

Sähkönjakeluverkon saarekekäyttöraatkaisut

Tutkimusprojektin loppuraportti
2.4.2024

Pertti Järventausta, Lasse Peltonen, Kukka Leppänen, Sami Repo
Kari Kallioharju, Juho Ylipaino, Pirkko Harsia

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	1
1.1	TAUSTA	1
1.2	TUTKIMUSPROJEKTIN TAVOITTEET JA TOTEUTUS.....	2
2	SAAREKEKÄYTTÖRATKAISUT JA NIIDEN HYÖDYNTÄMINEN JAKELUVERKKOTOIMINNASSA	2
3	SAAREKEKÄYTTÖIHIN LIITTYVÄ KYSELYTUTKIMUS	4
4	SAAREKESIMULOINNIT	6
5	EI-TEKNOLOISET TOIMENPIDE-EHDOTUKSET	8
6	TUTKIMUSPROJEKTIN MUU DOKUMENTAATIO.....	910

1 Johdanto

Tässä raportissa esitetään keskeiset tulokset Tampereen yliopiston (TAU) ja Tampereen ammattikorkeakoulun (TAMK) yhteistyönä toteuttamasta Sähkönjakeluverkon saarekekäytöt -tutkimusprojektistä. Projekti alkoi kesällä 2022 ja päättyi keväällä 2024. Tutkimusprojektin rahoittajana ovat olleet Sähkötutkimuspooli sekä STEK ry.

Raportissa kuvataan eri osatehtävien toteutusta ja keskeisiä tuloksia, joita on kuvattu laajemmin ja yksityiskohtaisemmin lähdeluettelossa listatuissa dokumenteissa. Loppuraportin tavoitteena on antaa kokonaiskuva tutkimusprojektissa käsitellyistä teemoista ja tutkimusaktiviteeteista.

1.1 Tausta

Hajautettujen energiaressurssien lisääntyessä sähkönjakeluverkkoon kokee sekä sähkötekniisiin kysymyksiin ja että sähköverkkoliiketoimintaan liittyviä muutoksia. Hajautettuja energiaressursseja (pien-tuotanto, energiavarastot, ohjattavat kuormat, verkosta ladattavat sähköautot, lämpöpumput jne.) voidaan hyödyntää monin tavoin joustavina resursseina paikallisen sähkönjakeluverkon kehittämisessä esim. käyttövarmuus- ja siirtokapasiteettivaatimusten näkökulmasta, mutta myös koko voimajärjestelmän toiminnassa tarjoamalla taajuusohjattuja käyttö- ja häiriöreservejä Fingridin ylläpitämille reservimarkkinoille. Muutokset avaavat myös uusia mahdollisuuksia esimerkiksi paikallisten saarekkeiden (mikroverkkojen) muodostamiseen verkon häiriötilanteissa. EU:n direktiivit määrittelevät energijärjestelmän uuden oikeudellisen toimijan, energiayhteisön, jonka tietyt implementaatiot mahdollistavat myös paikallisten mikroverkkojen muodostamisen joko asiakkaiden omina ratkaisuin (esim. takamittaroitu kiinteistöverkko, kiinteistörajan ylittävä erillinen linja) tai osana julkista jakeluverkkoa (esim. paikallinen hajautettu energiayhteisö). Lisäksi direktiivi ja kesällä 2021 voimaan tullut uusi sähkömarkkinalaki edellyttävät, että perinteisten investointivaihtoehtojen rinnalla jakeluverkkoyhtiön pitää tarkastella myös hajautettujen resurssien tarjoamia joustoja osana verkon kehittämissuunnitelmaa. Vuoden 2024 alusta voimaan tulleet uudet sähkönjakeluverkkoliiketoiminnan valvontamenetelmät sisältävät uutena elementtinä jakeluverkkotoimintaa tukevien joustojen hankintaa edistävän joustokannustimen, joka mahdollistaa myös saarekekäyttöratkaisujen kehittämisen ja hyödyntämisen osana verkkoliiketoimintaa.

Saarekekäyttöratkaisut, olipa saareke osa jakeluverkkoyhtiön julkista jakeluverkkoa tai asiakkaan oma kiinteistöverkko tai vastaava, tuovat mukanaan uusia haasteita ja tutkimuskysymyksiä. Osa kysymyksistä on sähkötekniisiä, kuten esim. eri tuotantoyksiköiden säätö ja keskinäinen tuotantotehonjako sekä suojausten toiminnan turvaaminen, osan ollessa luonteeltaan enemmän verkkoliiketoimintaan tai sähköturvallisuuteen ja lainsäädäntöön liittyviä.

Tutkimusprojektin yhtenä lähtökohtana on ollut vuoden 2021 Caruna Oy:lle tehty erillisselvitys akkuvarastoon pohjautuvan saarekkeen suojauskysymyksistä, erityisesti sulakesuojauksen selektiivisyyden

toteutumisesta [<https://www.epressi.com/tiedotteet/energia/tutkimustietoa-sahkovarastoista-caruna-mallinsi-tampereen-yliopiston-kanssa-akkujen-toimintaa.html>]. Selvityksen yhteydessä muodostettiin akkuvarmennetusta keski- ja pienjänniteverkosta yksityiskohtainen PSCAD-simulointimalli, jota voitiin hyödyntää lähtökohtana tässä hankkeessa kehitetyille simulointimallille ja -tarkasteluille.

1.2 Tutkimusprojektin tavoitteet ja toteutus

Tutkimussuunnitelman mukaisesti tutkimusprojekti jakautui kolmeen osatehtävään, joista ensisijaisia olivat kaksi ensimmäistä osatehtävää:

- 1) Saarekekäyttöön liittyvien tutkimuskysymysten ja ratkaisuvaihtoehtojen kartoitus
- 2) Saarekekäyttöihin liittyvät sähkötekniiset kysymykset
- 3) Verkkoliiketoimintaan ja lainsäädäntöön liittyvät kysymykset

Projektin tavoitteena oli luoda ymmärrystä saarekekäyttöihin liittyvistä ratkaisuista ja peruseräistä, sekä tehdä yksityiskohtaisempia tarkasteluja valituista saarekekäyttöön liittyvistä sähkötekniisistä kysymyksistä.

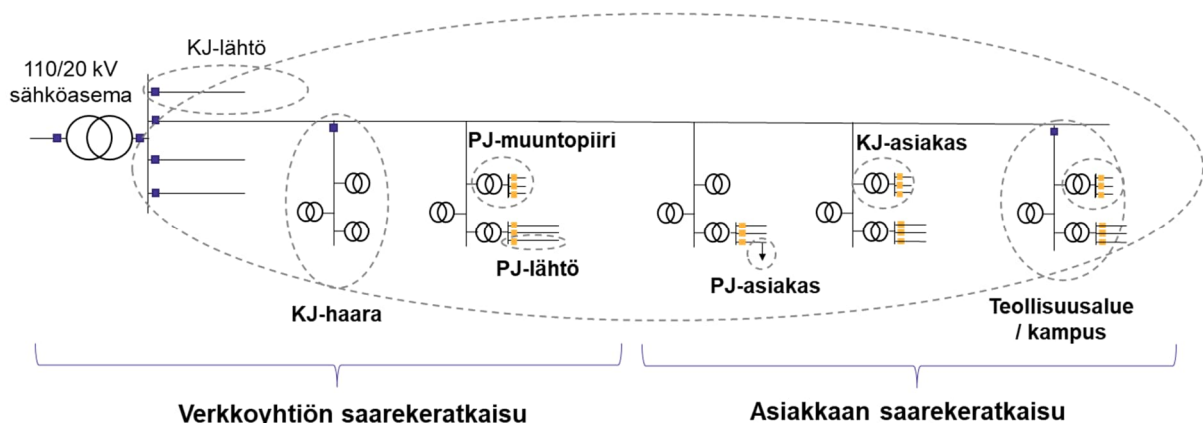
Tutkimusprojektin toteutuksesta ovat vastanneet Tampereen yliopiston (TAU) Sähkötekniikan yksikön tutkimusryhmä (DI Lasse Peltonen, tekn. yo. (DI) Kukka Leppänen sekä prof. Pertti Järventausta ja prof. Sami Repo) yhteistyössä Tampereen ammattikorkeakoulun (TAMK) sähköisen talotekniikan ryhmän (DI Kari Kallioharju, DI Juho Ylipaino ja TkL Pirkko Harsian) kanssa.

Tutkimusmenetelmiä projektissa olivat kirjallisuusselvitysten lisäksi laaja verkkoyhtiöille ja asiakkaille kohdennettu kyselytutkimus sekä PSCAD-simulointimallin kehitys ja sillä tehdyt simulointitarkastelut.

2 Saarekekäyttöratkaisut ja niiden hyödyntäminen jakeluverkkotoiminnassa

Saarekeverkosta voidaan käyttää myös nimitystä mikroverkko, joka muodostuu mikroverkossa olevista tuotantoresursseista ja kuormista sekä mahdollisista energiavarastoista. Saarekeratkaisuja on hyvin erilaisia ja niiden erityispiirteet riippuvat mm. tuotantoyksikön tyypistä (akku, aurinkopaneeli, dieselvaravoima, polttokenno, mikroturpiini...), jännitetasosta ja -tyypistä (AC vai DC), energiaresurssien saatavuudesta, kuormitusten ominaisuuksista ja suojausten toteutuksesta.

Mikroverkko voi toimia verkon rinnalla niin, että sen tehon siirtoa verkon ja mikroverkon välillä ohjataan reaaliaikaisesti tai se voi muodostaa itsenäisen verkosta irrotettavan saarekkeen esimerkiksi syötävän verkon vikatilanteessa. Saareke voi olla osa jakeluverkkoyhtiön verkkoa tai verkkoyhtiön asiakkaan liittymän takana toimiva kokonaisuus. Kuvassa 1 on esitetty erilaisia vaihtoehtoisia saarekeverkoratkaisuja.



Kuva 1. Saarekeratkaisuvaihtoehtoja

”Perinteisiä” varavoimakoneisiin (sisältää myös mobiilivaravoiman) pohjautuvia jakeluverkkoyhtiön omia saarekekäyttöratkaisuja voidaan hyödyntää keskeytystilanteiden hallinnassa sekä vikakeskeytyksistä että suunnitelluista keskeytyksistä asiakkaille aiheutuvien haittojen vähentämiseen varmistamalla asiakkaan sähkön syöttö. Saareke voi olla yhden sähköaseman syöttämä verkkoalue, yksi keskijännitelähtö, yksi tai useampi keskijännitehaara, pienjännitemuuntopiiri tai pienjännitelähtö. Omien varavoimakoneiden lisäksi verkkoyhtiöt voivat ostaa kiinteästi verkkoon kytkettyjen varavoimakoneiden tai akkujen tarjoamia palveluja, joiden avulla voidaan muodostaa jakeluverkkoon saarekkeita. Tällaisen ratkaisun voi tarjota myös paikallisesti hajautettu energiayhteisö, joka toimii verkon yhden pisteen takana, esim. samassa pienjännitemuuntopiirissa, ja omistaa tarvittavat energiaresurssit.

Saareke voi myös muodostua verkkoliittymän takana olevista asiakkaan kiinteistö- tai kiinteistöryhmän verkossa olevista resursseista. Esimerkiksi mautiloilla on laajasti tällaisia perinteisiin varavoimakoneisiin perustuvaa saarekekäyttökvykkyyttä, joita kartoitettiin projektissa tehdyllä laajalla kyselyllä. Myös erilaiset kiinteistön sisäiset energiayhteisöt (kauppakeskukset, kerrostalot, yhden kiinteistön sisällä toimivat yritykset) tai kiinteistörajan ylittävän erillisen linjan omaavat energiayhteisöt voivat muodostaa vastaavasti saarekkeita.

Keskeytystilanteiden hallinnan lisäksi jakeluverkkoyhtiön omia tai asiakkaiden mikroverkko- ja saarekekäyttöratkaisuja on mahdollista hyödyntää verkon pullonkaulatilanteiden hallinnassa (kapasiteettijousto) vähentämään verkon tapahtuvaa sähkön siirtoa. Vastaavasti niitä voisi käyttää myös valtakunnallisessa tehopulatilanteessa irrottamalla mahdolliset saarekkeet verkosta jo ennalta ennen kiertäviä sähkökatkoja, joilta mahdollisesti voitaisiin kuormitusta jo ennalta keventämällä välttyä kokonaan.

Saarekkeessa olevien kuormien ohjauksella on myös mahdollista vaikuttaa saarekkeen laajuuteen (miten suuri verkkoalue voi muodostaa saarekkeen) ja kestoon (miten pitkään esim. akun mahdollistamaa saarekettä voidaan käyttää). Erityisesti tämä tulee kyseeseen silloin, kun varavoimalaitteiden teho on rajallinen kuormitukseen nähden tai polttoaineen syöttö tai akun energiakapasiteetti on rajallinen. Yleisemminkin saarekekäytön kannalta on eduksi, jos asiakkaiden laitteet kuten aurinkovoimalat kykenevät esimerkiksi jännitteensäätöön ja siten tukemaan saarekkeen jännitejäykkyyttä. Toisaalta äärimmäisessä tilanteessa aurinkovoiman määrä voi olla suurempi kuin kuormitus, jolloin ylimääräinen teho pitäisi varastoida, leikata pois tai tasapainottaa kasvattamalla kuormitusta. Erityisesti varavoimakoneisiin perustuva saareke ei välttämättä toimi tällaisissa tilanteissa lainkaan, koska varavoimakoneella on minimiteho, jonka alapuolella sen toiminta ei ole mahdollista. Tilanteesta tulee tehonhallinnan lisäksi ongelmallinen myös vikavirransyötön näkökulmasta. Jotta saarekekäyttö julkisessa jakeluverkkossa olisi hallittavissa, tulisi saarekekäyttöä kyetä ohjaamaan SCADA/DMS ja automaatiojärjestelmien kautta vähintään samalla tasolla kuin jakeluverkkoa hallitaan normaalitilanteessakin. Nykykäytännön mukaisesti saarekekäytön aikaisesta verkonhallinnasta ei saada juurikaan tietoja valvomoon, jos saareke on perustettu keskijännitehaaraan tai pienjänniteverkkoon. Myös yhteistyö joustoresursien tarjoajien kanssa tulisi toteuttaa sellaisella tasolla, että tieto resursseista on valvomon ja jakeluautomaation käytettävissä reaaliaikaisesti.

Jakeluverkkoyhtiön verkon saarekekäytön tarvitsema jousto voidaan myös hankkia joko pitkäaikaisilla kahdenvälisillä sopimuksilla kuten liittymä- tai siirtosopimuksilla, tai paikallisen joustomarkkinan kautta. Esimerkiksi siirtotuotteeseen sisältyvä mahdollisuus irtikytkä kuormituksia voisi olla tehonhallinnan kannalta erittäin hyödyllinen, jolloin saarekealueen lämmityskuormia voitaisiin siirtää useilla tunneilla eteenpäin tai ajoittaa sellaiseen ajankohtaan, jolloin saarekkeessa on vähemmän muuta kuormaa. Yliuotantotilanteissa kuorman ohjausmahdollisuutta voisi hyödyntää varavoimakoneen tehon pitämiseksi minimitehon yläpuolella. Pienten saarekeverkkojen tapauksessa paikallisen joustomarkkinan hyödyntäminen voi olla erityisen haasteellista, koska markkinalle osallistuvia joustoresursseja ei välttämättä ole ollenkaan. Yksi keino joustojen tehokkaaseen hyödyntämiseen olisikin pitkäai-

kaisilla sopimuksilla hankittu velvollisuus jättää tarvittaessa (saarekekäytön aikana) tarjouksia paikalliselle joustomarkkinalle. Tällainen toiminta edellyttää joko täysin automatisoitua järjestelmää (ei toteutettavissa lähivuosina) tai ammattimaisten joustopalveluiden tuottajien hyödyntämistä osana kokonaisuutta.

Saarekekäyttömahdollisuuden hyödyntäminen pienentää verkkoliiketoiminnan valvonnassa sovellettavia KAH-kustannuksia, mikä voi kasvattaa verkkoyhtiön sallittua liikevaihtoa laatukannustimen ja tehostamiskannusteen kautta. Toisaalta saarekekäytön hyödyntäminen vaatii investointeja omaan varavoimaan ja asiakkailta ostettava palvelu kasvattaa operatiivisia kustannuksia. Asiakkaiden saarekekäytön hyödyntämisestä pitää myös olla selkeät sopimukset, joissa määritellään korvausten lisäksi myös mm. sähköturvallisuus ja muut vastuukysymykset. Esimerkiksi sähköturvallisuuslain (STL 1135/2016) vastuuhenkilöiden- ja vahinkotilanteiden määrittelyt. Projektissa tehtyyn kyselyyn vastanneista maataloista oli valmiutta tarjota saarekekäyttöä toimitusvarmuuspalveluna, josta korvauksen tulisi kattaa vähintään aiheutuneet kustannukset (esim. polttoaine) ja lisätyö. Maatilat toivat myös esille valmiutta taata useammalle loppukäyttäjälle lähinaapurustossa sähkönsyöttö saarekekäytön avulla.

3 Saarekekäyttöihin liittyvä kyselytutkimus

Osana tutkimusprojektia toteutettiin laaja verkkoyhtiöille ja asiakkaille kohdennettu kyselytutkimus, joka oli osa Kukka Leppäsen diplomityötä sähkönjakeluverkkoon liittyvistä saarekekäytöistä, käyttötapuksista ja niiden kannattavuuden perusteista (Leppänen 2023).

Jakeluverkkoyhtiöille suunnatussa kyselyssä kartoitettiin mm. seuraavia aiheita:

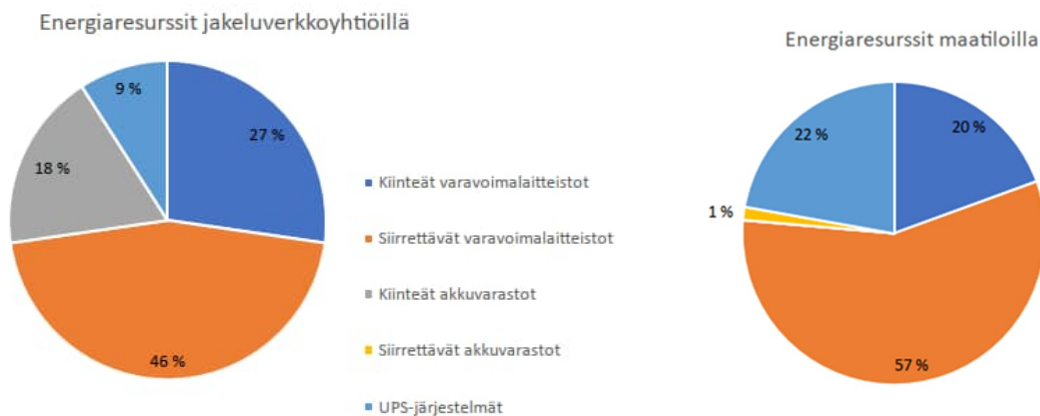
- Saarekekäyttömahdollisuudet, niissä käytetyt energiareсурssit, hyödyntämistavat, saarekoitumis- ja ohjaustavat, suojaus sekä sähköturvallisuus
- Verkkoalueella olevat asiakkaiden saarekekäyttömahdollisuudet, vuorovaikutus asiakkaiden kanssa
- Asiakkaiden saarekekäyttömahdollisuuksien hyödyntäminen toimitusvarmuus- ja kapasiteettijoustopalveluna
- Haasteet ja mahdollisuudet

Maatilayrittäjille, kaupan alan yrityksille ja huoltoasemille tehtiin oma kyselynsä, joka sisälsi mm. seuraavia aiheita:

- Varavoimalaitteistot, niiden hyödyntämistavat, saarekoitumis- ja ohjaustavat, suojaus sekä sähköturvallisuus
- Toimitusvarmuus- ja kapasiteettijoustopalveluiden tarjoaminen
- Haasteet ja mahdollisuudet

Kysely lähetettiin Energiategollisuus ry:n kautta kaikille Suomen jakeluverkkoyhtiöille, joista kuusi vastasi kyselytutkimukseen. Vaikka absoluuttinen vastausprosentti jäi pieneksi, niin vuoden 2021 tilastojen perusteella vastanneiden jakeluverkkoyhtiöiden verkkoalueilla oli 21 % kaikista Suomen jakeluverkkojen asiakkaista, ja vastanneiden jakeluverkkoyhtiöiden verkkopituudet kattoivat 32 % kaikkien Suomen sähköverkkojen kokonaispituudesta. Näin ollen, vastausten pienestä määrästä huolimatta, kyselyn tuloksista voidaan tehdä päätelmiä saarekekäytön tilasta Suomessa. Maatilayrittäjille lähetettyyn kyselyyn varavoimalaitteistoista, niiden käytöstä sekä hyödyntämisestä tulevaisuudessa vastasi 57 maatilayrittäjää. Kaupan alan yrityksiltä ja huoltoasemilta saatujen vastausten vähäisyydestä johtuen niiden varavoimalaitteistoista ja niiden saarekekäyttötapuksista ei saatu tehtyä päätelmiä. Seuraavassa on esitetty muutamia keskeisiä nostoja tuloksista, joita on analysoitu yksityiskohtaisemmin diplomityössä (Leppänen 2023).

Kyselytutkimuksen perusteella yleisimmin käytössä oli polttoainekäyttöisiä varavoimalaitteistoja, jotka otettiin käyttöön manuaalisesti ohjaten lyhyen katkon kautta. Akkupohjaisia ratkaisuja käytettiin vain yksittäisissä tapauksissa. Siirrettävät varavoimalaitteistot olivat yleisempi ratkaisu, koska niillä on enemmän käyttökohteita kuin kiinteillä varavoimalaitteistoilla. Varavoimalaitteistoilla oli varauduttu useita päiviä tai viikkoja kestäviin sähkönjakelun häiriöihin. Lähes 90 % vastanneilla maataloilla oli erilaisia varavoimalaitteistoja, joita tietyissä tuotantomuodoissa ja investointituissa myös laki edellyttää. Kuvassa 2 on esitetty erilaisten saarekkeiden perustana olevien energiaressurssien jakautumista jakeluverkkoyhtiöillä ja maataloilla.



Kuva 1. Saarekeratkaisujen pohjautuvat energiaressurssit jakeluverkkoyhtiöillä ja maataloilla.

Kyselyn tulosten perusteella saarekkeita käytetään lähinnä keskeytystilanteissa turvaamaan kriittisten kuormien toimintaa tai pienentämään taloudellisia tappioita. Kaapelointi on vähentänyt hyödyntämistarvetta haja-asutusalueilla. Nykyisen verkkoliiketoiminnan valvontamallin näkökulmasta maakaapelointi on saarekekäyttöä kustannustehokkaampi vaihtoehto verkon toimitusvarmuuden kehittämiseen. Toistaiseksi saarekeratkaisuja ei ole juurikaan hyödynnetty investointien lykkäykseen tai asiakkaiden osalta energiakustannusten pienentämiseen.

Loppukäyttäjät hyödyntävät saarekeratkaisuja energiakustannuksissa säästämiseen tai välttääkseen sähkönjakelun keskeytyksestä aiheutuvia haittoja. Maatilayrittäjillä on oltava eläintensuojelu määräysten ja erilaisten tukien velvoittamana varavoimalaitteisto turvaamaan eläinten hyvinvointia ylläpitävien laitteistojen toiminta. Varavoimalaitteistoja käytetään myös estämään tuotteiden pilaantumista pitkien sähkökatkojen aikana. Maataloilla on varauduttu pidempään saarekekäyttöön kuin jakeluverkkoyhtiöissä, muutamista tunneista useisiin päiviin. Maataloilla toivottiin myös parempaa keskusteluyhteyttä jakeluverkkoyhtiöiden suuntaan.

Kyselyn perusteella jakeluverkkoyhtiöt olisivat valmiita hyödyntämään ja maatilayrittäjät tarjoamaan toimitusvarmuus- ja kapasiteettijoustopalveluita, jos niiden kustannukset olisivat kummallekin osapuolelle liiketaloudellisesti kannattavia ja toteutus teknisesti toimiva. Tarkastellessa saarekekäytön taloudellista kannattavuutta jakeluverkkoyhtiön kannalta huomattiin, että ostamalla saarekekäyttöpalveluna maatilalta esimerkkiverkon tapauksessa palvelun hinnan perustuessa kulutetun polttoaineen hintaan oli mahdollisuus kustannussäästöihin. Keskeytystilanteessa loppukäyttäjän kannattaa aina siirtyä saarekekäyttöön, jotta keskeytyksestä aiheutuneet haitat saadaan minimoitua. Saarekekäyttöjä ei toistaiseksi hyödynnetä laajasti korkean sähkön hinnan aikaan.

Haasteina saarekekäytöissä nähtiin mm. saarekkeen sähkön laatu, riittävä vikavirta luotettavan suojausten toteuttamiseen, polttoaineen riittävyys ja ohjeistuksen puute laitteistoista ja saarekekäytöstä.

4 Saarekesimuloinnit

Tässä kappaleessa käydään läpi saarekesimulointien tarkasteluiden perustelut ja lähtökohdat tiivistetyt sekä tärkeimmät johtopäätökset. Laajemmin simulointien lähtökohdista, tuloksista ja johtopäätöksistä on esitetty erillisessä dokumentissa (Peltonen, Simulointitarkastelut). (Peltonen, Simulointitarkastelut) on koottu kuudesta eri osakokonaisuudesta (kts. alla oleva luokittelu A-F), joissa on esitetty simuloitteja yksityiskohtaisesti.

Mikroverkoja voidaan luokitella erilaisin kriteerein, kuten esim. topologian mukaan (säteittäinen/renkas/silmukoitu), käyttökohteen mukaan (teollisuusverkko/maatila/kauppa jne.) tai tuotantoyksiköiden verkkoon liitännätavan mukaan. Projektissa toteutetuissa PSCAD-simuloinneissa perusjako pohjautuu tuotantoyksiköiden verkkoon liitännätapaan. Kategorioita voidaan tällöin ajatella olevan kolme:

- 1) kaikki tuotantoyksiköt ovat suoraan liitettynä verkkoon
- 2) osa tuotantoyksiköistä on suoraan ja osa tehoelektroniikan välityksellä liitettynä verkkoon
- 3) kaikki tuotantoyksiköt on liitetty verkkoon tehoelektroniikan välityksellä.

Tulevia mikroverkoja ajatellen eri simulointiskenaarioihin on valittu kategoriat 2) ja 3). Seuraavassa on listattuna erillisessä dokumentissa (Peltonen, Simulointitarkastelut) yksityiskohtaisesti kuvattujen simulointitarkastelujen perusjako:

- A. Saarekoitumiset - suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä
- B. Saarekoitumiset - vain tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä
- C. Tuotantoyksiköiden keskinäinen tehonsäätö
- D. Mikroverkon sisäiset viat ja asiakkaiden oman tuotannon vaikutus suojaukseen
- E. Kahden lähekkäin olevan, MW-kokoluokan, aurinkovoimala (PV) osallistuminen jännitteensäätöön
- F. EMT detailed vs averaged / RMS –mallinnuksien eroja

Saarekoitumistapahtuman ymmärtäminen on olennainen osa mikroverkon dynamiikkaa ja mahdollisuus hyödyntää mikroverkon potentiaalia tehokkaasti. Saarekoitumiset voivat tapahtua katkon kautta, jolloin saarekkeeseen siirrytään ns. black start -ylös ajon kautta. Toinen vaihtoehto on siirtyä saarekkeeseen ilman katkoa, joka on sähkötekniisesti huomattavasti haastavampi suorittaa.

ja B- kategorian tarkastelut sisältävät saarekoitumisia ilman katkoa taustaverkon vian seurauksena. Mikroverkon ja taustaverkon välissä on liitännäpisteessä oleva katkaisija. Taustaverkon vian seurauksena myös liitännäpisteen jännite alenee. Kun liitännäpisteen jännite on pudonnut alle 0.85 p.u.:n, niin em. katkaisija avautuu ja mikroverkko saarekoituu.

Parametreina A- ja B-kategorian tarkasteluissa ovat saarekoitumisen viive sekä säätöpiireihin liittyviä yksityiskohtia, joita ovat mm. säätöpiirien vastenopeudet ja eri toimintamoodit. Viiveet koostuvat kahdesta osasta: 1) katkaisijan avausviive ja 2) viive akkuväsymyksen toimintamoodin vaihtumiseen siitä, kun katkaisija on avautunut. Simuloinneissa tehoelektroniikkaliitännäisissä tuotantoyksiköissä aktivoituneena on ylivirtasuojaus. Muita suojauksia, kuten ali-/ylijännite ja ali-/ylitaajuussuojia, ei ole aktivoituneita, koska tarkoituksena on tarkastella mikroverkon dynaamisia vasteita kaikkien tuotantoyksiköiden osallistuessa mikroverkon muodostamiseen.

A-kategoriassa mikroverkon dynamiikka määräytyy pääosin tuotantoyksikön tyypeistä ja tuotantoyksiköiden kokonaistehon suhteista. Mikroverkon, jossa 90 % (suurin osa) on tahtikoneita ja 10 % tehoelektroniikkaliitännäisiä yksiköitä vasteet ovat todennäköisesti huomattavan erilaiset kuin mikroverkon, jossa 90 % on tehoelektroniikkaliitännäisiä yksiköitä ja 10 % on tahtikoneita. Vaikka tehoelektroniikkaliitännäisten tuotantoyksiköiden säätö voi olla hyvin nopeaa, on tulosten perusteella selvää, että

tahtigeneraattorin luontainen ominaisuus muodostaa verkko parantaa monissa tilanteissa stabiiliutta viiveiden kasvaessa verrattuna B-kategoriaan.

B-kategoriassa mikroverkon dynamiikka määräytyy pääosin siitä, miten vaihtosuuntaajien säätö on toteutettu. Tahtikoneiden puuttuessa, tehoelektronikkayksiköiden erittäin nopeat vasteet tarjoavat paljon vapausasteita saarekkeeseen siirtymisessä. Toisaalta tuloksista voidaan nähdä, että nyt käytetyillä säätömenetelmillä tahtikoneiden puuttuminen tuo myös uusia haasteita ja vaatimuksia, etenkin verkkoa muodostavien tuotantoyksiköiden säädön peruseräpäätteisiin ja hallintaan. Viiveiden aikana, kun mikroverkossa ei vielä ole verkkoa muodostavaa yksikköä, mikroverkon hallinta saattaa kaivata uusia menetelmiä ja lähestymistapoja. Näistä yksi mahdollisuus on sisällyttää mikroverkkoon aina vähintään yksi yksikkö, jolla on inertian emulointimahdollisuus. Tällä voitaisiin saada varmistettua, että erilaisten viiveiden aikana mikroverkossa on aina vähintään yksi verkon muodostava yksikkö, johon muut tuotantoyksiköt voivat tahdistua. Vaihelukon, joka mittaa ja seuraa jännitteen kulmaa, virheet näkyvät välittömästi ko. yksikön ulostulotehojen virheinä ohjearvotekoihin verrattuna. Vaihelukon kyky seurata jännitteen kulmaa nopeasti ja tarkasti on ratkaisevan tärkeä yksittäisen tuotantoyksikön stabiilin toiminnan varmistamisen kannalta. Näin vaihelukon merkitys korostuu myös koko mikroverkon stabiiliuden säilyttämisessä.

A-kategoriassa mikroverkon sisäinen tehoepätasapaino ennen saarekoitumista muuttaa tuloksia odotetulla tavalla ja loogisesti. Mitä suurempi on esimerkiksi tehovajaus, sitä suurempi on taajuuden alenema saarekkeeseen siirryttäessä muiden parametrien pysyessä vakiona. B-kategoriassa taas vastavaa ns. luonnollista logiikka ei tulosten perusteella näytä olevan. Erisuuret tehoepätasapainot ennen saarekoitumista eivät heijastu pyörivien massojen kiihtymiseen tai hidastumiseen, vaan vasteet riippuvat lähinnä vaihelukon vasteista. Viiveiden aikana vaihtosuuntaajat saattavat tahdistua omiin jännitteisiinsä, jolloin kokonaisvasteet ovat hyvin erilaisia A-kategoriaan verrattuna.

C-kategoria käy droop-tehonjaon peruseräpäätteet lyhyesti läpi ja näyttää simulointiesimerkein, miten eri droop-arvot vaikuttavat tuotantoyksiköiden keskinäiseen tehonjakoon. Perinteinen droop-tehosäätö on monissa tapauksissa toimintaperiaate, jonka avulla tehonjako yksiköiden välillä on suoritettu. Tulevaisuuden B-kategorian mikroverkoissa perinteinen droop-säätö ei välttämättä enää ole sopiva, joten uusia säätömenetelmiä ja lähestymistapoja saatetaan tarvita. Jos tuotantoyksikkö osallistuu taajuuden ja jännitteensäätöön pätö- ja loistehojen kautta näennäistehorajan tullessa vastaan, voidaan tällöin halutessa valita, kumpaa säätöä priorisoidaan. Jos esimerkiksi taajuuden säätöä priorisoidaan, niin yhä suurempi osa näennäistehosta on pätötehoa taajuuden pienentyessä/suurentuessa loistehon, eli jännitteensäädön, kustannuksella.

D-kategorian tarkasteluissa mikroverkko on jo saarekoituneena ja tasapainotilassa. Tässä tilanteessa mikroverkossa tapahtuu vikoja. Simulointien tarkoitus on havainnollistaa, millä tavalla mikroverkossa sijaitseva asiakkaiden oma tuotanto (esimerkkisimuloinneissa aurinkovoimala, PV, 15 kVA) vaikuttaa sulakesuojauksen selektiivisyyteen ja palamisajan pituuteen. Tarkastelun kohteina on kaksi mikroverkkoa: 1) mikroverkko, jossa suhteellisen suuri akusto (1.0 MVA) syöttää keskijänniteverkon kautta pienjänniteverkkoa ja 2) mikroverkon muodostaa yksi pienjänniteverkko, jossa myös suhteellisen pieni akusto (200 kVA) on. Molemmista tarkasteluissa asiakkaiden oma tuotanto sijaitsee pienjänniteverkossa. Riippuen akuston koosta ja sen vikavirransyöttökäytöstä, asiakkaiden oma tuotanto muuttaa sulakkeiden palamisaikoja. Jos akuston koko on suuri suhteessa asiakkaiden omaan tuotantoon (1), on asiakkaiden omalla tuotannolla vähäinen merkitys sulakkeen sulamisaikaan. Simulointimallilla voidaan kuitenkin nähdä pienetkin, millisekuntitason erot, sulakkeiden palamisajoissa. 2-skenaarion tarkasteluissa palamisaikojen erot kasvavat verrattuna 1-skenarioon. Tarkasteluissa suojauksen selektiivisyydessä ei tapahtunut muutosta heikompaan suuntaan. Tässä tarkasteltiin tosin vain yhtä skenaariota, mutta tulokset näyttävät koko laajuudessaan, että ko. simulointimallilla pystytään tarkastelemaan monimutkaisia selektiivisyydestarkasteluja.

E-kategoriassa droop-pohjaisia jännitteensäätötarkasteluja tehdään kahden, lähellä toisiaan sijaitsevan aurinkovoimalan kesken. Tarkoituksena on tutkia miten eri sähköisten parametrien, kuten etäisyyden, vastenopeuksien ja vaihelukon toiminnan muuttaminen vaikuttaa PV:n jännitteensäätöön. Syntyvät tilanteita, joissa kahden, lähekkäin olevien PV:n jännitteen droop-säätö aiheuttaa odottamatonta ja haitallista värähtelyä. Värähtelyt voivat näkyä jännitteessä tai taajuudessa tai molemmissa.

Tulokset näyttävät, että lähekkäisten aurinkovoimaloiden jännitteensäätö saattaa häiritä molempien voimaloiden jännitteensäätöä, mutta tämä tapahtuu vasta sitten, kun säätöä nopeutettiin selvästi ja voimalat pyrkivät säätämään käytännössä saman pisteen jännitettä. Useimmissa tapauksissa, vaikka akusto ja PV:t sijaitsivat lähellä toisiaan, jännitteensäädössä ei ollut tulosten perusteella havaittavissa mainittavaa värähtelyherkkyyttä. Jos toisen PV:n oma vaihelukko on liian hidaskäyttö eikä näin pysty seuraamaan jännitteen kulmaa tarkasti, vaikuttaa tämä molempien PV:n vasteisiin hyvin haitallisesti, vaikka riittävän nopean vaihelukon PV:n pystyisi normaalitilanteessa (ei toisen PV:n tuottamaa häiriötä) toimimaan hyvin stabiilisti.

F-kategoriassa verrataan EMT-pohjaisia detailed- ja averaged-mallinnustapojen tuloksia keskenään. Averaged-menetelmällä, jossa paljon tietokoneen laskentatehoa vaativat IGBT:t korvataan ohjatuilla jännite- tai virtalähteillä, kokonaissimulointiaikaa saadaan lyhennettyä ja simuloinnin aika-askelta kasvatettua. Yksittäiset esimerkit osoittavat, että vertailtaessa detailed- ja averaged-mallien teho-ohjevasteita taustaverkkoon syötettynä, simuloinnin aika-askelta voi kasvattaa noin 60 mikrosekuntia tulosten pysyessä hyvin lähellä toisiaan. Kun tarkasteluihin otetaan mukaan suurempia verkon muutosilmiöitä, kuten vikoja, huomataan, että 60 mikrosekunnin lisäys muuttaa jo merkittävästi tuloksia. Averaged-mallinnuksessa mallia on siis hyvä testata myös nopeissa ja voimakkaissa muutostilanteissa, koska verraten rauhalliset teho-ohjearvomutokset eivät välttämättä tuo esille mallien eroja niiden tarvittavassa laajuudessa. (Peltonen, Simulointitarkastelut) on esitetty myös näkökulmia EMT:n averaged-mallinnuksen ja RMS-mallinnuksen eroista ja haasteista.

5 Ei-teknologiset toimenpide-ehdotukset

Saarekekäyttöjen laajempi hyödyntäminen vaatii vielä tarkennuksia asiaa koskeviin valtakunnallisiin säädöksiin. Lisäksi jakeluverkkoyhtiöiden, saarekeratkaisuiden omistajien ja ulkoisten palveluntarjoajien on kehitettävä liiketoiminta- ja palvelumalleja saarekekäytölle, joustopalveluille ja energiayhteisöille. Myös jakeluverkkoyhtiöiden ja loppukäyttäjien välisiin toimitusvarmuus- ja kapasiteettijoustopalveluihin liittyviä omistajuus- ja vastuunjakokysymyksiä tulee vielä selvittää. Eri toimijoiden tulisi osallistua saarekekäyttöjen kehittämiseen sekä varautua sähkökatkoihin varavoimalaitteistoilla tukeakseen yhteiskunnan toimintaa. Saarekekäyttömahdollisuus sekä hajautetut energiareсурssit on huomioitava laajemmin osana rakennusten suunnittelua ja energiareсурsseihin, saarekekäyttöön sekä energiayhteisöihin liittyvää tiedotusta sekä neuvontaa tulee lisätä. Taulukoon 1 on koottu saarekekäyttöjen yleistymistä edistäviä toimenpide-ehdotuksia sekä toimenpiteeseen liittyvä kohde- tai vastuutaho (Leppänen 2023).

Taulukko 1. Toimenpide-ehdotukset (Leppänen 2023)

Toimenpide-ehdotus	Kohde- tai vastuutaho
Hajautetun tuotannon ja saarekekäyttömahdollisuuden suunnittelu mukana rakennuksen tai kohteen suunnittelun alusta asti.	Saarekeratkaisun omistaja/kohteen rakennuttaja
Ratkaisuiden ympäristöystävällisyyden huomioiminen käyttötarkoituksien huomioiden.	Saarekeratkaisun omistaja
Valtakunnallisen tason määrittely, mitä laitteistoilta ja niiden käytöltä vaaditaan erilaisten ratkaisuiden yleistyessä.	Viranomaisen/jakeluverkkoyhtiö
Ilmoitusvelvollisuuden laajentamisen luokkiin 1 ja 2 hyötyjen ja vaikutusten selvitys.	Viranomaisen
Liiketoiminta- ja palvelumallien kehittäminen sekä verkkoyhtiöiden että loppukäyttäjien saarekeratkaisuille sekä niiden testaaminen.	Jakeluverkkoyhtiö/saarekeratkaisun omistaja
Käytössä olevien saarekekäyttömahdollisuuksien kartoittaminen sekä niiden toiminnallisuuden ja suojauksen toiminnan testaus.	Saarekeratkaisun omistaja/jakeluverkkoyhtiö
Omistajuus- ja vastuunjakokysymysten selvittäminen joustopalveluita ja saarekekäyttöä hyödynnettäessä.	Jakeluverkkoyhtiö/viranomaisen
Selvitys saarekekäytön ja joustopalveluiden vaikutuksista vakio- ja korvauksiin ja regulaatiomallin joustokannustimen hyödyntämiseen.	Viranomaisen/jakeluverkkoyhtiö
Polttoaineen saatavuuden turvaaminen laajoissa ja pitkäaikaisissa keskeytyksissä parantamalla huoltoasemien varautumista	Huoltoasemat
Ulkoisten palveluntarjoajien palveluiden kehittäminen saarekekäyttöä ja energiayhteisöitä ajatellen.	Ulkoisen palveluntarjoaja/jakeluverkkoyhtiö
Energiaressurssiin, saarekekäyttöön ja energiayhteisöihin liittyvän tiedotuksen lisääminen.	Jakeluverkkoyhtiö/viranomaisen/Motiva
Henkilöstön koulutus varavoimalaitteistojen käytössä yrityksissä, joissa hyödynnetään varavoimalaitteistoja ja saarekekäyttöä.	Palveluntarjoaja/järjestelmän toteuttaja/saarekeratkaisun omistaja
Markkina-alustojen kehittäminen.	Ulkoisen palveluntarjoaja

6 Tutkimusprojektin muu dokumentaatio

Kukka Leppänen, Sähkönjakeluverkkoon liittyvät saarekekäytöt, käyttötapaukset ja niiden kannattavuuden perusteet. Tampereen yliopisto, 2023, <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/151654>

Riaz N., Peltonen L., Repo S., Järventausta P., Frequency response of a microgrid under the influence of enhanced spatial and orientational smoothing of photovoltaic output. CIREC 2023 conference, June 2023, Rome, Italy, <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/154407>

Riaz N., Peltonen L., Repo S., Järventausta P., Enhancing Primary Frequency Control in Microgrids through Self-Smoothing Photovoltaic Systems. EPE 2023 conference, September 2023, Aalborg, Denmark, IEEE, <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/153380>

Lasse Peltonen, Saarekesimulointitarkastelut, Erilliset kalvosarjat, joissa esitetty tiivistelmä, laajempi yhteenveto sekä kategorioiden A-F kaikkien simulointitarkastelujen tulokset, 2.4.2024

Pertti Järventausta, Sähkönjakeluverkon saarekekäyttöratkaisut. Esitys Energia-alan tutkimusseminaarissa, Helsinki, 30.1.2024.

Ohjausryhmän kokouksissa esitetyt kalvosarjat

- Pirkko Harsia, Sähköturvallisuuskäsitteitä, 14.10.2022
- Juho Ylipaino, Verkkoyhtiöiden käytänteet – pientuotantoilmoitukset ja varavoimajärjestelmät, 9.6.2023