

SAVONIA

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

KESKIJÄNNITETUOTANNON LIIT- TÄMISPERIAATTEIDEN TARKAS- TELU

Kajave Oy

TEKIJÄ Veli-Pekka Ahonen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä(t) Veli-Pekka Ahonen			
Työn nimi Keskijännitetuotannon liittämisperiaatteiden tarkastelu			
Päiväys	20.5.2024	Sivumäärä/Liitteet	47+0
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Kajave Oy			
<p>Sähkön hajautetun tuotannon viimeaikainen positiivinen kehitys ja lähitulevaisuuden voimakas kasvuennuste asettaa paikallisesta sähköjakelusta vastaavat verkkoyhtiöt uuteen tilanteeseen. Alueellisesti sijoittunut sähköntuotanto haastaa perinteinen yhden syöttösuunnan sähköjakeluverkon käyttövarmuutta ja turvallisuutta. Tähän saakka tuotanto on keskittynyt yleensä suuriin puistomaisiin kokonaisuuksiin ja liitetty pääsääntöisesti suurjännitteiseen jakeluverkkoon taikka pieninä yksittäisinä kuluttajakohtaisina tuotantoyksikköinä pienjännitteiseen jakeluverkkoon. Nyt etenkin keskijännitteiseen jakeluverkkoon liitettävien tuotantoyksiköiden tehonkasvu ja tuotantoliittymien kysynnän voimakas lisääntyminen edellyttää sähköjakelusta paikallisesti vastaavien siirtoyhtiöiden tunnistamaan kaksisuuntaisen sähkösyötön vaikutukset keskijännitteiseen jakeluverkkoon ja sitä kautta määrittelemään liittymisen ehtoja entistä tarkemmin käyttöturvallisen ja laadukkaan jakelun turvaamiseksi. Tällä hetkellä käytännössä ainoana liittämisten määrää rajoittavana tekijänä on alueellinen kantaverkon varattavissa oleva vapaa kapasiteetti voimakkaasti kasvavalle hajautetulle tuotannolle.</p> <p>Tässä opinnäytetyössä tutkittiin hajautetun tuotannon vaikutuksia ja liittämisessä huomioitavia asioita keskijänniteverkossa. Tutkimus perustui kirjalliseen lähdeaineistoon ja pääpainona tutkimuksessa oli suojausten tarkastelu ja liittymispisteen sijoittumisen edellyttämät vaatimukset.</p> <p>Työn tarkoituksena oli muodostaa näkemys Kajavelle soveltuvista periaatteista hajautetun keskijännitetuotannon liittämiseksi, ja näin edesauttaa mahdollisesti myöhemmin julkaistavan keskijännitetuotannon liittymisohjeen tekemistä. Yhtiökohtaisille periaatteille on tarvetta myös toimialalta osittain puuttuvan yhteisen keskijänniteverkon tuotantoliittymien liittämiseksi huomioitavien teknisten käytänteiden ja suositusten vuoksi.</p> <p>Työn tuloksena saatiin muodostettua suosituksia ja periaatteellisia ratkaisuja hajautetun tuotannon liittämiseksi Kajaven keskijännitteiseen jakeluverkkoon.</p>			
Avainsanat Hajautettu sähköntuotanto, Keskijännite			

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Electrical and Automation Engineering	
Author(s) Veli-Pekka Ahonen	
Title of Thesis Examination of medium-voltage electricity production connection principles	
Date 20.5.2024	Pages/Appendices 47+0
Client Organisation /Partners Kajave Oy	
<p>The recent positive development of decentralized electricity production and the strong growth forecast for the near future place the local grid companies responsible for electricity distribution in a new situation. Locally situated electricity production challenges the reliability and safety of traditional single-direction electricity distribution networks. So far, production has generally been concentrated in large park-like entities, primarily connected to the high-voltage grid, or as small individual consumer-specific production units connected to the low-voltage grid. Now, especially with the increasing power output of production units connected to the medium-voltage grid and the strong increase in demand for production connections, it is necessary for transmission companies responsible for local electricity distribution to identify the effects of bidirectional power supply on their medium-voltage grids and thereby define connection conditions more precisely to ensure safe and high-quality distribution. Currently, the only practical limiting factor for connections is the available free capacity in the regional transmission grid for the rapidly growing decentralized production.</p> <p>In this thesis, the effects of distributed generation and considerations for integration in the medium-voltage grid were examined. The study was based on literature sources, with a primary focus on examining protections and the requirements for the placement of connection points.</p> <p>The purpose of the work was to form a view on the principles suitable for connecting decentralized medium-voltage production to Kajave, thereby potentially facilitating the creation of a medium-voltage production connection guide to be published later. Company-specific principles are needed due to technical practices and recommendations to be considered in connecting production connections to the common medium-voltage network, which is partly missing from the industry.</p> <p>As a result of the work, recommendations and principled solutions for connecting decentralized production to Kajaven's medium-voltage distribution network were formulated.</p>	
Keywords Decentralized electricity production, Medium voltage	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	8
1.1	Työn tausta ja tavoitteet	8
1.2	Työn rakenne	9
1.3	Kajave Oy:n yleisesittely	9
2	HAJAUTETTU TUOTANTO.....	10
2.1	Yleisimmät hajautetun tuotannon tuotantomenetelmät.....	10
2.1.1	Aurinkovoimalaitos.....	10
2.1.2	Vesivoimalaitos.....	11
2.1.3	Tuulivoimalaitos.....	12
2.2	Hajautetun tuotannon kehitys Suomessa	13
2.3	Hajautettu tuotanto Kajaven verkossa	15
3	VERKKOON LIITTÄMINEN	16
3.1	Kantaverkon siirtokapasiteetti	16
3.2	Liittymispisteet verkonhaltijan sähköverkossa	19
3.3	Suuntaajakytkeytyt voimalaitokset	19
3.4	Tahtikonevoimalaitokset	20
4	HAJAUTETUN TUOTANNON VAIKUTUKSET KESKIJÄNNITEVERKON SUOJAUKSEEN	20
4.1	Suojauksen toiminnan estyminen taikka hidastuminen	21
4.1.1	Oikosulkusuojaus.....	22
4.1.2	Maasulkusuojaus	23
4.2	Verkon suojauksen tarpeeton laukaisu.....	25
4.3	Takasyöttö kiskoviassa	25
4.4	Tuotantoyksiköiden tarpeettomat laukaisut.....	26
4.5	Jälleenkytkennän epäonnistuminen	26
4.6	Tahdistamaton jälleenkytkentä	27
4.7	Jänniteongelmat	27
5	HAJAUTETUN TUOTANNON VERKKOON LIITTÄMISELLE ASETETUT YLEISET VAATIMUKSET .	28
5.1	Laitteistolle ja käyttämiselle asetettujen vaatimusten tarkoitus.....	28
5.2	Velvoittavat lait ja standardit	28
5.3	Laitteistolle ja käyttämiselle asetetut turvallisuusvaatimukset.....	28
5.3.1	Verkon käyttötoiminta	29

5.3.2	Turvallinen työskentely verkossa	29
5.4	Voimalaitosten järjestelmätekniiset vaatimukset	30
5.4.1	Suojausvaatimukset	31
5.4.2	Tuotantoliittymän paikallinen eroonkytkentä.....	32
5.4.3	Lähivikakestoisuus	33
5.5	Loisteho, reaaliaikainen mittaus ja tiedonvaihto	35
5.6	Automaattinen kytkeytyminen.....	35
5.7	Kantaverkkoon liittymisen vaiheet	35
6	TUOTANTOLIITTYMIEN TEKNISET LIITTÄMISPERIAATTEET KAJAVEN KESKIJÄNNITEVERKOSSA.....	36
6.1	Suojaukseen liittyvät haasteet.....	36
6.2	Liittymäprosessi	37
6.3	Liittymispisteet.....	37
6.4	Hajautetun tuotannon liittämiseksi asetetut ehdot ja tekniset vaatimukset	38
6.4.1	Verkkoyhtiölle asetetut ehdot ja tekniset vaatimukset	39
6.4.2	Voimalaitokselle asetetut ehdot ja tekniset vaatimukset	41
6.5	Sähköenergian mittaus.....	42
6.6	Loistehokapasiteetti sekä loistehon ja jännitteen säätö	42
6.7	Reaaliaikainen mittaus, tiedonsiirto ja etäohjausvalmius	43
6.8	Käyttöasiakirjan lisäykset.....	43
7	YHTEENVETO.....	44
	LÄHTEET	45

KUVALUETTELO

KUVA 1. Kajave lukuina (Loiste, 2023).....	10
KUVA 2. Tyypillinen aurinkovoimalaitos ilman energian varastointia (Stoltenberg, Kiatreungwattana, VanGeet, 2019)	11
KUVA 3. Vesivoimalaitoksen havainnekuva (Turku Energia, 2018)	12
KUVA 4. Tuulivoimaloiden kokoluokan kehittyminen (Metsähallitus, 2022)	13
KUVA 5. Uusiutuvan energian vuosituotantomäärien prosentuaalinen kehittyminen (Tilastokeskus, 2023) ..	14
KUVA 6. Verkkoon liitetyn aurinkosähkön pientuotantokapasiteetin kehitys suomessa (Energiavirasto ,2022).....	14
KUVA 7. Hajautetun tuotannon ennuste SJ- ja KJ-verkossa (Energiavirasto, 2023)	15
KUVA 8. Hajautetun tuotannon ennuste Kajaven verkossa 2023-2033 (Kajave, 2024)	15
KUVA 9. Fingrid Verkkokiikari, tuotannon liityntäkapasiteetin kasvuennuste (Fingrid, 2024)	17
KUVA 10. Kainuun alueen kehittämissuunnitelma 2024-2033 (Fingrid, 2024)	18
KUVA 11. Kantaverkon kehittämissuunnitelma pääsiirtoverkon osalta (Fingrid, 2024)	18
KUVA 12. Tuotannon liittymispisteet keskijänniteverkossa. Muokattu lähteestä: (Lakervi & Partanen, 2008)	19
KUVA 13. Vika tuotantoa sisältävällä johtolähdöllä (Kumpulainen & Ristolainen, 2006)	21
KUVA 14. Maasulkuvirta sammutetussa järjestelmässä (SFS 6001, 2018).....	23
KUVA 15. Maasulkuvirta maasta erotetussa järjestelmässä (SFS 6001, 2018).....	24
KUVA 16. Lähdön laukeaminen virheellisesti viereisen johtolähdön viassa (Kumpulainen & Ristolainen, 2006).....	25
KUVA 17. Takasyöttö kiskoviassa. Muokattu lähteestä (Kumpulainen & Ristolainen, 2006).....	25
KUVA 18. Paikallisen eroonkytkennän logiikkakaavio (Fingrid, 2022).....	32
KUVA 19. Reaaliaikaisen eroonkytkennän logiikkakaavio (Fingrid, 2022)	33
KUVA 20. Luokan B ja C tahtikoneen lähivikakestoisuusvaatimus (Fingrid VJV, 2018)	34
KUVA 21. Luokan B ja C suuntaajakytketyn voimalaitoksen lähivikakestoisuusvaatimus (Fingrid VJV, 2018)	34
KUVA 22. Periaatteellinen kuvaus 110 kV ja 20 kV Uo> suojauksen toteuttamisesta.....	40
TAULUKKO 1. Hajautetun tuotannon nykytila Kajaven verkossa	15
TAULUKKO 2. Liittymispisteen tehoperusteinen määrittely	38
TAULUKKO 3. Määrittelyt Kajaven sähköverkkoon liitettävälle tuotannolle.....	39

LYHENTEET

Amplitudi	Värähtelytaajuus
EVY	Eroonkytkennän viestiyhteys
KJ	Keskijännite, yli 1, mutta enintään 70 kV vaihtojännite (sähköjake- lussa yleisesti käytetty standardoimaton termi)
Liittämiskohta (liittymispiste)	SFS 6000-8-801 standardin mukainen raja jakeluverkon ja sähköliitty- män asennukselle. Liittyjän ja jakeluverkon sähkölaitteistojen omistus- raja.
LOM	Lost of mains ts. saarekkeenestosoja
SJ	Suurjännite, $U > 1\,000\text{ V}$ (sähköturvallisuuslain määritelmä), yleisimmin tarkoitetaan 110 kV
SJV	Sähkövarastojen järjestelmätekniset vaatimukset
ROCOF-rele	Rate Of Change Of Frequency –suojaustoiminto eli taajuuden muutos- nopeutta mittaava suojaustoiminto
Taajuus	Sähkön vaihtelunopeus, jolla sähkön suunta vaihtuu joka sekunti
Takasyöttö/takajännite	Takasyötöstä puhutaan silloin, kun tuotantolaitteisto voi syöttää säh- köä verkkoon, vaikka syöttävä verkko on jännitteetön
Tuotantolaitte	Yksittäinen sähköenergian tuottamiseen tarkoitettu laite, esimerkiksi yksittäinen invertteri yhdistettynä yhteen tai useampaan aurinkopanee- liin
Tuotantolaitteisto	Lähtökohtaisesti yhdessä sähköliittymässä sijaitsevien sähköntuotanto- laitteiden kokonaisuus
VJV	Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset
Voimalaitos	Yleensä teollisuusmittakaavan sähköntuotantolaitos

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta ja tavoitteet

Hajautetun sähköntuotannon kasvu luo uusia haasteita perinteiselle yksisuuntaiselle sähköverkolle, erityisesti keskijännitteisen jakeluverkon liittymien kysynnän voimakkaan kasvun myötä. Tämä asettaa uusia vaatimuksia sähköverkon turvallisuudelle ja käyttövarmuudelle. Aiemmin sähköntuotanto keskittyi pääosin suuriin keskitettyihin voimalaitoksiin tai pieniin kuluttajakohtaisiin tuotantoyksiköihin. Nyt hajautettu tuotanto lisääntyy erityisesti keskijännitteiseen jakeluverkkoon liitettävien tuotantoliittymien myötä. Tämä muuttaa sähköverkon dynamiikkaa ja edellyttää verkkoyhtiöitä tunnistamaan ja hallitsemaan kahdensuuntaisen energiansiirron vaikutuksia.

Sähköjakeluverkossa sähkön tuotannon verkkoonliittymisen tulee olla rutiininomaista kuten sähkönkäyttäjien liittymisen. Tämä edellyttää sellaisten säännösten kehittämistä, joissa mm. suojausten toteuttamisvastuu jaetaan tarkoituksenmukaisesti molemmille osapuolille (Lakervi & Partanen, 2008). Euroopan komissio on linjannut asetuksessaan 2016/631:” Sähköntuotantomoduulien verkkoliitännälle olisi vahvistettava yhtenäiset säännöt, jotta voidaan luoda selkeä oikeudellinen kehys verkkoliitännöille, helpottaa unionin laajuista sähkökauppaa, varmistaa käyttövarmuus, helpottaa uusiutuvien energialähteiden liittämistä verkkoon, lisätä kilpailua ja mahdollistaa sähköverkon ja resurssien tehokkaampi käyttö kuluttajien hyödyksi (Eur-Lex, 2016)”.

Kuten lähteessä (Vihanninjoki, 2015) Suomen ympäristökeskukselle 2015 toimittamassa raportissaan toteaa, hajautetun tuotannon verkkoonliittäminen joudutaan tarkastelemaan erikseen tapauskohtaisesti koska liittämisen väärä tai virheellinen toteutus voi aiheuttaa vakavia laitevaurioita tai hengenvaaraa verkon vian aikana. Tämä asettaa sähköjakelusta vastaavat verkkoyhtiöt turvallisuuden ja käyttövarmuuden kannalta haasteelliseen asemaan koska verkkoon liittämistä ei voida ilman todennettuja perusteita kieltäytyä. Koska kaikkia verkkoon liittyjiä on kohdeltava tasavertaisesti, koskee tasavertaisuus myös liittyjien käytettävissä olevaa sähkön laatua ja turvallisuutta, joita kenenkään yksittäisen liittyjän laitteisto ei saa vaarantaa.

Keskijännitteisen jakeluverkon suojaamisesta puuttuu tällä hetkellä toimialan yhteinen hajautetun tuotannon huomioiva ohjeistus. Tämän seurauksena jakeluverkonhaltijat ovat osittain jo määritelleet tai ovat parhaillaan määrittelemässä yhtiökohtaisia periaatteitaan keskijännitetuotannon liittämiseen ja sitä kautta sähköjakeluverkon suojaukseen, käyttötoimintaan ja viestiyhteyksiin sekä liittyjiltä vaadittaviin lisäehtoihin. Tämä voi puolestaan johtaa hyvinkin erilaisiin alueellisiin käytäntöihin. Vaikka tuotannon vaikutukset sähköjakeluverkkoon voivat erota merkittävästi toisistaan verkon rakenteen, liittymispisteen sijoittumisen, tuotantomenetelmän, liitäntälaitteiston sekä -tehon vuoksi ja vaativat siksi aina tapauskohtaisia tarkasteluja ja määrittelyjä, olisi yhteiselle keskijänniteverkon ohjeistukselle ja teknisille käytänteille silti tarvetta.

Suomen sähköjärjestelmään liittymistä ohjaa Fingridin julkaisema Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset -asiakirja (Fingrid VJV, 2018). Asiakirjassa määritellään teho- ja jänniteperusteisesti eri tuotantolaitteistoille asetetut vaatimukset. Fingrid on julkaissut myös suurjännitteisten asiakasliityn-

töjen relesuojausohjeen missä ohjeistetaan kantaverkkoon liittyvien, Fingridin asiakkaiden, relesuojauksen määrittelyjä. Ohje ei ota suoranaisesti kantaa keskijänniteverkon liittymien relesuojaukseen, mutta on kuitenkin osittain sovellettavissa.

Tässä opinnäytetyössä tarkasteltiin hajautetun tuotannon keskijännitteiseen sähkönjakeluverkkoon aiheuttamia haasteita jakeluverkkoyhtiöille ja sitä kautta liittämislle asetettuja ehtoja. Koska sähköä voidaan tuottaa hajautetusti monilla eri menetelmillä, on tässä työssä tarkasteltu vain potentiaalisimpia keskijännitteiseen jakeluverkkoon liittyviä teollisen mittakaavan voimalaitoksia ja niiden liitännöitä. Työssä hyödynnettiin alan julkaisuja ja aihekohtaisia tutkimuksia sekä ohjeita.

Työn ensisijaisena tarkoituksena oli muodostaa Kajavelle näkemys ja ehdotukset tuotannon keskijänniteverkkoon liittämislle ja toteutuksen teknisille ratkaisuille. Liittämisperiaatteet selkeyttävät liittymäprosessia ja tukevat Kajaven tuotantoliittymien liittämisehdot -asiakirjan asiasisällön rakentamista, jonka työ on jo käynnistynyt.

Akkuvarastoliityntöjen kyselyiden vilkastuminen aiheuttaa tarpeen myös akkuvarastojen liittämisperiaatteille, mutta sitä ei kuitenkaan otettu kulutus-/tuotantoluonteensa vuoksi tähän opinnäytetyöhön mukaan. On kuitenkin perusteltua selvittää, että voidaanko nyt tutkittuja liittämislle huomioitavia asioita hyödyntää osittain tai jopa kokonaan myös akkuvarastojen liittämisehtoja tarkasteltaessa.

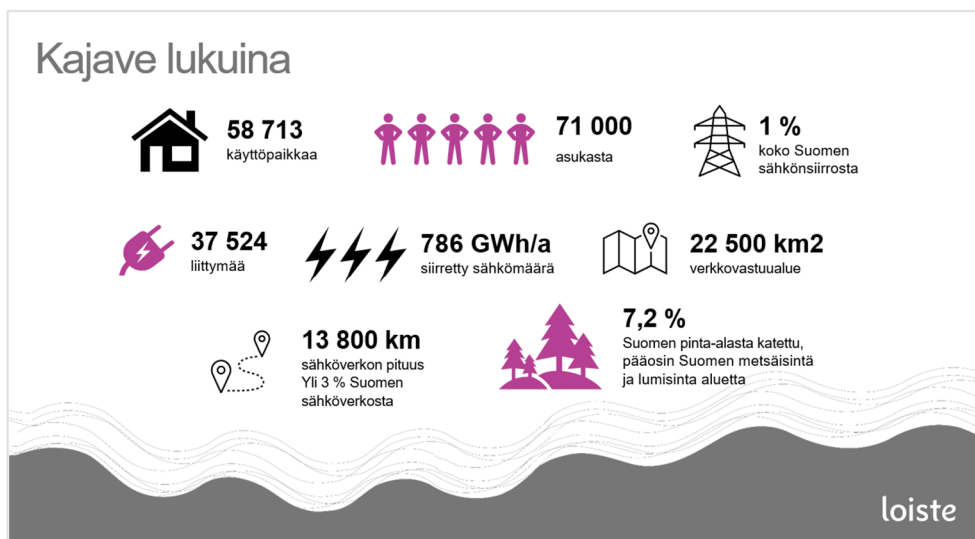
Työn tuloksena saatiin muodostettua Kajavelle soveltuvat liittämisperiaatteet keskijänniteverkon käytön sekä turvallisuuden kannalta oleellisille ja huomioitaville asioille, niin että liittymisen prosessi sekä itse liittyminen olisi mahdollisimman rutiininomaista.

1.2 Työn rakenne

Luvussa 2 kuvataan sähköverkkojen hajautetun tuotannon menetelmiä ja kehitystä Suomessa. Luvussa 3 käsitellään keskijänniteverkkoon liittymistä. Luvuissa 4 ja 5 tarkastellaan hajautetun tuotannon vaikutuksia keskijänniteverkkoon ja sen suojaukseen sekä liittämislle asetettuja vaatimuksia. Luvussa 6 esitellään selvitystyön tuloksena suositukset Kajavelle soveltuvista liittämislle ja suojausperiaatteista. Luku 7 sisältää työn yhteenvedon sekä esille nousseita jatkotutkimuskohteita.

1.3 Kajave Oy:n yleisesittely

Kajave on sähkönjakeluverkkoyhtiö, joka toimii pääasiassa Kainuun alueella ja osittain myös Pohjois-Pohjanmaan alueella. Kajave kuuluu Loiste-konserniin kaukolämpöpalveluita tuottavan Loiste Lämpö Oy:n ja energiapalveluita tuottavan Loiste Energia Oy:n kanssa. Kajaven toimialueella on 58713 käyttöpaikkaa, ja sillä on keskijännitejakeluverkkoa yhteensä noin 7200 kilometriä. Näistä maakaapeloituina on 1400 kilometriä. (Loiste, 2023)



KUVA 1. Kajave lukuina (Loiste, 2023)

2 HAJAUTETTU TUOTANTO

Valtioneuvoston julkaisun ”Hajautetun uusiutuvan energian mahdollisuudet ja rajoitteet (Valtioneuvoston kanslia, 2017)” määritelmän mukaan ”hajautettu” tarkoittaa energian tuottamista jakeluverkkoon, mutta se ei sellaisenaan viittaa tuotantoyksikön kokoluokkaan. Hajautetun energiantuotannon kokonaisuuden laaja-alaisuuden takia sen yksiselitteinen määrittely on haasteellista, mutta sitä pidetään synonyyminä pienimuotoiselle sähkön ja lämmön tuotannolle, johon liittyy tuotannon paikallisuus (Vihanninjoki, 2015).

Tässä opinnäytetyössä keskitytään hajautetun tuotannon osalta yleisesti keskijänniteverkkoon liittyviä teollisen mittakaavan tuotantolaitteistoihin, jotka syöttävät sähköä jakeluverkkoon. Tarkastelua on rajattu Kajaven keskijänniteverkkoon liitettävän 10 MW maksimitheon mukaan. Tuotantolaitteistoista käytetään myöhemmin tuotantotavasta riippumattomasti yleisnimitystä voimalaitos.

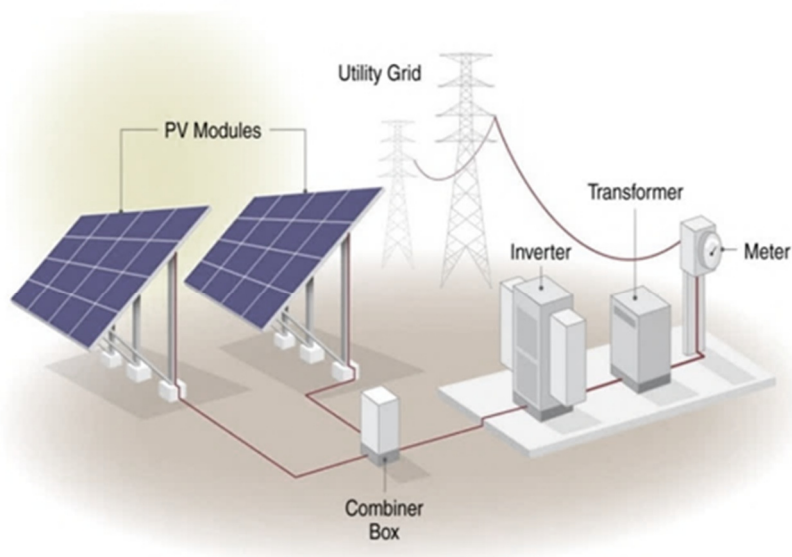
2.1 Yleisimmät hajautetun tuotannon tuotantomenetelmät

Seuraavissa luvuissa esitellään potentiaalisimmat keskijänniteverkkoon liitettävät hajautetun tuotannon teknologiat, joita ovat aurinkosähkö, pienvesivoima ja tuulivoima.

2.1.1 Aurinkovoimalaitos

Teollisen mittakaavan aurinkovoimalaksi kutsutaan keskitettyjä yli 1 MW (ELY-keskus, 2024) aurinkopuistoja, joissa sähkö tuotetaan suurella määrällä paneeleita ja tuotettu sähkö syötetään jakeluverkkoon. Teollisen mittakaavan aurinkopuisto voi tuottaa huomattavan määrän sähköä, ja suurimmat Suomeen suunnitellut aurinkopuistot ovat tuotantoteholtaan useita satoja megawatteja (Energiateollisuus, 2023).

Paneelien tuottama tasasähkö muutetaan vaihtosähköksi vaihtosuuntaajalla, eli invertterillä. Vaihtosuuntaajan muodostama vaihtojännite korotetaan liitettävän jakeluverkon jännitetasoon käyttäen jakelumuuntajaa (KUVA 2). (Stoltenberg, Kiatreungwattana, VanGeet, 2019)



KUVA 2. Tyypillinen aurinkovoimalaitos ilman energian varastointia (Stoltenberg, Kiatreungwattana, VanGeet, 2019)

Jakeluverkkoon liitetyillä teollisen mittakaavan aurinkovoimalaitoksilla ei yleisimmin ole sähkön varastointijärjestelmää, eli tuotantoteho siirtyy jakeluverkkoon sellaisenaan. Akustojen suotuisan hintakehityksen ansiosta sähkön varastointi on yleistymässä myös teollisen mittakaavan aurinkovoimaloissa. (Motiva, 2022)

Teollisen mittakaavan aurinkosähköjärjestelmät tulevat todennäköisesti muodostamaan suurimman osan Kajaven lähitulevaisuuden keskijänniteverkon tuotantoliittymistä, kun keskijännitteeseen liittämisen maksimitenhoksi on rajattu 10 MW. Teollisen mittakaavan aurinkovoimalla tarkoitetaan tämän työn osalta suuria keskitettyjä aurinkopuistoja taikka mahdollisesti pienempiäkin yksiköitä, kuitenkin toimijoita, jotka pyrkivät tuottamaan sähköä sopimuksellisen tehonsa verran ja siirtämään sen sähköverkkoon.

2.1.2 Vesivoimalaitos

Vesivoimalaitos koostuu yhdestä tai useammasta veden korkeus eron aiheuttaman liike-energian pyörittämästä turbiinista, joiden liike-energia puolestaan muutetaan sähköksi generaattoreissa. Syntyvä sähkö johdetaan muuntajan kautta sähköjakeluverkkoon. (Motiva, 2022) Kuvassa 3 on esitetty vesivoimalaitoksen periaatteellinen rakenne.



KUVA 3. Vesivoimalaitoksen havainnekuva (Turku Energia, 2018)

Vesivoimalaitokset voidaan jaotella Tilastokeskuksen määritelmän mukaan laitoksen nimellistehon perusteella suur-, pien- ja minivesivoimalaitoksiin:

- suuvesivoima, nimellisteholtaan yli 10 MW
- pienvesivoima, nimellisteholtaan 1 – 10 MW
- minivesivoima, nimellisteholtaan alle 1 MW

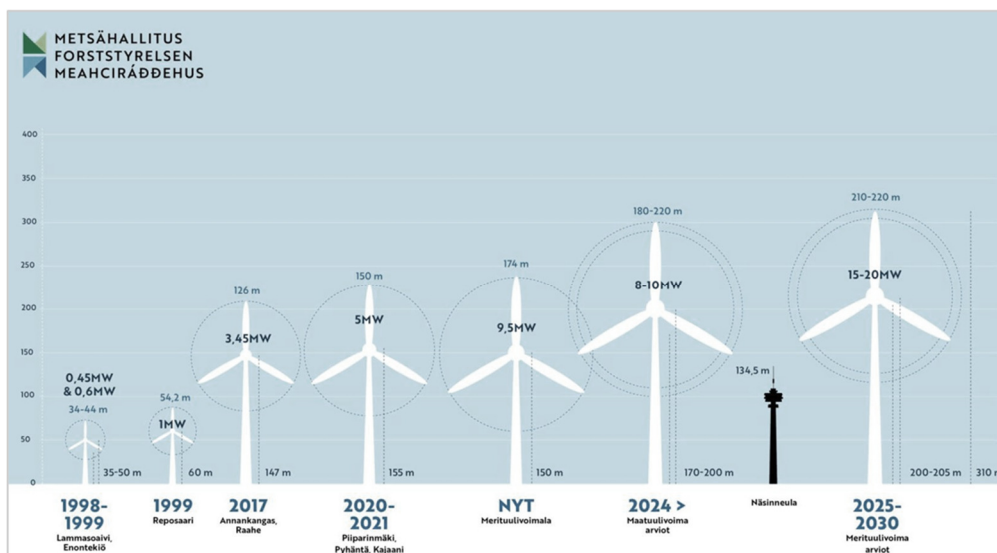
Suurin osa Suomen vesivoimalaitoksista on maantieteellisten olosuhteiden vuoksi pien- tai minivesivoimalaitoksia. Vaikka Suomessa olisi vielä hyödyntämätöntä vesivoimapotentiaalia, voivat ympäristösuojelulliset syyt estää uuden voimalaitoksen rakentamisen ja rajoittaa jopa olemassa olevan kapasiteetin käyttöä. (Energiateollisuus, 2023)

Uusia keskijännitteiseen jakeluverkkoon liittyviä pienvesivoimalaitoksia ole tällä hetkellä näköpiirissä Kainuun alueella.

2.1.3 Tuulivoimalaitos

Tuulivoimalaitos koostuu joko yhdestä taikka useammasta tuuliturbiinigeneraattorista, jotka muuttavat tuulen liike-energian sähköenergiaksi (Fingrid VJV, 2018).

Olemassa olevien tuulivoimalaitosten yksittäiset tuuliturbiinigeneraattorit ovat tyypillisimmin 1-3 MW, mutta jo tällä hetkellä rakenteilla sekä suunnitteilla olevien laitosten generaattorit ovat yleensä noin 4-6 MW. Suurimpien markkinoilla olevien maatuuligeneraattorien koko on noin 8-10 MW, ja merituuligeneraattoreiden jopa selvästi yli 10 MW. (Motiva, 2022) Kuvassa 4 on havainnollistettu tuulivoimalaitosten kokoluokan voimakas kasvu. Tuulivoimalaitosten kokonaistehon vuoksi ne kytkeytyvät pääsääntöisesti suurjännitteiseen siirtoverkkoon taikka suoraan kantaverkkoon.



KUVA 4. Tuulivoimaloiden kokoluokan kehittyminen (Metsähallitus, 2022)

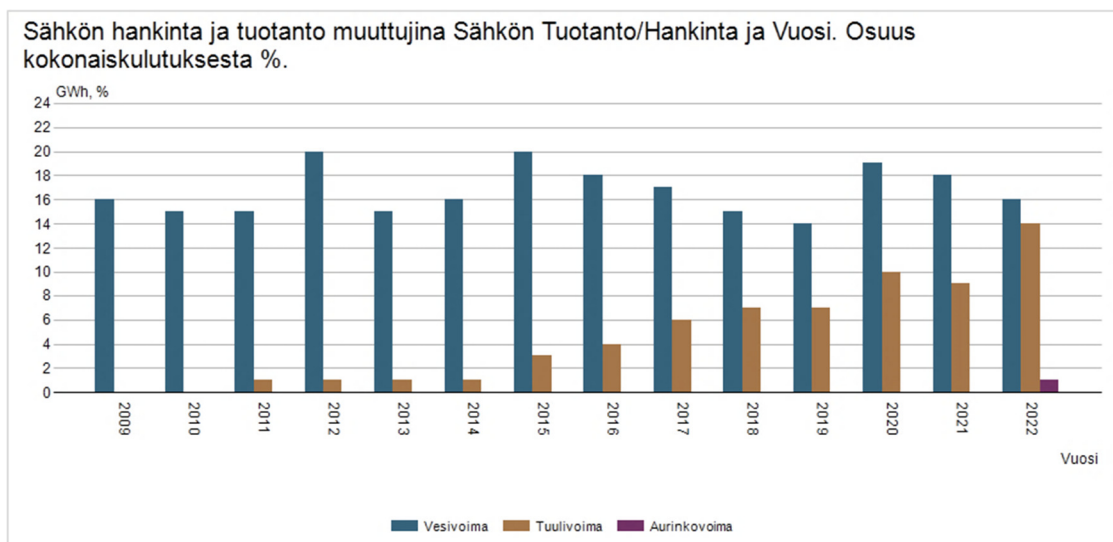
Tuulivoimalat voidaan jakaa roottorin pyörimisnopeuden mukaan vakio- ja muuttuvanopeuksisiin voimalaitoksiin, joista yleisimmät käytössä olevat tuulivoimaloiden konseptiratkaisut ovat (Thermopolis, 2010):

- Vakionopeuksinen, sakkaussäätöinen, epätahtigeneraattorilla (oikosulkugeneraattori) suoraan verkkoon liitetty voimala, nimellisteholtaan tyypillisimmin alle 1 MW.
- Rajoitetusti muuttuvanopeuksinen, epätahtigeneraattorilla suoraan verkkoon liitetty voimala.
- Muuttuvanopeuksinen, lapakulmasäätöinen, epätahtigeneraattorilla taajuusmuuttajan kautta verkkoon liitetty voimala (noin 30 % tehosta verkkoon taajuusmuuttajan kautta).
- Täysin muuttuvanopeuksinen, lapakulmasäätöinen, tahti- tai epätahtigeneraattorilla täysitehoisen taajuusmuuttajan kautta verkkoon liitetty voimala.

Tuulivoimalalaitteistot suurina puistomaisina kokonaisuuksina ovat tehonsa puolesta kytkeytymässä Kainuun alueella joko Kajaven suurjännitteisen jakeluverkkoon taikka Fingridin suurjännitteiseen siirtoverkkoon. Yksittäisiä tuulivoimalalaitteistoja taikka pieniä puistoja voitaisiin kuitenkin tehonsa puolesta liittää myös Kajaven keskijänniteverkkoon, kun kokonaisteho ei ylitä 10 MW. Liittymisen tarkastelu on aina tapauskohtaista ja vaativat myös laajempia mallinnuksia. Pienemmät yksittäiset kuluttajakohtaiset tuulivoimalalaitokset kytkeytyvät pienjännitteiseen sähköjakeluverkkoon.

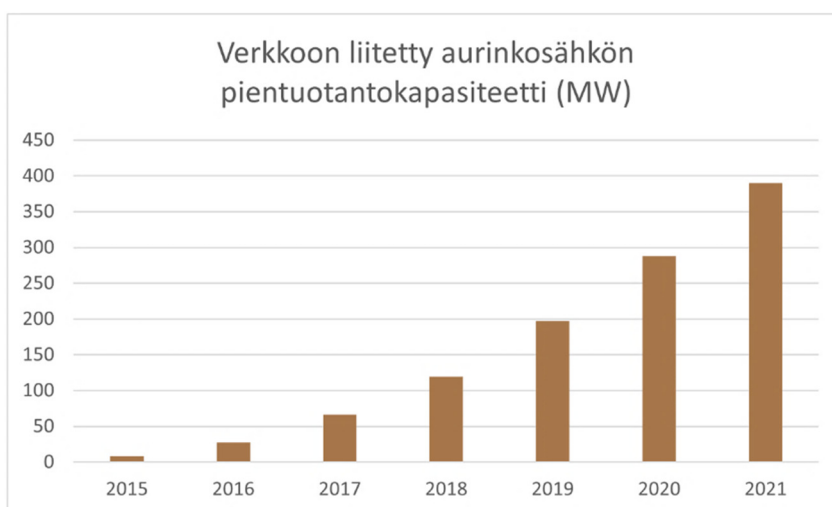
2.2 Hajautetun tuotannon kehitys Suomessa

LUT-yliopiston julkaisussa vuodelta 2019 (päivitetty 2023) kerrotaan että aurinkovoiman osuus Suomen sähköntuotannosta on pian prosentin luokkaa (KUVA 5, Tilastokeskus, 2023), ja määrän on arvioitu kasvavan jatkuvasti suunniteltujen yksittäisten useiden satojen megawattien aurinkovoimapuistojen vuoksi. Lisäksi Fingrid on saanut useita kyselyitä merituuli- ja aurinkovoimatuotantoliittymille yhteensä yli 100 GW edestä, ja siksi arvioikin Suomessa voivan olevan vuoteen 2030 mennessä aurinkovoimatuotantoa 7 GW edestä. (LUT-yliopisto, 2023)



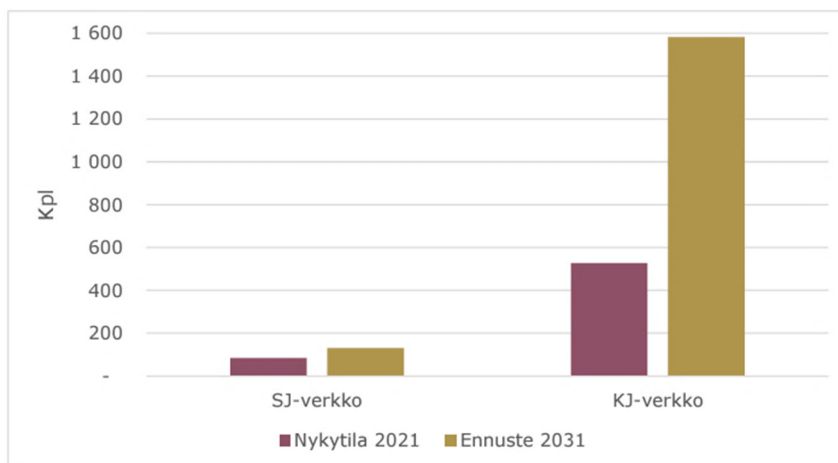
KUVA 5. Uusiutuvan energian vuosituotantomäärien prosentuaalinen kehittyminen (Tilastokeskus, 2023)

LUT-yliopiston julkaisun mukaan verkkoon kytketty aurinkosähkötuotanto on kasvanut noin sadalla megawatilla vuosittain vuodesta 2019 alkaen (KUVA 6, Energiavirasto, 2022), ja vuonna 2022 aurinkosähkötuotanto kasvoi 635 MW, jolloin yli 240 MW kasvu tarkoittaa yli kaksinkertaista kasvunopeutta. Vaikka toisin voisi ajatella, Suomi on Keski-Euroopan veroinen aurinkoenergian tuotantopotentiaaliltaan. (LUT-yliopisto, 2023)



KUVA 6. Verkkoon liitetyn aurinkosähkön pientuotantokapasiteetin kehitys Suomessa (Energiavirasto, 2022)

Energiavirasto ennustaa raportissaan (KUVA 7) hajautetun tuotannon voimalaitosten määrän kasvavan vuodesta 2021 50 prosenttia SJ-verkossa ja kolminkertaiseksi KJ-verkossa vuoteen 2031 mennessä (Energiavirasto, 2023).



KUVA 7. Hajautetun tuotannon ennuste SJ- ja KJ-verkossa (Energiavirasto, 2023)

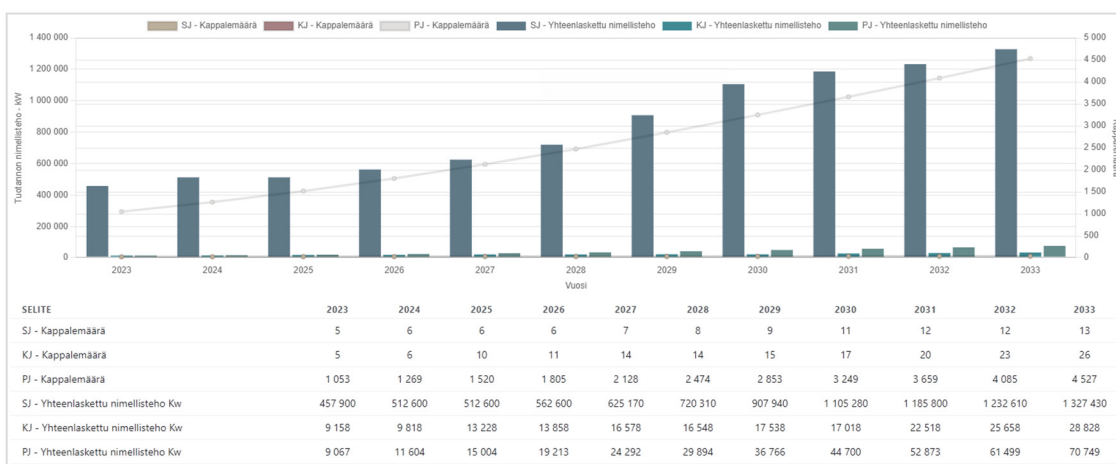
2.3 Hajautettu tuotanto Kajaven verkossa

Kajaven jakeluverkkoon on kytkeytyneenä tällä hetkellä yhteensä 476 MW edestä eri tuotantomuodoilla tuotettua sähköenergiaa. Hajautetun tuotannon liittymiä on lukumääräisesti eniten pienjänniteverkossa, mutta nimellistehoaltaan eniten suurjänniteverkossa. Keskijänniteverkkoon liitettyä tuotantoa on tällä hetkellä hieman yli 9 MW (TAULUKKO 1). (Kajave, 2024)

TAULUKKO 1. Hajautetun tuotannon nykytila Kajaven verkossa

	kpl	nimellisteho, kW
SJ-verkko	5	457900
KJ-verkko	5	9158
PJ-verkko	1053	9067

Hajautetun pientuotannon odotetaan kasvavan vuoteen 2033 mennessä erityisesti aurinkotuotannon osalta. Pientuotannon käyttöpaikkoja olisi tuolloin pienjänniteverkossa yhteensä 4500 kappaletta, joiden yhteenlaskettu nimellisteho olisi arviolta noin 70 MW ja keskijänniteverkossa 26 kappaletta nimellistehoaltaan yhteensä noin 29 MW (KUVA 8). (Kajave, 2024)



KUVA 8. Hajautetun tuotannon ennuste Kajaven verkossa 2023-2033 (Kajave, 2024)

Merkittävimmän vaikutuksen siirtovolyymeihin odotetaan tuovan suurjänniteverkkoon liitettävä tuuli-voima, jonka oletetaan kasvavan Kajaven verkkoalueella seuraavan kymmenen vuoden aikana noin 150-800 MW riippuen kantaverkon kapasiteetin kehittämisestä. (KUVA 8). (Kajave, 2024)

3 VERKKOON LIITTÄMINEN

Sähkömarkkinalaki velvoittaa verkonhaltijoita liittämään verkkoonsa tekniset vaatimukset täyttävät voimalaitokset ja energiavarastot. Tämä edellyttää verkonhaltijoilta selkeää näkemystä liittymiltä vaadittavista teknisistä ratkaisuista, jotka mahdollistavat verkon turvallisen käytön lisäksi standardin SFS-EN 50160 mukaisen sähkönlaadun säilymisen. (Sähkömarkkinalaki, 2013)

Sähkömarkkinalaki kieltää verkonhaltijoita kieltäytymästä liittämisestä vetoamalla mahdollisesti tulevaisuudessa tunnistettuihin verkon kapasiteettirajoituksiin (Sähkömarkkinalaki, 2013). Liittymän esiselvityshetkellä kantaverkon vapaana oleva kapasiteetti on kuitenkin ensisijaisesti määräävä tekijä sille, voiko liittymää kytkeä verkkoon tai milloin se on mahdollista mahdollisten tulevien kantaverkon vahvistusten myötä.

Sähköverkkoon liittymisen valmistelu ja tarvittavat esiselvitykset on sisällyttävä hankkeen suunnitteluun, että hankkeen kokonaisvaikutukset pystytään arvioimaan. Tämä on tarpeen sillä teollisuuskoluokan aurinkovoimalat voivat vaikuttaa koko sähköverkon rakenteeseen ja lisäksi aurinkoenergian tuotanto ei ole tasaista. On huomioitava, että suunnitellun voimalaitoksen tulee kyetä toimimaan myös verkon jännitteen ja taajuuden muutoksissa. Voimassa olevat sähköverkon liittymiseen ja turvallisuuteen asetetut vaatimukset on varmistettava aina sen sähköverkon haltijalta mihin liittymistä suunnitellaan. (ELY-keskus, 2024)

Luvuissa 3.1-3.4 on käsitelty tuotantolaitteiston liittämisen kannalta muutamia keskeisimpiä aiheita, jotka on otettava huomioon jo esiselvitysvaiheessa. Tällä hetkellä liittämisten määrän kannalta määrävimmän tekijän vaikuttavuudesta on kerrottu seuraavassa luvussa 3.1 Kantaverkon siirtokapasiteetti.

3.1 Kantaverkon siirtokapasiteetti

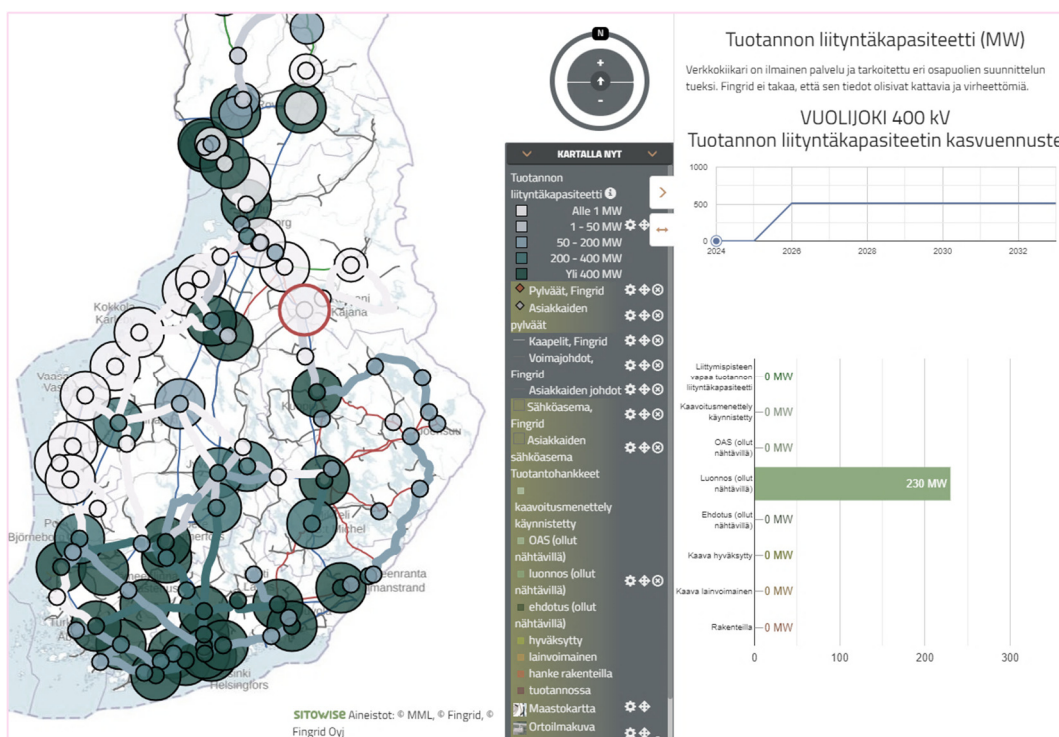
Valtakunnallinen sähkövoimajärjestelmä kuuluu yhteiskunnan tärkeimpiin infrastruktuureihin. Fingrid vastaa Suomen kantaverkon ylläpidosta, johon kuuluvat kaikki silmukoidut 400, 220 ja 110 kV suurjännitejohdot sekä sähköasemat. Kantaverkossa oli vuonna 2023 noin 14 000 km voimajohtoa ja 121 sähköasemaa. Kantaverkon kautta siirretään noin 75 prosenttia kaikesta Suomessa siirretystä sähköstä. (Fingrid, 2023)

Kaikkien suuritehoisten keskijänniteliittymien taikka suurjänniteverkkoon kytkettävien liittymien kohdalla on tarkasteltava ensisijaisesti kantaverkon siirtokyvykyys, eli siirtokapasiteetti siirtää suunniteltu sähköenergia. Tämä tarkastelu on tehtävä koska sähköverkossa voidaan siirtää rajallinen, käytövarmuuskriteerien mukainen määrä sähköä. Tätä kutsutaan puolestaan siirtojenhallinnaksi, jolla varmistetaan siirtojen pysymisen siirtokapasiteetin rajoissa. (Fingrid, 2023)

Kantaverkkoyhtiö Fingrid määrittelee kantaverkon sähkömarkkinoiden käyttöön annettavan siirtokapasiteetin, missä se huomioi sähköjärjestelmän tekniset siirtorajoitteet ja käyttövarmuuden. Tästä käytetään myös termiä siirtokapasiteetin laskenta. (Fingrid, 2023)

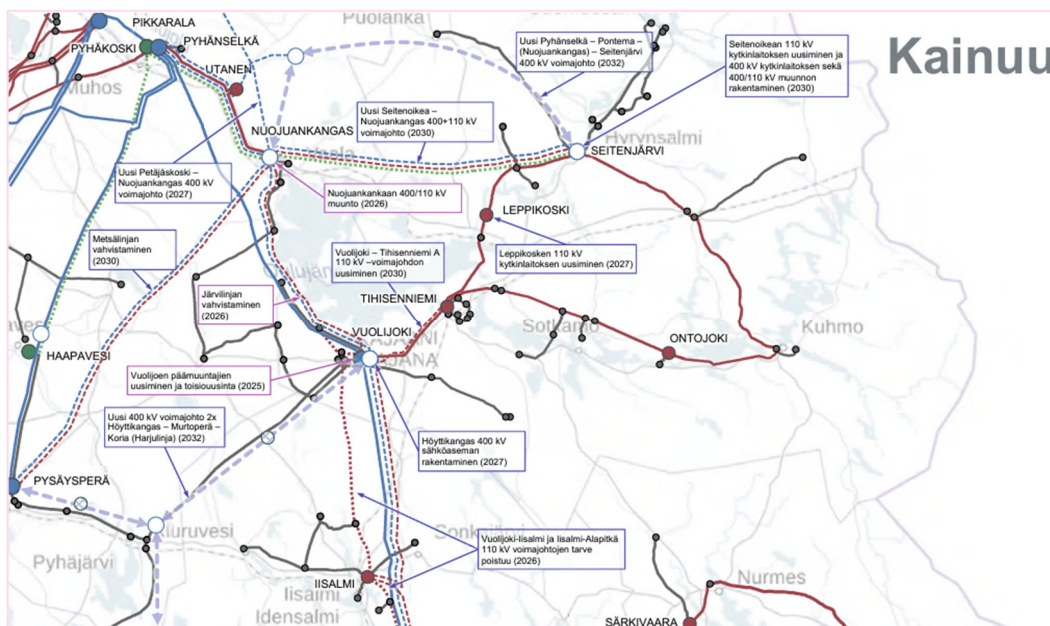
Koska eurooppalaisen lainsäädännön CACM (Kapasiteetin jakamisen ja siirtojen hallinnan suunta-viiva) edellytyksenä on saada kantaverkonhaltijoita laskemaan siirtokapasiteettinsa koordinoitusti, siirtokapasiteetin laskentamenetelmä uudistuu. Tämä tarkoittaa, että tulevaisuudessa Kööpenhaminassa sijaitseva pohjoismainen alueellinen koordinoitikeskus Nordic RCC, laskee siirtokapasiteetin pohjoismaisille kantaverkonhaltijoille, jotka toimittavat siirtokapasiteetin laskemiseen tarvittavat tiedot ja vahvistavat RCC:n laskeman siirtokapasiteetin. (Fingrid, 2023)

Laskentamenetelmän uudistuksen konkreettisenä seurauksena Pohjoismaissa otetaan lokakuussa 2024 käyttöön siirtoihin perustuva flow based -kapasiteetinlaskentamenetelmä. Flow based -menetelmän eduksi lasketaan siirtoverkon kapasiteetin jakamisvaiheen tarkempi huomiointi ja sitä kautta syntyvä kansantaloudellinen tehokkuus (Fingrid, 2023).



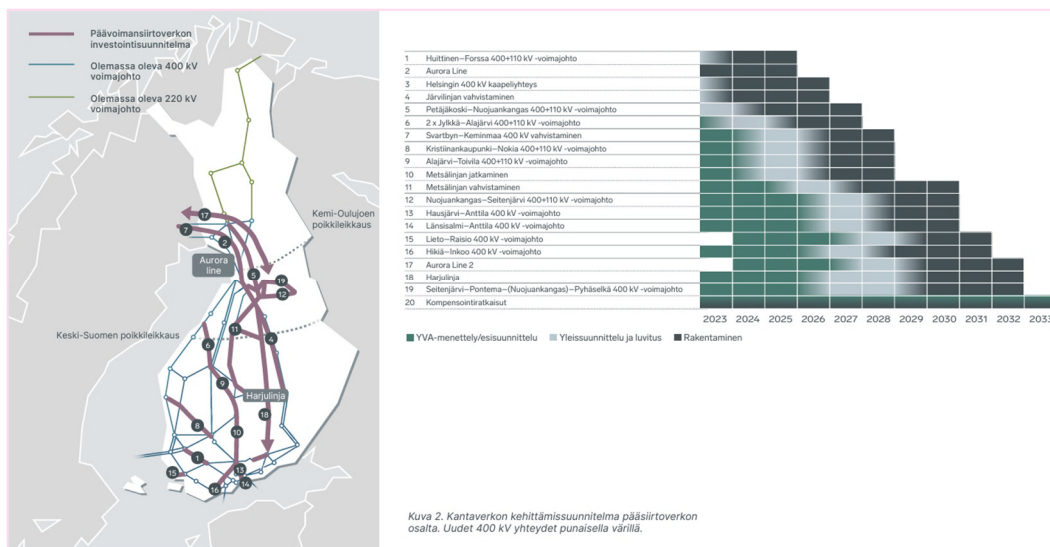
KUVA 9. Fingrid Verkkokiikari, tuotannon lii... kasvuennuste (Fingrid, 2024)

Fingrid on julkaissut sivustollaan Verkkokiikari-karttanäkymän (KUVA 9) mistä voi tarkastella kanta-verkon lii... mahdollisuuksia, koska erityisesti tuotantohankekyselyt ovat lisääntyneet voimakkaasti. Karttanäkymä tarjoaa eri ajanjaksojen lii... mahdollisuuksien lisäksi tietoa jo suunnittelussa taikka toteutuksessa olevista tuotantohankkeista (Fingrid, 2024). Verkkokiikarin tämän hetken tietojen mukaan esimerkiksi Kainuussa Vuolijoen 400 kV vaikutusalueella olisi vapaata tuotannon lii... kapasiteettia vasta 2026 alkaen.



KUVA 10. Kainuun alueen kehittämissuunnitelma 2024-2033 (Fingrid, 2024)

Fingridin mukaan Kainuun ja Pohjois-Pohjanmaan alueelle on suunnitteilla useita tuulivoimahankkeita, minkä vuoksi 400 kV kantaverkon vahvistaminen on tarpeen ja suunnittelu on jo aloitettu. Ensimmäisessä vaiheessa on tarkoitus korvata Nuojuankangas-Seiteneika 220 kV -voimajohto uudella Nuojuankangas-Seitenjärvi 400 ja 110 kV -yhteydellä vuoden 2030 aikana (KUVA 10). Hankkeen ympäristövaikutusten arviointimenettely on meneillään.

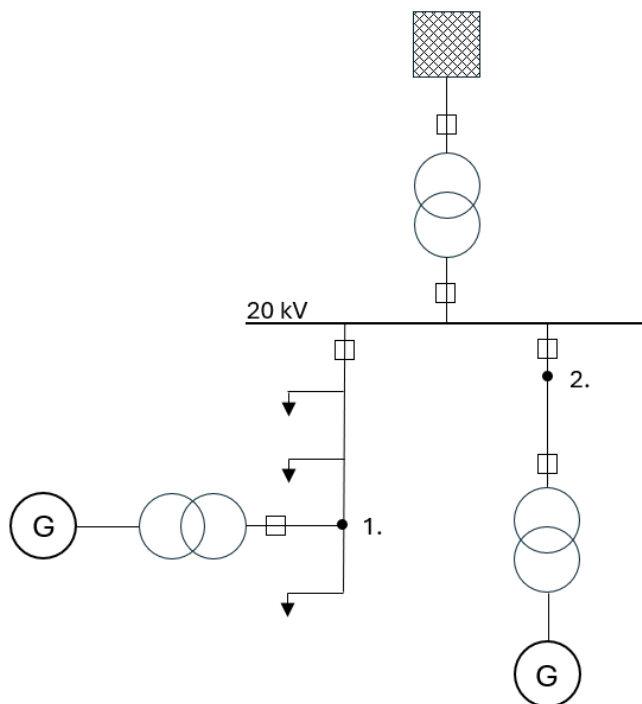


KUVA 11. Kantaverkon kehittämissuunnitelma pääsiirtoverkon osalta (Fingrid, 2024)

Toisessa vaiheessa 400 kV verkkoa vahvistetaan Pyhänselästä Ponteman sähköaseman kautta Seitenjärvelle ja Nuojuankankaalle (KUVA 11, voimajohto 19) ja vahvistuksen on tarkoitus valmistua 2032. Käyttöikänsä loppuilla oleva Vuolijoki-Tihisenniemi 110 kV -johto on uusintavuorossa 2030.

3.2 Liittymispisteet verkonhaltijan sähköverkossa

Sähköntuotantoa voidaan liittää verkonhaltijan keskijänniteverkossa joko jakeluverkkoon (KUVA 12, piste 1.) taikka suoraan sähköasemalle (KUVA 12, piste 2.). Verkonhaltijoilla voi olla yhtiökohtaisia tehooperusteisia määrittelyjä liittymispisteen sijoittamiselle. Jakeluverkolla tarkoitetaan säteittäisesti taikka renkaaseen kytkettyä kaapeli- tai ilmajohtoverkkoa, johon on kytkettyneenä muitakin kulutus- taikka tuotantoliittymiä.



KUVA 12. Tuotannon liittymispisteet keskijänniteverkossa. Muokattu lähteestä: (Lakervi & Partanen, 2008)

Jakeluverkkoon liiittäessä verkonhaltija määrittelee liittymispisteeksi yleensä joko olemassa olevan taikka uuden rakennettavan kytkemön keskijännitekennon mihin saakka liittyjä rakentaa liittymiskaapelinsa. Sopimusteknisenä liittymispisteenä toimii yleensä kytkentäliittimet, joihin kaapeli kytketään.

Sähköasemalle liiittäessä liittyjä rakentaa liittymiskaapelinsa sähköaseman kennoon saakka ja sopimusteknisenä liittymispisteenä toimii yleensä tässäkin tapauksessa kytkentäliittimet, joihin kaapeli kytketään. Sähköaseman aitojen sisäpuolinen kaivu asettaa yleensä rajoitteita asennuksen tekeväälle urakoitsijalle, ja verkonhaltija voikin asettaa ehdoksi sopimusurakoitsijansa tekemän valvonnan taikka vaihtoehtoisesti aitojen sisäpuolisen asennuksen kokonaan sopimusurakoitsijansa tehtäväksi.

3.3 Suuntaajakytketyt voimalaitokset

Vaihtosuuntaaja yksinkertaistettuna muuttaa tasajännitteen vaihtojännitteeksi, jonka amplitudia ja taajuutta voidaan muuttaa halutunlaiseksi (ABB, 2000). Vaihtosuuntaajasta käytetään myös nimitystä invertteri.

Suuntaajakytketyksi voimalaitokseksi kutsutaan yksittäistä sähköä tuottavaa yksikköä tai useiden yksiköiden muodostamaa kaupallista kokonaisuutta, joka on kytketty sähköverkkoon joko ilman synkronointia taikka tehoelektronikan kautta. Ja joka omaa myös yhden liittymispisteen siirto- tai

jakeluverkkoon, mukaan lukien suljettu jakeluverkko, taikka suurjännitteiseen tasasähköjärjestelmään. (Fingrid VJV, 2018)

Keskijänniteverkkoon liitettävät suuntaajakytketyt voimalaitokset ovat lähes yksinomaan aurinkosähkötuotantoa, mutta myös sähkövarastot ja osin tuulivoimalatkin käyttävät suuntaajaa. Sähkövarastoja voi olla tuuli- ja aurinkovoimaloiden yhteydessä taikka itsenäisesti toimivina kaupallisina yksiköinä.

3.4 Tahtikonevoimalaitokset

Fingridin määritelmän mukaan yleisen sähköverkon kanssa rinnankäytettävä tahtikonevoimalaitos muodostuu yhtenäisestä laitteistokokonaisuudesta, joka kykenee tuottamaan sähköenergiaa niin, että laitoksella tuotettu jännite on taajuuden ja generaattorin nopeuden osalta yleisen sähköverkon jännitteen taajuuteen nähden vakiosuhteessa ja sitä kautta tahtikäytössä (Fingrid VJV, 2018).

Keskijänniteverkkoon liitettävä hajautetun tuotannon tahtikonevoimalaitosratkaisu voisi olla pienveivoimalaitos taikka polttoprosessiin perustuva yhdistetty pienimuotoinen lämmön- ja sähköntuotantolaitos. Muuten pyöriviä generaattoreita sisältävät voimalaitokset ovat tehonsa puolesta liittymässä tällä hetkellä lähes yksinomaan suurjännitteiseen sähköverkkoon, esimerkkinä tuulipuistot.

4 HAJAUTETUN TUOTANNON VAIKUTUKSET KESKIJÄNNITEVERKON SUOJAIKSEEN

Merinovan VTT:ltä (Teknologian tutkimuskeskus) tilaamassa tutkimuksessa ”Sähkönjakeluverkon ja siihen liitetyn hajautetun tuotannon sähköteknisen suojauksen kehittäminen (Kumpulainen & Ristolainen, 2006)” on todettu, että hajautettu tuotanto vaikuttaa todennetusti sähkönjakeluverkon käyttötoimintaan.

Tutkimuksesta käy ilmi, että hajautettu tuotanto voi aiheuttaa sähkönjakeluverkon suojalaitteiden tarpeettomia laukaisuja ja taas toisaalta hidastaa tai jopa kokonaan estää verkon suojauksen normaalin toiminnan (Kumpulainen & Ristolainen, 2006). Eli kiteytettynä sähkön laatu ja sähköturvallisuus voivat vaarantua.

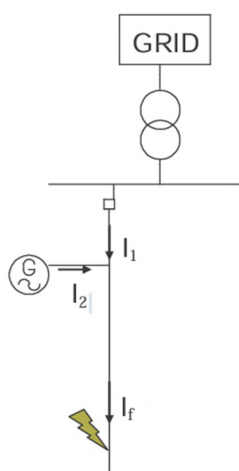
Tutkimuksen keskeisimmäksi hajautettuun tuotantoon liittyväksi ongelmaksi on kerrottu eroonkytkentäsuojauksen, Eurooppalaiselta termiltään Lost of Mains (LoM) luotettavan toteuttamisen, joka oli koettu tutkimuksessa erityisen haastavaksi, jos verkossa käytetään jälleenkytkentöjä. Tutkimuksessa on osoitettu vuonna 2006 olleiden yleisimpien käytössä olevien passiivisten eroonkytkentäsuojausmenetelmien tehokkuus ja selektiivisyys puutteelliseksi, ja siksi onkin tarkasteltava myös nykyisin käytössä olevia LoM-suojausmenetelmiä.

Vaikka tutkimus on tehty jo vuonna 2006, pätevät havaitut vaaratekijät, haasteet ja huomiot tänäkin päivänä ja niihin onkin syytä ennalta varautua sekä ottaa huomioon suojauksia suunnitellessa.

Luvuissa 4.1-4.9 on käsitelty hajautetun tuotannon keskeisimpiä vaikutuksia sähkönjakeluverkkoon, joita myös Kumpulainen ja Ristolainen havaitsivat selvityksessään sekä niille esitettyjä ja tunnistettuja ratkaisuvaihtoehtoja.

4.1 Suojauksen toiminnan estyminen taikka hidastuminen

Johtolähdön suojareleen toiminta voi estyä releen näkemän vikavirran pienenemisen vuoksi, eli vikavirta ei saavuta releeseen asetettua virran havahtumisrajaa. Syntyneestä tilanteesta käytetään nimitystä suojauksen sokaistuminen (protection blinding) ja tilanteen syntyminen on mahdollista pitkän johdon loppuosaan syntyvän vian aikana, kun johdon alkuosaan on liitetty sähköntuotantoa (KUVA 13). (Kumpulainen & Ristolainen, 2006) Yksinkertaistettuna suuritehoisen voimalaitoksen sivusta verkkoon syöttämä vikavirta I_2 pienentää johtolähdön varsinaisesta syöttösuunnasta kulkevaa vikavirtaa I_1 (Despro, 2023), jolloin myös suojareleen näkemä vikavirta pienenee (Kumpulainen & Ristolainen, 2006). Ongelma on erityisen suuri ja jopa todennäköinen oikosulkuteholtaan heikossa verkossa missä voimalan ja verkon välinen oikosulkusuhte on alhainen (Despro, 2023).



KUVA 13. Vika tuotantoa sisältävällä johtolähdöllä (Kumpulainen & Ristolainen, 2006)

Voimalaitoksen liitännälaitteistolla on merkittävä vaikutus oikosulkuvirran tuottokyvykkyyteen. Siinä missä vaihtosuuntaajakytketyt tuotantolaitokset tuottavat tyypillisimmin enintään kaksinkertaisen oikosulkuvirran nimellisvirtaansa nähden, on suoraan kytketyillä pyörivillä generaattoreilla kyvykkyyttä tuottaa moninkertaisesti nimellisvirtaansa suuruisen oikosulkuvirran. Toisin sanoen vaihtosuuntaajakytketyn tuotantolaitoksen kanssa riskit suojauksen sokaistumiselle sekä rinnakkaisten johtolähtöjen virhelaukaisuille ovat vähäisemmät. (Kumpulainen & Ristolainen, 2006)

Oikosulkusuojauksen toimivuuden parantamisen yhtenä ratkaisuvaihtoehtona on releen asettelujen säätö herkemiksi, joka on kuitenkin tehtävä suunnitelmallisesti ja tarkasti että suojaus ei toimi turhaan verkon normaalin käyttötilanteiden aikaisista kuormitusolosuhteista ja kytkentäsysäyksistä. Välikatkaisijan sijoittaminen keskijännitejohdolle ja johtolähdön releen suojausolottuman asettelu välikatkaisijaan saakka on myös vakavasti harkittava ratkaisuvaihtoehto. (Kumpulainen & Ristolainen, 2006)

Hajautettu tuotanto saattaa myös pitkittää syntyneitä maasulkutilannetta ja maasulkua ei saada kytettyä pois turvallisuusvaatimusten edellyttämässä ajassa, vaikka jakeluverkonverkon johtolähdön suojaus toimisikin oikein. Tilanne voi syntyä, jos johtolähdön suojaus havaitsee maasulun ja avaa katkaisijan ennen kuin voimalaitoksen suojaus toimii ja voimalaitos jää ylläpitämään saarekkeeksi jääneen lähdön jännitettä ja maasulkuvirtaa. Tämä voi seurata keskitetysti sammutun verkon johto-

lähdöllä, joka muuttuu maasta erotetuksi lähdon katkaisijan avautuessa. Ongelman esiintymisen todennäköisyys voi pienentyä sammutetun verkon valokaarivikojen sammussa itsestään ennen suoja-laitteen toimintaa. (Kumpulainen & Ristolainen, 2006)

Maasulkusuojauksen ja sitä kautta sallitun kosketusjännitevaatimuksen toteutumiseen raportissa esitetään nopeaa tuotannon eroonkytkentäsuojauksena joko passiivisena missä eroonkytketymisen ehdot on määritelty voimalaitoksen suojareleelle taikka aktiivisena missä voimalaitoksen katkaisijalle tuodaan ohjaus siirtolaukaisuna sähköasemalta tiedonsiirtoyhteyden avulla (Kumpulainen & Ristolainen, 2006). Voimalaitoksen passiivisena suojauksena voitaisiin ajatella perinteisen suunnatun maasulkusuojauksen sijaan monitaajuuksiseen admittanssimittaukseen perustuvaa maasulkusuojauksena (MFAPSDE), jonka voi asettaa toimimaan samoilla asetteluilla maasta erotetussa ja sammutetussa verkossa. MFAPSDE sisältää myös katkeilevan maasulun suojaustoiminnon. Kun suojauksen valvontasuunta määritellään voimalaitokseen päin ei se tunnista johtolähdon vikoja eikä poista alkuperäistä ongelmaa mutta mahdollistaa silti voimalaitoksen maasulkusuojauksen toiminnan, jos sähköaseman keskitetty sammutus vikaantuu ja verkko muuttuu maasta erotetuksi.

Koska voimalaitoksen tehon lisäksi jakeluverkon sähköiset ominaisuudet vaikuttavat ratkaisevasti verkon suojausten toimivuuteen on verkonhaltijoiden suositeltavaa selvittää liittämisen vaikuttavuudet ja vaadittavat toimenpiteet ennen tuotantolaitoksen verkkoon liittämistä.

4.1.1 Oikosulkusuojaus

Oikosulku on kahden tai kolmen vaihejohtimen välillä tapahtuva virtapiirin sulkeutuminen joko suoraan, valokaaren taikka vikaimpedanssin kautta. Virtapiirin sulkeutuminen voi johtua eristysviasta taikka ulkoisesta kosketuksesta. Oikosulun seurauksena voi aiheutua henkilövahinkojen lisäksi myös laitteiden rikkoontumisia oikosulkuvirtojen mekaanisen tai termisen rasituksen vuoksi. (Lakervi & Partanen, 2008)

Oikosulkusuojauksen tarkoituksena on erottaa vioittunut johto verkosta ja estää vian aikaisen oikosulkuvirran aiheuttamia lämpenemisvaurioita johdoille ja laitteille. Suojauksen tarkoituksena on myös varmistaa verkon vikaantumisen sattuessa käyttäjien sekä ulkopuolisten turvallisuus. (Lakervi & Partanen, 2008) Jakeluverkon oikosulkusuojaus toteutetaan johtolähdon suojareleen avulla.

Oikosulkuvirta I_k voidaan laskea yhtälöstä: (ABB, 2000)

$$I_k = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * Z_k} \quad (1)$$

jossa,

c on jännitekerroin

U_n on syöttävän verkon jännite

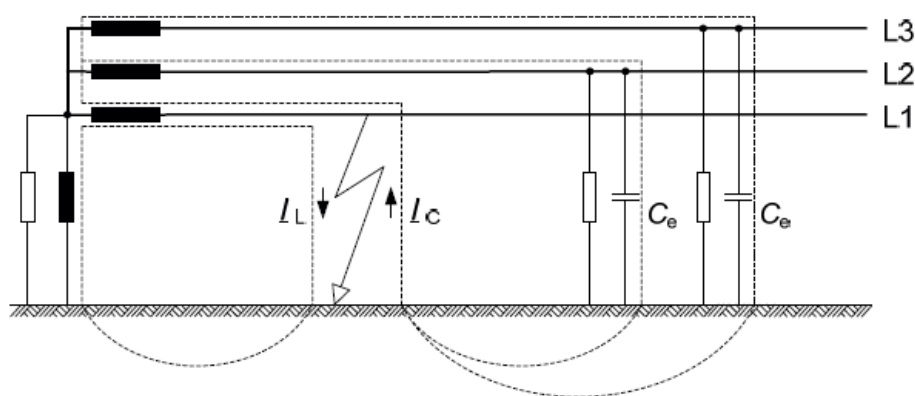
Z_k on impedanssi vikapaikasta katsottuna

4.1.2 Maasulkusuojaus

Maasulku on standardin SFS 6001:2018 määritelmän mukaan vika, joka syntyy, kun jännitteellinen johto yhdistyy maahan tai kun eristysvastus sen ja maan välillä laskee alle asetetun raja-arvon. Kaksoismaasululla tarkoitetaan puolestaan kahden tai useamman samaan sähköjärjestelmään kuuluvan vaihejohtimen samanaikaisia maasulkuja eri vikapisteissä. (SFS 6001, 2018)

Standardin vaatimuksena on, että kaikki sähköisesti erillään olevat suurjännitejärjestelmät on suojattava automaattisella maasulkusuojauksella, joka havaitsee syntyneen maasulkutilanteen ja kytkee sen pois (SFS 6001, 2018). Eli maasulkusuojauksen tarkoituksena on kytkeä vika pois vaaditussa ajassa ja näin estää vianaikaisen vaarallisen kosketusjännitteen syntyminen.

Maasulkuvirta I_f on virta, joka kulkee pääpiiristä maahan tai maadoitettuihin osiin vikakohdassa (maasulkukohdassa). Sammutetun järjestelmän yksivaiheisessa maasulussa maasulkuvirta on maasulun jäännösvirta $I_f = I_{RES}$ (KUVA 14). (SFS 6001, 2018)



$$|I_f| = |I_{RES}| = \sqrt{|I_C + I_L|^2 + |I_H|^2}$$

Selite

- I_f Maasulkuvirta
- I_C Kapasitiivinen maasulkuvirta (kompleksinen arvo sisältäen resistiivisen komponentin)
- I_L Rinnakkaisten sammutuskelojen virtojen summa (kompleksinen arvo sisältäen resistiivisen komponentin)
- I_H Harmoninen virta (eri taajuuksia)
- I_{Res} Maasulun jäännösvirta

KUVA 14. Maasulkuvirta sammutetussa järjestelmässä (SFS 6001, 2018)

Sammutetun verkon maasulkuvirta I_f voidaan laskea yhtälöstä: (Lakervi & Partanen, 2008)

$$I_f = \frac{U_v}{R_f + \frac{R}{1 + jR(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L})}} \quad (2)$$

jossa,

U_v on vaihejännite

R_f on vikaresistanssi

R on sammutuskuristimen sijaiskytkennän resistiivinen osa

C_0 on verkon yksivaiheinen maakapasitanssi

L on sammutuskuristimen induktanssi

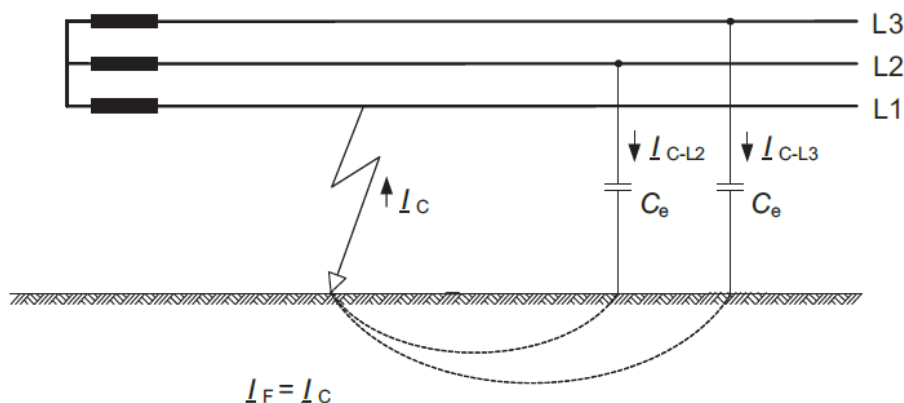
Vikapaikan jäännösmaasulkuvirta I_{RES} koostuu reaktiivisesta/kapasiitiivisesta komponentista (SFS 6001, 2018). Jäännösmaasulkuvirran suuruuteen vaikuttavat sammutuskuristimen vinovirityksen suhde resonanssipisteeseen eli kompensointiaste, sekä lisäksi sammutuskuristimen, rinnanvastuksen ja verkon johtimien resistanssit sekä resistiiviset vuotovirrat (Lakervi & Partanen, 2008).

Maasulkuvian aikaisen tähtipistejännitteen tunnistaminen on tarpeen johtolähdön suojaraleen maasulku- ja nollajännitesuojauksen sekä sähköaseman kiskon nollajännitesuojauksen U_0 asetteluita varten.

Sammutetun verkon tähtipistejännite U_0 eli nollajännite saadaan yhtälöstä: (Lakervi & Partanen, 2008)

$$U_0 = \frac{-R}{R_f + R + jRR_f(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L})} U_v \quad (3)$$

Maasta erotetun järjestelmän yksivaiheisessa maasulussa maasulkuvirta on maasulun kapasitiivinen virta $I_f = I_c$ (KUVA 15), missä I_c voi sisältää myös resistiivisen komponentin. (SFS 6001, 2018)



KUVA 15. Maasulkuvirta maasta erotetussa järjestelmässä (SFS 6001, 2018)

Maasta erotetun verkon maasulkuvirta I_f voidaan laskea yhtälöstä: (Lakervi & Partanen, 2008)

$$I_f = \frac{j3\omega C_0}{1+j3\omega C_0 R_f} U_v \quad (4)$$

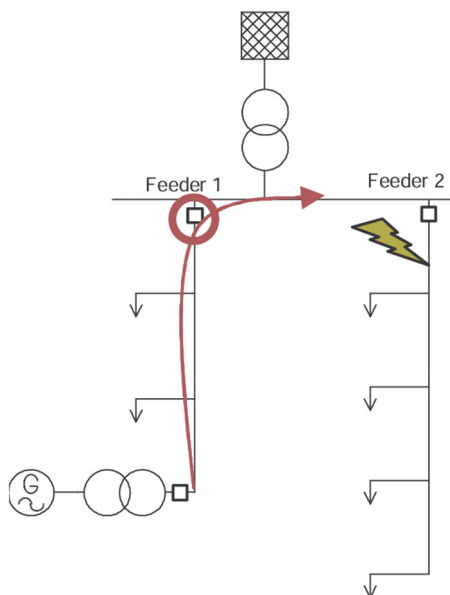
Ja tähtipistejännite U_0 eli nollajännite yhtälöstä: (Lakervi & Partanen, 2008)

$$U_0 = \frac{-1}{1+j3\omega C_0 R_f} U_v \quad (5)$$

Maasulkusuojaus toteutetaan tyypillisesti vaihevirtojen epäsymmetrian eli nollavirran ja tähtipistejännitteen valvontaan ja laukaisuehtoihin perustuvalla maasulun suuntareleellä, mutta viime aikoina myös admittanssin mittaukseen perustuvat suojaukset ovat yleistyneet.

4.2 Verkon suojausten tarpeeton laukaisu

Hajautetun tuotannon havaittiin voivan aiheuttaa tuotantoa sisältävän johtolähdön suojarahkeen havautumisen viereisen johtolähdön vian aikana ja sitä kautta katkaisijan tarpeettoman avautumisen. Tämän todettiin johtuvan siitä, että tuotanto syöttää vikavirtaa vikaantuneeseen johtolähtöön ja lähön rele Feeder 1 (KUVA 16) havahtuu.

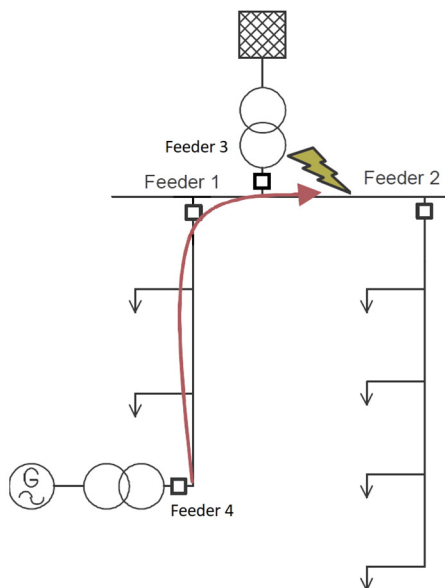


KUVA 16. Lähön laukeaminen virheellisesti viereisen johtolähdön viassa (Kumpulainen & Ristolainen, 2006)

Ratkaisuna esitetään suunnatun ylivirtasuojauksen käyttämistä, jolloin rele huomioi pelkästään johdolle päin kulkevan vikavirran (Kumpulainen & Ristolainen, 2006).

4.3 Takasyöttö kiskoviassa

Sähköaseman kiskovika aiheuttaa syöttökatkaisijan Feeder 3 (KUVA 17) avautumisen ja johtolähdölle kytketty tuotanto voi jäädä ylläpitämään kiskovikaa (Kumpulainen & Ristolainen, 2006).



KUVA 17. Takasyöttö kiskoviassa. Muokattu lähteestä (Kumpulainen & Ristolainen, 2006).

Takasyöttö on estettävissä syöttökennon laukaisun välittäminen sähköaseman sisäisenä siirtolaukaisuna kaikkien johtolähtöjen katkaisijoille Feeder 1 ja 2. Vaihtoehtoisesti siirtolaukaisu olisi vietävä ainakin vähintään lähdön katkaisijalle mihin tuotantoa on kytketty. (Kumpulainen & Ristolainen, 2006) Tuotantolaitteiston eroonkytkentäsuojauksen on kuitenkin toimittava riittävän nopeasti myös tässä tapauksessa, ettei johtolähtö jäisi katkaisijan avautumisen jälkeen saarekkeeseen. Kiskovikaa vastaava vikatilanne syntyy myös kantaverkon maasulkutilanteessa missä sähköaseman suojaukset toimivat. Paras toiminnallinen ratkaisu olisi viedä siirtolaukaisu aina kiskon ja kantaverkon vioissa suoraan tuotannon pääsuojalle Feeder 4 saakka. Riittävän nopea toiminnallisuus vaatisi mahdollisesti kuituyhteyden rakentamisen.

4.4 Tuotantoyksiköiden tarpeettomat laukaisut

Passiivisten eli paikallisten LoM suojausmenetelmien haavoittuvuudeksi on todettu alttius toimimaan oman johtolähdön ulkopuolisten vikojen tai muiden nopeiden muutostilojen aikana ja näin aiheuttavan tuotantoyksikköjen tarpeettomia laukaisuja (Kumpulainen & Ristolainen, 2006). Voimalaitoksen LoM-suojaukseen kohdistuva vaatimus irrottaa tuotanto riittävän nopeasti jakeluverkon vioissa, myös pikajälleenkytkennän jännitteettömänä aikana, voi myös johtaa edellä mainittuun tilanteeseen. Fingrid on määritellyt ehdot voimalaitosten lähivikakestoisuudelle. Tämä tarkoittaa, että voimalaitoksen tulee pysyä verkkoonkytkettynä muualla kuin voimalaitoksen liittymisjohdossa olevan vian aikana. Verkossa pysymistä edellyttävä aika on riippuvainen vianaikaisen jännitekuopan suuruudesta. (Fingrid VJV, 2018)

Lähivikakestoisuudelle asetettujen ehtojen saavuttamiseksi ja sitä kautta tuotannon tarpeettomien laukaisuiden estämiseksi on tuotantolaitoksen jännitesuojauksen asetteluissa noudatettava kulloinkin Fingridin VJV ehtojen mukaisia ohjearvoja.

4.5 Jälleenkytkennän epäonnistuminen

Jälleenkytkentöjen tarkoituksena on saada ilmajohtoverkossa syntyneen vian aiheuttama keskeytys mahdollisimman lyhyeksi tai jopa vika poistumaan kokonaan. On arvioitu, että 70-90 prosenttia vioista saadaan selvitettyä jälleenkytkentöjen avulla, erityisesti pikajälleenkytkentöjen. Jakeluverkko-yhtiöiden tavoitteena on saada kuitenkin jälleenkytkentöjä vähennytyksi johon tehokas tapa on muuttaa jakeluverkko maasta erotetusta kompensoiduksi. Tällä menettelyllä saadaan syntyvää maasulkuvirtaa pienennettyä niin että vika voi sammua jopa itseksensä ilman että katkaisijan tarvitsee toimia. Toinen tehokkaaksi todettu tapa vähentää pikajälleenkytkentöjä on käyttää jakelumuuntamoiden ylijännitesuojauksena kipinävälin sijaan venttiilisuojia. (Kumpulainen & Ristolainen, 2006)

Jakeluverkkoon kytketyt tuotantoyksiköt voivat kuitenkin jäädä syöttämään jännitettä jälleenkytkennän jännitteettömänä aikana ja näin ylläpitämään valokaarta. Kertaalleen syntyneen valokaaren ylläpitämiseen riittää pienikin jännite. Tämän seurauksena johtolähdön rele näkee edelleenkin vikavirtaa ja jälleenkytkentä epäonnistuu. Hajautetun tuotannon nopea poiskytkentä on ensiarvoisen tärkeää jälleenkytkentöjen onnistumiselle ja niihin liittyvät ongelmat onkin tunnustettu keskeiseksi hajautettuun tuotantoon liittyväksi ongelmaksi. (Kumpulainen & Ristolainen, 2006)

Ratkaisuna jälleenkytkentöjen onnistumiseksi on esitetty pikajälleenkytkennän jännitteettömän ajan pidentämistä vähintään yhteen sekuntiin. Tämä ei oikein ole hyväksyttävä ratkaisu kiristyvien laatuvaatimusten vuoksi, mutta tulevaisuuden potentiaalina nähdään älykäs adaptiivinen jälleenkytkentä missä jännitteetön väliaika määräytyy releen analysoiman virtatiedon perusteella. Kuitenkin paras ratkaisu on selektiivinen eroonkytkentäsuojaus missä suojaus irrottaa tuotannon nopeasti verkosta. (Kumpulainen & Ristolainen, 2006)

Jälleenkytkentöjen ongelmassa merkittävimäksi haasteeksi on tunnistettu tuotantolaitteiston eroonkytkentäsuojauksen luotettava onnistuminen riittävän nopeasti, että voimalaitos ei jää syöttämään jännitettä ja ylläpitämään valokaarta pikajälleenkytkennän jännitteettömänä aikana.

4.6 Tahdistamaton jälleenkytkentä

Sähkönjakeluverkon jälleenkytkentöjä käytettäessä voi syntyä tilanne missä tuotannon irtautuminen verkosta jälleenkytkennän jännitteettömänä aikana ei ole onnistunut, ja saarekkeeseen joutuneen tuotannon taajuus ajautuu pois syöttävän verkon tahdista. Tätä tilaa kutsutaan vaiheoppositioksi ja riski siihen on sitä suurempi, mitä kauempana kulutus ja tuotanto ovat toisistaan. Jos voimalaitos kytkeytyy takaisin jakeluverkkoon vaiheoppositiossa voi se aiheuttaa laitevaurioita ja virta- jännite- ja vääntömomenttitransientteja. Toisaalta tahdistamaton jälleenkytkentä on aina haitallinen ilman vaiheoppositiotakin. (Kumpulainen & Ristolainen, 2006)

Tilanne voitaisiin Kumpulainen ja Ristolaisen raportin mukaan ennaltaehkäistä varustamalla johtolähtö releellä missä on tahdissaolon ja jännitteen valvonta, sekä sallimalla johtolähdön pikajälleenkytkentä pelkästään tahdissa tai jännitteettömänä. Tämä menetelmä pääasiallisena suojana kuitenkin asettaisi jakeluverkkoon liittyvät eriarvoiseen asemaan sähkön laadun näkökulmasta ja toteutuksen verkkoyhtiön vastuulle sekä antaisi tuotannolle mahdollisuuden jatkaa jännitteen syöttämistä johtolähdölle ja näin estää jälleenkytkennän onnistumisen (Kumpulainen & Ristolainen, 2006). Menetelmää voitaisiin kuitenkin tapauskohtaisesti ajatella mahdollisena varasuojana varsinaiselle voimalaitoksella toteutettavalle eroonkytkentäsuojaukselle, jolla verkosta irtautuminen jälleenkytkennän jännitteettömänä aikana sekä takaisinkytketymisen tahdissaolon valvonta on syytä muutenkin hoitaa.

4.7 Jänniteongelmat

Sähkönjakelujohtoon liitetty generaattori voidaan kuvitella negatiiviseksi kuormitukseksi, joka nostaa käydessään lähiseutunsa jännitettä. Erityisesti jos voimalaitos sijaitsee johtohaaran loppupäässä, jännitteen kohoaminen on pääosin myönteinen asia. Toisaalta jos tuotanto on kulutusta huomattavasti suurempaa voi jännitteenousu olla myös haitallista. (Lakervi & Partanen, 2008)

Yleensä hajautetun tuotannon on kuitenkin havaittu lisäävän jännitteen vaihtelua verkossa. Tyypillisesti ongelmia aiheuttavat verkonjännitteen nousu sekä voimalaitoksen irti kytkeytymisestä aiheutuvat jännitteen notkahdukset kuten jälleenkytkentöjen yhteydessä, kun tuotantoyksiköt kytkeytyvät irti verkosta jälleenkytkennän jännitteettömänä aikana. Ongelma on suurimmillaan verkon huippukuormituksen aikana, kun hajautettua tuotantoa on käynnissä. Edellä mainitun alijännitetilanteen ennaltaehkäisy nähdään ehkäpä merkittävimäksi yksittäiseksi tekijäksi hajautetun tuotannon määrää rajoittamassa. (Kumpulainen & Ristolainen, 2006)

5 HAJAUTETUN TUOTANNON VERKKOON LIITTÄMISELLE ASETETUT YLEISET VAATIMUKSET

5.1 Laitteistolle ja käyttämiselle asetettujen vaatimusten tarkoitus

Vaatimuksia tarvitaan, jotta varmistetaan sähkönjakeluverkon turvallisuus ja luotettavuus. Ilman näitä vaatimuksia voimalaitoksen kytkeminen verkkoon voisi aiheuttaa merkittäviä riskejä, kuten sähkökatkoksia, jännitepiikkejä tai muita häiriöitä, jotka voivat vahingoittaa laitteistoa ja vaarantaa käyttäjien turvallisuuden. Vaatimukset myös varmistavat, että voimalaitos irtautuu automaattisesti jakeluverkosta vian sattuessa. Lisäksi oikeanlaisella suunnittelulla ja rakentamisella voidaan estää tuotantolaitteiston tahaton kytkeytyminen verkkoon epäoptimaalisissa olosuhteissa, mikä vähentää riskejä sekä tuotantolaitteelle että jakeluverkolle sekä parantaa jakeluverkon käyttöturvallisuutta. Näin säilytetään verkon vakaus ja estetään mahdolliset laiterikot ja vaaratilanteet.

Vaikka voimalaitokselta vaadittujen suojausmenetelmien toteuttamisesta ja vaatimuksista vastaa liittyjä, on verkkoyhtiöllä kuitenkin aina vastuu jakeluverkkonsa sähkön laadusta ja turvallisuudesta. Tämän vuoksi verkkoyhtiöillä voi olla toisistaan poikkeavia yhtiökohtaisia vaatimuksia verkkoon liittymiselle sekä parhaaksi katsomilleen suojausteknisille ratkaisuille.

5.2 Velvoittavat lait ja standardit

Tässä luvussa on kuvattu pääasialliset sähkönjakelua ja laatua velvoittavat lait ja standardit, jotka liittyvät oleellisesti hajautetun tuotannon yleiseen jakeluverkkoon liittämiseen.

Sähköturvallisuuslaki 1135/2016 määrittelee yksittäisille sähkölaitteille- sekä kokonaisille laitteistoille laissa asetetut vaatimukset sekä lain ehdot vaatimuksenmukaisuuden osoittamiselle ja valvonnalle. Lain tarkoituksena on varmistaa sähkölaitteistojen ja -laitteiden käyttöturvallisuus ja vaatimuksenmukaisuus sekä ehkäistä sähkömagneettisten häiriöiden haitalliset vaikutukset sähköverkon käyttäjille. (Sähköturvallisuuslaki, 2016)

Standardi SFS-EN 50160 antaa yleiselle eurooppalaiselle sähkönjakeluverkolle normaalin käyttötilanteen jakelujännitteen ja taajuuden pääominaisuudet ja raja-arvot liittymispisteessä. Standardi linjaa vaatimukset jännitteen sallittuihin vaihteluihin, aaltomuotoon, symmetrisyyteen ja taajuuteen. (SFS-EN 50160, 2010)

Sähkömarkkinalaissa 588/2013 on kerrottu ehdot ja vaatimukset luvanvaraiselle sähköverkkotoiminnalle ja -toimijalle varmistamaan terveet ja tehokkaasti toimivat sähkömarkkinat ja turvallisen sekä toimitusvarman sähkönjakelun turvaamiseksi loppukäyttäjille. (Sähkömarkkinalaki, 2013)

5.3 Laitteistolle ja käyttämiselle asetetut turvallisuusvaatimukset

Sähkölaitteiden ja -laitteistoiden suunnittelulle, rakentamiselle, valmistukselle, huollolle ja käytölle asetetaan sähköturvallisuuslaissa erityisiä vaatimuksia: (Sähköturvallisuuslaki, 2016)

- Ne eivät aiheuta vaaraa kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle.
- Niistä ei synny kohtuutonta häiriötä sähköisesti tai sähkömagneettisesti.
- Niiden toiminta ei herkästi häiriinny sähköisesti tai sähkömagneettisesti.

Laitteiden on oltava suunniteltu siten, että niiden tavanomaisessa käytössä ei synny sähköiskun tai palon vaaraa. Lisäksi suunnittelussa on otettava huomioon mahdolliset epätavalliset käyttötilanteet. Asennukset on suoritettava ammattitaidolla käyttäen laadukkaita tarvikkeita. Sähkölaitteiden ja -laitteistojen omistajien on vastattava turvallisuudesta, varmistaen, että ne pysyvät turvallisina hallinnassaan. Kaikki laitteissa ja laitteistoissa havaitut viat ja puutteet on korjattava välittömästi estääkseen mahdolliset onnettomuudet. Sähköalan työtehtävät suunnitellaan ja toteutetaan siten, että työntekijän tapaturmariski minimoituu. Tärkeimmät tekijät sähkötyöturvallisuudessa ovat työssä käytettävät menetelmät, välineet ja asianmukainen perehdyttäminen. (Lakervi & Partanen, 2008)

5.3.1 Verkon käyttöönotto

Verkon käyttöönoton tarkoituksena on lyhyen aikavälin sähkön laadun, turvallisuuden, asiakaspalvelun ja taloudellisuuden ylläpitoa, joista korostuvat erityisesti vastuu turvallisuudesta ja käyttövarmuudesta. Käyttöönotto on luonteeltaan prosessien hallintaa mahdollisimman tehokkaan ja turvallisen toiminnan takaamiseksi. (Lakervi & Partanen, 2008) Käyttöönoton vastaa verkkoyhtiön käytönjohtaja ja käyttöönotto voi olla toteutettu verkkoyhtiön omana työnä taikka ostopalveluna.

Käyttöönottoa ohjataan valvomosta käsin, joka voi olla joko kiinteä käyttökeskus taikka päivystäjän mukana kulkeva kokonaisuus, joka mahdollistaa verkon suojaus- ja kytkinlaitteiden reaaliaikaisen valvonnan lisäksi toimintaan ankarasti liittyvän työ- ja sähköturvallisuusvastuun huomioimisen. Käyttöönottoon kuuluvat oleellisesti sähköasema- ja verkostoautomaation mahdollistamat kytkin- ja erotinlaitteohjaukset sekä mittauslaitteet. (Lakervi & Partanen 2008)

5.3.2 Turvallinen työskentely verkossa

Jakeluverkon ylläpito ja kehittämisen vuoksi verkkoon kohdistuu rakennus-, kunnossapito, sekä viankorjaustöitä, joita voidaan toteuttaa erilaisilla työmenetelmillä. Työn turvallisen suorittamisen edellytyksenä on, että tuotantolaitteisto on oltava tarvittaessa erotettavissa verkosta ja verkonhaltijalla tulee olla myös rajoittamaton pääsy erottimelle (SFS 6002, 2015). Yleensä verkonhaltijat sijoittavat hallinnassaan olevan erotuslaitteen myös keskijänniteverkon liittymispisteeseen.

Sähkötyöturvallisuusstandardin SFS 6002 mukaisesti käytettävät työmenetelmät voidaan jakaa kolmeen erilaiseen työkäytäntöön: työ jännitteettömänä, jännitetyö ja työ jännitteisten osien läheisyydessä (SFS 6002, 2015). Kaikille työmenetelmille on yhteistä sähköiskulta ja/tai oikosulun ja valokaaren vaikutuksilta suojautuminen. Tässä luvussa käsitellään jännitteettömänä työskentelyn vaatimuksia pääpiirteittäin.

Standardin edellyttämän tarkasti määritellyn työkohteen jännitteettömäksi tekemisen ja jännitteettömänä pysymisen varmistamisen viisi tärkeintä toimenpidettä suoritusjärjestyksessään ovat: (SFS 6002, 2015).

- Työkohteen täydellinen erottaminen.
- Jännitteen takaisinkytkemisen estäminen.
- Jännitteettömyyden toteaminen.
- Työmaadoitus.
- Suojaus läheisiltä jännitteisiltä osilta.

Täydellisen erottamisen kansallinen lisävaatimus velvoittaa työkohteen erityisen huolellista jännitteettömäksi tekemistä, jos jännitteen kytkeminen on mahdollista useammasta kuin yhdestä suunnasta tai jos laitteessa on monia muita kytkentämahdollisuuksia. Myös takajännitteen mahdollisuus on tunnistettava ja estettävä esimerkiksi rinnan käyvien muuntajien taikka varavoimalaitteistojen, aurinkosähköjärjestelmien ja UPS laitteistojen työkohteeseen aiheuttama vaarallinen jännite. Suurjännitelaitteistojen kytkennästä on tehtävä aina kirjallinen kytkentäohjelma lukuun ottamatta yksittäisten laitteiden kytkemisiä sekä häiriö- ja hätätilannekytkentöjä. (SFS 6002, 2015)

5.4 Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset

Kantaverkkoyhtiö Fingrid on määritellyt eurooppalaisiin verkkosääntöihin (Euroopan komission asetus 2016/631) perustuvat, kansallisilla lisäyksillä ja vaatimuksilla täydennetyt järjestelmätekniset vaatimukset Suomen sähköjärjestelmään liitettäville voimalaitoksille. Eurooppalaiset verkkosäännöt on muodostettu tasapuolisten ja syrjimättömien kilpailuolosuhteiden mahdollistamiseksi sisämarkkinoilla, sähköjärjestelmien käyttövarmuuden takaamiseksi ja liittymisehtojuhtojen yhtenäistämiseksi (Fingrid VJV, 2018). Vaatimuksista käytetään yleisesti lyhennettä VJV.

Vaatimusten pyrkimyksenä on varmistaa, että voimalaitos kykenee kestämään sähköjärjestelmässä esiintyvät jännite- ja taajuusvaihtelut, ja että voimalaitos tukee tarvittaessa sähköjärjestelmän toimintaa häiriötilanteissa, sekä toimii luotettavasti häiriöiden aikana ja -jälkeen, eikä voimalaitos verkossa ollessaan haittaa muita sähköjärjestelmään kytkettyjä laitteita. Tavoitteena on lisäksi, että liittymispisteen verkonhaltija sekä Fingrid saavat käyttöönsä voimalaitoksen sähköjärjestelmän ja käytön suunnitteluun sekä käyttövarmuuden ylläpitoon tarvittavat tiedot. (Fingrid VJV, 2018)

Vaatimukset koskevat kaikkia Suomen sähköjärjestelmään 19.5.2018 jälkeen liitettyjä tai liitettäviä, mitoitusteholtaan vähintään 0,8 kW voimalaitoksia sekä ennen vaatimusten voimaantumista käyttöönotettuja voimalaitoksia, kun niiden järjestelmäteknisiä ominaisuuksia muutetaan. (Fingrid VJV, 2018)

Vaatimuksia on määritelty voimalaitoksen liittämistavan (Tyyppiluokat A-D) ja mitoitustehon sekä liittymispisteen jännitetason mukaan (TAULUKKO 2).

TAULUKKO 2. Voimalaitosten tyyppiluokat mittaustehon ja liittymispisteen jännitteen perusteella (Fingrid VJV, 2018)

Tyyppi-luokka	Liittymispisteen jännitetaso	Ehto	Voimalaitoksen mitoitusteho P_{max}
Tyyppi A	Liittymispisteen jännitetaso on alle 110 kV ¹	ja (*)	Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 0,8 kW mutta alle 1 MW. (0,8 kW $\leq P_{max}$ < 1 MW)
Tyyppi B	Liittymispisteen jännitetaso on alle 110 kV ¹	ja (*)	Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 1 MW mutta alle 10 MW. (1 MW $\leq P_{max}$ < 10 MW)
Tyyppi C	Liittymispisteen jännitetaso on alle 110 kV	ja (*)	Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 10 MW mutta alle 30 MW. (10 MW $\leq P_{max}$ < 30 MW)
Tyyppi D	Liittymispisteen jännitetaso on vähintään 110 kV	tai (+)	Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 30 MW. ($P_{max} \geq 30$ MW)

¹ Riippumatta liittymissopimuksen mukaisesta liittymispisteen jännitteestä, tyyppien A ja B voimalaitosten liittymispisteen jännitetasoksi katsotaan se jännitetaso, johon voimalaitoksen päämuuntaja liitetään tai jännitetaso, johon voimalaitos liittyy suoraan ilman päämuuntajaa.

Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset (VJV) ovat määritelty Fingridin asiakkaille. Paikallisesta sähköjakelusta vastaava verkkoyhtiö Fingridin asiakkaana vastaa omistamansa sähköaseman ja jakeluverkon VJV-vaatimusten täyttymisestä, kun niihin liittyy sähköntuotantoa. Vastaavasti verkkoyhtiö edellyttää VJV-vaatimustenmukaisuutta myös verkkoonsa liitettävältä sähköä tuottavalta voimalaitokselta sitä koskevilta osin.

Yleisesti ottaen vaatimuksia tarkastellessa on tärkeä tunnistaa mitä jännitetasoa vaatimukset koskevat, milloin vaatimukset kohdistuvat sähköasemaan tai yksittäiseen aseman johtolähtöön ja ketä asiakkaalla missäkin yhteydessä tarkoitetaan.

Seuraavissa luvuissa käsitellään tiivistetysti keskijänniteverkkoon sovellettavissa olevia suojauksen ja laadun kannalta oleellisia tyyppiluokkien A-C VJV-vaatimuksia.

5.4.1 Suojausvaatimukset

Suojausvaatimusten tavoitteena on minimoida riskit ja vaaratilanteet sekä turvata sähköverkon ja voimalaitosten toiminta. Tämä auttaa puolestaan ehkäisemään vahinkoja, turvaa sähkön toimitusvarmuuden sekä varmistaa sähköntuotannon ja -jakelun turvallisuuden ja luotettavuuden.

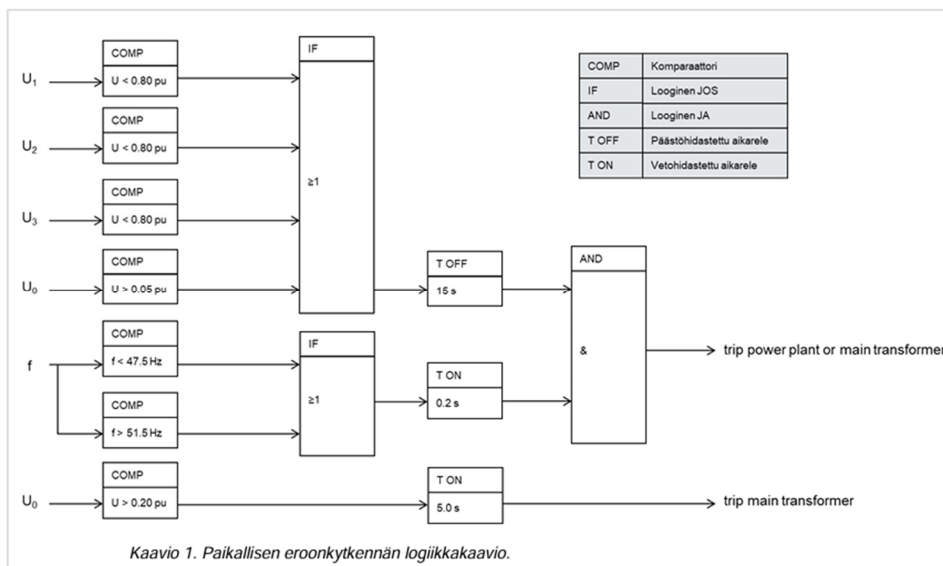
Suurjänniteverkkoon liittyville voimalaitoksille on toteutettava paikallinen eroonkytkentäreleistys, jolta vaaditaan yli- ja alijännitesuojauksia, yli- ja alitaajuussuojauksia, tahdissaolonvalvonta sekä saarekekäytön estosuojaus (Loss of Mains = LoM) (Fingrid, 2022). Onkin luontevaa, että paikallinen eroonkytkentäreleistys vastaavilla toiminallisuuksilla voidaan vaatia myös keskijänniteverkossa voimalaitoksen pääsuojaksi. Lisäksi esimerkiksi Elenia suosittelee määrittelemäänsä liittymispisteeseen nollavirtasuojauksia, katkeilevan maasulun suojausta ja tietyin ehdoin myös nollajännitesuojauksia. Elenia vaatii liittymisohjeessaan myös paikallisen eroonkytkentäreleistyksen 1-5 MW voimalaitoksille ja määrittelee tapauskohtaisesti, rakennetaanko 5 MW ja suuremmille voimalaitoksille eroonkytkentäreleistys Elenian sähköasemalle vai käytetäänkö eroonkytkennän viestiyhteyttä (EVY) (Elenia, 2022).

Fingrid velvoittaa Sähköturvallisuuslakiin 1135/2016 ja standardiin SFS 6001 (kohta 4.2.2) vedoten 110 kV maasulkujännitesuojauksen toteuttamisen muuntajille, joiden kautta tuotantoa liittyy sähköverkkoon. Maasulkujänniterelettä ei kuitenkaan Fingridin mukaan vaadita, jos muuntajan takainen tuotantoteho on alle 50 % kulutuksen minimitehosta, ja yksittäisen tuotantolaitoksen teho on alle 1 MW. Maasulkujännitereleen pois jättäminen asettaa liittyjälle vastuun valvoa kulutuksen ja tuotannon välistä suhdetta. (Fingrid, 2022) Koska sähköasemansa kautta kantaverkon liittynä keskijänniteverkon sähköntuotantotilanteissa on paikallinen verkkoyhtiö, on 110 kV maasulkujännitteen valvonnalle vahvoja perusteita ilman jakeluverkkoon liitettyä tuotantokin ja sitä kautta voisi ajatella olevan korkea kynnyksen sen pois jättämiselle 50 % säännön perusteella. Jos 110 kV mittaus ja sitä hyödyntävä maasulkujännitesuojauksia on toteutettu, on sen havahtumistieto hyödynnettävissä myös mahdollisissa nopeissa siirtolaukaisuissa. Voimalaitoksen paikallinen maasulkujännitesuojauksia on puolestaan toteutettava aina ja vaatii myös jännitemittauksen paikallisen toteuttamisen.

5.4.2 Tuotantoliittymän paikallinen eroonkytkentä

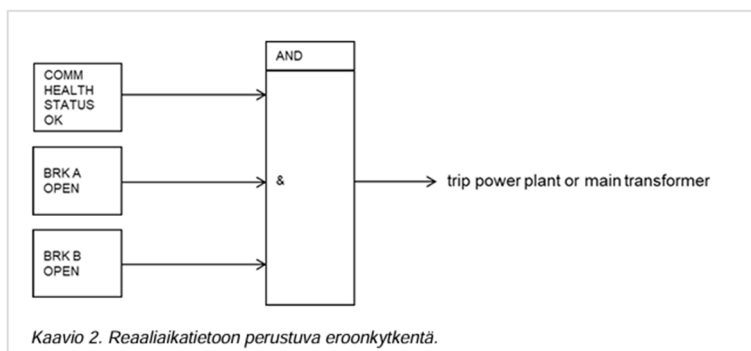
Fingrid määrittelee paikallisen eroonkytkennän tarkoituksiksi voimajohtoon liittyneiden asiakkaiden sähkölaadun ja turvallisuuden parantamisen sekä voimajohdon kohtuullisen häiriöttömän käytön. Paikallisen eroonkytkennän toteuttaminen on asiakkaan vastuulla ja suurjänniteliitynnöissä eroonkytkentä toteutetaan yleensä voimalaitoksen sähköaseman releillä ja tarvittava jännitetieto otetaan sähköaseman jännitemuuntajilta. Fingrid velvoittaa yli 1 MW voimalaitosten eroonkytkentää verkosta voimajohdon pikajälleenkytkennän jännitteettömänä aikana ennen kytkennän kiinniohjausta. Mikäli paikallista eroonkytkentää ei voida muuten luotettavasti toteuttaa voidaan käyttää eroonkytkennän viestiyhteyttä. (Fingrid, 2022) Vastaavasti samoja vaatimuksia voidaan soveltaa myös keskijännite-tuotantoliittymissä, sillä poikkeuksella, että eroonkytkentä toteutetaan yleensä ensisijaisesti voimalaitoksen kojeistoon taikka liittymispisteeseen sijoitetulla eroonkytkentäreleistyksellä, jolloin myös jännitettä on mitattava paikallisesti.

Paikallisen eroonkytkennän on perustuttava Fingridin mukaan jännite- ja taajuusehtojen yhdistelmään, jonka logiikka on esitetty kuvassa 18. Tiivistettynä paikallisen eroonkytkennän on toteuduttava, jos verkkosyöttö katkeaa taikka voimalaitoksen liitännänavoista mitattu jännite ja taajuus poikkeavat määritellystä normaalitasosta. Eli kun minkä tahansa vaiheen jännite alittaa 0.8 pu tai nollajännite ylittää 0.05 pu, käynnistetään päästöhidastettu aikarele, joka odottaa 15 sekunnin ajan. Mikäli taajuus karkaa sallitusta 47.5 – 51.5 Hz ikkunasta 15 sekunnin odotusaikana 200 ms ajan katkaisija avautuu ja voimalaitos irtoaa verkosta. Lisäksi on käytettävä nollajännitteeseen perustuvaa hidastettua muuntajasuojausta asetteluarvoilla 0.20 pu ja 5 sekuntia. (Fingrid, 2022)



KUVA 18. Paikallisen eroonkytkennän logiikkakaavio (Fingrid, 2022)

Tapauskohtaisesti voidaan edellyttää eroonkytkennän viestiyhteyttä (EVY) saarekkeenestosuojauksen luotettavan eroonkytkennän varmistamiseksi. Reaaliaikatietoon perustuvassa eroonkytkennässä voimalaitoksen eroonkytkentäreleistykselle välitetään tieto voimajohtoliittymän vasta-asemien suojaavien katkaisijoiden tiloista. Paikallinen eroonkytkentäreleistyks irrottaa voimalaitoksen sähköverkosta, jos viestiyhteys on kunnossa ja oletetaan saarekkeen syntyneen eli vasta-asemien molemmat katkaisijat ovat auki (KUVA 19). Jos viestiyhteys ei ole kunnossa, luotetaan paikalliseen eroonkytkentään. (Fingrid, 2022)



KUVA 19. Reaaliaikaisen eroonkytkennän logiikkakaavio (Fingrid, 2022)

Keskijänniteverkkoon liitetyn voimalaitoksen eroonkytkennän viestiyhteydelle kohdistuu merkittävä nopeusvaatimus, että suojaus ennättäisi toimia vaaditussa ajassa. Viestiyhteyden nopeuden lisäksi on otettava huomioon myös releiden ja katkaisijoiden valmistajakohtaiset toiminta-ajat.

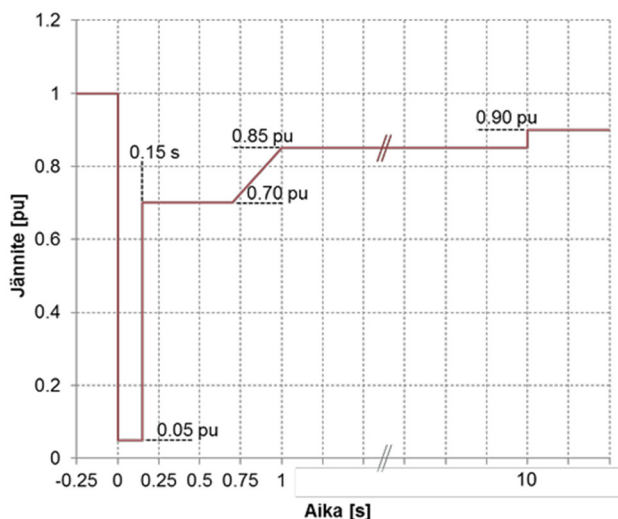
5.4.3 Lähivikakestoisuus

Voimalaitokselta vaaditaan lähivikakestoisuutta, että laitoksen toiminta ei häiriinny eikä se irtoa verkosta jakeluverkossa ilmenevien ohimenevien jännitteen- tai taajuuden muutostilanteiden tai toisen johtolähdön häiriöiden aikana ja niiden jälkeen. Lähivikavaatimus on voimassa kolmivaiheisissa oikosuluissa, kaksivaiheisissa oiko- ja maasuluissa sekä yksivaiheisissa maasuluissa. (Fingrid VJV, 2018)

Lähivikavaatimus on voimassa kun: (Fingrid VJV, 2018)

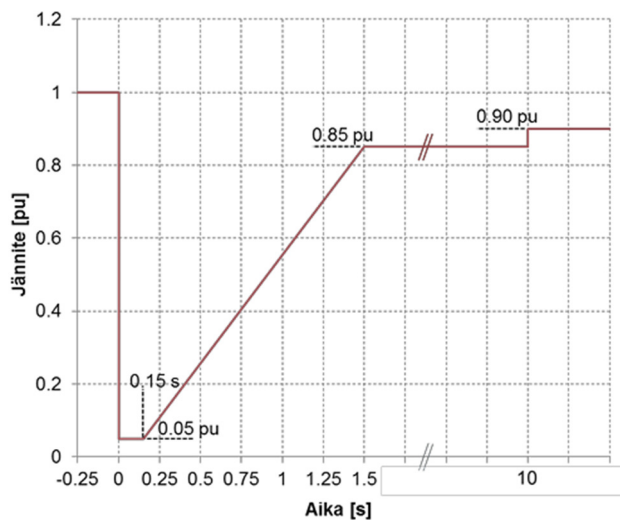
- Ennen jännitehäiriötä voimalaitoksen liittymispisteen jännite on 1.0 pu
- Ennen jännitehäiriötä voimalaitos ei syötä eikä ota loistehoa liittymispisteestä
- Ennen jännitehäiriötä voimalaitoksen automaattinen jännitteensäätö (AVR) on toiminnassa
- Liittymispisteen oikosulkutehon oletetaan olevan kesätilanteen normaali ennen lähivikaa sekä sen jälkeen

Voimalaitoksen on kyettävä toimimaan normaalisti ja pysyttävä liittymispisteen verkonhaltijan määrittelemällä jännitealueella, sekä 49.0-51.0 Hz välisellä taajuusalueella. Lisäksi voimalaitoksen on myös toimittava normaalisti 30 minuutin ajan verkon taajuuden ollessa 51.0-51.5 Hz ja 49.0-47.5 Hz. Voimalaitoksen tulee myös pystyä jatkamaan normaalia toimintaansa taajuuden muutosnopeuden ollessa alle 2.0 Hz/s. (Fingrid VJV, 2018)



KUVA 20. Luokan B ja C tahtikoneen lähivikakestoisuusvaatimus (Fingrid VJV, 2018)

Keskijännitteeseen liitettävältä luokan B ja C tahtikonevoimalaitokselta vaaditaan kuvan 20 mukaisesti jakeluverkon lyhytaikaisien jännitekuoppien sietämistä ja säilytettävä myös tahtikäyttönsä. Kuvassa 20 on esitetty jännitteen suhteellisuusarvona 1.0 pu, joka kuvaa jännitettä ennen häiriötä. Laitoksen on siedettävä 0.05 pu jännite 150 ms ajan irtoamatta sähköverkosta ja menettämättä tahtikäyttöään. (Fingrid VJV, 2018)



KUVA 21. Luokan B ja C suuntaajakytketyn voimalaitoksen lähivikakestoisuusvaatimus (Fingrid VJV, 2018)

Keskijännitteeseen liitettävältä luokan B ja C suuntaajakytketyltä voimalaitokselta vaaditaan kuvan 21 mukaisesti jakeluverkon lyhytaikaisien jännitekuoppien sietämistä ja säilytettävä toimintansa normaalina. Kuvassa 21 on esitetty jännitteen suhteellisuusarvona 1.0 pu, joka kuvaa jännitettä ennen häiriötä. Laitoksen on siedettävä enimmillään 0.05 pu jännitettä 150 ms ajan irtoamatta sähköverkosta. (Fingrid VJV, 2018)

5.5 Loisteho, reaaliaikainen mittaustiedon vaihto

Voimalaitosten järjestelmätekniikassa vaatimuksissa on määritelty tuotantotyyppin ja liittymisjännitteen luokitteluiden mukaiset vaatimukset loistehon kapasiteetille, kapasiteetin rajoittamiselle ja loistehon säädölle (Fingrid VJV, 2018). Fingridin kulloinkin voimassa olevat vaatimukset on otettava huomioon liittämistä sovitettaessa. Muuten loistehoa ei käsitellä tämän laajemmin tässä opinnäytetyössä.

Tyyppin B-D voimalaitoksia koskee pätö- ja loistehon reaaliaikamittaustiedon vaatimus sekä mittaustiedon ja kytkinlaitteiden tilojen tiedonsiirto Fingridille. Jos voimalaitos liittyy toisen verkonhaltijan sähköverkkoon, on liittymispisteen verkonhaltijan veloitettava liittymään toimittamaan vaaditut tiedot sovitusti Fingridille, tai toimitettava tiedot itse. (Fingrid VJV, 2018)

Tiedonvaihto toteutetaan sopimusosapuolien verkkokäytönvalvontajärjestelmien välillä hyödyntäen pääasiassa FEN-verkkoa (FIN Elcom Network). Tiedonsiirrossa käytetään IEC 60870-5-104 protokollaa ja siirrettävän tiedon päivitysväli on korkeintaan 60 sekuntia. (Fingrid VJV, 2018)

5.6 Automaattinen kytkeytyminen

Voimalaitokselle annetaan mahdollisuus kytkeytyä automaattisesti takaisin sähköverkkoon seuraavien ehtojen täyttyessä: (Fingrid VJV luonnos, 2024)

- Sähköverkon taajuus on 49,0–51,0 Hz
- Liittymispisteestä mitattu jännite on sallitulla vaihteluvälillä
- Voimalaitoksen pätötehon minuutin aikainen muutosnopeus suhteessa mitoitustehoon on korkeintaan 20 %
- Liittymispisteen verkkoyhtiö hyväksyy voimalaitokselle automaattisen jälleenkytkentäjärjestelmän, ja kytkeytymisen 1–10 minuutin sisällä häiriötilan päättymisestä

5.7 Kantaverkkoon liittymisen vaiheet

Fingrid kuvaa verkkosivullaan (www.fingrid.fi/kantaverkko/liitynta-kantaverkkoon) kantaverkkoon liittymisen etenevän vaiheittain sekä että liityntä suunnitellaan yhteistyössä asiakkaan kanssa ja alkaa asiakkaan yhteydenotosta. Fingrid on määrittellyt asiakkaalta pyydettävät asiakirjat ja tiedot kosen suunnittelu-, käyttöönotto- ja todentamis- sekä tarkastus- ja hyväksyntävaihetta. (Fingrid, 2024) Vuonna 2024 päivittyvä VJV asiakirja nostaa julkisen luonnosversion perusteella mukaan vielä esisuunnitteluvaiheen. Fingrid on julkaissut verkkosivuillaan karttapalvelun liityntäkyselyä varten sekä Oma Fingrid palvelun missä voi esimerkiksi toimittaa liittymäprosessissa tarvittavia asiakirjoja.

Myös liittymispisteen verkonhaltijan on julkaistava luettelo vaatimuksenmukaisuuden todentamisen asiakirjoista, vaatimuksista ja tiedoista, jotka liittymään tulee toimittaa osana todentamisprosessia (Fingrid VJV, 2018). Esimerkiksi myös Elenia on julkaissut verkkosivullaan eri liittymisvaiheiden kuvaukset suurjänniteliittymiä varten muodostetussa ohjeessaan (Elenia, 2022). Seuraavissa kappaleissa kerrotaan tiivistetysti Fingridin vaiheittainen liittymäprosessi.

Vaihe 0 on esisuunnitteluvaihe ja siinä liittymään järjestää todentamisprosessia käsittelevän aloituskokouksen, mihin osallistuu Fingridin lisäksi myös liittymispisteen verkkoyhtiö. Kokouksessa käsitellään

hankkeen tekniset asiat ja keskeisimmät suunnitteluperiaatteet sekä sovitaan todentamisprosessiin liittyvät asiat. (Fingrid VJV luonnos, 2024)

Vaihe 1 on varsinainen suunnitteluvaihe missä liittöjä toimittaa liittömisspisteen verkonhaltijalle suunnitteluvaiheessa vaadittavat tiedot ja vaatimuksenmukaisuusilmoituksen vaadittavilta osin täydennettynä. Vaiheen 1 aikana liittöjä toteuttaa reaaliaikamittauksen ja toimittaa myös vaaditut mallinnustiedot. Liittömisteen verkonhaltija antaa liittöjälle väliaikaisen käyttöönottoilmoituksen, jos toimitetuissa tiedoissa ei ole ollut puutteita ja Fingrid on hyväksynyt mallinnustiedot. (Fingrid VJV, 2018)

Vaihe 2 on käyttöönotto- ja todentamisvaihe, jonka aikana liittöjä suunnittelee ja suorittaa vaaditut käyttökokeet ja toimittaa vaiheessa vaaditut tiedot ja vaatimuksenmukaisuusilmoituksen vaadittavilta osin täytettynä. Vaiheen 2 edellytyksenä on hyväksytty väliaikainen käyttöönottoilmoitus. (Fingrid VJV, 2018)

Vaihe 3 on tarkastus- ja hyväksyntävaihe, jossa liittömisspisteen verkonhaltijan on tarkastettava kaikki prosessivaiheiden yhteydessä toimitetut tiedot ja vahvistettava että vaaditut toimenpiteet on suoritettu. Jos tiedoissa ei ole huomautettavaa antaa liittömisspisteen verkonhaltija lopullisen käyttöönottoilmoituksen, joka on toistaiseksi voimassa ja antaa liittöjälle oikeuden käyttää voimalaitostaan ja tuottaa sähköä verkkoon. (Fingrid VJV, 2018)

Vastaavan kaltainen prosessimainen ja vaiheittain etenevä malli vaatimuksenmukaisuus- ja vaikuttavuusmallinnuksineen olisi varmasti toimiva myös keskijänniteverkossa ja toisaalta sitä Fingrid myös edellyttääkin tyyppiluokkien B ja C osalta. Eli suurjänniteliittömisteen malli voisi soveltua hyvinkin pienin muutoksin myös jakeluverkkoyhtiöille.

6 TUOTANTOLIITTÖMIEN TEKNISET LIITTÖMISPERIAATTEET KAJAVEN KESKIJÄNNITEVERKOSSA

6.1 Suojaukseen liittyvät haasteet

Hajautetun tuotannon on havaittu aiheuttavan verkostovaikutuksia keskijännitteisessä jakeluverkoissa niin jännitteen laadun kuin suojaustenkin osalta. Merkittävimmät vaikutukset ovat jakeluverkon jännitteen notkahdus laitoksen irtikykytyessä verkon kuormitustilanteessa sekä jakeluverkon suojausten epäonnistuminen joko sokaistumisen, taikka vikapaikkaan palamaan jäävän valokaaren vuoksi.

Kuten johdannossakin on todettu, liittömisteen väärä tai virheellinen toteutus voi aiheuttaa vakavia laitevaurioita tai hengenvaaraa verkon vian aikana (Vihanninjoki, 2015). Haasteita asettaa suojausten riittävän nopea ja selektiivinen toiminta, ja silti kuitenkin riittävä kyvykyys säilyttää tuotanto kytkettyneenä verkkoon muiden verkossa esiintyvien muutostilanteiden aikana. Luotettavin menetelmä suojausten toimivuuteen, myös selektiivisesti, on alan tutkimusten perusteella nopeaan eroonkytkennän viestiyhteyteen (EVY) perustuva eroonkytkentäsuojaus, kun tuotanto on liittömissä jakeluverkkoon (Kumpulainen & Ristolainen, 2006). Käytännössä tämä edellyttää kuituyhteyden rakentamista sähköaseman ja voimalaitoksen välille, joka on teknistaloudellisesti kallis ratkaisu ja aiheuttaa

omistajalleen ylläpitovelvoitteita. Sähköverkon on joka tapauksessa täytettävät sille asetetut vaatimukset ja nopea eroonkytkennän viestiyhteys voi olla lopulta ainut ratkaisu niiden saavuttamiseksi, joten kustannuksiin on syytä varautua. Verkosto- ja suojausvaikutuksia voi ennakoida jonkin verran liittymispisteen tehoportaitaisella määrittelyllä, joskin rajoittavana tekijänä on sähköasemien rakenteellinen kapasiteetti ja liittymiskaapelin pituuden kohtuuton kasvaminen.

Seuraavissa luvuissa on määritelty suositukset ehdoille ja periaatteille hajautetun tuotantolaitteiston kytkemiseksi ja suojaamiseksi Kajaven keskijänniteverkossa. Suositeltuja periaatteita voidaan soveltaa kaikissa keskijännitetuotantoliittymissä, mutta ne eivät kuitenkaan korvaa kulloinkin voimassa olevia Fingridin VJV ehtoja ja eivät näin saa johtaa suojausten ristiriitaisuuteen ja vaarantaa turvallisuutta. Määrittelyjä on esitetty tehoportaitain, mutta tuotannon todelliset verkostovaikutukset on tarkasteltava aina tapauskohtaisesti.

6.2 Liittymäprosessi

Luvussa 5.8 on kuvattu pääpiirteittäin Fingridin määrittelemä suurjänniteverkkoon liittymisen vaiheittaisesti etenevä prosessi. Prosessimainen malli ohjaa liittymisen vaiheittain onnistuneeseen lopputulokseen. Myös liittymispisteen verkonhaltijan on julkaistava luettelo vaatimuksenmukaisuuden todentamisen asiakirjoista, vaatimuksista ja tiedoista, jotka liittyjän tulee toimittaa osana todentamisprosessia. Verkonhaltijan on toimitettava saamansa tiedot Fingridille (Fingrid VJV, 2018).

Toimintamallien harmonisoinnin ja prosessin hallinnan kannalta olisi hyvinkin suositeltavaa lähteä kehittämään vastaavan kaltaista suurjänniteverkon vaiheisälyttöjen mallia ja todentamisasiakirjoja soveltuvilta osin myös keskijänniteverkolle. Vaikka Fingrid ei vaadi vaiheittaista liittymisen mallia A ja B-tyyppin voimalaitoksilta, jotka ovat käytännössä ainoat Kajaven keskijänniteverkkoon liitettävät <10 MVA voimalaitostyyppit, voivat verkkoyhtiöt silti kehittää omia liittymisprosessejaan.

Kajaven liittymäprosessiksi ehdotetaan sisältöineen Fingrid VJV 2024 luonnokseen pohjautuen vaiheittaista mallia, jossa:

- Vaihe 0 on esisuunnitteluvaihe
- Vaihe 1 on suunnitteluvaihe
- Vaihe 2 on käyttöönoton ja todentamisen vaihe
- Vaihe 3 on tarkastuksen ja hyväksynnän vaihe

6.3 Liittymispisteet

Hajautettua tuotantoa voidaan liittää joko jakeluverkkoon taikka suoraan sähköasemalle. Kajave on teettänyt ulkopuolisen tarkastelun kahdelle eri sähköasemalle liitettävän 10 MW aurinkotuotantoliittymän verkostovaikutuksista. Tarkastelun perusteella voidaan kyseisen tehon todeta olevan hyvinkin lähellä liitettävää maksimia, kun asema toimii normaalina jakeluverkon asemana. Jakeluverkon osalta yksittäisesti tarkastellun 2 MW suuntaajakytetyn aurinkovoimalaitoksen ei todettu verkkotietojärjestelmän laskentojen perusteella aiheuttava jännitejännitykselle ja suojaukselle ongelmia kyseisessä verkossa. Voimalaitoksen tehon myötä kasvava vikavirta voi kuitenkin nopeasti nousta jakeluverkon suojausten kannalta ongelmalliselle tasolle. Edellä mainittujen tietojen pohjalta voidaankin määrittellä taulukossa 2 esitetyn mukaiset karkeat tehoroajat liittymispisteen esiselvitysvaiheen tueksi.

TAULUKKO 2. Liittymispisteen tehoerusteinen määrittely

110 kV siirtoverkko		≥10 MVA
20 kV sähköasema	3 - <10 MVA	
20 kV jakeluverkko	0,5 - 3 MVA	

Määritelyjen tehoportaiden lisäksi lopullista liittymispistettä valittaessa on kuitenkin vielä huomioitava tuotantolaitteiston sijainnin sekä jakeluverkon topologian ja kapasiteetin lisäksi myös sähköaseman rakenteellinen kapasiteetti.

Liittymisteholtaan ≤ 3 MVA tuotantolaitos voidaan liittää jakeluverkkoon. Liittäminen tapahtuu joko jo olemassa olevan tai rakennettavan kytkemön taikka puistomuuntamon erotinkennoon, joka varustetaan kaukokäytettävällä erottimella jakeluverkon kunnossapito-, häiriönhoito- ja varasyöttötilanteiden varalta ja on myös verkonhaltijan lukittavissa. Sopimusteknisenä liittymispisteenä ja omistusrajana toimivat erottimen kytkentäliittimet, johon saakka liittyjä vastaa liittymiskaapelinsa toimittamisesta kustannuksellaan.

Liittymisteholtaan $3 - <10$ MVA tuotantolaitokset liitetään suoraan Kajaven sähköasemalle. Liittymispisteeksi määritellään sähköaseman katkaisijakenno. Sopimusteknisenä liittymispisteenä ja omistusrajana toimivat kaapelin kytkentäliittimet. Liittyjä toimittaa liittymiskaapelinsa kustannuksellaan sähköaseman kennon saakka.

Liittymisteholtaan ≥ 10 MVA tuotantolaitokset liittyvät ensisijaisesti suurjännitteiseen siirtoverkkoon, mutta kyseistä maksimitehoa voidaan kuitenkin tapauskohtaisesti harkita. Suurjänniteverkkoon liittyminen voi vaatia uuden sähköaseman rakentamisen.

6.4 Hajautetun tuotannon liittämiselle asetetut ehdot ja tekniset vaatimukset

Taulukossa 3 on esitetty tehoerusteisesti määräytyneiden liittymispisteiden avulla verkkoyhtiölle ja voimalaitokselle suositeltuja teknisiä vaatimuksia. Vaatimuksia on käsitelty tarkemmin luvusta 6.4.1 alkaen.

TAULUKKO 3. Määrittelyt Kajaven sähköverkkoon liitettävälle tuotannolle

Tekniset vaatimukset	Liittymispiste			
	Jakeluverkko	Jakeluverkko	Sähköasema	
Voimalaitoksen näennäisteho				
3 - (<10)* MVA			x*	*Asemakohtainen
1 - 3 MVA		x	x*	*Tapauskohtainen
0.5 - <1 MVA	x			
Sähköaseman kenno (liittimet)			x	
Kytkevän kenno (liittimet)	x	x		
SA Vaatimukset (mittaukset)				
110 kV Uo mittaus	x	x	x	
SA Johtolähdön suojaus (vähimmäisvaatimus)				
I->, I->> (kaikki lähdöt)	x	x	x	
Io>->	x	x	x	
IoInt	x	x	x	
Uo>	x	x	x	
SA Jälleenkytkennät PJK/AJK				
0.4/60 s	x*	x*		*Jos johtolähdöllä on ilmajohtoja
Eroonkytkentäreleistys				
Voimalaitos	x	x	x	
LoM toteuttaminen				
Voimalaitoksen pääsuoja	x	x	x	
LoM eroonkytkentä				
Voimalaitoksen katkaisija	x	x	x	
Siirtolaukaisut				
Laukaisut voimalaitoksen pääsuojalle		x*	x*	*Tapauskohtainen
110kV Uo> laukaisu johtolähtöön	x	x	x	
110kV suojien laukaisu johtolähtöön	x	x	x	
20kV Uo> laukaisu johtolähtöön	x	x	x	
20kV kiskosuojien laukaisu johtolähtöön	x	x	x	
Eroonkytkennän viestiyhteys (EY)				
Kuitu		x*		*Tapauskohtainen
Suojaus (voimalaitoksen pääsuoja)				
I>, I>>	x	x	x	
MFADPSDE	x	x	x	
Io>->	x*	x*	x*	*Voidaan korvata MFADPSDE suojalla
IoInt	x*	x*	x*	*Voidaan korvata MFADPSDE suojalla
Io	x	x	x	
Uo> (Uo)	x	x	x	
U>, U<	x	x	x	
f>, f<	x	x	x	
SYNC	x	x	x	
LoM (EI ROCOF)	x	x	x	
Reaaliaikainen tiedonvaihto				
Päätö- ja loisteho	x*	x	x	*Tapauskohtainen
Kytkinlaitteen tilatieto (voimalaitos)	x*	x	x	*Tapauskohtainen
Kytkinlaitteen tilatieto (sähköasema)		x*	x*	*Tapauskohtainen
Tiedonvaihdon viestiyhteys				
Mobiili		x	x	
Kuitu		x*	x*	*Vaihtoehtoinen
Työnaikainen erottaminen ja lukitus				
Liittymispisteen erotin	x	x		
Sähköaseman katkaisija			x	
Voimalaitoksen kytkinlaitteen paikallinen ohjaus	x*	x*	x*	*Etäohjaus pyydettyäessä
Tilanteet:				
Jakeluverkon kunnossapito				
Jakeluverkon häiriönhoito				
Jakeluverkon varasyöttö				

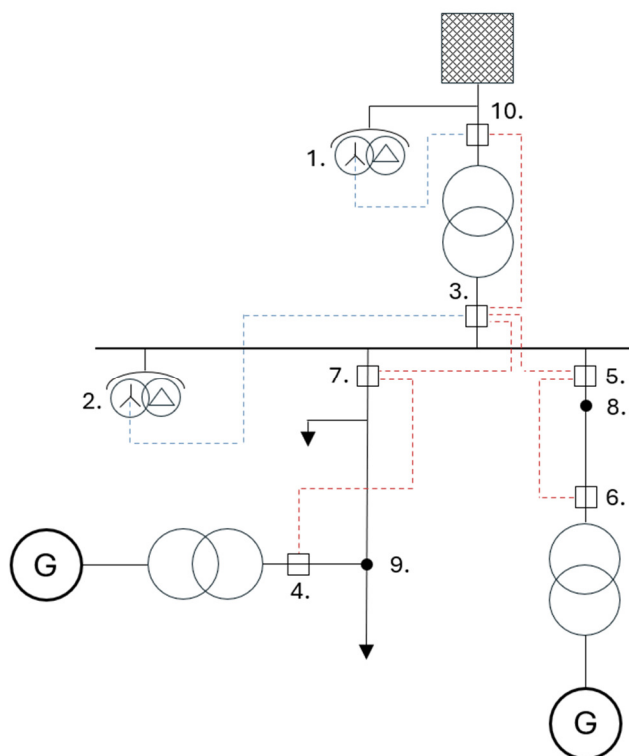
6.4.1 Verkkoyhtiölle asetetut ehdot ja tekniset vaatimukset

Sähköasemakohtaisena perusvaatimuksena esitetään lukuun 5.4.1 perustuen 110 kV maasulkujännitteen mittaus (KUVA 22, piste 1.), jota tarvitaan 110 kV maasulkujännitesuojauksen (Uo>) toteuttamiseen. 110 kV maasulkujännitteen mittaamisesta voitaisiin luopua luvussa 5.4.1 kerrottujen ehtojen perusteella, mutta koska 110 kV Uo> suojaus on kuitenkin yksi sähköaseman tärkeimmistä perussuojauksista, on mittaus syytä toteuttaa. Jos 110 kV jännitemittausta ei entuudestaan ole on se investoitava asemalle, jonka vaikutus on syytä huomioida liittymän toimitusajassa.

Suojareleen mahdollisen sokaistumisen aiheuttava voimalaitoksen vikavirran syöttökyyvykyys on huomioitava suunnitteluvaiheen vaatimustenmukaisuuden todentamisympäristössä. Suojareleen sokaistumiseen johtavia syitä sekä korjaavia toimenpiteitä on käsitelty luvussa 4.1. Ensimmäisessä sähköase-

man johtolähdön suojareleen ylivirta-asettelut asetellaan herkimmäksi mahdolliseksi minkä vain verkon normaali tunnistettu tehonvaihtelu antaa myöten. Jos kuitenkin voimalaitoksella todetaan olevan merkittävä vikavirran syöttökyvykyys ja johtolähdön suojauksella on vaarana sokaistua, on harkittava välikatkaisijan sijoittamista jakeluverkon rungolle syöttösunnastaan voimalaitoksen jälkeen sekä johtolähdön suojausulottuman porrastusta. Välikatkaisijan voi sijoittaa myös liittymispisteenä toimivaan kytkemöön, joka on hyvä ottaa huomioon kytkemön sijaintia suunnitellessa.

Sähköaseman rinnakkaisten johtolähtöjen vikojen aiheuttamat virhelaukaisut tuotantoa sisältävälle lähdölle pyritään estämään lukuun 4.2 pohjautuen asettelemalla johtolähtöjen ylivirtasuojauksen suunnatuksi, valvontasuunta syötettävään johtoon päin. Näin johtolähtöjen suojareleet havaitsevat vain suojaamaansa johtoon päin kulkevan vikavirran. Maasulkusuojauksen oletusarvoisesti toteutettu Kajaven verkossa suunnattuna, mutta on kuitenkin syytä suunnitteluvaiheessa vielä varmistaa ja tarvittaessa muuttaa ylivirta-asetteluiden yhteydessä.



KUVA 22. Periaatteellinen kuvaus 110 kV ja 20 kV $U_{o>}$ suojauksen toteuttamisesta.

Sähköaseman kiskossa esiintyvien vikojen ja kantaverkon maasulkutilanteen aikainen, voimalaitoksen epäonnistuneen tai hidastuneen saarekkeenestosuojauksen aiheuttama takasyöttö estetään viemällä sähköaseman 110 kV suojiin ja 20 kV syötön suojausten laukaisut luvun 4.3 mukaisesti sisäisenä siirtolaukaisuna niiden johtolähtöjen katkaisijoille, joiden taakse on liitetty hajautettua tuotantoa. Eli esimerkiksi 110 kV maasulkujännitesuojauksen avaa 110 kV ja 20 kV syötön katkaisijat (KUVA 22, pisteet 10. ja 3.), sekä tuotantoa sisältävien johtolähtöjen katkaisijat (KUVA 22, pisteet 7. ja 5). Jos vaaditaan tapauskohtaisen tarkastelun perusteella suojauksen siirtolaukaisuja, viedään silloin 110 kV $U_{o>}$ laukaisu- tai havahtumistieto myös voimalaitoksen pääsuojalle (KUVA 22, pisteet 4. ja 6.). Kuvassa jännitteen mittaustieto on esitetty sinisellä ja laukaisutieto punaisella katkoviivalla.

Ilmajohtoa sisältävillä johtolähdöillä käytettävien jälleenkytkentöjen epäonnistuminen, jos tuotanto ei irtaudu riittävän nopeasti jälleenkytkennän jännitteettömänä aikana, voidaan estää viemällä tarvittavat nopeat siirtolaukaisut voimalaitoksen pääsuojalle. Tämä vaatii kuitenkin aina tapauskohtaisen tarkastelun ja oletusarvoisena suojauksena toimii paikallinen saarekkeenestosuojaus, jonka toteutuminen riittävän nopeasti on todennettava suunnitteluvaiheen vaatimuksenmukaisuuslaskelmilla. On kuitenkin varauduttava eroonkytkennän viestiyhteyden (EVY) rakentamiseen myös myöhemmässä vaiheessa. Saarekkeenestosuojauksista on käsitelty seuraavassa luvussa ja jälleenkytkentöjen epäonnistumisen syitä on kerrottu luvussa 4.5.

6.4.2 Voimalaitokselle asetetut ehdot ja tekniset vaatimukset

Liittyjän vastuulla on täyttää ja todentaa vaatimusten täyttyminen. Voimalaitoksen tulee kestää sähköjärjestelmässä esiintyvät jännite- ja taajuusvaihtelut, tukea sähköjärjestelmän toimintaa häiriötilanteiden yhteydessä sekä toimia luotettavasti niiden aikana ja niiden jälkeen eikä saa verkossa ollessaan aiheuttaa haittaa muille sähköjärjestelmään kytketyille laitteille.

Voimalaitokselta veloitetaan aina keskitettyä suojauksia, joka toimii paikallisena eroonkytkentäreleistyksenä. Eli yksi rele, joka ohjaa yhtä tai useampaa voimalaitoksen katkaisijaa ja toimii pääsuojana sekä mahdollisesti invertterin varasuojana. Sähköntuotannon paikallinen eroonkytkentä on toteutettava ensisijaisesti voimalaitoksen pääsuojalla ja siksi eroonkytkentäreleistyksessä vaaditaan voimalaitokselta aina liityttäessä Kajaven keskijännitteiseen jakeluverkkoon taikka sähköasemalle. Paikallisen eroonkytkentäreleistyksen tehtävänä on sähköntuotantolaitteiston paikallinen erottaminen sähköverkosta vian tai muun verkon normaalista käytöstä poikkeavan tilanteen ajaksi. Eroonkytkennän varasuojana voidaan käyttää sähköaseman johtolähdön suojarelettä (KUVA 22, piste 5.) kun liittymispiste on sähköasemalla (KUVA 22, piste 8.). Lisäksi Kajave varustaa liittymispisteen kauko-ohjattavalla erottimella tai sähköaseman katkaisijalla.

Voimalaitoksen lähivikakestoisuuden toteutuminen on varmistettava asettelemalla voimalaitoksen pääsuoja kulloinkin voimassa olevan Fingridin relesuojausohjeen mukaisilla arvoilla ja toiminnoilla, joista kerrotaan tarkemmin luvussa 5.4.3. Voimalaitoksen lähivikakestoisuus on osoitettava suunnitteluvaiheen vaatimuksenmukaisuuslaskelmilla.

Voimalaitoksen pääkatkaisijaa (KUVA 22, pisteet 4. ja 6.) ohjaava rele on varustettava luvun 5.4.1 suojausvaatimuksiin perustuen vähintään seuraavilla suojausfunktioilla:

- Kaksiportainen ylivirtasuojaus $I>$ ja $I>>$
- Monitaajuusadmittanssisuojaus MFADPSDE
- Suunnattu maasulkusuojaus I_{oDir}^*
- Katkeileva maasulkusuojaus I_{oInt}^*
- Nollavirtasuojaus I_o
- Nollajännitesuojauks U_o
- Yli- ja alijännitesuojauks $U>$ ja $U<$
- Yli- ja alitaajuussuojauks $f>$ ja $f<$
- Tahdissaolonvalvonta SYNC
- Saarekkeenestosuojauks LoM (Ei ROCOF)

*Suositellaan korvaamaan monitaajuusadmittanssisuojauksella

Voimalaitos on varustettava saarekkeenestosuojauksella. Taajuuden muutosnopeuteen perustuvien ROCOF-releiden käyttöä ei hyväksytä keskijännitteisten tuotantoliittymien LoM-suojauksen toteuttamiseen Kajaven verkossa, vaan suojauksen on perustuttava taajuuden ja jännitteen mittaukseen. LoM-suojauksen on kyettävä toimimaan luotettavasti ja riittävän nopeasti myös jakeluverkon jälleenkkytkentöjen jännitteettömänä aikana. Voimalaitoksen saarekkeenestosuojauksella on merkittävä vaikutus jakeluverkon suojausten onnistumiseen ja sitä onkin käsitelty useassa yhteydessä luvussa 4 Hajautetun tuotannon vaikutukset keskijänniteverkon suojaukseen.

Eroonkytkennän viestiyhteys (EVY) on rakennettava, jos suunnitteluvaiheen tapauskohtaisen tarkastelun tuloksena vaaditaan siirtolaukaisuja paikallisen eroonkytketymisen varmistamiseksi. Tällaisia tilanteita ovat tahattoman saarekkeen syntyminen ja takasyötön estäminen kantaverkon ja sähköasemakiskon vioissa sekä selektiivinen eroonkytketymisen jakeluverkon jälleenkkytkentöjen sekä ylivirta- ja maasulkutilanteiden aikana. Eroonkytkennän viestiyhteyden nopeusvaatimuksen vuoksi nähdään kuidun olevan ainut riittävän nopea ja luotettava yhteystekniikka. Kajave määrittelee aina tapauskohtaisesti, edellytetäänkö eroonkytkennän viestiyhteys. Viestiyhteyden rakentamiseen on kuitenkin varauduttava myös myöhemmässä vaiheessa, jos paikallinen eroonkytkentäreleistys ei kykene toimimaan muuten vaaditulla tavalla.

Voimalaitokselle suositellaan sallia automaattinen jälleenkkytkeytyminen kulloinkin voimassa olevan Fingrid VJV ehtojen mukaisesti. Automaattisen jälleenkkytkeytyksen ehdoista on kerrottu tarkemmin luvussa 5.6 ja tahdistetun jälleenkkytkeytyksen epäonnistumisen riskeistä ja tärkeydestä luvussa 4.6.

6.5 Sähköenergian mittaus

Voimalaitoksen sähköenergian mittaus toteutetaan Kajaven verkkoalueella ensisijaisesti liittymispisteessä taikka sen välittömässä läheisyydessä. Kojeisto missä mittaus toteutetaan, on varustettava mittaukselta varten tarvittavilla laitteistoilla (mm. mittamuuntajat ja mittarialustat mittalaitteille). Jos mittaus sijaitsee liittymän kojeistossa, on mittauskaaviot ja -piirroset hyväksyttävä verkonhaltijalla ennen liittymän kytkentää osana suunnitteluvaiheen vaatimuksenmukaisuuden todentamista. (Kajave, 2024)

6.6 Loistehokapasiteetti sekä loistehon ja jännitteen säätö

Voimalaitoksen on täytettävä kulloinkin voimassa olevien Fingrid VJV vaatimusten loistehon kapasiteetille sekä loistehon ja jännitteen säädölle asetetut vaatimukset. Jos voimalaitokselle ei aseteta erillisiä vaatimuksia, on laitoksen loistehokapasiteetti mitoitettava niin että laitos kykenee toimimaan kaikissa tilanteissa liittymispisteessään tehokertoimella 1, myös tyhjäkäyntitilanteessa (Kajave, 2024). Loistehon ja jännitteen käsittelystä sovitaan esisuunnitteluvaiheessa ja toteuttamiseen liittyvät toimenpiteet ja mallinnukset todennetaan suunnitteluvaiheessa.

6.7 Reaaliaikainen mittaus, tiedonsiirto ja etäohjausvalmius

Reaaliaikainen mittaus vaaditaan Kajaven keskijänniteverkossa Fingridin vaatimuksiin perustuen nimellisteholtaan 1-10 MW voimalaitoksilta (luokat B ja C). Toimitettavia tietoja ovat pätö- ja loisteho sekä kytkinlaitteiden tilatiedot ja tietojen päivitysväli saa olla maksimissaan 60 sekuntia.

Voimalaitokselle on rakennettava logiikkaliittymä (syöttöportti) joka mahdollistaa pätötehon tuotannon pysäyttämisen etäohjauksella viiden sekunnin sisällä käskyn saavuttua. Kajave päättää tapauskohtaisesti otetaanko väyläliittymä käyttöön ja määrittelee myös käytettävän tiedonsiirtoprotokollan.

Edellä mainitut vaatimukset perustuvat aina kulloinkin voimassa olevaan Fingridin voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset (VJV) -asiakirjaan.

6.8 Käyttöasiakirjan lisäykset

Ennen voimalaitoksen liittämistä Kajaven jakeluverkkoon on sovittava käyttöteknisistä asioista ja muodostettava yhteinen käyttöasiakirja. Vakiomuotoiseen käyttöasiakirjaan on tehtävä sähköä tuottavan voimalaitoksen osalta ainakin seuraavat lisäykset:

- Liittymispiste ja teknisten rakenteiden omistus- ja käyttövastuun raja
- Voimalaitoksen Kajaven jakeluverkkoon syöttämä sopimusnäennäisteho
- Voimassa olevan VJV
- Normaali verkon syöttötilanne ja varasyöttöyhteys
- Ehdot voimalaitoksen loistehon kapasiteetille ja -säädölle
- Ehdot voimalaitoksen jännitteensäädölle
- Ehdot voimalaitoksen eroonkytketykselle
- Ehdot automaattiselle jakeluverkkoon takaisinkytketykselle
- Tilanteet, joissa Kajavella on oikeus irrottaa tuotanto jakeluverkosta
- Teknisten rakenteiden käyttö- ja kunnossapitovastuut
- Yhteystiedot ja käytönjohtaja
- Pääsy voimalaitoksen kojeistoon

Sähkölaitteistojen käyttö- ja kunnossapitovastuut sekä -kustannukset määräytyvät yleensä täysmääräisesti omistajilleen sopimuksessa liittymispisteeksi määritellyyn pisteeseen saakka. Tämä on kuitenkin syytä olla sovittuna ennen verkkoon liittämistä.

7 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön keskeisimpinä tavoitteina oli tutkia ja tunnistaa hajautetun sähköntuotannon aiheuttamia haasteita keskijännitteisen jakeluverkon suojaukselle, esittää ratkaisuja ja periaatteita sekä toimia tukena Kajaven keskijännitetuotannon liittymisohjeen tekniselle asiasisällölle. Aihe on ajankohtainen kaikille paikallisesta sähkönjakelusta vastaaville verkkoyhtiöille nimenomaan keskijännitteisen jakeluverkon tuotanto- ja akkuvarastoliittymien kysynnän vilkastumisen myötä. Suur- ja pienjänniteverkon toimintamallit ovat pitkälti jo olemassa, mutta keskijännitteeltä yhteinen malli vaikuttaisi vielä toistaiseksi puuttuvan.

Koska tutkimukseni perustui alan julkaisuihin ja tutkimuksiin, huomasin että vaikka verkostovaikutuksia on tunnistettu yleisellä tasolla hyvin, niin varsinaista kansallista tutkimusaineistoa on saatavilla vain vähän. Työn edetessä kävi kuitenkin hyvin selväksi, että merkittävin toiminnallinen epävarmuus kohdistuu saarekkeenestosuojauksen oikea-aikaiseen toimintaan tai yleensäkin onnistumiseen. Muut kaksisuuntaisen energiasiirron verkostovaikutukset ovat pääasiallisesti mallinnettavissa ennakkoon, mutta koska en perustanut työtäni käytännön mallinnuksille jäivät simulointien tulokset ja mahdollisuudet tässä työssä tarkemmin käsittelemättä. Tutkimuksessa selvisi myös, että aktiivisella, eli viestiyhteyden perustuvalla suojauksella toiminnalliset epävarmuudet olisivat kuitenkin pääasiallisesti ratkaistavissa. Viestiyhteyden on oltava riittävän nopea ja luotettava. Myös suoraan sähköasemalle liityttäessä välttäisiin lähes kaikilta suojuksiin liittyviltä haasteilta, mutta kennojen riittävyys ja sähköaseman laajennettavuus voivat voimalaitoksen tarvitseman vapaan maa-alueen saatavuuden ohella vaikeuttaa liittymistä. Kuitenkin reletekniikan kehittyessä jatkuvasti myös passiivisen, eli paikallisesti eroonkytkentäreleistyksellä toteutetun suojauksen toivoisi myös tarjoavan luotettavia ratkaisuja jakeluverkkoon liittymisen tueksi.

Työn tavoitteeksi asetettu teknisten periaatteiden määrittely toteutui ja tavoite saavutettiin. Selvitystyöstä on ollut jo konkreettista hyötyä. Koska lähitulevaisuus voi tuoda tullessaan uusia hyväksi koettuja toimintamalleja tai jopa toimimattomuuksia, voivat jotkut tämän työn määrittelyistä periaatteista vanhentua hyvinkin nopeasti. Ja voihan olla, että jokin alan keskeisistä toimijoista lähtee määrittelemään yhteistä ohjeistusta. Silloin periaatteita on tarkasteltava vain uudelleen.

Mahdollisina jatkotutkimuskohteina voisivat olla erilaiset passiivisen eroonkytkentäsuojauksen kehittämismahdollisuudet, joita olisi hyvä tutkia enemmän. Esimerkiksi suojausta perustuen invertterin liitäntänavoilta mitatun jännitteen nopeaan nousuun saarekkeen syntyhetkellä verkkojännitteen kadotessa, jossa yksinkertaisesti asettelijännitteen ylitys aiheuttaisi nopean laukaisun. Toinen kiinnostava tutkimuskohde voisi olla vastajännitekomponentin valvonnan mahdollisuuksien hyödyntäminen paikallisessa eroonkytkentäsuojauksessa. Todennäköisin jatkotutkimuskohde tulee itselläni olemaan akkuvarastojen vastaava verkostovaikutuksien ja suojausmenetelmien tutkiminen sekä tämän opinnäytetyön tulosten hyödyntämismahdollisuudet siinä.

LÄHTEET

ABB (2000). TTT-käsikirja 2000-07. Haettu 3.3.2024

Despro (2023). Kajave Taivaljärvi PV Liitettävyytarkastelu 29.9.2023. Haettu 20.3.2024. Ei julkisesti saatavilla

ELY-Keskus (2024). Aurinkoenergia - Uusiutuvan energian lupaneuvonta. Haettu 1.3.2024.
<https://www.ely-keskus.fi/web/uusiutuvan-energian-lupaneuvonta/aurinkoenergia>

Energiateollisuus (2009). Verkostosuositus YA9:09, mikrotuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon. Haettu 3.3.2024

Energiateollisuus (2023). Aurinkovoima. Haettu 1.3.2024. <https://energia.fi/energiatietoa/energian-tuotanto/sahkontuotanto/aurinkovoima/>

Energiateollisuus (2023). Vesivoima. Haettu 1.3.2024. <https://energia.fi/energiatietoa/energian-tuotanto/sahkontuotanto/vesivoima/>

Energiavirasto (2022), Aurinkosähkön kapasiteetti. Haettu 7.3.2024. <https://energiavirasto.fi/-/aurinkosahkon-kapasiteetti-kasvoi-suomessa-yli-100-megawattia-vuonna-2021>

Energiavirasto (2023), Yhteenvetoraportti vuoden 2022 jakeluverkon kehittämisuunnitelmista.pdf. Haettu 21.4.2024. <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/22104830/Yhteenvetoraportti+vuoden+2022+s%C3%A4hk%C3%B6njakeluverkon+kehitt%C3%A4missuunnitelmista.pdf/859c5434-0979-9c27-6f5e-8a1a53f8472e/Yhteenvetoraportti+vuoden+2022+s%C3%A4hk%C3%B6njakeluverkon+kehitt%C3%A4missuunnitelmista.pdf?t=1687176575693>

Eur-Lex (2016), Asetus – 2016/631. Haettu 30.2.2024. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=OJ%3AJOL_2016_112_R_0001

Fingrid (2018). Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset VJV2018. Hakupäivä 27.2.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kayttovarma-sahkonsiirto/vjv2018.pdf>

Fingrid (2022). Kantaverkon asiakasliityntöjen relesuojaus. Hakupäivä 27.2.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/kantaverkon-ja-asiakasliityntojen-relesuojausohje.pdf>

Fingrid (2022). Kantaverkkoon liittyjän opas.pdf. Haettu 1.3.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/kantaverkkoon-liityjan-opas.pdf>

Fingrid (2023). Siirtokapasiteetin laskennan uudistus. Haettu 1.3.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyssahkomarkkinoiden-kehityshankkeet/siirtokapasiteetinlaskenta/>

Fingrid (2023). Fingridin sähkönsiirtoverkko. Haettu 1.3.2024. <https://www.fingrid.fi/sivut/yhtio/kuluttajatietoa/fingridin-sahkonsiirtoverkko/>

Fingrid (2024). Tarkastele liityntämahdollisuuksia. Haettu 10.3.2024. <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/liitynta-kantaverkkoon/verkkokiikari/>

- Fingrid (2024). Fingrid kantaverkon kehittämissuunnitelma 2024-2032. Haettu 8.4.2024. https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/fingrid_kehittamissuunnitelma_luonnos_26.6.pdf
- Fingrid (2024). Voimalaitoksia ja sähkövarastoja koskevien järjestelmäteknisten vaatimusten päivitys 2024. Haettu 30.4.2024. <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/liitynta-kantaverkkoon/tekniset-vaatimukset/voimalaitoksia-ja-sahkovarastoja-koskevien-jarjestelmateknisten-vaatimusten-paivitys-2024/>
- Kajave (2024). Kehittämissuunnitelma. Haettu 7.5.2024. <https://kajave.fi/kehittamissuunnitelma>
- Kajave (2024). Liittymisehdot_luonnos. Haettu 5.5.2024. Ei julkisesti saatavilla
- Kumpulainen, Lauri & Ristolainen, Ilari (2006). Sähkönjakeluverkon ja siihen liitetyn hajautetun tuotannon teknisen suojauksen kehittäminen. Haettu 27.2.2024. https://www.merinova.fi/wp-content/uploads/2016/10/suojaus_loppuraportti_87.pdf
- Lakervi, Erkki & Partanen, Jarmo (2008). Sähkönjakeluteknikka. Helsinki, Suomi: Otatieto Oy. Haettu 27.2.2024
- Loiste (2023). Loiste yhtiöt yritysesittely 2023.ppt. Haettu 15.4.2024. Ei julkisesti saatavilla.
- LUT-yliopisto (2023). Aurinkoenergia ja aurinkosähkö Suomessa. Haettu 1.3.2024. <https://www.lut.fi/fi/artikkelit/aurinkoenergia-ja-aurinkosahko-suomessa>
- Metsähallitus (2022). Tuulivoima. Haettu 1.3.2024. <https://www.metsa.fi/vastuullinen-liiketoiminta/tuulivoima/>
- Motiva (2022). Pienvesivoima. Haettu 1.3.2024. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/vesivoima/pienvesivoima
- Motiva (2022). Pientuulivoima. haettu 1.3.2024. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/pientuulivoima
- Motiva (2022). Sähkön varastointi. Haettu 1.3.2024. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman_kaytto/sahkon_varastointi
- SFS 6001 (2018). Suurjännitesähköasennukset. Helsinki, Suomi: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Haettu 12.3.2024
- SFS 6002 (2015). Sähkötyöturvallisuus. Helsinki, Suomi: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Haettu 12.3.2024
- Stoltenberg, Blaise; Kiatreungwattana, Kosol & VanGeet, Otto (2019). Facility-Scale Solar Photovoltaic Guidebook. Haettu 2.3.2024. <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/67122.pdf>
- Sähkömarkkinalaki (2013). Sähkömarkkinalaki 588/2013. Haettu 7.3.2024. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588>
- Sähköturvallisuuslaki (2016). Sähköturvallisuuslaki 16.12.2016/1135. Haettu 15.4.2024. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2016/20161135>
- Thermopolis (2010). EETUMA-opas-230610.pdf. Haettu 15.4.2024. <https://www.thermopolis.fi/wp-content/uploads/EETUMA-opas-230610.pdf>

Tilastokeskus (2023). Tilastokeskuksen maksuttomat tilastotietokannat. Haettu 1.3.2024.
https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__salatuo/statfin_sala-tuo_pxt_11sr.px/chart/chartViewLine/

Turku Energia (2018). Vesivoimalat tuottavat tärkeää säätösähköä. haettu 1.3.2024.
<https://www.turkuenergia.fi/valopilkku/vesivoimalat-tuottavat-tarkeaa-saatosahkoa>

Valtioneuvoston kanslia (2017). Hajautetun uusiutuvan energian mahdollisuudet ja rajoitteet. Haettu 1.3.2024. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-382-8>

Vihanninjoki, Vesa (2015). Hajautettu energiantuotanto Suomessa. Haettu 15.3.2024.
<https://www.syke.fi/download/noname/%7BDD119785-B537-45DE-AEF0-8360DCAB1BDF%7D/111845>