisväli yleistetään kaikilla kantaverkon kolmelletoista sarjakondensaattorille, tapahtuu varistorien tuhoutuminen keskimäärin noin kerran 6,6 vuodessa. Keskimääräinen esiintymisväli sisältää oletuksen, että sisäistä vikaa edeltää aina pahin mahdollinen ulkoinen vika eli sisäisen vian tapahtuessa sarjakondensaattorin energiasuoja on lähellä rajaansa, mutta sarjakondensaattori ei ole ulkoisen vian seurauksena vielä ohittunut.

Ulkoisessa viassa riskialuetta on Petäjavesi–Toivila-voimajohdon lisäksi myös Petäjavesi–Vihtavuori-voimajohto (ks. liite E), joten taulukossa 7.6 esitetty riskialue täytyy kertoa kahdella. Tällöin ulkoisessa viassa ohittumisen voidaan arvioida tapahtuvan noin 95 vuoden välein. Jos tulos yleistetään kaikille kantaverkon kolmelletoista sarjakondensaattorille, tapahtuu koko kantaverkossa kondensaattorin ohittuminen ulkoisessa viassa noin 7,3 vuoden välein. Luvussa 5.2.3 on arvioitu ulkoisen vian vika-ajan olevan 99 %:ssa vikatapauksista maksimissaan 70 ms. Jos 100 ms:n vika-ajan oletetaan esiintyvän jäljelle jäävissä 1 %:ssa vioista, saadaan kondensaattoriohituksen keskimääräisen esiintymisvälin arvioksi koko kantaverkolle noin 730 vuotta.

7.1.6 Mitoitukseen ja riskiarvioihin liittyvät epävarmuudet

Luvussa 7.1 tehtyihin MOV-mitoituslaskelmiin liittyy epävarmuuksia, joista suurin osa liittyy työssä tehtyihin oletuksiin sekä PSCAD-malliin. PSCAD-mallin epävarmuudet liittyvät mallin oikosulkutehon valintaan. Syynä epävarmuuteen on mallin 400 kV:n jännitelähde-ekvivalentit, joiden asettelu tarkasti on vaikeaa verkon runsaan silmukoinnin vuoksi. Luvussa 7.1.4 kuitenkin havaittiin, että oikosulkutehon vaikutus energiakertymiin on vähäinen, joten malliin liittyvillä epävarmuuksilla ei uskota olevan merkittävää vaikutusta tuloksiin.

Varistorien kustannukset on työssä arvioitu käyttämällä Fingridin vanhoissa sarjakondensaattoriprojekteissa eri valmistajien varistorien yksikköhinnalle määrittämiä hintoja. Hinnat vaihtelevat projektikohtaisesti, mutta todennäköisesti työssä käytetty hintaväli 2000–4000 €/MJ on edustava riippumatta projektista. Myös kipinävälittömyydessä säädettävät kustannukset on arvioitu vanhojen projektien tarjousmateriaalien perusteella arvioimalla, mitkä komponentit kipinävälittömyyden myötä olisivat tarpeettomia.

Energiamitoitusta huomattavasti merkittävämmät epävarmuudet liittyvät luvuissa 7.1.2 ja 7.1.5 esitettyihin riskiarvioihin. Luvussa 7.1.2 arvioitiin sarjakondensaattorin ohittumisriskiä ulkoisen vian epäonnistuneen jälleenkytkennän ja luvussa 7.1.5 ulkoisen vian erottamisen viivästymisen seurauksena. Tarkastelun epävarmuustekijöitä ovat:

- Energiasuojan asettelussa ei ole tutkimuksessa käytetty marginaalia. Tyypillisesti marginaalin suuruus on ollut aiemmissa projekteissa noin 10 %:n suuruinen (ks. luku 3.3).
- Simuloinnit tehtiin viidellä eri vikahetkellä, ja riskiarvioon valittiin energiakertymistä suurin arvo (ks. luku 6.3).
- Yhdelle sarjakondensaattorille määritetyn riskin yleistäminen koko kantaverkolle.
- Oletus että viat jakautuvat 400 kV:n verkossa tasaisesti (ks. liite B).

Näiden lisäksi luvun 7.1.2 jälleenkytkennän aiheuttamaa kondensaattoriohituksen riskiä arvioitaessa käytettiin tarkasteluissa keskimääräistä pidempiä toiminta-aikoja (ulkoinen vika 70 ms, PJK/AJK 65 ms). Lisäksi luvun 7.1.2 jälleenkytkennän aiheuttamaa kondensaattoriohituksen riskin arviointi sisälsi oletuksen siitä, että tilastoihin merkitty ”Ohimennyt AJK:illa tai käsinkytkentä” tarkoittaa, että tätä on aina edeltänyt epäonnistunut PJK. Todellisuudessa osassa tällaisista vioista PJK on ollut pois kytkettynä tai jostain muusta syystä PJK:ta ei ole tapahtunut (liite B). Jos tilastoihin taas on merkitty ”pysyvä vika”, oletetaan sarjakondensaattorin kokeneen ulkoisen vian jälkeen sekä epäonnistuneen PJK:n että AJK:n. Näissäkin vikatapauksissa ei ole liitteen B mukaisesti aina tapahtunut molempia jälleenkytkentöjä. [5] Erityisesti luvun 7.1.2 jälleenkytkennän aiheuttamaa kondensaattoriohituksen riskiä kuvaavat riskiarviot voidaan edellä esitetyn listan perusteella arvioida olevan konservatiivisia.

Luvussa 7.1.5 arvioitiin kondensaattoriohituksen riskin lisäksi myös riskiä varistorien tuhoutumiselle ohituskatkaisijan hidastuneen toiminnan vuoksi. Varistorien tuhoutumisriskiä pienentäviä tekijöitä ovat:

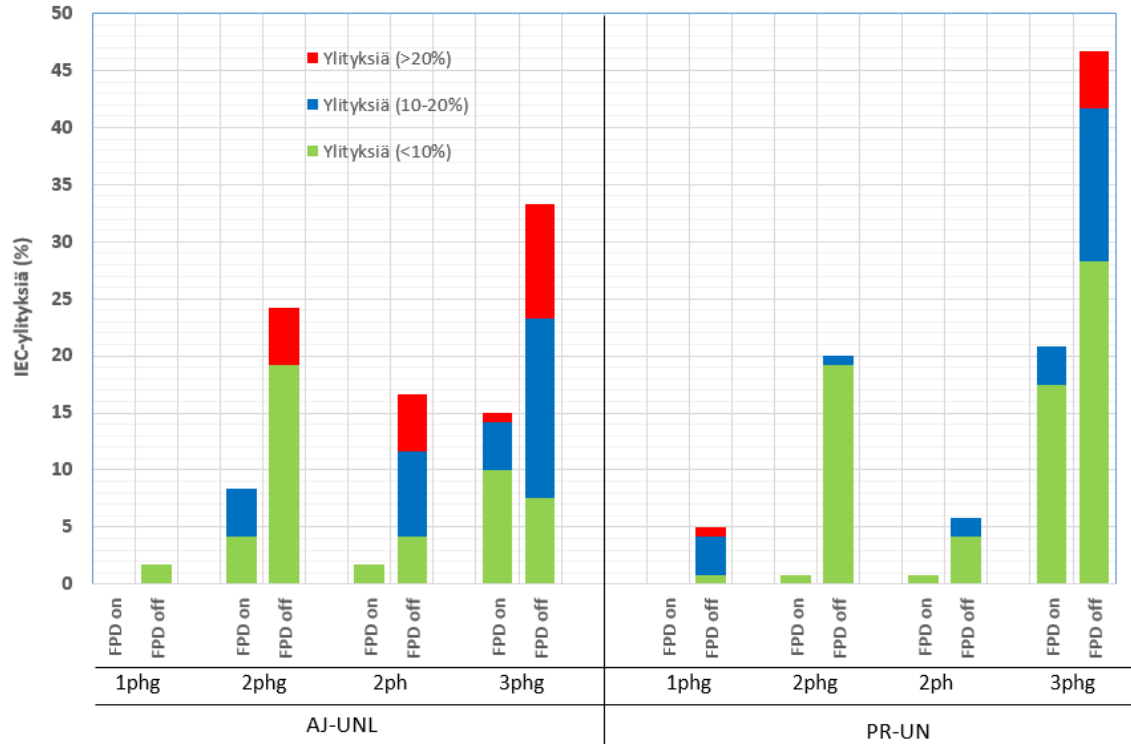
- Varayksikköjä ei huomioida energiamitoituksessa (ks. luku 3.2.2).
- Asetteluun käytetty verkkomalli on tyypillisesti valittu konservatiivisesti oikosulkutehon suhteen, jonka vuoksi energiakertymät jäävät usein todellisuudessa pienemmiksi [20].
- Sarjakondensaattorivalmistaja käyttää varistoreille marginaalia, jota ei huomioida energiamitoituksessa [66].
- Varistorivalmistaja käyttää varistoreille marginaalia, jota ei huomioida energiamitoituksessa [66].
- Varistorien energiakapasiteetti määritellään +40-asteen lämpötilalle, joka tuottaa matalammissa lämpötiloissa varistoreille ylimääräistä energian absorbointikapasiteettia (ks. luku 4.2).

Varistorien tuhoutuminen vaatii, että ennen sisäistä vikaa on tapahtunut ulkoinen vika lähellä kondensaattorin vasta-asemaa, jonka vuoksi varistorien energiakertymä on lähellä energiasuojan rajaa. Riskiarviossa ei myöskään ole huomioitu vaatimusta ulkoisesta viasta ennen sisäistä vikaa, koska peräkkäin esiintyvää ulkoista ja sisäistä vikaa ei voi pitää toisistaan riippumattomana tapahtumana. Edellä esitettyjen syiden vuoksi varistorien tuhoutuminen, ohituskatkaisijan muutamien millisekuntien hidastumisen tai talven suuremman oikosulkutehon takia, ei vaikuta todennäköiseltä.

7.2 Johtokatkaisijoiden TRV-riski sarjakompensoidussa verkossa

7.2.1 Kipinävälittömyyden vaikutus TRV-riskiin

Tässä luvussa arvioidaan sarjakondensaattorien kipinävälittömyyden vaikutusta johtokatkaisijoiden TRV-riskin sarjakompensoidussa verkossa. Kuvassa 7.7 on esitetty sarjakondensaattorien kipinävälittömyyden (ks. taulukko 6.1) vaikutus AJ-PR-voimajohdon johtokatkaisijoiden IEC-verhokäyräylitysten prosentuaaliseen lukumäärään eri vikatyypeillä suhteessa kaikkiin ko. vikatyypillä simuloituihin vikoihin. Jos yhden tai useamman johtokatkaisijan navan simuloitu TRV ylittää IEC-standardin määrittelemän verhokäyrän, tulkitaan kyseinen vikatilanne IEC-ylitykseksi. Ylitykset on jaoteltu ylityksen vakavuuden mukaan kolmeen osaan: alle 10 %:n ylitys, 10–20 %:n ylitys ja yli 20 %:n ylitys. Ylityksen vakavuus on merkitty kuvaan sen navan mukaan, jossa ylitys oli suurin. Jos esimerkiksi yhdessä katkaisijan navassa ylityksen suuruus on yli 20 %, toisessa navassa 10–20 % ja kolmannessa navassa ylitystä ei tapahdu, merkitään vian vakavuudeksi yli 20 %. Tilanteissa, joissa vikavirrassa esiintyneen DC-komponentin vuoksi katkaisija ei toiminut asetetussa aikaikkunassa, oletettiin ettei IEC-ylitystä tapahtunut (ks. luku 6.4.4).



Kuva 7.7 IEC-ylitysten prosentuaalinen lukumäärä eri vikatyypeillä AJ-UNL- ja PR-UN-johtokatkaisijoilla, kun UNE- ja UNP-sarjakondensaattorit ovat kipinävälillisiä (FPD on, tutkimus 1) ja kipinävälittömiä (FPD off, tutkimus 2, ks. taulukko 6.1).

Kuvasta havaitaan IEC-verhokäyrän ylitysten kannalta vakavimman vikatyypin olevan sarjakompensoidussa verkossa 3phg-vika riippumatta siitä, ovatko sarjakondensaattorit kipinävälittömiä vai eivät. Erityisesti kipinävälillisten sarjakondensaattorien kanssa suurin osa ylityksistä tapahtuu 3phg-viassa. 1phg-viassa IEC-ylityksiä ei tapahtunut lainkaan ja 2ph-viassakin vain muutamassa prosentissa vikatapauksista, kun sarjakondensaattorit olivat kipinävälillisiä. Kipinävälittömyyden havaittiin kasvattavan ylitysten lukumäärää kaikilla vikatyypeillä huomattavasti. Esimerkiksi PR-UN-katkaisijalla ylitysten kokonaismäärä kasvaa noin 21 %:sta noin 47 %:iin 3phg-viassa. Erityisen suuri vaikutus kipinävälin poistumisella oli vakavimpiin yli 20 %:n ylityksiin, joita kipinävälillisellä sarjakondensaattorilla tapahtui ainoastaan muutamassa 2phg- ja 3phg-viassa.

Sarjakondensaattorien kipinävälin vaikutus AJ-UNL- ja PR-UN-johtokatkaisijoiden TRV-riskiin on esitetty taulukossa 7.7. TRV-riski on määritetty käyttämällä kuvan 7.7 vikatyypien IEC-ylitys todennäköisyyksiä ja liitteen B taulukossa B.1 (”Johtoviat vuodessa / 100 km”-sarake) esitettyjä johtovikojen esiintymistodennäköisyyksiä eri vikatyypeillä. TRV-riskialueena on laskelmissa käytetty AJ-PR-voimajohdon pituutta (225 km, ks. taulukko 2.1). Taulukosta havaitaan, että katkaisijoiden yhdistetty IEC-ylitysriski kasvaa kipinävälin poistumisen vuoksi yli kolminkertaiseksi. Ilman kipinäväliä ylitys tapahtuisi keskimäärin noin kerran 8 vuodessa ja kipinävälin kanssa noin kerran 24 vuodessa. Yli 10 %:n IEC-ylitysten lukumäärä lähes kahdeksankertaisuisi kipinävälin poistumisen

vuoksi. Kipinävälittömyyden vuoksi yli 20 %:n ylitysten keskimääräinen esiintymisväli muuttuisi yli 1000 vuodesta alle 50 vuoteen.

Taulukko 7.7 IEC-ylitysten keskimääräinen esiintymisväli AJ–PR-voimajohdon johtokatkaisijoilla, kun UNE- ja UNP-sarjakondensaattorit ovat kipinävälillisiä (FPD on, tutkimus 1) ja kipinävälittömiä (FPD off, tutkimus 2, ks. taulukko 6.1).

Johtokatkaisija		Ylityksen keskimääräinen esiintymisväli (vuotta) AJ-PR johtokatkaisijoilla		
		Ylityksen suuruus >20 %	Ylityksen suuruus >10%	Ylityksen suuruus >0%
AJ-UNL	FPD on	1136	158	54
	FPD off	80,8	32	19
PR-UN	FPD on	-	284	45
	FPD off	115	28	13
Yhteensä	FPD on	1136	101	24
	FPD off	47,5	14,8	7,9

Taulukossa 7.8 TRV-riski on yleistetty koko Suomen sarjakompensoidulle kantaverkolle käyttämällä riskialueena AJ–PR-voimajohtopituuden sijaan koko sarjakompensoidun kantaverkon johtopituutta. Koko sarjakompensoidun verkon riskialueena käytettiin katkaisijoiden rajaamien sarjakompensoitujen voimajohtojen pituuksien summaa (1783 km, ks. taulukko 2.1). Jos kaikki kantaverkon sarjakondensaattorit ovat kipinävälittömiä, IEC-ylityksen voidaan taulukon 7.8 mukaan arvioida tapahtuvan keskimäärin noin kerran vuodessa. Yli 10 %:n ylityksiä tapahtui keskimäärin useammin kuin joka toinen vuosi ja yli 20 %:n ylityksiä noin kerran kuudessa vuodessa. Huomattavaa on, että kipinävälilliselläkin sarjakondensaattorilla ylityksiä tapahtui keskimäärin noin kerran kolmessa vuodessa ja yli 10 %:n ylityksiä noin kerran 13 vuodessa. Sen sijaan yli 20 %:n prosentin ylitykset jäivät kipinävälin kanssa erittäin harvinaisiksi koko sarjakompensoidussa kantaverkossa.

Taulukko 7.8 Sarjakompensoidun kantaverkon johtokatkaisijoiden IEC-ylitysten keskimääräinen esiintymisväli, kun kantaverkon sarjakondensaattorit oletetaan kipinävälilliseksi (FPD on, tutkimus 1) ja kipinävälittömiksi (FPD off, tutkimus 2, ks. taulukko 6.1).

	Ylityksen esiintymisväli (vuotta) kantaverkossa		
	Ylityksen suuruus >20 %	Ylityksen suuruus >10%	Ylityksen suuruus >0%
FPD on	143	12	3,1
FPD off	6,0	1,9	1,0

Liitteen F taulukoista F.1 ja F.2 havaitaan sarjakondensaattorin nopean ohituksen vaikutus TRV:n maksimiarvon suuruuteen ja IEC-ylitysten lukumäärään. Sama johtopäätös voidaan tehdä myös liitteessä F esitettyjen kuvien F.1–F.6 perusteella. AJ–UNL-katkaisijalle napakohtaisten IEC-ylitysten kannalta pahimmat vikapaikat olivat 13 ja 14 (ks. kuva 6.4), kun sarjakondensaattorit olivat kipinävälittömiä. Erityisesti vikapaikassa 14 tapahtui paljon ylityksiä. Vikapaikassa 15, eli UNP-sarjakondensaattorin Pikkaralan

puoleisessa terminaalissa, ylityksiä ei tapahtunut sisäisen suojauksen nopean toiminnan vuoksi. Kun sarjakondensaattori ei sijainnut katkaisijan ja vikapaikan välissä (vikapaikat 16–18) tapahtui ylityksiä ainoastaan muutama kappale.

Kun sarjakondensaattorit olivat kipinävälillisiä, tapahtui ylityksiä ainoastaan vikapaikassa 13. Osassa ylitystilanteista linjavirta ei ollut riittävä kipinävälin sytytykseen, jolloin ohitus tapahtui ohituskatkaisijan avulla ulkoisella ohitussignaalin vasta johtokatkaisijan aukeamishetken jälkeen. Vikapaikassa 14 kipinävälin nopean ohituksen hyödyt tulivat AJ–UNL-katkaisijan yli vaikuttavan TRV:n kannalta merkittävimmin esiin: ylityksiä ei tapahtunut katkaisijalla lainkaan, kun sarjakondensaattorit olivat kipinävälillisiä.

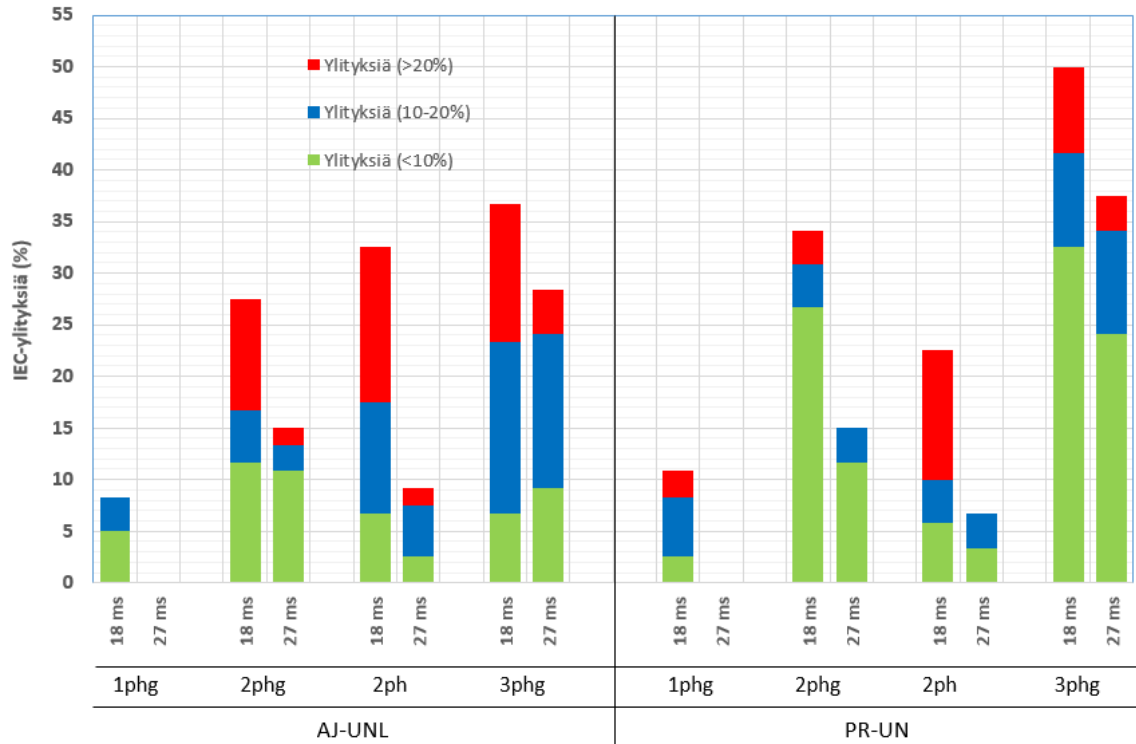
PR–UN-katkaisijalla ylityksiä tapahtui eniten vikapaikassa 18, kun sarjakondensaattorit olivat kipinävälittömiä. UNE- ja UNP-kondensaattorin läpi kulkevat vikavirrat olivat UN–AJ-voimajohtovälillä tapahtuvissa vioissa suuremmat kuin PR–UN-voimajohtovälillä tapahtuvissa vioissa, minkä takia kondensaattorien sisäisen suojauksen kattavuus oli Alajärven suuntaan parempi. Siksi vikapaikassa 17 ylityksiä tapahtui PR–UN-katkaisijalla suhteellisen vähän myös silloin, kun sarjakondensaattorit olivat kipinävälittömiä.

Suurimmat kipinävälin hyödyt PR–UN-johtokatkaisijan TRV:n kannalta näkyivät vikapaikassa 18, jonne sarjakondensaattorien sisäinen suojaus ei yltänyt. Vaikka sarjakondensaattori ei sijainnut katkaisijan ja vikapaikan välissä vikapaikassa 13, tapahtui ylityksiä 3phg-viassa runsaasti riippumatta siitä, olivatko sarjakondensaattorit kipinävälittömiä vai eivät. Vikapaikan 13 ylityksiin kondensaattorien nopealla ohituksella ei ollut vaikutusta. PR–UN-katkaisijan IEC-ylitykset ovat kuitenkin olleet vikapaikassa 13 lieviä.

Tulosten perusteella voidaan sanoa kipinävälin hyödyn perustuvan pitkältä sisäisen suojauksen ulottumattomissa tapahtuviin vikoihin. Lähellä kondensaattorien terminaalista tapahtuvissa vioissa kondensaattorit ohittuvat sisäisen suojauksen käskystä ohituskatkaisijan avulla useimmiten riittävän nopeasti ja kondensaattorien vaikutus TRV-riskiin jää pieneksi. Sen sijaan sisäisen suojauksen ulottuvuuden ulkopuolella tapahtuvissa vioissa sarjakondensaattorien ohitus ulkoisen ohitussignaalin avulla ei toimi riittävän nopeasti, jotta kondensaattorien TRV-riskiä kasvattava vaikutus saataisiin eliminoitua.

7.2.2 Johtokatkaisijan toiminta-ajan vaikutus TRV-riskiin

Kuvassa 7.8 on esitetty johtokatkaisijan aukeamisviiveen vaikutus AJ–PR-voimajohdon katkaisijoiden IEC-ylitysten prosentuaaliseen lukumäärään eri vikatyypeillä suhteessa kaikkiin ko. vikatyypillä simuloituihin vikoihin, kun UNE- ja UNP-sarjakondensaattorien oletetaan olevan kipinävälittömiä. Tuloksista havaitaan nopeamman (18 ms) johtokatkaisijan (tutkimus 3, ks. taulukko 6.1) aiheuttavan enemmän IEC-ylityksiä kuin hitaamman (27 ms) johtokatkaisijan (tutkimus 4, ks. taulukko 6.1) kaikilla vikatyypeillä ja kummallakin katkaisijalla. Ero on erityisen suuri vakavimmissa yli 20 %:n ylityksissä.



Kuva 7.8 IEC-ylitysten prosentuaalinen lukumäärä eri vikatyypeillä AJ-UNL- ja PR-UN-johtokatkaisijoilla, kun johtokatkaisijoiden toiminta-aika on 18 ± 2 ms (tutkimus 3) ja 27 ± 2 ms (tutkimus 4, ks. taulukko 6.1).

Johtokatkaisijan toiminta-ajan vaikutus on AJ-PR-voimajohdon johtokatkaisijoiden TRV-riskiin on esitetty taulukossa 7.9. Taulukosta havaitaan katkaisijoiden yhteenlasketun IEC-ylitysriskin olevan yli kaksi kertaa suurempi nopeammalla johtokatkaisijalla kuin hitaammalla. Vakavimpia yli 20 %:n IEC-ylityksiä tapahtuisi keskimääräisesti nopeammalla johtokatkaisijalla lähes neljä kertaa useammin kuin hitaammalla katkaisijalla.

Taulukko 7.9 IEC-ylitysten keskimääräinen esiintymisväli AJ-PR-voimajohdon johtokatkaisijoilla, kun johtokatkaisijoiden toiminta-aika on 18 ± 2 ms (tutkimus 3) ja 27 ± 2 ms (tutkimus 4, ks. taulukko 6.1).

Johtokatkaisija	Johtokatkaisijan keskimääräinen toiminta-aika	Ylityksen esiintymisväli (vuotta) AJ-PR johtokatkaisijoilla		
		Ylityksen suuruus >20 %	Ylityksen suuruus >10%	Ylityksen suuruus >0%
AJ-UN	18 ms	46	18	12
	27 ms	144	40	26
PR-UNL	18 ms	44	18	9,2
	27 ms	196	57	21
Yhteensä	18 ms	23	8,8	5,1
	27 ms	83	24	12

Taulukossa 7.10 on esitetty, miten johtokatkaisijoiden TRV-riski muuttuu koko sarjakoissa kantaverkossa johtokatkaisijan aukeamisviiveen suhteen, kun kaikki

kantaverkon sarjakondensaattorit on oletettu kipinävälittömiksi. Ylityksiä havaitaan tapahtuvan koko sarjakompensoidussa kantaverkossa keskimäärin alle kahdeksan kuukauden välein, jos kaikkien sarjakompensoidun verkon johtokatkaisijoiden aukeamisviiveiden oletetaan olevan tutkimuksessa 3 käytettyjen viiveiden kanssa yhteneväiset. Yli 10 %:n viiveitä sarjakompensoidun verkon katkaisijoilla tapahtuisi keskimäärin lähes vuosittain ja yli 20 %:n ylityksiä lähes joka kolmas vuosi. Hitaammalla ohituskatkaisijalla ylitysriski on selvästi pienempi. Erityisesti vakavimpia ylityksiä tarkastellessa johtokatkaisijan aukeamisviiveellä havaitaan olevan merkittävä vaikutus TRV-riskin suuruuteen.

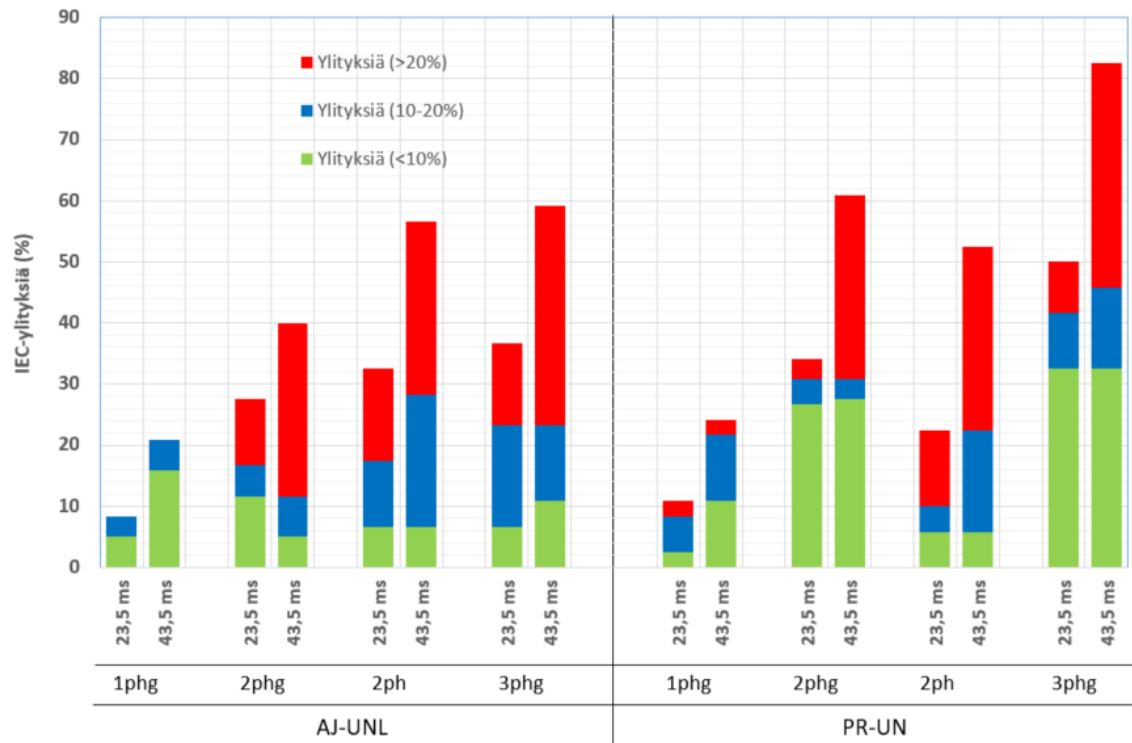
Taulukko 7.10 Sarjakompensoidun kantaverkon johtokatkaisijoiden IEC-ylitysten keskimääräinen esiintymisväli, kun sarjakompensoitujen voimajohtojen johtokatkaisijoiden toiminta-aika on 18 ± 2 ms ja 27 ± 2 ms. Kaikki kantaverkon sarjakondensaattorit ovat oletettu kipinävälittömiksi. Ohituskatkaisijan toimintaviive on 23,5 ms.

Johtokatkaisijan toiminta-aika	Ylityksen esiintymisväli (vuotta) kantaverkossa		
	Ylityksen suuruus >20 %	Ylityksen suuruus >10%	Ylityksen suuruus >0%
18 ms	2,8	1,1	0,6
27 ms	11	3,0	1,5

Liitteen G taulukoissa G.1 ja G.2 on esitetty vikapaikkakohtaiset tulokset tutkimuksista 3 ja 4. Suurimmat vaikutukset johtokatkaisijan aukeamisviiveellä oli AJ–UNL-katkaisijan ylitysten määrään vikapaikoissa 13 ja 14 sekä PR–UN-katkaisijan ylitysten määrään vikapaikassa 18. Sarjakondensaattoriohitusten lukumäärään johtokatkaisijan aukeamisviiveellä ei ollut juurikaan vaikutusta.

7.2.3 Ohituskatkaisijan toiminta-ajan vaikutus TRV-riskiin

Kuvassa 7.9 on esitetty sarjakondensaattorin ohituskatkaisijan toimintaviiveen vaikutus AJ–PR-voimajohdon katkaisijoiden IEC-ylitysten prosentuaaliseen lukumäärään eri viikatyypeillä. Johtokatkaisijoille käytetty toiminta-aika on tutkimuksissa 18 ± 2 ms. UNE- ja UNP-sarjakondensaattorit ovat tutkimuksissa kipinävälittömiä. Tuloksista havaitaan nopeamman (23,5 ms) ohituskatkaisijan (tutkimus 3) aiheuttavan vähemmän IEC-ylityksiä kuin hitaamman (43,5 ms) ohituskatkaisijan (tutkimus 5, ks. taulukko 6.1). Sarjakondensaattoriohituksen viivästymisen vuoksi erityisesti yli 20 %:n ylitysten määrä kasvaa runsaasti.



Kuva 7.9 IEC-ylitysten prosentuaalinen lukumäärä eri vikatyypeillä AJ-UNL- ja PR-UN-johtokatkaisijoilla, kun kipinävälittömän sarjakondensaattorin ohituskatkaisijan toimintaviive on 23,5 ms (tutkimus 3) tai 43,5 ms (tutkimus 5, ks. taulukko 6.1).

Liitteen G taulukkojen G.3 ja G.4 mukaan ohituskatkaisijan toimintanopeuden vaikutus AJ-UNL-katkaisijan TRV-riskiin oli suurin vikapaikassa 15 ja PR-UN-katkaisijan TRV-riskiin vikapaikoissa 16 ja 17. Nopeammalla ohituskatkaisijalla kondensaattoriohitus tapahtuu sisäisen suojauksen toimesta ennen johtokatkaisijan aukeamisajanhetkeä vikapaikoissa 15–17. Sen sijaan hitaammalla ohituskatkaisijalla ohitus tapahtuu vain muutamassa tapauksessa ennen johtokatkaisijan aukeamisajanhetkeä. Ohituskatkaisijan toimintanopeuden vaikutus tutkimukseen valituilla johtosuojauksen toimintaviiveillä vaikuttaa tulosten perusteella johtokatkaisijan TRV-riskiin eniten tilanteissa, joissa sarjakondensaattori sijaitsee vikapaikan ja katkaisijan välissä ja kondensaattorin läpi kulkeva vikavirta on riittävä sisäisen suojauksen toimintaan.

Ohituskatkaisijan uusimista nopeatoimisempaan ei voida kaikilla sarjakondensaattoreilla perustella varistorien investointikustannuksilla saatavilla säästöillä, kun suojaus- ja ohjauksjärjestelmäusinnan yhteydessä siirrytään kipinävälittömään ratkaisuun (ks. luku 7.1.1). TRV-tulosten perusteella on helppo havaita, että ohituskatkaisijan toimintanopeus vaikuttaa varistorien kustannusten lisäksi myös vaikuttaa sarjakompensoidun verkon TRV-riskiin olevan merkittävästi. Suojausuusinnan yhteydessä tehtävä ohituskatkaisijan vaihtaminen nopeatoimisempaan kipinävälittömään ratkaisuun siirtyessä on perusteltua, vaikka ohituskatkaisijan vaihtaminen tuottaakin lisäkustannuksia.

7.2.4 Johtokatkaisijan nimellisjännitteen vaikutus TRV-riskiin

Taulukossa 7.11 on vertailtu AJ–PR-voimajohdon johtokatkaisijoiden IEC-ylitysten keskimääräistä esiintymisväliä 420 kV:n (tutkimus 3) ja 550 kV:n (tutkimus 6, ks. taulukko 6.1) nimellisjännitteisillä johtokatkaisijoilla. Johtokatkaisijoiden toiminta-ajaksi on tutkimuksissa oletettu 18 ± 2 ms ja ohituskatkaisijan toiminta-ajaksi 23,5 ms. UNE- sekä UNP-sarjakondensaattorit ovat tutkimuksissa kipinävälittömiä. Tuloksista havaitaan TRV-riskin pienenevän selvästi siirryttäessä nimellisjännitteeltään suurempiin johtokatkaisijoihin. Erityisen suuri vaikutus on yli 20 %:n ylitysten keskimääräiseen esiintymisväliin, joka kasvaa noin 22 vuodesta lähes 1000 vuoteen. Myös 10–20 %:n ylitysten keskimääräinen esiintymisväli laskee noin yhdeksästä vuodesta noin 270 vuoteen.

Taulukko 7.11 IEC-ylitysten keskimääräinen esiintymisväli AJ–PR-voimajohdon johtokatkaisijoilla, kun johtokatkaisijoiden nimellisjännitteet ovat 420 kV (tutkimus 3) tai 550 kV (tutkimus 6, ks. taulukko 6.1).

Johtokatkaisija	Johtokatkaisijan nimellisjännite	Ylityksen esiintymisväli (vuotta) AJ-PR johtokatkaisijoilla		
		Ylityksen suuruus >20 %	Ylityksen suuruus >10%	Ylityksen suuruus >0%
AJ-UN	420 kV	46	18	12
	550 kV	1270	425	91
PR-UNL	420 kV	44	17,6	9,2
	550 kV	3820	764	105
Yhteensä	420 kV	22,5	8,9	5,1
	550 kV	955	273	48,9

Kun ylityksen riskiä arvioidaan koko kantaverkossa (taulukko 7.12), havaitaan 550 kV:n johtokatkaisijalla ylityksen tapahtuvan keskimäärin noin kerran kuudessa vuodessa. Yli 10 %:n ylityksiä tapahtuisi kantaverkossa keskimäärin noin kerran 34 vuodessa ja yli 20 %:n ylityksiä kerran 120 vuodessa.

Taulukko 7.12 Sarjakompensoidun kantaverkon johtokatkaisijoiden IEC-ylitysten keskimääräinen esiintymisväli, kun sarjakompensoitujen voimajohtojen johtokatkaisijoiden nimellisjännitteet ovat 420 kV (tutkimus 3) tai 550 kV (tutkimus 6, ks. taulukko 6.1).

Johtokatkaisijan nimellisjännite	Ylityksen esiintymisväli (vuotta) kantaverkossa		
	Ylityksen suuruus >20 %	Ylityksen suuruus >10%	Ylityksen suuruus >0%
420 kV	2,8	1,1	0,6
550 kV	120	34	6,2

Tulosten perusteella kipinävälittömän sarjakondensaattorin aiheuttama sarjakompensoidun verkon johtokatkaisijoiden TRV-riskitason kasvu pystytään kompensoimaan käyttä-

mällä johtokatkaisijoita, joiden nimellisjännite on 550 kV (ks. taulukot 7.8 ja 7.12). Lieviä ylityksiä tapahtuu tutkimuksen mukaan suuremmallakin nimellisjännitteellä varustetuilla katkaisijoilla suhteellisen useasti.

7.2.5 TRV-riskiarvioon liittyvät epävarmuudet

TRV-tutkimuksen merkittävimmät oletukset ja niiden oletetut vaikutukset on esitetty taulukossa 7.13. Merkittävin TRV-ylitysten lukumäärään vaikuttava oletus liittyy luvussa 4.3.2 tarkemmin esiteltyyn TRV-verhokäyrien interpolointiin. Työssä tehdyssä TRV-tutkimuksessa on käytetty standardin IEC-62271-100 määrittelemiä T100-, T60-, T30- ja T10-verhokäyriä riippuen katkaisuhetkellä katkaisijan läpi kulkevan vikavirran tehollisarvosta.

Jos työssä käytettäisiin tarkan oikosulkuvirran mukaan interpoloituja verhokäyriä lähteen [48] esittelemällä tavalla, ylitysten lukumäärä olisi esitettyä pienempi. Tämä johtuu siitä, että standardissa määritellyt TRV-verhokäyrät eivät muutu portaattomasti katkaisijan navan läpi kulkevan vikavirran mukaan. Laskentatavan vaikutus 420 kV:n nimellisjännitteisen verhokäyrän maksimiarvon suuruuteen on noin 0–100 kV riippuen katkaisijan läpi kulkevan vikavirran tehollisarvon suuruudesta. Suurimmillaan tämä tarkoittaisi, että T30-verhokäyrään verrattaessa 14,5 %:n ylitys ei vaihtoehtoisella laskutavalla olisi ylitys. Tällainen tilanne olisi mahdollinen, jos katkaisijan läpi kulkevan vikavirran tehollisarvoksi olisi tutkimuksessa saatu vain hieman yli 4,0 kA.

Tutkimuksessa havaittiin TRV-ylitysten tapahtuvan verhokäyrän viimeisen polvipisteen jälkeen. IEC-standardissa ei ole kuvattu katkaisijan navan TRV-kestoisuuden kasvua viimeisen polvipisteen jälkeen. Tässä työssä on oletettu, että TRV-kestoisuus ei enää kasva viimeisen polvipisteen jälkeen. Katkaisunavat kuitenkin jatkavat erkaantumistaan viimeisen polvipisteenkin jälkeen. Kun navat ovat erkaantuneet ääriasentoihinsa, tulisi jännitekestoisuuden olla saavuttanut salamasyökyjännitteen arvo [62]. Jos TRV-kestoisuuden oletettaisiin jatkavan kasvuaan vielä viimeisenkin polvipisteen jälkeen, putoaisi ylitysten määrä merkittävästi. Kaikki työn tuloksena saadut IEC-verhokäyräylitykset tapahtuivat vasta viimeisen polvipisteen jälkeen (ks. liitteet F–G), joten kyse on merkittävästä epävarmuudesta.

TRV-tutkimuksissa tehdään tyypillisesti oletus, että johtokatkaisijan valokaari on johtamaton. Valokaaren resistanssi luo vaimennusta TRV:n nousevaan rintamaan [50], mutta koska IEC-ylitykset tapahtuivat tutkimuksessa vasta verhokäyrien viimeiseen polvipisteen jälkeen, ei oletuksella todennäköisesti ole merkittävä vaikutusta ylitysten lukumäärään. Ohituskatkaisijan valokaari sen sijaan oletettiin työssä johtamattomaksi, koska valmistaja määrittää ohituskatkaisijalle ainoastaan sulkemisajan (kuva 5.7). Oletus saattaa

aiheuttaa muutaman millisekunnin ylimääräisen viiveen kondensaattoriohitukseen. Kondensaattoriohituksen toiminnan viivästymisen havaittiin työssä kasvattavan TRV-riskiä (ks. luku 7.2.3), joten oletus on konservatiivinen.

Työssä oletettiin johtokatkaisijan valokaaren katkeavan aina ensimmäisessä nollakohdassaan. Jos valokaaren katkeaminen viivästyy, johtokatkaisijan navan avautumishetki viivästyy. Johtokatkaisijan avautumisen viivästymisen pienentää TRV-riskiä (ks. luku 7.2.2), joten oletus on todennäköisesti konservatiivinen. Toisaalta ilmiön vaikutusta katkaisunavan TRV-kestoisuuteen tai TRV:n käyrämuotoon on hankala arvioida.

Tutkimuksessa vikavirrassa esiintyi yksittäistapauksissa DC-komponenttia, jonka vuoksi muutamassa tapauksessa vaiheen katkaisu viivästyi merkittävästi. Ilmiötä esiintyi 1phg- ja 2phg-vikojen vikaantumattomissa vaiheissa. Ilmiön arvioitiin olevan luvussa 6.4.4 olevan ainoastaan mallinnustekninen ongelma. Vaikka DC-komponenttia esiintyisi todellisuudessa, ei tämä aiheuttaisi katkaisijalle TRV-riskiä, koska vikaantumattomien vaiheiden TRV:n havaittiin tutkimuksessa [52] jäävän selvästi IEC-verhokäyrän alapuolelle. TRV-riskiarviossa oletettiin, ettei kyseisissä tapauksissa tapahtunut vaiheissa ylitystä.

Taulukko 7.13 TRV-tutkimuksessa tehdyt merkittävimmät oletukset ja oletuksien vaikutukset IEC-verhokäyräylityksiin.

TRV-Tutkimuksessa käytetty oletus tai valinta	Vaikutus ylitysten määrään
Verhokäyrien interpolointia ei suoriteta	konservatiivinen
Ohituskatkaisijan valokaaren resistanssi on ääretön	hieman konservatiivinen
Johtokatkaisijan valokaari katkeaa aina ensimmäisessä nollakohdassaan	todennäköisesti hieman konservatiivinen
Katkaisijan napojen TRV-kestoisuus ei kasva viimeisen polvipisteen jälkeen	erittäin konservatiivinen (ei varmaa tietoa)

Muita TRV-tutkimukseen liittyviä epävarmuuksia ovat:

- AJ-PR-voimajohtovälin johtokatkaisijoille lasketun TRV-riskitason yleistäminen koko kantaverkkoa koskevaksi
- Aseman ja kuormien tarkka mallintaminen (esimerkiksi hajakapasitanssit)
- Suojauksen toiminta-aikojen epävarmuudet
- Johtokeskeytysten vaikutukset TRV riskiin
- 3ph-vian mahdollinen esiintyminen verkossa
- Vikojen tasainen jakautuminen 400 kV:n kantaverkossa

Koko kantaverkkoa koskevan riskitason merkittävänä epävarmuutena on yhden voimajohtovälin TRV-riskitason yleistäminen koko kantaverkkoa koskevaksi. Esimerkiksi Pikkarala-Petäjäskoski voimajohtolla sijaitsevan Asmuntin sarjakondensaattorin sisäisen

suojauksen kattavuuden todettiin tutkimuksessa [52] olevan heikko, ja täten on mahdollista, että TRV-riskitaso olisi johtovälin katkaisijoilla korkeampi kuin tutkitun AJ-PR-johtovälin katkaisijoilla. Muiden listassa esitettyjen epävarmuuksien ei uskota vaikuttavan merkittävästi tutkimuksessa saatuun TRV-riskiin.

7.3 Tulosten yhteenveto

Luvussa 7.1.1 tehtyjen tutkimusten perusteella kipinävälitön sarjakondensaattorin on kipinävälillistä sarjakondensaattoria investointikustannuksiltaan halvempi ratkaisu, kun uusi sarjakondensaattori rakennetaan keskelle johtoa. Jos 400 kV:n johtolähtöjä on johdon päähän asemalle rakennettavalle sarjakondensaattorille enemmän kuin kaksi kappaletta, kipinävälittömyyden kannattavuus investointikustannusten näkökulmasta riippuu projektikohtaisista tarkoista varistorien ja kipinävälikomponenttien hinnoista. Esimerkiksi johdon päässä asemalla, jolta on kolme 400 kV:n johtolähtöä, sijaitseville Keminmaan sarjakondensaattoreille kipinävälillinen sarjakondensaattori on investointikustannuksiltaan hieman kannattavampi kuin kipinävälitön ratkaisu. Kolme johtolähtöä aiheuttaa vikatilanteessa kaksi 400 kV:n vikavirran syöttösuuntaa, mikä aiheuttaa suuren kondensaattorin läpi kulkevan vikavirran ja varistorien energiakertymän.

Suojaus- ja ohjausjärjestelmäusinnan yhteydessä kipinävälittömyydestä ei kerry investointisäästöjä, joilla katettaisiin kipinävälittömyyden vaatima varistorien lisääminen, koska suojausiusinnan yhteydessä ei tyypillisesti uusita kipinäväliä. Toisaalta varistoreja ei ole pakko suojausiusinnan yhteydessä uusida, jos niiden kunto on hyvä ja energiakapasiteetti riittävä myös kipinävälittömälle ratkaisulle. Suojausiusintojen yhteydessä olisi Keminmaan sarjakondensaattoreita lukuun ottamatta mahdollista uusida kantaverkon sarjakondensaattorit kipinävälittömiksi ilman varistorien uusintaa, mikäli varistorien kunto on hyvä. Nykyisten sarjakondensaattorien varistorien energiakapasiteetin riittävyys erilaisilla mitoitusperiaatteilla on esitetty taulukossa 7.14.

Taulukko 7.14 Nykyisten sarjakondensaattorien varistorien energiakapasiteetin riittävyys ($x =$ riittävä) erilaisilla mitoitusperiaatteilla ja verkkomallin oikosulkutehoilla, kun varayksiköt huomioidaan ja ei huomioida mitoituksessa.

Verkkomalli	Kesä								Talvi	
	100 ms + 1,5 ms		100 ms + 23,5 ms		70 ms + 23,5 ms		70 ms + 65 ms + 23,5 ms		70 ms + 23,5 ms	
	kyllä	ei	kyllä	ei	kyllä	ei	kyllä	ei	kyllä	ei
UNI	x	x	x	x	x	x			x	x
UNE	x	x	x	x	x	x			x	x
UNP	x	x	x		x	x			x	x
VJP	x				x		x		x	
VJE	x	x	x		x	x	x	x	x	x
TE	x	x	x	x	x	x			x	
AS	x	x	x		x	x	x	x	x	x
HSP	x	x	x	x	x	x	x		x	x
HSE	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
KIL	x									
KII	x	x								

Suojausintojen yhteydessä lisäkustannuksia saattaa varistorien lisäksi syntyä myös ohituskatkaisijan vaihtamisesta nopeatoimisempaan. Hitaampi ohituskatkaisija kasvattaa merkittävästi varistorien energiakertymää sisäisissä vioissa (taulukko 7.15) ja varistorien kustannuksia. Vaikkei kipinävälittömään ratkaisuun siirryttäessä ohituskatkaisijan uusimista voida kaikille sarjakondensaattoreille investointikustannusten kannalta suositella, havaittiin ohituskatkaisijan toiminta-ajalla olevan merkittävä vaikutus sarjakompensoidun voimajohdon johtokatkaisijoiden TRV-riskiin.

Taulukko 7.15 Käytetyn verkkomallin oikosulkutehon sekä sisäisen vian vika-ajan vaikutus varistorien sisäisen vian energiakertymään ja hintaan. Hinnassa ei ole huomioitu ulkoista vikaa.

Verkkomalli		Kesä			Talvi
Vika-aika		1,5 ms	23,5 ms	43,5 ms	23,5 ms
Energia-kertymä (MJ)	Keskiarvo	4,0	15,5	36,3	16,9
	Maksimi	9,8	40,8	99,9	45,3
	Minimi	0,9	5,7	11,3	6,8
Hinta (t€)	Keskiarvo	24-48	93-185	218-436	101-202
	Maksimi	59-117	235-490	600-1200	272-544
	Minimi	5-10	34-69	68-136	41-81

Nykyisin varistorien energiasuojan mitoitukseseen käytettävän 100 ms:n ulkoisen vian vika-ajalle ei löydetty luvussa 5.2.3 perusteita johtosuojauksen toiminta-ajoista. Keskimääräisen vika-ajan arvioitiin 400 kV:n verkossa olevan noin 50 ms. Teoreettiseksi vika-ajan maksimiksi arvioitiin noin 80 ms, kun valokaaren oletettiin katkeavan ensimmäisessä nollakohdassaan. Vika-ajan arvioitiin olevan noin 99 %:lla vioista maksimissaan 70 ms. Kun 100 ms:n vika-ajan oletettiin esiintyvän 1 %:ssa vioista, saatiin luvussa 7.1.5

kondensaattoriohituksen esiintymisvälin arvioksi koko kantaverkolle 726 vuotta. Mitoitusperiaatteen vaihtamisella 100 ms:sta 70 ms:iin voidaan arvioida säästävän koko kantaverkossa yhteensä noin 0,3–0,7 M€ (taulukko 7.16).

Taulukko 7.16 Verkkomallin oikosulkutehon, mitoituksessa käytetyn vika-ajan ja epäonnistuneen PJK:n vaikutus varistorien ulkoisen vian energiakertymään ja hintaan. Hinnassa ei ole huomioitu sisäistä vikaa.

Verkkomalli		Kesä			Talvi
Vika-aika		70 ms	100 ms	70 + 65 ms	70 ms
Energiakertymä	Keskiarvo (MJ)	13,1	17,3	20,7	14,5
	Maksimi (MJ)	24,4	33,1	34,8	25,6
	Minimi (MJ)	5,1	5,1	12,0	7,9
Hinta	Keskiarvo (t€)	78-157	52-104	62-124	87-174
	Yhteensä (M€)	1,0-2,0	1,3-2,7	1,6-3,2	1,1-2,3

Epäonnistuneen pikajälleenkytkennän mitoitusperiaatteisiin lisäämisen arvioitiin maksavan koko kantaverkolle verkolle yhteensä noin 0,6–1,2 M€ (taulukko 7.16). Kondensaattoriohituksen arvioitiin tapahtuvan ulkoisen vian epäonnistuneen jälleenkytkennän seurauksena koko kantaverkossa keskimäärin noin 25 vuoden välein, jos epäonnistunutta pikajälleenkytkentää ei huomioida mitoituksessa. Jos epäonnistunut PJK huomioidaan mitoituksessa, tapahtuu ohittuminen keskimäärin noin 420 vuoden välein. Riskiarvioissa käytettiin keskimääräistä pidempiä vika-aikoja, minkä vuoksi arviot ovat pessimistisiä. Toisaalta joissain vikapaikoissa epäonnistunut jälleenkytkentä saattaa aiheuttaa useamman sarjakondensaattorin ohittumisen.

Sarjakompensoidun siirtoyhteyden rinnakkaisen siirtoyhteyden johtokeskeytys saattaa tietyissä vikatilanteissa johtaa kondensaattorin ohittumiseen ulkoisessa viassa. Sisäisissä vioissa johtokeskeytysten ei havaittu aiheuttavan energiakertymän kasvua, joten keskeytykset eivät tulosten perusteella aiheuta varistorien termisen tuhoutumisen riskiä. Keskeytysten huomioiminen kaikkien kantaverkon 13 sarjakondensaattorin mitoitusperiaatteen aiheuttaisi varistorien investointikustannuksissa 1,4–2,8 M€:n lisäkustannuksen. Keskeytyksen aikaisen epäonnistuneen PJK:n huomioiva mitoitusperiaate aiheuttaisi kantaverkossa 3,7–7,5 M€:n varistorien lisäkustannuksen. Keskeytysten aikaisen AJK:n mukaan tehty mitoitus aiheuttaisi 6,4–13,5 M€:n lisäkustannuksen.

Kantaverkon nykyisten sarjakondensaattorien varistorien energiamitoitus on tehty verkon maksimioikosulkutehotilannetta kuvaavalla mallilla. Talven suurempi oikosulkuteho kasvatti kantaverkon sarjakondensaattorien varistorien vaihekohtaista sisäisen vian energiakertymää noin 0,5–3,5 MJ, kun kondensaattorit oletettiin kipinävälittömiksi. Ulkoisessa viassa oikosulkutehon vaikutus kantaverkon varistorien energiakertymään havaittiin olevan noin 0,6–2,9 MJ. Yhteensä kaikille kantaverkon sarjakondensaattoreille hintaero kesän ja talven oikosulkutehotilanteilla lasketuille mitoituksille on noin 220–450 t€.

Kipinävälittömyyden vaikutusta sarjakompensoidun voimajohdon johtokatkaisijoiden TRV-riskiin tutkittiin työssä AJ–PR-voimajohdon johtokatkaisijoille. Kipinävälittömyyden havaittiin kasvattavan erityisesti vakavampien yli 20 %:n ja yli 10 %:n IEC-verhoikäyrien ylitysten lukumäärää (taulukko 7.17) merkittävästi. Näiden voidaan luvussa 7.2.5 esitettyjen tutkimusten epävarmuuksien perusteella arvioida kuvaavan tilannetta, jossa katkaisijan todellinen TRV-kestoisuus on todennäköisesti ylittynyt. Vertaamalla taulukossa 7.17 esitettyjä tutkimusten 1 ja 6 tuloksia havaitaan, että kipinävälittömän sarjakondensaattorin aiheuttama TRV-riskitason suureneminen pystytään kompensoimaan käyttämällä nimellisjännitteeltään suurempia 550 kV:n johtokatkaisijoita.

Taulukko 7.17 Sarjakompensoidun kantaverkon johtokatkaisijoiden IEC-ylitysten keskimääräinen esiintymisväli, kun AJ–PR-voimajohtovälin johtokatkaisijoille eri tutkimuksissa (ks. taulukko 6.1) määritetty TRV-riski yleistetään koko kantaverkolle.

Tutkimus nro	Viiveet (ms)			Johtokatkaisijan nimellisjännite (kV)	Keskimääräinen esiintymisväli (vuotta)		
	Kipinäväli	Ohituskatkaisija	Johtokatkaisija (keskimääräinen)		Ylityksen suuruus >20 %	Ylityksen suuruus >10%	Ylityksen suuruus >0%
1	1,5	23,5	22,5	420	140	13	3,1
2	-	23,5	22,5	420	6,0	1,9	1,0
3	-	23,5	18	420	2,8	1,1	0,6
4	-	23,5	27	420	11	3,0	1,5
5	-	43,5	18	420	1,1	0,6	0,3
6	-	23,5	18	550	121	34	6,2

Nopeatoimisella johtokatkaisijalla TRV-riskin havaittiin olevan korkeampi kuin hitaalla johtokatkaisijalla. Johtokatkaisijan toiminta-ajan hidastuminen pienentää TRV-riskiä, mutta kasvattaa mahdollisuutta, että kondensaattoriohitus tapahtuu ulkoisessa viassa esimerkiksi epäonnistuneen pikajälleenkytkennän tai keskeytyksen seurauksena. Hitaalla ohituskatkaisijalla TRV-riskin havaittiin olevan suurempi kuin nopealla ohituskatkaisijalla. Nopeampi ohituskatkaisija tuottaa siis merkittäviä säästöjä varistorien investointikustannuksissa (taulukko 7.15) ja pienentää johtokatkaisijoiden TRV-riskiä (taulukko 7.17).

8. JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUSAIHEET

8.1 Johtopäätökset

Työn tulosten perusteella uudet sarjakondensaattorit suositellaan rakennettavan jatkossa kantaverkkoon kipinävälittömästi. Kipinävälittömyyden ansiosta sarjakondensaattorin ylijännitesuojaus yksinkertaistuu ja luotettavuus paranee. Kipinävälittömyys on työn tulosten perusteella investointikustannusten näkökulmasta kannattava ratkaisu, kun uusi sarjakondensaattori rakennetaan keskelle johtoa tai johdon päähän asemalle, jolta on enintään kaksi 400 kV:n johtolähtöä. Kun kipinävälitön sarjakondensaattori rakennetaan johdon päähän, on suositeltavaa välttää useiden 400 kV:n johtolähtöjen rakentamista asemalle.

Kipinävälittömään sarjakondensaattoriin kannattaa siirtyä suojaus- ja ohjausjärjestelmäusinnan yhteydessä, mikäli varistorien energiakapasiteetti on riittävä myös kipinävälittömässä tapauksessa. Sarjakondensaattoreilla, joiden nykyiset ohituskatkaisijat ovat selvästi hitaampia kuin markkinoiden nopeimmat ohituskatkaisijat, on suositeltavaa uusia ohituskatkaisijat nopeammiksi kipinävälin poistamisen yhteydessä. Työn tulosten perusteella sarjakondensaattorin nopealla ohituksella pystytään sekä pienentämään johtokatkaisijoiden TRV-riskiä että varistorien energiakertymää.

Kipinävälittömän sarjakondensaattorin ohituskatkaisijan toiminta on syytä testata säännöllisesti vuosihuoltojen yhteydessä, koska kipinävälittömän sarjakondensaattorin ohittaminen on mahdollista suorittaa ainoastaan ohituskatkaisijan avulla. Toisaalta luvussa 7.1.6 havaittiin, että sisäisessä viassa kondensaattoriohituksen viivästymisen muutamalla millisekunnilla esimerkiksi ohituskatkaisijan hidastumisen vuoksi ei aiheuta merkittävää riskiä varistorien termiselle tuhoutumiselle.

Kipinävälittömän sarjakondensaattorin havaittiin työssä kasvattavan johtokatkaisijoiden TRV-riskiä. Kun tutkimus suoritettiin käyttämällä 550 kV:n nimellisjännitteisten johtokatkaisijoiden TRV-verhokäyriä, havaittiin nimellisjännitteeltään suurempien johtokatkaisijoiden kompensoivan kipinävälin poistamisen aiheuttaman TRV-riskin kasvun. Sarjakompensoiduilla johdoilla, joille on asennettuna kipinävälitön sarjakondensaattori, on työn tulosten perusteella suositeltavaa käyttää johtokatkaisijoita, jotka täyttävät IEC-62271-100-standardin määrittämät 550 kV:n nimellisjännitteisen katkaisijan palaa- van jännitteen testit. Johtokatkaisijan suuremman nimellisjännitteen lisäksi muita mahdollisia tapoja laskea TRV-riskitasoa ovat muun muassa kondensaattorin suojausjännitteen laskeminen [10], sisäisen suojauksen ulottuvuuden kasvattaminen [54] tai metallioksidivaristorin asentaminen johtokatkaisijan rinnalle [53].

Työssä arvioitiin johtosuojauksen toiminta-aikojen perusteella 400 kV:n verkon vika-ajan olevan 99 %:lla vioista maksimissaan 70 ms. Jos varistorien ulkoisen vian ja kondensaattorin energiasuojan mitoittamiseen käytetään kaikilla kantaverkon sarjakondensaattoreilla 70 ms:n vika-aikaa, koko kantaverkossa tapahtuu kondensaattorin ohittuminen ulkoisessa viassa keskimäärin 726 vuoden välein. Riskiarvion perusteella varistorien mitoittamiseen on suositeltavaa käyttää ulkoisessa viassa 70 ms:n vika-aikaa.

Diplomityössä tehdyn riskiarvion perusteella jälleenkytkentöjä ei kannata huomioida energiamitoituksessa. Epäonnistuneiden jälleenkytkentöjen arvioitiin aiheuttavan koko kantaverkossa keskimäärin noin 25 vuoden välein kondensaattorin ohittumisen ulkoisessa viassa, kun varistorien mitoituksessa ei huomioida epäonnistuneita jälleenkytkentöjä. Epäonnistuneen jälleenkytkennän seurauksena tapahtuva sarjakondensaattorin ohittuminen ei tyypillisesti aiheuta verkossa stabiiliusongelmia, koska P1-siirto on harvoin lähellä siirtorajaa. Myöskään kondensaattoriohituksen aiheuttamalla vastaostokustannuksilla epäonnistuneiden jälleenkytkentöjen huomioimista mitoituksessa ei voida perustella.

Varistorien mitoitus kannattaa työn tarkastelujen perusteella tehdä normaalia verkon käyttötilannetta kuvaavalla verkkomallilla. Johtokeskeytystilanteessa pysyvän vian yhteydessä tapahtuva sarjakondensaattorin ohittuminen aiheuttaa todennäköisemmin verkon stabiiliusongelmia, koska keskeytystilanteessa P1-siirto on useammin lähellä siirtorajaa. Toisaalta keskeytystilanteen aikana tapahtuva pysyvä vika, joka johtaa sarjakondensaattorin ohittumiseen ulkoisessa viassa, on harvinaista. Jos sarjakondensaattorin ohittumattomana pysyminen haluttaisiin varmistaa kaikissa ulkoisissa vioissa, mitoitusperiaatteissa täytyisi huomioida myös keskeytysten aikaiset jälleenkytkennät. Johtokeskeytysten aikaisten jälleenkytkentöjen huomioiminen mitoitusperiaatteissa aiheuttaa kuitenkin merkittävän lisäkustannuksen. Työn tulosten mukaan keskeytystilanteet eivät aiheuta varistorien tuhoutumisriskiä.

Varistorien hajoaminen talvella tapahtuvassa viassa on häiriöiden vähäisen määrän ja ulkolämpötilan tuottaman varistorien lisäkapasiteetin vuoksi erittäin epätodennäköistä. Sarjakondensaattorin ohittuminen ulkoisessa viassa talvitilanteen suurempien vikavirtatasojen takia on työn tulosten perusteella epätodennäköistä, koska talven suurempi oikosulkuteho ei aiheuttanut merkittävää varistorien energiakertymän kasvua. Tyypillisesti 400 kV:n verkon viat tapahtuvat kesällä, joten diplomityössä suositellaan mitoitukseen käytettävän kesän oikosulkutehoon perustuvaa verkkomallia.

8.2 Suositeltavat jatkotutkimusaiheet

Luvussa 7.2.5 esitettyjen epävarmuustekijöiden vuoksi työssä määritetty TRV-riskiarvio ei todennäköisesti kuvaa todellista riskitasoa. Työn jatkotutkimuksena suositellaan TRV-riskiarvion tekemistä käyttäen IEC-standardin [13] T100-, T60-, T30- ja T10-verho-

käyristä interpoloituja verhoikäyriä. Tutkimus tulisi tehdä kipinävälittömän sarjakondensaattorin kanssa 550 kV:n ja kipinävälillisen sarjakondensaattorin kanssa 420 kV:n katkaisijan palaavan jännitteen verhoikäyriä interpoloimalla.

Toinen työn tuloksiin merkittävästi vaikuttava epävarmuus liittyy johtokatkaisijan TRV-kestoisuuden kasvuun viimeisen polvipisteen jälkeen. Jatkotutkimuksia varten on syytä selvittää, onko työssä tehty oletus oikea, ettei katkaisijan TRV-kestoisuus kasva viimeisen polvipisteen jälkeen.

Tämän työn yhteydessä tehdyt TRV-tarkastelut rajoittuivat Alajärvi–Pikkarala-voimajohtolle. Jotta koko kantaverkon TRV-riskiä voidaan luotettavammin arvioida, olisi tarkastelut syytä tehdä toisellakin sarjakompensoidulla voimajohtolla, joka voisi olla esimerkiksi toinen suunnitteilla olevista uusista voimajohtoista. Tutkimuksen luotettavuutta olisi mahdollista parantaa jakamalla voimajohto useampaan osaan, kuin tässä diplomityössä suoritetuissa tarkasteluissa on tehty. Jos mahdollisissa jatkotutkimuksissa todetaan TRV-riskin olevan merkittävä, on suositeltavaa tutkia luvussa 4.3.3 esitettyjen TRV-rajoitusmenetelmien sovellettavuutta Suomen sarjakompensoidulle kantaverkolle.

Tässä tutkimuksessa MOV-mitointukseen on käytetty vuotta 2025 kuvaavaa verkkomallia. Sarjakondensaattorin pitoaika on noin 40 vuotta, joten tutkimuksessa tehdyt mitoitukset olisi syytä tehdä verkkomallilla, joka edustaa parasta arviota verkon rakenteen ja oikosulkutehon kehittymisestä sarjakondensaattorin elinkaaren aikana. Vikavirtatasoilla ja erityisesti niihin voimakkaasti vaikuttavien tahtikoneiden määrällä ja sijoittumisella on merkittävä vaikutus sarjakondensaattorien varistorien energiakertymään.

Työssä tehty jälleenkytkentöjen riskiarvio perustui kiinteään 70 ms:n ulkoiseen vika-aikaan ja 65 ms:n epäonnistuneen jälleenkytkennän vika-aikaan. Riskiarvio olisi mahdollista tehdä myös luvussa 5.2 esitettyjen johtosuojauksen toiminta-aikajakaumien avulla, missä vika-aika muuttuu jokaisella simulointikierroksella. Tällöin riskiarvio vastaisi paremmin todellista epäonnistuneen jälleenkytkennän aiheuttamaa riskiä kondensaattoriohitukselle ulkoisessa viassa. Jälleenkytkentöjen lisäksi myös keskeytysten aiheuttamaa riskiä ulkoisen vian kondensaattoriohitukselle ja ohituksen aiheuttamien stabiiliusongelmien todennäköisyyttä olisi syytä tarkastella jatkotutkimuksissa.

9. YHTEENVETO

Työssä tutkittiin teknistaloudellisia reunaehtoja, joilla Suomen kantaverkossa olisi mahdollista siirtyä käyttämään kipinävälitöntä sarjakondensaattoria. Kipinävälin poistamisella halutaan yksinkertaistaa suojausjärjestelmää ja poistaa sarjakondensaattorin luotettavuuden kannalta ongelmallinen suojausjärjestelmän komponentti. Työn tulosten perusteella kipinävälitön sarjakondensaattori on investointikustannuksiltaan kipinävälillistä sarjakondensaattoria halvempi, kun uusi sarjakondensaattori rakennetaan keskelle johtoa. Johdon päähän asemalle rakennettavalle sarjakondensaattorille, jolta on useampi 400 kV:n johtolähtö, kipinävälittömyyden kannattavuus riippuu investointikustannusten näkökulmasta projektikohtaisista varistorien ja kipinävälikomponenttien hinnoista.

Kipinävälittömän sarjakondensaattorin havaittiin kasvattavan johtokatkaisijoiden TRV-riskiä. Parannusehdotuksena työssä tutkittiin suurempien 550 kV:n johtokatkaisijoiden käyttöä kipinävälittömän sarjakondensaattorin sisältämällä johto-osuuksilla. Työn tulosten perusteella 550 kV:n johtokatkaisija kompensoi kipinävälin poistamisen aiheuttaman TRV-riskin kasvun. Tutkimuksissa ohituskatkaisijan toiminnan hidastuminen ja johtokatkaisijan nopeutuminen kasvattivat TRV-riskiä. Toisaalta johtokatkaisijan toiminnan nopeutuminen pienentää kondensaattorin ohittumisriskiä ulkoisen vian johtokeskeytystilanteissa tapahtuvan vian tai epäonnistuneen jälleenkytkennän seurauksena.

Sarjakondensaattoreiden varistorien mitoitusperiaatteisiin liittyen työn keskeisin havainto on, ettei sarjakondensaattorin energiasuojan mitoittaminen 70 ms:n vika-ajalla aiheuta merkittävää riskiä kondensaattorin ohittumiselle ulkoisessa viassa. Vika-ajan arviointiin työssä olevan 99 %:n todennäköisyydellä maksimissaan 70 ms. Tulosten perusteella varistorien mitoittamiseen on suositeltavaa käyttää ulkoisessa viassa 70 ms:n vika-aikaa.

Varistorien mitoitukseen suositeltiin käytettävän keskimääräistä kesäpäivän oikosulkutehoa kuvaavaa mallia, koska talvella mitoituksen kannalta merkitseviä vikoja tapahtuu harvoin. Kondensaattorin virheellinen ohittuminen tai erityisesti varistorien hajoaminen talven suuremman oikosulkutehon takia ei ole tarkastelujen perusteella todennäköistä.

Epäonnistunut jälleenkytkentä aiheuttaa koko kantaverkossa keskimäärin kerran 25 vuodessa kondensaattorin ohittumisen ulkoisessa viassa, kun varistorien mitoituksessa ei huomioida jälleenkytkentöjä. Keskeytykset eivät työn tulosten perusteella aiheuta varistorien hajoamisriskiä, mutta kondensaattorin ohittuminen ulkoisessa viassa keskeytyksen takia on mahdollista. Epäonnistuneen PJK:n huomioiminen koko kantaverkon sarjakondensaattorin mitoitusperiaatteena aiheuttaa noin 0,6–1,2 M€:n lisäkustannuksen. Johtokeskeytystilanteiden huomioiminen ilman jälleenkytkentöjä lisää noin 1,4–2,8 M€ kustannuksia. Tulosten ja riskiarvioiden perusteella varistorien mitoitus kannattaa tehdä käyttämällä normaalin käyttötilanteen verkkomallia huomioimatta jälleenkytkentöjä.

LÄHTEET

- [1] T. Rauhala, J. Jyrinsalo ja H. Kuisti, *Enhancing the Transmission Capability using FACTS: The Finnish Experience*, London, UK: 9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, 2010.
- [2] A. Itäpää, Haastateltava, *Vanhempi asiantuntija, siirtokyklaskenta, Fingrid Oyj*. [Haastattelu] 6.2.2018.
- [3] J. Koski, ”Sarjakondensaattorien luotettavuus ja kunnonhallinta”, Diplomityö, 2015.
- [4] K. Nepola, Haastateltava, *Fingrid Oyj, Asiantuntija, FACTS*. [Haastattelu] Useita ajankohtia.
- [5] Fingrid Oyj, *MAXIMO-omaisuudenhallintajärjestelmä*, 2017.
- [6] M. Hernesniemi, *Keminmaa FSC revamp, Spark Gap Study*, GE, rajoitettu saatavuus, 2016.
- [7] ABB, *LTB 1/72,5-245/420-550E1 with operating mechanism BLG 1002AS 1-pole operation: Assembly instructions*, rajoitettu saatavuus.
- [8] ABB, *Asmunti projektidokumentaatio: Bypass breaker site tests*, Sisäinen dokumentti.
- [9] CIGRE Technical Brochure 693, *Experience with equipment for series and shunt compensation*, CIGRE A3.33, 2017.
- [10] A. Alfredsson, *Analysis and proposal for standardization of transient recovery voltages on series compensated lines*, Rio de Janeiro, Brazil: Cigre International Technical Colloquium, September 12th-13th, 2007.
- [11] G. Asan, E. Cinieri ja F. Iliceto, *TRVs Across Circuit Breakers of Series Compensated Lines. Status with Present Technology and Analysis fo the Turkish 420-kV Grid*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 7, No. 2, April, 1992.
- [12] P. Datka, K. Narendra, H. Eriksson, A. Harjula, R. Le Roux ja P. Marken, *Transient Recovery Voltage (TRV) and Rate of Rise of Recovery Voltage (RRRV) of Line Circuit Breakers in Over Compensated Transmission Lines*, Paris: Cigre US National Committee 2017 Grid of the Future Symposium, 2017.

- [13] International Standard IEC 62271-100, *High-voltage switchgear and controlgear - Part 100: Alternating-current circuit-breakers*, 2008.
- [14] L. Haarla ja J. Elovaara, *Sähköverkot II*, Helsinki: Otatieto, 2011.
- [15] International Standard IEC 60143-1, "Series capacitors for power systems - Part 1: General", 2015.
- [16] J. Jyrinsalo ja R. Hirvonen, *Increasing the utilisation of the Finnish 400 kV grid*, Singapore: In Proc. of International Conference on Energy Management and Power Delivery, 1995.
- [17] Fingrid Oyj, "Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2017-2027", 2017. [Verkkosivu]
Saatavissa:
<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/kantaverkon-kehittamissuunnitelma-2017-2027.pdf> [Haettu 12.3.2018].
- [18] Fingrid Oyj, "Suomen ja Ruotsin kantaverkkoyhtiöt etenevät uuden siirtoyhteyden rakentamisessa – tavoitteena saada yhteys käyttöön vuoteen 2025 mennessä", 16.12.2016. [Verkkosivu] Saatavissa:
<http://www.fingrid.fi/fi/ajankohtaista/tiedotteet/Sivut/Suomen-ja-Ruotsin-kantaverkkoyhti%C3%B6t-etenev%C3%A4t-uuden-siirtoyhteyden-rakentamisessa.aspx> [Haettu 4.9.2017].
- [19] Fingrid Oyj, "Fingrid luo mahdollisuuksia sähköjärjestelmän murrokselle: Megainvestointeja ja ehdotuksia konkreettisista uudistuksista sähkömarkkinoille", 5.4.2017. [Verkkosivu] Saatavissa:
<http://www.fingrid.fi/fi/ajankohtaista/tiedotteet/Sivut/Fingrid-luo-mahdollisuuksia-s%C3%A4hk%C3%B6j%C3%A4rjestelm%C3%A4n-murrokselle.aspx> [Haettu 10.10.2017].
- [20] A. Harjula, Haastateltava, *Fingrid Oyj, Vanhempi asiantuntija, verkkosuunnittelu*. [Haastattelu] Useita ajankohtia.
- [21] A. Harjula, *Sarjakompensointiselvitys*, Fingrid Oyj, Sisäinen muistio, 2017.
- [22] K. Nepola, *Sarjakondensaattorien suunnittelun, rakentamisen ja kunnossapidon periaatteet*, Fingrid Oyj, Sisäinen muistio, 2017.

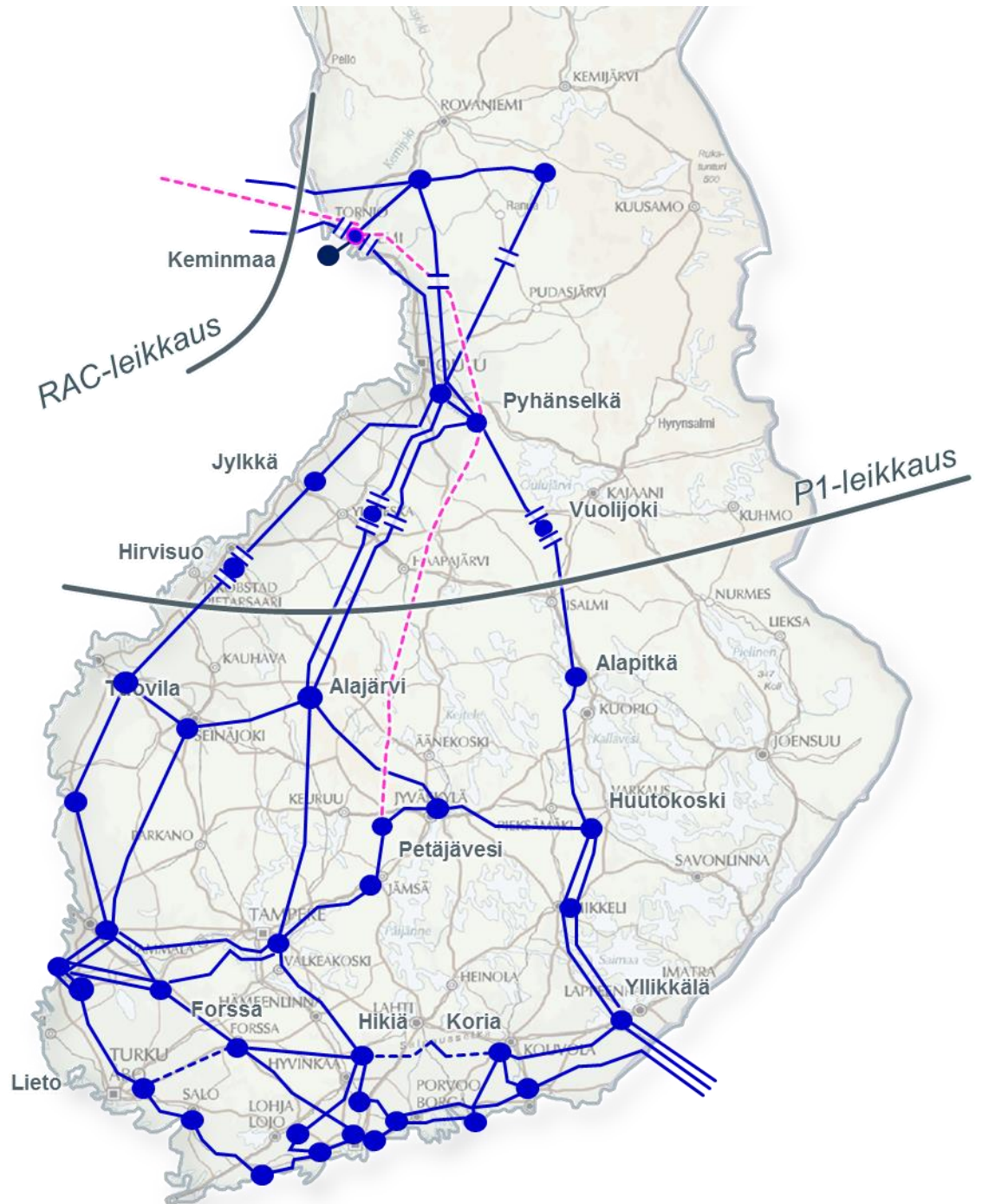
- [23] Energiavirasto, *1. suuntaviivat valvontamenetelmiksi neljännellä 1.1.2016 - 31.12.2019 ja viidennellä 1.1.2020 - 31.12.2023 valvontajaksolla*, 2015.
- [24] ENTSO-E, "Principles for Determining the Transfer Capacities in the Nordic Power Market", 8.2.2017. [Verkkosivu] Saatavissa: <https://www.nordpoolspot.com/globalassets/download-center/tso/principles-for-determining-the-transfer-capacities.pdf> [Haettu 12.3.2018].
- [25] Electrical Engineering Portal, "Providing capacitive reactive compensation with shunt capacitor banks", 3.12.2014. [Verkkosivu] Saatavissa: <http://electrical-engineering-portal.com/providing-capacitive-reactive-compensation-with-shunt-capacitor-banks> [Haettu 13.3.2018].
- [26] Siemens AG Energy Management, *Fixed Series Compensator*, Rajoitettu saatavuus, 2016.
- [27] International Standard IEC 60143-2, *Protective equipment for series capacitor banks*, 2012.
- [28] International Standard IEC 60099-4, *Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems*, 2004.
- [29] M. Aro, J. Elovaara, M. Karttunen, K. Nousiainen ja V. Palva, *Suurjännitetekniikka*, Otatieto, 2003.
- [30] M. Masti, "MOV Study 2xFSC, Finland", GE, rajoitettu saatavuus, 2017.
- [31] "INMR Article", 10.12.2016. [Verkkosivu] Saatavissa: <http://www.inmr.com/mov-protection-series-capacitor-banks/> [Haettu 13.7.2017].
- [32] T. Hänninen, *FSC improvement proposals*, GE Grid Solutions, Rajoitettu saatavuus, 2018.
- [33] Fingrid Oyj, *Series Capacitor Specification HS2*, Sisäinen muistio, 2015.
- [34] E. Elfving, *MOV study, SC Asmunti/Tuomela / 400 kV, VARISTORI, TUTKIMUS*, Sisäinen selvitys, ABB AB, 2008.
- [35] ABB, *Component Description - CapThor*, Rajoitettu saatavuus, 2014, s. 6.
- [36] T. Hänninen, *KI-0-P-105 Protection Co-ordination Study*, GE Grid Solutions, Rajoitettu saatavuus, 2017.

- [37] Siemens AG Energy Management, *FSCs Hirvisuo: 5a Protection Coordination*, Sisäinen dokumentti, 2015.
- [38] E. Elfving, *Series Capacitor Protections and Setting list for Asmunti and Tuomela*, Sisäinen dokumentti, 2009.
- [39] R. Smeets, A. Hofstee, L. -R. Jänicke ja M. Pungner, *High-current switching protective equipment in capacitor banks for series compensation of very long overhead lines*, Paris: CIGRE Conference, paper A3-304, 2006.
- [40] M. Hernesniemi, *RE: Vuolijoen ACSC2 itsesytyminen*, GE Grid Solutions, Lead Design Engineer, FACTS. Sähköpostiviesti 22.3.2017. Vastaanottajat: K. Nepola, J. Grönholm.
- [41] J. Redlund, J. Fecteau, L. Paulsson ja L. L. -P. Rollin, "A New Fast Protective Device for High Voltage Series Capacitors", Power Engineering Society General Meeting. IEEE, Montreal, Que., Canada, 18-22 June 2006.
- [42] R. Gruenbaum, J. Rasmussen ja C. Li, "Series Capacitors for Increased Power Transmission Capability of a 500 kV Grid Intertie", Electrical Power and Energy Conference (EPEC), IEEE, London, Ontario, Canada, 10-12 October 2012.
- [43] Siemens AG Energy Management, *SIEMENS spark gap SIGAP Version: G02*, Rajoitettu saatavuus, 2015.
- [44] K. Nepola, *Kipinävälin virhetoiminnot/hajoamiset diplomityön teoriaosuuteen*, Sähköpostiviesti 10.1.2018. Vastaanottajat O-P Janhunen, T. Rauhala.
- [45] D. Dufournet, "Transient Recovery Voltages (TRVs) for High-Voltage Circuit Breakers Part 1", Alstom Grid, 18.9.2013. [Verkkosivu] Saatavissa: http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/switchgear/presentations/tp_files/2013-1_Thu_Dufournet.pdf [Haettu 12.3.2018].
- [46] C. L. Wagner, D. Dufournet ja G. F. Montillet, *Revision of the Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers of IEEE C37.011: A Working Group Paper of the High Voltage Circuit Breaker Subcommittee*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 1, January 2007.
- [47] R. W. Alexander ja D. Dufournet, *Transient Recovery Voltage (TRV) for High-Voltage Circuit Breakers*, Calgary, Canada: Tutorial IEEE Switchgear Committee, 16th October 2008.

- [48] IEEE Std C37.011-2011, *IEEE Guide for the Application of Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers*, New York, USA: IEEE Power & Energy Society, 28 November 2011.
- [49] T. Rauhala, *On factors affecting TRV in Finnish series compensated 400 kV network*, Fingrid Oyj, Julkaisematon selvitys, 2008.
- [50] S. Henschel, L. Kirscher ja M. C. Lima, *Transient Recovery Voltage at Series Compensated Transmission Lines in Piaui, Brazil*, Montreal, Canada: International Conference on Power Systems Transients (IPST'05), 19-23 June 2005.
- [51] B. Fang, Y. Guan, P. Guo, B. Zheng, Q. Ma, Y. Han ja S. Wang, *Simulation on TRV Characteristics and Limiting Methods of Series Compensated UHV Lines*, Pilsen, Czech Republic: The 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH2015), August 2015.
- [52] J -P Mikkola, *Fingrids FSC fleet study*, GE Grid Solutions, Julkaisematon selvitys, 2018.
- [53] B. Zheng, Z. Xiang, L. Ban, J. Lin, G. Nihong, G. Sun ja B. M Han, *TRV Phenomenon in Chinese 1100 kV UHV Series Compensated System*, Delft, The Netherlands: International Conference on Power Systems (IPST2011), 14-17 June 2011.
- [54] J -P Mikkola, *Fingrid's FSC fleet improvements study*, Julkaisematon selvitys, 2018.
- [55] H. Laine, *Keminmaa FSC revamp, Protection and Control System Specification*, Sisäinen dokumentti, 2017.
- [56] M. Holmgren, Haastateltava, *Erikoisasiantuntija, relesuojaus, Fingrid Oyj*. [Haastattelu] 20.10.2017 ja 12.3.2018.
- [57] A. Kuusela, ”Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset VJV2018”, Fingrid Oyj, 1.2.2018. [Verkkosivu] Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kayttovarma-sahkonsiirto/vjv2018-luonnos.pdf> [Haettu 13.3.2018].
- [58] Z. Gajic, *REL670 Version 2.2 High Speed Distance Protection*, ABB, Rajoitettu saatavuus, 2017.

- [59] Siemens AG, *Katkaisija 3AP2 FI-DCB*, Käyttöohje, Rajoitettu saatavuus, 2010.
- [60] T. Laitinen, *TRV / Katkaisijoiden toiminta-ajat*, Sähköpostiviesti 18.9.2008. Vastaanottajat: J. Naumanen, J. Suontausta, T. Rauhala, P. Lindblad, P. Yli-Salomäki.
- [61] International Standard IEC 62271-109, *Alternating-current series capacitor bypass switches*, 2006.
- [62] T. Laitinen, Haastateltava, *Vanhempi asiantuntija, kytkinlaitteet, Fingrid Oyj*. [Haastattelu] 23.10.2017.
- [63] Siemens, *Confirmation on Routine Tests Circuit Breaker*, Rajoitettu saatavuus, 2016.
- [64] T. Rauhala, *Sarjakondensaattorin ohituskatkaisijan vaimennuspiirin mahdollisesta vaikutuksesta katkaisijan yli vaikuttavaan palaavaan jännitteeseen*, Fingrid Oyj, Julkaisematon selvitys, 2008.
- [65] J. Tuominen, Haastateltava, *Järjestelmäsuunnittelun asiantuntija, Fingrid Oyj*. [Haastattelu] 19.3.2018.
- [66] V. Oinonen, T. Hänninen, M. Masti ja J -P Mikkola, Haastateltavat, *Projektipalaveri yrityksen GE Grid Solutions kanssa*. [Haastattelu] 3.11.2017.
- [67] J. Elovaara, Haastateltava, *Professori, johtava-asiantuntija, Fingrid Oyj*. [Haastattelu] Aihe: 400 kV:n kantaverkon viat. 28.2.2018.

LIITE A: SUOMEN 400 KV KANTAVVERKKKO



Kuva A.1 Kantaverkon 400 kV voimajohdot (sininen) ja suunnitteilla olevat RAC3 sekä P1 voimajohdot (punainen katkoviiva) [21]

LIITE B: JOHTOVIKOJEN LUKUMÄÄRÄ JA JAKAUTUMINEN SUOMEN 400 KV:N KANTAVERKOSSA

Taulukossa B.1 on esitetty johtovikojen lukumäärä Fingridin omistamilla 400 kV:n voimajohdoilla jaoteltuna vikatyypin mukaan. Alempien jännitetasojen viat eivät ole tutkimuksen kannalta kiinnostavia, koska muuntajan alajännitepuolella tapahtuvat viat eivät muuntajan suuren reaktanssin vuoksi aiheuta suuria kondensaattorin läpi kulkevia vikavirtoja eivätkä siten vaikuta varistorien suojaukseen. 110 kV:n ja 220 kV:n verkoissa tapahtuvilla vioilla ei myöskään ole vaikutusta 400 kV:n verkon johtokatkaisijoiden palautukseen.

Valitut tarkasteluvuodet ovat vuoden 2000 alusta vuoden 2017 loppuun asti. Vikamäärät on kerätty Fingridin hallinnoimasta Maximo -toiminnanohjausjärjestelmästä. Laskelmissa tietyn vuoden johtovikojen (sisältäen myös kiskoviat) kokonaismäärä on suhteutettu kyseisen vuoden lopussa Fingridin omistuksessa olleeseen 400 kV:n voimajohtopituuteen. Tämän jälkeen eri vuosien vikatiheyksistä on laskettu keskiarvo. Kun tämä kerrotaan tietyn vian esiintymistodennäköisyydellä, saadaan taulukon sarakkeen ”johtoviat vuodessa / 100 km” lukemat. Laskelmissa eri vikatyypin suhteelliset lukumäärät on laskettu koko datamäärästä. Taulukossa oletetaan vikojen tapahtuvan tasaisesti joka puolella 400 kV:n verkkoa.

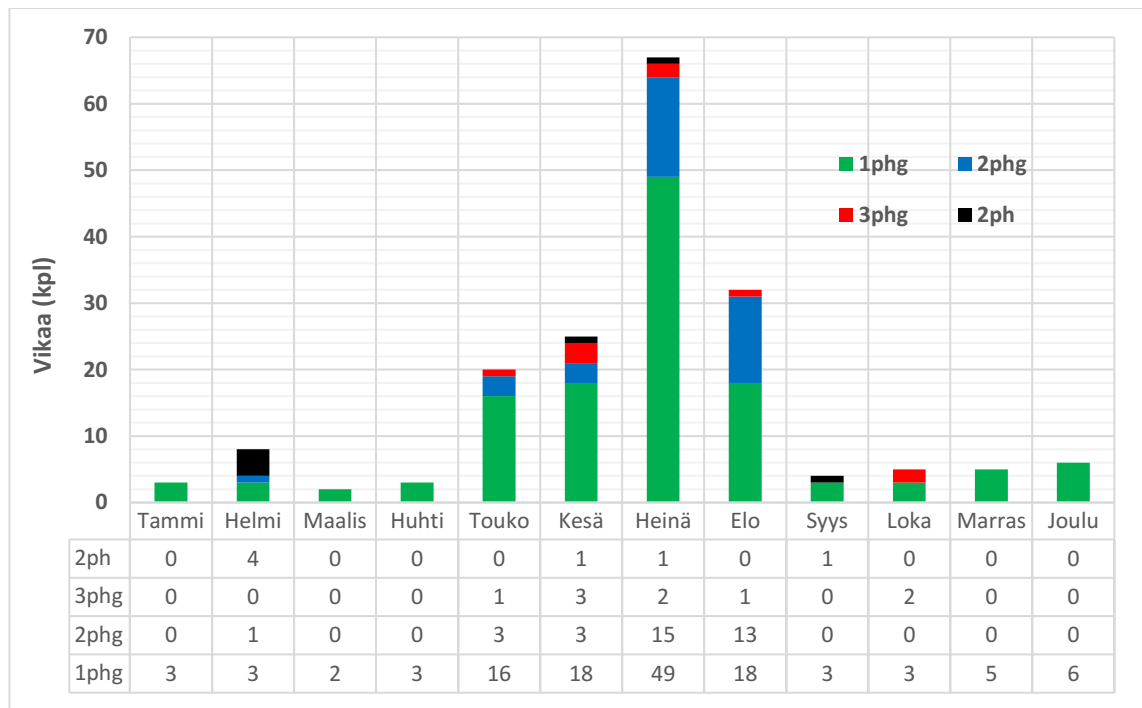
Taulukko B.1 Johtovikojen (ja kiskovikojen) lukumäärä Fingridin omistamilla 400 kV voimajohdoilla vuosina 2000-2017 jaoteltuna vikatyypin mukaan

Vikatyypin	Johtovikojen lukumäärä	Johtovikojen suhteellinen lukumäärä (%)	Johtoviat vuodessa	Johtoviat vuodessa / 100 km
1phg	130	70,65	7,22	0,1686
2ph	9	4,86	0,50	0,0117
2phg	36	19,57	2,00	0,0467
3phg	9	4,86	0,50	0,0117
Yhteensä	184	100	10,22	0,2386

Merkittävää on huomata johtovikojen jakautuminen 400 kV:n verkossa: Yli 70 % vioista on yksivaiheisia maasulkuja (1phg), joissa vikavirrat jäävät tyypillisesti pieniksi. Kolmivaiheisia vikoja on vioista ainoastaan noin 5 prosenttia, jolloin kolmivaiheinen vika tapahtuu keskimäärin 400 kV:n verkossa ainoastaan joka toinen vuosi. Tilastoissa ei oltu eritelty kolmivaiheisia maasulkuja (3phg) ja kolmivaiheisia oikosulkuja ilman maakosketusta (3ph) [5]. Työssä on oletettu, että kolmivaiheisiin vikoihin on kuitenkin sisällytetty myös maakosketus verkon rakenteen vuoksi. 3ph-vika on teoriassa mahdollinen, mutta käytännössä erittäin epätodennäköinen. Eräs mahdollinen 3ph-vian aiheuttava syy voisi

olla esimerkiksi jonkin erittäin ison (yli 10 m) kappaleen osuminen voimajohdolle. Todennäköisesti tällainenkin vika aiheuttaisi oikosulunvaiheiden välisen suuren etäisyyden vuoksi ensin kaksivaiheisen oikosulun. Kaikki ukkosen aiheuttamat ilmastolliset ylijännitteet sisältävät myös maakosketuksen. [67]

Kuvassa B.1 vuosina 2000–2017 tapahtuneet viat on jaettu kuukausittain. Kuvasta havaitaan suurimman osan vioista tapahtuneen kesäkuukausina. Yhteensä noin 82 % vioista on tapahtunut 1.5.–30.9. välisenä aikana. Helmikuussa tapahtuneet neljä 2ph- vikaa koostuvat samana päivänä yhdelle johdolle sattuneesta tuulen aiheuttamasta vaihejohtimien yhteen osumisesta. Tätä lukuun ottamatta talvi-kuukausina eli marraskuu–helmikuu välisenä aikana ei ole tapahtunut 3phg- tai 2ph-vikoja. Vikojen jakautumista eri kuukausille käytetään hyödyksi, kun pohditaan sitä, millaisella verkkomallilla varistorien energiamitoitus ja TRV-tarkastelu tulisi tehdä.



Kuva B.1 Johto- ja kiskovikojen lukumäärä Fingridin omistamilla 400 kV:n voimajohtoilla vuosina 2000–2017 lajiteltuna kuukausittain.

Taulukossa B.2 on esitetty Fingridin 400 kV:n verkon johtovikojen lukumäärä vioissa, jotka eivät ole menneet ohi PJK:lla. Taulukossa mainitussa ”ohi AJK:lla” viassa 400 kV:n johdolla on tapahtunut vika, joka on poistunut AJK:lla tai valvomon käsinkytkenällä. Käytännössä tämä tarkoittaa, että johdolla olevat komponentit (mukaan lukien sarjakondensaattori komponentteineen) ovat kokeneet ensin vian ja tämän jälkeen mahdollisesti epäonnistuneen pikajälleenkytkennän. Tilastoista ei ole haettu tietoa, onko viassa tehty epäonnistunut pikajälleenkytkentä. Mahdollisia syitä PJK:n väliin jättämiselle ovat esimerkiksi jälleenkytkentöjen estäminen johto-osuudelta, jälleenkytkentäreleen toimimattomuus esimerkiksi tahdissaolonvalvojureleen toiminnan vuoksi tai ongelma jälleenkyt-

kennän tekevän katkaisijan sulkemisessa. Taulukossa esitetyllä pysyvällä vialla taas esitetään tilannetta, jossa vika ei ole poistunut jälleenkytkennöillä tai käsinkytkennöillä. Tällöin johdolla olevat komponentit ovat kokeneet vian ja mahdollisesti pikajälleenkytkennän sekä aikajälleenkytkennän. Myös pysyvät viat sisältävät tilanteita, joissa jälleenkytkennän tekevän katkaisijan sulkeutuminen on jostain syystä estynyt. [5]

Taulukossa esitetyt johtoviat vuodessa sarakkeiden lukemat on laskettu tilastoista jakamalla tietyn vikatyypin vikojen lukumäärä tarkasteluvuosien (2000–2017) lukumäärällä. Johtoviat vuodessa/100 km on taas laskettu jakamalla johtoviat vuodessa sarakkeiden lukemat tarkasteluvuosien keskimääräisellä johtopituudella (4284 km) ja kertomalla 100 kilometrillä. Syynä taulukoiden B.1 ja B.2 erilaiselle 100 km:lle suhteutetun vikatodennäköisyyden laskennalle on taulukon B.2 vikojen pieni esiintymistodennäköisyys. Taulukoissa esitetyt lukuarvoja käytetään hyödyksi, kun työn soveltavassa osiossa pohditaan varistorien mitoitusperiaatteita ja johtokatkaisijan palaavan jännitteen riskiä.

***Taulukko B.2** Johtovikojen lukumäärä vioissa jotka eivät ole menneet PJK:lla ohi Fingridin omistamilla 400 kV voimajohdoilla vuosina 2000-2017 jaoteltuna vikatyypin mukaan.*

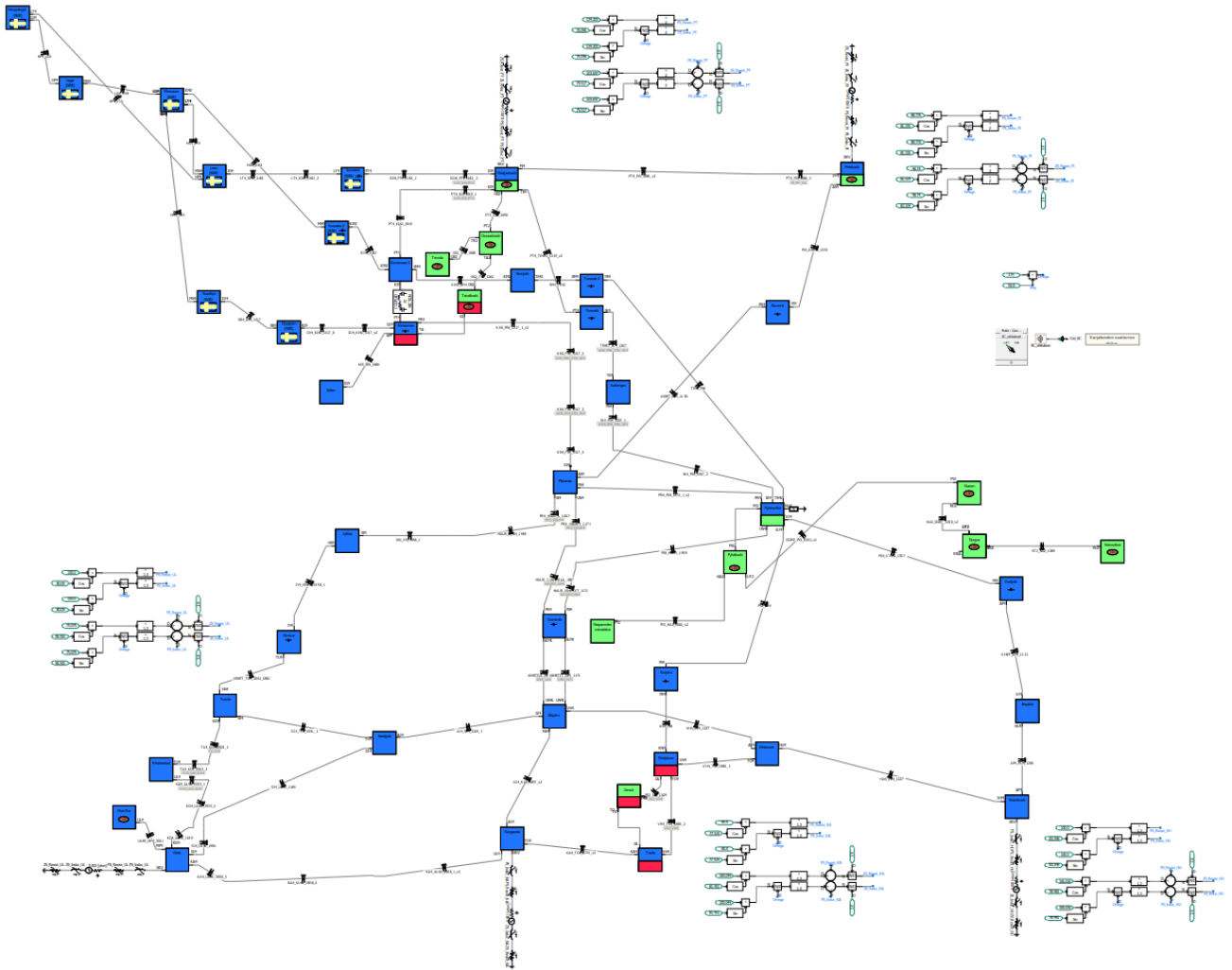
Vika- tyyppi	Johtoviko- jen luku- määrä: Ohi AJK:lla	Johtoviat vuodessa: Ohi AJK:lla	Johtoviat vuo- dessa/100 km: Ohi AJK:lla	Pysyvä vika	Pysyvät johtoviat vuodessa	Pysyvät joh- toviat vuo- dessa/100 km
1phg	20	1,111	2,59E-02	12	0,667	1,56E-02
2ph	5	0,278	6,48E-03	0	0	0
2phg	8	0,444	1,04E-02	1	0,056	1,3E-05
3phg	1	0,055	1,30E-03	1	0,056	1,3E-05
Yhteensä	34	1,889	0,0441	14	0,778	0,0182

LIITE C: KANTAVERKON SARJAKONDENSAATTORIEN SUOJAUSTASON JA VAIMENNUSPIIRIN ARVOT

Taulukko C.1 Tutkimuksessa käytettyjen sarjakondensaattoreiden suojaustason ja vaimennuspiirin arvot

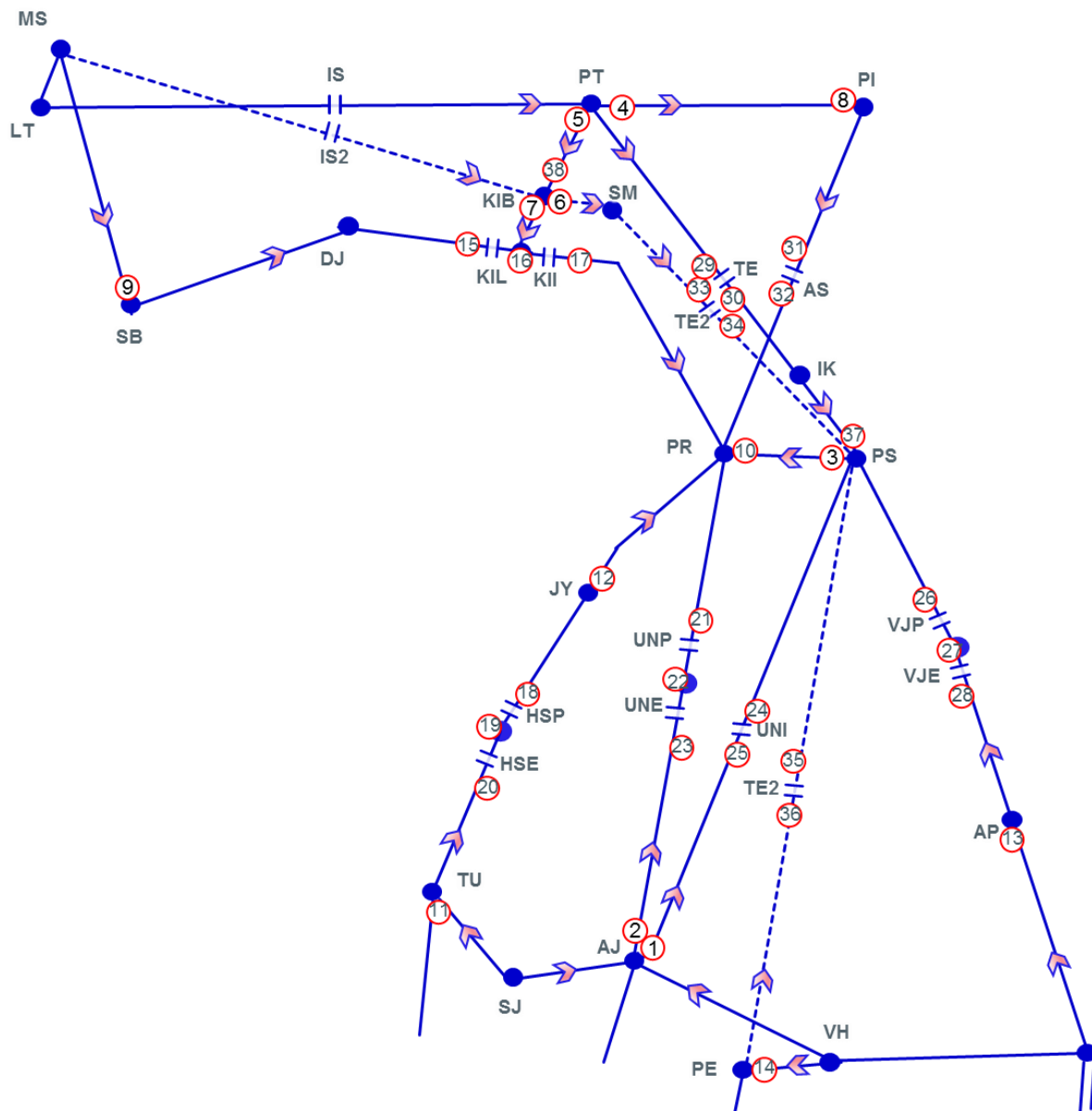
FSC	Suojaus- taso	Suojausjännite (kVp)	R(Ω)	L(μ h)
KIL	2,3	181,5	4	400
KII	2,3	181,5	4	400
UNI	2,3	245,9	4	360
UNE	2,3	123	4	250
UNP	2,3	123	4	250
VJP	2,3	116,1	4	250
VJE	2,3	116,1	4	250
TE	2,3	181,5	12	789,8
AS	2,25	217,6	12	670,3
HSP	2,31	96,2	3	350
HSE	2,31	140	4	500
TE2	2,3	307,4	4	250
KJ	2,3	614,8	4	250

LIITE D: PSCAD-MALLI



Kuva D.1 Työssä käytetty PSCAD-malli. Osa jännitelähde-ekvivalenteista (esimerkiksi Ruotsin voimajärjestelmää kuvaavat ekvivalentit) on sijoitettu mallissa asemakomponentin alle.

LIITE E: MOV-MITOITUSPERIAATTEIDEN TUTKIMISEEN KÄYTYT VIKAPAIKAT, KESKEYTYSTILANTEET JA JÄLLEENKYTKENTÖJEN SUUNNAT



Kuva E.1 Tutkimuksessa käytetyt vikapaikat ja jälleenytkentöjen jännitteennannon suunnat. Sarjakondensaattorien ulkoisia vikoja kuvaavat vikapaikat (1–14) ja sisäisiä vikoja vikapaikat 15–36. TE2 sarjakondensaattorin keskeytystilanteet tutkittiin vikapaikoilla 3, 7, 33, 34, 37 ja 38. Kuvaan merkityt nuolet kuvaavat mistä suunnasta jälleenytkennän jännite annetaan voimajohdon vikatilanteessa.

Taulukko E.1 Kantaverkon sarjakondensaattoreiden sisäisen vian alueet

FSC	SISÄISEN VIAN MÄÄRITTÄMÄT ASEMAT		
KIL	Svartby (SB)	Pikkarala (PR)	Keminmaa B (KIB)
KII	Svartby (SB)	Pikkarala (PR)	Keminmaa B (KIB)
UNI	Alajärvi (AJ)	Pyhänselkä (PS)	-
UNE	Alajärvi (AJ)	Pikkarala (PR)	-
UNP	Alajärvi (AJ)	Pikkarala (PR)	-
VJP	Pyhänselkä (PS)	Alapitkä (AP)	-
VJE	Pyhänselkä (PS)	Alapitkä (AP)	-
TE	Petäjaskoski (PT)	Pyhänselkä (PS)	-
AS	Pirttikoski (PI)	Pikkarala (PR)	-
HSP	Tuovila (TU)	Jylkkä (JY)	-
HSE	Tuovila (TU)	Jylkkä (JY)	-
TE2	Keminmaa B (KIB)	Pyhänselkä (PS)	-
KJ	Petäjävesi (PE)	Pyhänselkä (PS)	-

Taulukko E.2 Tuomela 2-sarjakondensaattorin tutkittavat keskeytystilanteet ja vikapaikat ulkoisissa sekä sisäisissä vioissa

Lyhenne	Keskeytyksessä oleva voimajohto	Ulkoiset vikapaikat	Sisäiset vikapaikat
NOC0	Ei keskeytyksiä	3, 7	33, 34
NOC1	PR-PS	37	33, 34
NOC2	PS-IK	3	33, 34
NOC3	MS-KI	7	33, 34
NOC4	KIB-PT	7	33, 34
NOC5	KIB-KI	38	33, 34

LIITE F: KIPINÄVÄLITTÖMÄN JA KIPINÄVÄLILLISEN SARJAKONDENSAATTORIN TRV-TULOKSET

Taulukossa F.1 on esitetty AJ–UNL-johtokatkaisijan ja taulukossa F.2 PR–UN-johtokatkaisijan TRV-tulokset kipinävälillisellä (tutkimus 1, ks. taulukko 6.1) ja kipinävälittömällä (tutkimus 2, ks. taulukko 6.1) sarjakondensaattorilla. Taulukossa on esitetty johtokatkaisijan napakohtaiset verhoikäyrän ylitykset ja kondensaattoriohituksen lukumäärät sekä TRV:n maksimi-arvo ja maksimi-arvon esiintymisajanhetki eri vikapaikoissa ja vikatyypeillä. IEC-ylitysten lukumäärä-sarakkeen ensimmäinen numero kertoo ylitysten lukumäärän ja toinen numero tutkimukseen hyväksytyjen napojen lukumäärä. Jos kaikki navat hyväksyttiin tutkimukseen, on toisen numeron suuruus 60.

Ohitukset luokiteltu kolmeen luokkaan: ei ohitusta (no Bypass eli no BP), yhden kondensaattorin ohitus (single BP) ja kummankin kondensaattorin ohitus (both BP). ”Ohitusten lkm”-sarakkeessa on esitetty informaatio, kuinka monta yhden kondensaattorin ohitusta ja kummankin kondensaattorin ohitusta on tapahtunut. Loput hyväksytyistä navoista on jäänyt ohittumatta.

AJ–UNL-johtokatkaisijan TRV-pinta-alakäyrät 3phg-vioissa on esitetty kuvissa F.1 (FPD off) ja F.2 (FPD on). Pinta-alakäyriässä on jokaisella ajanhetkellä (15 μ s) laskettu käyrien 50 %:n, 75 %:n, 95 %:n ja 100 %:n kertymät. Kuvaan on piirretty kaikki vaiheet niin, että ajanhetki 0s tarkoittaa hetkeä, kun katkaistavan vaiheen virta saavuttaa nollakohdan.

Suurin ero kipinävälillisen ja kipinävälittömän sarjakondensaattorin tapauksessa AJ–UNL-katkaisijan ylityksissä havaittiin olevan vikapaikoissa 13 ja 14 kolmivaiheisella maakosketuksen sisältävällä vialla (LLG), minkä vuoksi vikojen simuloidut käyräparvikuvan on esitetty kuvissa F.3, F.4, F.5 ja F.6.

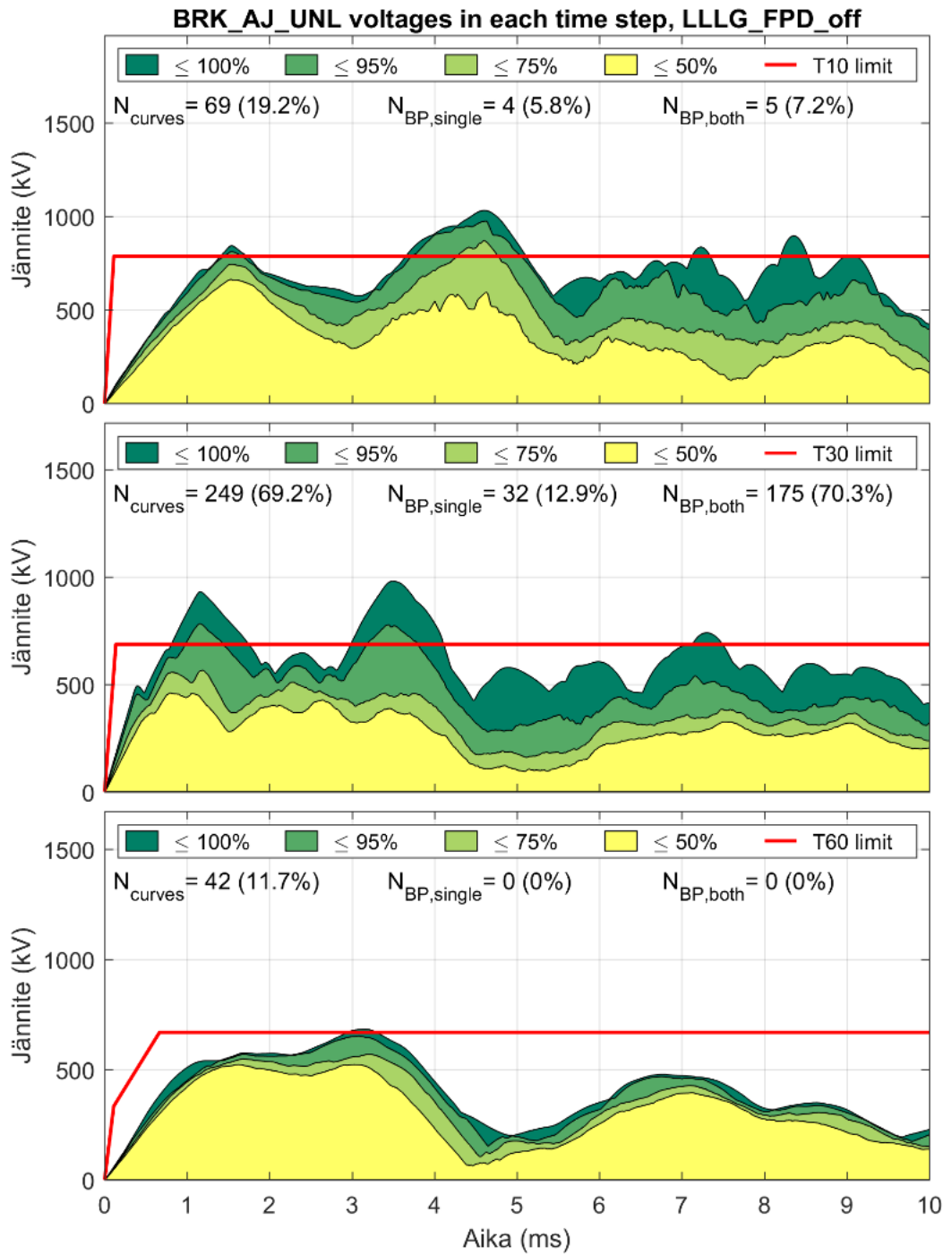
Jos kumpikaan kondensaattoreista ei tilanteessa ohitu, merkitään tilanteeksi no BP, joka käyräparvikuvissa on piirretty mustalla värillä. Jos toinen sarjakondensaattori eli UNP- tai UNE-sarjakondensaattori ohittuu ja toinen jää ohittumatta, merkitään ohituksen luokaksi single ja käyrä piirretään oranssilla värillä. Jos sekä UNP- että UNE-paristot ohituvat, tällöin luokaksi merkitään both, ja käyrä piirretään vihreällä värillä. Ohituksen kriteeriksi on valittu taulukossa 6.1 esitetty johtokatkaisijan avautumishetki. Napakohtaisia 0–4 ms:n satunnaisgeneraattorilla luotuja viiveitä ei ohituksen kriteerissä huomioida. Tämän vuoksi joissain yksittäisissä tilanteissa sarjakondensaattoriohitus saattaa vaikuttaa tuloksiin myös tilanteissa, joissa kondensaattoriohitus on merkitty tapahtuneeksi vasta johtokatkaisijan aukeamisajan jälkeen.

Taulukko F.1 AJ–UNL-johtokatkaisijan IEC-verhokäyrän ylitysten ja kondensaattoriohitusten lukumäärä eri vikapaikoissa ja vikatyypeillä, kun UNE- ja UNP-sarjakondensaattorit ovat kipinävälillisiä (FPD on) ja kipinävälittömiä (FPD off). Lisäksi taulukossa on esitetty TRV:n huippuarvon suuruus ja ajanhetki, jolla huippuarvo esiintyi.

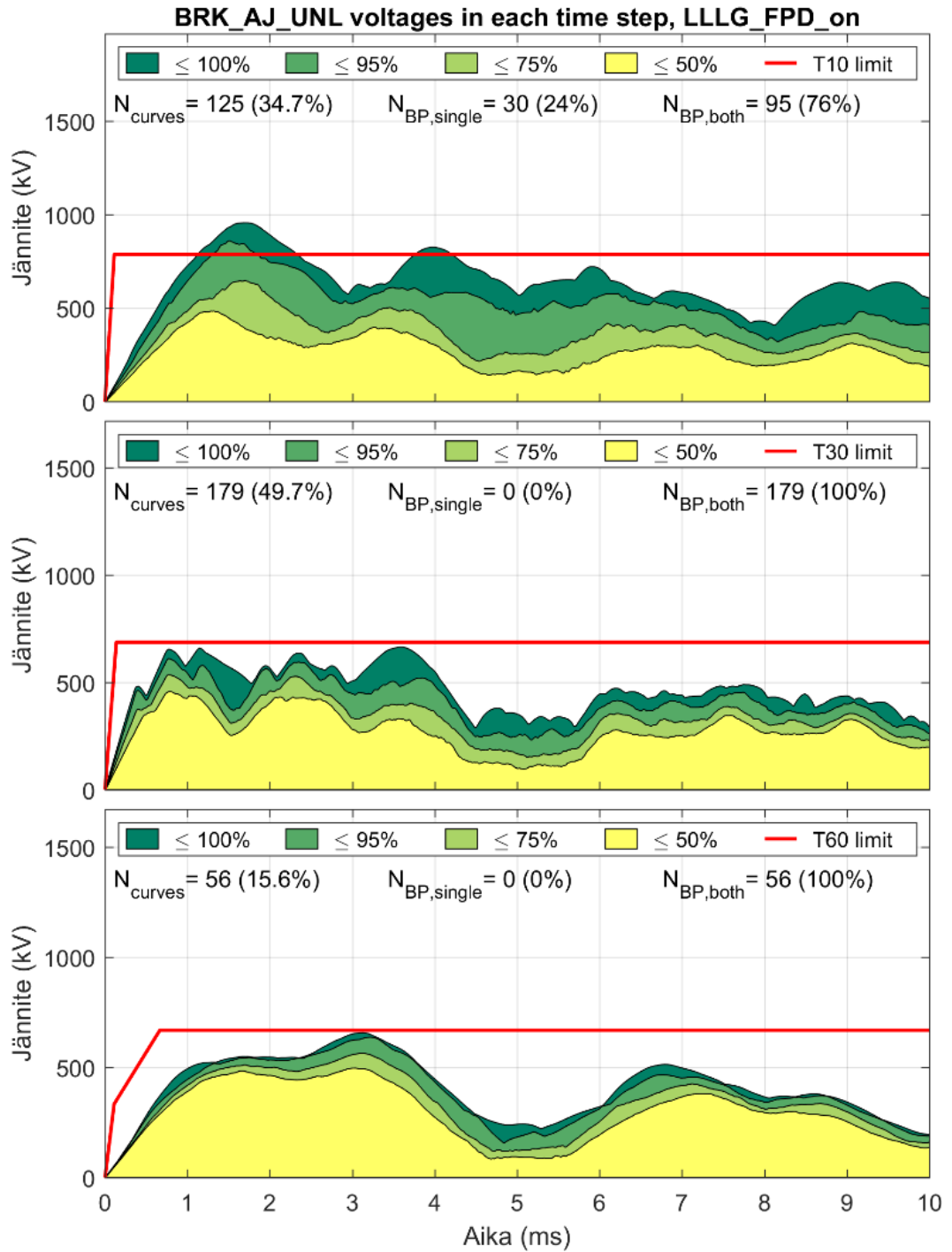
Vika- paikka	Vika- tyyppi	IEC-ylityksiä (ylityksiä/napojen lkm)		Ohitusten lkm (single/both)		Max TRV (kV)		MAX TRV ajanhetki (ms)	
		FPD on	FPD off	FPD on	FPD off	FP D on	FPD off	FPD on	FPD off
13	LG	0 / 60	0 / 60	0 & 0	0 & 0	638	638	6,72	6,72
	LL	2 / 60	7 / 60	15 & 18	0 & 0	845	845	4,58	4,58
	LLLG	20 / 60	34 / 60	30 & 30	0 & 0	957	1032	1,71	4,61
	LLG	10 / 60	12 / 60	20 & 19	0 & 0	913	860	1,68	6,09
14	LG	0 / 59	2 / 58	0 & 20	0 & 0	559	807	1,26	3,59
	LL	0 / 60	22 / 60	0 & 40	0 & 0	569	859	1,16	3,41
	LLLG	0 / 60	34 / 60	0 & 60	36 & 0	665	980	3,59	3,50
	LLG	0 / 60	21 / 60	11 & 40	33 & 0	676	910	1,16	1,17
15	LG	0 / 59	0 / 58	29 & 20	43 & 0	525	670	2,36	2,37
	LL	0 / 60	0 / 60	1 & 58	9 & 48	525	557	2,31	2,25
	LLLG	0 / 60	0 / 60	0 & 60	0 & 60	654	662	0,78	0,77
	LLG	0 / 59	0 / 59	0 & 59	0 & 59	550	622	0,81	0,80
16	LG	0 / 58	0 / 60	2 & 56	3 & 57	486	493	0,84	0,80
	LL	0 / 60	1 / 60	0 & 60	0 & 60	510	969	0,78	2,96
	LLLG	0 / 60	0 / 60	0 & 60	0 & 60	637	638	2,36	0,78
	LLG	0 / 60	0 / 60	0 & 60	0 & 60	599	614	0,78	0,78
17	LG	0 / 54	0 / 59	0 & 20	0 & 0	477	500	2,81	1,20
	LL	0 / 60	0 / 60	3 & 49	6 & 30	517	564	2,64	1,89
	LLLG	0 / 60	0 / 60	0 & 60	0 & 60	619	605	1,19	1,19
	LLG	0 / 59	0 / 57	4 & 52	6 & 42	558	594	2,78	1,19
18	LG	0 / 56	0 / 59	0 & 20	0 & 0	493	515	3,23	3,14
	LL	0 / 60	0 / 60	0 & 40	0 & 0	537	550	3,21	3,20
	LLLG	0 / 60	1 / 60	0 & 60	0 & 0	657	684	3,12	3,15
	LLG	0 / 60	0 / 60	0 & 40	0 & 0	542	565	3,18	2,06
Kaikki	LG	0 / 346	2 / 354	31 & 136	46 & 57	638	807	6,72	3,59
	LL	2 / 360	30 / 360	19 & 265	15 & 138	845	969	4,58	2,96
	LLLG	20 / 360	69 / 360	30 & 330	36 & 180	957	1032	1,71	4,61
	LLG	10 / 358	33 / 356	35 & 270	39 & 161	913	910	1,68	1,17
13	Kaikki	32 / 240	53 / 240	65 & 67	0 & 0	957	1032	1,71	4,61
14		0 / 239	79 / 238	11 & 160	69 & 0	676	980	1,16	3,50
15		0 / 238	0 / 237	30 & 197	52 & 167	654	670	0,78	2,37
16		0 / 238	1 / 240	2 & 236	3 & 237	637	969	2,36	2,96
17		0 / 233	0 / 236	7 & 181	12 & 132	619	605	1,19	1,19
18		0 / 236	1 / 239	0 & 160	0 & 0	657	684	3,12	3,15
Kaikki	Kaikki	32 / 1424	134 / 1430	115 & 1001	136 & 536	957	1032	1,71	4,61

Taulukko F.2 PR-UN-johtokatkaisijan IEC-verhokäyrän ylitysten ja kondensaattoriohitusten lukumäärä eri vikapaikoissa ja vikatyypeillä, kun UNE- ja UNP-sarjakondensaattorit ovat kipinävälillisiä (FPD on) ja kipinävälittömiä (FPD off).

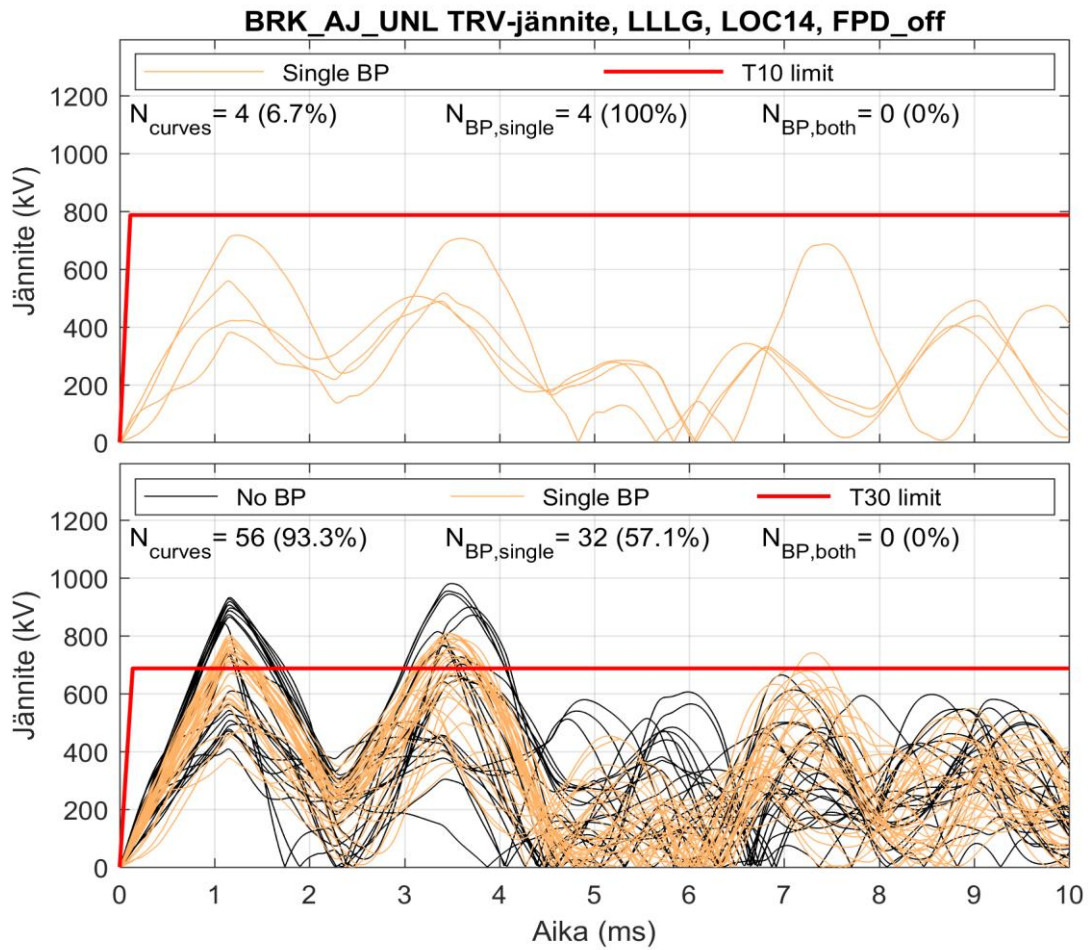
Vika- paikka	Vika- tyyppi	IEC-ylityksiä (ylityksiä / napojen lkm)		Ohitusten lkm (single & both)		Max TRV (kV)		MAX TRV ajanhetki (ms)	
		FPD on	FPD off	FPD on	FPD off	FPD on	FPD off	FPD on	FPD off
13	LG	0 / 59	0 / 59	0 & 0	0 & 0	539	539	2,49	2,49
	LL	1 / 60	0 / 60	15 & 18	0 & 0	685	563	1,59	3,18
	LLLG	35 / 60	31 / 60	30 & 30	0 & 0	753	760	2,52	2,24
	LLG	1 / 60	3 / 60	20 & 19	0 & 0	693	689	2,45	2,52
14	LG	0 / 59	0 / 59	0 & 20	0 & 0	480	496	2,10	2,07
	LL	0 / 60	0 / 60	0 & 40	0 & 0	583	576	1,97	1,94
	LLLG	4 / 60	4 / 60	0 & 60	36 & 0	710	727	2,03	2,03
	LLG	0 / 60	0 / 60	11 & 40	33 & 0	661	630	2,01	2,04
15	LG	0 / 59	0 / 58	29 & 20	43 & 0	533	543	0,86	2,45
	LL	0 / 60	0 / 60	1 & 58	9 & 48	576	551	2,33	2,31
	LLLG	0 / 60	10 / 60	0 & 60	0 & 60	683	728	2,42	0,80
	LLG	0 / 59	1 / 59	0 & 59	0 & 59	610	689	2,46	2,40
16	LG	0 / 57	0 / 60	2 & 55	3 & 57	518	488	2,45	2,48
	LL	0 / 60	1 / 60	0 & 60	0 & 60	533	805	2,34	0,80
	LLLG	0 / 60	1 / 60	0 & 60	0 & 60	676	694	2,48	0,80
	LLG	0 / 60	2 / 60	0 & 60	0 & 60	583	717	2,40	0,81
17	LG	0 / 54	5 / 58	0 & 20	0 & 0	506	869	1,19	1,2
	LL	0 / 60	4 / 60	3 & 49	6 & 30	543	842	1,17	3,42
	LLLG	0 / 60	3 / 60	0 & 60	0 & 60	653	734	1,17	1,17
	LLG	0 / 59	1 / 57	4 & 52	6 & 42	652	722	1,2	1,17
18	LG	0 / 57	1 / 58	0 & 20	0 & 0	564	794	1,64	1,62
	LL	0 / 60	6 / 60	0 & 40	0 & 0	594	827	1,55	1,55
	LLLG	1 / 60	33 / 60	0 & 60	0 & 0	828	963	1,53	4,47
	LLG	0 / 60	17 / 60	0 & 40	0 & 0	694	887	1,55	1,58
Kaikki	LG	0 / 345	6 / 352	31 & 135	46 & 57	564	869	1,64	1,2
	LL	1 / 360	11 / 360	19 & 265	15 & 138	685	842	1,59	3,42
	LLLG	40 / 360	82 / 360	30 & 330	36 & 180	828	963	1,53	4,47
	LLG	1 / 358	24 / 356	35 & 270	39 & 161	694	887	1,55	1,57 5
13	Kaikki	37 / 239	34 / 239	65 & 67	0 & 0	753	760	2,52	2,24
14		4 / 239	4 / 239	11 & 160	69 & 0	710	727	2,03	2,03
15		0 / 238	11 / 237	30 & 197	52 & 167	683	728	2,42	0,80
16		0 / 237	4 / 240	2 & 235	3 & 237	676	805	2,48	0,80
17		0 / 233	13 / 235	7 & 181	12 & 132	653	869	1,17	1,20
18		1 / 237	57 / 238	0 & 160	0 & 0	828	963	1,53	4,47
Kaikki	Kaikki	42 / 1423	123 / 1428	115 & 1000	136 & 536	828	963	1,53	4,47



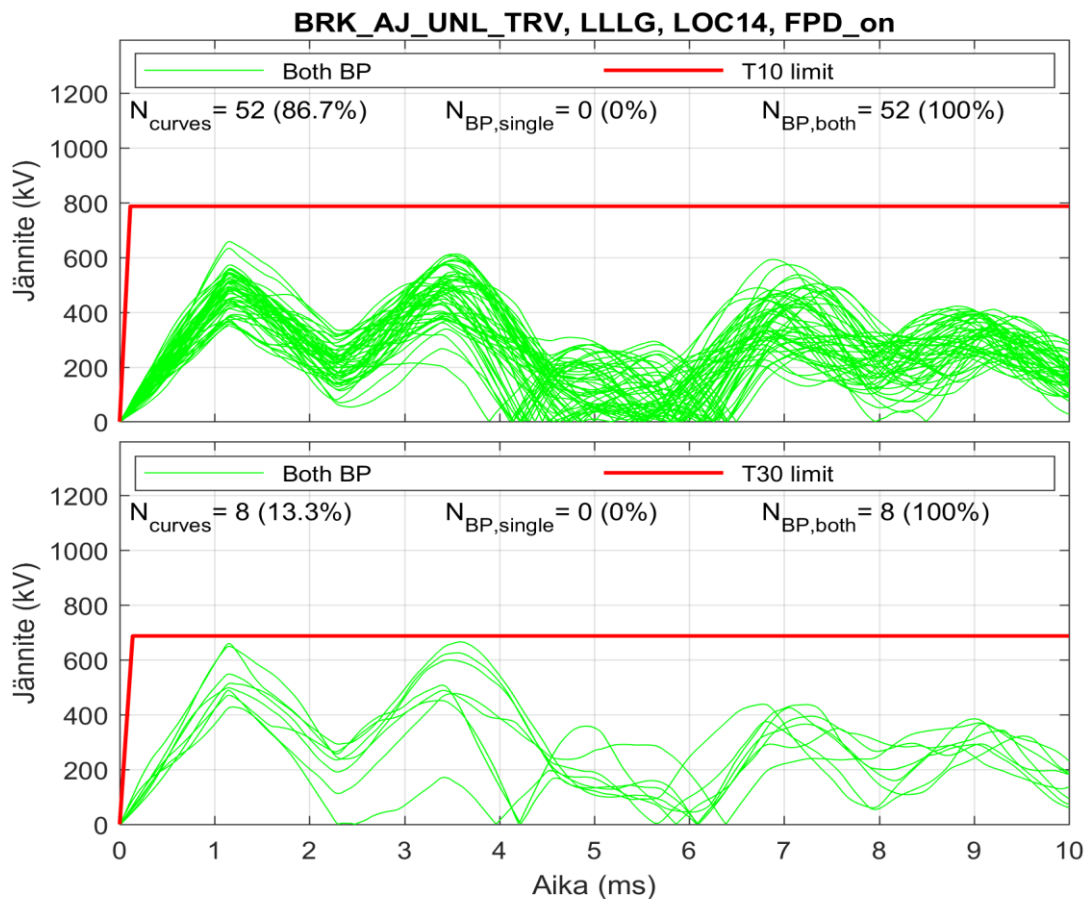
Kuva F.1 AJ-UNL-johtokatkaisijan TRV:n suuruus 3phg-viassa kaikissa vikapaikoissa, kun UNE- ja UNP-sarjakondensaattorit ovat kipinävälittömiä.



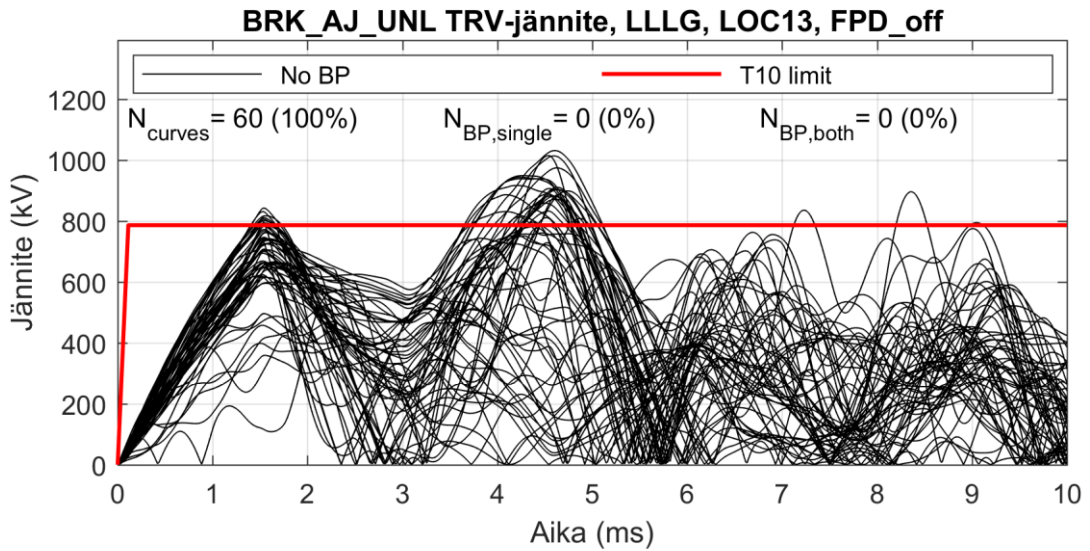
Kuva F.2 AJ-UNL-johtokatkaisijan TRV:n suuruus 3phg-viassa kaikissa vikapaikoissa, kun UNE- ja UNP-sarjakondensaattorit ovat kipinävälillisiä.



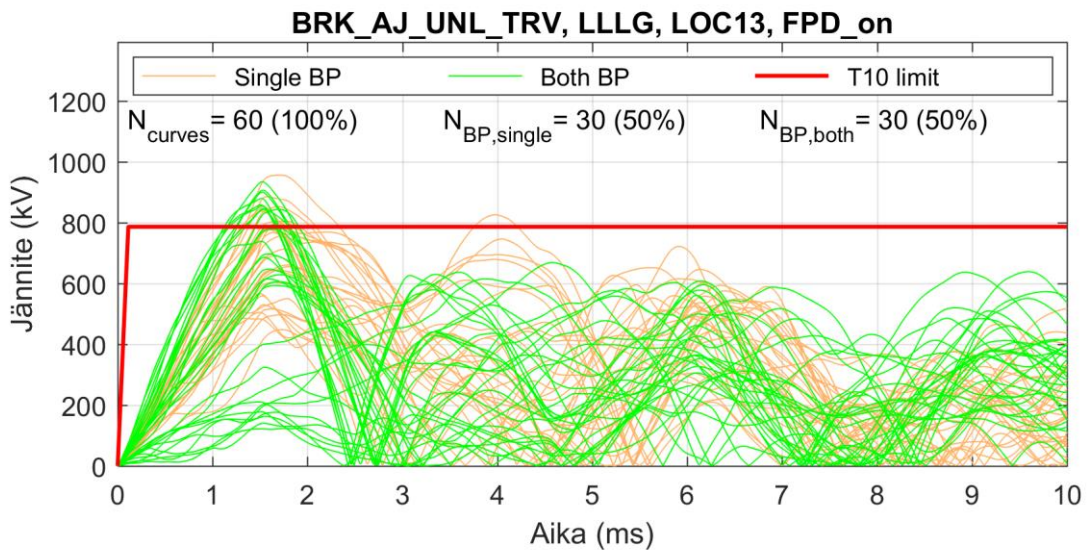
Kuva F.3 AJ-UNL -katkaisijan TRV:n suuruus 3phg-viassa vikapaikassa 14, kun UNE- ja UNP-sarjakondensaattorit ovat kipinävälittömiä



Kuva F.4 AJ-UNL-katkaisijan TRV:n suuruus 3phg-viassa vikapaikassa 14, kun UNE- ja UNP-sarjakondensaattorit ovat kipinävälillisiä



Kuva F.5 AJ-UNL -katkaisijan TRV:n suuruus 3phg-viassa vikapaikassa 13, kun UNE- ja UNP-sarjakondensaattorit ovat kipinävälittömiä



Kuva F.6 AJ-UNL -katkaisijan TRV:n suuruus 3phg-viassa vikapaikassa 13, kun UNE- ja UNP-sarjakondensaattorit ovat kipinävälillisiä.

LIITE G: JOHTOKATKAISIJAN JA OHITUSKATKAISIJAN TOIMINTA-AJAN VAIKUTUS TRV-RISKIIN

Taulukko G.1 AJ–UNL-johtokatkaisijan TRV-tulokset, kun johtokatkaisijan toiminta-aika on 18 ± 2 ms (tutkimus 3) tai 27 ± 2 ms (tutkimus 4, ks. taulukko 6.1).

Vika- paikka	Vika- tyyppi	IEC-ylityksiä / napojen lkm)		Ohitusten lkm (single & both)		Max TRV (kV)		MAX TRV ajanhetki (ms)	
		18 ms	27 ms	18 ms	27 ms	18 ms	27 ms	18 ms	27 ms
13	LLLG	41 / 60	24 / 60	0 & 0	0 & 0	1058	1046	4,55	4,62
14	LLLG	44 / 60	19 / 60	36 & 0	42 & 0	980	973	3,51	3,57
15	LLLG	0 / 60	0 / 60	0 & 60	0 & 60	662	618	0,77	2,28
16	LLLG	0 / 60	0 / 60	0 & 60	0 & 60	661	641	0,78	0,78
17	LLLG	0 / 60	0 / 60	0 & 60	0 & 60	629	598	2,73	1,17
18	LLLG	4 / 60	1 / 60	0 & 0	0 & 0	684	683	3,17	3,17
Kaikki	LG	10 / 359	0 / 344	48 & 56	46 & 59	829	778	1,64	3,51
	LL	60 / 360	22 / 360	15 & 138	18 & 150	1244	1126	4,53	3,14
	LLLG	89 / 360	44 / 360	36 & 180	42 & 180	1058	1046	4,55	4,62
	LLG	46 / 356	19 / 352	39 & 161	35 & 164	981	924	4,55	4,43
13	Kaikki	76 / 240	36 / 240	0&0	0&0	1244	1126	4,53	3,14
14		114 / 240	43 / 233	69&0	77&0	1044	1073	3,44	3,57
15		4 / 240	2 / 236	54&168	52&172	1091	788	2,39	2,36
16		2 / 238	2 / 237	3&235	0&237	991	864	3,02	0,83
17		0 / 237	0 / 235	12&132	12&144	662	598	1,13	1,17
18		9 / 240	2 / 235	0&0	0&0	1041	937	1,88	3,17
Kaikki	Kaikki	205 / 1435	85 / 1416	138 & 535	141 & 553	1244	1126	4,53	3,14

Taulukko G.2 PR–UN-johtokatkaisijan TRV-tulokset, kun johtokatkaisijan toiminta-aika on 18 ± 2 ms (tutkimus 3) tai 27 ± 2 ms (tutkimus 4, ks. taulukko 6.1).

Vika- paikka	Vika- tyyppi	IEC-ylityksiä / napojen lkm)		Ohitusten lkm (single & both)		Max TRV (kV)		MAX TRV ajanhetki (ms)	
		18 ms	27 ms	18 ms	27 ms	18 ms	27 ms	18 ms	27 ms
13	LLLG	33 / 60	34 / 60	0 & 0	0 & 0	764	747	2,39	2,51
14	LLLG	2 / 60	3 / 60	36 & 0	42 & 0	711	698	2,03	2,01
15	LLLG	8 / 60	8 / 60	0 & 60	0 & 60	721	718	2,43	0,80
16	LLLG	7 / 60	0 / 60	0 & 60	0 & 60	752	661	0,80	2,45
17	LLLG	3 / 60	0 / 60	0 & 60	0 & 60	710	661	1,16	1,17
18	LLLG	52 / 60	16 / 60	0 & 0	0 & 0	981	1011	1,56	4,46
Kaikki	LG	13 / 359	0 / 342	48 & 56	45 & 58	872	767	1,68	3,51
	LL	31 / 360	14 / 360	15 & 138	18 & 150	1217	1043	3,23	2,84
	LLLG	105 / 360	61 / 360	36 & 180	42 & 180	981	1011	1,56	4,46
	LLG	43 / 356	18 / 352	39 & 161	35 & 164	978	933	1,56	4,41
13	Kaikki	48 / 240	44 / 239	0 & 0	0 & 0	1062	1043	2,43	2,84
14		6 / 240	5 / 235	69 & 0	77 & 0	834	850	2,21	2,21
15		10 / 240	9 / 235	54 & 168	51 & 172	1079	864	2,34	2,31
16		14 / 238	2 / 236	3 & 235	0 & 236	796	806	0,80	2,30
17		30 / 237	0 / 235	12 & 132	12 & 144	898	767	1,17	3,51
18		84 / 240	33 / 234	0 & 0	0 & 0	1217	1011	3,23	4,46
Kaikki	Kaikki	192 / 1435	93 / 1414	138 & 535	140 & 552	1217	1043	3,23	2,84

Taulukko G.3 AJ–UNL-johtokatkaisijan TRV-tulokset, kun ohituskatkaisijan toiminta-aika on 23,5 ms (tutkimus 3) tai 43,5 ms (tutkimus 5, ks. taulukko 6.1).

Vika- paikka	Vika- tyyppi	IEC-ylityksiä (ylityksiä / napojen lkm)		Ohitusten lkm (single & both)		Max TRV (kV)		MAX TRV ajanhetki (ms)	
		23,5 ms	43,5 ms	23,5 ms	43,5 ms	23,5 ms	43,5 ms	23,5 ms	43,5 ms
13	LLLG	41 / 60	44 / 60	0 & 0	0 & 0	1058	1058	4,55	4,55
14	LLLG	44 / 60	56 / 60	36 & 0	0 & 0	980	980	3,51	3,51
15	LLLG	0 / 60	38 / 60	0 & 60	0 & 6	662	995	0,77	2,28
16	LLLG	0 / 60	16 / 60	0 & 60	0 & 3	661	787	0,78	0,77
17	LLLG	0 / 60	0 / 60	0 & 60	0 & 3	629	686	2,73	1,17
18	LLLG	4 / 60	4 / 60	0 & 0	0 & 0	684	684	3,17	3,17
Kaikki	LG	10 / 359	25 / 360	48 & 56	0 & 3	829	829	1,64	1,64
	LL	60 / 360	83 / 360	15 & 138	0 & 3	1244	1244	4,53	4,53
	LLLG	89 / 360	158 / 360	36 & 180	0 & 12	1058	1058	4,55	4,55
	LLG	46 / 356	77 / 360	39 & 161	0 & 9	981	981	4,55	4,55
13	Kaikki	76 / 240	78 / 240	0 & 0	0 & 0	1244	1244	4,53	4,53
14		114 / 240	139 / 240	69 & 0	0 & 0	1044	1044	3,44	3,44
15		4 / 240	97 / 240	54 & 168	0 & 12	1091	1238	2,39	3,80
16		2 / 238	17 / 240	3 & 235	0 & 9	991	914	3,02	1,31
17		0 / 237	3 / 240	12 & 132	0 & 6	662	773	1,13	3,42
18		9 / 240	9 / 240	0 & 0	0 & 0	1041	1041	1,88	1,88
Kaikki	Kaikki	205 / 1435	343 / 1440	138 & 535	0 & 27	1244	1244	4,53	4,53

Taulukko G.4 PR–UN-johtokatkaisijan TRV-tulokset, kun johtokatkaisijan toiminta-aika on 23,5 ms (tutkimus 3) tai 43,5 ms (tutkimus 5, ks. taulukko 6.1).

Vika- paikka	Vika- tyyppi	IEC-ylityksiä (ylityksiä / napojen lkm)		Ohitusten lkm (single & both)		Max TRV (kV)		MAX TRV ajanhetki (ms)	
		23,5 ms	43,5 ms	23,5 ms	43,5 ms	23,5 ms	43,5 ms	23,5 ms	43,5 ms
13	LLLG	33 / 60	33 / 60	0 & 0	0 & 0	764	764	2,39	2,39
14	LLLG	2 / 60	7 / 60	36 & 0	0 & 0	711	711	2,03	2,03
15	LLLG	8 / 60	21 / 60	0 & 60	0 & 6	721	819	2,43	0,80
16	LLLG	7 / 60	36 / 60	0 & 60	0 & 3	752	1008	0,80	2,43
17	LLLG	3 / 60	49 / 60	0 & 60	0 & 3	710	1029	1,16	3,59
18	LLLG	52 / 60	59 / 60	0 & 0	0 & 0	981	981	1,56	1,56
Kaikki	LG	13 / 359	29 / 360	48 & 56	0 & 3	872	872	1,68	1,68
	LL	31 / 360	88 / 360	15 & 138	0 & 3	1217	1217	3,23	3,23
	LLLG	105 / 360	205 / 360	36 & 180	0 & 12	981	1029	1,56	3,59
	LLG	43 / 356	101 / 360	39 & 161	0 & 9	978	987	1,56	4,94
13	Kaikki	48 / 240	48 / 240	0 & 0	0 & 0	1062	1062	2,43	2,43
14		6 / 240	11 / 240	69 & 0	0 & 0	834	834	2,21	2,21
15		10 / 240	32 / 240	54 & 168	0 & 12	1079	975	2,34	2,36
16		14 / 238	105 / 240	3 & 235	0 & 9	796	1163	0,80	3,99
17		30 / 237	134 / 240	12 & 132	0 & 6	898	1091	1,17	4,02
18		84 / 240	93 / 240	0 & 0	0 & 0	1217	1217	3,23	3,23
Kaikki	Kaikki	192 / 1435	423 / 1440	138 & 535	0 & 27	1217	1217	3,23	3,23