

# Joustojen hyödyntäminen jakeluverkkotoiminnan kehittämisessä

Sami Repo, Pertti Järventausta, Pekka Verho  
Sähköenergiatekniikan tutkimuskeskus  
Tampereen yliopisto  
2023

Tutkimusprojektin loppuraportti

Joustojen hyödyntäminen jakeluverkkotoiminnan kehittämisessä  
loppuraportti

© Tekijät: Tampereen yliopiston, 2023  
ISBN 978-952-03-3642-4 (verkkójulkaisu)

## Sisällysluettelo

1. Johdanto .....	4
1.1 Jouston määritelmä .....	4
2. Tarpeet joustojen hyödyntämiseen .....	6
2.1 Jakeluverkon nykytila ja tulevaisuus .....	6
2.2 Perimmäiset tarpeet .....	7
3. Joustoratkaisut .....	10
3.1 Kapasiteettijousto .....	10
Verkkopalvelumaksut .....	10
Liittymäsopimukset .....	13
Paikallinen joustomarkkina .....	14
Jakeluverkon jännitteen säätö .....	15
Jakeluverkon virran hallinta .....	17
Jakeluverkon kommunikoiva suojaus .....	18
Ajantasaisempi ja kattavampi tilanvalvonta .....	19
3.2 Toimitusvarmuusjousto .....	20
Saarekeverkkoratkaisut .....	20
Jakeluautomaatio .....	22
Tehostettu kunnossapito .....	23
3.3 Järjestelmätason joustotarpeet .....	23
Reservimarkkinat .....	23
Tehopulatilanteen hallinta .....	24
Verkkokoodien liittymisehdot .....	25
4. Lainsäädännön ja regulaation kehittyminen .....	26
5. Yhteenveto ja suositukset .....	28
5.1 Jouston hyödyntäminen .....	28
5.2 Suositellut joustoratkaisut .....	29
Kapasiteettijousto .....	29
Toimitusvarmuusjousto .....	31
Lähdeluettelo .....	33
Liite – Joustoratkaisujen kuvaukset .....	35

# 1. Johdanto

Joustoista puhuttaessa voidaan tarkoittaa monenlaisia toimenpiteitä, joilla on vaikutusta lyhyellä aikavälillä jakeluverkon käyttötoimintaan tai pidempiaikaisia vaikutuksia, jotka tulee huomioida osana verkon suunnittelua. Erilaisten toimenpiteiden vaikuttavuus poikkeaa toisistaan ja olisi oleellista tunnistaa kustannustehokkaimmat toimenpiteet, joihin myös verkkoliiketoiminnan valvonnan tulisi verkon kehittämistä ohjata. Oman haasteensa asiaan tuo se, tarkastellaanko asiaa erityisesti verkkoyhtiön toiminnan vai asiakkaan (verkon loppukäyttäjän) näkökulmasta, ja miten kukin toimenpide vaikuttaa ei vain sähköjakeluverkon vaan koko energijärjestelmän kokonaistehokkuuteen sekä asiakkaan kokemaan verkkopalvelun laatuun ja hintaan.

Nykyisen Sähkömarkkinalain edellyttämän jakeluverkon kehittämissuunnitelman tulee Energiaviraston uusien ohjeiden mukaan sisältää ”suunnitelma sähkönkulutuksen jouston, sähkövarastojen, jakeluverkonhaltijan energiatehokkuustoimenpiteiden ja muiden resurssien mahdollisesta käyttämisestä vaihtoehtona jakeluverkon siirtokapasiteetin laajentamiselle.” Kehittämissuunnitelmassa edellytettävän investointivaihtojen tarkastelun tueksi tarvitaan myös eri vaihtoehtojen kustannustehokkuuden arviointiin työkaluja. Nykyisessä verkkoliiketoiminnan valvontamallissa kehittämissuunnitelmissa edellyttävät vaihtoehdot eivät ole liiketaloudellisesta näkökulmasta tasavertaisessa asemassa perinteisiin verkkoinvestointeihin nähden. Usein ostopalveluna hankittavien vaihtoehtojen (esim. akkuvarmennus, joustopalvelut, varavoima, raivaus, johtokadun levennys) kustannukset kohdistuvat valvontamallissa operatiivisiin kustannuksiin, joihin kohdistuu tehostamistavoite, joka pienentää sallittua liikevaihtoa, kun taas verkostoinvestointi (esim. maakaapelointi) kasvattaa verkon arvoa ja sitä kautta lisää sallittua tuottoa sekä sallittua liikevaihtoa poistomenettelyn kautta. Jakeluverkkoliiketoiminnan valvontamallin tulisi kuitenkin olla teknologianeutraali sillä tavoin, että erilaiset kustannustehokkaat investointivaihtoehdot ovat aidosti investointeja koskevassa päätöksenteossa vaihtoehtoja esimerkiksi verkon uusimiseksi, kapasiteetin laajentamiseksi ja toimitusvarmuuden tason nostamiseksi. Energiavirasto on seuraavien 6. ja 7. valvontajaksojen suuntaviivoissa tuomassa osaksi valvontamallia joustokannustimen, joskin sen soveltaminen edellyttää vielä tarkempaa menettelytapohjetta tai vastaavaa ohjeistusta mm. hyväksyttävien kustannusten ja toimenpiteiden osalta.

Tämän raportin tavoite on kuvata joustojen hyödyntämisen kokonaistilannetta sähkönjakelun verkko-toiminnan kannalta ja hahmotella lähitulevaisuuden mahdollisia ratkaisuja verkkotoiminnan kehittämiseksi. Osaltaan raportti pyrkii ratkaisemaan muna-kana ongelmaa joustojen hyödyntämiseksi verkkoliiketoiminnassa. Nykyisinhän joustojen hyödyntäminen verkkotoiminnassa on hyvin vähäistä, koska tarjolla olevia kustannustehokkaita ratkaisuja on hyvin vähän kaupallisesti tarjolla, vaikka tutkimus- ja tuotekehitysmielessä ratkaisuja onkin esitetty runsaasti. Toisaalta joustoratkaisuja ei kannata kaupallistaa, jos niille ei ole riittävän laajaa kysyntää.

## 1.1 Jouston määritelmä

Jouston määrittelemiseksi täytyy sen osatekijät erotella toisistaan selkeästi ja yleistettävän määritelmän tulee olla teknologia- ja ratkaisuriippumaton. Osatekijöillä tarkoitetaan tässä yhteydessä jouston jakamista resursseihin, palveluihin ja tuotteisiin. Joustoresurssit ovat fyysisiä laitteita tai prosesseja, joita voidaan ohjata halutulla tavalla. Laitteet liittyvät sähköenergian tuotantoon, varastointiin, energiamuunnokseen, kulutukseen tai siirtoon. Resursseihin liittyy erilaisia teknisiä reunaehtoja kuten nimellistehoja tai energiakapasiteetteja, jotka tyypillisesti määräytyvät laitteiden hankinnan yhteydessä. Näiden lisäksi erityisesti jouston ohjaukseen liittyy laitteiden käyttöön liittyviä reunaehtoja, jotka puolestaan riippuvat joko itse laitteen tai laitetta hyödyntävän primääriprosessin tilasta. Esimerkiksi lämmitysvastuksella on nimellisteho, mutta sen ohjausmahdollisuus riippuu vastuksen

lämmittämän tilan sallitusta lämpötilan vaihteluvälistä, kyseisen tilan sen hetkisestä lämpötilasta ja itse vastuksen tilasta (päällä/pois).

Jouston hyödyntämiseksi joustoresurssien tarkastelu on useinkin aivan liian yksityiskohtainen taso. Samaan toimintoon voidaan päästä hyvin erilaisilla teknologioilla tai niiden kombinaatioilla. Joustopalvelu on abstrakti kuvaus joustoresurssin hyödyntämiseksi yhteen spesifiin tarkoitukseen. Joustoresurssija voidaan kuitenkin hyödyntää moneen tarkoitukseen, joten joustopalveluiden määritelmiä tulee olla monia. Olennaista joustopalvelun osalta onkin määritellä jousto sen hyödyntämiseen liittyvien tarpeiden näkökulmasta, jotta resursseilta edellytettävät tekniset ja käyttöön liittyvät ominaisuudet saadaan yksilöityä. Tämä mahdollistaa teknologiariippumattomuuden ja toisaalta jouston tarjoaja tunnistaa millaisilla teknisillä ratkaisuilla saavutetaan riittävä taso. Lisäksi joustopalveluiden ostamisesta saadaan syrjimätöntä ja resurssien tekninen kehitys ei edellytä jouston uudelleenmäärittelyä. Esimerkkejä joustopalveluista ovat esimerkiksi prosumerin tai energiayhteisön kannalta energiakustannusten minimointi, energian säästö, tehoaipun leikkaus ja tuotantoa seuraava jousto. Sähkönmyyjän kannalta joustopalveluita voisivat olla esimerkiksi taseenhallinta ja strateginen kaupankäynti päivää edeltävillä tai päivän sisäisillä markkinoilla. Sähkönverkkoyhtiön kannalta tyypillisiä palveluita ovat jännitteen säätö, taajuuden säätö, pullonkaulan eli kapasiteetin hallinta, saarekekäyttö ja kylmäkäynnistys (blackstart tai grid forming).

Joustokaupan toteuttamiseksi tarvitaan lisäksi joustotuote, joka on varsinainen kaupankäynnin kohde. Joustotuote määrittelee joustopalvelun toteuttamiseksi tarvittavan tavan hankkia joustoja. Tuote voi olla jollain markkinapaikalla vaihdettava tuote tai perustua kahdenväliseen sopimukseen. Lisäksi epäsuoraan ohjaukseen perustuvat tariffit voidaan ymmärtää myös joustoja toteuttavina tuotteina, vaikka ne enemmänkin muistuttavat kannustimia kuin aktiivisen kaupankäynnin kohteita. Joustotuote kuvataan attribuuteilla, jotka kuvaavat millä tavalla joustotarjous täyttää joustopalvelun tarpeet. Esimerkiksi pullonkaulan hallinnan joustotuote voitaisiin määritellä hinnan, joustoresurssin sijainnin, tarjoukseen (esimerkiksi tarjouksen vähimmäis- tai enimmäismäärä), aktivointitavan, ylös- tai alassäädön, aktivoinnin pituuden ja resurssityypin perusteella. Koska kaikkien hyväksyttävien tarjousten on täytettävä joustopalvelun vähimmäisvaatimukset, niin kaupankäynnissä voidaan suoraan vertailla tarjouksia ja niiden sopivuutta kyseiseen tarpeeseen. Hyvin toteutettu joustopalvelun ja -tuotteen määrittely mahdollistaa automatisoidun ja läpinäkyvän joustokaupan. Joustotuotteen määrittelyssä tulee myös ottaa kantaa siihen millä tavalla jouston aktivoinnin todentaminen toteutetaan.

## 2. Tarpeet joustojen hyödyntämiseen

### 2.1 Jakeluverkon nykytila ja tulevaisuus

Sähkönjakeluverkot ovat nykyisin pääosin passiivisia eli niiden suorituskyky perustuu itse verkkoinfrastruktuuriin. Verkon aktiivista hallintaa toteutetaan lähes yksistään vianhallinnan näkökulmasta ja jos-sain määrin verkostohäviöiden minimoiseksi. Verkon siirtokyky määräytyy verkkokomponenttien mitoituksen perusteella virta-, jännite- ja sähkönlaaturajojen puitteissa. Toimitusvarmuuden näkökulmasta sähkönjakeluverkon suorituskyky määräytyy itse primääriverkon lisäksi jakeluautomaatiosta, vianhallinta- ja -korjausprosesseista, tietoliikenneyhteyksistä, tiedonvaihtomekanismeista ja tietoturvaratkaisuista. Sähkömarkkinalaki ja sen pohjalta määritelty verkkoyhtiöiden regulaatio ohjaavat vahvasti verkkoyhtiöitä investoimaan itse verkkoinfrastruktuuriin.

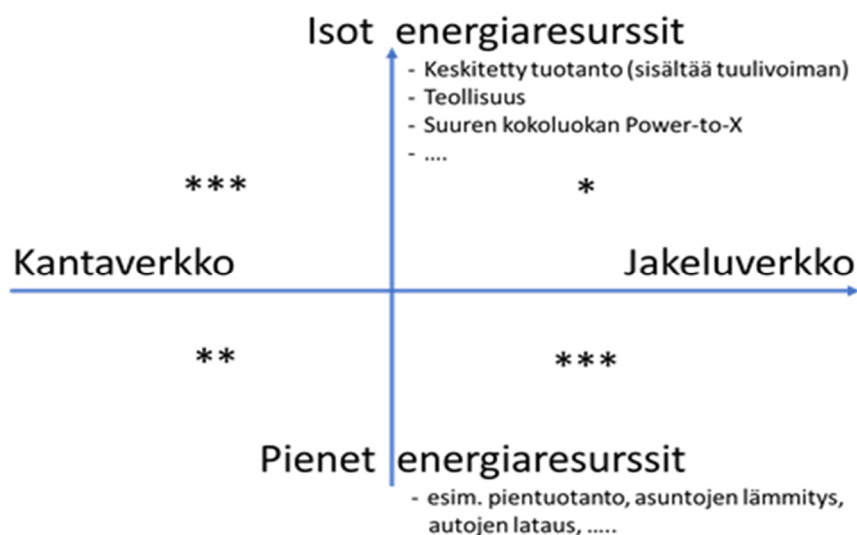
Jakeluverkot ovat kuitenkin voimakkaassa murrostilassa johtuen useammasta samanaikaisesta muutostekijästä. Vanhin näistä on jakeluverkkojen toimitusvarmuuden parantamiseksi säädetty sähkömarkkinalain muutos, jolla pyritään takaamaan riittävän luotettava sähkönjakelu kaikkialla. Tämä on johtanut erittäin merkittäviin investointitarpeisiin sähkönjakeluverkossa ja kohdistuu erityisesti keskijänniteverkon kaapelointiin, joka on parhaillaan käynnissä.

Toinen merkittävä tekijä liittyy energiamurrokseen, jolloin jakeluverkon asiakkaat investoivat energian säästöön (energiatehokkaat rakennukset), lämpöpumppuihin, aurinkopaneeleihin ja sähköautoihin, mitkä vaikuttavat sähkönjakeluverkon suorituskykyyn. Lisäksi tulevaisuudessa kiinteistöissä voi olla myös energiavarastoja ja energiankäyttöä ohjaavaa automaatiota. Tähän samaan teemaan liittyvät myös usean asiakkaan yhdessä muodostamat energiayhteisöt, jotka myös osaltaan pyrkivät alentamaan asiakkaiden energiakustannuksia tai hyödyntämään yhteisinvestointeja esimerkiksi lämpöpumppujen tai aurinkopaneeleiden osalta. Näiden muutostekijöiden vaikutuksen sähkönjakeluverkoissa ovat vasta alkuvaiheessa, mutta jo monin paikoin selvästi nähtävissä. Energiamurroksen myötä sähkönjakeluverkon rooli tulee muuttumaan merkittävästi asiakkaiden energiaomavaraisuuden kasvessa ja kulutusprofiiliin muuttuessa entistä satunnaisemmaksi. Yksistään kiinteistöjen katoille asennettävien aurinkopaneeleiden vaikutus jakeluverkoissa tulee olemaan erittäin merkittävä seuraavalla vuosikymmenellä.

Kolmanneksi sähköjakeluverkoille ollaan asettamassa vaatimuksia toimia entistä kustannustehokkaammin. Perinteisten passiivisten verkostoinvestointien ohella on selvitettävä muita potentiaalisesti kustannustehokkaampia ratkaisuja verkon vahvistamiseksi tai luotettavuuden parantamiseksi. Toisaalta energiamurroksen mukanaan tuomien verkostovaikutusten muutosnopeus voi olla nopeampi kuin jakeluverkkoyhtiöiden kyky investoida verkon vahvistamiseksi, jolloin verkon aktiivinen hallinta jää ainoaksi mahdollisuudeksi täyttää jakeluverkolle asetetut suorituskykyvaatimukset. Esimerkkinä tästä ovat kymmenien ja satojen megawattien suuruusluokkaa olevien sähkökattiloiden liittäminen osaksi kaukolämpöverkkoja. Uuden sähköaseman ja 110 kV:n siirtolinjan suunnittelu ja rakentaminen, sähkökattilan hyödyntämiseksi ilman rajoituksia, vie käytännössä useita vuosia parhaassakin tapauksessa, kun asiakkaan toive saada liittymä käyttöön voi olla muutaman kuukauden mittainen. Jakeluverkon lisäksi tästä voi aiheutua investointitarpeita myös kantaverkon puolelle, mikä entisestään viivästyttää kokonaisuuden rakentamista. Vastaavia haasteita esiintyy tuuli- ja aurinkopuistojen, suuritehoisten sähköajoneuvojen latauskeskittymien ja tulevaisuudessa elektroyksilaitosten liittämisiksi 110 kV:n sähkönjakeluverkkoon.

## 2.2 Perimmäiset tarpeet

Joustavia energiaressursseja tarvitaan järjestelmän eri tasoilla eri tavoin, ja toisaalta eri tasoilla tarjolla olevien resurssien vaikutuksella on eroa. Kuvassa 1 on hahmoteltu nelikenttää, jossa vaaka-akselin muodostaa sähköjärjestelmän eri tasot järjestelmävastuussa olevasta kantaverkosta paikallisiin sähkönjakeluverkkoihin ja pysty-akselin erilaiset eri kokoluokan energiaressurssit (tuotanto, varasto, kulutus), joista pienet resurssit pääosin ovat jakeluverkkoihin liittyviä joustoresursseja ja isommat resurssit 110 kV:n suurjännitteiseen jakeluverkkoon tai kantaverkkoon liittyneitä resursseja. Kantaverkkoon kytkeytyvät merkittävät energiaressurssit (suuret tuotantoyksiköt, teollisuus, ison kokoluokan vedyntuotantolaitokset jne.) ja niiden nopeat muutokset vaikuttavat suoraan kantaverkon järjestelmä- ja sähkötekniiseen tilaan ja jouston näkökulmasta tehotasopainoon ja verkon taajuuteen (merkitty kuvaan kolmella tähdellä kantaverkon puolella), mutta eivät vaikuta juurikaan paikallisen jakeluverkon tilaan paitsi koko järjestelmän tehotasopainon tilaa kuvaavan taajuuden muodossa. Paikallisen jakeluverkon haasteisiin (tehonsiirtokapasiteetti, jännitteen laatu, asiakkaiden sähkön syöttö) ei voida vaikuttaa kantaverkkoon kytkeytyvien resurssien ja niiden joustojen avulla, vaan paikalliset ratkaisut perustuvat paikallisessa verkossa oleviin pienempiin energiaressursseihin, jolloin jouston sijoittumisella on myös merkittävä vaikutus. Kulutuksesta merkittävä osa on kytkeytynyt jakeluverkkoon (vuoden 2016 15 105 MWh/h huippukuormitustilanteen kulutuksesta 66,1 % aiheutui jakeluverkoissa sijaitsevasta kulutuksesta) (Matilainen, 2016), jolloin pienistä energiaressursseista syntyy merkittävä joustopotentiali jakeluverkolle (kolme tähteä jakeluverkon puolella). Aggregoituina kokonaisuuksina pienet resurssit voivat tarjota myös joustopotentialia kantaverkon tarpeisiin, josta syntyy kantaverkolle merkittävä joustopotentiali. Jakeluverkon mahdollisista rajoitteista johtuen, näiden resurssien joustopotentiali on pienempi kantaverkolle kuin jakeluverkolle (kaksi tähteä kantaverkon puolella). Jakeluverkoissa on toistaiseksi vain rajoitetusti suuria energiaressursseja lukuun ottamatta joitakin kaupunkiverkkoja (yksi tähti jakeluverkoissa). Jouston sijainnin lisäksi muita merkittäviä tekijöitä ovat jouston (tuotannon ja kulutuksen jousto) ajallinen vaihtelu ja jouston saatavuus silloin kun sitä tarvitaan. Esimerkiksi sähkölämmityskuormista ei juurikaan ole saatavissa joustoa kesäaika tai kaikkein kylmimpinä ajankohtina, jolloin lämmitys ei ole päällä tai on jatkuvasti päällä, jolloin jousto toteutuu ainoastaan asiakkaan mukavuudesta tinkimällä.



Kuva 1. Erilaisten joustoresurssien vaikutus järjestelmän eri tasoille (Honkapuro 2020).

Koko sähköjärjestelmän toimintaympäristö on muuttumassa nopeassa tahdissa. Kantaverkko- ja suurjännitteisen jakeluverkon tasolle on tulossa merkittävä määrä lisää uusia energiaressursseja niin

tuotannon (tuulivoima ja suuret aurinkovoimalat) kuin kulutuksen (esim. elektrolyysit, suuritehoiset sähköajoneuvojen latauskeskittymät ja sähkökattilat) osalta. Nämä tulevat vaikuttamaan edellä kuvattun mukaisesti erityisesti kantaverkon ja 110 kV verkon joustotarpeisiin ja jouston hyödyntämiseen. Esimerkiksi sähköautojen nopea lisääntyminen, lämmityksen sähköistyminen, asiakkaiden oman pientuotannon lisääntyminen ja energiayhteisöt tuovat taas merkittäviä muutoksia jakeluverkkotasolla. Yhtenä skenaariona voikin nähdä "joustomarkkinoiden" eriytymisen siten, että suuren kokoluokan energiaresurssit ovat ensisijaisesti kantaverkko- ja 110 kV jännitetaso joustojen lähteenä, kun taas keski- ja pienjännitteiseen jakeluverkkoon kytkeytyvät pienemmät resurssit luovat mahdollisuuksia jakeluverkkotasoon uusille ratkaisuille. Aggregointimallien kehittyessä myös pienemmän kokoluokan energiaresurssit voivat osallistua voimajärjestelmätason (kantaverkko, myyjät, suuret kuluttajat ja tavastavaat) joustomarkkinoille, mutta niiden kilpailukyky kymmenien ja satojen megawattien suuristen energiaresurssien rinnalla voi olla haasteellista.

Jakeluverkon näkökulmasta joustojen hyödyntämisen tarvetta aiheuttaa mm.:

- energiemarkkinoiden (esim. spot-hinnat) hintasignaalit, jotka voivat synkronoida kuormia halvoille tunneille aiheuttaen merkittäviä tehohippuja ja kapasiteettiongelmia jakeluverkkoon
- asiakkaan oman pientuotannon verkkoon syötön merkittävä kasvu, varsinkin, kun tähän on liittymä- ja siirtopalveluiden hinnoittelun osalta olemassa kannusteita
- sähköautojen latauskuormat sekä muut hetkellisiä suuria tehoja ottavien kuormien (esim. lämpöpumput) ajoittuminen
- poikkeustilanteissa (esim. vikatilanteet) varasyöttöyhteyksien kautta syötettävän kuorman hallinta
- pitkäkestoisten vikatilanteiden jälkeinen tehopiikki (cold-load pick-up ilmiö) tai aggregoitujen kulutusjoustojen ennen/jälkeen aiheutuva tehopiikki (rebound ilmiö), kun verkossa on paljon varaavaa sähkökuormaa (sähkölämmitys ja -jäähdytys, sähköautot ja akut)
- tehopolatilanteiden hallinta (kiertävien sähkökatkojen välttäminen)

Jakeluverkon olemassa olevan kapasiteetin tehokkaampi hyödyntäminen (kapasiteettijousto) siirtää verkon investointitarpeita, kun pitoajaltaan käyttökelpoista verkkoa ei tarvitse saneerata tuotannon ja/tai kulutuksen kasvun seurauksena. Kapasiteettijousto voidaan vaikuttaa välillisesti verkkopalvelumaksujen hinnoittelulla, erityisesti tehopohjaisilla tariffeilla, tai hyödyntämällä reaaliaikaisemmin paikallisten joustomarkkinoiden tarjontaa.

Edellä kuvattujen muutostekijöiden takia sähkönjakeluverkkoihin on investoitava tulevaisuudessa merkittävästi. Investointitarpeet syntyvät siitä, ettei nykyisen verkon mitoituksessa ole välttämättä huomioitu kaikkien muutostekijöiden vaikutusta koko verkon eliniän ajalta, jolloin verkon siirtokyky voi jäädä vajaamittaiseksi ennen sen teknisen eliniän päättymistä. Tällöin vaihtoehtoina on saneerata olemassa olevaa verkkoa vahvemmakeksi, mikä voi johtaa merkittäviin investointeihin, tai lykätä tai jopa kokonaan välttää investointeja aktiivisen verkonhallinnan keinoin.

Asiakkaiden ja energiayhteisöjen omien paikallisten energiaratkaisujen lisääntyminen luo osaltaan edellytyksiä sekä asiakkaiden omille että julkisen jakeluverkon kautta syntyville saareke- ja mikroverkoratkaisuille, jotka ovat hyödynnettävissä toimitusvarmuusjoustoina, erityisesti syrjäisillä seuduilla. Jotta nämä ratkaisut kehittyvät toivottuun suuntaan, on energiayhteisöille ja mikroverkoille kehitettävä kannustavat ja ohjaavat tariffit ja liittymisehdot. Keskeistä tässä on, että taloudelliselta kannalta arvonluonti on kaikkien osapuolten kannalta positiivista.

Toimitusvarmuuden parantaminen kaapeloinnilla haja-asutusalueilla, erityisesti muuttotappioalueita, tulee siirrettyä energia kohti suhteettoman kalliiksi. Toimitusvarmuutta on kuitenkin parannettava, jotta keskeytyksen maksimijän osalta päästään 36 h vaatimuksen alle. Pitkistä etäisyyksistä ja



metsäisistä olosuhteista johtuen, tähän ei välttämättä päästä vain tehostamalla avojohtoverkon korjaustoimintaa, vaani vaihtoehtoisia investointi- ja käyttöstrategioita tulisi kehittää myös toimitusvarmuuden parantamiseksi.

Verkossa on myös tehtävä huoltotoimenpiteitä, jotka esimerkiksi päämuuntajassa tai muussa sähköjakelun kannalta kriittisessä komponentissa tulee voida ajoittaa sellaiseen ajankohtaan, ettei siitä aiheudu keskeytystä asiakkaalle. Tämän ns. N-1 periaatteen noudattaminen voi kuitenkin olla joissakin tilanteissa hyvin kallista ja toisaalta tilanteiden todennäköisyys, jossa sähköjakelu joudutaan kokonaan keskeyttämään, on hyvin harvinainen. Edellä kuvatut muutostekijät tekevät huoltojen aikaisista tilanteista entistä hankalammin hallittavia. Jouston hyödyntäminen huoltoihin rajoittuvana ajankohdana voi mahdollistaa yksinkertaisempien ja edullisempien verkostoratkaisuiden hyödyntämisen muutostarpeista huolimatta.

Samaa logiikkaa voidaan soveltaa myös vikatilanteiden aikaisten poikkeuksellisten kytkentätilanteiden aiheuttamien pullonkaulatilanteiden hallintaan. Vikatilanteisiin varautumiseksi kriittisten varasyöttöyhteyksien pullonkaulatilanteisiin tulisi varautua vähintään ennustamalla aiheuttaako jokin vikatilanne pullonkaulan varasyöttötilanteessa. Laskenta voidaan toteuttaa automaattisesti vaihtoehtoisissa varasyöttötilanteissa ennustetuille tehosiirtotilanteille. Tarvittava jousto ennätetään siten hankkia joustomarkkinoilta tai ilmoittamalla kahdenvälisen sopimuksen hyödyntämisestä ennustetussa pullonkaulatilanteessa mahdolliseen vikatilanteeseen varautumiseksi. Varautumisesta syntyvän operatiivisen kulun koko ratkaisun elinkaaren ajalta tulee olla verkkoinvestointia halvempi, jotta se olisi taloudellisesti mielekäs.

Talven 2022-2023 mahdolliseen tehopolatilanteeseen varauduttiin kiertävin sähkökatkoin. Tällainen kehitysmaista tuttu ratkaisu on luonnollisesti viimeinen keino varmistaa sähköjärjestelmän tasapaino, ja siten sen käyttö tulisi olla äärimmäisen harvinaista. Tehopolatilanteen kohonneen todennäköisyyden takia Suomessakin varauduttiin toteuttamaan kiertäviä sähkökatkoja. Tulevaisuudessa sähköntuotannon muuttuessa yhä enenevässä määrin tuuli- ja aurinkovoimaan perustuvaksi tarvitaan merkittävästi joustoa tehotasapainon säilyttämiseksi vienti- ja tuontikapasiteetin lisäksi. Siksi onkin nähtävissä, että tehopolatilanteen todennäköisyys tulevaisuudessa on pikemminkin lisääntymässä kuin pienentymässä. Jotta kiertävistä sähkökatkoista ei aiheutuisi kohtuutonta haittaa koko yhteiskunnalle, tulisi kiertävien sähkökatkojen toteutusta uudistaa johtolähtöjen irtikytkennästä kohti vähemmän kriittisten laitteiden irtikytkentää.

Perimmäisenä tavoitteena on hyödyntää olemassa olevia ja uusia energiaressursseja ja verkkoa kokonaisuutena optimaalisesti, mikä edellyttää energiaressurssien käytöltä ja sähköverkolta uusia älykäitä ratkaisuja. Edellä kuvattujen syiden takia jakeluverkkojen hallintaan tulisi kehittää vaihtoehtoisia ratkaisuja passiivisille verkkoinvestoinneille. Aktiivinen jakeluverkonhallinta tarkoittaa erilaisia IT- ja automaattioratkaisuja nykyisen jakeluverkon suorituskyvyn parantamiseksi ilman merkittäviä investointeja passiiviseen verkkoon. Luonnollisesti aktiivisen verkonhallinnan tarvitsemien IT- ja automaattioratkaisuiden ja joustonhankinnan elinkaarikustannusten tulee olla edullisemmat kuin investoinnit passiiviseen verkkoon. Samoin tulisi kehittää tariffi- ja liityntäsopimuksia, jotta asiakkailta olisi oikeanlainen kannustin investoida ja käyttää sähköä kokonaisuuden kannalta tarkoituksenmukaisella tavalla. Sosio-ekonomisen optimin saavuttaminen koko yhteiskunnan tasolla on erittäin haastava tavoite ja käytännössä esimerkiksi verkkoregulaatio johtaa osaoptimointiin. Seuraavassa luvussa tarkastellaan yleisellä tasolla joustoratkaisuja, joilla sähköjakeluverkkoyhtiö voisi lähteä kehittämään jouston hyödyntämistä liiketoiminnassaan.

## 3. Joustoratkaisut

### 3.1 Kapasiteettijousto

Kapasiteettijoustopilla tarkoitetaan ratkaisuja, joiden avulla nykyisen sähköjakeluverkon siirtokapasiteettia voidaan kasvattaa ilman investointeja verkon passiivisiin komponentteihin. Englannin kielellä samaan asiaan viitataan termillä "hosting capacity", jolla tarkoitetaan mahdollisuutta liittää olemassa olevaan verkkoon enemmän hajautettua sähköntuotantoa, sähköautoja, lämpöpumppuja, hintaohjattua kulutusta ja varastoja, aggregoitua joustoa, jne. Kapasiteettijoustopiratkaisut voidaan jakaa sopimuksellisiin (verkkopalvelumaksut, liittymäsopimukset ja vapaaehtoiset palvelusopimukset), kaupallisiin ratkaisuihin (paikallinen joustomarkkina) ja jakeluverkon hallinnan teknisiin ratkaisuihin.

#### Verkkopalvelumaksut

Verkkopalvelumaksujen vaikutus on useimmiten välillinen, mutta hyvin suunniteltu tuoterakenne vaikuttaa pitkällä aikavälillä alentavasti investointitarpeisiin, koska sama verkko voi syöttää sähköenergiaa esimerkiksi entistä useammalle sähköautolle. Tehotariffeja on perinteisesti sovellettu keskijänniteasiakkaille ja suurimmille pienjänniteasiakkaille. Tehotariffin idea on kannustaa kulutushuippujen alentamiseen ja siten mahdollistaa jakeluverkon käyttöasteen kasvattaminen. Jakeluverkkoyhtiöt ovat siirtymässä tehotariffien soveltamiseen entistä pienemmille asiakkaille. Nykyisin jo ainakin neljä jakeluverkkoyhtiötä tarjoaa tällaista verkkopalvelutuotetta omakoti -kokoluokan asiakkaille. Tehotariffissa verkkopalvelumaksu määräytyy siirretyn sähköenergian lisäksi esimerkiksi kuukausittaisen tehohuipun perusteella. Tehotariffi parantaa sähköjakelun kustannusvastaavuuden toteutumista (Lummi 2018), (Lummi 2019).

Tehotariffissa perusmaksun ja kulutusmaksun (mahdollisesti Time of Use-tyyppinen) lisäksi verkkopalvelumaksuun sisältyy tehomaksukomponentti (€/kW), jonka pohjautuu pienasiakkailla Energiaviraston työ- ja elinkeinoministeriölle tekemässä harmonisointisuosituksessa (Karppinen 2021) kuukauden (laskutusjakso) kolmen suurimman tuntien energian (=tuntikeskiteho kWh/h) keskiarvon mukaan. Tehomaksulle on mahdollisesti myös kynnysteho, jonka jälkeen tehomaksua aletaan vasta periä. Tehotariffi ohjaa välillisesti asiakkaita hallitsemaan liittymän huipputehoa. Tehotariffin kautta asiakkaalle syntyy käytetystä tehosta kustannus, mutta toisaalta se parantaa asiakkaan mahdollisuutta vaikuttaa omaan verkkopalvelumaksuunsa, jos tehomaksulla korvataan perusmaksua (osa perusmaksusta). Jos asiakkaan huipputeho sattuu samalle ajankohdalle verkon huipputehon kanssa, vaikuttaa huipputehon alentaminen koko verkon alueella ja siten parantaa isossa kuvassa olemassa olevan verkon kapasiteetin riittävyttä, ja siten vähentää tarvetta verkon vahvistusinvestoinneille. Tehotariffin pitäisi näkyä näin pidemmällä aikavälillä asiakkaiden verkkopalvelumaksuja alentavasti tai niiden korotuspaineen vähenemisenä. Tehotariffin avulla voidaan vaikuttaa nykyisiin kuormituksiin sekä uusiin lyhyitä teho-  
piikkejä aiheuttaviin kuormiin (sähköautot, lämpöpumput). Vaikutus kohdistuu isoon asiakasmäärään ja sitä kautta tehotariffilla on merkittävä vaikutus koko verkolle. Tehotariffi vaikuttaa keskimääräisellä tavalla koko verkon alueella ja se toimii etäisyysriippumattomana perushinnoittelumallina. Sen rinnalla voi olla paikalliseen verkon tilanteeseen perustuva erillinen dynaaminen hinnoittelurakenne, joka toimii erillisenä lisäpalvelutuotteena, jolla voidaan paremmin huomioida joustojen paikallinen vaikutus.

Tehotariffi luo lisäkustannuksen hetkelliselle markkinaperusteiselle kuorman lisäykselle, esim. pörsisähkön hinnan ollessa lähes nolla. Voimajärjestelmän tehotasapainon näkökulmasta kuorman tulisi joustaa myös ylöspäin. Kuitenkin markkinaperusteinen jousto synkronoi kuormia samaan ajanhetkeen, jolloin voi syntyä aiempaa suurempia tehohuippuja verkkoon. Tehomaksu antaa tälle vastakkaisen verkon kapasiteettiin pohjautuvan hintasignaalin, jolloin joustosta saatavan hyödyn pitää kattaa myös tehomaksusta tuleva lisäkustannus, joka heijastelee verkon kustannuksia keskimääräisellä

tasolla. Myös jakeluverkon tasolla paikalliselle kuormanlisäykselle voi olla tarvetta, jos samalla alueella oleva tuotanto nostaa jännitettä liikaa. Vaihtoehtona on silloin leikata tuotantoa tai kasvattaa paikallisesti kuormaa. Tämä pitää kompensoida tariffista erillisellä dynaamisella hinnoittelulla. On kuitenkin syytä huomata, että tehotariffi mahdollistaa jouston kuukauden huipputehon alapuolella hyvin vapaasti ilman kustannusvaikutuksia, mikä mahdollistaa pörssisähkön sidotun sähkön myyjän tuotteen omaavalle asiakkaalle mahdollisuuden hyödyntää hintavaihteluja tehokkaasti. Tehotariffi huomioi kuitenkin paremmin sähköjärjestelmän kokonaistehokkuuden, pelkän energiemarkkinan osa-optimoinnin sijaan, lisäämällä kustannuskomponentin jakeluverkon kapasiteetin käytöstä.

Esimerkkinä tehotariffin soveltamisesta on sen ohjaava vaikutus kuluttajan hankkiessa sähköauton, jolloin asiakkaan sähköauton hankinta ei johda sulakekoon kasvattamiseen vaan ohjaa latauskuorman ja muun kuorman hallintaan (vuorotteluun ja tarkoituksenmukaiseen ajoittamiseen). Se ohjaa myös aurinkoenergian rinnalla asiakkaan oman kysyntäjoustop tai akkuvaraston järkevään hyödyntämiseen itse tuotetun sähkön mahdollisimman täysimääräiseksi hyödyntämiseksi ja antaa oikean suuntaisen hintasignaalin lämpöpumppujen aiheuttamille kuormitushuipuille.

Tehotariffi on mahdollista toteuttaa tuntimittausten pohjalta osana mittaustieto- ja laskutusjärjestelmää. Se myös ohjaa asiakkaan kuormien hallintaa tukeviin ohjaus- ja automaattioratkaisuihin. Tehotariffin käyttöönoton kustannusvaikutus jakeluverkko-yhtiöille ei ole merkittävä ja se on käyttöönotettavissa lähes välittömästi, edellyttäen kuitenkin kustannusperusteisten verkkopalvelumaksujen määrittämistä maksukomponenttien yksikköhintojen (€/kk, snt/kWh, €/kW) laskemiseksi. Käytännössä kyse on nykyisen pienjännitetehtotariffin käyttöönotosta myös pienasiakkaille. Pienimpien asiakkaiden osalta voidaan määrittää myös kynnysteho, jolloin tehomaksulla ei ole vaikutusta.

Asiakkaan näkökulmasta tehotariffi tarkoittaa verkkopalvelumaksun määrätymisen monimutkaistumista ja investointeja tehohuipun hallintaan, jos tehomaksun osuus verkkopalvelumaksusta kasvaa merkittävän suureksi. Jos asiakkaan tehohuiput sattuvat ajankohtaan, jolloin sähkönsiirto jakeluverkoissa ei ole merkittävän suuruista missään verkonosassa, johon kyseinen asiakas vaikuttaa, niin tehotariffi rankaisee asiakasta, vaikka hän muutoin toimiikin verkon kannalta mielekkäällä tavalla. Perusajatus tehotariffin kustannusvastaavuudesta toimiikin keskimääräiselle asiakkaalle, joka ei ohjaa kuluistaan ja jonka kulutushuiput sattuvat samanaikaisesti muiden asiakkaiden huippujen kanssa. Tehotariffi myös osaltaan hidastaa koko yhteiskunnan sähköistymistä, koska lämpöpumput ja sähköautot kasvattavat usein asiakkaan tehohuippuja. Toisaalta tehotariffi kannustaa asiakkaan oman automaation ja paikallisten ohjausten yleistymiseen sekä olemassa olevan verkkokapasiteetin kustannustehokkaampaan hyödyntämiseen (jos oletetaan asiakkaan tehohuipun korreloivan verkon tehohuipun kanssa), minkä voi nähdä myös edistävän yhteiskunnan sähköistymistä. Myös aktiivisten prosumereiden tehohuiput voivat kasvaa johtuen merkittävän kokoisista aurinkovoimaloista tai kysyntäjoustop ja varastojen hyödyntämisestä hintaohjattuna tai aggregoituna esimerkiksi reservimarkkinoilla. Asiakkaiden oman aurinkovoiman lisääntyessä sekä yksikkökokojen ja mahdollisesti siten myös liittymäkokojen kasvaessa, olisikin perusteltua myös tarkastella tuotannon verkkopalvelumaksun muuttamista nykyisestä Sähkötalouden asettamasta maksimirajasta (0,07 snt/kWh) aidosti aiheuttamisperiaatetta ja kustannusvastaavuutta noudattavaksi. Aurinkovoiman kasvaessa jakeluverkoissa tulisi kulutuksen asettua ajankohtiin, jolloin aurinkoenergiaa on runsaasti saatavilla. Naapurina, joka kuluttaa vieressä olevan aurinkovoimalan ylijäämäsähköä, ei tulisi rangaista tästä kohonneena tehomaksuna, vaan pikemminkin kannustaa tällaiseen käyttäytymiseen. Tämän tyyppisen uuden verkkopalvelumaksurakenteen tarve on tunnistettu mm. TEM:n Energiayhteistyöryhmän loppuraportissa (<https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/164884>) sekä sen taustaksi tehdyssä tutkimusraportissa (<https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-03-2791-0>). Näillä kaikilla on oma arvonsa koko sähköjärjestelmää

tarkasteltaessa. Siksi kokonaisuuden kannalta ei olekaan itsestään selvää, että tehotariffi johtaa kustannustehokkaampaan ratkaisuun, vaan saattaa johtaa pikemminkin osaoptimointiin.

Tehotariffi yksistään on liian yksinkertainen ratkaisu tulevaisuuden monimutkaisiin pullonkaulojen hallinnan tarpeisiin. Tehotariffia tulisi soveltaa ainoastaan ajankohtina, jolloin siirtokapasiteetista on pula. Tähän tarkoitukseen on perinteisesti sovellettu aikatariffia, jolla tasataan päivän ja yön kulutusta jakeluverkossa. Aurinkoenergian yleistymisen myötä myöskään päivä/yö jaottelu ei ole tarpeeksi dynaamista (tarpeenmukaista), vaan ongelma on edelleen samanlainen kuin tehotariffinkin yhteydessä. Jotta siirtotariffeista saataisiin riittävän dynaamisia pullonkaulojen hallinnan tarpeisiin, niin tariffikomponenttien hintaparametreja tulisi kyetä muuttamaan hyvinkin nopeasti. Tällainen järjestelmä olisi hyvin monimutkainen asiakkaiden kannalta ja vaatisi tuekseen täysin automatisoitua sähkönkäytön ohjausta, joka saisi automaattisesti päivitettyt tariffitiedot jakeluverkkoyhtiön järjestelmien kautta. Sopimuksellisesti tällaisella tariffilla täytyisi olla selkeät reunaehdot, joidenka puitteissa dynaamisuutta sovellettaisiin. Yksi mahdollinen ratkaisukeino tähän ongelmaan on Carunan käyttöönotettava käytäntö, jossa asiakas itse voi valita yösähkön aloitusajankohdan.

Asiakkaan kannalta selkeämpi ratkaisu voisi olla verkkopalvelutuote, jossa itse sähkönsiirron tariffiparametrit eivät muutu, mutta asiakas saa ennalta sovitun alennuksen siirtomaksusta, jos hän osallistuu verkkoyhtiön ohjaamana pullonkaulojen hallintaan. Porkkanan tulisi olla kannustava, mutta suhteessa toteutettuun joustotehoon ja -kapasiteettiin. Ohjaus kohdistuisi vain valittuihin asiakkaisiin tarpeenmukaisesti, jolloin välttyttäisiin tarpeettomalta kulutusjouston hyödyntämiseltä (tarpeeton kulutusjouston hyödyntäminen vähentää jouston tarjontaa muilla joustomarkkinoilla ja siten niiden hinnat kasvavat) ja aurinkovoimaan ja aktiivisiin prosumereihin liittyviltä ongelmilta.

Kaikkein radikaalein ehdotus verkkopalvelumaksujen osalta olisi määrittää ne sijainnin tai pikemminkin siirrettävän sähköenergian etäisyyden perusteella. Tällöin sähkönjakelun kustannusvastaavuus voitaisiin saada kaikkein parhaimmalle mahdolliselle tasolle, koska kukin asiakas osallistuisi kustannusten kattamiseen oman sähkönsiirtonsa mukaisesti. Asiakkaan sijainnin sijasta tulisi tarkastella siirron etäisyyttä, kun jakeluverkossa on useita syöttöpisteitä (rengasverkko ja hajautettua tuotantoa). Tämä ratkaisu edellyttää kuitenkin merkittävää periaatteellista muutosta sähkömarkkinalaissa ja siksi sen soveltaminen ei onnistu lähitulevaisuudessa. Kantaverkkotasolla asiaa on kuitenkin Suomessakin selvitetty (Salvi 2022), joten ratkaisuun kohdistuu laajempaakin mielenkiintoa. Jakeluverkkojen kannalta tämä voisi toimia kannustimena haja-asutusalueiden mikroverkkojen syntymiselle, joilla olisi myös positiivisia vaikutuksia kyseisen verkkoalueen toimitusvarmuuden parantamisessa. Toki mikroverkoille voidaan rakentaa myös oma verkkopalvelutuote, erityisesti tilanteissa, joissa mikroverkko on asiakkaiden ja verkkoyhtiön yhteinen intressi.

Jakeluverkkoon kytketyn tuotannon siirtotariffi on nykyisellään hyvin vaatimattoman suuruinen. Etäällä kulutuksesta sijaitsevan tuotantoyksikön tapauksessa tuotannon siirtotariffista saatavat tulot eivät välttämättä kata edes tuotannon siirrosta aiheutuvia häviökustannuksia. Toki tilanne on hyvin erilainen, kun tuotanto on lähellä kulutusta. Ylijäämäisen tuotannon takia tehonsiirron suunta jakeluverkossa voi kuitenkin kääntyä kohti sähköasemaa sekä yksittäisessä pienjänniteverkossa, mutta myös koko keskijänniteverkossa. Tällöin jakeluverkon pullonkaula syntyy joko jännitteen noususta tai jännitteen laadusta kuten jännitteen nopeasta muutoksesta. Yksi keino pullonkaulojen hallinnan kehittämiseksi olisi miettiä myös tuotannon verkkopalvelumaksurakenteita, jotta ne olisivat kustannusvastaavampia ja kannustaisivat ratkaisuihin, joilla pullonkaulatilanteet voitaisiin välttää. Esimerkiksi kiinteistöille, joissa on selkeästi ylimitoitettu aurinkovoimala kulutukseen nähden, voitaisiin soveltaa korkeampaa tuotannon verkkopalvelumaksua kuin kiinteistöissä, jotka syöttävän hyvin harvoin ylijäämäsähköä verkkoon. Tässä yhteydessä on syytä huomata, että jakeluverkko ei ole siinä mielessä

symmetrinen, että siihen voi tehona liittää suuremman kulutuksen kuin tuotannon ilman pullonkaulaongelmaa.

### Liittymäsopimukset

Luonnollisesti samantapaiset ajatukset kuin siirtotariffeissakin toimivat myös liittymäsopimusten osalta. Liittymien hinnoittelussa sovellettu vyöhykeperiaate toimii, kun liittyjät ovat keskenään samantapaisia. Liittymäsopimuksessa voidaan sopia liittymän takana olevien laitteiden ohjauksesta. Ennen sähkömarkkinan vapautumista tällaisia sopimuksia oli laajasti käytössä, vaikka niitä sovellettiin lähinnä sähköyhtiön sähköhankinnan kustannusten alentamiseksi, voitaisiin samaa periaatetta soveltaa myös verkon pullonkaulojen hallintaan. Ohjaukseen voitaisiin kohdistaa pullonkaulan takana oleviin ohjattaviin liittymiin. Sopimukseen voisi kuulua myös ehto, että verkkoyhtiön on ilmoitettava riittävien ajoissa, aikooko se hyödyntää pullonkaulojen ohjausta. Jos verkkoyhtiöllä ei ole tarvetta joustolle, voisivat asiakkaat ja heidän mahdolliset aggregaattorit hyödyntää jouston johonkin muuhun käyttötarkoitukseen. Hinnoittelu voisi perustua liittymän kuukausimaksun alennukseen (erityinen siirtotariffi ko. asiakkaille) tai ennalta sovitun suuruiseen korvaukseen toteutuneesta jouston aktivoinnista. Jälkimmäisessä verkkoyhtiölle jäisi riski siitä, ettei aktivointia tapahdukaan halutun suuruisena, mutta myös kustannukset olisivat maltillisemmat, koska niitä kertyisi ainoastaan pullonkaulatilanteiden aikana.

Liittymissopimuksessa voitaisiin sopia myös dynaamisesta liittymäkapasiteetista. Ero edelliseen on, että riski normaalia alemmasta liittymätehosta on kokonaisuudessaan asiakkaalla. Tällaisia sopimuksia voitaisiin soveltaa väliaikaisesti liitettäessä erittäin suuria asiakkaita (tuuli- tai aurinkopuisto, sähkökattila, teollisuuskokoluokan lämpöpumput ja elektrolyysilaitokset) esimerkiksi suurjännitteiseen jakeluverkkoon. Ajatuksena tällaisissa sopimuksissa on, että verkkoinvestointien pitkien viiveiden takia, asiakkaalla voi olla intressi liittyä verkkoon mahdollisimman nopeasti, eikä hän joudu odottamaan verkkoinvestoinnin valmistumista. Tässä tapauksessa olemassa olevan verkon kapasiteettia hyödynnetään maksimaalisella tavalla aina kuin se suinkin on mahdollista. Useissa tapauksissa varsinainen pullonkaula saattaa olla esimerkiksi kantaverkon muuntokapasiteetissa. Käyttövarmuuskriteereitten takia kantaverkon muuntokapasiteetin taakse ei voida kytkeä muuntajien nimellistehojen verran kuormaa tai tuotantoa, vaan sähkönsyötön tulee pystyä jatkumaan keskeytyksettä myös muuntajan huollon tai vikaantumisen yhteydessä. Ajoittaisen kuormituksen tai tuotannon leikkauksen avulla huolehditaan, ettei kulloinkin käytettävissä olevaan siirtokapasiteettia ylitetä. Tuuli- ja aurinkopuistojen liittymissä tällainen periaate saattaa olla mielekäs koko puiston eliniän ajan, koska vahvistetun liittymän lisäkustannus saattaa olla merkittävän suuri kasvaneen siirtokapasiteetin hyötyihin nähden. Tuuli- ja aurinkopuistojen liittymisjohdon käyttöaste jää tyypillisesti hyvin alhaiseksi (tuulivoiman huipunkäyttöaika noin 3000-3600 h/a, aurinkovoimalle 1500 h/a ja yhdistetylle tuuli- ja aurinkovoimapuistolle 4000-5500 h/a riippuen tuotantokapasiteettien suhteista) Nimellinen tuotantoteho voidaan myös yllimitoittaa liittymisjohdon kapasiteettiin nähden, mikä kasvattaa johdon käyttöastetta, mutta parantaa silti tuotantoyksikön kannattavuutta, koska liittymisjohdon kustannus voi olla merkittävä kustannuserä puiston kokonaiskustannuksista. Englannin kielellä tällaisista liittymistä käytetään nimitystä "non-firm connection contract" ja tuotannon mitoitusperiaatteesta "overplanting".

Suomessa Fingrid on tietävästi soveltanut tällaisia sopimuksia joidenkin tuulipuistojen liittymiin. Kulutuksen puolella Caruna:lla on kahdenvälinen sopimus Fortumin kanssa sähkökattilan ohjauksesta Espoossa (<https://www.fortum.fi/media/2022/06/fortum-toteuttaa-carunan-kanssa-taysin-uudenlaisen-sahkokattilakonseptin-kotimaiseen-kaukolammontuotantoon>). Helsingin sähköverkko suunnittelee vastaavanlaista sopimusta Helen:n sähkökattiloiden liittämiseksi. Suurten tuotantoyksiköiden ja kulutuskohteiden osalta liittymän rajoituksen voidaan viestittää SCADA-tason viesteillä. Jos samaa liittymäperiaatetta halutaan soveltaa pienemmille asiakkaille, niin ohjaukset on rakennettava osaksi

verkkoyhtiön keskijänniteverkon automaatiota (mahdollisia toteutusvaihtoehtoja: verkostoautomaatio pohjautuen perinteiseen SCADA:aan ja älymittareihin, tai asiakasliittymiin laajennettu muuntamoautomaatio) tai joissain tapauksissa osaksi hajautettujen energiaressurssien automaatiota. Yksinkertaisin mahdollinen toteutus hajautetun tuotannon tapauksessa, kun pullonkaula syntyy jännitteen noususta, olisi jännitereleen lisääminen tuotantoyksikköön sopivalla asetteluarvolla. Invertteriohjatuisia tuotantoyksiköissä on myös sisäänrakennettuna useimmiten P(U)-säätökäyrä, jolla voidaan rajoittaa tuotantoyksikön tuotantoa jännitteen noustessa, mitä kautta jännitteen nousu taittuu. Pullonkaulan johtuessa virrasta on tilanne yleensä monimutkaisempi, koska hajautettu energiaressurssi ei voi päättellä verkon tilaa omien mittaustensa perusteella. Tällöin verkkoyhtiön automaatiojärjestelmän on välitettävä ohjaukaskäsky ohjattavalle resurssille tai välitettävä sille tarvittavat tiedot verkosta päätteilyn toteuttamiseksi hajautetun energiaressurssin tasolla. Suurjännitteisessä jakeluverkossa ohjaukset voitaisiin välittää SCADA:n välityksellä (Kulmala 2017), mutta esimerkiksi pienjänniteverkon asiakkaiden osalta tällainen ratkaisu on todennäköisesti liian kallis, jolloin ratkaisuna voisi toimia reunalaskentaan perustuva muuntamoautomaatoratkaisu.

### Paikallinen joustomarkkina

Paikallisella joustomarkkinalla tarkoitetaan tässä yhteydessä markkinapaikkaa, jossa voidaan käydä kauppaa sijaintiin perustuvilla joustotuotteilla. Markkinapaikka on usein monen toimijan (esimerkiksi kaikki verkkoyhtiöt) hyödynnettävissä, millä pyritään alentamaan kaupankäynnin kustannuksia ja kasvattamaan markkinan likviditeettiä. Jouston tarjoajia ovat tyypillisesti aggregaattorit, johtuen kaupankäynnin monimutkaisuudesta.

Kaupallisesti toimivia joustomarkkinoita on Euroopassa joitakin. Ehkä tunnetuin niistä on PicloFlex, joka toimii tällä hetkellä Iso-Britanniassa. PicloFlex perustuu pitkäaikaisiin kahdenvälisiin ehdollisiin joustosopimuksiin. Siinä verkkoyhtiö avaa tarjouskaupan tietylle verkkoalueelle sovitulle ajanjaksolle (yleensä vuosia). Ehdollisuus tarkoittaa sitä, että verkkoyhtiön tulee ilmoittaa etukäteen, jos se aikoo hyödyntää sopimukseen kuuluvaa joustoa. Jos näin ei tehdä, voi jousto osallistua muille joustomarkkinoille täysin vapaasti.

Toista ääripäätä paikallisen joustomarkkinan toteutuksesta edustaa ETPA (Hollannin Intra-day markkina), jossa joustotarjoukset jätetään päivän sisäiselle markkinalle varustettuna sijaintitiedolla. Jos sijaintitietoa ei ole, on tarjous normaali intra-day tarjous, ja toisaalta kuka tahansa intra-day kauppaa käyvä taho voi hyödyntää myös sijaintitiedolla varustetun tarjouksen. Tällä tavoin joustotarjoukset ovat laajan ostajakunnan hyödynnettävissä, mikä lisää merkittävästi markkinan likviditeettiä. INTERFACE-projektissa toteutettiin vastaavalla idealla demonstraatiot, missä sijainnilla varustettuja joustotarjouksia pystyi jättämään sekä Nordpoolin intra-day markkinalle, että Fingridin säätösähkömarkkinalle (INTERFACE 2022).

Pohjoismainen Nodes perustuu kokonaan toisenlaiseen filosofiaan joustotarjousten osalta. Nodes ei ole markkinapaikka, vaan se on pikemminkin koordinaatioalusta jouston yhdistämiseksi niille markkinoille mihin sen ominaisuudet riittävät. Nodesissa jousto kuvataan attribuuttien avulla, minkä jälkeen Nodes yhdistää sen eri markkinoille.

Paikallisen joustomarkkinan hyödyntämiseksi jakeluverkossa, tulisi markkinalikviditeetin ongelma onnistua ratkaisemaan. Tällä tarkoitetaan markkinan houkuttelevuutta, jotta tarjouksia on riittävästi tarpeeseen nähden. Koska jakeluverkon pullonkaulat ovat hyvin ajoittaisia, ei pelkästään yhden jakeluverkkoyhtiön käytössä olevassa paikallisessa joustomarkkinassa ole riittävästi houkuttelevuutta tarjoajien kannalta. Saman jouston voi tarjota monelle muullekin markkinalle tai hyödyntää asiakkaan sisäisiin tarpeisiin, jolloin väistämättä jouston hinta nousee tällaisella markkinapaikalla aina hyvin suureksi. Jotta järkevästi hinnoiteltuja joustoja saadaan riittävästi paikalliselle joustomarkkinalle, täytyy

samaa markkinaa pystyä hyödyntämään useat ostajat, sama tarjous tulee koordinoitusti pystyä jättämään usealle markkinapaikalle, ja esimerkiksi liittymäsopimuksin velvoittamaan erityiset asiakkaat (non-firm liittymäasiakkaat) jättämään tarjouksia markkinalle ennalta ilmoitetuissa pullonkaulatilan-teissa.

### Jakeluverkon jännitteen säätö

Kuten aikaisemmin on jo todettu, niin hajautetun tuotannon osalta pullonkaulat syntyvät erityisesti haja-asutusalueen verkoissa jännitteenoususta. Kaikkein yksinkertaisin tapa ratkaista tämä pullonkaula on lisätä tuotannon liittymisehtoihin vaatimus voimalan loistehokapasiteetista, kyvystä säätää sitä valituissa rajoissa myös nimellisteholla, ja velvoite osallistua jännitteen primäärisäätöön droop-säädön kautta. Erityisesti invertterikytketyissä voimaloissa tällainen ratkaisu on tavanomainen globaalisti. Sama vaatimus voitaisiin asettaa myös muille invertterikytketyille laitteille kuten useimmille lämpöpumpuille, sähköautoille ja akuille, jolloin jännitteensäätö parantaa verkon siirtokykyä myös jännitteenalenemien suhteen. Inverttereiden jännitteensäätökykyä voitaisiin tekniseltä kannalta hyödyntää, vaikkei invertteri tuottaisi tai kuluttaisikaan pätötehoa. Käytännössä tämä edellyttää usein invertterin säätömoodin vaihtamista, mikä tekee sen hyödyntämisestä käytännön kannalta hieman haasteellisempää.

Vaikka verkkoyhtiön kannalta inverttereiden jännitteensäätö on ihanteellinen ratkaisu, koska se ei edellytä minkäänlaisia investointeja, on asiakkaiden kuitenkin hankittava suurempia inverttereitä, jotta loistehokapasiteettivaatimus täytyy myös invertterin toimiessa nimellispätöteholla. Operatiiviselta kannalta sekä verkkoyhtiön että asiakkaan häviöt kasvavat, koska loistehon siirto aiheuttaa myös pätötehohäviöitä. Jännitteenousun rajoittamiseksi invertterit kuluttavat loistehoa, jolloin se täytyy siirtää verkon kautta. Keski-jännitekaapeliverkot toimivat aina aliluonnollisella tehoalueella, jolloin ylimääräistä loistehoa löytyy läheltä, jos keski-jänniteverkko on kaapeloitu. Avojohtoverkon tapauksessa loisteho voi virrata inverttereille aina sähköaseman kondensaattoreista saakka, jolloin siirtoetäisyys voi olla merkittävä. Alijännitteen tapauksessa invertterit tuottavat loistehoa, mikä siirtyy lähimpään loistehokuorman tai muuhun loistehoa kuluttavaan laitteeseen kuten muuntajaan tai ylluonnollisella teholla käyvään avojohtoon. Alijännitteen tukemiseksi loistehon siirtoetäisyys invertteristä muualle ei voi olla kovinkaan pitkä. Kaapeliverkkojen tapauksessa se kuitenkin käytännössä kasvattaa sähköasemalla tarvittavaa reaktoritehoa, vaikka lähin loistehokuorma olisikin aivan naapurissa.

Loistehon siirto varaa myös osan muuntajien ja johtojen siirtokapasiteetista, jolloin huonosti suunniteltu loistehon kompensointi voi aiheuttaa itsessään pullonkaulan esimerkiksi päämuuntajaan. Jotta pullonkaualta vältyttäisiin, tulee kaapeliverkkojen tapauksessa kiinnittää huomiota optimaaliseen reaktorikapasiteetin sijaintiin ja kompensoinnin määrään. Kaapeloidun keski-jänniteverkon tapauksessa keski-jänniteverkko toimii loisteholähteenä, jolloin reaktorin tulisi sijaita sähköaseman keski-jännitepuolella. Joissakin kaupunkiyhtiöissä on myös käytössä 110 kV:n kaapeleita, joissa hyvinkin lyhyissä kaapeleissa syntyy monin verroin enemmän loistehoa kuin koko keski-jänniteverkossa. Tällöin reaktorin tulee sijaita 110 kV:n puolella. Jotta loistehon siirto merkittävässä määrin päämuuntajan läpi voidaan välttää, tulee reaktoreita kyetä ohjaamaan joko välitokytkimen tai käämikytkimen avulla, tai muilla loistehonsäätöön osallistuvilla laitteilla.

Jakeluverkon päämuuntajan käämikytkimen säädössä sovelletaan usein jännitteenaleneman kompensointia, jolla pyritään pienentämään jännitteenaleneman suuruutta, kun muuntajan kuormitus kasvaa. Ilman jännitteenaleneman kompensointia, käämikytkimen jännitteensäätö kompensoi ainoastaan itse muuntajassa tapahtuvan jännitteenaleneman. Jännitteenaleneman kompensoinnilla korotetaan sähköaseman jännitettä normaalia suuremmaksi, jolloin keski-jänniteverkon jännitteenalenema pienenee. Säätö toteutetaan yleensä mittaamalla jännitteen lisäksi muuntajan läpi kulkevaa virtaa ja laskemalla



kompensoinnissa käytettävän impedanssin avulla pilot-pisteen jännitteenalenema. Mittausten ja lasketun jännitteenaleneman avulla voidaan säätää fiktiivisen pilot-pisteen jännitettä sähköaseman kiskojännitteen sijaan. Hajautetun tuotannon vaikutuksesta päämuuntajan virta alenee, jolloin myös jännitteenaleneman kompensointi alenee. Erityisesti tilanteissa missä merkittävä määrä tuotantoa liittyy omalla lähdöllään sähköaseman kiskoon, kokevat muut lähinnä kuormitusta sisältävät lähdöt suuremman jännitteenaleneman. Ongelmaa voidaan kiertää mittaamalla käämikytkimen säädössä päämuuntajan virran sijaan kunkin keskijännitelähdön virrat ja niiden suunnat. Tällöin jännitteenaleneman kompensointi voidaan määrittää lähinnä kuormitusta sisältävien lähtöjen perusteella, jos tuotantolähdön jännitteennousu ei rajoita jännitteen nostoa sähköasemalla.

Käämikytkinsäädön jännitteenaleneman kompensointi kasvattaa jakeluverkon siirtokykyä jännitteenaleneman suhteen, mutta jännitteennousun suhteen se heikentää siirtokykyä. Tämän takia perinteistä jännitteenaleneman kompensointia on kehitetty edelleen, jotta hajautetun tuotannon vaikutuksesta tapahtuva siirtosuunnan muutos huomioitaisiin oikein käämikytkimen säädössä. Kun päämuuntajan läpi kulkeva virta voi virrata kumpaan tahansa suuntaan, valitaan jännitteen kompensointisuunta virran suunnan perusteella. Jos virtaussuunta on kohti keskijänniteverkkoa, kompensoidaan jännitteenalenemaa kuin edelläkin. Jos taas siirtosuunta on kohti suurjänniteverkkoa, niin kompensoinnin avulla pienennetään keskijänniteverkon jännitetasoa jännitteennousun kompensoinnin avulla, mikä toimii vastaavalla tavalla kuin jännitteenalenemankin kompensointi. Tällä tavoin voidaan hillitä keskijänniteverkon jännitteennousua ja siten parantaa jakeluverkon siirtokykyä myös hajautetun tuotannon suhteen.

Perinteisesti jakelumuuntajissa on sovellettu väliottokytkimiä jännitetason hallitsemiseksi pienjänniteverkoissa. Pelkästään kuormitusta sisältävissä verkoissa tämä onkin ollut riittävä toiminto. Hajautetun tuotannon yleistymisen myötä, väliottokytkimen jännitettä korottava vaikutus heikentää verkon siirtokykyä hajautetun tuotannon kannalta. Ongelmasta pääsee toki eroon muuttamalla väliottokytkimen asentoa ja siten pienentämällä jännitettä pienjänniteverkon puolella. Koska väliottokytkimen asentomuutos edellyttää jännitteettömyyttä, ei asentomuutosta haluta tehdä kovin usein. Luonnollisesti muutostyöstä aiheutuu myös muita kuluja. Sopiva väliottokytkimen asento voikin tulevaisuudessa olla neutraali asento, jolloin jännitettä ei koroteta eikä alenneta. Koska pienjänniteverkossa voi talvella suuren kuormituksen aikaan olla merkittävä jännitteenalenema ja vastaavasti kesällä aurinkovoiman vaikutuksesta merkittävä jännitteen nousu, tarvitaan ongelman ratkaisemiseksi käämikytkin, jotta jännitettä voidaan tukea tai alentaa tarpeen mukaan. Samalla koko  $\pm 10\%$ :n sallittu jännitteen vaihteluväli tulee hyödynnettäväksi pienjänniteverkossa, koska keskijänniteverkon ja jakelumuuntajan vaikutus voidaan säätää pois. Jos jakelumuuntajan käämikytkimet asennetaan kaikkiin keskijänniteverkon jakelumuuntajiin, niin tällöin myös keskijänniteverkon jännitteen voidaan sallia vaihdella nykyistä laajemmalla vaihteluvälillä. Näiden molempien tekijöiden ansiosta, voidaan sekä keski- että pienjänniteverkkojen siirtokapasiteettia kasvattaa. Tällä hetkellä jakelumuuntajan käämikytkin on kuitenkin suhteellisen kallis komponentti, joten sen käyttö rajoittuu erikoistapauksiin.

Edellä kuvattujen jännitteen primäärisäätöratkaisujen lisäksi voidaan jännitteen toisosäädöllä kasvattaa erittäin merkittävästi jakeluverkon siirtokapasiteettia. Jännitteennousun rajoittamisissa esimerkitapauksissa toisosäädöllä on simulointien avulla pystytty osoittamaan 3-4 kertaista siirtokapasiteetin kasvua (Kulmala 2014, Supponen 2017). Toisosäätö perustuu ajatukseen, että jännitettä hallitaan koko jakeluverkon osalta yksittäisten pisteiden sijaan. Toisosäätö edellyttää, että joko mittauksia on riittävän kattavasti käytettävissä tai verkon tilaestimointiin voidaan luottaa. Tilaestimoinnin tarkkuutta saadaan parannettua lisäämällä mittauksia keskijänniteverkon strategisesti merkittäviin pisteisiin, kuten suurivirtaisiin haarautumispisteisiin tai jakelumuuntajiin. Myös pienjänniteverkon jännitteenmittauksilla, jos ne ovat riittävän tarkkoja, on voitu osoittaa olevan tilaestimointia parantava



vaikutus. Lisäksi tilaestimoinnin soveltamia pseudomittauksia voidaan merkittävästi parantaa päivittämällä ja uudelleenklusteroimalla kuormituskäyrät älymittareiden datojen pohjalta (Mutanen 2018). Tilaestimoinnin avulla määritetään verkon käyttötila koko verkkoalueella (tyypillisesti esimerkiksi koko keskijänniteverkossa) ja siten se muodostaa lähtökohdan jännitteen toisosäädölle.

Jännitteen toisosäätö pyrkii optimoimaan koko verkon käyttötilan tavoitefunktio määräämällä tavalla annettujen reunaehtojen puitteissa. Tyypillisesti minimoidaan esimerkiksi verkon häviöitä, tuotannon leikkausta (oletuksena, että tuotantoyksiköt irtikytketyvät tai leikkaavat tuotantotehoaan liian suuren jännitteen seurauksena), jännitteen vaihtelua nimellisjännitteestä ja käämikytkimen askellusten lukumäärää huoltokustannusten alentamiseksi. Reunaehtoina toimivat verkon ja säätävien laitteiden tekniset rajoitteet. Perinteisin ratkaisu jännitteen toisosäädön toteuttamiseksi on SCADA/DMS pohjainen toteutus (Kulmala 2014, Kuovi 2015). Hajautetun tuotannon lukumäärän kasvaessa ja tehojen pientyessä keskitetty ratkaisu ei ole luontevin kalliista asiakkaille aiheutuvista integrointikustannuksista ja verkkoyhtiöille aiheutuvista skaalaukustannuksista johtuen, joten reunalaskentaan perustuva sähköasema- ja muuntamoautomaation laajennusta on tutkittu ja demonstroitu useissa projekteissa (Kulmala 2017, Ruuth 2021).

### Jakeluverkon virran hallinta

Jännitteen ohella verkon kuormitettavuutta rajoittaa myös virta. Virran hallintaan ei ole olemassa säteittäisessä jakeluverkossa kovinkaan monia laitetason ratkaisuja. Ehkä hyvänä poikkeuksena tästä ovat pienjänniteverkkoon tarkoitettut vinokuormaa korjaavat laitteet, jotka tyypillisesti ovat erilaisia muuntajakytkentöjä tai tehoelektroniikkaan perustuvia laitteita. Tasaamalla vaihevirtoja saadaan pienjänniteverkkoon lisää kuormitettavuutta ja samalla myös tyypillisesti jännitteen laatu paranee.

Virranhallinnan osalta haasteena on, että ylikuormittuminen voi periaatteessa tapahtua missä päin verkkoa hyvänsä suhteessa ohjattaviin resursseihin, jolloin yksittäisen resurssin mittausten perusteella ei voida päätellä miten ohjattavan resurssia tulisi ohjata, jotta ylikuormittuminen voitaisiin välttää. Samoin verkon eri osat tyypillisesti saavuttavat tehohuippunsa eriaikaisesti, jolloin yksinkertaiset aikaohjaukseen perustuvat ratkaisut eivät ole riittävän tehokkaita toimenpiteitä. Esimerkiksi yksittäisen asiakkaan tehohuipun leikkaus ei välttämättä paranna jakelumuuntajan kuormitettavuutta, jos kyseisen asiakkaan tehohuippu ajoittuu eri ajankohtaan kuin jakelumuuntajan tehohuippu. Lisäksi tulevaisuudessa voi olla tarve myös strategisesti kasvattaa kuormituksia, jotta voidaan hallita myös verkko syötetyn tuotantotehon virtoja.

Tämän takia luontevin tapa toteuttaa ylikuormittumisen hallinta olisi sen toteuttaminen SCADA/DMS-sovelluksena perustuen tilaestimoinnin antamaan kokonaiskuvaan jakeluverkosta. Tehovirtausten hallitsemiseksi perinteisin keino on ollut keskijänniteverkon ja miksei myös pienjänniteverkon kytkentätilan muuttaminen siten, että ylikuormittumista ei tapahdu. Keskijänniteverkon osalta tämä voidaan ainakin osittain toteuttaa kauko-ohjattavien erottimien avulla, jolloin kytkentätilan muutoksesta aiheutuvia kuluja voidaan alentaa. Kytkentätilan lisäksi tehonvirtauksia voitaisiin hallita myös verkkoyhtiön omilla varavoimailaitteilla (siirrettävät varavoimakoneet ja –akut), jotka olisivat sijoitettu strategisesti kriittisiin paikkoihin. Esimerkiksi sähköasemalle sijoitettu varavoimalaite voisi tukea yhden päämuuntajan sähköasemaa sen huollon aikaisessa varasyöttötilanteessa. Varavoimailaitteen tehoa hallittaisiin SCADA/DMS-järjestelmän avulla perustuen ylikuormittuvan verkonosan (esim. varasyöttöyhteyden) virran perusteella. Sama logiikka toimii myös keskijännite- tai jopa pienjänniteverkon varasyöttötilanteissa. Mitä syvemmälle jakeluverkkoon mennään, mitä enemmän ohjattavia resursseja on mukana ja mitä useammin ylikuormittumista tapahtuu, niin sitä todennäköisemmin päätöksenteon hajauttaminen sähköasema- ja muuntamoautomaation tehtäviksi tulisi mielekkäämmäksi kuin keskitetty SCADA/DMS-järjestelmä. Verkkoyhtiön omien varavoimailaitteiden lisäksi ohjattavina

resursseina voivat toimia kahdenvälisiin sopimuksiin tai paikalliseen joustomarkkinaan perustuvat joustopalvelut (tehonohjaus, kuormanpudotus, tehohuipun leikkaus). Fyysisinä resursseina voisivat toimia aggregaattoreiden akut, sähköautojen latauskentät, suuret lämmitys- ja jäähdytyskuormat, energiayhteisöjen ja mikroverkkojen joustoresurssit, jne.

Saksassa on myös käytössä hajautetun tuotannon tehonalennusjärjestelmä, jolla alennetaan tuotantotehoa verkon pullonkaulatilanteissa. Ohjauslaite on pakollinen kaikille yli 30 kW:n laitteille ja tehonalennus kohdistuu kaikkiin tuotantoyksiköihin valitulla verkkoalueella suhteessa niiden nimellistehoihin (VDE 2018a, VDE 2018b). Kommunikaatio ohjauslaitteen kanssa on toteutettu matalataajuisten sähköverkkotiedonsiirron (ripple control) avulla, jolla voidaan toteuttaa broadcast tyyppinen viestintä sähköasemalta kaikkien kyseisen sähköaseman alla olevien ohjauslaitteiden kanssa. Viestin sisältö kertoo ohjauslaitteelle mitä sen kuuluu tehdä (tehonalennuksen suuruus tai paluu normaalitilanteeseen). Samaa ohjauslogiikkaa voidaan hyödyntää myös kuorman irtikytkennässä tai monipuolisempaan joustoresurssien teho-ohjauksena hyödyntäen esimerkiksi aurinkovoiman, akkujen, sähköautojen latureiden ja lämpöpumppujen inverttereiden tehon asettelumahdollisuutta. Oleellinen haaste tällaisissa laajavaikutteisessa ohjausjärjestelmässä on tietoturva huolehtimisessa koko järjestelmän eliniän aikana. Sähköverkkotiedonsiirron osalta hyökkäjä on suhteellisen helppo manipuloida viestejä sekä fyysisellä kommunikaation että loogisella tiedonvaihdon tasoilla. Laitteiden ja ohjelmistojen moninaisuus aiheuttaa myös yhteensopivuushaasteen, joka on kyllä hyvällä määrittelytyöllä ja testauskäytännöillä ratkaistavissa.

Lähes kaikkia asiakkaita koskevan pakollisen tehonohjausjärjestelmän käyttäminen tulisi rajoittaa ainoastaan poikkeustilanteisiin. Tällaisia poikkeustilanteita ovat esimerkiksi Fingridin asettama tehopulatilanne ja siitä mahdollisesti seuraavat ohjaustoimenpiteet. Laajamittaista tehonohjausjärjestelmää voitaisiin hyvin rajatuissa tilanteissa soveltaa myös muihin poikkeustilanteisiin. Paikallisten pullonkaulatilanteitten takia, poikkeustilanne voi syntyä esimerkiksi silloin kun verkkoyhtiön omat varautumistoimenpiteet ja joustomarkkinoiden tarjoamat joustomahdollisuudet eivät ole riittäviä pullonkaulatilanteen hallitsemiseksi. Luonnollisesti tällaista kapasiteettipulatilannetta ei saisi syntyä kovin usein, mutta aktiivisen verkonhallinnan vararatkaisuna (emergency measure) tällainen on syytä olla olemassa. Tehonohjauksen vaihtoehtonahan on valikoitujen asiakkaiden tai verkonosan irtikytkentä, mistä aiheutuu suurempaa haittaa ja lisäksi se kohdistuu epätasa-arvoisesti asiakkaisiin.

### Jakeluverkon kommunikoiva suojaus

Kommunikoivan suojauksen avulla voidaan toteuttaa hallintaratkaisuja, jotka vaativat välitöntä reagointia, joissa SCADA/DMS ja muut perinteiset automaatiototeutukset ovat liian hitaita. Esimerkkejä tilanteista, joissa vaaditaan välitöntä reagointia ovat esimerkiksi suurjännitteiseen jakeluverkkoon kytkettyjen tuuli- ja aurinkopuistojen eroonkytkentäsuojauksen ja fault ride through –vaatimuksen täyttäminen. Näiden kahden vaatimuksen välillä on ristiriita eroonkytkentäsuojauksen pyrkiessä irtikytkemään voimalan mahdollisimman nopeasti mahdollisen tahattoman saarekekäytön aika, ja toisaalta fault ride through edellyttää, että voimala tukee sähköjärjestelmää sen stabiiliuden säilyttämiseksi. Kantaverkon viassa, missä voimala ei saisi irtikytkettyä jakeluverkosta, voimala näkee erittäin syvän jännitekuopan ja taajuuden muutosnopeuden, mitkä eroonkytkentäsuojauksen kannalta näyttävät samanlaisilta myös tahattoman saarekekäytön aikana. Sähköasemalla suojareleet voivat kuitenkin päätellä, että vika on kantaverkossa eikä jakeluverkossa, jolloin voimalalle voidaan lähettää block-viesti ja siten estää voimalan eroonkytkentä. Vastaavasti, jos vika on jakeluverkon puolella voimalaa syöttävällä lähdöllä, niin voimalalle voidaan lähettää trip-viesti, jolloin eroonkytkentää saadaan nopeatuettua eikä voimala jää syöttämään yksin muita lähdölle kytkettyjä asiakkaita.

## Ajantasaisempi ja kattavampi tilanvalvonta

Jakeluverkon tilanvalvonta on useimpien edellä kuvattujen ratkaisuiden taustalla. Tilanvalvontaa itsessään voidaan kehittää kattavammaksi lisäämällä enemmän mittalaitteita, mitattavia suureita voidaan monipuolistaa, ja mittausten resoluutiota ja päivitysväliä voidaan tarkentaa. Kaikista näistä luonnollisesti aiheutuu kustannuksia, joille olisi löydettävä perusteet verkonhallinnan kehittämisen osalta. Haasteeseen sisältyy dilemma, että ilman dataa hyviäkään hankkeita ei voida perustella, mutta toisaalta tarpeettoman datan kerääminen ei lisää tietoa verkosta vaan aiheuttaa ainoastaan tuskaa sitä hallinnoivien osalta. Data-analyysin avulla on kuitenkin tehtävissä päätelmiä, joita ei perinteisessä tilanvalvonnassa huomioida. Tämä edellyttää kuitenkin laajaa ja monipuolista data-aineistoa ja uudenlaisia työkaluja ja osaamista datan käsittelyssä, yhdistelemisessä ja analyysissä. Data-analyysin tekemiseksi datasta itsestään tulee strategisesti merkittävä tuotannonväline, joten sen omistajuus on oleellista varmistaa varsinkin palveluiden ulkoistamisen ja erilaisen software-as-a-service tyyppisten palvelukonseptien yhteydessä.

Esimerkkeinä tilanvalvonnan laajentamisesta on tilaestimoinnin ulottaminen pienjänniteverkkoon saakka. Pienjänniteverkosta on nykyisin saatavissa huomattavasti vähemmän reaaliaikaisia mittauksia kuin keskijänniteverkosta, mutta älymittareiden soveltaminen luo merkittävän potentiaalin toteuttaa riittävän tarkka tilaestimointi sekä tarkentamalla pseudomittauksia että hyödyntämällä älymittaria reaaliaikamittauksiin. Tällöin myös pienjänniteverkon tilaa voitaisiin valvoa reaaliaikaisesti ja sen pohjalta olisi tehtävissä verkonhallinnan päätöksiä automaattisesti. Autonominen päätöksenteko pienjänniteverkkojen osalta on erittäin tärkeää, koska näitä kohteita on aivan liian paljon operaattoreiden päätöksenteon kannalta. Lisäksi tulevaisuudessa monet muutostekijät kohdistuvat nimenomaan pienjänniteverkkoihin.

Tilaestimointi on yleinen systeemiteoriassa sovellettu menetelmä, joten sitä voidaan soveltaa minkä tahansa järjestelmän analysointiin. Siten sitä voitaisiin soveltaa myös virtojen ja jännitteiden estimoinnin lisäksi muiden sähköverkon kriittisten suureiden estimointiin kuten komponenttien lämpenemän, jännitteen laadun tai muiden poikkeamatilanteiden arviointiin. Erilaisilla koneoppimisen keinoilla voidaan myös rakentaa tilaestimointi, joka päättelee itse sähköverkon rakenteen mittausten pohjalta. Tällöin tilaestimoinnin lähtötietoina ei enää tarvittaisikaan verkkomallia, vaan se pääteltäisiin datan pohjalta, mikä avaa erittäin merkittäviä mahdollisuuksia hajauttaa päätöksentekoa verkkoyhtiön valvomon ulkopuolisiin automaatiojärjestelmiin. Tällä tavoin esimerkiksi muuntamoautomaatio tai energiyhteisö voisi päätöksenteossaan ottaa huomioon verkon tilan ilman, että verkkomallia tarvitsee välittää kyseisille tahoille. Vastaavasti mittauksista ja esimerkiksi tiedonvaihdon lokitiedoista voidaan päätellä, onko automaatiojärjestelmään tunkeuduttu. Laajamittaisesta datasta voidaan pyrkiä löytämään hälytysten taustalla olevat juurisyyt ja siten tarjoamaan jalostetumpaa tietoa operaattorille pelkkien hälytystietojen sijaan. Parhaimmillaan tällainen päättely voisi tarjota myös ratkaisuehdotuksia, kuten automaattisen vianhallintatoiminnon (FLISR-toiminnon) osalta jo DMS:ssä tehdäänkin.

Eriytyinen kohde, jossa lämpenemän reaaliaikaiseen valvontaan on kehitetty lukuisia kaupallisia tuotteita, on suurjännitteisten (110 kV ja 400 kV) avojohtojen dynaamisen kuormitettavuuden ratkaisu (dynamic line rating). Dynaamisen kuormitettavuuden perusidea on hyödyntää johtimen kuormitettavuus vallitsevan tilanteen mukaisesti, jolloin hyvissä jäähdytyolosuhteissa johtimen virran voidaan sallia nousta reilusti yli nimellisvirran vaarantamatta itse johdon elinikää tai luomatta vaaratilannetta johtimen alla oleville henkilöille tai kohteille. Vastaavasti huonoissa jäähdytyolosuhteissa tai ulkolämpötilan ollessa nimellislämpötilan yläpuolella, voidaan johdon virtaa rajoittaa. Lisäksi johdinta voidaan lyhytaikaisesti ylikuormittaa, koska lämpöaikavakio on useita kymmeniä minutteja. Ratkaisu on erityisen kiinnostava erityisesti tuulivoimaa sisältävissä verkoissa. Ratkaisuteknologioita on useita erilaisia, mutta pohjimmiltaan ne kaikki pyrkivät mallintamaan mikä on johdon lämpötila ja siitä seuraava

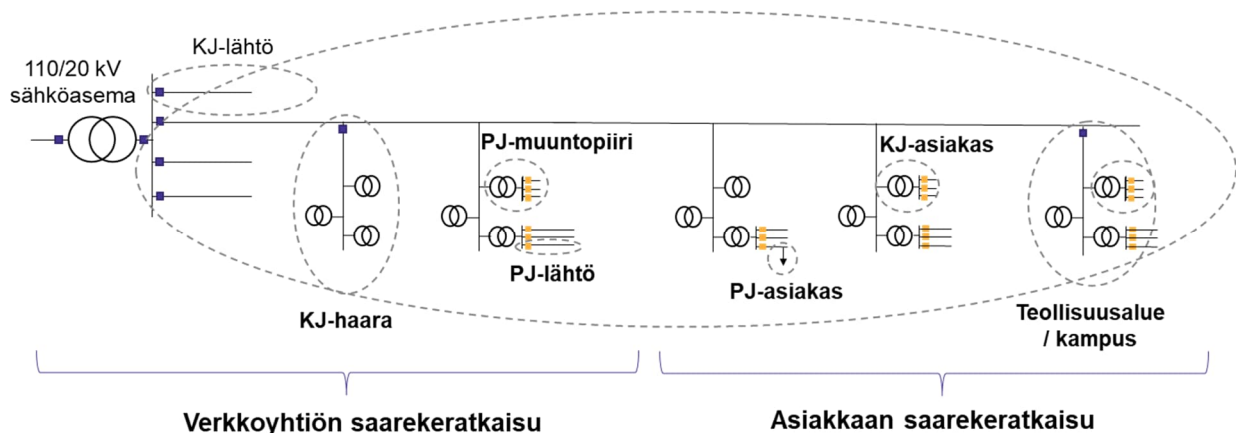
riippuma. Johtimen lämpötilaan vaikuttaa virran lisäksi ulkoiset tekijät kuten ulkolämpötila ja johtimeen kohdistuva jäädyttävä tuuli. Tuulen merkitys jäädytykselle on merkittävämpi kuin ulkolämpötila. Vastaavaa ratkaisua voitaisiin soveltaa myös kaapeleille ja muuntajille.

Internet of Things (IoT) ajattelun mukaisesti kommunikoivia ja edullisia sensoreita olisi kaikkialla ja data olisi hyödynnettävissä pilvipalveluiden kautta. Esimerkiksi jakeluverkon kunnon- ja laadunvalvonnan tarpeisiin lisättävät sensorit eivät välttämättä ole tällaisia vaan tuhansia euroja maksavia laitteita, joissa itsessään on myös datan tallennus- ja analysointimahdollisuuksia. Kustannuksia nostaa myös vaatimus datan luotettavuudesta, kun väärä kuntotietohälytys saattaa myös olla kustannuksiltaan hyvin haitallinen. Toinen haaste sensoreiden osalta on ollut niiden hyvin lyhyt elinikä johtuen paristoihin perustuvasta energoinnista.

## 3.2 Toimitusvarmuusjousto

### Saarekeverkkoratkaisut

Yksi mahdollisuus parantaa asiakkaan kokemaa sähkön jakeluverkon toimitusvarmuutta perinteisten verkkoinvestointien, erityisesti maakaapeloinnin, sijasta tai rinnalla on erilaiset paikalliset saarekeverkkoratkaisut. Saarekeverkosta voidaan käyttää myös nimitystä mikroverkko, joka muodostuu mikroverkossa olevista tuotantoresursseista ja kuormista sekä mahdollisista energiavarastoista. 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 syöttävän verkon vikatilanteessa. Saareke voi olla osa jakeluverkkoyhtiön verkkoa tai verkkoyhtiön asiakkaan liittymän takana toimiva kokonaisuus. Kuvassa 2 on esitetty erilaisia vaihtoehtoisia saarekeverkkoratkaisuja.



Kuva 2. 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 saarekekäyttökyvykkyyttä, jota on kartoitettu laajalla kyselyllä Sähkö tutkimuspoolin ja STEK:n rahoittamassa Sähkönjakeluverkon saarekekäyttöratkaisut -projektissa (Leppänen 2023). 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 ollenkaan, koska varavoimakoneella on minimiteho, jonka alapuolella sen toiminta ei ole mahdollista. Tilanteesta tulee tehonhallinnan lisäksi ongelmallinen myös vikavirransyötön näkökulmasta. Jotta saarekekäyttö julkisessa jakeluverkossa 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 irtikytkeä 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. Ylituotantotilanteissa 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 pitkäaikaisilla 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.

Sähkötutkimuspoolin ja STEK ry:n rahoittamassa Sähköjakeluverkon saarekekäyttöratkaisut -projektissa toteutettiin laaja kysely saarekekäyttöistä jakeluverkkoyhtiöille ja asiakkaille, joista erityisesti maataloilta saatiin runsaasti vastauksia. Kyselyn tulokset julkaistaan syyskuussa valmistumassa Kukka Leppäsen diplomityössä. Lähes 90 % vastanneilla maataloilla oli erilaisia varavoimalaitteistoja, joita tietyissä tuotantomuodoissa ja investointituissa myös laki edellyttää. Yli puolella vastanneista maataloista oli valmiutta tarjota saarekekäyttöä toimitusvarmuuspalveluna, josta korvauksen tulisi kattaa vähintään aiheutuneet kustannukset (esim. polttoaine) ja lisätyö. Tuntikohtaiset korvauspyynnöt saarekkeeseen siirtymisestä olisi 30-100 €/h tai 30-50 snt/kWh suuruusluokkaa, mitä voi pitää kohtuullisena tasona. Maatilat toivat myös esille valmiutta taata useammalle loppukäyttäjälle lähinaapurustossa sähkönsyöttö saarekekäytön avulla. Ylipäänsä toivottiin parempaa keskusteluyhteyttä jakeluverkkoyhtiöiden suuntaan.

Mikroverkkojen ja erilaisten paikallisten saarekekäyttövykykyyden omaavien ratkaisujen yleistymiseen voisi vaikuttaa välillisesti myös integroimalla toimitusvarmuuden laatu verkkopalvelumaksun tasoon. Sähkömarkkina-alueella olevat toimitusvarmuuskriteerit (myrskyn tai lumikuorman aiheuttava vika ei saa aiheuttaa asemakaava-alueella yli 6 tunnin ja sen ulkopuolella 36 tunnin keskeytystä) ovat tavallaan jo laadun differointia, jota toimitusvarmuuden integrointi verkkopalvelumaksun tasoon veisi vain pidemmälle.

Periaatteessa saarekekäyttöillä voisi myös vaikuttaa asiakkaan sähkön saatavuuteen pitkissä keskeytyksissä ja siten verkkoyhtiön maksamiin vakiokorvauksiin. Vakiokorvaukset on määritelty Sähkömarkkina-alueella ja niistä ei voi joustaa, vaikka asiakkaalla olisikin jakeluverkon keskeytyksen aikana saarekekäytön avulla sähkön syöttö varmistettu.

### Jakeluautomaatio

DMS-pohjainen automaattinen vianhallinta on sen verran yleinen teknologia, ettei sitä käsitellä tässä raportissa ollenkaan. Sen kehittämisessä lienee kuitenkin edelleen mahdollisuuksia erityisesti saarekoverkkojen hallinnan osalta.

Perinteiseen kauko-ohjattaviin erottimiin perustuvaa vianhallinnan automatiikkaa voidaan parantaa lisäämällä keskijännitelähdöille välikatkaisijoita. Välikatkaisijan ansiosta sen takana olevassa viassa vain osa kyseisen johtolähdön asiakkaista kokee keskeytyksen. Tyypillinen paikka välikatkaisijalle on kaapeli- ja avojohtoverkon rajakohta. Mitä enemmän välikatkaisijoita on, sitä parempi on myös toimitusvarmuus. Luonnollisesti jossain vaiheessa marginaalinen hyöty lisäkatkaisijasta tulee niin vähäiseksi, ettei verkkoyhtiön kannata investoida siihen. Myös suojaustekniseltä kannalta pelkkään virran ja aikahidastusten koordinaatioon perustuva suojausasetteluperiaate käy mahdottomaksi, koska aikahidastukset sähköasematasolla kasvavat liian suuriksi. Kommunikaatioon perustuvien lukitusviestien avulla aikahidastusta saadaan kuitenkin pienennettyä merkittävästi, jolloin peräkkäisten välikatkaisijoiden määrää voidaan tekniseltä kannalta kasvattaa. Myöskään kommunikaatioviiveestä ei synny ongelmaa, jos keskijännitekaapeloinnin yhteyteen on asennettu myös valokuitukaapeli.

Horizontaalista kommunikaatiota keskijänniteverkolla sijaitsevien IED:n välillä voidaan hyödyntää myös vian tarkempaan rajaukseen ja palautuskytkentöjen tekemiseen (IDE4L 2016). Ensimmäisessä vaiheessa vian erottaminen tehdään kuten edellä esitettiin välikatkaisijoille perustuen block-viesteihin. Toiseen vaiheeseen osallistuvat myös erottimien IED:t ja viantunnistintietojen perusteella voidaan päätellä mille erotinvälille vika voidaan rajata. Kun vika on saatu rajattua, voidaan jännite palauttaa

syötön suunnasta sulkemalla avautunut katkaisija. Erotin, joka on tehnyt vian rajauksen, lähettää pyynnön sulkea syötön suunnassa olevat kytkimet. Vastaavasti menetellään varasyöttöyhteyksien osalta. Varasyöttöyhteytenä voi toimia avoin erotin naapurilähdölle tai –asemalle, tai saarekkeeksi erotettu mikroverkko vianhallinnan ensimmäisessä vaiheessa. Automaatiologiikka voidaan toteuttaa täysin autonomisesti ja keskeytysaika vika-alueen ulkopuolella oleville asiakkaille on pienennettävissä muutama sekuntiin. Erityisesti RMU-kojeistoilla varustetuissa kaupunkiverkoissa tällainen ratkaisu voi olla mielenkiintoinen.

Syötönvaihtoautomaatiikkaa (transfer switch) on sovellettu erityisesti kriittisten asiakkaiden kuten sairaaloiden sähkönsyötön varmentamisessa. Asiakasta syötetään kahdella syötöllä, mutta ainoastaan toinen niistä on kerrallaan käytössä, jotta verkkorakenne säilyy säteittäisenä. Jos käytössä oleva syöttö vikaantuu, niin syötönvaihtoautomaatiikka vaihtaa toiselle syötölle automaattisesti. Vaihto on tehtävissä äärimmäisen nopeasti, jos kytkinkomponentteina sovelletaan tehopuolijohteita. Katkaisijoilla ja erottimilla vaihtoon menee luonnollisesti enemmän aikaa. Teknologiaa voitaisiin soveltaa myös jakeluverkoissa. RMU-kojeistossa syötön vikaantuessa kyseinen erotin avattaisiin ja avoimena oleva erotin suljettaisiin. Jos vika tapahtuu kauempana avoimesta erottimesta, tulisi RMU-kojeistojen kommunikoida horisontaaliseen kommunikaatioon perustuvan FLISR-automaation tavoin, jotta avoin erotin osataan siirtää oikeaan paikkaan.

Äärimmilleen vietyinä keskijänniteverkosta tulee suljettu rengasverkko, jossa voidaan aina erottaa ainoastaan vikaantunut verkonosa. Tällainen ratkaisu on luonnollisesti hyvin kallis jo senkin takia, että katkaisijoita tarvitaan paljon ja toiseksi suojaus edellyttää melko todennäköisesti kommunikoivaa suunnattua ylivirtasuojasta tai differentiaalisuojasta.

### Tehostettu kunnossapito

Samaan tapaan kuin kapasiteettijoustop tapauksessakin, tilanvalvonnan avulla on mahdollista parantaa myös toimitusvarmuutta vähentämällä vikojen todennäköisyyttä ennakoivan kunnonvalvonnan avulla. Vikoja potentiaalisesti aiheuttavat avojohtokadun reunapuut voidaan tunnistaa käyttäen erilaisia kuvantamisen tekniikoita. Yhdistämällä tämä tieto esimerkiksi puuston iän ja säätietojen (tuuli ja lumi) kanssa, saadaan potentiaalisimmat vikakohteet tunnistettua ennen vikaantumista ja siten kohdistaa reunapuiden poisto ainoastaan vika-altteimpiin kohteisiin.

Samaa dataa voidaan hyödyntää myös siten, että verkostosuunnittelun lähtötiedoiksi kerrotaan vika-altteimmat kohdat, jolloin toimitusvarmuutta saadaan parannettua kohdistamalla investoinnit koko verkon sijasta vaikuttavimpiin kohteisiin. Tämä ajatus toimii tietysti siinä tilanteessa, kun olemassa olevalla verkolla on vielä käytettävissä olevaa elinikää merkittävästi jäljellä tai muusta syystä esimerkiksi koko keskijännitelähdön kaapelointi ei tule kyseeseen. Tässä tapauksessa ratkaisukeinoja voivat olla esimerkiksi johdon siirtäminen maantien varteen, johtokadun leventäminen, reunapuiden systemaattinen raivaus, johdon korottaminen hyödyntämällä korkeampia pylviä, jne.

## 3.3 Järjestelmätason joustotarpeet

### Reservimarkkinat

Sähkövoimajärjestelmän hetkellisestä tehotasapainon hallinnasta vastaa järjestelmävastaavana kantaverkkoyhtiö, jonka yhtenä keskeisenä työkaluna tehotasapainon hallinnassa on sen ylläpitämät reservimarkkinat, joille myös jakeluverkkotasolle kytkeytyvät resurssit voivat tarjota joustokykyään, esim. aggregaattorin välityksellä. Reservimarkkinoille osallistuminen edellyttää tiettyjen teknisten vaatimusten täyttämistä ja esim. säätökokeita. Reservimarkkinoille osallistuvat jakeluverkkotason resurssit voivat tietyissä tilanteissa aiheuttaa jakeluverkkoon paikallisia pullonkauloja, joiden hallintaan



voidaan hyödyntää edellä kuvattuja kapasiteettijoustoratkaisuja. Toisaalta reservimarkkinoille osallistumisen edellyttämää tekniikkaa voidaan hyödyntää laajemminkin jakeluverkon hallinnassa. Tässä raportissa ei käsitellä kuitenkaan tarkemmin reservimarkkinoita, niiden teknisiä ja sopimuksellisia vaatimuksia tai reservimarkkinoille osallistumisen vaikutusta paikalliseen jakeluverkkoon.

## Tehopulatilanteen hallinta

Sähkøpulatilanteessa, kun markkinaehtoiset ja muut käytettävissä olevat resurssit mm. kantaverkkoyhtiön omat reservilaitokset on hyödynnetty sähkövoimajärjestelmän käyttövarmuuden ja tehotasapainon hallinnassa, jäljellä on jakeluverkkotasolla olevien kuormien irtikytkentä. Kantaverkkoyhtiö pyytää tietyn suuruisen kuormanpudotuksen toteutusta jakeluverkkoyhtiöiltä, mistä on tullut jo ennakkoarvotus tehøpulatilanteen uhatessa. Perinteisesti kuormien irtikytkentä on suunniteltu toteuttavan ns. kiertävinä sähkökatkoina, joissa sähköasemalla oleva keskijännitelähdön katkaisija avataan 1-2 tunnin ajaksi, jonka jälkeen keskeytys siirtyy seuraavalle johtolähdölle. Kiertävien sähkökatkojen alue voidaan muodostaa myös hienojakoisemmin hyödyntämällä kauko-ohjattavia erottimia. Kiertävissä sähkökatkoissa laajoja alueita on keskeytyksen ajan ilman sähköä, mikä sinällään vastaa normaalia keskeytystilannetta, varsinkin haja-asutusalueen verkoissa. Kaupunkiympäristöissä 1-2 tunnin laajempi keskeytys on poikkeuksellisempaa.

Laajalle alueelle kohdistuvien johtolähtökohtaisten kiertävien sähkökatkojen sijaan, tai vähintään ennen niihin siirtymistä, kuormien irtikytkentä voisi perustua asiakkaiden älymittarien kautta tehtävien ohjausten hyödyntämiseen vastaavasti kuin ennen sähkömarkkinoiden avaamista 1995 oli normaalina käytäntönä sähkölämmityskohteiden osalta, jolloin ohjausten insenttiivinä oli sähkölaitoksen seuraavien vuosien sähköhankintakustannusten hallinta. Silloisessa sähköhankintakustannusten hallinnassa sähköhankintakustannuksiin vaikutti merkittävästi vuoden kolmen suurimman tuntitehon suuruus, mikä kannusti ohjaamaan kuormia huippukuormitustunnilta toiseen ajankohtaan. Tuolta ajalta on peräisin edelleen sähkötoimitusehdoissa olevat kirjaukset sähkölämmityksen ohjauksen edellytyksistä (*"2.8.2 Kun kysymyksessä on asunnon suora sähkölämmitys pääasiassa suoraan sähkölämmittimin, ei voida sopia, että lämmityselementtien jännitteetön aika olisi suurempi kuin 1,5 tuntia kerrallaan ja yhteenlaskettuna suurempi kuin 5 tuntia vuorokaudessa. Jokaista yksittäistä jännitteetöntä ajanjaksoa tulee seurata jännitteellinen ajanjakso, joka on vähintään jännitteettömän ajanjakson pituinen."*). Älymittareiden kautta tehtäviä ohjauksia voisivat hyödyntää normaalissa käyttötilanteessa sähköhankintamyyjät ja aggregaattorit omassa toiminnassaan asiakkaan kanssa tehdyn sopimuksen mukaisesti tai jakeluverkkoyhtiö hankkiessaan joustoja suoraan asiakkaalta kahdenvälisellä sopimuksella. Tehøpulatilanteen hallinnassa älymittareiden kautta tehtävät ohjaukset mahdollistaisivat hienojakoisemman kuormanirrotuksen ennen laajempien kiertävien sähkökatkojen toteuttamista joko osana jakeluverkkoyhtiön toteuttamaa kantaverkkoyhtiön pyynnöstä tehtävää ohjausta tai jo ennen sitä sähköhankintamyyjän hintaohjauksessa olevana toiminnallisuutena, mikä vähentäisi kiertäviin sähkökatkoihin siirtymisen tarvetta.

Toinen vaihtoehto kiertävien sähkökatkojen toteuttamisen tueksi on hyödyntää jakeluverkon omaa saarekekäyttökyvykkyyttä sekä asiakkaiden saarekekäyttöjä, mikä vähentää kantaverkosta siirrettävän sähköhankintamäärää ja näyttäytyy kantaverkkotasolla kuormanirrotusta vastaavasti. Saarekekäyttöjä hyödyntämällä voidaan turvata sähköhankintamäärä kriittisimmille käyttöpaikoille kiertävien sähkökatkojen aikana. Hajautettuja resursseja (tuotantoa, kysyntäjoustoja ja varastoja) sekä niiden mahdollistamaa saarekekäyttökyvykkyyttä on enenevässä määrin mm. maataloilla, kaupakeskuksilla, huoltoasemilla jne. Talveksi 2023 odotettiin mahdollista sähköpulatilannetta, mutta mm. lämmin talvi ja OL3:n testit vaikuttivat siihen, että sähköä ei tullut missään vaiheessa pulaa eikä hintakaan noussut erityisen korkeaksi. Sähköpulatilanne saattaa kuitenkin olla edelleen mahdollinen tulevana talvena, jos talvelle osuu pidempi erityisen kova pakkasjakso (esim. napapöörteen aiheuttama tilanne kuten USA:ssa vuonna 2022) ja samaan aikaan tapahtuu vastaavan kaltaisia tuotantolaitosten vikaantumisia kuin



mitä on koettu elokuussa 2023. Olisikin perusteltua varautua mahdolliseen sähköpulatilanteeseen jo hyvissä ajoin ennakkoon kartoittamalla ja testaamalla kaikki jakeluverkkoyhtiön omat ja myös verkko-yhtiön asiakkailta olevat saarekekäyttöratkaisut ja kuormanohjausmahdollisuudet.

### Verkkokoodien liittymisehdot

Verkkokoodit sisältävät vaatimuksia verkkoon liittyvälle tuotannolle, varastoille sekä kuormille, mikä vaikuttaa myös jakeluverkkotason resurssien verkkoliittynnän ehtoihin ja toiminnallisuuksiin. Verkkokoodit sisältävät sekä sähkötekniiseen liityntään että mittauksiin ja ohjauksiin liittyviä vaatimuksia. Nämä osaltaan luovat myös edellytyksiä joustojen hyödyntämiseen sekä kanta- että jakeluverkkotason joustoresursseina. Tässä raportissa ei kuitenkaan laajemmin käsitellä verkkokoodien vaikutusta joustoresurssien saatavuuteen.

## 4. Lainsäädännön ja regulaation kehittyminen

Lainsäädäntö, erityisesti sähkömarkkinalaki, sekä verkkoliiketoiminnan valvontamalli ja siihen kytkeytyvät muut vaatimukset (mm. kehittämissuunnitelmat) luovat viitekehyksen joustojen hyödyntämiselle jakeluverkkotoiminnassa.

Sähkömarkkinalain mukaan *"sähköverkko on suunniteltava ja rakennettava ja sitä on ylläpidettävä siten, että ... verkonhaltija kykenee tuottamaan siirto- ja jakelupalvelun verkkonsa käyttäjille kustannustehokkaalla tavalla;"*. Sähkömarkkinalain edellyttämän jakeluverkon kehittämissuunnitelman tulee sisältää *"suunnitelma sähkönkulutuksen jouston, sähkövarastojen, jakeluverkonhaltijan energiatehokkuustoimenpiteiden ja muiden resurssien mahdollisesta käyttämisestä vaihtoehtona jakeluverkon siirtokapasiteetin laajentamiselle;"*. Vuonna 2021 päivitetyn sähkömarkkinalain taustalla olevan hallituksen esityksen (HE 265/2020 vp) mukaan *"pelkkä investointien tai toimenpiteiden hankintojen kilpailuttaminen ei yksinään riitä täyttämään säännöksessä asetettua kustannustehokkuuden vaatimusta."*

Toisaalta nykyinen verkkoliiketoiminnan valvontamalli ei erityisesti tue joustojen hyödyntämistä verkkoiminnassa. Monet joustoja tukevat toimenpiteet pitää hankkia ostopalveluna (esim. akkuvarmennus) ja useimmat älyverkkojen ratkaisut eivät kuulu yksikköhinnoittelun piiriin. Nykyisin valvontamallissa ostopalveluna hankittavien vaihtoehtojen kustannukset kohdistuvat valvontamallissa operatiivisiin kustannuksiin, joihin kohdistuu tehostamistavoite, joka pienentää sallittua liikevaihtoa, kun taas verkostoinvestointi (esim. maakaapelointi) kasvattaa verkon arvoa ja sitä kautta lisää sallittua tuottoa sekä sallittua liikevaihtoa poistomenettelyn kautta. Investointeja koskevassa päätöksenteossa erilaiset kustannustehokkaat investointiratkaisut tulisi olla aitoja vaihtoehtoja esimerkiksi verkon uusimiseksi, kapasiteetin laajentamiseksi ja toimitusvarmuuden tason nostamiseksi. Valvontamallia tulisiikin muuttaa siten, että ostopalveluina hankittavat investointivaihtoehdot (esim. akkuvarmennus, joustopalvelut, varavoima, raivaus, johtokadun levennys) ovat jakeluverkkoyhtiöin liiketoiminnan kehittämisen näkökulmasta vertailukelpoisia vaihtoehtoja suhteessa perinteisiin verkostoinvestointeihin. Investointivaihtoehdoille, jotka kasvattavat operatiivisia kuluja (OPEX), mutta jotka kokonaiskustannuksina (TOTEX=OPEX+CAPEX) jäävät muita vaihtoehtoja pienemmäksi, tulisi luoda valvontamalliin kannustimet.

Energiavirasto on nyt seuraavien 6. ja 7. valvontajaksojen suuntaviivoissa tuomassa osaksi valvontamallia joustokannustimen, joskin sen soveltaminen edellyttää vielä tarkempaa menettelytapaohjetta tai vastaavaa ohjeistusta mm. hyväksyttävien kustannusten ja toimenpiteiden osalta. Kuudennella valvontajaksolla (2024-2027) innovaatiokannustimen kaltaisesti toimiva joustokannustin mahdollistaa laajemmin joustoa tukevien ratkaisujen kehittämisen verkkoyhtiössä sisältämättä innovaatiokannustimeen liittyvää merkittävän uutuusarvon vaatimusta. Kuudennella valvontajaksolla mahdollistettavat joustoratkaisujen kehittämistä tukevat investoinnit tukevat jatkossa perinteisten verkkoinvestointien sijasta tehtävien kustannustehokkaiden toimenpiteiden hyödyntämistä verkkoiminnan kehittämisessä ja siihen liittyvissä kannusteissa, jotka vaativat kuitenkin vielä kehittämistä ennen seitsemännelle valvontajaksolle siirtymistä. Joustokannustin mahdollistaa joustojen hyödyntämistä tukevien investointien (myös operatiiviset kustannukset) kohdistamisen sallittuun liikevaihtoon ns. läpilaskutuseränä maksimissaan 1 % liikevaihdosta. Syksyllä 2022 ja talvella 2023 koetun energiakriisin myötä asiakkaille on perusteltavissa TKI-investointina joustoratkaisuiden kehittäminen, mikä parantaa palvelua varauduttaessa tuleviin hintavaihteluihin ja tehopulatilanteiden hallintaan.

6. valvontajakson aikana tulee määritellä 7. valvontajaksolla käyttöön otettava joustokannustin ja sen sisältämät menetelmät kapasiteetti- ja toimitusvarmuusjoustojen huomioimiseen osana

valvontamallia tasavertaisesti passiivisten verkostoratkaisuiden kanssa (ei syrjivästi kuten nykyään) siten, että joustot ovat liiketaloudellisesti perusteltavissa. Määrittelytyössä tulee hyödyntää 6. valvontajakson aikana tehtyjä kehittämistoimenpiteitä, joita on mahdollistettu 6. valvontajakson joustokannustimella. Yhtenä kehittävänä menetelmänä osana joustokannustinta on määrittää, miten tehtyjen joustokannustinta hyödyntävien kehitysinvestointien poistot käsitellään 7. valvontajaksolla ja miten ne sisällytetään jatkossa verkon arvon muodostukseen.

Ensi vaiheen tehtävänä on määrittellä periaatteet, miten sekä verkkoliiketoimintaa (kapasiteetti- ja toimitusvarmuusjousto) että laajemmin sähkömarkkinoita tukeviin joustoihin liittyviä kustannuksia voi kohdistaa joustokannustimeen. Tämä olisi hyvä toteuttaa Energiaviraston, verkkoyhtiöiden, palveluntarjoajien ja joustoja tarjoavien verkon käyttäjien yhteistyönä. Joustokannustimen tulisi mahdollistaa erityyppisten toimenpiteiden kehittämiseen ja verkkoinfraan liittyvien investointien lisäksi myös esimerkiksi sopimusten, hinnoittelumallien ja markkinapaikkojen kehittämiseen liittyvä työ yhtiökohtaisten joustoratkaisujen kehittämiseksi. Joustokannustimen rinnalla tulisi mahdollistaa lisäksi erilaisten uusien toimintamallien demonstraatiot ”regulative sandbox” tyyppisinä kokeiluina.

Lisäksi tulisi edistää joko kannustimin tai muutoin lainsäädännöllisin keinoin verkkoyhtiöitä toteuttamaan joustojen ohjausmahdollisuuksia, mikä loisi edellytyksiä jouston tarjonnalle sähkömarkkinoiden ja verkkoyhtiöiden tarpeisiin. Valvontamallin joustokannustinta tulisi hyödyntää, jotta luodaan joustavia resursseja sisältäviin käyttöpaikkoihin perusratkaisut joustoresurssien ohjaukseen joko hyödyntämällä verkkoyhtiöiden älymittareita tai muita kehittyneempiä automaattioratkaisuja. Sähkömittareiden kautta toteuttavan ohjauksinfran rakentaminen tulee olla mahdollista sisällyttää joustokannustimeen hyväksyttävänä kuluna normaalin mittariasennuksen ylimenevältä osalta sisältäen myös tarvittavat tietojärjestelmämuutokset ja kehitystyön.

Rakennuslainsäädäntöön ja verkkokoodeihin tarvitaan myös täydennyksiä. Verkkokoodiella ja liittymishdoilla pitää edellyttää, että tietyn kokoiset hajautetut energiareсурssit (esim. aurinkovoimala, akku, sähköauton lataus ja lämpöpumppu) sisältävät vaadittavat mittaus-, ohjaus- ja kommunikaatiovalmiudet myös jakeluverkkoyhtiön tarpeisiin kantaverkkoyhtiön lisäksi. Myös esim. yhteiskunnan tukemisiin energiatehokkuusremontteihin sekä laajamittaisiin peruskorjauksiin tulee edellyttää varautuminen kiinteistön ja sen hajautettujen energiareсурssien monitorointiin, älyratkaisuiden toteuttamiseen ja etäohjaukseen. Monitorointidatan on oltava verkkoyhtiön käytettävissä, jotta jakeluverkon tilaa voidaan ennakoida paremmin ja yleisesti valvoa joustotoimenpiteiden toteutumisesta. Paikallisautomaatioon perustuvien älyratkaisuiden yhdistyminen pilvipalveluiden kanssa mahdollistaa automaattisen joustokaupan ja eri osapuolien intressiristiriitojen koordinoimisen. Etäohjaus tulee mahdollistaa tarpeenmukaisesti sekä suoraan verkkoyhtiön toimesta (häätätilanteiden ohjaus) ja välillisesti joustopalvelun tarjoajan kautta (markkinaehtoinen ohjaus).

Vakiokorvaukset on määritelty Sähkömarkkinalaissa ja niistä ei voi joustaa, vaikka asiakkaalla olisikin jakeluverkon keskeytyksen aikana saarekekäytön avulla sähkön syöttö varmistettu. Asiakkailta ostettavalta saarekekäyttöpalveluilla olisi kuitenkin mahdollisuus vaikuttaa asiakkaan sähkön saatavuuteen pitkissä keskeytyksissä ja siten verkkoyhtiön maksamiin vakiokorvauksiin, jos laki mahdollistaisi tämän kaltaisten toimitusvarmuusjoustojen huomioimisen vakiokorvauksia määritettäessä. Toisaalta, jos asiakkaalta on hankittu toimitusvarmuusjousto Sähkömarkkinalain 52 a §:n mukaisesti (*”...Jakeluverkonhaltijan on hankittava joustopalvelut avointen, syrjimättömien ja markkinapohjaisten menettelyjen mukaisesti. Joustopalvelujen hankintaehtojen on oltava tasapuolisia ja syrjimättömiä joustopalvelujen tuottajille eikä niissä saa olla perusteettomia tai kilpailua ilmeisesti rajoittavia ehtoja.... Ehdot on julkaistava”*), niin voitaisiin ajatella, että toimitusvarmuusjousto on voimassa myös pidemmissä yli 12 tunnin keskeytyksistä. Asiasta olisi hyvä saada Energiaviraston tulkinta.

## 5. Yhteenveto ja suositukset

### 5.1 Jouston hyödyntäminen

Joustojen hyödyntäminen verkkotoiminnan kehittämisessä tarkoittaa moninaisia ratkaisuja ja lainsäädännöllisiä keinoja jakeluverkon muutostekijöiden kustannustehokkaaksi huomioimiseksi. Joustoa voidaan hyödyntää sekä verkon suunnittelun että käyttötoiminnan tarpeisiin. Jouston hyödyntämisen rinnalla tulee aina olemaan tarve myös investoinneille sähköverkon primäärikomponentteihin kuten muuntajiin, johtimiin ja kytkinlaitteisiin. Jouston rooli onkin enemmänkin tarjota lisämahdollisuuksia verkon kehittämiseen ja sen kapasiteetin tehokkaammaksi hyödyntämiseksi pienentämällä kulutus- ja tuotantohuippujen verkostovaikutuksia. Samoin jakeluverkon toimitusvarmuutta voidaan parantaa joustoratkaisuin. Kustannustehokkuus saavutetaan joustoratkaisuiden avulla, kun olemassa olevan jakeluverkon pitoaikaa voidaan kasvattaa ja siten välttää verkon ennenaikaiset uusintainvestoinnit.

Jotta joustoratkaisut olisivat vertailukelpoisia perinteisten verkkoinvestointien kanssa, tulisi verkkoregulaatiota kehittää sellaiseen suuntaan, että käyttökustannusten kategorisesta pienentämisvaatimuksesta luovuttaisiin ja kehittämissuunnitelmien ratkaisuvaihtoehtoja tarkasteltaisiin kokonaiskustannusten kautta. Kuudennen valvontajakson joustokannustin on toki askel oikeaan suuntaan joustoratkaisuiden kehittämiseksi, mutta lisäksi tarvitaan regulaatiomallin syvempi uudistaminen joustoratkaisuiden liiketaloudellisen kannattavuuden kohentamiseksi suhteessa perinteisiin ratkaisuihin.

Tulevaisuuden sähköjakeluverkkoa rakennetaan parhaillaan. Verkon pitoajan ollessa 40-50 vuotta, tulee energiamurroksen vaikutukset näkymään tässä verkossa hyvin pitkään. Energiamurroksen seurauksena verkon siirtotarpeet muuttuvat oleellisesti. Hajautetun tuotannon myötä kaksisuuntainen siirto tulee uudeksi normaaliksi, merkittävä osa asiakkaista voi olla pitkiäkin aikoja täysin omavaraisia, mutta myös kulutushuiput tulevat merkittävästi kasvamaan. Nykyisten verkkojen siirtokapasiteetti ei tule riittämään kaikkialla ja ennenaikaisia investointeja tullaan tarvitsemaan. Joustoratkaisuiden avulla olemassa olevan verkon pitoaikaa voidaan kasvattaa pienemmin kustannuksin kuin perinteisillä verkon vahvistusinvestoinneilla. Toki kohteissa, joissa verkko on jo muutenkin saneeraustarpeessa heikosta kunnosta johtuen, perinteiset investoinnit ovat tarpeen.

Joustoratkaisuja tarvitaan myös asiakastarpeiden tyydyttämiseksi. Monet energiamurroksen investoinnit ovat kokoluokaltaan suuria, kuten tuuli- ja aurinkopuistot, kaukolämmön sähkökattilat, vedyntuotannon elektrolyysit ja sähköajoneuvojen suuret pikalatauskohteet. Näiden kohteiden liittäminen edellyttää usein verkostoinvestointeja, joiden kokonaistoteutusaika saattaa olla useita vuosia ja hitaimmillaan jopa yli kymmenen vuotta. Asiakkaalla on kuitenkin usein tarve liittyä verkkoon mahdollisimman pian. Tällöin oikeastaan ainoaksi vaihtoehdoksi jää joustoratkaisuiden hyödyntäminen. Usein nämä ratkaisut ovat yhdistelmä sopimuksellisia, teknologisia ja kaupallisia ratkaisuja, joissa esimerkiksi joustavan liittymissopimuksen avulla mahdollistetaan verkon hallinta rajoittamalla ajoittain asiakkaan oikeutta käyttää verkkoa liittymistehollaan. Teknisillä keinoilla, esimerkiksi avojohdon dynaamisen kuormitettavuuden avulla, saadaan verkon kapasiteettia kasvatettua. Kaupallisten ratkaisuiden rooli on hakea ratkaisua, joka on taloudellisesti mielekkäin. Tällöin voitaisiin esimerkiksi edellyttää joustavan liittymissopimuksen tehnyt tuulipuisto tarjoamaan alassäätöä paikalliselle joustomarkkinalle, kun verkon siirtokyky ei tule riittämään. Samalle markkinapaikalle voisivat osallistua myös muut joustoa tarjoavat osapuolet, jolloin pullonkaulan ratkaisemiseksi tarjottavalle joustolle syntyy kilpailua, minkä pitäisi alentaa kokonaiskustannuksia ja tilanne on myös liittyjälle oikeudenmukaisempi, koska tilanne sähköenergiamarkkinoilla voi vaihdella merkittävästi ja siten vaikuttaa jouston arvoon.

Jouston hyödyntäminen kantaverkkotasolla ja sähköenergiamarkkinoilla on ollut arkipäivää jo pitkään. Mietittäessä kuinka joustoa voitaisiin hyödyntää jakeluverkkotasolla, tulee vastaan uusia ulottuvuuksia. Keskeisimpiä näistä ovat jouston sijaintiin ja saatavuuteen liittyvät haasteet. Jakeluverkon hallinnassa hyödynnettävän jouston tulee sijaita suhteellisen pienellä alueella, jotta siitä on ratkaistavan haasteen kannalta riittävästi hyötyä. 110 kV:n säteittäisen verkon ja päämuuntajien takana voidaan olettaa olevan riittävästi joustoresursseja, erityisesti jos energiamurroksen myötä liitettävien uusien laitteiden integroimiseksi IT- ja automaatiojärjestelmiin huolehditaan riittävän ajoissa esimerkiksi liittymisehtojen ja energia-alan yhteisen standardointityön kautta. Lisäksi joustoresurssien ja automaatiojärjestelmien on oltava riittävän kyvykkäitä, jotta ne kykenevät tarjoamaan tarvittavia joustopalveluita. Joustopalveluiden määrittäminen on niitä tarvitsevien tahojen tehtävä. Teknologiamielessä tehoelektroniikkaan perustuvat energiaresurssit ovat kykeneviä tuottamaan lähes minkä tahansa tarpeen mukaisia joustopalveluita. Oleellista on määrittää vaatimukset siten, että tarvittavat ominaisuudet toteutetaan myös fyysisissä laitteissa. Esimerkkinä huonosta määrittelystä ovat sähköajoneuvojen pikalatauspisteet, joiden kapasitiiviselle loisteholle ei ole määritelty ylärajaa. Monet laturit tuottavatkin erityisesti tyhjäkäyntitilanteessa merkittävän määrän loistehoa verkkoon päin. Lisäksi tulee huomioida vaikutukset jännitteen laatuun.

Keskijännitelähtöjen tasolla joustoa on jo huomattavasti vähemmän tarjolla johtuen asiakkaiden lukumäärän pienenemisestä. Vastaavasti siirryttäessä kohti keskijännitelähdön häntää, pienenee saatavissa olevan jouston määrä entisestään. Jakelumuuntajien ja pienjänniteverkkojen osalta tilanne voi olla sellainen, että joustoa voi tarjota hyvin rajallinen määrä asiakkaita. Tällöin jouston saatavuuteen alkaa vaikuttamaan merkittävästi asiakkaiden käyttäytyminen ja millaista joustoresurssia kyseisessä verkonosassa on liitetty. Lämmityskuormaa ei juurikaan ole saatavissa kesäajan hajautetun tuotannon jännitteenousuongelman ratkaisemiseksi. Vastaavasti sähköauton tarjoama jousto on riippuvainen siitä, onko auto kytkettynä sähköverkkoon ja mikä on akun latausaste. Jouston saatavuuden realistinen huomioiminen edellyttää joustoennusteen laatimista, jossa huomioidaan sen voimakas stokastiikka sekä vuodenaikojen, viikonpäivien, vuorokauden ja asiakaskäyttämisen osalta.

Toimitusvarmuuden parantamiseksi joustoilla voidaan mahdollistaa kustannustehokkaampi saarekekäyttöjen toteuttaminen hyödyntämällä asiakkaiden joustoresursseja ja -palveluita saarekekäytön mahdollistamiseksi ja pidempikestoisen saarekkeen toteuttamiseksi energiavarastoilla. Samoin toimitusvarmuusjoustoilla voidaan välttää huoltotoimenpiteiden aiheuttamat keskeytystilanteet, kun primääriverkko ja siirtotilanne eivät ole N-1 periaatteen mukaisia. Jouston ansiosta huoltotoimenpiteet voidaan ajoittaa myös korkean siirtotarpeen ajankohtiin helpommin. Samoin voidaan menetellä myös vikatilanteiden aikaisten poikkeuksellisten varasyöttötilanteiden toteuttamiseksi.

## 5.2 Suositellut joustoratkaisut

### Kapasiteettijousto

Suositteluja joustoratkaisuja on tarkasteltu nykyisestä verkkoregulaatiosta erillisenä. Useimmat joustoratkaisut edellyttävät, että verkkoregulaatiota muutetaan joustojen kannalta kannustavampaan suuntaan. Toiseksi tarkastelussa on arvioitu joustoratkaisuiden vaikuttavuutta laajassa verkkomasassa yksittäisten tapausten sijaan. Myös toteutusten helppoutta ja vaikutusten nopeutta on arvioitu suosituksia laadittaessa.

Verkkopalvelumaksujen kehittäminen on verkkoyhtiön kannalta nopea ja laajalle alueelle vaikuttava toimenpide, mutta sen verkostovaikutukset näkyvät vasta vuosikymmenien kuluessa. Siksi se tulee ymmärtää strategisen verkostosuunnittelun työkaluna asiakaskäyttämisen ohjaamiseksi. Maksujen painottaminen entistä enemmän kohti tehotariffeja olisi perusteltua jakeluverkon kustannusrakenteen näkökulmasta ja samalla voitaisiin alentaa kulutushuippuja sähköajoneuvojen ja lämmityksen

osalta, jos asiakkaat toteuttavat tehotariffin motivoimana älykkäitä ohjausratkaisuja. Ohjausvaikutus pitää olla riittävä, jotta se kumoaa esimerkiksi sähköenergian ja joustopalveluiden hintavaihtelusta aiheutuvan insenttiivin keskittää ohjattava kulutus edullisille ajanjaksoille. Asiakkaiden älykkäissä ohjausjärjestelmissä on mahdollista optimoida ohjaukset huomiomaan sekä energiamarkkinan että verkko- palvelumaksujen hinnoittelu.

Verkkoon myydyin hajautetun tuotannon siirtotariffin kasvattaminen kustannuksia vastaavalle tasolle edellyttää sähkömarkkinalain muutosta. Tuotannon siirtotariffin muutokselle olisi kuitenkin perusteensa, koska verkkoon syöttö tulee kasvamaan merkittävästi tulevaisuudessa. Siirtotariffin avulla verkkoon syötöstä tehtäisiin vähemmän houkuttelevaan prosumereille, ja siten kannustettaisiin kuluttamaan itse tuotettu sähkö tai vaihtoehtoisesti rajoittamaan hajautetun tuotannon ylityksiä. Tällä tavoin myös puhtaat tuotantoasiakkaat osallistuisivat jakeluverkon kustannusten jakamiseen ja siten myös Sähkömarkkinalain mukaisesta aiheuttamisperiaatetta noudatteleva hinnoittelu toteutuisi paremmin. Nykyisinhän alle 2 MVA:n tuotannolta ei voida periä edes välittömiä verkon vahvistamisen kustannuksia.

Joustavan liityntäsopimuksen avulla voitaisiin nopeuttaa liityntän toteuttamista niissä tapauksissa, joissa pyydetty liittymä edellyttää merkittäviä verkon vahvistusinvestointeja. Kansantaloudellisesti ajateltuna ajoittainen tuotannon leikkaus tulisi sallia automaattisesti kaikille prosumereille. Leikattavan tuotantoenergian tulisi kuitenkin olla vähäistä (esim. alle 1 % vuosienenergiasta), jotta se ei merkittävästi vaikuttaisi tuotantoinvestoinnin arvoon. Ajoittaisen tuotannonleikkauksen avulla jakeluverkon hosting kapasiteettia hajautetulle tuotannolle voidaan kasvattaa merkittävästi, paljon enemmän kuin mitä on menetetyin tuotannon arvo. Samalla luotaisiin kannuste prosumereille kuluttaa itse tuotettu energia mahdollisimman hyvin. Tuotannon leikkaaminen ylijännitetilanteissa tai tuotantoyksikön irtikytkentä jännitereleellä ovat joka tapauksessa verkon suojaustoimenpiteitä, joita tuotantoyksiköltä usein edellytetään. Yleisellä tuotannon leikkausoikeudella, verkkoyhtiö voisi kohdistaa tuotannon leikkauksen tasapuolisesti kaikkien prosumereiden kesken, jolloin verkon hännillä olevat asiakkaat eivät joutuisi eriarvoiseen asemaan.

Paikallisen joustomarkkinan pilottien kehittäminen jakeluverkkojen tarpeisiin olisi erittäin tärkeä saada käyntiin kuudennen valvontajakson aikana. Joustokannustin tarjoaa erinomaisen mahdollisuuden kehittää markkinapaikkaa ja joustotuotteita ja -palveluja suomalaisten jakeluverkkoyhtiöiden tarpeisiin. Kehitystyö tulisi aloittaa ennakoivasti, jotta toimiva mekanismi on olemassa, kun sitä tarvitaan pullonkaulojen hallintaan. Kehitystyön aloittaminen siinä vaiheessa, kun asiakkaita ollaan liittämässä jakeluverkkoon ja siirtokapasiteetista tulee ajoittaista pulaa, on auttamattomasti liian myöhässä. Kehitystyö tulee tehdä yhteistyössä kaikkien verkkoyhtiöiden ja aggregaattoreiden kesken.

Jakeluverkon jännitteensäädön osalta ensimmäinen konkreettinen kehitysaskel on Energiategollisuuden tulevan verkostosuosituksen käyttöönotto hajautetun tuotannon jännitteensäädön soveltamisesta. Heikossa jakeluverkossa hajautetun tuotannon jännitteensäätö tai tehokertoimen ohjaus kasvattaa jakeluverkon hosting kapasiteettia tuotannolle. Vaikutus on tapauskohtaista, mutta vaikutus on kaikkein suurin, kun kaikki tuotantoyksiköt osallistuvat siihen. Lähellä sähköasemaa olevat tuotantoyksiköt voisivat olla tehokertoimiohjauksessa ja kauempana sähköasemasta olevat tuotantoyksiköt olisivat jännitesäädössä. Tällä tavoin kaikki tuotantoyksiköt osallistuisivat säätöön sijaintipaikasta riippumatta ja siten parantaisivat kokonaistilannetta. Jännitteestä riippuva pätötehonleikkaus kasvattaisi verkon hosting kapasiteettia tuotannolle vielä lisää. Tämä joustoratkaisu on erittäin helposti toteutettavissa, koska liittymisvaatimusten kautta se saadaan käyttöön kaikissa uusissa tuotantoyksiköissä. Sen käyttöönotolle ei myöskään ole teknisiä esteitä, sillä kaikki inverttereihin ja tahtikoneisiin perustuvat voimalat sisältävät käytännössä jännitteensäädön. Vaatimus jännitteensäädöstä on myös helposti laajennettavissa akkuihin, sähköajoneuvojen latauspisteisiin ja invertterikäyttöisiin

lämpöpumppeihin. Hajautettujen energiaressurssien monitorointi- ja etäohjausvaatimusten kautta jännitteensäätöä on mahdollista kehittää tarvittaessa koordinoitua jännitteensäädön tarpeisiin hyödyntämällä SCADA/DMS tai reunalaskennan ratkaisuja, jolloin heikon jakeluverkon hosting kapasiteetti on edelleen mahdollista moninkertaistaa.

Hajautettujen energiaressurssien lukumäärän kasvaessa erityisesti pienjänniteverkossa hankaloituu jännitetason hallinta, koska eri pienjänniteverkot voivat olla hyvin erilaisissa käyttötilanteissa. Tällöin lisäjoustavuutta jännitetason hallintaan saadaan jakelumuuntajan käämikytkimen avulla. Kyseisiä laitteita on jo kaupallisesti saatavissa, tosin hinta on edelleen korkea. Kokeilut kyseisen laitteen soveltamisesta olisi kuitenkin hyvä aloittaa varhaisessa vaiheessa, jotta se aidosti saadaan osaksi keinovalikoimaa.

Älymittareiden uusinnan myötä avautuu uusia mahdollisuuksia kattavamman, tarkemman ja ajantasaisemman keski- ja myös pienjänniteverkon tilavalvonnan suhteen. Mittareiden tarjoaman ajantasaisen tiedon hyödyntäminen osana jakeluverkon hallintaa tulisi laajentua vian- ja keskeytystenhallinnasta myös jakeluverkon normaalitilan valvontaan. Normaalitilan valvonta on perusta älykkäille, aktiivisille ja tulevaisuudessa myös autonomisille verkonhallinnan sovelluksille. Merkittävä osa energiamurroksen vaikutuksista kohdistuu pienjänniteverkkoon, joten edullisen mutta kattavan tilavalvonnan kehittämiseksi on tarvetta.

110 kV:n verkon siirtokapasiteettia voitaisiin kasvattaa soveltamalla dynaamisen kuormitettavuuden ratkaisuja (dynamic line rating tai dynamic transformer rating). Ratkaisuiden idea on määrittää komponentin todellinen kuormitettavuus komponenttia lämmittävien ja jäähdyttävien tekijöiden kautta. Esimerkiksi tuulivoimalaa syöttävän 110 kV:n ajojohtoverkon kuormitettavuutta voidaan kasvattaa merkittävästi, kun tuuli jäähdyttää johtoa (tuulen jäähdyttävä vaikutus on merkittävämpi kuin ulkolämpötilan vaikutus). Olemassa olevaan johtoon saadaan liitettyä enemmän tuulivoimaa investoimalla johtoa monitoroivaan automaatiojärjestelmään. Automaatioinvestointi on myös huomattavasti nopeampi toteuttaa kuin johdon uusintainvestointi tai kokonaan uuden johdon rakentaminen uudella johdoreitillä. Ratkaisun yhdistelmä joustavan liityntäsopimuksen kanssa tarjoaa hyviä synergiaetuja molemmille osapuolille.

### Toimitusvarmuusjousto

Yksi mahdollisuus parantaa asiakkaan kokemaa sähkön jakeluverkon toimitusvarmuutta perinteisten verkkoinvestointien sijasta tai rinnalla on erilaiset paikalliset saarekeverkkoratkaisut. "Perinteisiä" varavoimakoneisiin, sisältäen myös mobiilivaravoimarakaisut, pohjautuvia jakeluverkkoyhtiön omia saarekekäyttöratkaisuja voidaan hyödyntää sekä vika- että suunniteltujen keskeytystilanteiden hallinnassa asiakkaille aiheutuvien haittojen vähentämiseen varmistamalla asiakkaan sähkön syöttö. Verkkoyhtiöt voivat lisäksi ostaa muiden toimijoiden 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 pienjännitemuuntopiirissä, ja omistaa tarvittavat energiaressurit. Saareke voi myös muodostua verkkoliittymän takana olevista asiakkaan kiinteistö- tai kiinteistöryhmän verkossa olevista resursseista.

Jakeluverkon vika- ja suunniteltujen keskeytystilanteiden hallinnan lisäksi saarekeratkaisuja voisi hyödyntää myös valtakunnallisessa tehopulatilanteessa irrottamalla mahdolliset saarekkeet verkosta jo ennalta ennen kiertäviä sähkökatkoja. Olisikin perusteltua varautua mahdolliseen sähköpulatilanteeseen jo hyvissä ajoin ennakkoon kartoittamalla ja testaamalla kaikki jakeluverkkoyhtiön omat ja myös verkkoyhtiön asiakkailta olevat saarekekäyttöratkaisut ja kuormanohjausmahdollisuudet.

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). Jotta saarekekäyttö julkisessa jakeluverkossa 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 joustoresurssien tarjoajien kanssa tulisi toteuttaa sellaisella tasolla, että tieto resursseista on valvomon ja jakeluautomaation käytettävissä reaaliaikaisesti.

Saarekekäyttömahdollisuuden hyödyntäminen pienentää verkkoliiketoiminnan valvonnassa sovellettavia keskeytyskustannuksia, 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.

Mikroverkkojen ja erilaisten paikallisten saarekekäyttökyvykkyyden omaavien ratkaisujen yleistymiseen voisi vaikuttaa välillisesti myös integroimalla toimitusvarmuuden laatu verkkopalvelumaksun tasoon. Sähkömarkkinalaissa olevat toimitusvarmuuskriteerit (myrskyn tai lumikuorman aiheuttava vika ei saa aiheuttaa asemakaava-alueella yli 6 tunnin ja sen ulkopuolella 36 tunnin keskeytystä) ovat tavallaan jo laadun differentia, jota toimitusvarmuuden integrointi verkkopalvelumaksun tasoon veisi vain pidemmälle.

Periaatteessa saarekekäytöllä voisi myös vaikuttaa asiakkaan sähkön saatavuuteen pitkissä keskeytyksissä ja siten verkkoyhtiön maksamiin vakiokorvauksiin. Vakiokorvaukset on määritelty Sähkömarkkinalaissa ja niistä ei voi joustaa, vaikka asiakkaalla olisikin jakeluverkon keskeytyksen aikana saarekekäytön avulla sähkön syöttö varmistettu. Jos jakeluverkkoyhtiön omalla saarekekäytöllä voidaan lyhentää loppukäyttäjien kokema sähkönjakelun keskeytys alle 12 tuntiin ilman, että saarekeverkkoon liittyneiden loppukäyttäjien tarvitsee rajoittaa sähkön kulutusta tai tuotantoa, jakeluverkkoyhtiön ei tarvitse maksaa loppukäyttäjille vakiokorvauksia. Samoin, jos jakeluverkkoyhtiö järjestää laajemmalle osalle jakeluverkkoaan sähkönsyötön saarekekäytön avulla esimerkiksi ostamalla sen palveluna sähkövarasto-operaattorilta tai kyseisessä saarekkeessa olevalta loppukäyttäjältä sähkömarkkinalain 52 a § mukaisesti niin, etteivät saarekkeessa olevat asiakkaat koe yli 12 h kestävä sähkönjakelun keskeytystä, vakiokorvauksia ei makseta. Kokonaisuudessaan loppukäyttäjän liittymän takana sijaitseva saarekekäyttö ja tällaisesta saarekekäytöstä maksettava toimitusvarmuusjoustopalvelu eivät kuitenkaan liity jakeluverkon toimintaan, ja siten palvelusta sopiminen ei kuulu 52 a § piiriin. Tällaisessa tapauksessa loppukäyttäjä ja jakeluverkkoyhtiö eivät sähkömarkkinalain mukaan saa sopia vakiokorvauksista. (Leppänen 2023)

Saarekekäyttöjen yleistymisiä tukevia toimenpide-ehtotuksia on tarkasteltu laajemmin lähteessä (Leppänen 2023).



## Lähdeluettelo

(Honkapuro 2020) Honkapuro S., Sihvonen V., Partanen J., Harsia P., Kallioharju K., Kortetmäki A., Järventausta P., Repo S., Remes L., Ketomäki J., STEK-projektin loppuraportti 2020 (<https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-335-582-8>)

(IDE4L 2016) Deliverable 4.3, "Preliminary assessment of the algorithms for network reliability improvement: Laboratory verification of algorithms for network reliability enhancement by FLISR", Ideal grid for all EU FP7 project, 2016.

(INTERFACE 2022) INTERFACE deliverable D5.6, Congestion Management demonstration - Final Evaluation report and lessons learnt, 2022, [http://www.interface.eu/sites/default/files/publications/INTERFACE\\_D5.6\\_FINAL\\_PUBLIC.pdf](http://www.interface.eu/sites/default/files/publications/INTERFACE_D5.6_FINAL_PUBLIC.pdf)

(Karppinen 2021) Karppinen T., Energiaviraston luonnos harmonisoiduksi verkkopalvelumaksujen hinnoittelun rakenteeksi. Älyverkkoforum 26.8.2021

(Kulmala 2014) Kulmala, A., Repo, S., Järventausta, P.: Coordinated voltage control in distribution networks including several distributed energy resources, IEEE Transactions on Smart Grid, 2014. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2297971>

(Kulmala 2017) A. Kulmala, S. Repo, J. Pylvänäinen, Generation Curtailment as a Means to Increase the Wind Power Hosting Capacity of a Real Regional Distribution Network, 24th International Conference on Electricity Distribution, CIRED 2017.

(Kuovi 2015) Janne Kuovi, "Predictive congestion and distributed energy resources management", diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2015.

(Leppänen 2023) Kukka Leppänen, "Sähkönjakeluverkkoon liittyvät saarekekäytöt, käyttötapaukset ja niiden kannattavuuden perusteet", diplomityö, Tampereen yliopisto, 2023.

(Lummi 2018) Lummi K., Rautiainen A., Järventausta P., Heine P., Lehtinen J., Hyvärinen M., Salo J., Alternative Power-Based Pricing Schemes for Distribution Network Tariff of Small Customers. Proceedings of the Innovative Smart Grid Technologies Conference Asia (ISGT-Asia 2018), Sep 2018, p. 581-586

(Lummi 2019) Lummi K., Mutanen A., Järventausta P., Upcoming Changes in Distribution Network Tariffs – Potential Harmonization Needs for Demand Charges. Proceedings of 25th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2019), Madrid, June 2019

(Mutanen 2018) A. Mutanen, P. Järventausta, S. Repo, Smart Meter Data-Based Load Profiles and Their Effect on Distribution System State Estimation Accuracy, International Review of Electrical Engineering (2018), <https://doi.org/10.15866/iree.v12i6.13419>

(Ruuth 2021) K. Ruuth, A. Supponen, A. Mutanen, S. Repo, K. Rosenørn, M. Møller, Lessons learnt in implementation of coordinated voltage control demonstration, 26th International Conference on Electricity Distribution (CIRED), 20-23 September 2021, Geneva, Switzerland.

(Salvi 2022) Salvi V., Ensuring adequacy of internal transmission capacity in Finland : Means besides network investments, diplomityö, Tampereen yliopisto, 2022, <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202208306807>

(Supponen 2017) Supponen A., Kulmala A., Repo S., Coordinated Voltage Control as a Replacement for Passive Network Reinforcements - a Case Study, IEEE International Conference on Smart Grid Communications 23-26 October 2017, Dresden, Germany.

(VDE 2018a) VDE-AR-N 4105 Anwendungsregel:2018-11, Generators connected to the low-voltage distribution network; Technical requirements for the connection to and parallel operation with low-voltage distribution networks, VDE standard, 2018.

(VDE 2018b) VDE-AR-N 4110 Anwendungsregel:2018-11, Technical requirements for the connection and operation of customer installations to the medium voltage network, VDE standard, 2018.

## Liite – Joustoratkaisujen kuvaukset

Taulukko 1. Koordinoitu jännitteensäätö

Kuvaus	Jännitteen toisiosäätö, jossa optimoidaan jännitteen primäärisäätäjien (esim. päämuuntajan käämikytkin, generaattorit, jakelumuuntajan käämikytkin ja hajautetut energiaressit) asetusrvot verkon kokonaistilan perusteella.
Sovellusesimerkkejä	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Useamman tuulipuiston liittyminen 110 kV:n säteittäiseen johtoon</li> <li>2. Keskijänniteverkon jännitetason hallinta hajautetun tuotannon ja hajautettujen energiaressien haasteisiin</li> <li>3. (Pienjänniteverkon jännitetason hallinta hajautetun tuotannon ja hajautettujen energiaressien haasteisiin)</li> </ol>
Tekninen ratkaisu	<p>Reaaliaikaisten asema- ja jakelumuuntamomittausten ja tilaestimoinnin perusteella määritetään säädettävän verkkoalueen jännitetasot. Optimointialgoritmi laskee kunkin jännitteensäätäjän optimaalisen asetusarvon verkon häviöiden, jännitteen nimelliarvosta poikkeamien ja tuotannonleikkauksen minimoimiseksi. Optimoinnin reunaehtoina toimivat jännitteen sallitut vaihteluvälit, komponenttien kuormitettavuudet ja jännitteensäätäjien tekniset reunaehdot.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. SCADA+DMS pohjainen ratkaisu</li> <li>2. Asema-automaatioon pohjautuva ratkaisu</li> </ol>
Kaupallinen ratkaisu	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ainakin Hitachin DMS:ssä on ollut tähän soveltuvia osia [Kuovi 2015]</li> <li>2. Smarter grid solutions (<a href="https://www.smartergridsolutions.com/">https://www.smartergridsolutions.com/</a>) ja TAU:n protoratkaisu [Ruuth 2021]</li> </ol>
Säädöksellinen ratkaisu	<p>Tarvitaan TOTEX-pohjainen verkkoinvestointien huomiointi sallitun tuoton laskennassa. Lisäksi yksittäisen ohjelmistomoduulin (esim. optimointi DMS:ssä tai asema-automaatioissa) hankinnalle tulisi olla realistinen yksikköhinta. CAPEX ja OPEX "pohjaiset" ratkaisut pitää saada vertailukelpoisiksi.</p> <p>Hajautetun tuotannon ja energiaressien liittymisehtoihin vaatimukset jännitteen- tai loistehonsäädöstä ko. yksiköiden osalta.</p>
Osapuolet ja heidän roolit	Verkkoyhtiöllä keskeinen rooli automaatiojärjestelmän toteuttamiseksi, johon asiakkaiden jännitteensäätäjät liittyvät. Verkkoyhtiö asettaa myös hajautetun tuotannon ja energiaressien liittymisehdoissa vaatimuksen jännitteensäädöstä, sen ominaisuuksista ja kaukokäyttöyhteydestä tai rajapinnasta. Liittyjän rooli on varmistaa, että jännitteensäätö toimii sovitulla tavalla.
Vaikutusmekanismit	Jännitetaso saadaan halutulle/optimaaliselle tasolle koko verkossa.
Hyödyt	Verkon hosting kapasiteetti hajautetun tuotannon ja energiaressien liittämiseksi voi kasvaa 3-4 kertaiseksi heikossa sähköverkossa. Verkon häviöt pienenevät myös verrattuna tilanteeseen, jossa jännitteensäätäjää ei koordinoita keskenään. Jännitteen laatu jännitetason osalta paranee koko verkkoa ajatellen erityisesti verkon poikkeuksellisissa kytkentätilanteissa.

"Haitat", sivuvaikutukset	Ratkaisu kasvattaa verkon operatiivisia kuluja kommunikaatiotarpeen johdosta. Ratkaisu kasvattaa myös käämikytkimen askellusten lukumäärää, mutta tehtyjen demonstraatioiden ja laskelmien perusteella vaikutus käämikytkimen huoltokustannuksiin näyttäisi ole hyvin vähäinen. Askellusten tulee kuitenkin lisääntyä todella merkittävästi, jotta aikaperusteinen huoltoväli alittuu.
Potentiaali	Tekninen potentiaali erinomainen haja-asutusalueilla, jossa hajautettuja energiaressusseja ja jakelumuuntajien käämikytkimiä voidaan hyödyntää jännitetaso hallinnassa päämuuntajan käämikytkimen lisäksi.
Valmiusaste	Keskijänniteverkon, isojen hajautettujen resurssien ja jakelumuuntajien käämikytkimien osalta vaatii ainoastaan tietojärjestelmäkehitystä (SCADA+DMS pohjainen ratkaisu). Pienjänniteverkkojen ja pienien hajautettujen resurssien osalta kehitettävä myös liittymisehtoja ja kommunikaatio- ja tiedonvaihtoratkaisuja.
Kustannusarvio	Hyötyihin nähden lisäkustannukset ovat hyvin alhaiset varsinkin, jos ominaisuutta hyödynnetään useilla verkkoalueilla. Pienjänniteverkon ja pienten hajautettujen resurssien osalta kustannusarvio on vielä epäselvä, koska tarvittavaa kommunikaatio- ja tiedonvaihtoratkaisua ei ole toistaiseksi selvitetty.  Tilaestimoinnin tarkentaminen edellyttää yleensä vähintään yhden virtamittauksen lisäämistä per keskijännitelähtö strategisesti merkittävimmälle (suurimmalle) jakelumuuntamolle, josta luonnollisesti aiheutuu investointi- ja kommunikaatiokuluja. Vaihtoehtoisesti voitaisiin hyödyntää nykyistä tarkempia älymittareiden reaaliaikaisia jännitemittauksia valikoiduilta asiakkailta.

Taulukko 1. Tehotariffi

<p>Kuvaus</p>	<p>Perusmaksun ja kulutusmaksun (ToU) lisäksi verkkopalvelumaksuun sisältyy tehomaksukomponentti (€/kW), jonka pohjautuu kuukauden (laskutusjakso) kolmen suurimman tuntienergian (=tuntikeskiteho kWh/h) keskiarvon mukaan. Mahdollisesti kynnysteho tehomaksulle.</p> <p>Ohjaa välillisesti asiakkaita hallitsemaan liittymän huipputehoa, jolla tehotariffin kautta asiakkaalle syntyy kustannus, mutta toisaalta parantaa asiakkaan mahdollisuutta vaikuttaa omaan verkkopalvelumaksuunsa, jos tehomaksulla korvataan perusmaksua (osa perusmaksusta).</p> <p>Välillisesti vaikuttaa verkon huipputehoihin koko verkon alueella ja siten parantaa isossa kuvassa olemassa olevan verkon kapasiteetin riittävyyttä.</p>
<p>Sovellusesimerkkejä</p>	<p>Asiakkaan sähköauton hankinta ei johda sulakekoon kasvattamiseen vaan ohjaa latauskuorman ja muun kuorman hallintaan (vuorotteluun).</p> <p>Ohjaa aurinkoenergian rinnalle asiakkaan oman akkuvaraston hankintaan.</p> <p>Antaa oikean suuntaisen hintasignaalin lämpöpumppujen aiheuttamille kuormitushuipuille</p>
<p>Tekninen ratkaisu</p>	<p>Toteutetaan tuntimittausten pohjalta osana mittaustieto- ja laskutusjärjestelmää</p> <p>Ohjaa asiakkaan kuormien hallintaa tukeviin ohjaus- ja automaattioratkaisuihin.</p>
<p>Kaupallinen ratkaisu</p>	<p>Nykyisen pienjännitetehtotariffin käyttöönotto myös pienasiakkaille. Pienimpien asiakkaiden osalta kynnysteho, jolloin tehomaksulla ei vaikutusta.</p> <p>Edellyttää kustannusperusteista laskentaa tariffien muodostamisessa maksukomponenttien yksikköhintojen (€/kk, snt/kWh, €/kW) määrittämiseksi</p>
<p>Säädöksellinen ratkaisu</p>	<p>Mahdollinen jo nykyisin, mutta ministeriön asetus tehomaksun määräytymisperusteiden harmonisoinnista edistäisi tehotariffin käyttöönottoa. Energiaviraston esitys asiasta käsittelyssä ministeriössä.</p>
<p>Osapuolet ja heidän roolit</p>	<p>Jakeluverkkoyhtiö – asiakas</p> <p>Lisäksi ohjaa asiakkaan ohjaus- ja automaattioratkaisujen kehitykseen</p>
<p>Vaikutusmekanismit</p>	<p>Ohjaa välillisesti asiakkaita hallitsemaan liittymän huipputehoa, jolla tehotariffin kautta asiakkaalle syntyy kustannus, mutta toisaalta parantaa asiakkaan mahdollisuutta vaikuttaa omaan verkkopalvelumaksuunsa, jos tehomaksulla korvataan perusmaksua (osa perusmaksusta).</p> <p>Välillisesti vaikuttaa verkon huipputehoihin koko verkon alueella ja siten parantaa isossa kuvassa olemassa olevan verkon kapasiteetin riittävyyttä.</p>

Hyödyt	Parantaa olemassa olevan verkon kapasiteetin riittävyyttä ja siten vähentää tarvetta verkon vahvistusinvestoinneille. Pitäisi näkyä myös pidemmällä aikavälillä asiakkaiden verkkopalvelumaksujen alentavasti tai korotuspaineen vähenemisenä.
"Haitat", sivuvaikutukset	<p>Luo lisäkustannuksen hetkelliselle markkinaperusteiselle kuorman lisäykselle, esim. pörssisähkön hinnan ollessa lähes nolla.</p> <p>Voimajärjestelmän tehotasapainon näkökulmasta kuorman tulisi joustaa myös ylöspäin. Kuitenkin markkinaperusteinen jousto synkronoi kuormia samaan ajanhetkeen, jolloin voi syntyä aiempaa suurempi tehohuippuja verkkoon. Tehomaksu antaa tälle vastakkaisen verkon kapasiteettiin pohjautuvan hintasignaalin, jolloin joustosta saatavan hyödyn pitää kattaa myös tehomaksusta tuleva lisäkustannus, joka heijastelee verkon kustannuksia keskimääräisellä tasolla.</p> <p>Jakeluverkon tasolla paikalliselle kuormanlisäykselle voi olla tarvetta, jos samalla alueella oleva tuotanto nostaa jännitettä liikaa. Vaihtoehtona leikata tuotantoa tai kasvattaa paikallisesti kuormaan. Tämä pitää kompensoida tariffista erillisellä dynaamisella hinnoittelulla.</p> <p>Tehotariffi vaikuttaa keskimääräisellä tavalla koko verkon alueella ja se toimii etäisyysriippumattomana perushinnoittelumallina. Sen rinnalla voi olla paikalliseen verkon tilanteeseen perustuva erillinen dynaaminen hinnoittelurakenne, joka toimii erillisenä lisäpalvelutuotteena (tästä oma kuvaus).</p>
Potentiaali	Merkittävä. Vaikuttaa nykyisiin kuormituksiin sekä uusiin lyhyitä teho- piikkejä aiheuttaviin kuormiin (sähköautot, lämpöpumput). Vaikutus isoon asiakasmäärään ja sitä kautta merkittävä vaikutus koko verkolle.
Valmiusaste	Käyttöön otettavissa lähes välittömästi. Edellyttää kustannusperusteisten verkkopalvelumaksujen laskentaa
Kustannusarvio	Kustannusvaikutus verkkoyhtiölle pieni

Taulukko 1. Toimitusvarmuusjousto

Kuvaus	Toimitusvarmuusvaatimuksen toteutus asiakkaan omalla ratkaisulla
Sovellusesimerkkejä	Asiakas varautuu itse tai hyväksyy alemman toimitusvarmuustason (esimerkiksi niin, että vakiokorvaus alkaa juosta vasta 3 vuorokauden pituisessa katkossa eli verkon toimitusvarmuusvaatimus kuudesosa nykyisestä)
Tekninen ratkaisu	Asiakkaan vastuulla eli käytännössä ei mitään tai oma varavoimaratkaisu
Kaupallinen ratkaisu	Asiakkaalla alennettu verkkopalvelumaksu (esimerkiksi 25% alempi kuin niillä, joilla on normaali toimitusvarmuustaso)
Säädöksellinen ratkaisu	Edellyttäisi lakimuutosta, jossa perushaasteen ohella mietittävä onko tarjolla kaikille vai ainoastaan alueille, joissa alempi toimitusvarmuustaso on käytännössä potentiaalinen vaihtoehto. Ja kääntäen, voidaanko vaatia asiakasta hyväksymään alempi toimitusvarmuustaso). Sopimuksen tulee olla kiinteistökohtainen ja määräaikainen (esim. 5 vuotta)
Osapuolet ja heidän roolit	Verkkoyhtiö ja asiakas (jolla mahdollinen varavoimaratkaisun tuottaja)
Vaietusmekanismit	Vaihtoehto toimitusvarmuusinvestoinnille.
Hyödyt	Voitaisiin lykätä tai välttää investointeja ja parantaa yleistä varautumistasoa, jota voi hyödyntää vaikkapa tehopulatilanteessa. Kannustaisi omaehtoiseen varautumiseen.
"Haitat", sivuvaikutukset	Liian helppo valinta, jos käytännön toimitusvarmuus on oletettavasti korkealla tasolla ja tarjolla edullisempaa verkkopalvelua
Potentiaali	Merkittävä mahdollisuus parantaa varautumista ja suunnitella, rahoittaa ja rakentaa paikalliset energiaratkaisut niin, että ne toimivat myös sähkökatkopauksessa.
Valmiusaste	Teknisesti valmis varavoimana, tehtävissä myös akkujen ja oman tuotannon kanssa, säädöksellisesti kaukana ja saattaa olla jopa mahdoton
Kustannusarvio	Asiakkaalle käytännössä (alennettuna verkkopalvelumaksuna) hyvitetään yhden 1-3 vrk vakiokorvaus vuosittain, jolla voi ylläpitää varavoimaa ja joka on pois verkkoyhtiön tuloista.

Taulukko 1. Haja-asutusalueen maatilán saarekekäyttö

Kuvaus	Haja-asutusalueella sijaitsevan maatilán (ja mahdollisesti sen naapuruston) energiakokonaisuuden tarjoamat kapasiteetti- ja toimitusvarmuusjoustot.
Sovellusesimerkkejä	<p>Etäämmällä sähköasemasta oleva keskijännitelähdön varrella tai hánnillä oleva maatila omistaa varavoimaratkaisun (varavoimakone tai akku), jolla turvataan eläinsuojelulainsäädännönkin edellyttämä eläintuotantotilan jatkuva sähkökäyttö.</p> <p>Varavoiman lisäksi maatilalla voi olla myös muuta omaa tuotantoa, esim. aurinkosähkön tuotantoa tai biokaasupohjaista sähkön ja lämmön yhteistuotantoa sekä erilaisia ohjattavissa olevia kuormia. Maatilán energiakokonaisuus voi tarjota jakeluverkkoyhtiölle tehon hallintaan kykenevää joustoa (kapasiteettijousto) tai saarekekäyttövalmiuden (toimitusvarmuusjousto).</p>
Tekninen ratkaisu	Maatilán saarekekäyttö ja/tai jakeluverkosta siirrettävän tehon hallinta. Voidaan hyödyntää jakeluverkossa olevassa keskeytystilanteessa toimitusvarmuusjoustona tai verkossa olevan pullonkaulan (tai laajemman tehopulan) hallintaan verkossa siirrettävän tehon vähentämiseksi.
Kaupallinen ratkaisu	<p>Pitkissä (&gt; 12 h) keskeytyksissä maatila saa aina vakiokorvauksia jakeluverkkoyhtiöltä.</p> <p>Jakeluverkkoyhtiö voisi myös maksaa sopimukseen perustuvaa korvausta keskeytystilanteissa, jolloin maatila varmistaa sähkönsyötön omilla paikallisilla ratkaisuilla ja maatilaa ei huomioida jakeluverkkoyhtiön keskeytyksen aiheuttamien keskeytyksien laskennassa. Tämä voitaisiin huomioida myös vakiokorvauksia määritettäessä, jos se lainsäädännöllisesti olisi mahdollista.</p> <p>Jakeluverkkoyhtiö voisi ostaa verkosta siirrettävän tehon ohjausta pullonkaulojen hallintaan joko suoraan maatilán kanssa tehtävällä sopimuksella tai paikalliselta joustomarkkinalta, jos maatila tarjoaa energiasurssejaan laajemmin joustomarkkinoille.</p>
Säädöksellinen ratkaisu	<p>Toimitusvarmuusjoustojen mahdollistamiseksi muutoksia vakiokorvauslainsäädäntöön ja verkkoliiketoiminnan valvontamallin keskeytyskustannusten laskentaan ja laatukannustimeen.</p> <p>Joustojen hyödyntäminen verkko kapasiteetin hallinnassa perinteisten verkkoinvestointien sijaan tulisi olla liiketaloudellisesti perusteltua verkkoliiketoiminnan valvontamallin kautta.</p>
Osapuolet ja heidän roolit	Jakeluverkkoyhtiö – maatila
Vaikutusmekanismit	Verkon kapasiteetin hallinta sekä paikallisen saarekkeen hyödyntäminen verkon keskeytystilanteissa → vaikutukset asiakkaiden kokemaan laatuun ja verkkopalvelumaksuihin
Hyödyt	Parantaa olemassa olevan verkon kapasiteetin riittävyttä ja siten vähentää tarvetta verkon vahvistusinvestoinneille. Parantaa paikallista energiakäyttöä sekä tukee kapasiteetti- ja toimitusvarmuusjoustojen



	mahdollistumista. Pitäisi näkyä myös pidemmällä aikavälillä asiakkaiden verkkopalvelumaksuja alentavasti tai korotuspaineen vähenemisenä.
"Haitat", sivuvaikutukset	Muun maatilaa syöttävän verkon toimitusvarmuus saattaa jopa heikentyä, jos maatilán sähkön käyttö varmistetaan paikallisella ratkaisulla, jolloin syöttävän verkon investointeja lykätään ja/tai kunnossapitoa vähennetään.
Potentiaali	Haja-asutusalueella olevien maatilat ja muut vastaavat asiakkaat (esim. teollisuuskiinteistöt, huoltoasemat, kaupat)
Valmiusaste	Ei vaadi merkittävää teknologian kehittämistä, enemmän lainsäädännön ja regulaation muutos ratkaisujen mahdollistamiseksi
Kustannusarvio	Toteutuksen kustannusarvio ei merkittävä, mutta liiketoimintavaikutus voi olla merkittävä

Taulukko 1. Haja-asutusalueen teollisuuskäyttöverkko / energiayhteisö

<p>Kuvaus</p>	<p>Haja-asutusalueella sijaitsevan teollisuuslaitoksen ja sen ympärillä olevan energiakokonaisuuden tarjoamat kapasiteetti- ja toimitusvarmuusjoustot.</p> <p>Energiakokonaisuus voi muodostaa paikallisen jakeluverkon ylitoimivan energiayhteisön, kiinteistön sisäisen energiayhteisön tai erillisen linjan mahdollistavan ratkaisun. Energiakokonaisuus voi tarjota tehon hallintaan kykenevää joustoa (kapasiteettijousto) tai saarekekäyttö valmiuden (toimitusvarmuusjousto).</p>
<p>Sovellusesimerkkejä</p>	<p>Etäämmällä sähköasemasta oleva keskijännitelähdön varrella tai hännillä oleva teollisuusalue kasvattaa toimintaa ja lisää siten sähkötehon tarvetta (voi perustua esim. nykyisen korkea lämpötilan lämmöntarpeen korvaamiseen sähkön pohjautuviin ratkaisuihin), jota varten rakennetaan omaa energian tuotanto- ja varastointikapasiteettia joko omalle kiinteistölle tai lähietäisyydelle (erillisen linjan mahdollistama).</p> <p>Esimerkki 1</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kylässä useita kiinteistöjä sekä teollisia kuormia, joilla kaasukäyttöisiä uuneja</li> <li>• Lämmönjakelu osaan kylän kiinteistöistä</li> <li>• Mahdollisuus joustoihin (varastot/lämpö/prosessi)</li> <li>• Teollisen tuotannon kasvattaminen lisää kuormitusta 2 MW → 5 MW</li> <li>• Mahdollisuus lisätä omaa tuotantoa (aurinkovoima, biokaasu)</li> </ul> <p>Esimerkki 2</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kylän kaikilla kiinteistöillä sama haltija/omistaja</li> <li>• Teollisia kuormia, joilla kaasukäyttöisiä uuneja</li> <li>• Lämmönjakelu osaan kylän kiinteistöistä</li> <li>• Mahdollisuus joustoihin (varastot/lämpö/prosessi)</li> <li>• Teollisen tuotannon kasvattaminen lisää kuormitusta 2 MW → 5 MW</li> </ul> <p>Mahdollisuus lisätä omaa tuotantoa (aurinkovoima, biokaasu)</p>
<p>Tekninen ratkaisu</p>	<p>Syöttävän 20 kV verkon vahvistaminen kasvu (~5 vuotta sitten kaapeloitu) → kaikkien asiakkaiden verkkopalvelumaksun kasvu</p>
<p>Kaupallinen ratkaisu</p>	<p>Esimerkki 1</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Paikallisen tuotannon mahdollistaminen erillisen linjan avulla → paikallinen (hajautettu) energiayhteisö</li> <li>• Joustava liityntäsopimus / kapasiteetti jousto / toimitusvarmuusjousto → uudet hinnoittelurakenteet → säästö kaikkien asiakkaiden verkkopalvelumaksuissa</li> </ul> <p>Esimerkki 2</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kiinteistön sisäinen energiayhteisö, jolla oma rinnakkainen verkko → säästö verkkopalvelumaksuissa</li> </ul>
<p>Säädöksellinen ratkaisu</p>	<p>Mahdollistetaan hajautetun paikallisen energiayhteisön ja erillisen linjan rakentamiseen pohjautuvat energiayhteisöt lainsäädännöllisesti.</p>

	<p>Toimitusvarmuusjoustojen mahdollistamiseksi muutoksia vakiokorvauslainsäädäntöön ja verkkoliiketoiminnan valvontamallin keskeytyskustannusten laskentaa ja laatukannustimeen.</p> <p>Sektori-integraation edistämistä tukevan lainsäädännön kehittäminen.</p>
Osapuolet ja heidän roolit	Jakeluverkkoyhtiö – teollisuusasiakas/-asiakkaat – ympäröivän kylän asukkaat
Vaikutusmekanismit	Verkon kapasiteetin hallinta sekä paikallisen saarekkeen hyödyntäminen verkon keskeytystilanteissa → vaikutukset asiakkaiden kokemaan laatuun ja verkkopalvelumaksuihin
Hyödyt	Parantaa olemassa olevan verkon kapasiteetin riittävyyttä ja siten vähentää tarvetta verkon vahvistusinvestoinneille. Parantaa paikallista energiakäyttöä sekä tukee kapasiteetti- ja toimitusvarmuusjoustojen mahdollistumista. Pitäisi näkyä myös pidemmällä aikavälillä asiakkaiden verkkopalvelumaksujen alentavasti tai korotuspaineen vähenemisenä.
"Haitat", sivuvaikutukset	Kiinteistörajojen "kikkailulla" tehty kiinteistön sisäinen paikallinen ratkaisu voi johtaa muiden asiakkaiden verkkopalvelumaksujen kasvamiseen, jos ei määritellä tämän kaltaisille ratkaisuille omaa verkkopalvelumaksutuotetta eikä saada hyödynnetyksi paikallisen mikroverkon tarjoamia palveluita toimitusvarmuusjoustona.
Potentiaali	Haja-asutusalueella olevien teollisuusasiakkaat, mukaan lukien maatilat sekä paikalliset kyläyhteisöt / taajamat
Valmiusaste	Ei vaadi merkittävää teknologian kehittämistä, enemmän lainsäädännön ja regulaation muutos ratkaisujen mahdollistamiseksi
Kustannusarvio	Toteutuksen kustannusarvio ei merkittävä, liiketoimintavaikutus voi olla merkittävä