

Please note! This is a self-archived version of the original article.

Huom! Tämä on rinnakkaistalenne.

To cite this Article / Käytä viittauksessa alkuperäistä lähdettä:

Honkapuro, S., Sihvonen, V., Partanen, J., Harsia, P., Kallioharju, K., Kortetmäki, A., Järventausta, P., Repo, S., Reme, L. & Ketomäki, J. (2020) Jousto 2035 visio – Energijärjestelmän jouston tarpeet ja toteutuspotentiaali 2035. LUT.

URL: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-335-582-8>

LUT Scientific and Expertise Publications

Tutkimusraportit – Research Reports

115

Samuli Honkapuro, Ville Sihvonen, Jarmo Partanen, Pirkko Harsia,
Kari Kallioharju, Aki Kortetmäki, Pertti Järventausta, Sami Repo,
Laura Remes ja Jaakko Ketomäki

Jousto 2035 visio – Energiajärjestelmän jouston tarpeet ja toteutuspotentiaali 2035

Jousto 2035 visio – Energiajärjestelmän jouston tarpeet ja toteutuspotentiali 2035

Samuli Honkapuro, Ville Sihvonen, Jarmo Partanen

LUT yliopisto

Pirkko Harsia, Kari Kallioharju, Aki Kortetmäki

Tampereen ammattikorkeakoulu

Pertti Järventausta, Sami Repo

Tampereen yliopisto

Laura Remes, Jaakko Ketomäki

Aalto yliopisto

Lappeenrannan-Lahden Teknillinen Yliopisto LUT
LUT School of Energy Systems
Yliopistonkatu 34
53850 Lappeenranta
ISBN 978-952-335-582-8
ISSN-L 2243-3376
ISSN 2243-3376115

Lappeenranta 2020

Sisällysluettelo

Sisällysluettelo	2
1. Terminologia	3
2. Johdanto	7
2.1. Energiamurros ja muut muutostekijät	7
2.2. Jousto verkon eri tasoilla	8
3. Jousto energiajärjestelmässä	10
3.1. Tuotannon jousto	10
3.2. Tuotantoteknologioista	14
3.3. Kulutuksen jousto	16
3.4 Energiavarastot	18
4. Sähkön käytön muutokset ja joustomahdollisuudet	21
4.1. Sähkön kulutusmuutos rakennuskannassa	21
4.2. Uudet kulutuskohteet	26
5. Sähkön tuotannon muutokset	30
5.1. Tuotantoskenaariot	30
5.2 Tuotannon joustavuuden muutokset	33
6. Joustotarpeet ja resurssit tulevassa energiajärjestelmässä	35
6.1. Mihin joustoa tarvitaan?	35
6.2. Paljonko joustoa tarvitaan?	36
6.3. Mistä jousto saadaan?	37
7. Miten jousto kohtaa tarpeen	39
7.1. Aika ja paikka	39
7.2. Markkinaratkaisut jouston saamiseksi	40
7.3. Tekniset ratkaisut jouston saamiseksi	44
8. Asiakkaiden rooli joustossa	47
8.1. Yksittäiset asiakkaat	47
8.2. Energiayhteisöt jouston tarjoajina	48
9. Esimerkkejä jouston toteutuksesta	51
10. Yhteenveto ja johtopäätökset	53
Lähteet	56

1. Terminologia

Kysyntäjousto

Lähteen Järventausta ym. (2015) mukaisesti kysynnän jousto¹ sisältää laajan joukon erilaisia toimintoja, joiden merkitys, tarve ja ansaintalogiikka vaihtelevat toimijan näkökulmasta. Kysynnän joustolla voidaan ymmärtää välillinen esimerkiksi hinnoittelurakenteilla toteutettava vaikuttaminen asiakkaan käyttäytymiseen, vaihtelevaan energian hintaan pohjautuvat suorat ohjaustoimenpiteet sekä siirto- ja jakeluverkon tarpeista tulevat ohjaukset, kuten kuorman toimiminen kantaverkkoyhtiön reservinä tai yötariffiin kytketyn kuorman porrastaminen. Seuraavassa on kuvattu lyhyesti kysynnän jouston mahdollisuuksia ja tarpeita eri toimijoiden näkökulmasta:

- **Kantaverkkoyhtiölle** kysynnän jousto tarjoaa mahdollisuuksia tehotasapainon hallintaan ja taajuuden säätöön käyttö- ja häiriöreservien osalta sekä mahdollisesti myös joustavuutta tehopula -tilanteiden hallintaan.
- Sähkön **vähittäismyyjä** voi hyödyntää kysynnän joustoa sähkön hankinnan suunnittelussa, tasevastaavana oman taseensa hallinnassa muiden toimenpiteiden rinnalla, säätösähkömarkkinoiden tarjouksissa sekä uusien tuotteiden ja oman liiketoiminnan kehittämisessä.
- **Jakeluverkkoyhtiö** voi hyödyntää kysynnän jouston mahdollisuuksia pitkän aikavälin verkon suunnittelussa verkon mitoitusasteen näkökulmasta sekä reaaliaikaisessa käyttötoiminnassa esim. poikkeustilanteiden aikaisen huipputehon hallinnassa.
- Sähkön **loppukäyttäjän** näkökulmasta kysynnän jousto mahdollistaa mm. sähkön käytön edullisen hinnan aikana, ostosähkön vähentämisen, oman pientuotannon täysimääräisen hyödyntämisen, huipputehojen pienentämisen sekä mahdollisesti liittymäkoon rajoittamisen.
- **Laite- ja järjestelmätoimittajille sekä palvelun tarjoajille** (esim. kuormia aggregoiva ”jousto-operaattori”) kysynnän jousto tarjoaa uusia tuote- ja liiketoimintamahdollisuuksia.

Kysynnän jouston laajamittainen hyödyntäminen edellyttää eri toimijoiden välistä yhteistyötä.

Jousto

Sähköjärjestelmän kannalta on usein sama, toteutetaanko esimerkiksi tehotasapainon hallinta ohjaamalla kulutusta, tuotantoa tai varastoja. Kysynnän jouston lisäksi on siten hyvä tiedostaa kaikki mahdollisuudet ja ratkaisut tehotasapainon hallinnassa. Tällä hetkellä kulutus saa vaihdella yksittäisten käyttäjien tekemien, usein ainakin sähköjärjestelmän kannalta täysin tiedostamattomien, päätösten mukaisesti ja sähköjärjestelmän

¹ Käytetään myös termejä ”kysyntäjousto” ja ”kulutusjousto”

säätö toteutetaan siten, että sähköntuotanto mukautuu hetkittäiseen kulutukseen eli joustaa pääasiassa sähkömarkkinoiden kaupankäynnin avustamana.

Aggregointi/aggregaattori

Jouston yhteydessä puhuttaessa aggregointi käsittää useiden erillisten joustoresurssien keräämisen yhdeksi, yhtenäiseksi joustoresurssiksi. Osa yksittäisistä joustoresursseista, kuten yksittäisen omakotitalon lämmitys, ovat yksinään teholtaan liian pieniä osallistukseen sähkömarkkinoille. Tällöin vaaditaan aggregointia, eli näiden pienempien resurssien kasaamista isommaksi ryhmäksi, jolloin saavutetaan suurempi säätöteho ja mahdollistetaan sähkömarkkinoille osallistuminen. Aggregaattori on siis toimija, joka kerää nämä irralliset joustoresurssit yhdeksi kokonaisuudeksi, tarjoaa ne sähkömarkkinoille, vastaa näiden resurssien saatavuudesta sekä maksaa korvauksen resurssien omistajille.

Tehomäärittelyt

Nimellisteho (P_n)

Valmistajan ilmoittama mitoittava sähkö(pätö)teho, jota vastaavan virran laite ottaa suurimmillaan tavanomaisessa käyttötilanteessa jännitteen ja tehokertoimen ollessa nimellinen.

Asennusteho ($P_{asennus}$)

Laiteryhmän yhteinen nimellisteho, kuten esimerkiksi kiinteistöön asennettujen sähkölämmittimien nimellistehojen summa.

Lämmityslaitteen lämmitysteho

Valmistajan vahvistama ja takaama suurin mahdollinen kilowatteina ilmoitettu lämpöteho, jota voidaan jatkuvassa käytössä tuottaa valmistajan ilmoittamalla hyötysuhteella. Kutsutaan myös lämmitysjärjestelmän nimellistehoksi.

Hetkellinen teho, (esim. P_{5s})

Tarkasteluaikana käytetty energia jaettuna ajalla, esim. 5 s:n keskiteho

Tuntiteho, tuntikeskiteho

Yhden tunnin aikana käytetty energia (kWh) jaettuna tunnilla (h).

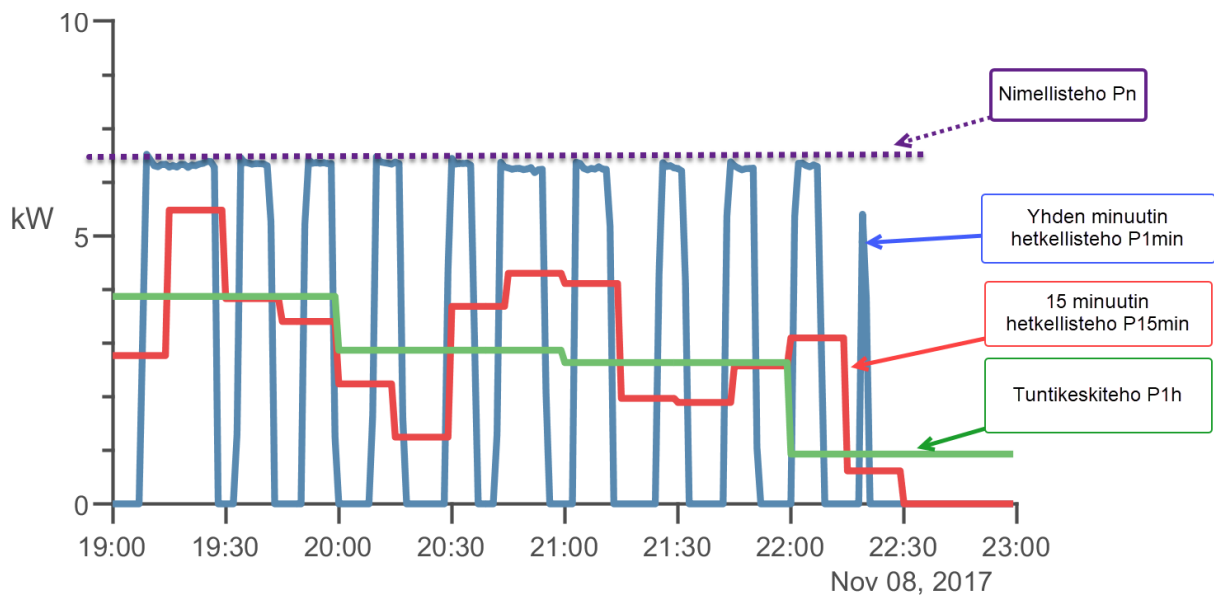
Toimintateho

Laitteen tai laiteryhmän tavanomainen käyttöteho tarkastelujakson aikana. Sen suuruuteen vaikuttaa laitteen nimellisteho sekä ohjaus- ja käyttötapa, kuten termostaattiohjaus. Käyttötapaa voidaan kuvata käyttökertoimella.

Kiinteistön/ liittymän huipputeho (P_h)

Kiinteistön suurin tuntikeskiteho, jonka ylitystodennäköisyys on $<1\%$. Muodostuu laitteiden nimellistehojen ja käyttöprofiilien yhteisvaikutuksesta. Käytetään usein liittymän mitoituskeinoon.

Esimerkki tehoista, kuva 1.1: Sähkökiukaan nimellisteho $P_n = 7,5$ kW. Kiukaan termostaatti ohjaa kiukaan lämmityksen aikana vastuksia päälle ja pois. Minuuttitasolla teho vaihtelee nimellistehon ja nollan välillä. 15 minuutin tarkastelujaksolla teho (15 min. keskiteho) vaihtelee välillä 1 kW - 4,5 kW ja tuntikeskiteho 1 - 4 kW. Keskimäärin sähkösaunoissa käytetään vuodessa energiaa noin 1000 kWh, joka vastaisi tässä kohteessa saunomista noin 100 kertaa vuodessa ja vuosikeskiteho olisi siis noin 0,114 kW.



Kuva 1.1. Esimerkkikohteessa mitattu nimellisteholtaan 7,5 kW sähkökiukaan tehoprofiili eri mittausjaksopituuksilla.

Energiaa, ja myös sähkön tuotantoa ja kulutusta, tarkastellaan usein vain vuositason kokonaisenergiämäärinä. Järjestelmien, joissa on paljon erilaisia laitteita, mitoituksia tehdään suunnitteluvaiheessa tuntikeskitehojen pohjalta pääosin kokemukseräiseen tietoon ja laitteiden nimellistehoihin sekä käyttökertoimiin perustuen. Toteutuneita kulutusdataja tai seuranta-mittauksia hyödynnetään useimmiten vain uudistamis- tai muutostilanteissa. Erityisesti alle tunnin kulutusprofiileja tai niiden merkitystä tunnetaan huonosti.

Yksiköt

Watti (W) = käytetty energia aikayksikköä kohden (J/s). Pätehtö P yksikkö.

kilowatti (kW) = tuhat wattia (1 000 W)

Megawatti (MW) = tuhat kilowattia (1 000 kW) = miljoona wattia (1 000 000 W)

Gigawatti (GW) = tuhat megawattia (1 000 MW) = miljardi wattia (1 000 000 000 W)

2. Johdanto

Sähkövoimajärjestelmän toiminnan keskeinen tekninen reunaehto on kulutuksen ja tuotannon tasapaino. Tämä tasapaino tulee ylläpitää joka hetki ja samalla tulee varmistaa myös pitkän aikavälin tehonriittävyys. Lisäksi tulee varmistaa järjestelmän kustannustehokkuus ja kestävyys. Kestävyydessä hiilineutraalisuus korostuu ilmastonmuutoksen myötä ja johtaa merkittäviin energijärjestelmän muutoksiin, joista voidaan käyttää kokonaisnimitystä energiamurros.

2.1. Energiamurros ja muut muutostekijät

Siirtyminen hiilineutraaliin yhteiskuntaan on välttämätöntä, jotta ilmastonmuutoksen vaikutuksia voidaan rajoittaa. Useissa energiankäytön kohteissa tämä tarkoittaa fossiilisen energian korvaamista hiilineutraalisti tuotetulla sähköllä; esimerkkeinä siirtyminen polttomoottoriautoista sähköautoihin, lämpöpumppulämmitys tai raudan vetypelkistys. Tätä muutosta voidaan yleisesti kutsua sähköistämiseksi.

Sähköistämisen tavoitteena on nostaa koko järjestelmän hyötysuhdetta luopumalla polttoaineen polttamisesta niin voimaloissa kuin kulkuneuvojen moottoreissa. Tämä tulee aiheuttamaan sen, että sähkön käyttö kasvaa globaalisti erittäin paljon tulevien vuosien ja vuosikymmenten aikana. Sähkökulutuksen kasvuun vaikuttaa vahvasti se, kuinka paljon etenkin energiaintensiivistä teollisuutta sähköistetään tulevaisuudessa.

Esimerkiksi SSAB:n Raahen tehtaan siirtyminen fossiilivapaaseen tuotantoon (vetypelkistys ja valokaariuunit) kasvattaisi tehtaan vuotuista sähkönenergian käyttöä yli 10 TWh/a, mikä on yli 10 % Suomen vuotuisesta sähkönkäytöstä.

Tähän saakka sähkön käyttö on kasvanut melko tasaisesti ja ennustettavasti, mutta näköpiirissä olevien teknologiamurrosten myötä tulevaisuuden kehitystä ei voida ennakoida historiallisten muutosten perusteella. Lisääntyvä sähköntarve tulee täyttää hiilineutraalilla tuotannolla. Suomessa tuotantokustannuksiltaan edullisin vaihtoehto tällä hetkellä (2020) on tuulivoima, kun taas lähempänä päiväntasaajaa edullisin tuotantomuoto on aurinkovoima. Tulevaisuuden energijärjestelmässä on siis suuri määrä säätilan mukaan vaihtelevaa tuotantoa, jonka vaihtelu tulee tasapainottaa kysyntäjouston, energiavarastojen sekä joustavan tuotannon keinoin.

Vaikkakin sähkönkulutus tulee kasvamaan hyvin merkittävästi, pienenee primäärienergian² käyttö kasvavan hyötysuhteen ansiosta, mikäli sähkö tuotetaan uusiutuvalla energialla. Muunnettaessa tämä sähkö esimerkiksi liikkeeksi sähkömoottorilla, saavutetaan parempi hyötysuhde kuin öljyn muuntamisella polttoaineeksi ja sen polttamisella matalalla hyötysuhteella polttomoottorissa.

² Primäärienergiaa on esimerkiksi öljy, ennen kuin se on muunnettu polttoaineeksi autoon tai hiili, ennen kuin sillä on tuotettu sähköä ja kaukolämpöä voimalassa. Tuuli- ja aurinkovoiman tuottama sähkö luokitellaan suoraan sellaisenaan primäärienergiaksi.

Energiajärjestelmän suorien muutosten ohella on paljon muita yhteiskunnallisia, sosiaalisia ja demografisia muutostekijöitä, joilla on vaikutusta siihen, miten, missä, milloin energiaa käytetään ja missä sitä tuotetaan.

Hajautetut energiareсурssit (DER), kuten aurinkovoimalat ja kiinteistöjen akkujärjestelmät ovat muuttamassa verkkoasiakkaiden roolia pelkästä kuluttajasta kohti tuottajan roolia (prosumer). Tämä voisi mahdollistaa esimerkiksi kuluttajien välisen (P2P) kaupankäynnin sähköenergian osalta. Tämä asettaa myös sähköverkkoyhtiöille uusia haasteita. Suuritehoiset kulutuskohteet, kuten paljon sähköä käyttävä teollisuus, liittyvät usein suoraan siirtoverkkoon. Jakeluverkoissa pienemmille asiakkaille siirrettävä energia voisi laskea vuositasolla, mutta huipputehot pysyvät samana, elleivät jopa paikoin kasva, esimerkiksi sähköautojen ja lämpöpumppujen lisälämmittimien takia (Lassila et al., 2019). Verkkoyhtiöiden investointitarve pysyisi huipputehojen takia siis samana tai kasvaisi, jos tehot kohdistuvat samalle ajankohdalle. Tällöin verkkoa joudutaan niiden vuoksi vahvistamaan, mutta perinteisen energiapohjaisen hinnoittelun mukaan saatavat tulot laskisivat.

Kaupungistuminen on merkittävä muutostrendi sekä Suomessa että globaalisti. Tämä tiivistää väestö- ja työpaikkarakennetta ja lisää palveluiden tarvetta kasvukeskuksissa, maaseudulla vaikutus on päinvastainen. Muutos näkyy vastaavasti myös energiakäytössä. Maaseudulla tämä aiheuttaa haasteita erityisesti infrastruktuurin (sähkönjakeluverkot) ylläpidossa, kun palvelun käyttäjiä ja siten maksajia on vähemmän, mutta palvelutaso tulee ylläpitää. Kulutuksen keskittyminen suuriin kaupunkeihin ja etenkin pääkaupunkiseudulle ja samaan aikaan uuden tuotannon rakentuminen erityisesti Pohjanmaalle ja Pohjois-Suomeen (STY, 2020), asettuu kantaverkolle mahdollisesti suuria rasitteita.

Digitalisaatio mullistaa myös energia-alaa. Esineiden internet (IoT) mahdollistaa pientenkin energiankulutus- ja tuotantokohteiden yhdistämisen internetiin, näiden seuraamisen ja ohjaamisen reaaliajassa. Lisäksi tekoäly mahdollistaa näiden resurssien automaattisen ennustamisen ja ohjaamisen. Siten tehotasapainon hallinnassa olisi mahdollista hyödyntää pieniäkin resursseja. Tosin tähän ohjaamiseen liittyy monia turvallisuus- ja käyttäjätarpeisiin liittyviä haasteita.

2.2. Jousto verkon eri tasoilla

Jousto tarvitaan järjestelmän eri tasoilla eri tavoin. Sähköjärjestelmässä tulee olla tuotannon ja kulutuksen tasapaino koko järjestelmän tasolla. Tasapainon muutokset näkyvät verkon taajuudessa, joka on yhteinen koko pohjoismaisessa järjestelmässä. Tehotasapainon hallintaan voi osallistua sekä tuotanto että kulutus.

Tuotannon ja kulutuksen tasapainoa on perinteisesti ylläpidetty säätämällä voimalaitosten tuotantoa. Tässä keskeisessä roolissa ovat olleet lauhde- ja vesivoimalaitokset. Kulutuksen ohjaukseen ei kuitenkaan ole uusi asia; Suomessa on vuosikymmeniä ohjattu sähkölämmitystä yöajalle, kun muu kuormitus on ollut vähäisempää ja esimerkiksi ydinvoimaloiden tuotantoa ei ole voitu säätää. Sähkölämmityksessä on ollut myös tehonpudotusmahdollisuus, jolloin kuormitusta on voitu ohjata tarpeen mukaan lyhyeksi ajaksi pois päältä.

Tuotantorakenteen muuttuessa sisältämään entistä enemmän vaihtelevaa sääriippuvaa tuotantoa (tuuli ja aurinko) sekä perinteisesti tasaisesti ajettavaa ydinvoimaa kulutuksen tarjoaman jouston rooli tehotasapainon hallinnassa tulee korostumaan aiempaa enemmän. Kulutuksesta merkittävä osa on kytkeytynyt jakeluverkkoon, kuten esimerkiksi vuoden 2016 tammikuun 7. päivän huippukuormitustilanteessa (7.1.2016, klo 17-18, 15 105 MWh/h) kantaverkosta kulutukseen siirtyneestä sähköenergiasta 66,1 % siirtyi jakeluverkkojen kautta (Matilainen, 2016). Tästä syystä jakeluverkkoon kytkeytyvän kulutuksen joustolla on merkittävä rooli kantaverkkoon kytkeytyneiden teollisuuskuormien jouston lisäksi. Sähkön jakeluverkossa rajoittaviksi tekijöiksi tulevat tehonsiirtokapasiteetti ja jännitteenalenema. Vaikka Suomen jakeluverkoissa ei ole merkittäviä tehonsiirtoa rajoittavia pullonkauloja, voivat nämä tekijät tulla rajoitteeksi esimerkiksi tilanteessa, jossa suuri määrä sähköautoja ladataan samaan aikaan. Kustannustehokkuuden kannalta verkkoa ei kannata ylimitoitaa, vaan parempi vaihtoehto on joustava kulutus. Kiinteistötasolla puolestaan verkkoliittymä (pääsulakkeiden koko) ja verkkopalveluiden hinnoittelu (perusmaksu tai mahdollinen tehomaksu) rajoittavat tehonkäyttöä ja kannustavat joustoon kiinteistön tasolla. Jatkossa lisääntyvä omatuotannon tehokas hyödyntäminen edellyttää kiinteistökohtaista joustoa. Mahdolliset usean kiinteistön energiayhteisöt luovat lisätarpeita kulutuspuolelle joustoille.

Joustoa, eli kulutuksen ja tuotannon tasapainotusta, tarvitaan siten sähköjärjestelmän eri tasoilla eri tarpeisiin.

3. Jousto energiajärjestelmässä

3.1. Tuotannon jousto

Sähköntuotannon jousto voidaan luokitella esimerkiksi jouston aikajänteen perusteella. Pisimmillään aikajänne on useita vuosia eteenpäin, kun uuden tuotantokapasiteetin rakentamisesta tai vanhan tuotantokapasiteetin purkamisesta päätetään. Viime vuosina on nähty esimerkkejä molemmista, ja tämä on normaalia kehitystä toimivalla sähkömarkkinalla. Huoli tuotantokapasiteetin riittävydestä on kuitenkin aiheellinen, koska Suomi on pitkään ollut, naapurimaiden halvemmassa tuotantorakenteesta johtuen, alijäämäinen sekä vuosituotannon että huippukulutuksen aikaisen tuotantokapasiteetin suhteen. Jousto tehotasapainon ylläpitämiseksi onnistuu kuitenkin Suomea laajemman sähkömarkkina-alueen ja sähkön vienti- ja tuontimahdollisuuksien ansiosta. Sähkön siirtokapasiteetti tulisikin laskea mukaan järjestelmätarkasteluihin. Vaikka sähkömarkkinahäiriötä, jossa sähkömarkkinan tuotantotarjouksia ei ole riittävästi kysyntätarjouksiin nähden, ei ole koskaan tapahtunutkaan, varaudutaan siihen jatkuvasti ylläpitämällä tehoreserviä ja kantaverkon varavoimailaitosten avulla. Ajoittain sähköenergia on ollut lyhytaikaisesti erittäin kallista, mutta sitä on riittänyt kaikille. Myös vastakkainen ilmiö, jossa hyvin edullista tuotantoa on tarjolla enemmän kuin sille olisi käyttäjiä, on ilmennyt, jolloin sähköenergian hinta on paikoin ollut jopa negatiivinen. Muutoin uuden tuotantokapasiteetin rakentaminen tapahtuu täysin markkinaehtoisesti ja jokainen tuottaja harkitsee oman kilpailuasetelmansa kautta, millaiset mahdollisuudet uuden tuotantokapasiteetin rakentaminen luo. Tästä syystä ei ole omistajalleen kannattavaa rakentaa tuotantokapasiteettia, jolle ei kerry riittävästi käyttötunteja kustannuksiin nähden. Huipputuotantokapasiteettia, jota tarvitaan vain muutaman tunnin ajan vuodessa, on erittäin vaikea saada kannattavaksi pelkästään sähköenergian myynnillä.

Suomessa sähkönkulutuksessa ja siten tuotantokapasiteetin tarpeessa on vahva vuodenaikavaihtelu. Tähän varautuminen tapahtuu suunnitteleamalla ennakoita, kuinka vesivarastoja hyödynnetään. Erityisesti vesivoimavaltaisessa Norjassa tähän on erinomaiset mahdollisuudet. Sähkömarkkinoiden kautta Norjassa ja Ruotsissa tehdyt vesivoiman ajosuunnitelmat vaikuttavat myös suomalaisen tuotannon kannattavuuteen markkinoilla. Kausivarastoja sisältävää vesivoimaa ajetaankin strategisesti siten, että varastossa olevalle vedelle yritetään löytää mahdollisimman hyvä tuotto. Vesivoiman lisäksi kausivaihteluun on perinteisesti vastattu myös lauhdetuotannolla, mutta johtuen tuulivoiman yleistymisestä ja hiilidioksidipäästöjen pienentämistavoitteista sen kannattavuus on heikentynyt merkittävästi. Hiililauhde poistuu pian markkinoilta kokonaan.

Talven tuotantotarvetta on katettu myös yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon (CHP) avulla, kun kaukolämmölle on myös tarvetta. Hiilidioksidipäästöjen alentamisen vaikutuksesta kaukolämmöntuotanto on kohtaamassa sähköntuotannon ohella rakennemuutoksen. Tulevina vuosina vähenee CHP-kaukolämpökapasiteetti Suomessa lämpölaitosten ja lämpöpumppujen korvautessa hiilipohjaista CHP-tuotantoa. Osittain tätä muutosta tullaan kompensoimaan kausilämpövarastoilla, jollaisia on rakenteilla tai suunnitteilla usealle paikkakunnalle, kuten Helsinkiin ja Vantaalle. Lämmön kausivarastoon voidaan varastoida esimerkiksi lämpöpumpun avulla

edullista tuulivoimaa silloin, kun sitä on erityisen paljon tarjolla ja pysäyttää lämpöpumput, kun hinta nousee tai tehotasapainon säilyttämiseksi se on tarpeen. Kaukolämmön kuluttajat eivät huomaa varaston ansiosta sähkömarkkinan hintavaihteluita tai tuulivoiman tehonvaihteluita.

Merkittävä osa tuotannon ohjauksesta tapahtuu kuitenkin päivittäin sähkömarkkinoiden kaupankäynnin mukaisesti. Tuottajat laativat tuotantotarjouksia sähkömarkkinalle oman tuotantoportfolionsa kustannusten, tuotantoennusteiden (tuulivoima, CHP-kaukolämpö, jne.) ja sähkömarkkinan hintaennusteiden perusteella. Sähkön myyjät, jotka välittävät sähköenergiaa kuluttajille, tekevät puolestaan ostotarjouksia omien kulutusennusteiden, hintaennusteiden ja mahdollisten kysyntäjoustomahdollisuuksien perusteella. Sähkömarkkinan kaupankäynnin päätyttyä saa kukin tuottaja tietoonsa toteutuneet kaupat, jonka perusteella määräytyy hänen seuraavan päivän tuotannon ajo-ohjelmansa. Tällä tavalla saadaan tuotanto ja kulutus vastaamaan toisiaan tuntitasolla edellisen päivän ennusteiden pohjalta.

Koska ennusteet eivät ole koskaan täydellisiä ja yllättäviäkin asioita kuten tuotantoyksiköiden vikaantumisia, voi tapahtua, täytyy tehotasapainon ylläpidosta huolehtia vielä seuraavanakin päivänä. Päivää edeltävän sähkömarkkinan lisäksi on olemassa päivän sisäisen sähkömarkkina, jossa voi käydä jatkuvasti kauppaa mielenkiintoisista tarjouksista. Omaa ajo-ohjelmaa voi esimerkiksi täydentää ostamalla lisää tuotantoa päivän sisäiseltä markkinalta joltain toiselta tuottajalta, jos esimerkiksi edellisen päivän tuulivoimaennuste on ollut suurempi kuin viimeisin ja samalla tarkin ennuste. Vastaavasti päivän sisäiselle markkinalle voi koittaa myydä ylimääräistä tuotantoaan, jos tuulivoimaennusteet ovat olleet virheellisiä vastakkaiseen suuntaan. Tällä tavalla tuottaja voi ylläpitää tehotasapainoa omalta osaltaan ja välttää mahdolliset, virheestä johtuvat, kalliit kustannukset tuotantotaseen. Ylimääräisestä tuotannosta tuottaja toki pääsee helposti eroon ilman onnistunutta kauppaa vähentämällä tuulivoimalan ulostulotehoa. Tehotasapainon hallinnan kannalta päivää edeltävä ja päivän sisäinen sähkömarkkina ovat merkittävimmät työkalut. Tuotannon lisäksi, näille markkinoille osallistuvat myös kysyntäjousto ja varastot.

Tuotannon ajosuunnitelmaa voi siis muokata aina käyttötunnin alkuun saakka. Käyttötunnin alettua tuottajan velvollisuutena on noudattaa ajosuunnitelmaansa. Jos tuottaja ei sitä tee, niin hänelle kertyy tasevirhettä. Tuotannon tasevirhe yksistään ei kuitenkaan välttämättä johda säätötarpeeseen tehotasapainon ylläpitämiseksi, koska samanaikaisesti muiden tuottajien tai kulutustase voi poiketa vastakkaiseen suuntaan, joten ratkaisevaa säädön kannalta on koko järjestelmän nettotase. Käytännössä eri sähkömarkkinatoimijoiden vastakkaissuuntaiset tasevirheet kompensoivat toinen toisiaan, eikä varsinaista säätöä tarvita yhtä paljon kuin poikkeamia yksittäisissä taseissa on yhteenlaskettuna. Mitä laajempi sähköjärjestelmä on kyseessä, sitä enemmän tällaista tasevirheiden tasoittumista pääsee tapahtumaan. Käyttötunnin jälkeen selvitetään taseselvityksen kautta, kuinka paljon kukin sähkömarkkinan toimija joutuu maksamaan järjestelmätaseen korjauksesta. Periaatteena on, että ainoastaan ne toimijat maksavat, jotka ovat aiheuttaneet järjestelmän tasevirhettä. Jos oletetaan, että toimijoiden tasevirheet ovat normaali-jakautuneita, niin puolet yksittäisten toimijoiden tasevirheistä ovat hyödyllisiä ja puolet haitallisia järjestelmän tasevirheen kannalta. Lisäksi tasevirheen kustannus on hinnoiteltu siten, että

se on aina kalliimpaa kuin sähkömarkkinoilta saatava hyöty, joten toimijan kannattaa, jos suinkin mahdollista, oikaista taseensa.

Käytännössä tällä hetkellä tuotannon tuntitason ajosuunnitelmia noudatetaankin lähes täsmälleen johtuen tuotannon kyvystä reagoida tasepoikkeamiin. Sähköjärjestelmän tasevirhe muodostuukin pääasiassa kulutuksen tasevirheistä. Tuotannon reagointikyky käyttötunnin aikana korjata tasevirhettä koostuu monesta tekijästä, eikä siten ole yksistään riippuvainen tuotantoteknologiasta. Jotta tuottaja voi korjata käyttötunnin aikana tasevirhettään tarvitaan reaaliaikaisia mittauksia ja ennusteita tuotannosta. Lisäksi tasevirheen korjaus on joko täysin automatisoitava tai tilannetta on tarkkailtava valvomosta käsin. Tuotantorakenteen ollessa edelleen suhteellisen keskitettyä (pääosa tuulivoimastakin on keskitettyä ja laajamittaista tuotantoa), on tuottajilla nämä edellytykset kunnossa. Sähköntuotannon hajautuessa esimerkiksi pienimuotoisen aurinkovoiman muodossa, reaaliaikaiset mittaukset usein puuttuvat ja ennustettavuus siten heikkenee.

Tuotantotaseen ylläpitämisen kannalta ratkaisevaa on kuitenkin koko tuotantoportfolio ja sen kyky reagoida muutoksiin. Tuuli-, aurinko- ja vesivoimaa voidaan ajaa yhdessä, jolloin vettä säästetään ajankohtiin, jolloin tuulee ja paistaa vähemmän, ja vesivoiman osuutta kasvatetaan vastaavasti, kun tuuli- ja aurinkovoiman määrä on vähäisempi ja markkinoilla on kysyntää tuotannolle. Vesivoiman avulla voidaan reagoida riittävän nopeisiin tuuli- ja aurinkovoiman aggregoituun muutokseen. Vastaavasti voidaan hyödyntää myös tuuli-, aurinko- ja CHP-voiman yhteisajoa. Suurimittainen tuuli- ja aurinkovoima sijoittuvat käytännössä laajalle maantieteelliselle alueelle, jolloin voimalat eivät kohtaa täsmälleen samaa tuulennopeuden ja aurinkonsäteilyn vaihteluita ja ne voivat olla keskenään erisuuntaisia. Tällä tavalla merkittävä määrä nopeimpia tuotantotehon vaihteluita tasoittuu nettotuotannosta pois. Tuotantotehon tasoittumismalli (power smoothing) helpottaa käytännössä tuuli- ja aurinkovoiman ennustettavuutta ja tuotantotaseen ylläpitämistä merkittävästi. Myös järjestelmätason tasehallinta helpottuu samalla, jolloin järjestelmään voidaan integroida suurempia määriä tuuli- ja aurinkovoimaa, kuin yksittäisten voimaloiden tehonvaihteluita tarkasteltaessa.

Jos tuotantoportfoliossa ei ole riittävästi joustokykyistä tuotantoa taseen ylläpitämiseksi, niin myös tuuli- ja aurinkovoimaa voidaan tarvittaessa ohjata. Tämä kuitenkin edellyttää, että voimalaa ajetaan jonkin verran maksimitehopisteen alapuolella. Tällöin voimalalla on kyky säätää tehoaan sekä ylös- että alaspäin. Näin osalla tuuli- ja aurinkovoimaloita voidaan reagoida tuuli- ja aurinkovoiman vaihteluihin. Jos ohjattavuutta halutaan edelleen parantaa, niin osaan voimaloista voidaan integroida esimerkiksi akku tai varavoimalaitos, jonka avulla ohjattavuutta voidaan nopeuttaa ja toisaalta pienentää hukattavan energian määrää. Oleellista on ymmärtää, ettei minkään tuotantoportfolion tarvitse olla vakio vuorokauden ja vuodenaikojen yli, vaan tuotantoportfolion tulee pystyä seuraamaan markkinoille myytyä ajosuunnitelmaa.

Tekninen vastuu tehotasapainon ylläpitämisestä on järjestelmävastaavalla, joka Suomessa on kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj. Järjestelmävastaavan tehtävänä on ylläpitää tehotasapainoa käyttötunnin sisällä, kun tuotanto- ja kulutustaseiden nettotuloksessa on poikkeamaa. Tätä tarkoitusta varten Fingridillä on säätösähkömarkkina, jossa käydään kauppaa taajuuden palautus-

reservituotteilla. Säätosähkömarkkinan ehdot täyttävät tuotantoyksiköt, kulutusjousto ja varastot tarjoavat joustoa tälle markkinalle, mistä Fingrid ostaa sitä tarvittaessa. Tällä tavalla ylläpidetään tehotasapainoa ja vapautetaan taajuudensäätöreservejä uudelleen käytettäväksi 15 minuutin aikajaksolla.

Lähitulevaisuudessa sähkömarkkinan markkinayksikköä tullaan lyhentämään tunnista 15 minuuttiin. Tällä tavoitellaan sekä parempaa seurattavuutta kuormituksen vaihteluihin että tuotajien vastuun lisäämistä nopeasti vaihtelevan sähköntuotannon ennustamisessa ja tasehallinnassa. Suomessa erityisesti aamun nopeasti kasvava kulutus aiheuttaa haasteita teknisen tehotaseen ylläpitämisessä, koska tunnin markkinayksikkö on hyvin pitkä ajanjakso nopeissa muutoksissa. Tällaisessa tilanteessa tuotannon seurattavuus ajo-ohjelmaansa, kulutuksen ja tuotannon hetkellisissä arvoissa voi olla suhteellisen suurikin ero. Lyhennettäessä markkinayksikköä 15 minuuttiin, madaltuvat nämä ns. tunninvaihteen tase-erot merkittävästi. Samalla tuuli- ja aurinkotuottajien ajo-ohjelmat vastaavat tarkemmin fyysistä tehontuotantoa hetkellisellä tasolla. Hyvin todennäköisesti täysin uusiutuvaan sähköntuotantoon perustuvassa sähköjärjestelmässä markkinayksikköä tullaan edelleen lyhentämään. On jopa esitetty ajatuksia täysin reaaliaikaisesta sähkömarkkinasta, joka mullistaisi nykyisen sähkömarkkinarakenteen ja mahdollistaisi tehotasapainon ylläpitämisen aivan uudella tasolla.

Hetkellisen taajuuden ylläpitämisestä, mikä on tehotasapainon sähkötekninen indikaattori, huolehditaan Fingridin toimesta taajuuden ylläpitomarkkinoiden avulla. Fingrid ostaa näiltä markkinoilta reservejä (tuotantoa, kysyntäjoustoa ja varastoja), jotka sitoutuvat ylläpitämään kapasiteettia sähkötehon kasvattamiseksi ja alentamiseksi. Reservejä varataan koko Pohjoismaiden tasolla normaalitilanteita varten 600 MW:a ja häiriötilanteita (esimerkiksi suurimman tuotantoyksikön vikaantumisen varalta) varten 1 200 MW:a. Näiden reservien avulla varaudutaan siihen, että hetkellinen tehotasapaino säilyy vaikka täysin ennakoimattomia asioita tapahtuisi milloin tahansa ja silti sähköjärjestelmän tasapaino voidaan säilyttää. Vaihtelevan sähköntuotannon lisääntyessä vaikutukset näkyvät ensin hetkellisessä taajuudessa, joten tulevaisuudessa luultavammin tarvitaan normaalitilanteen reservejä nykyistä enemmän. Tästä on jo viitteitä, koska taajuuden laatu on heikentynyt viimeisen kymmenen vuoden aikana jonkin verran. Lisäksi teknologinen muutos sähköntuotannossa (invertterikytkentäisten voimalaitosten korvauksena suoraan kytkettyjä generaattoreita) pienentää sähköjärjestelmän inertiaa, mikä johtaa siihen, että entistä pienemmät tehonvaihtelut aiheuttavat suurempia taajuuden vaihteluita. Tämän haasteen ratkaisemiseksi reservimarkkinoille on hiljattain tuotu uusi tuote, nopea taajuusreservi, jonka avulla järjestelmävastaavat voivat tarvittaessa kasvattaa sähköjärjestelmän inertiaa.

Edellisten markkinapohjaisten keinojen lisäksi järjestelmävastaavilla on myös teknisiä keinoja tehotasapainon ylläpitämiseen. Yksi esimerkki tällaisista ovat tuotantoyksiköiden liittämiskaavimukset, jossa määritellään tekniset vähimmäisvaatimukset tuotantoyksikön ominaisuuksille, jotta yksikkö voidaan kytkeä sähköverkkoon. Vaatimukset eivät siten ole varsinaisesti joustoa, mutta ne takaavat edellytykset monen jouston toteuttamiseksi käytännössä ja toisaalta takaavat teknisesti järjestelmän toimivuuden. Liittämiskaavimuksissa on myös varauduttu tulevaisuuden tarpeisiin, jos esimerkiksi vaihteleva sähköntuotanto alkaa vaarantaa sähköjärjestelmän käytövarmuutta.

Kaikki uusi sähköntuotanto ei suinkaan tuo lisää joustoa sähköntuotantoon, vaikka tehotasapainon ylläpito tapahtuukin pääasiassa tuotannon jouston avulla. Hetkellisellä ja markkinayksikön tasolla pätevät edellä kuvatut periaatteet ja kunkin toimijan velvollisuuden tehotasapainon ylläpitämiseksi. Lisäksi tätä asiaa tulee tarkastella pidemmällä investointihorisontilla. Uusi tuotantokapasiteetti parantaa toki teknisesti Suomen kykyä säilyttää tehotasapaino myös kaikkein poikkeuksellisimpien tilanteiden aikana. Tällainen voisi olla esimerkiksi erittäin kylmä ajanjakso, jolloin kokonaiskulutus kohoaa merkittävän suureksi ja samanaikaisesti tapahtuu vikaantuminen sekä sähkönsiirtoverkossa, jolloin tuonti naapurimaista vähenee, että tuotantoyksikössä. Pidemmällä aikavälillä tulee kuitenkin tarkastella markkinatilannetta ja siinä tapahtuvia muutoksia uudesta tuotantoyksiköstä johtuen. Kannattamattomat sähköntuotantolaitokset poistuvat markkinoilta, koska uudemmat laitokset ovat tehokkaampia ja kustannuksiltaan edullisempia. Kalliimmille tuotantolaitoksille kertyy vähemmän käyttötunteja ja siten mahdollisuutta kattaa edes kiinteät kulut. Kyseiset laitokset pysäytetään kannattomina ja lopulta puretaan.

3.2. Tuotantoteknologiaista

Ydinvoima tuottaa Suomessa noin kolmanneksen kaikesta Suomessa tuotetusta sähköenergiasta. Ydinvoiman rakentaminen on hyvin kallista, mutta itse energiantuotanto on hyvin edullista alhaisten muuttuvien kustannusten takia. Tästä syystä esimerkiksi Suomessa ydinvoimalla tuotetaan tasaista niin sanottua perusvoimaa. Ydinvoima ei osallistu sähkövoimajärjestelmän joustavuuteen tuntitasolla, mutta on kylläkin merkittävä lähde inertialle ja siten ylläpitää järjestelmän taajuutta tehotasapainon nopeissa heilahteluissa. Ydinvoimalla olisi kuitenkin teknisesti hyvä joustokyky. Muun muassa Rankassa ja Saksassa ydinvoimaloita ajetaan jopa 20-30% teholla (Savolainen, 2015; Kepplet et al., 2012). Ydinvoimaloiden tuotantotehot ovat hyvin merkittäviä yhtä laitosta kohden. Vian sattuessa esimerkiksi voimalan muuntajassa, häviää sähkövoimajärjestelmästä hyvin suuri tuotantoteho kerralla. Sähkövoimajärjestelmän suurin yksikkökoko asettaa omat vaatimuksensa sähkövoimajärjestelmän joustavuudelle ja etenkin häiriöreserveille. Tämä on myös huomioitu rajasiirtoyhteyksissä, joiden siirtokapasiteettia rajoitetaan etukäteen mahdollisen vian varalta (Energiavirasto, 2019).

Yhteistuotantolaitos (combined heat and power, CHP) tuottaa sekä sähköenergiaa, että lämpöenergiaa. CHP-laitoksia löytyy kaukolämpöverkosta, teollisuudesta, sekä näiden yhdistelmiä. CHP-laitokset kykenevät tuottamaan sähköenergiaa suoraan sähköverkkoon, mutta myös teollisuuden tarpeisiin. Sama pätee myös lämpöenergiaan, mitä voidaan tuottaa kaukolämpöverkoon tai teollisuusprosessiin. CHP-laitos kykenee tuottamaan kumpaakin energiamuotoa suhteellisen joustavasti tarpeiden mukaan, säätämällä kuinka paljon höyryä kulkeutuu turbiiniin tuottamaan sähköä tai kaukolämpöpiiriin lämpöä.

Erillistuotanto, tai lauhdetuotanto, on tuotantoa, joka tuottaa vain sähköä. Kivihiilivoima, kaasuvoima ja dieselgeneraattorit ovat esimerkkejä tällaisesta tuotantomuodosta. Huomioitavaa on, että edellä mainitut voimalatyypit voivat olla myös yhteistuotantolaitoksia. Tällaisia tuotantolaitoksia, joiden polttoaineilla on korkea hinta, yleensä käytetään silloin, kun sähkön kysyntä, kuten myös sähkön hinta, on korkeimmillaan. Joitain tällaisia laitoksia, kuten kaasuvoimaloita, voidaan myös käyttää häiriöreservinä.

Kaukolämpöverkosta löytyy myös voimalaitoksia vain kaukolämmön tuotantoon. Tällaiset lämpölaitokset, kuten öljykattilat, ovat tarkoitettuja huippukysynnän hetkiin. Polttoaineen kustannus on paljon korkeampi, kuin verrattavien muiden tuotantomuotojen, joten käyttötunnit ovat vuodessa hyvin matalat. Tarkoituksena on täyttää kysyntää silloin, kun muu tuotanto ei riitä. Alhainen sähkön markkinahinta voi kuitenkin johtaa siihen, että uutta CHP laitosta ei kannata rakentaa, vaan taloudellisempi ratkaisu on ainoastaan lämpöä tuottava laitos. Tällaisen päätöksen eteen voidaan tulla, mikäli olemassa oleva laitos tulee käyttöikänsä päähän ja se täytyy korvata uudella.

Vesivoima on Pohjoismaissa hyvin merkittävässä asemassa, etenkin Norjassa ja Ruotsissa, mutta myös Suomessa. Pääasialliset tuotantomuodot vesivoimalle ovat suoraan virtaukseen perustuvat voimalat joissa, sekä patoaltaisiin perustuvat voimalat. Vesivoiman tuotanto on erittäin hyvin säädetävissä varastoaltaiden ansiosta, joiden koot vaihtelevat vuorokausivarastoista hyvin suuriin kausivarastoihin. Mahdollisia ongelmatilanteita aiheuttaa vähäsateiset jaksot, sekä kevättulvat. Etenkin kevättulvien aikana vesivoimaloita on ajettava lähes täydellä teholla, jolloin säätövaraa jää hyvin vähän. Vesivoima tarjoaa erittäin hyvää säätövoimaa edullisesti ja sillä on merkittävä asema esimerkiksi säätösähkömarkkinoilla (Frantti, 2018).

Maakaasua, eli metaania tai biokaasua voidaan polttaa niin kaasumoottoreissa, kuin -turbiineissa. Kaasuvoimalaitos voi tuottaa vain sähköä tai myös kaukolämpöä sähkön lisäksi. Kaasuvoimala voi koostua pelkästä kaasumoottorista tai -turbiinista (avokierto), tai siihen voi olla liitettynä myös höyryvoimalaitos (yhdistetyn syklin voimala, kombilaitos), mikä käyttää hukkalämmön hyödyksi ja parantaa hyötysuhdetta. Kaasuvoiman rakentaminen on suhteellisen edullista, mutta muuttuvat kustannukset, eli pääasiassa polttoaine, ovat hyvin korkeat, verrattuna muihin energiantuotannon muotoihin, kuten ydin- tai vesivoima. Kaasuvoimala kykenee tarjoamaan hyvin nopeaa tehonsäätöä, sekä se kykenee käynnistymään hyvin nopeasti. Voimala, jossa on vain kaasumoottori tai -turbiini, on nopeampi reagoimaan tarvittaviin muutoksiin, kuin yhdistetyn syklin voimala.

Suomen käyttämästä sähköstä noin 20 % tuodaan ulkomailta, niin Ruotsista, Norjasta, Virosta, kuin Venäjältä. Ruotsista ja Norjasta on iso osa vuodesta saatavilla hyvin edullista sähköä, pääasiassa vesivoiman ansiosta. Tätä edullista sähköä käytetään siirtoyhteyksien kapasiteetin rajoissa mieluummin, kuin käynnistetään esimerkiksi kaasuvoimaloita. Korkeajännitteiset tassa sähköyhteydet (HVDC) Ruotsista, Virosta ja Venäjältä tarjoavat tehoelektroniikkansa ansiosta erittäin hyvää joustavuutta. Myös eri vikatilanteissa nämä siirtoyhteydet ovat erittäin kriittisessä asemassa kattamassa maiden sisäisiä tehotasapainoja.

Tuulivoima on sääriippuvaista ja sen tuotanto muuttuu hyvin voimakkaasti tuulen mukaan. Tyypillisesti tuulivoimala tuottaa sähköä tuulen nopeuden saavuttaessa noin 3 m/s ja lopettaa tuotantonsa tuulen saavuttaessa 21-25 m/s. Tuulivoimala tuottaa lähtökohtaisesti hyvin heikosti joustavuutta sähkövoimajärjestelmälle. Tuotantoa voidaan ajaa alaspäin, jos voimajärjestelmän taajuus uhkaa nousta liian korkealle tai tuottajan tase on menossa epätasapainoon. Tuulivoimalan tehon ylössäätö onnistuu, jos voimalaa ajetaan strategisesti hieman maksimitehopisteen alapuolella. Paikallisesti tuulivoimapuisto voi tuottaa tehoelektroniikan ansiosta jännitteen hal-

lintaa. Tuulivoima on hyvin ennustettavissa, joten muuta tuotantoa voidaan ohjata ennakkoivasti. Tuulivoima tuottaa merkittäviä joustotarpeita tulevaisuudessa, joita on käsitelty myöhemmissä luvuissa.

3.3. Kulutuksen jousto

Sähkön kulutuksen joustoon on vaikutettu pääosin sähkön hinnoittelulla ja epäsuorasti energiatehokkuusvaatimuksilla. Liittymän huipputeho on vaikuttanut sekä liittymän hintaan että sähkön siirron perusmaksuihin ja mahdollisesti tehomaksuun. Suurien sähkölaitteiden päälle- ja poiskytketymisen vaikutuksia sähkön laadulle pyritään rajoittamaan sähköntoimitusehtojen ohjeilla. Lisäksi 1990-luvulle asti sähköyhtiöillä oli ohjeita, joita noudatettiin määräysluonteisina, koskien erityisesti sähkölämmitysasennuksia ja niiden ohjattavuutta.

Kulutuspuheen jousto nähdään usein vain kulutuksen rajoittamisena tai siirtämisenä toiseen ajankohtaan, vaikka jatkossa voi syntyä tarpeita myös lisätä kulutusta ylituotantotilanteissa. Samoin omatuotannon hyödyntäminen paikallisesti edellyttää kulutuksen jouston lisäämistä. Kulutuksen jouston tarjoaminen eri joustomarkkinoille aggregaattorin välityksellä tarjoaa myös uuden tavan hyötyä joustoresursseista. Kuluttajapuheen jousto ja niiden toteuttaminen liittyy aina kulutuskohteen järjestelmä- ja ohjausratkaisuvaihtoihin ja asennusten rakenteisiin.

Kulutuspuheen jousto yksittäisen kohteen osalta vaikuttaa liittymän koon ja omatuotannon hyödyntämisen lisäksi muuntopiiriin mitoitukseen. Lisäksi kulutusjousto muuttaa asiakkaan käyttäytymistä ja näkyy sähkönmyyjän ennustevirheinä ennekuin ennustejärjestelmä oppii kuluttajan uudentyypin käyttäytymisen. Kokoamalla suuri joukko ohjattavaa kuormaa voidaan muodostaa myös markkinoille sopiva kokonaisjoustokuorma.

Jousto voidaan tehdä kiinteistön sisäisenä toimintona tai ulkopuoliseen ohjaussignaaliin perustuen. Sisäistä jousto-ohjausta, joilla ennen kaikkea vaikutetaan liittymän kokoon ovat esimerkiksi:

- risteilykytkennät, kuten sähkölämmityskohteissa laajasti toteutettu ns. kiuasristely
- tehovahdit, jotka liittymän kokonaisvirran perusteella kytkevät ennalta päätettyjä kuormia pois
- dynaamiset kuormat, jotka liittymän kokonaisvirran mukaan säätävät omaa ottotehoaan
- omatuotannon käytön aktiiviset ohjauslaitteet, jotka kytkevät sopivat kuormat, kuten vedenlämmityksen, päälle tuotannon kanssa samaan aikaan, jos tehoa alkaa virrata sähköverkkoon päin.
- kiinteistöautomaatio tai kotiautomaatiojärjestelmä, joka ohjaustiedon tai hintatiedot pohjalta ohjaa kuormia päälle ja pois tai tekee tehoalennuksen ja noston.

Ulkoista jousto-ohjausta ovat esimerkiksi:

- sähkön hinnoitteluun perustuva aikaohjaus, josta esimerkki on laajasti käytössä ollut yö- päiväsähköohjaus tai tuntihinnoiteltu sähköenergia. Tällöin sähköenergiamittarin ja

aiemmin erillisen kellolaitteen avulla annetaan kuluttajalle sähkön hintatieto sekä siirron että energian osalta. Ohjaustiedon perusteella kytkeytyy esimerkiksi varaavia lämmityksiä päälle tai pois.

- Ulkopuolinen palvelutarjoaja ohjaa kulutuslaitteita, kuten lämmitystä tai lämminvesivaraajaa sähkön kokonaishinnan ja/tai joustotarpeen mukaisesti.

Vuorokausi- ja päivänsisäiset markkinat

Joustavan kulutuksen huomiointi portfolion optimoinnissa osana myyjän tai aggregaattorin energiasalkkua voidaan toteuttaa vuorokausi (day-ahead) ja päivänsisäisillä (intraday) markkinoilla. Jousto voi olla myyjän kannalta passiivista (loppuasiakas tekee joustopäätöksen kertomatta siitä myyjälle) tai aktiivista (myyjä/aggregaattori tekee päätöksen loppuasiakkaan puolesta tai yhteistyössä hänen kanssaan).

Passiivinen hintaohjaus, jossa kuluttaja tekee ohjauspäätöksen hintojen perusteella, on periaatteessa toimiva keino pienentää kulutusta korkeiden hintojen aikana, jolloin tuotannossa joudutaan käyttämään kalliita huipputuotantolaitoksia. Käytännössä ongelma on siinä, että kulutus päätös tehdään tukkumarkkinakaupankäynnin jälkeen, kun sähkön myyjä on jo hankkinut markkinalta tarvittavan energiamäärän. Kulutuksen ennakoimaton pienentyminen johtaa tasevirheeseen ja siten lisäkustannuksiin, kun toteutunut käyttö eroaa hankitusta määrästä. Käytännössä kulutuksen hintaelastisuus opitaan ennakoimaan, mikä pienentää tasevirheen riskiä.

Aktiivisella ohjauksella vältetään em. tasevirheen riski, ja voidaan osallistua myös nopeammille markkinoille (päivän sisäinen, säätösähkö- ja reservimarkkinat), mikäli ohjaukselle ja mittaukselle asetetut tekniset vaatimukset täyttyvät.

Säätösähkö- ja reservimarkkinat

Kulutus kykenee osallistumaan säätösähkö- ja reservimarkkinoille, siinä missä tuotantokin. Nämä markkinat huolehtivat käyttötunninaikaisesta säädöstä siten, että tuotannon ja kulutuksen välinen tasapaino voidaan ylläpitää ennustevirheistä tai vikatilanteista huolimatta.

Säätösähkömarkkinoilla tarjouksia voi jättää viimeistään 45 minuuttia ennen käyttötunnin alkua. Minimitarjouskoko on 10 MW (5 MW, jos käytössä on elektroninen aktivointi) ja tehonmuutoksen pitää aktivoitua 15 minuutin kuluessa pyynnöstä.

Pääasialliset reservimarkkinat ovat taajuusohjatut käyttö- ja häiriöreservit, sekä nopea taajuusreservi. Näitä reservejä käytetään erilaisissa taajuuden poikkeustilanteissa, kun taajuus eroaa nimellisestä 50 Hz arvosta. Tavoitteena näillä reserveillä on tasapainottaa sähkövoimajärjestelmää ja palauttaa tehotasapaino. Markkinapaikasta riippuen minimitarjouskoko on 0,1 - 1 MW ja aktivoitumisaika taajuuspoikkeamassa joitakin sekunteja.

Etenkin teollisuudesta löytyy hyvin suuria kuormia, joita voidaan ohjata nopeasti. Kuten edellä kuvatut minimitarjousrajat kertovat, ei yksittäinen pienkuluttaja voi osallistua näille markkinoille. Pieniä kulutuskohteita voidaan kuitenkin yhdistää eli aggregoida markkinoille siten, että

minimitarjousrajat ylittyvät. Tätä edesauttaa digitalisaatio sekä koti- ja taloautomaation kehittyminen. Aggregoitaessa suurta joukkoa kulutuskohteita pienennetään myös yksittäisen kuluttajan kulutuksen stokastisuudesta aiheutuvia riskejä.

Paikallinen jouston hyödyntäminen

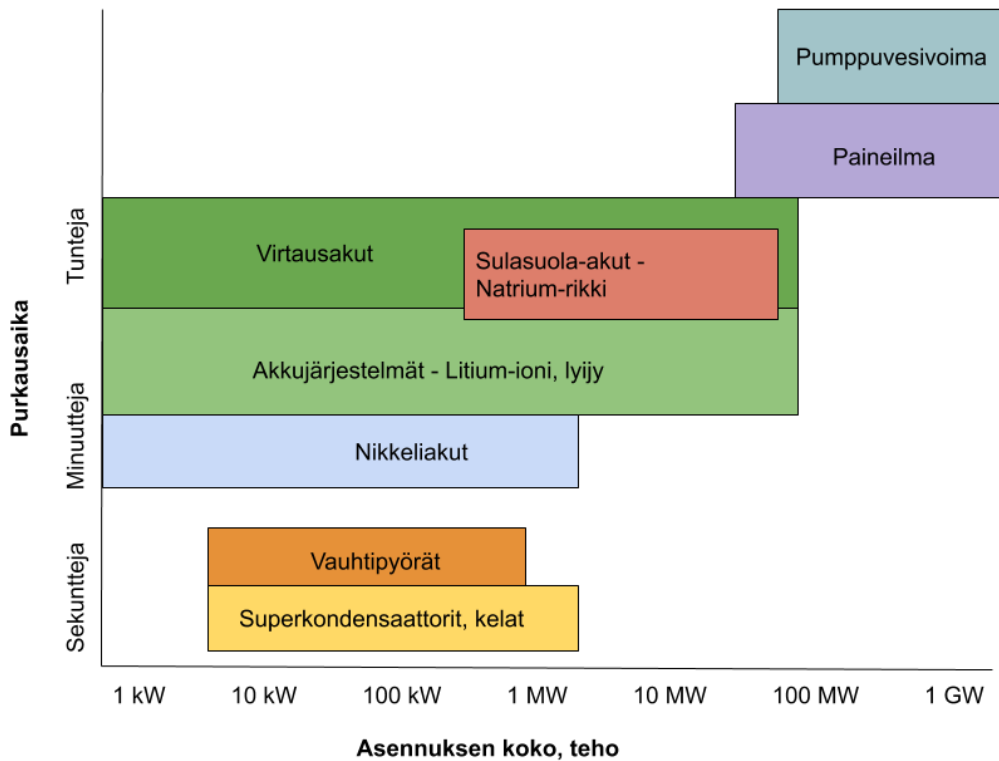
Edellä kuvatut markkinapaikat ovat osa pohjoismaisia sähkömarkkinoita, ja niiden tarkoituksena on markkina-alueen tai yksittäisen maan tehotasapainon hallinta ja eri sähkömarkkinaosapuolien taseiden hallinta. Tämän lisäksi joustoa voitaisiin käyttää myös paikallisesti, jakeluverkon pullonkaulojen ja vikatilanteiden hallintaan. Esimerkiksi mikroverkkoa voitaisiin käyttää saarekkeena akkuenergiavaraston avulla syöttävän verkon vikatilanteen aikana, ja akkuvaraston riittävyttä voidaan pidentää pienentämällä kuormituksia tällaisessa tilanteessa. Esimerkki tällaisesta saarekoituvasta mikroverkosta on Fortumin ja Elenian akusto (Elenia 2020), jossa akkua käytetään normaalitilanteessa taajuusreservimarkkinalla ja vikatilanteessa samaa akkua käytetään sähkönsyötönvarmistukseen paikallisen mikroverkon alueella.

Tällainen paikallinen jouston hyödyntäminen on vasta kehittymässä, ja esimerkiksi markkinapaikkoihin liittyvää kehitystyötä on menossa useissa tutkimusprojekteissa. Muutoksia tarvitaan vielä mm. sähköverkkoliiketoiminnan valvontamalliin, jotta verkkoyhtiöillä olisi taloudelliset kannusteet hyödyntää joustoa verkkoinvestointien sijasta.

3.4 Energiavarastot

Energianvarastointi perustuu siihen, että energia muunnetaan sellaiseen muotoon, jossa sitä on helpompi säilyttää, kuten potentiaali-, kineettiseksi-, lämpö- tai kemialliseksi energiaksi. Tässä keskitytään erityisesti sähköenergian varastointiin em. energiamuodoissa.

Energiavarastot terminä käsittää useita eri varastointimuotoja ja useita eri käyttökohteita. Pääasiallinen tehtävä energiavarastoille on varastoida energiaa yhdestä hetkestä toiseen. Sähköenergian varastointitekologioita on useita. Sähköä voidaan varastoida kemiallisiin akkuihin, kuten lyijy-, litium-ioni-, virtaus- ja sulasuola-akkuihin, mekaanisiin varastoihin, kuten pumppuvoimalaitoksiin tai vauhtipyöriin, sekä polttoaineena, kuten vety tai synteettinen metaani. Kuvassa 3.1 niitä on eritelty tyypillisten asennuskokojen ja energiakapasiteettien mukaan. Lisäksi sähköenergiaa voidaan varastoida myös lämpönä.



Kuva 3.1. Eri sähkövarastojen tyypilliset asennuskoot ja purkausajat³ (Muokattu (IRENA, 2017)).

Tuulivoiman yleistyessä kasvaa tarve energiavarastoille, joilla on kyky varastoida energiaa useiden tuntien, jopa vuorokausien tarpeeseen, sekä kyky säilyttää tämä energia hyvinkin pitkäksi aikaa tulevaisuuteen. Tällaisen varaston pääasiallinen tarkoitus on luovuttaa energiaa silloin, kuin muuta tuotantoa ei ole saatavilla. Esimerkkejä tällaisista varastoista on pumppuvesivoima, paineilma ja erilaiset synteettiset polttoaineet.

Akkujärjestelmä avulla voidaan yhteensovittaa kiinteistöissä päiväajan omatuotanto aamu- ja iltapäivän huippukulutuksen kanssa. Tämä parantaa omatuotannon kannattavuutta, koska myytävästä sähköstä saa vain noin kolmanneksen ostosähkön hinnasta (ostosähkössä maksetaan sähköenergian lisäksi siirtomaksu ja sähkövero). Samanlainen ajattelu voidaan viedä paljon isompaan mittakaavaan tuulivoiman yhteydessä. Jos tuulivoima tuottaa energiaa silloin, kun kulutus koko maassa on matalampaa, joudutaan yleensä joko tuulituotantoa tai muuta tuotantoa rajoittamaan, ja täten syntyy taloudellinen menetys. Energiavarastolla tämä voitaisiin välttää ja tuotettu energia voitaisiin käyttää myöhemmin, kun sille on tarvetta.

Lämpövarastoa, kuten lämpökaivoa tai vesivaraajaa käytettäessä omatuotanto voidaan varastoida pidemmäksi aikaa yksittäisessä kiinteistössä. Lämpövarastoja voidaan lämmittää esimerkiksi edullisemmän sähkön aikana, ja ne kykenevät luovuttamaan myöhemmin lämpöenergiaa,

³ Purkausaika (discharge time) kuvastaa varaston kykyä luovuttaa energiaa nimellisteholla.

kun sähkön hinta on korkeampi tai uusiutuvan tuotannon määrä on alhaisempi. Lämpönä varastoinnin yleisiä muotoja ovat lämminvesivaraajat tai varaavat sähkölämmitykset lattioissa tai muissa rakenteissa. Samanlainen varasto voidaan toteuttaa kaukolämpöverkkoon hyvin suuressa mittakaavassa, kymmenien tuhansien litrojen lämminvesi- tai lämpövarastoina. Hyvin eristetyt ja massiivisen rakenteet hidastavat lämpötilan muutoksia rakennuksissa ja mahdollistavat epäjatkuvan lämmityksen. Lämpöä voidaan varastoida myös maahan, kuten lämpökaivoihin, sekä sulasuolaan, jota käytetään muun muassa keskitettävissä aurinkovoimaloissa (CSP). Osa lämpövarastoista kykenee säilömään lämpöä jopa kuukausiksi. Tällaisia varastoja voidaan varata esimerkiksi syksyn hyvätuulisina hetkinä ja purkaa talvella vähätuulisina hetkinä. Lämmön varastointia on myös kylmävarastot, joilla etenkin teollisuusluokan kylmiöissä voidaan saavuttaa mahdollista lisäjoustavuutta laskemalla lämpötiloja sähkön edullisen hinnan tai ylituotantoajankohdan aikana.

Merkittävä käyttökohde energiavarastoille on myös tukea koko sähkövoimajärjestelmää tai paikallisia jakeluverkkoja. Varastoimalla ylimääräistä energiaa tai purkamalla energiaa varastosta tiettyinä hetkinä voidaan saavuttaa useita hyötyjä ja taloudellisia etuja. Esimerkkinä tällaisesta edusta on muun muassa huipputehon pienentäminen jakeluverkossa, mikä voi mahdollistaa tarvittavien investointien siirtämistä myöhempään hetkeen niin kaapeloinnin kuin muuntajien osalta. Sähköenergiavarastoilla voidaan myös pienentää syntyvää huipputehoa laajemmassa mittakaavassa ja näin vähentää tarvetta investoida energiantuotantoon, jolle ei ole tarvetta kuin joitain tunteja päivässä. Akkujärjestelmät mahdollistavat jakeluverkoissa hyvin tehokkaan ja nopean jännitehallinnan. Jänniteongelmat voivat olla ajankohtaisia suurien yhtäaikaisten kuormien, jotka saattavat johtaa alijännitteeseen, sähkön laadun heikkenemiseen ja laitteiden toiminnan häiriytymiseen, yleistyessä. Sen sijaan, että investoitaisiin jakeluverkon infrastruktuuriin, akkujärjestelmä voisi olla vaihtoehtoisena ratkaisuna mahdollisesti edullisemmin ja samalla tarjoten monia muita hyötyjä verkon käyttäjille. Sähköenergiavarastot kykenevät myös hyvin tehokkaasti osallistumaan koko sähkövoimajärjestelmän kattavaan tehotasapainon hallintaan eli tuottamaan palveluja, joilla voidaan säätää taajuutta eri tilanteissa.

Energiavarastojen määrä tulee kasvamaan hyvin merkittävästi osana energijärjestelmän siirtymistä hiilineutraaliuteen. Etenkin akkujen määrä sähkövoimajärjestelmässä tulee kasvamaan merkittävästi muun muassa kiinteistöjen, datakeskuksien ja sähköautojen akkujärjestelmien myötä. Energiaintensiivisen teollisuuden sähköistyessä etenkin vetyyn perustuvien ratkaisujen kautta, syntyy merkittävä tarve varastoida vetyä. Myös kaukolämmön sähköistyminen tulee näkymään merkittävänä tarpeena lisätä hajautettuja ja keskitettyjä lämpövarastoja.

4. Sähkön käytön muutokset ja joustomahdollisuudet

4.1. Sähkön kulutusmuutos rakennuskannassa

Rakennuskannan muutoksilla vuoteen 2035 mennessä on vaikutusta sekä energian kulutukseen että tehotarpeeseen. Sähkön kulutukseen ja joustokykyyn vaikuttavat rakennuskannan uudistuminen poistuman ja uuden rakentamisen kautta sekä korjausrakentaminen. Energiatehokkuusvaatimukset aiheuttavat muutosta energian käytössä ja myös lämmitystapavalinnoissa. Uudet kulutuskohteet, kuten sähköautot ja paikallinen tuotanto muuttavat kiinteistöjen tehoprofiilia.

Asuntorakennuskannasta, joka muodostaa yli 60 % koko rakennuskannan pinta-alasta, poistuman arvioidaan olevan noin 11 % vuoteen 2035 mennessä. Palvelurakennuksista, jotka muodostavat 26 % rakennuskannasta, poistuma on vastaavana aikana noin 15 % (Kurvinen ym. 2020). Loppuosa, n. 10 % osa rakennuskannasta on pääosin teollisuusrakennuksia. Asuntojen uudistuotanto vastaa tarkasteluajanjaksona määrällisesti poistumaa, mutta palvelurakennuksissa rakennuskanta saattaa jopa hieman pienentyä. Uudisrakentaminen keskittyy suurimpiin kaupunkiseutuihin, ja esimerkiksi asuinrakentamisesta noin 90 % keskittyy 14 suurimpaan kasvukeskukseen. (Vainio, 2020). Rakennuskannan muutos vaikuttaa siis lämmitystapoihin, rakennusten tyyppeihin ja sijoittumiseen sekä lämmitysenergian tarpeeseen. Toisaalta se mahdollistaa myös toteuttaa uusia kulutusjoustoja automaation lisääntyessä.

Seuraavassa on esitetty arviota tehotarvemutoksista. Ne perustuvat rakennuskannan muutostarvioihin, eri lämmitystapojen sähköteho vaikutuksiin ja mallinnuksiin. Arvioita on käsitelty tarkemmin hankkeen taustaraporteissa.

Olemassa olevien asuinrakennusten lämmitystapamuutokset

Vanhan rakennuskannan lämmitysmuodoissa vuoteen 2035 mennessä aiheuttaa suurimmat lisäykset sähkötehon tarpeelle öljylämmityksen korvautuminen pääosin lämpöpumppuihin perustuvilla ratkaisuilla, kerrostalojen poistoilmalämpöpumppujen yleistymisen ja osin siirtymisen kaukolämmöstä maalämpöön tai ilma-vesilämpöpumppuratkaisuihin. Energiaremonteilla, kuten ikkunoiden uusimisella ja ilmanvaihdon lämmön talteenoton lisäämisellä, voidaan pienentää lämmitystehon tarvetta, mutta samalla saattaa sähkötehon tarve kasvaa. Lämmitystapamuutokset aiemmin ei-sähkölämmitteisissä kohteissa lisäävät sähkötehon tarvetta arvioilta noin 2 000 MW.

Olemassa olevissa sähkölämmityskohteissa, joista valtaosan muodostavat omakotitalot ja rivitalot, lämmityslaitteiden asennettu nimellisteho (asennusteho) on yhteensä noin 6 600 MW, josta lämpimän käyttöveden lämmitys asennusteholtaan on noin 1800 MW. Asennusteholla on merkitys ennen kaikkea pitkien sähkökatkojen jälkeen. Sähkölämmityksen huipputehon tarve on normaalissa tilanteessa alhaisempi, arviolta noin 5 200 MW ja käyttöveden lämmityksen n. 350 MW, mikäli lämmitys tapahtuisi jatkuvana. Energiaremontit pienentäisivät tilalämmityksen huipputehotarvetta arviolta 10 – 20 %. Sähkölämmityskohteiden poistuman, energiaremonttien ja lämmitystapamuutosten kokonaisvaikutuksesta sähkölämmityskohteiden sähkötehon tarve pienenee arviolta noin 1 000 MW.

Kokonaisvaikutus sähkötehoon lämmitystapamuutoksilla ja poistumalla on siis noin 1 000 MW tehotarvelisäys. Tilojen lämmityksen sähkötehon tarve, arviolta 6 200 MW, olisi lämpötilariippuvaa, siten, että huipputehotarve ajoittuisi kylmimpään aikaan vuodesta ja suurimman osan lämmityskautta se on lämpöpumppuratkaisuissa n. 1/3 huipputehon tarpeesta ja sähkölämmityskohteissa n. ½ huipputehosta. Käyttöveden lämmittäminen tulee laitetehtona muodostamaan noin 1500 - 2000 MW:n asennustehon, mutta teho vaikutus tasaisena kuormana on noin 350 MW. Käyttöveden tehotarpeeseen tulee vaikuttamaan myös eri lämpöpumppuratkaisujen valinnat ja niissä käytettävät varaajakoot.

Olemassa olevissa sähkölämmityskohteissa arviolta n. 60 prosentissa on ns. ”yösähköohjaus” ja lämmitystehoista noin puolet on myös ohjattavissa erillisellä tehorajoituksella. Sähkölämmityskohteissa on arviolta vuonna 2035 minuutti- ja tuntijoustavaa tilalämmityskuormaa n. 2000 MW ja käyttöveden lämmitystä n. 300 MW, mikäli ohjausratkaisuja ei merkittävästi lisätä niissä kohteissa, joissa ei ole valmiina ohjauskytkentöjä.

Uudisrakentaminen

Uudisrakentamisessa rakennukset tulevat olemaan lähes nollaenergiataloja. Tämä vaikuttaa sekä lämmitysenergian tarpeeseen että lämmitystapoihin. Asuinrakennusten uudistuotannon vaikutus sähkötehotarpeeseen lämmityksen osalta on vähintään noin 500 MW. Tehotarpeen suuruuteen vaikuttaa ennen kaikkea kerrostalokannan lämmitystapavalinnat. Mikäli kaukolämmön osuus vähenee ja korvautuu lämpöpumppuperusteisilla ratkaisuilla tai sähköllä toimivilla ilmalämmityksillä, voi tehotarve olla noin 1000 MW.

Lämpöpumppuratkaisuissa on mahdollisuus tehojousto- ja tuntitasolla. Varaajakokoja suurentamalla voitaisiin tehdä jopa vuorokausitasoista joustoa. Jatkuvat toimisen lämmityksen ohjaus epäjatkuvaiksi aiheuttaa vastaavasti suuremman tehotarpeen ja myös energian kulutuksen lämmitysjakson aikana.

Asuinrakennusten lämmityksen osalta voidaan arvioida sähkötehon huipputehotarpeen olevan vuonna 2035 noin 1500 – 2000 MW suurempi vuoteen 2020 verrattuna. Jousto-ohjattavaa, mutta lämpötilariippuvaa tehoa olisi noin 3000 – 4000 MW. Veden lämmitystehoa olisi lisäksi noin 500 MW. Tällöin suurimman osan lämmityskautta, jolloin ulkolämpötila on +5 - -5 °C astetta joustavaa lämmityskuormaa olisi noin 2000 – 2500 MW.

Vapaa-ajan asunnot

Vapaa-asuntokannasta noin puolessa on sähkölämmitys ja ympärivuotinen lämmitys noin kolmasosassa. Suurimmassa osassa vuokramökkejä on sähkölämmitys. Nämä yhdessä muodostavat noin 800 MW:n asennustehon. Lämmitystehon tarvetta pienentää matala sisälämpötila poissaoloaikoina. Ilmalämpöpumpuilla voidaan pienentää energian tarvetta, mutta ei niinkään vaikuteta huipputehotarpeeseen. Loma-asunnoissa on suuntauksena nähtävillä toisaalta huonokuntoisten poistuma ja toisaalta lämmitettyjen, korkeasti varustettujen vapaa-ajan asuntojen lisääntyminen. Niissä myös etäohjaus- ja automaattioratkaisut lisääntyvät, joilla lämmityksen

ohjaaminen lisääntyy. Loma-asunnot voisivat tarjota joustoon 100 – 300 MW:n jouston suurimman osan lämmityskautta.

Palvelukiinteistöt

Palvelukiinteistöistä poistuman, uudistuotannon ja energiatehokkuuden parantamisen myötä kaukolämmön käyttö vähenee ja lämpöpumppujen käyttö yleistyy. Tämän voidaan arvioida aiheuttavan 200 – 300 MW:n sähkötehotarpeen lisäyksen. Toisaalta muu sähkön käyttö tehostuu valaistuksen ja tarpeenmukaisen ilmanvaihdon osalta. Palvelukiinteistöissä automaatio mahdollistaa monipuolisen joustojen hyödyntämisen.

Saunat

Saunojen sähkökiukaat muodostavat suuren asennustehokokonaisuuden, arviolta noin 10 000 - 11 000 MW. Saunojen käyttö ajoittuu tyypillisesti ilta-aikaan ja keskimääräinen tuntiteho on käytön aikana noin 50 % nimellistehosta. Sähkölämmityskohteissa on laajalti toteutettu teho- vuorottelu, jolloin sähkökiuas ei nosta huipputehoa. Saunan käyttöön liittyy myös suuri lämpimän käyttöveden tarve, joka voi aiheuttaa suuriakin hetkellisiä tehotarpeita käyttöveden lämmitysvastusten kytkeytyessä päälle. (SÄTE-opas, 2019).

Huoneistosaunojen lisääntyminen erityisesti kerrostaloissa aiheuttaisi tehotarpeen kasvua muutamia satoja megawatteja. Suurin vaikutus saunoilla on kiinteistön liittymän suuruuteen, varsinkin, jos lämpöpumppukohteissa ei tehdä tehohallintaohjauksia tai kasvateta käyttöveden varaajakokoja. Asuinkiinteistössä huipputehotarpeeseen vaikuttaa jatkossa yhä merkittävämmän saunomisen ja lämpimän käyttöveden tuottamisen ratkaisut. Kiinteistö- ja muuntopiiritaloilla nämä aiheuttavat merkittävät joustotarpeet.

Valaistus

Valaistustekniikka on kehittynyt viime vuosina merkittävästi sekä valaisintekniikan että ohjauksien osalta. Uudiskohteissa (ei asuinrakennuksia) sisävalaistuksen tehoksi voidaan arvioida 5-10 W/m² ja tehotrendi on edelleen laskeva. Olemassa olevien kohteiden valaistustehot ovat keskimäärin välillä 10-20 W/m². Tulee kuitenkin ottaa huomioon se, että valaistus on tällä hetkellä suosittu investointikohde, jonka vuoksi valaisimet ja ohjausjärjestelmät päivittyvät vauhdilla. Valaistuksen sähköteho palvelukiinteistöissä ja julkisissa kiinteistöissä on tällä hetkellä n. 4 000 MW. Palvelukiinteistöjen ja liiketilojen valaistus olisi jo ohjattavissa merkittävältä osin. Jos joustot olisivat lyhytaikaisia (< 15 min), voisi valaistuksella joustaa kohteissa noin 30 % alaspäin valaistuksen sähkötehosta ilman, että olosuhteiden heikentymisestä aiheutuisi huomattavaa käyttäjähaittaa. Ylössäädön mahdollisuutta em. kohteissa voidaan arvioida olevan n. 10 % ja sen määrä todennäköisesti lisääntyy tulevaisuudessa sisätyöpaikkojen valaistusstandardi 12464-1 muutosten johdosta. Jos käyttäjien ei haluta havaitsevan valaistuksen säätöä, tulisi säätörampin olla n. 30 sekuntia. Myös teollisuuteen on alkanut tulla jouston mahdollistavaa valaistuksenohjausta, mutta määrä on vielä vähäinen verrattuna muihin rakennuksiin.

Kuten muissakin rakennustyypeissä, asuinrakennuksissa sisävalaistuksen tehotrendi on ollut laskusuuntainen Vuoden 2015 valaistuksen laskentaoppaan (Ympäristöministeriö, 2015) mukaisesti. Koko asumisen energiankulutuksesta valaistuksen osuus on 2 % (Tilastokeskus, 2019). Asuinrakennusten valaistustehot ovat kuitenkin muita rakennustyyppijä alhaisemmat olleen 8-11 W/m² ja käyttöaste on 0,6 (Ympäristöministeriö, 2015). Suurin muutos on jo tapahtunut siirryttäessä ledeihin ja vanhojen valaisimien poistuessa. Täten kovin suurta laskua ei enää ole odotettavissa vuoteen 2035 mennessä. Ledien energiankulutus on asuinrakennuksissa sen verran alhaista, ettei niiden voida olettaa tuovan merkittävää lisäystä joustopotentialiin.

Tie- ja katuvalaistuksen sähköteho on laskusuunnassa. Sähkötehon alenemiseen vaikuttavat erityisesti uudet valaisin- ja ohjaustekniikat. Tie- ja katuvalaistuksen sähkötehoksi voidaan arvioida tällä hetkellä n. 200 MW ja se pienenee n. 2-3 % vuosittain. LED-tekniikoiden korvattaessa perinteiset valonlähteet, mahdollistuu myös valaistuksen ohjaus. Ohjaus- ja monitorointijärjestelmiä toteutetaan jo tällä hetkellä, mutta teknisesti ollaan vielä hyvin alkuvaiheessa ja voitaneen puhua ennemminkin järjestelmien pilotoinnista kuin laajamittaisesta käytöstä. Trendi on kuitenkin sellainen, että tulevaisuudessa suuri osa tie- ja katuvalaistuksesta on seurattavissa ja ohjattavissa lämmityskauden aikaan siten, että sekä alas- että ylössäätö on mahdollista. (DR-pooli, 2014, Kulomäki, 2019)

Kuluttajalaitteet

Kuluttajalaitteiden käyttöaste asuinrakennuksissa on sama 0,6, kuten valaistuksessa. Niiden tehot ovat kuitenkin valaisimia alhaisemmat sijoittuen välille 3-4 W/m². Niiden käyttämä sähkömäärä kasvaa kuitenkin edelleen (Tilastokeskus, 2019). Yksittäisten laitteiden keskimääräisen sähkönkulutuksen ollessa laskusuuntainen, selittyy sähkömäärän kasvu laitehankintojen ja niiden käytön lisääntymisellä. Vuonna 2018 36 % kotitalouksien sähköstä kului kuluttajalaitteisiin ja koko asumisen energiasta niihin kului noin 10 % (Tilastokeskus, 2019).

Autolämmitys

Autojen moottorinlämmittimet ovat teholtaan noin 0,3 -0,7 kW. Tämän lisäksi sisätiloja voidaan lämmittää sisätilalämmittimellä, jotka ovat teholtaan tyypillisesti 1,2- 1,9 kW. Jos oletetaan Suomessa olevan miljoona lämmitysmahdollisuudella varustettua autoa, joista puolessa on lisäksi sisätilalämmitin, saadaan näiden yhteenlasketuksi tehoksi 1 300 MW. Nämä kuormat ajoittuvat merkittävässä määrin samoille talviaamujen tunneille. Lämmitysjakson suositeltava kesto on lämpötilasta riippuen puolesta tunnista muutamaan tuntiin. Lämmitysten ohjaus tapahtuu tyypillisesti erilaisilla kello-ohjauksilla tai muulla automatiikalla. Lämmitettävä moottorin nesteet ja sisätila varaavat jonkin verran lämpöä, joka mahdollistaa lyhytaikaisia joustoimia lämmitysjankohtina.

Jäähdytys ja kylmä

Erilaiset kylmäjärjestelmät tarjoavat varaavana ja ympärivuotisena kohteena kiinnostavan kysyntäjoustopotentialin. Tyypillisen kauppakiinteistön energiankulutuksesta noin 60-70 % menee kylmälaitteiden toimintaan (Söyrinki 2017). Kylmälaitteisiin lukeutuu sähköteholtaan laaja skaala eri kokoluokan järjestelmiä. Isommat keskitetyt pakkasvarastot ovat nimellisteholtaan

satoja kilowatteja, kun taas asuntokohtaisten jääkaappien kompressorit ovat vain 100-200 wattia.

Kylmälaitteiden ohjaamista joustokapasiteetiksi ei ole muutamia pilottikohteita lukuun ottamatta vielä juurikaan toteutettu. Pilottikohteissa on lupaavista tuloksista huolimatta pysyvistä ohjauksista jouduttu luopumaan. Asiantuntijahaastatteluiden perusteella huolenaiheina on ollut jatkuvan ohjauksen vaikutukset kompressorien toimintaan ja elinikään. Erityisesti päälle-pois-ohjattujen kompressoreiden ohjaus joustokapasiteetiksi lisäisi näiden käyntikertojen määrää, jonka vaikutuksesta laitteiston elinkaareen ei voida olla varmoja. Myös riski ohjausvirheiden myötä sulaneista pakasteista on koettu saatua hyötyä suuremmaksi.

Eräessä pilottikohteessa Suomen johtavan pakkasvaraston invertteriohjatuksi sähkötehoksi taajuusohjattuun käyttöreserviin (FCR-N) saatiin 200-300 kW. Pilottikohteessa pakkasvarastoa on kysyntäjousto-ohjauksissa voitu ohjata pois päältä kesäisin noin tunnin jaksoissa, kun taas talvisin tämä on ollut mahdollista pidempään. (Rasimus 2020, Seam Group Oy 2015). Toisessa pilotissa marketin kylmälaitteiden joustavaksi kuormaksi saatiin yhteensä noin 35 kW (Söyrinki 2017).

Tilojen jäädytykset tarjoavat merkittävän sähkökuorman joustopotentialiksi erityisesti kesäaikoina, jolloin joustavia lämmityskuormia ei ole yhtä merkittävästi tarjolla kuin kylmempinä ajankohtina. Liikerakennusten jäädytysten arvioidaan olevan Suomessa yhteisteholtaan noin 450 MW (Luoma, 2015).

Kasvihuoneet

Kasvihuoneiden merkittävin sähköteho syntyy kasvien keinovalotuksesta. Ympärivuotista valoviljelyä tehdään noin 140 hehtaarin pinta-alalla ja valotusteho on kasvista riippuen n. 50 – 300 W/m². Kasvihuoneiden valaistuksen yhteenlaskettu sähköteho on noin 230 MW, joka on pääsääntöisesti käytössä vain talviaikaan. (Luonnonvarakeskus, 2019; Kivioja, 2019). Kasvihuoneiden valaistuksen ohjaus on kohtuullisen helppoa, koska kasvit eivät ole herkkiä lyhytaikaisille valaistuksen katkoille. Tällä hetkellä Suomen kasvihuoneista jo noin 200 MW on Finngridin taajuusohjatussa häiriöreservissä (FCR-D), joka on kokonaisuudessaan noin 270 MW (Nortio, 2019). Myös taajuusohjatun käyttöreservin (FCR-N) pilotointia on tehty kasvihuonevalaistuksella, mutta haasteeksi muodostuu, että ylössäädön toteuttaminen kasvihuoneiden valotukseen aiheuttaa nykyään vielä liian paljon kustannuksia (Kivioja, 2019).

Varavoima

Sähkönsyötön katkeamisen varalle rakennetut varavoimajärjestelmät tarjoavat osaltaan potentiaalia tulevaisuuden joustokapasiteetiksi. Varavoimajärjestelmät voidaan jakaa polttomoottorilla toimiviin varavoimakoneisiin ja akkuvarmennettuihin UPS-järjestelmiin.

Polttomoottorilla toimivien varavoimakoneiden soveltuvuutta joustokapasiteetiksi on jo pilotoitu kauppakeskuskohteissa. Pilottikohteissa yksittäinen varavoimakone on teholuokaltaan tyypillisesti 0,5-1 MW. Verohallinnon pientuottajatilastojen perusteella kokoluokaltaan alle yhden MVA:n polttoöljyllä toimivia järjestelmiä on Suomessa 733 kappaletta. Tätä suurempia 1-10 MVA:n järjestelmiä on ilmoitettu 203 yksikköä. (Verohallinto 2019)

Generaattorilaitteistojen soveltuvuutta erilaisiin joustokapasiteettitarpeisiin rajoittaa niiden suhteellisen hidaiden reagoitusaikojen. Koska varavoimakoneiden tarve on normaalitilanteessa ajallisesti vähäistä, tulee niiden toimintaa säännöllisesti testata. Nämä testit voitaisiin ajoittaa sähkömarkkinoiden tarpeiden mukaan, jolloin varavoimakoneiden kapasiteetti pystyttäisiin hyödyntämään mahdollisimman kannattavasti. Ajallisesti vähäisen tarpeen vuoksi varavoimakoneiden kapasiteetti on käytettävissä lähes jatkuvasti vuoden- ja vuorokaudenajoista riippumatta.

4.2. Uudet kulutuskohteet

Uusia sähkökäyttöä lisääviä kulutuskohteita tulevat olemaan mm. sähköautot, datakeskukset sekä teollisuuden sähköistyminen ja synteettisten polttoaineiden tuottaminen, jotka liittyvät keskeisesti myös sektori-integraation kehittämiseen, joka osaltaan parantaa energiajärjestelmän joustokykyä sekä resurssitehokkuutta.

Datakeskukset

Suurten konesaliin (datakeskusten) yhteenlasketun tehon arvioidaan olevan Suomessa 260 MW (Vuoden 2018 tilanne lähteen Bergmann 2018 mukaan sekä arviot sen jälkeisestä kasvusta). Vuotuisen sähköenergiankäytön voidaan arvioida olevan n. 2,5 TWh/a. Datakeskusten sähkökulutuksen arvioidaan kasvavan vuoteen 2030 mennessä 150 %, jolloin niiden sähkökulutus tulisi olemaan 6,5 TWh/a. Datakeskusten tarvitsema sähköenergia tuotetaan esimerkiksi Googlen tapauksessa PPA-sopimuksella⁴ hankitulla tuulivoimalla. Lisääntynyt energiantarve näkyy siten suoraan kasvaneena tuulivoiman määränä. Datakeskus tarvitsee kuitenkin sähköenergiaa jatkuvasti, joten joko PPA-sopimuksen myyjän (tuulivoiman tuottaja) tai datakeskuksen operaattorin tulee täyttää tämä tarve silloinkin, kun tuulienergiaa ei ole saatavilla. Datakeskukset voivat kuitenkin joustaa jossain määrin kulutuksessa; prosesseja voidaan priorisoida ja siirtää maantieteellisesti eri alueilla sijaitseviin datakeskuksiin. Merkittävä joustoresurssi on lisäksi datakeskuksissa olevat jatkuvan sähkönsyötön turvaavat akut (UPS-järjestelmät), joita voidaan käyttää primäärikäyttötarkoituksen ohella tuottamaan nopeaa taajuussäätöä. Koska akkujärjestelmät on tehty reagoimaan nopeasti tilanteisiin, joissa muu sähkönsyöttö katkeaa, kykenevät akkujärjestelmät myös vastaamaan nopeasti häiriöreservissä taajuuden ylössäätöön. Akkujärjestelmä kykenee myös hetkellisesti nostamaan kulutusta eli datakeskuksella on myös mahdollisuus alassäätöön. (Alaperä, 2019)

Power-to-X (Vedyn tuotanto)

Täysin uutta merkittävää sähkökulutusta ennakoitaan syntyvät sektorikytkennän myötä (ns. Power-to-X teknologiat). Sähköllä tuotettavasta vedystä ja teollisuusprosessista tai ilmasta talteenotettavasta hiilidioksidista voidaan tehdä synteettistä polttoainetta, jonka polttaminen ei lisää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta. Tehokkainta on ottaa biopohjainen hiilidioksidi talteen sellutehtaan pakokaasuista. Hiilidioksidin talteenotto kuluttaa jossain määrin sähköä, mutta merkittävin lisäys sähkökulutukseen tulee tarvittavan vedyn tuottamisesta elektrolyysillä.

⁴ PPA-sopimuksella tarkoitetaan pitkäaikaista sähkönostosopimusta, jossa tyypillisesti suuri sähkökäyttäjä tai joukko pienempiä sähkökäyttäjiä sopii ostavansa sähköntuottajalta tietyn määrän sähköä sopimuksen mukaiseen hintaan esimerkiksi 10-20 vuoden ajan. (Tuulivoimayhdistys.fi)

Lähteessä (Laaksonen ym. 2020) on arvioitu, että mikäli biopohjaisen hiilidioksidin päästölähteistä hyödynnettäisiin 85 %, siten että synteettistä polttoainetta tuotettaisiin 10 paikkakunnalla, jossa on suurimmat biopohjaisen hiilidioksidipäästön lähteet, kuluttaisi tämä 240 TWh/a sähköenergiaa.

Power-to-X (P2X tai PtX) näkyy suurena muutoksena kulutetussa vuosienergiassa, mutta myös sähkötehoon tämä muutos on hyvin merkittävä. Esimerkiksi korvattaessa teräksen valmistukseen käytetty hiili vedyllä, vaatisi yksi terästehdas yli 10 TWh sähköä vuodessa (Sipola, 2019). Jos tämä kulutus kuviteltaisiin tasaiseksi ympäri vuoden, tarkoittaisi se yli 1 100 MW jatkuvaa sähkötehoa. Jos vedyn tuotannossa käytetään varastointia, tämä sama sähköteho voidaan ajatella uudeksi hyvin merkittäväksi joustoresurssiksi, mikäli joustosta saatava korvaus on riittävän suuri.

Power-to-heat

Turpeen ja hiileen käytön lopettaminen energiantuotannossa tulee näkymään myös kaukolämpöverkossa. Osa tarvittavasta lämpöenergiasta voidaan korvata biopohjaisilla ratkaisuilla, mutta etenkin suurien lämpöpumppujen asema tulee korostumaan. Lämpöpumppu yhdistettynä lämpövarastoihin kykenee tuottamaan hyvällä hyötysuhteella hyvin joustavasti lämpöenergiaa kaukolämpöverkon tarpeisiin. Kyseinen yhdistelmä kykenee tarjoamaan myös hyvin merkittävää joustoa sähkövoimajärjestelmälle. Lämpöpumput voivat tuottaa lämpöenergiaa varastoon hetkinä, kun tuulituotanto ylittää muun kulutuksen, ja varastoitua lämpöenergiaa voidaan käyttää, kun tuulituotanto on vähäisempää. Suuret lämpöpumput kykenevät tuottamaan myös keksäikaan jäädytystä kaukolämpöverkon asiakkaille. Lämpövarastot ovat merkittävästi edullisempia kuin sähkövarastot, joten tällainen joustavuus saadaan selvästi pienemmillä kustannuksilla kuin esimerkiksi akkuja käyttämällä.

Sähköinen liikenne

Liikenteen sähköistyminen on yksi keskeinen sektori-integraatioon liittyvä osatekijä, joka pitää sisällään sekä sähkön suoran käytön liikenteen energialähteenä että päästöttömän sähkön avulla tuotettavan vedyn ja biopolttoaineiden valmistuksen (Power-to-X teknologia) liikenteessä käytettäväksi polttoaineeksi.

Liikenteen sähköistyminen tarjoaa osaltaan uudenlaisen kuormituksen, joka on tehtävissä sähköjärjestelmän näkökulmasta joustavaksi. Sähköautojen ja muiden ajoneuvojen merkittävä lisäys sähköjärjestelmä merkitsee toisaalta kasvanutta sähköenergian tarvetta, mutta suurempi kysymys on hetkellisen tehon riittävyys, joka näyttäytyy eri tavoin sähköjärjestelmä eri tasoille (kantaverkko, keski- ja pienjänniteverkko, kiinteistöverkko). Toisaalta merkittävä määrä sähköajoneuvoja tarjoaa huomattavan joustopotentialin esim. tuulivoiman lisääntymiselle koko voimajärjestelmän tasolla, jos sähköajoneuvojen latausratkaisuista tehdään älykkäitä ja jouston mahdollistavia. Jousto voi tarkoittaa ainoastaan latauksen ohjausta älykkäästi (G2V, Grid-to-Vehicle) tai tulevaisuudessa myös energian varastointia ja takaisin syöttämistä sähköverkkoon

(V2G, Vehicle-to-Grid) paikallisena varavoimaratkaisuna (V2H, Vehicle-to-Home). Tätä joustokapasiteettia voidaan käyttää monella eri markkinapaikalla ohjattavana ja joustava kuormituksen ja/tai varastona tai osana laajempaa aggregoitua "joustosalkkua".

Sähköisten ajoneuvojen lisääntyminen pitää sisällään sekä henkilöliikenteessä käytettävä autot, linja-autot sekä erilaiset liikenteessä kulkevat työkoneet sekä muissa kohteissa olevat työkoneet (esim. satamat, metsätyökoneet). Lisäksi kauko- ja paikallisjunayhteyksien tavoitteellinen lisääminen lisää sähköisen liikkumiseen määrää. Erilaiset matkaketjuihin liittyvät palvelut tukeutuvat enenevässä määrin sähköisen liikenteen ratkaisuihin. Myös liikkumiseen liittyvät ratkaisut laajemmin, erityisesti kaupunkiolosuhteissa, lisäävät sähköisen liikkumisen hyödyntämistä esim. sähköpyörien ja -potkulautojen muodossa. Kaikki edellä mainitut ajoneuvo- ja työkoneratkaisut edellyttävä latausratkaisujen kehittämistä, mikä luo mahdollisuuksia teknologian kehittämislle huomioimaan sähköjärjestelmän tarpeet ja mahdollisuudet.

Tämänhetkisenä valtioneuvoston virallisena tavoitteena on, että Suomessa on 250 000 sähköautoa vuoteen 2030 mennessä. Joidenkin arvioiden mukaan määrä voisi olla jopa 800 000. Tällä hetkellä (Q2/2020) sähköautoja Suomessa on hieman yli 40 000 kappaletta (6 432 täys-sähköautoa ja 33 883 verkosta ladattavaa hybridiä). Sähköautokannan kasvunopeus edelliseen vuoteen verrattuna molemmissa ryhmissä on yli 80 %. Julkisia latauspaikkoja on yhteensä 1 109 sisältäen peruslatauspisteitä (type 2) 3 528 kpl ja pikalatauspisteitä 302 kpl (ei sisällä Teslan latausasemia), molemmissa ryhmissä kasvunopeuden ollessa n. 50 % edelliseen vuoden vastaavaan ajankohtaan verrattuna (Sähköinen liikenne ry, 2020). Moni kaupunki on jo aloittanut sähköbussien käytön paikallisessa julkisessa liikenteessä ja julkistanut hyvinkin kunnianhimoisia tavoitteita sähköbussien määrän nopeassa lisäämisessä. Esimerkiksi pääkaupunkiseudulla HSL:n tavoitteena on 400 sähköbussia vuonna 2025 (HSL 2019).

Sähköautojen lataamisen energiantarve ei muodostu haasteeksi; esimerkiksi 250 000 sähköauton vuotuinen sähköenergiatarve on alle 1 TWh/a, mikä on alle prosentti Suomen nykyisestä sähkökäytöstä. Haasteita jakeluverkon ja kiinteistöverkon tasolla saattaa kuitenkin tulla, mikäli suurta määrää autoja ladataan samaan aikaan samalla alueella. Päällekkäiset 3-vaihelataukset voivat aiheuttaa haasteita tehonsiirtokapasiteetissa ja jännitteen laadussa (sisältää jännitetason lisäksi mm. harmoniset yliaallot) ja 1-vaihelataukset voivat puolestaan aiheuttaa epäsymmetriaa ja muita laatuongelmia. Nämä haasteet voidaan kuitenkin ratkaista älykkäällä latauksella, jossa latausta ohjataan jakeluverkon ja sähkömarkkinan tarpeen mukaan. Pelkästään sähkömarkkinahinnan mukaan ohjattava lataus voi aiheuttaa haasteita paikallisessa jakeluverkoissa, jos suuri määrä autoja lataa samaan matalan sähköhinnan aikaan. Siten myös verkon rajoitteet on otettava huomioon latauksen ohjauksessa. Yksi tapa ohjata paikallista lataustehojen hallintaa on tehomaksukomponentin sisältämä pienasiakkaan verkkopalvelumaksurakenne. Lähteessä (Simolin 2020) on esitelty sähköauton lataustehon hallintaan menetelmä, jolla on tehdyssä testitarkastelussa voitu vähentää jopa 60 % asiakkaan maksamaa verkkopalvelumaksua verrattuna ohjaamattomaan lataukseen.

Yksityiskäytössä olevat autot ovat tyypillisesti suurimman osan ajasta parkissa, jolloin latauksen ajoitus voi olla hyvin joustavaa. Sähköauton akusta voidaan myös purkaa energiaa verkkoon (Vehicle-to-Grid, V2G), jos lataustekniikka ja auton käyttäjä tämän sallivat. Tällöin auton

akkua voidaan käyttää energiavarastona, ja kun aggregoidaan suuri määrä tällaisia energiavaroja, näitä voidaan käyttää joustona kompensoimaan esimerkiksi tuulivoiman vaihtelua tai osallistumaan reservimarkkinoille nopeasti säätävänä energiaresurssina. Seuraavassa on yksinkertainen esimerkki sähköautojen tarjoamasta joustopotentialista reservimarkkinoiden näkökulmasta:

- Oletetaan, että Suomessa on 500 000 ladattavaa sähköautoa, joista puolessa olisi V2G kyvykyys ja akun kapasiteetti V2G käytössä keskimäärin 5 kWh. Ohjattavissa oleva kokonaisenergiakapasiteetti olisi tällöin 1.25 GWh. Jos auton latausratkaisu mahdollistaisi 3.5 kW purkaustehon, niin kokonaisjoustokapasiteetti tehona olisi 875 MW. Jos oletetaan, että kolmasosa autoista olisi verkossa syöttökaapelin kautta kiinni, niin hetkellinen joustopotentiali olisi tuolloin lähes 300 MW.

Kaiken kaikkiaakaan sähköautojen lataus, älykkäästi ohjattuna, on ennemminkin mahdollisuus kuin haaste sähköjärjestelmälle, jos haasteet tunnistetaan riittävän ajoissa ja luodaan teknologiset ja markkinaehtoiset ratkaisut, joilla voidaan sähköautojen tarjoamat mahdollisuudet sähköjärjestelmän kehittämiseksi hyödyntää mahdollisimman täysimääräisesti.

5. Sähkön tuotannon muutokset

5.1. Tuotantoskenaariot

Tulevaisuuden tarkkaa sähkönkulutusta on vaikea arvioida, ja täten myös tarvittavan tuotantokapasiteetin määrää on vaikea arvioida. Tulevaisuuden tuotantotarpeen määrittää pääasiassa miten voimakkaasti energiantensiivistä teollisuutta sähköistetään. Muun muassa teräs-, paperi- ja selluteollisuus ovat potentiaalisesti erittäin merkittäviä tulevaisuuden sähkönkuluttajia. Sähkönkulutuksen kasvaessa vaaditaan uutta sähkön tuotannon kapasiteettia ja kuten aikaisemmin on mainittu, Suomessa tuulivoima on edullisin vaihtoehto uudesta uusiutuvasta energiasta. Samalla, kun tarve uudelle tuotannolle lisääntyy, vähenee vanha verkkoon liitetty tuotantokapasiteetti. Syitä vanhan tuotantokapasiteetin vähenemiselle ovat muun muassa hiilidioksidipäästöjen vähentäminen, sekä tuotantolaitosten kannattamattomuus alentuneen käyttöasteen takia.

Tulevaisuuden energiajärjestelmä, joka pohjautuu vahvasti uusiutuvaan energiaan, asettaa omat haasteensa energiajärjestelmän joustavuudelle. Jotta näitä joustavuustarpeita voidaan tarkastella, täytyy luoda eri skenaarioita tulevaisuuden energiantuotannosta. Nämä tulevaisuuden tuotantoskenaariot koostuvat samoista pääpiirteistä. Ne eivät sisällä yhtään fossiilisia polttoaineita ja ainut uusiutumaton energialähde on ydinvoima. Merkittävin osa tuotetusta vuosienenergiasta tulee tuuli- ja ydinvoimaloista, mutta mukana on myös biopohjaista CHP-tuotantoa, sekä vesivoimaa.

Tässä tutkimuksessa on muodostettu kaksi erilaista skenaariota Suomen sähköenergian kulutuksesta ja tuotannosta vuonna 2035; *perusskenaario* ja *voimakkaan kasvun skenaario*. Nämä skenaariot ovat esitettynä taulukossa 5.1. Skenaariot ja niihin liittyvä laskenta ovat osa tutkimuksen yhteydessä valmistettua diplomityötä (Sihvonen, 2020). Tässä yhteydessä tulee huomata, että skenaariot eivät ole suunnitelmia tai virallisia tavoitteita, vaan tutkijoiden asiantuntemukseen perustuvia näkemyksiä siitä, miten sähkönkulutus tulee Suomessa kehittymään, ja minkälaisella tuotantorakenteella lisääntyvä sähköntarve todennäköisesti katetaan. Skenaarioiden lähtökohtana on oikea toteutunut tuotanto- ja kulutusdata vuodelta 2018, mitä on skaalattu ylöspäin skenaarioiden tilanteiden mukaan. Tässä kappaleessa esitetyt luvut pohjautuvat Energiategollisuuden materiaalipankista saatuun avoimeen dataan (Energiategollisuus, 2020).

Molemmissa skenaariossa on oletettu kasvua sähkön käyttöön, ja lisääntynyt sähkön tarve arvioidaan tuotettavan käytettävissä olevilla hiilineutraaleilla tuotantomuodoilla, enimmäkseen tuulivoimalla. Perusskenaariossa kulutuksen kasvu on maltillista ja lähinnä jo nyt tapahtuvan kehityksen jatkumoa, jossa kasvua tuovat mm. sähköautot, datakeskukset ja lämpöpumppulämmitys. Lisäksi on oletettu sähköntuotannon omavaraisuuden kasvavan nykyisestä. Nykyisellään tuontia on 20 TWh (23 % kulutuksesta), perusskenaariossa vain 6 TWh (6 % kulutuksesta).

Tuloksia tarkasteltaessa onkin tärkeää muistaa, että tehdyn analyysin syvyyttä on rajoitettu muun muassa käyttämällä tiettyjä oletuksia ja yksinkertaistuksia. Energiategollisuuden avoimeen dataan perustuvaa tuntidataa on lineaarisesti skaalattu ylös energiankulutuksen mukaan niin kulutuksen, kuin tuotannon osalta. Tämä asettaa merkittävän rajoituksen, kuinka tarkasti

uusien kulutusresurssien vaikutusta voidaan arvioida analyysissä. Kulutuspuolen vaikutusten arviointi onkin jätetty teoreettisemmaksi, etenkin uusien syntyvien joustoresurssien osalta. Kulutuksen muutokset ovat pääasiassa huomioitu vain kasvaneena vuosienergiana. Tuotantopuolella esimerkiksi varastoinnin tuomat hyödyt eivät näy suoraan tarkastelussa, vaan profiili seuraa vanhaa ajojärjestystä. Lähtökohtana on ollut analysoida, kuinka suuri olisi kulutuksen ja tuotannon välinen ero, mikäli muutokset eivät vaikuttaisi näiden profiileihin vaan ainoastaan suuruuteen. Tämä ero kuvastaa joustotarvetta, joka täytetään varastoilla, kysyntäjoustolla ja joustavalla tuotannolla.

Taulukko 5.1 Skenaariot sähkönkulutuksesta ja -tuotannosta Suomessa vuonna 2035. Tuulivoima on esitettyä matalalla ja korkealla tuulivoiman huipunkäyttöajalla.

	2018		Perusskenaario		Voimakkaan kasvun skenaario	
	Sähkönkulutus		Sähkönkulutus		Sähkönkulutus	
	87 TWh/a		100 TWh/a		150 TWh/a	
	Sähköntuotanto		Sähköntuotanto		Sähköntuotanto	
Tuotantomuoto	Kapasiteetti [GW]	Vuosienergia [TWh/a]	Kapasiteetti [GW]	Vuosienergia [TWh/a]	Kapasiteetti [GW]	Vuosienergia [TWh/a]
Ydinvoima	2,8	21,9	4,4	34,4	4,4	34,4
Teollisuus CHP	2,3	9,7	2	8,6	1,5	6,5
Kaukolämpö CHP	3,3	11,8	2	7,2	1,5	5,4
Erillistuotanto	1,4	4,9	0	0	0	0
Vesivoima	3,2	13,1	3,2	13,1	3,2	13,1
Tuulivoima	2	5,9	10	29,3 - 38,1	25	73,2 - 96,5
Aurinkovoima	0,2	0,2	2	1,6	5	4,1
Yhteensä	15,1	67,5	23,6	94,2	40,6	136,7

Voimakkaan kasvun skenaariossa on oletettu perusskenaarion kasvuelementtien lisäksi Suomeen syntyvän synteettisten polttoaineiden valmistusta, mikä kuluttaa merkittävästi sähköenergiaa. Lisäksi sähköautojen ja lämmityksen sähköistämisen kasvun on oletettu olevan voimakkaampaa kuin perusskenaariossa. Kasvava sähköntarve katetaan tässäkin skenaariossa valtaosin tuulivoimalla.

Tuulivoima on säästä riippuvaista ja onkin hyvä ottaa huomioon, kuinka eri tuuliolosuhteet vaikuttavat tuotettuun vuosienergiaan. Uusien tuulivoimaloiden napakorkeus ja pyyhkäisy-pinta-ala ovat suurempia kuin vanhoissa, ja näiden vaikutuksesta vuotuinen huipunkäyttöaika voi olla jopa 1 000 tuntia suurempi. Tämän vuoksi skenaarioanalyysissä on arvioitu tuulivoimalla tuotettua energiaa kahdella erilaisella huipunkäyttöajalla; 2 871 h/a ja 3 783 h/a. Tämä näkyy taulukossa tuulivoiman vuosienergiatuotannon vaihteluvälinä.

Ydinvoiman osalta on oletettu nykyisten käytössä, ja rakenteilla olevien viiden reaktorin olevan käytössä. Vesivoiman potentiaalinen laajennusmahdollisuus on hyvin vähäistä, ja voidaan olettaa, että tulevaisuudessa vesivoiman määrä ei kasva merkittävästi. Erillis- eli lauhdetuotannon on oletettu poistuvan vuoteen 2035 mennessä. Myös CHP-tuotannon oletetaan vähenevän sen korvautuessa osittain lämpöpumpuilla.

Aurinkovoiman oletetaan kasvavan molemmissa skenaarioissa, perusskenaariossa asennettu kapasiteetti on 2 GW ja voimakkaan kasvun skenaariossa 5 GW. Aurinkovoiman kustannukset ovat olleet jo pitkään laskussa ja trendin oletetaan jatkuvan. Erityisen kannattavaa aurinkovoima on kiinteistöön asennettuna, jolloin omalla tuotannolla voi korvata verkosta ostettua sähköä. Oletettavaa onkin, että suurin osa aurinkovoimasta tullaan asentamaan kiinteistöjen ka-toille.

Toisin kuin moni muu sähköntuotantomuoto, aurinkovoima tuottaa energiaa vain päiväsaikaan. Suomessa on kohtalaiset olosuhteet aurinkovoimalle. Suomen pitkät kesäpäivät ovat erityisen hyviä aurinkovoiman kannalta, mutta pitkä talvi lyhyine päivineen heikentää vuodessa kokonaisuudessaan tuotettua energiaa. Nykyisellään aurinkovoima saavuttaa Suomessa noin 800 tunnin vuotuisen huipunkäyttöajan. Kapasiteettikerroin aurinkovoimalle olisi tällöin 0,09. Vaikkakin aurinkovoiman asennuskapasiteetti tehona on suhteellisen korkea, se ei lopulta näy yhtä merkittävästi tuotettuna vuosienergiana etenkin verrattuna perinteisiin tuotantomuotoihin. Aurinkovoima ei myöskään saavuta huipputehoaan, mikä on noin 80 % asennetusta kapasiteetista, kuin muutamana tuntina vuodessa. Talvella, kun kysyntä olisi suurinta, aurinkovoiman huipputeho on noin 3 % asennetusta kapasiteetista.

Taulukossa 5.2 on esitettyä tuotannon keskitehojen vaihtelu vuodenaikojen mukaan. Tuulivoimalle on esitettyä keskiteho matalalla ja korkealla tuulivoiman huipunkäyttöajalla. Voidaan havaita muun muassa, että tuulisuus on keskimäärin parempaa talvella, sekä että myös talvella aurinkovoima tuottaa energiaa. Yhteistuotannossa sähköntuotanto on vähäisempää kesällä, sillä myös lämmityksen tarve on matalampaa. Pitkäaikaisilla lämpövarastoilla tätä tuotantoa voitaisiin mahdollisesti tasoittaa.

Taulukko 5.2 Tuotannon keskitehot vuodenaikojen mukaan. Tuulivoima on esitettyä matalalla ja korkealla tuulivoiman huipunkäyttäjällä. Talvikausi on tammi-maaliskuu, kevät on huhti-kesäkuu, kesä on heinä-syyskuu ja syksy on loka-joulukuu.

Tuotanto- muoto	Perusskenaario				Voimakkaan kasvun skenaario			
	Talvi	Kevät	Kesä	Syksy	Talvi	Kevät	Kesä	Syksy
Ydinvoima [GW]	4,4	3,5	3,7	4,2	4,4	3,5	3,7	4,2
Teollisuus CHP [GW]	1,1	0,7	0,9	1,1	0,8	0,6	0,7	0,8
Kaukolämpö CHP [GW]	1,4	0,5	0,3	1,1	1,0	0,4	0,2	0,8
Vesivoima [GW]	1,9	1,7	1,0	1,3	1,9	1,7	1,0	1,3
Tuulivoima [GW]	3,4- 4,5	2,9- 4,1	3,1- 3,9	4,0- 5,2	8,4- 11,3	7,3- 10,2	7,8- 9,7	10,0- 12,9
Aurinko- voima [GW]	0,04	0,3	0,4	0,04	0,1	0,7	0,9	0,1

5.2 Tuotannon joustavuuden muutokset

Vesivoiman lisäksi lauhdevoima sekä sähkön ja lämmön yhteistuotannossa käytettävät voimalaitokset ovat perinteisesti tarjonneet joustavuutta sähkövoimajärjestelmälle. Kun fossiilisten polttoaineiden polttamiseen perustuvien voimalaitosten korvautuvat sääriippuvaisella, uusiutuvalla tuotannolla, heikkenee tuotannon kyky tarjota joustavuutta tehotasapainoon. Kummasakin luodussa skenaariossa vähennykset tuotantoyksiköissä kohdistuvat etenkin kivihiihivoimaloihin, joiden käyttö loppuu 2020-luvun loppuun mennessä. Yhteistuotannon kapasiteetin vähentyessä nousee kuitenkin jäljelle jäävien yksiköiden joustavuus sähkö- ja lämpövarastojen myötä. Yhteistuotantolaitos kykenee säätämään tuottamansa sähkön ja lämmön määrää tietyissä rajoissa, mutta varastoilla tätä kyettäisiin säätämään huomattavasti joustavammin sekä lyhyellä että pidemmällä ajanjaksolla.

Synteettisesti tuotettu metaani mahdollistaa kaasuvoiman hiilineutraalin käytön, jolla voidaan paikata etenkin pidempiä tuotantovajeita. Synteettisen metaanin hinta on kuitenkin vielä 2035 niin korkea, että muuttuvat tuotantokustannukset jäävät hyvin suuriksi. Energijärjestelmän tarvitsema kaasuvoima jää kuitenkin vuositasolla tuntimääräisesti matalaksi, jolloin vaikutus sähkön keskihintaan ei välttämättä olisi niin merkittävä.

Hyvin nopeissa muutostilanteissa erittäin tärkeä osa joustavuutta on verkkoon kytkettyjen tahtigeneraattorien tuottama inertia. Suoraan verkkoon kytkettyjen tahtigeneraattorien määrä tulee laskemaan lauhdevoiman vähentyessä ja samalla vähenee verkon inertia⁵. Inertia luonnostaan hidastaa taajuuden muutosta nopeissa, suurissa muutostilanteissa, kuten ison tuotantolaitoksen

⁵ Inertia tarkoittaa pyörivien massojen hitautta, joka vastustaa muutoksia.

irtoamisessa. Tulevaisuuden sähkövoimajärjestelmässä inertia tulee muodostumaan sekä perinteisestä tahtigeneraattorien inertiasta, että synteettisestä inertiasta, jota tuulivoima, kysyntäjousto ja sähkövarastot kykenevät tuottamaan.

Yleisesti ajatellaan, että tuuliturbiini ei voi kasvattaa omaa tuotantoaan. Tämä olisi kuitenkin teknisesti mahdollista tuuliolosuhteiden sen salliessa, jos tuulivoimaa ajettaisiin normaalisti rajatulla teholla, esimerkiksi, säätämällä tuuliturbiinin lapoja. Kun syntyy tarve nostaa tuotantoa, lapoja voitaisiin säätää uudelleen. Tällöin tuuliturbiini tuottaisi tehon, jonka se normaalisti tuottaisi kyseisellä hetkellä vallitsevalla tuulen nopeudella. Nykyisellään tämä ei olisi taloudellisesti kannattavaa, mutta tuulivoiman kustannuksien laskiessa entisestään ja hetkellisen jouston arvon kasvaessa tällaiseen toimintaan voisi syntyä riittävä kannustin.

6. Joustotarpeet ja resurssit tulevassa energiajärjestelmässä

6.1. Mihin joustoa tarvitaan?

Joustotarvetta tulevaisuudessa kasvattaa erityisesti sään mukaan vaihteleva uusiutuva tuotanto, Suomessa käytännössä tuulivoima. Sähköistyminen lisää merkittävästi sähkönkulutusta ja edullisin sähköntuotantomuoto on tuulivoima, joten tuulivoiman tuotanto tulee kasvamaan merkittävästi. Tuulivoiman tuotantoa pystytään ennustamaan melko luotettavasti. Ennustevirhe on seuraavan päivän tuotannolle n. 5-10 %, kun kulutusennusteen tarkkuus on noin 2-3 %) ja tarvittaessa ennustevirheitä voidaan oikaista päivän sisäisen markkinan avulla. Tuulivoiman tuotantoa voidaan pienentää (strategisista syistä tuulivoimaa kannattaa myydä päivää edeltävälle markkinalle ennusteita vähemmän), mikä kuitenkin heikentää hieman kustannustehokkuutta menetettäessä tuotantoa. Haasteeksi muodostuvat erityisesti pidemmät, jopa 5-10 vuorokauden vähätuuliset jaksot. Tuulivoimateknologian kehittyminen (korkeammat mastot ja suuremmat turbiinit) kuitenkin parantaa tuulivoimaloiden käyttöaikoja ja siten pienentää tätä haastetta.

Toisaalta joustoa tarvitaan myös tehotasapainon ylläpitämiseen yllättävissä vikatilanteissa. Esimerkiksi verkkovian seurauksena tuotannosta voi poistua ennakoimattomasti yhden ydinvoimalan tuotanto (1 600 MW), joka tulee korvata kuormanpudotuksella ja muun tuotannon lisäämisellä.

Joustoa tarvitaan myös korvaamaan voimajärjestelmän pienentyvää inertiaa. Kun voimajärjestelmästä poistuu äkillisesti tuotantoa, esim. vian seurauksena, turbiinien ja generaattoreiden pyörivät massat vastustavat taajuuden muutosta, ja siten auttavat tasapainon ylläpitoa. Energiajärjestelmässä suuret generaattorit, kuten lauhdevoimalaitokset, korvautuvat tuuli- ja aurinkovoimalla, joissa pyörivät massat ovat huomattavasti pienempiä tai olemattomia. Lisäksi tuulivoimalat kytketään verkkoon kokonaan tai osittain taajuusmuuttajan välityksellä, jolloin pyörivä massa ei ole enää suoraan kytkeytynyt verkon taajuuteen. Siten voimajärjestelmän inertia pienentyy ja tarvitaan hyvin nopean, jopa alle sekunnin vasteajan joustoa.

Vaikkakin suurin muutos saattaa tapahtua kantaverkon tasolla, pääasiassa tuulivoiman korvattaessa perinteiset tuotantomuodot, uutta joustotarvetta syntyy myös paikallisesti. Muun muassa sähköautojen suuret latausvirrat, muutokset lämmitystavoissa ja aurinkovoimaloiden kaksisuuntainen tehonsyöttö kasvattavat tarvetta jakeluverkon joustavuudelle. Etenkin hetkelliset yhtäaikaiset suuret kuormitukset saattavat asettaa erityisiä haasteita verkkoinfrastruktuurille. Alun perin jakeluverkkoa suunnitellessa tällaisia suuria kulutusmuutoksia ei ole huomioitu, joten joillakin alueilla tehopiikit saattavat näkyä muun muassa jakelumuuntajien ylikuormittumisena. Jos esimerkiksi sähköautojen ja aurinkovoimaloiden määrät jatkavat kasvuaan, syntyy tarve investoida verkkoinfrastruktuuriin. Tältä investoinnilta voitaisiin välttyä, tai sitä ainakin voitaisiin siirtää tulevaisuuteen, jos joustoresursseja saadaan riittävästi aktivoitua paikallisesti.

Joustotarvetta on myös sähkökäyttäjillä itsellään. Aurinkovoimala osana kulutuskohdetta on sitä kannattavampi mitä enemmän itse tuotettua sähköä kulutetaan paikallisesti. Tällöin ainakin

pientuottaja hyöttyy sekä sähköverojen että sähkönsiirtomaksun välttämisen muodossa. Tällaisessa tilanteessa kuluttajan kannattaa ohjata omaa kulutustaan mahdollisimman paljon samalle ajankohdalle kuin itse tuotettua sähköä on tarjolla. Tuntihinnoitellun sähköenergiatariffin kautta kuluttaja pääsee hyötymään sähkömarkkinoiden edullisimmista hinnoista, jos hänellä on joustoa sähkökulutuksessa. Sähkönsiirtotariffissa voi olla myös aikaperusteinen hinnoittelu, jolloin kulutusta kannattaa siirtää mahdollisuuksien mukaan edullisimmille tunneille. Joissakin tapauksissa siirtotariffissa voi olla myös tehomaksu, jolloin kulutushuippuja kannattaa välttää joko ennakolta suunnittelemalla suuritehoisimmat kulutuskohteet (esimerkiksi sähkökiuas ja sähköauton lataus) eri ajankohdille tai hetkellisesti siirtämällä jokin suurista kulutuksista myöhempään ajankohtaan. Kuluttajan kannalta sähköenergian, sähkönsiirron ja oman tuotannon hyötyjä tulisi optimoida kokonaisuutena etukäteen automaattisen järjestelmän avulla, jolloin myös jouston arvo maksimoituu.

6.2. Paljonko joustoa tarvitaan?

Jouston tarpeen määrällinen arviointi on moniulotteinen ongelma. Jouston tarve syntyy kulutuksen ja tuotannon vaihtelusta, ja se voidaan täyttää erilaisilla tuotannon, kulutuksen ja varastoinnin ratkaisuilla. Näiden kannattavuuteen vaikuttaa markkinahinta, joka puolestaan määräytyy tuotannon ja kulutuksen mukaan. Kun järjestelmässä on niukkuutta tuotantoresursseista, hinta nousee, mikä kannustaa kysyntäjoukseen, varastojen hyödyntämiseen ja kalliimpien tuotantomuotojen käyttöönottamiseen. Nämä puolestaan tasaavat tuotannon ja kulutuksen eroa. Markkinamalli ohjaa siis järjestelmää tasapainotilaan. Sähköjärjestelmässä tehovajeen laskennallinen kustannus, eli toimittamatta jääneen energian arvo on tyypillisesti sähkön markkinahintaa merkittävästi korkeampi. Toisaalta sähkön hinnan merkittävä nousu aiheuttaa energiaköyhyyttä ja teollisuuden kilpailukyvyyn heikkenemistä. Siten luottaminen puhtaasti markkinapohjaiseen ratkaisuun erityisesti tehoriittävyuden varmistamisessa voi olla haasteellista.

Tässä projektissa jouston tarvetta on kuitenkin tutkittu enemmänkin teknisestä näkökulmasta, eli miten tuotanto ja kulutus kohtaavat, jos tuotantorakenne muuttuu edellä esitettyjen skenaarioiden mukaisesti. Jos oletetaan, että tuulivoiman määrä kasvaa merkittävästi ja muun tuotannon ja kulutuksen profiilit pysyvät ennallaan, on kulutuksen ja tuotannon tasapainottamiseen tarvittava joustava teho jopa 76 % vuorokauden keskitehosta, ja viikkotasolla joustotarve on suurimmillaan jopa 50 % keskitehosta. Etenkin talvella voi olla useita yli viiden vuorokauden vähätuulisia aikajaksoja, jotka ovat haasteellisia tuotannon ja kulutuksen tehotasapainon näkökulmasta. Tuotannon ja kulutuksen välinen ero voi olla tällaisen jakson aikana useita gigawatteja ja energiavaje viikon ajalta useita satoja gigawattitunteja, joinain viikkoina jopa yli terawattitunnin.

Tuulisuus on tyypillisesti talvella voimakkaampaa kuin kesällä, mutta kesällä kulutus on pienempää ja aurinkoenergia korvaa ajoittaista vähäisempää tuulivoiman tuotantoa. Talven pitkien tuotantovajeiden takia kausivarastot, eli pitkäaikaiset varastot, joihin varastoidaan tarvittava energia kesällä ja syksyllä ja käytetään talvella, ovat erittäin tärkeitä. Erittäin merkittävä apu saataisiin myös sektori-integraatiosta sähkö- ja lämpöjärjestelmien suhteen ja erityisesti lämmön kausivarastojen hyödyntämisestä. Merkittävän osa sähkönkulutuksesta kylminä talvipäivinä muodostuu sähköön perustuvista lämmitysmuodoista. Lämmön kausivarastojen ja synteettisen kaasun varastojen avulla riippuvuutta sähkötehosta voidaan pienentää.

Kuten edellä on todettu, on näissä analyyseissä oletettu tuotannon ja kuormituksen profiilin vastaavan nykytilannetta. Tämä tarkoittaa, että esimerkiksi uutta kysyntäjoustoja tai sähköautojen latausta ei ole huomioitu suoraan kuormitusprofiilin muutoksiin. Käytännössä sähkönkulutuksen rakenteelliset muutokset, kuten sähköautojen ja lämpöpumppujen yleistymisen ja niihin liittyvän joustopotentialin hyödyntäminen tulevat vaikuttamaan kuormitusprofiileihin. Tässä analyysissä ei ole myöskään huomioitu markkinahinnan muodostamisen vaikutuksia tuotannon ajojärjestykseen. Kuormitusprofiilin muodostumiseen vaikuttaa moni asia, joten sen tarkka ennakointi on hyvin vaikeaa. Tässä raportissa onkin käytetty nyt yllä kuvattua yksinkertaistusta. Siten tulokset ovat ainoastaan suuntaa antavia.

6.3. Mistä jousto saadaan?

Lyhytaikaista (sekunneista joihinkin tunteihin) joustoja saadaan lisää todennäköisimmin kysyntäjoustoista, sekä akkuvarastoista. Kuormituksia voidaan ohjata lyhytaikaisesti pois päältä, ilman että loppukäyttö häiriintyy. Digitalisaatio puolestaan mahdollistaa pientenkin resurssien kustannustehokkaan hallinnan. Tuuli- ja aurinkovoiman strateginen ajaminen hieman maksimitahopeiteen alapuolella tarjoaa myös yhden teknisesti helposti toteutettavan keinon lyhytaikaisen lisäjoustopotentialin saamiseksi. Pienentynyt inertia tulee todennäköisesti korvaantumaan nopealla kuormien ja akkuvarastojen ohjauksella, eli niin sanotulla synteettisellä inertialla. Tarkasteltaessa etenkin lyhytaikaisia joustotarpeita, joiden hetkelliset tehot voivat olla hyvin merkittäviä, korostuu, kuinka tärkeää on useiden eri resurssien yhtäaikainen käyttö. Haastavimmissa tilanteissa vain yksittäisen joustoresurssin käyttö ei enää riitä.

Akkuenergiavarastoja ei kuitenkaan kannata käyttää pidempään energianvarastointiin. Pidempään joustotarpeeseen tarvitaan muunlaisia energiavarastoja kuten lämpövarastoja ja synteettistä polttoainetta. Myös pumppuvoimalat ovat mahdollisia energiavarastoja tulevaisuudessa, esimerkiksi hyödynnettäessä vanhoja kaivoksia ja näiden luomaa korkeuseroa. Jos kaukolämmön tuotanto tulee perustumaan suurelta osin lämpöpumppuihin, voidaan lämpövarastojen avulla ohjata sähköntarvetta tarkoituksenmukaiseen suuntaan ja siten pienentää tehovajetta ja tasevirhettä tai varastoida ylimääräinen edullinen sähköenergia lämpönä myöhempää käyttöä varten. Kaukolämpöverkossa on jo itsessään lyhytaikaista varastointikykyä, ja tätä voidaan lisätä sähkövarastoja edullisemmilla vuorokausi- ja kausilämpövarastoilla.

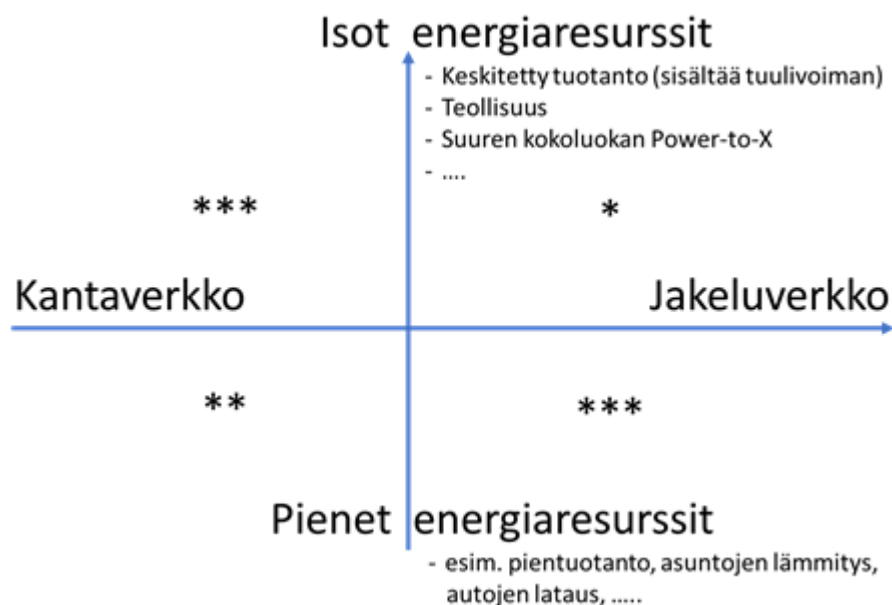
Nyt ja myös tulevaisuudessa Suomen rajasiirtoyhteydet ovat tärkeässä asemassa sekä normaaleissa sähkömarkkinan tilanteissa että haastavissa tilanteissa, joissa Suomen sisäinen tuotanto ei riittäisi. Rajasiirtoyhteydet mahdollistavat sähköenergian kaupan laajemmalla alueella, mikä merkittävästi vähentää joustopotentialin tarvetta verrattuna tilanteeseen, missä Suomi toimisi erillisenä saarekkeena. Ruotsissa ja Norjassa on hyvät olosuhteet tuuli- ja vesivoimaloille sekä pumppuvoimaloille, joiden tuottamaa energiaa on mahdollista myös tuoda Suomeen tilanteen sitä vaatiessa. Vastaavasti huonoina vesivuotina Suomesta ja Baltista viedään sähköä Ruotsiin ja Norjaan. Tuotantoportfolion muutokset tulevaisuudessa, erityisesti Olkiluoto 3 ydinvoimalan käyttöönotto, tulee aikanaan muuttamaan markkinatilannetta merkittävästi ja siten vaikuttamaan sähköntuotantoon ja tuontiin. Vuoteen 2030 mennessä rajasiirtoyhteyksien kapasiteetti kasvaa

5 916 MW:iin (Fingrid, 2017). Etenkin perusskenaarion kaltaisessa tilanteessa, tämä olisi hyvin merkittävä potentiaalinen joustoresurssi. Rajasiirtoyhteysien olemassaoloon ei pitäisi kuitenkaan luottaa liikaa.

7. Miten jousto kohtaa tarpeen

7.1. Aika ja paikka

Kuten edellä on todettu useaan otteeseen, niin joustoja tarvitaan järjestelmän eri tasoilla eri tavoin, ja toisaalta eri tasoilla tarjolla olevien resurssien vaikutuksella on eroa. Kuvassa 7.1 on hahmoteltu nelikenttää, jossa vaaka-akselin muodostaa sähköjärjestelmän eri tasot järjestelmävuastuussa olevasta kantaverkosta paikallisiin sähköjakeluverkkoihin ja pysty-akselin erilaiset eri kokoluokan energiaressit (tuotanto, varasto, kulutus). Kantaverkkoon kytkeytyvät merkittävät energiaressit (suuret tuotantoyksiköt, teollisuus) ja niiden nopeat muutokset vaikuttavat suoraan kantaverkon järjestelmä- ja sähkötekniseen tilaan ja jouston näkökulmasta tehotasopainoon ja verkon taajuuteen (merkitty kuvaan kolmella tähdellä), mutta juurikaan suoraan vaikuta 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 energiaressuseihin, jolloin jouston sijoittumisella on myös merkittävä vaikutus. Aggregoituina kokonaisuuksia pienet resurssit voivat tarjota myös merkittävän joustopotentiaalin kantaverkon tarpeisiin, varsinkin, kun kulutuksesta merkittävä osa on kytkeytynyt jakeluverkkoon (vuoden 2016 15 105 MWh/h huippukuormitustilanteen kulutuksesta 66,1 % aiheutui jakeluverkoissa sijaitsevasta kulutuksesta) (Matilainen, 2016).



Kuva 7.1. Joustoresurssien vaikutus järjestelmän eri tasoilla

Jouston sijainnin lisäksi toinen merkittävä tekijä on jouston (tuotannon ja kulutuksen jousto) ajallinen vaihtelu. Osa tuotannosta, esim. ydinvoima, on kannattavaa ajaa mahdollisimman tasanaisesti nimellistehollaan, kun taas entistä suurempi osa tuotannosta on sääriippuvaa vaihtelevaa tuotantoa. Tuotannon joustokyky riippuu tuotantoteknologian lisäksi ajosuunnitelmasta ja mahdollisen jouston strategisesta suunnittelusta. Tuotannon joustoja kuten mitä tahansa joustoja

voidaan allokoida useille eri markkinoille, ja siten ajosuunnitelmalla eri markkinoiden suhteen on keskeinen merkitys jouston saatavuuden suhteen. Erittäin joustava vesivoimakaan ei tarjoa juurikaan joustoa kevään tulvatilanteessa jokien tulviessa ja voimaloiden tuottaessa kaiken mahdollisen energian mitä turbiineilla voi tuottaa. Tässä tilanteessa vesivoimalla tuotetun reservin hinta olisi hyvin korkea, koska vettä jouduttaisiin ohjuuksuttamaan.

Myöskään kulutus ei ole tasaista, vaan erilaiset kuormat käyttäytyvät ajallisesti hyvinkin poikkeavasti; esimerkiksi lämmitys- ja jäähdytyskuorma riippuvat vuodenajasta ja ulkolämpötilasta, kun taas teollisuuskuorma on tasaisempaa riippuen suhdannetilanteista, vuorojärjestelyistä, teollisuusprosessin syklisyydestä, jne. Teollisuusprosessin sisällä voi olla merkittäviä joustavia osakokonaisuuksia, joita se voi hyödyntää sisäisesti tai tarjota joustoa eri markkinoille. Palvelusektorin ja toimistorakennusten kulutus puolestaan riippuu niiden aukioloajoista ja käyttöasteesta. Näissä kohteissa jäähdytysratkaisuilla on usein myös merkittävä vaikutus kulutuksen vaihteluun kulutuksen ollessa suurinta kesällä kaukolämmityskohteissa.

Energian varastoinnilla voidaan merkittävästi vaikuttaa jouston ajalliseen vaihteluun. Energian varastointi voi tapahtua pitkäaikaisvarastointina, jolloin puhutaan kausivarastoinnista tai lyhytaikaisena ja/tai nopeasti reagoivana varastona, esim. akkuvarastot ja vauhtipyörät.

Koska jouston paikalla ja erityisesti jouston tarpeen ja tarjonnan ajallisella vaihtelulla ja resurssin jouston vasteen nopeudella on merkittävä vaikutus jouston toteutumiseen ja sen myötä sen arvoon, tarvitaan erilaisia markkinaratkaisuja ja -paikkoja, jossa jouston kysyntä voi kohdata tarjonnan ja jossa joustolle syntyy sen hetkistä tarvetta vastaava arvo (hinta).

7.2. Markkinaratkaisut jouston saamiseksi

Kulutuksen joustolle muodostuu arvo perinteisillä Day-ahead ja Intra-day markkinoilla, joille tehtäviin tarjouksiin markkinaosapuolet voivat sisällyttää myös tuotannon ja kulutuksen jouston. Nämä markkinat toimivat järjestelmätasolla, ja niillä ei ole resurssin paikallista sijaintiin liittyvää ulottuvuutta. Ajallinen vaihtelu tulee esille markkinaosapuolten tarjouksissa.

Kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj ylläpitää säätösähkömarkkinoiden lisäksi ns. reservimarkkinoita, joita on esitelty kuvassa 7.2. Edellä mainittuja sähköpörssin tuotteita vastaavasti markkinat toimivat järjestelmätasolla, ja resurssin sijainnilla ei ole merkitystä, paitsi säätösähkömarkkinan osalta, jota hyödynnetään taseenhallinnan lisäksi kantaverkon sisäisten pullonkaulojen hallinnassa. Ajallinen vaihtelu mallintuu joustotarjouksiin.

	FFR	FRD	FCRN	aFRR	mFRR
	Nopea taajuusreservi	Taajuusohjattu häiriöreservi 250 MW Pohjoisissa yhteensä 1200 MW	Taajuusohjattu käyttöreservi 140 MW Pohjoisissa yhteensä 600 MW	Automaattinen taajuudenhallintareservi 70 MW Pohjoisissa yhteensä 300 MW	Manuaalinen taajuuden palautusreservi 1000 MW
Aktivointi	Suurissa taajuuspoikkeamissa Käytössä pienen inertian tilanteissa	Suurissa taajuuspoikkeamissa	Käytössä jatkuvasti	Käytössä kohdistetuilla tunneilla	Käytössä tarvittaessa
Nopeus	Sekunnissa	Sekunneissa	Parissa minuutissa	Videssä minuutissa	Vartissa
					

Kuva 7.2. Suomessa käytössä olevat reservituotteet ja niiden kapasiteetti vuonna 2018 [Fingrid, verkkosivu].

Ns. Puhtaan energian paketin sisältämä sähkömarkkinadirektiivi 2019/944, joka astui voimaan kesällä 2019 (Direktiivi 2019), vauhdittaa osaltaan paikallisten joustomarkkinoiden syntymistä. Direktiivin 32 artikla edellyttää kansallisen tason sähkömarkkinoiden säätelykehysten muuttamista niin, että se mahdollistaa jakeluverkonhaltijalle joustopalveluiden hankinnan hajautettua tuotantoa, energian varastointia ja kulutusjoustoja harjoittavilta toimijoilta sekä kannustaa siihen. Joustopalveluiden hankinnalla tulee artiklan mukaan pyrkiä kehittämään ja tehostamaan jakeluverkon käyttöä. Jakeluverkonhaltijan joustopalvelut on artiklan mukaan hankittava avointen, syrjimättömien ja markkinapohjaisten menettelyjen mukaisesti (Niemimaa 2020). Direktiivin linjausten mukaisesti alkuvuodesta 2020 lausuntokierroksella ollut hallituksen esitys (HL-SML ym 2020 V2 09012020) Sähkömarkkinain muuttamisesta sisälsi esityksen, että jakeluverkon kehittämissuunnitelman tulisi jatkossa sisältää myös suunnitelma kulutusjouston, sähkövarastojen, verkonhaltijan energiatehokkuustoimenpiteiden ja muiden resursien mahdollisesta käyttämisestä vaihtoehtona jakeluverkon siirtokapasiteetin laajentamiselle.

Jakeluverkonhaltija voi ostaa paikallisilta resursseilta joustopalvelua muun muassa kahdenvälisillä sopimuksilla. Tällöin jakeluverkon haltijalla on hyvä varmuus jouston saatavuudesta ja riittävästä ominaisuuksista. Sopimus on hyödyllinen myös joustoja tarjoavalle osapuolelle, jotta varmuus investointien kannattavuudesta taataan. Kahdenvälisillä sopimuksilla voidaan myös pienentää esimerkiksi hajautetun tuotannon liittymiskustannuksia, jos liitettävä tuotantoyksikkö käyttäytyy verkon kannalta riittävän joustavasti. Esimerkiksi hyvin harvoin toteutettavan tuotannon leikkauksen avulla voidaan sallia suuremman tuotantoyksikön liittäminen heikkoon jakeluverkkoon kuin ilman joustomahdollisuutta, jolloin molemmat osapuolet hyötyvät järjestelystä. Myös hajautettuja akkuvarastoja voidaan sijoittaa jakeluverkossa strategisesti sopiviin paikkoihin, jolloin verkkoyhtiö voi toteuttaa niiden tarjoamien palveluiden avulla toteuttaa sähkönsyötön varmennusta, jännitteen laadun parannusta ja hetkellisistä tehopiikeistä aiheutuvien investointitarpeiden siirtämistä vuosilla eteenpäin. Kysyntäjouston osalta tilanne on hankalampi, koska kysyntäjousto on hyvin hajallaan verkossa ja sen strateginen ohjaaminen on tuotantoa ja varastoja monimutkaisempaa. Kysyntäjoustoja voitaisiin kuitenkin käyttää samaan tapaan kuin tuotantoa (kysyntähuipun ajoittainen leikkaaminen) tai, kuten varastoja, ohjaamalla kysyntää paikallisen verkon tarpeiden perusteella.

Kahdenväliset sopimukset toimivat hyvin silloin, kun joustavia resursseja on halutussa paikassa tarjolla hyvin vähän. Tilanne on usein tällainen, kun jakeluverkkojen pienjänniteverkoissa. Kahdenvälisten sopimusten ongelmana on kuitenkin jouston oikean arvon määrittäminen. Lisäksi paikallinen sopiminen voi poistaa osan joustosta muilta joustomarkkinoilta. Sopimukset tulisikin laatia siten, että hyvin harvoin tarvittavat kriittiset joustotarpeet varmistetaan, mutta joustoresurssin osallistuminen muille markkinoille, joista tuottoa on haettavissa useammin, tulisi sallia. Näin jakeluverkossa sijaitsevat joustoresurssit voisivat samanaikaisesti hyödyntää sekä paikallisia tarpeita että järjestelmätason tarpeita eri sähkömarkkinaosapuolten kannalta. Tällä tavoin joustopalvelu olisi todennäköisesti myös edullisempaa paikalliselle jakeluverkonhaltijalle. Jouston myyjän tulee tällaisessa tilanteessa olla eri sähkömarkkinoiden asiantuntija ja kyetä käymään aktiivista kauppaa näillä markkinoilla. Yksittäisellä pienasiakkaalla, palvelutai teollisuusyrityksellä harvoin on tällaista osaamista tai edes mielenkiintoa. Tällaisessa tapauksessa markkinoille myytävää joustoa operoi aggregaattori, joka samalla voi operoida useampia joustoresursseja isompina kokonaisuuksina.

Jos joustoresursseja on paikallisesti riittävästi ja luotettavasti saatavilla, niin kahdenväliset sopimukset voidaan korvata myös paikallisella joustomarkkinalla. Ajatukset siitä, millainen paikallisen joustomarkkinan tulisi olla, jotta se olisi toimiva markkina sekä ostajille että myyjille, on vasta muotoutumassa. Useita kokeiluja sekä pitkäaikaisen että lyhytaikaisen paikallisen jouston kaupankäyntiin on olemassa. Yksi keskeinen motivaatio näissä kokeiluissa on ollut pienimuotoisen hajautetun tuotannon kokeman pakollisen tuotannonleikkauksen ja sähköautojen latauksen aiheuttamien ylikuormitustilanteiden ja jännitteen laatuongelmien vähentäminen. Nopeasti muuttunutta tilannetta pientuotannon ja sähköautojen osalta ei ole kymmeniä vuosia sitten rakennettujen sähköverkkojen investointisuunnitelmissa osattu ennakoida.

Jouston hyödyntämisen laajentuessa yhä useamman sähköjärjestelmän ja -markkinan osapuolen toimintoihin tarvitaan jouston koordinoitua. Nykyisessä tilanteessa esimerkiksi kantaverkkoyhtiön aktivoima jousto voi aiheuttaa ongelmia paikallisessa jakeluverkossa, koska jakeluverkon tilanne ei ole kantaverkkoyhtiön tai aggregaattorin tiedossa. Tilanteen koordinoimiseksi on esitetty liikennevalomallia, jossa vihreä valo tarkoittaisi, ettei jakeluverkossa ole haasteita näköpiirissä, jolloin muut toimijat voivat toimia täysin vapaasti. Suurin osa jakeluverkoista toimisi tässä tilassa valtaosan ajasta. Keltainen valo olisi indikaatio siitä, että paikallista jousto tarvitaan jakeluverkon tarpeisiin, jolloin joustoa tarjoavat osapuolet tietäisivät tehdä tarjouksia paikalliselle joustomarkkinalle ja muiden markkinoiden joustotarjousten tulisi läpäistä jakeluverkon verifiointi. Punaisen valon tarkoitus on indikoida, että jakeluverkossa on häiriö ja kaikki mahdolliset toimenpiteet otetaan käyttöön. Tällöin jakeluverkkoyhtiö voisi esimerkiksi leikata tuotantoa ja kulutusta niiltä asiakkailta, joiden kanssa asiasta on sovittu. Punaisen valon käyttö jakeluverkon hallinnassa tulisi säännellä hyvin tarkasti, jotta sen väärinkäyttö estettäisiin. Myös keltaisen valon aikainen jakeluverkon verifiointi on säänneltävä, jotta jakeluverkossa sijaitsevalla joustolla on mahdollisimman vapaa pääsy kaikille joustomarkkinoille.

Toinen koordinaatiota vaativa tilanne on paikallisen jouston markkinavoiman väärinkäytön estäminen paikallisella joustomarkkinalla. Koska paikallinen joustomarkkina voidaan ajoittain hyödyntää hyvinkin pienellä alueella, voi helposti käydä niin, että yhdellä jouston tarjoajalla

on hallussaan kaikki kyseisen alueen joustoresurssit. Tällöin markkinamekanismi ei toimi toivotulla tavalla, koska hinnoittelussa ei ole kilpailua. Tällaisessa tilanteessa jouston tarjoaja voisi halutessaan myös aiheuttaa ensin ongelmia paikalliselle jakeluverkolle ja sitten tarjota joustopalvelua niiden ratkaisemiseksi. Tämä tilanne on tosin helposti havaittavissa, jos eri markkinoiden tarjous- ja kaupankäyntitiedot ovat niitä koskevien verkonhaltioiden tiedossa. Tämä tosin edellyttää nykyisten markkinoiden kehittämistä, jotta esimerkiksi aggregoidut tarjoukset eri sijaintipaikoista osataan jakaa eri verkonhaltioille ja niiden eri käyttöpaikoille.

Yksi keskeinen ongelma paikallisen joustomarkkinan kehittämisessä on sen likviditeetin varmistaminen. Jos markkinalla ei ole riittävästi tarjouksia, sille ei myöskään tule kysyntää, vaan verkkoyhtiön on ratkaista paikalliset ongelmat muilla keinoin. Tästä syystä yksi tehokas keino likviditeetin saavuttamiseksi on olemassa olevan vakiintuneen markkinapaikan hyödyntäminen myös paikallisiin tarpeisiin. Esimerkiksi päivän sisäisen sähkömarkkinan tarjouksiin voitaisiin sisällyttää vapaaehtoinen paikkatieto jouston sijainnista, jolloin tarjous on käytettävissä myös paikallisella joustomarkkinalla ehkäpä hieman korotetulla tarjoushinnalla. Tällä tavalla sama joustotarjous voi osallistua useammalle markkinalle ja sen arvo sekä jouston tarjoajalle että koko järjestelmälle maksimoituu. Tarjous toki hyväksytään vain yhdellä markkinalla, mutta tarjous on kahden markkinan hyödynnettävissä. Ajatusta voitaisiin laajentaa vielä useammallekin markkinalle esimerkiksi tapauksessa, jossa markkinat sulkeutuvat eri aikoina. Tällöin jouston tarjoajan päänsärkyä, mille markkinalle joustotarjous tulisi jättää, voidaan vähentää esimerkiksi automaattisten, ei hyväksytyjen tarjousten edelleenlähetyksen avulla seuraavaksi sulkeutuvalle markkinalle, missä jousto täyttää markkinan ehdot.

Jouston kaupankäynnin koordinoinnin lisäksi keskeinen uusi elementti jouston tehokkaaksi hyödyntämiseksi monimarkkina - monitoimija -ympäristössä on joustorekisteri. Se on tietovarasto joustoresurssien ominaisuuksista (esimerkiksi käyttöpaikka, omistaja, aggregaattori, tekniset ominaisuudet, hyväksytyt joustotuotteet, jne.). Rekisteri ei siis ole keskitetty kaupapaikka, vaan apuväline tehokkaiden automatisoitujen tiedonvaihtotarpeiden toteuttamiseksi joustokaupan osapuolten välillä sekä itse kaupankäynnissä, että siihen liittyvissä koordinaatio- tarpeissa. Mitä pienempiä joustoresursseja hyödynnetään, sitä oleellisemmaksi tulevat automatisoidut prosessit kaikissa jouston hyödyntämisen vaiheissa sopimuksen laatimisesta kaupankäynnin eri vaiheista aina joustoselvityksen laatimiseen jouston aktivoinnin jälkeen.

Yhtenä osana jouston kaupallista toteutusta on asiakkaiden verkkopalvelumaksuun sisältyvä tehomaksukomponentti. Perinteisesti hieman suuremmilla (> 63 A liittymäkoko), pienjänniteverkkoon kytkeytyvillä asiakkailta on jo ollut käytössä verkkopalvelumaksun rakenne, joka sisältää perus- ja kulutusmaksun lisäksi asiakkaan tuntitehoon (esim. kuukauden suurin mitattu tuntikeskithe) perustuvan maksukomponentin. Vastaavanlaista ns. tehotariffia on suunniteltu sovellettavan myös pienemmille asiakkaille. Tällä hetkellä jo ainakin kolme jakeluverkkoyhtiötä on tällaisen verkkopalvelurakenteen ottanutkin käyttöönsä. Tällöin teholle (tuntikeskithe) muodostuu osaltaan arvo, joka heijastelee sähköverkon kustannusta ja osaltaan ohjaa paikallisten tehojen hallintaan.

7.3. Tekniset ratkaisut jouston saamiseksi

Kiinteistön sähkötehon tarve, tehon käyttöprofiili ja ohjattavuus muodostuvat monen valinnan ja mitoituksen yhteisvaikutuksena sekä luonnollisesti kiinteistön käyttötarkoituksen mukaan. Näistä suurin osa tehdään rakennuksen suunnittelu- ja toteutusvaiheessa tai muutostöiden yhteydessä. Tämän vuoksi rakentamista ohjaava lainsäädäntö sekä sitä tarkentavat määräykset ja ohjeet ovat osa kulutuspään jouston lähtökohtia yhdessä tilaajan ja käyttäjien asettamien tavoitteiden kanssa. Säädösten vaatimukset ja tilaajan tavoitteet vaikuttavat erityisesti lämmitysratkaisuihin ja laitevalintoihin. Tehojen hallinta erilaisin mittauksin ja ohjauksin edellyttää tilaajalta myös automaation ja tehohallinnan tavoitteiden määrittelyä, osaratkaisujen yhteensovittamista ja järjestelmähankintaa.

Rakennusten energiatehokkuusvaatimusten kehityksen myötä on lainsäädäntöön tullut vaatimuksia myös rakennusten automaatoratkaisuille (Laki rakennusten varustamisesta sähköajoneuvojen latauspisteillä ja latauspistevalmiuksilla sekä automaatio- ja ohjausjärjestelmillä, 2020) ja niiden suunnittelulle ja toteutukselle (ympäristöministeriö 2020). Kehitteillä on myös EU-tasolla rakennusten SRI-indikaattori (Smart Readiness Indicator), jossa yhtenä vaikuttavuuskriteerinä on “grid flexibility and storage”. (Verbeke et. 2020). Lisäksi ohjausjärjestelmien ja tietorakenteiden suunnittelun tueksi ollaan valmistelemaan kansainvälisiä standardeja, jotka tullaan implementoimaan osaksi eurooppalaisia ja suomalaisia sähköalan standardikokoelmia. Lisäksi valmistelussa on ekosuunnitteluvaatimusten valmistelu älykkäille laitteille, johon tuoteryhmään kuuluu kysyntäjoustoa tukevat tai sen mahdollistavat laitteet. (Ekosuunnittelu.info)

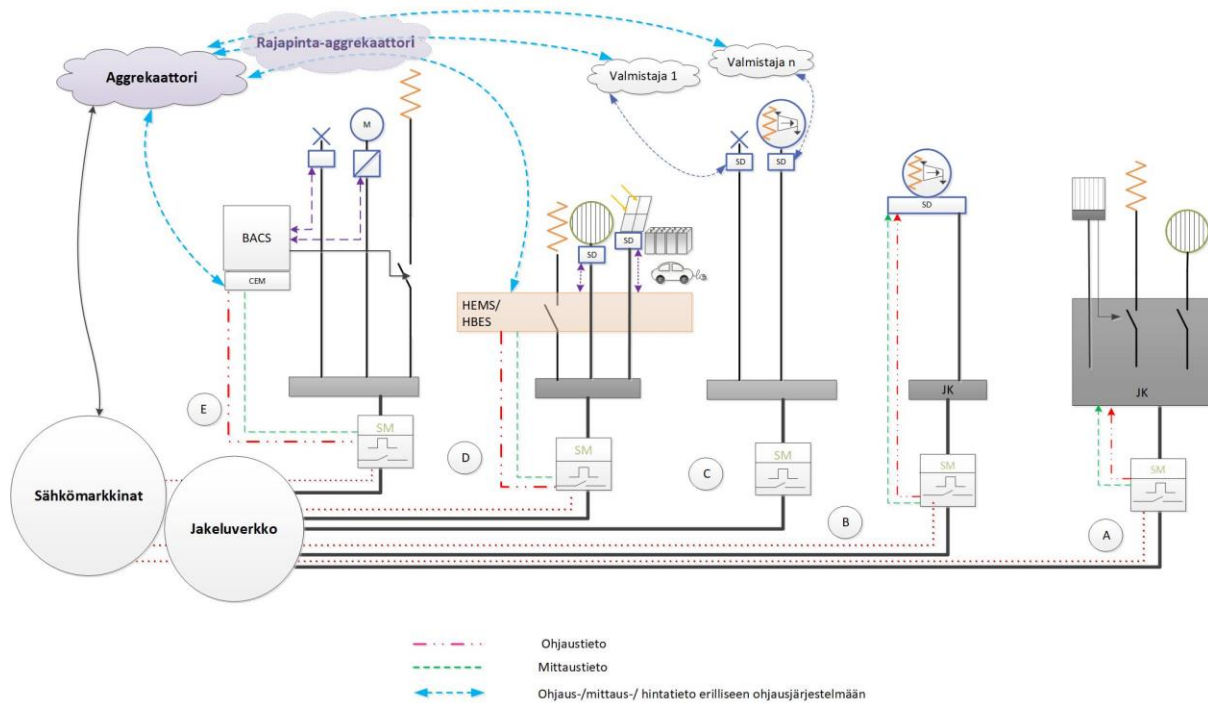
Suunnitteluvaiheessa tehtävät laite- ja järjestelmämitoitukset ovat perustana laitevalinnoille, joilla vaikutetaan merkittävästi lopullisen kokonaisratkaisun toimintaan. Rakentamisvaiheessa tehdään vielä erillishankintoja, laitemuutoksia tai asennustapamuutoksia, joilla voi olla vaikutusta kokonaisratkaisuun, eri laitteiden ohjattavuuteen tai yhteensopivuuteen.

Esimerkiksi käyttöveden varaajakoko, vastusteho, termostaatin asetteluarvot ja käyttöveden kulutus vaikuttavat siihen, milloin ja kuinka usein vedenlämmitys kytkeytyy päälle. Alalla syntyneet vakioratkaisut ja ohjeet voivat yhdenmukaistaa toteutuksia, mutta ne voivat myös ohjata epätarkoituksenmukaisiin valintoihin. Monet muutokset rakentamisessa sekä uusien laiteryhmiä tulo voivat muuttaa merkittävästi tehotarvetta ja kulutusprofiilia. Erityisesti muutoksia tuo erilaisten lämmitysratkaisujen tukena olevat sähköiset lisälämmitykset, lämpöpumppujen yleistymisen sekä jatkossa sähköautojen lataus.

Kiinteistö- tai taloautomaatio tai laitekohtaiset tehohallintatoiminnot muodostavat ohjattavan tehohallinnan perustan. Eri laiteryhmiä, kuten lämmityksen osalta, perusohjausratkaisut ja säätötavat vaikuttavat siihen, miten eri tehot kytkeytyvät ajallisesti tai käyttötarpeen mukaan. Kiinteistöautomaation ja ulkoisten toimijoiden palveluilla voidaan tehohallintaa hyödyntää energiakustannusten optimoinnissa kiinteistötasolla, tuoda kulutus näkyviin reaaliaikaisesti sen käyttäjille ja siten lisätä tietoisuutta kulutuksen vaikutuksista ja mahdollistaa joustoresurssien hyödyntäminen eri joustomarkkinoilla aggregaattorin välityksellä. Tarvittavien automaatio- ja IT-järjestelmien asentamiseen, ylläpitoon ja käyttöön liittyy kuitenkin monia turvallisuus-, tietoturva- ja vastuunäkökulmia, joita ei ole selvitetty riittävästi kokonaisuuden kannalta, vaan

yksittäisistä näkökulmista kuten tietoliikenteen tietoturvan näkökulmasta. (Harsia ym. 2019, Järventausta ym. 2015)

Yksittäisten laitteiden ohjattavuus on lisääntynyt teknisen kehityksen ja digitaalisten ratkaisujen yleistymisen myötä. Monipuoliset automaatio- ja ohjausratkaisut eivät ole enää kustannustekijä. Kuvassa 7.3 on esitetty jousto-ohjauksen erilaisia vaihtoehtoja, joita tällä hetkellä on käytössä.



Kuva 7.3. Kiinteistöön joustoon liittyviä nykyisiä vaihtoehtoja. A-versio on tyypillinen sähkölämmityskohde, B-versiossa on laitteissa omaa ohjausälykkyyttä, C-versio perustuu laitekohtaisiin ohjauspalveluihin, D-versiossa on oma energiahallintajärjestelmä

Joustopaikan skaalautuminen tulee edellyttämään kulutuspaikan ratkaisujen siirtymistä analogiperusteisesta “rele- ja kontaktitekniikasta” digitaalisten ratkaisujen käyttöön. Kiinteistöpaikassa tehohallintaan ratkaisut voivat olla sekoitus paikallista energia/tehohallintajärjestelmää (CEM) ja yksittäisten “älykkäiden” laitteiden (SD) palveluiden käyttöä. Kiinteistö- ja kotiautomaatioratkaisut ovat keskeisiä myös tehohallinnassa.

Joustopaikan ohjattavuus ei vielä takaa, että resurssi on sellaisenaan hyödynnettävissä joustopaikan palveluna jollakin joustopaikan markkinalla. Resurssi on integroitava osaksi sitä hyödyntävien osapuolten IT-ratkaisuja. Jotta tämä voitaisiin tehdä tehokkaasti ilman paikan päällä tehtävää integrointityötä, tarvitaan ohjelmistoarkkitehtuuri, jonka kautta kukin sopimuksilla oikeutettu osapuoli pääsee tietoturvallisesti käsiksi joustopaikan resurssin tietoihin. Tehokas integrointiratkaisu edellyttää, että paikallinen toteutus joustopaikan resurssin ohjaamisesta häivytetään tietojärjestelmän integroinnin näkökulmasta. Joustopaikan palvelu voi julkaista tiedon resurssin tilasta samanaikaisesti kaikille siitä kiinnostuneille (kotiautomaatiolle ja aggrekaattorin pilvipalvelulle jne.). Sopimuksilla määritellään ketkä ja kuinka saavat joustopaikan resurssia hyödyntää.

Esimerkiksi lämpöpumpun päätehtävä on tuottaa lämpöä ja viilennystä kiinteistöön. Pumpun tarjoamaa tietoa voidaan käyttää kiinteistön valvonnassa, energiansäästössä esim. lämpötilan pudotusten kautta kotiautomaation avulla. Kotiautomaatio voi myös minimoida energiakustannuksia, jos se saa tarvittavat tiedot hinnoista ja ennusteet kodin kulutuksesta ja tuotannosta. Toisaalta samasta tiedosto voi olla kiinnostunut myös aggregaattori, jolla on joustosopimus pumpun omistajan kanssa. Sopimuksessa on sovittu esimerkiksi, että lämpötila saa vaihdella ± 2 °C asetusarvon ympärillä. Tämä lämpötilan vaihtelualue on aggregaattorin käytössä olevaa joustoa. Pumpua ei siis pysäytetä tai käynnistetä, sen asetusarvoja vain vaihdetaan lennossa, jolloin pumpun käyntisykli muuttuu haluttuun suuntaan. Kun aggregaattorilla on riittävän monta tällaista pumppua, niin kokonaisuutena saadaan haluttu palvelu toimitettua jouston ostajalle. Vastaavasti kodin energiakustannusten minimointi voi olla osa sähkönmyyjän palvelua, jolloin hyöty kotiautomaation toteutukseen verrattuna on mahdollisuus optimoida myös myyjän hankintaportfoliota, mikä mahdollistaa edullisemmän sähköenergian myymisen loppuasiakkaalle.

Pilvipalveluiden avulla voidaan luoda skaalautuvia ratkaisuja kotiautomaation ja aggregaattorin tarpeisiin. Jotta kullakin joustoresurssilla ei olisi omaa erillistä pilvipalvelua, tarvitaan lisäksi myös paikallinen IoT-infrastrukturi laitteiden liittämiseksi yhteen ja niiden hallinnoimiseksi tietoturvallisella tavalla, joka mahdollistaa fyysisten laitteiden ja IT-maailman tehokkaan yhdistämisen, tiedonvaihdon kaikkien osapuolien kanssa, jotka tietoa tarvitsevat, ja eri toimijoiden toimintojen hajauttamisen ja koordinoimisen. Kotiautomaation toiminto voi toteuttaa esimerkiksi ostoenergian ja siirtolaskun minimointia samalla kun se pyrkii tarjoamaan mahdollisimman paljon joustoresurssia aggregaattorille. Jouston myyminen eri joustomarkkinoille on puolestaan aggregaattorin liiketoimintaa ja siksi tämä kannattaakin ”ulkoistaa” aggregaattorin mietittäväksi. Aggregaattori ja kotiautomaatio vaihtavat keskenään tietoa päätöksistään, jotta kokonaisuus saadaan toimivaksi molempien kannalta, eivätkä toisen tekemät päätökset pääse ikävästi yllättämään toista.

Kotiautomaatio jatkossa ennustaa ja optimoi joustavien resurssien ajoittamista. Ajo-ohjelman tuloksena on voitu päättää esimerkiksi, milloin varaajan lämpötilan pitää antaa alentua, jotta päivän ylimääräinen aurinkoenergia mahtuu sinne ja toisaalta, ettei tehotariffin rajaa ylitetä, vaikka sähköauto laitettaisiinkin lataukseen kotiin saapumisen jälkeen. Kotiautomaatio antaa ennakoitua asetusarvot laitteille ja niitä reaaliajassa koordinoivalle toiminnolle. Perinteisesti koordinointi on toteutettu esimerkiksi relekytkennöillä, mutta huomattavasti monipuolisempia ja muokattavampia ratkaisuja saadaan toki aikaiseksi IoT-infran päälle rakennetulla ohjelmistototeutuksella. Säädön hierarkialla saavutetaan myös huomattavasti luotettavampi ratkaisu.

8. Asiakkaiden rooli joustossa

8.1. Yksittäiset asiakkaat

Asiakkaiden rooli on keskeinen kysyntäjoustopuolella ja verkon tasapainotuksessa pienjänniteverkon tasolla. Asiakkaiden tietämys kysyntäjoustopuolesta voi kuitenkin olla puutteellista. Asiakkailla on myös epäätietoisuuden lisäksi erilaisia huolenaiheita kysyntäjoustopuoleen liittyen, olivatpa ne huolet oikeutettuja tai epäätietoisuuteen perustuvia. Näiden huolten ja epäätietoisuuskohtien kartoittaminen on siten oleellista kysyntäjoustopuoleen mahdollistamiseksi pienjänniteverkon tasolla. Asiakaskyselyitä onkin jo jonkin verran tehty niiden kartoittamiseksi. Immosen, Kiljanderin ja Aron (2020) tutkimuksen mukaan asiakkaista yli 40 % suhtautuu kysyntäjoustopuoleen joko varauksellisesti tai negatiivisesti. Lisäksi Aalto-yliopistossa toteutettiin keväällä 2020 pienimuotoinen haastattelututkimus (Fatima, Hammer, Hämäläinen, Rahkola & Turunen, 2020). Siinä lähes 40 % haastatelluista osoitti huolta ja 25 % oli mahdollisesti huolissaan kysyntäjoustopuolesta. Tämän luvun tiedot perustuvat edellä mainittuihin tutkimuksiin.

Asiakkaiden tietoisuudessa kysyntäjoustopuolesta on haastattelujen perusteella parantamisen varaa ja heitä tulisi valistaa asiasta. Osalla heistä esiintyy epäätietoisuutta jopa sen osalta, mille ajankohdille heidän tulisi sähkönkulutustaan siirtää, miten se käytännössä toteutetaan ja mistä kyseinen tieto olisi helposti saatavilla. Asiakkaat pitävät suurten kodinkoneiden ja saunan käyttöajankohdan siirtämisen potentiaalisena tapana osallistua kysyntäjoustopuoleen, mutta niihin liittyen heillä on turvallisuuteen liittyviä huolenaiheita käytön valvonnan ja vakuutuskelpoisuuden osalta. Se, että kysyntäjoustopuolesta tuo asiakkaille ensisijaisesti mieleen kodinkoneiden ja saunan käyttöajankohdan siirron, kertoo siitä, että ainakin osa asiakkaista ajattelee kysyntäjoustopuoleen ohjauksen olevan vielä ainakin osittain manuaalista. Myös lämmitys nähdään kysyntäjoustopuolesta, vaikkakaan ei yhtä selkeänä kuin suuret kodinkoneet. Lisäksi lämmityksen osalta asiakkaat ovat huolissaan asumismukavuutensa heikkenemisestä. Ylipäätään huoli asumismukavuuden heikkenemisestä on merkittävä kysyntäjoustopuoleen tapauksessa. Asumismukavuudesta kun ei kovin mieluusti haluta tinkiä. Edellä mainitut seikat viittaavat siihen, että asiakkaita tulisi paremmin valistaa sen osalta, mitä kysyntäjoustopuolesta todellisuudessa tarkoittaa. Sähköautojen näkeminen selkeänä osana kysyntäjoustopuolesta asiakkaiden enemmistön keskuudessa puolestaan odottaa sähköautojen yleistymistä.

Asiakkaita huolestuttaa kysyntäjoustopuoleen toimivuus käytännössä: Seuraako siitä uusia ongelmia, mikäli kaikki pyrkivät lisäämään kulutustaan edullisen sähkön aikana? Yleisesti ottaen sähkönkulutus on kuitenkin nykyisellään suurinta aamuisin ennen tyypillisiä työaikoja ja etenkin iltaisin niiden jälkeen. Suurimmillaan asiakkaiden sähkönkulutus Suomessa on klo: 16-22. Mikäli tyypillisissä työajoissa ei tapahdu suurta muutosta, tuskin on myöskään odotettavissa suurta ryntäystä kulutustottumusten muutoksissa edullisemmän sähkön ajoille, jolloin edellä mainittu pelko on liioiteltu. Toki on myös huomioitava koronatilanteen mukanaan tuomat ja mahdollisesti pitkäaikaiset muutokset etätöiden lisääntymisessä, mikä voi aiheuttaa aamu- ja iltapäivän painottuvien kulutuspiikkien tasoittumista. Aiheesta kuitenkin tarvittaisiin lisätutkimusta koronatilanteen tasoituttua ns. uuden normaalin aikakaudella.

Suurinta osaa asiakkaista huoletti asumismukavuuden heikkeneminen kysyntäjoustopotentialin johdosta ja se, että he olisivat pakotettuja muuttamaan elintapojaan, vaikka 65 % asiakkaista osoittaa valmiutta kulutuksensa järjeistämiseen. Yksi esille nousseista ja keskeisimmistä huolenaiheista on asiakkaiden huoli omasta yksityisyydestään, mikäli jokin ulkoinen taho ohjailee heidän sähkönkulutustaan. Ulkopuolinen etäohjaus nähdään myös potentiaalisena ongelmien aiheuttajana joko niin, että heidän laitteensa tai laitteistonsa ovat käynnissä heidän valvomattaan, tai sähköä ei ole riittävästi tarjolla heidän sitä tarvitessaan. Tuon kaltaiset huolet kertovat asiakkaiden epätietoisuudesta kysyntäjoustopotentialista. Asiakkaat ovat myös huolissaan siitä, mille tahoille data heidän kulutustottumuksistaan jaetaan ja kuinka suuret riskit siinä ovat heidän yksityisyydensuojajensa kannalta. Kysyntäjoustopotentialiin liittyviä teknologioita ja siihen liittyvää informaatiota parantamalla asiakkaiden halukkuutta kysyntäjoustopotentialiin voidaan parantaa.

Huolenaiheistaan ja epätietoisuudestaan riippumatta kuluttajat ovat suhteellisen halukkaita osallistumaan kysyntäjoustopotentialiin. Etäohjaukseenkin myönteisesti suhtautuu lähes 60 % ja siihen olisi jo valmis lähes 50 %, mikäli se toteutettaisiin huomaamattomasti ja heitä hyödyttävästi. Ilmastonmuutoksen hidastaminen toimii motivaattorina kulutuskäyttäytymisen muutoksiin. Yli 50 % pitää ympäristöhyötyjä tärkeinä. Keskeisimpänä motivaattorina asiakaskäyttäytymiselle toimii kuitenkin kysyntäjoustopotentialin tuottamat taloudelliset säästöt. Yli 90 % pitäisi sähkölämmityksen pienenemistä tervetulleena muutoksena. Hintatoukka onkin paras tapa lisätä asiakkaiden halukkuutta kysyntäjoustopotentialiin. Asiakkaiden huolta vähentäisi entisestään tarjolla olevien ja tarjolle tulevien kysyntäjoustopotentialiteknologioiden kehittyminen, turvallisuuden ja avoimuuden lisääntyminen, sekä kysyntäjoustopotentialiin liittyvän informaation suurempi ja helpompi saatavuus. Kysyntäjoustopotentialin toteuttamiseen, siihen liittyvään datan siirtoon ja käyttöön kaivataan selkeitä ja avoimia pelisääntöjä. Lisäksi asiakkaat kaipaavat tietoa siitä, koska se olisi käytössä ja millainen käytännön toteutus olisi kyseessä.

Asiakkaiden oma energian pientuotanto ja mahdolliset akkuvarastot voivat lisätä kysyntäjoustopotentialia. Erityisesti oman aurinkoenergian tuotanto kiinnostaa asiakkaita ja siihen investoiminen nähdään positiivisena, mikäli takaisinmaksuaika on kohtuullinen (5 vuotta). Aurinkopaneelien määrä onkin lisääntynyt Suomessa. Mikäli oman tuotannon yhteyteen liitetään akkuja, voi osa asiakkaista olla ainakin hetkittäin osittain omavaraisia siten, että voivat käyttää omia energiavarastojaan hintavan sähkön aikana ja painottaa verkosta ostamista edullisen sähkön aikana.

8.2. Energiayhteisöt joustopotentialin tarjoajina

Yksittäisten asiakkaiden lisäksi asiakkaat voivat muodostaa energiayhteisöjä, joilla voi uutena toimijana olla myös merkittävä rooli joustopotentialin tarjoajana ja erityisesti perimmäisenä tavoitteena olevaan hiilineutraaliin yhteiskuntaan siirtymisessä. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2018/2001 (Direktiivi 2018 uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämiseksi) perusteluiden mukaan paikallisten kansalaisten ja paikallisviranomaisten osallistuminen uusiutuvan energian hankkeisiin uusiutuvan energian yhteisöjen kautta on tuottanut huomattavasti lisäarvoa uusiutuvan energian paikallisen hyväksynnän ja ylimääräisen yksityisen

pääoman saatavuuden suhteen, minkä seurauksena on toteutettu paikallisia investointeja, kuluttajien valinnanvara on laajentunut ja kansalaisten osallistuminen energiasiirtymään on lisääntynyt (Euroopan unionin virallinen lehti, L 328/92 FI, 2018).

Sähkömarkkinadirektiivissä (EU) 2019/944 yhtenä keskeisenä ajatuksena on asiakkaan roolin korostaminen. Direktiivi määrittelee käsitteen "aktiivinen asiakas", jolla tarkoitetaan "*loppuasiakasta tai yhdessä toimivien loppuasiakkaiden ryhmää, joka kuluttaa tai varastoi omissa tiloissaan rajatulla alueella tai jäsenvaltion niin salliessa muissa tiloissa tuotettua sähköä tai joka myy itse tuottamaansa sähköä tai osallistuu joustoa tai energiatehokkuutta koskeviin järjestelyihin, jos tällainen toiminta ei ole sen ensisijaista kaupallista tai ammatillista toimintaa* (Direktiivi 2019)."

Direktiivi (EU) 2019/944 määrittelee myös energiajärjestelmän toimijoiden osalta uutena käsitteenä "kansalaisten energiayhteisöt", joilla tarkoitetaan "oikeushenkilöä,

- a) joka perustuu vapaaehtoiseen ja avoimeen osallistumiseen ja jossa tosiasiallista määräysvaltaa käyttävät jäsenet tai osakkaat, jotka ovat luonnollisia henkilöitä, paikallisviranomaisia, kunnat mukaan lukien, tai pieniä yrityksiä;*
- b) jonka ensisijainen tarkoitus on tuottaa rahallisen voiton sijaan ympäristöön, talouteen tai sosiaaliseen yhteisöön liittyviä hyötyjä jäsenilleen tai osakkailleen tai alueille, joilla se toimii; ja*
- c) joka voi harjoittaa tuotantoa, mukaan lukien uusiutuvista lähteistä peräisin olevaa tuotantoa, jakelua, toimitusta, kulutusta, aggregointia, energian varastointia, energiatehokkuuspalveluja tai sähköajoneuvojen latauspalveluja tai voi tarjota muita energiapalveluja jäsenilleen tai osakkailleen; (Direktiivi 2019)"*

Direktiivin 2019/944 16 artiklassa tarkennetaan puitteita, joiden pohjalta jäsenvaltiot voivat säätää kansalaisten energiayhteisöt mahdollistavassa sääntelykehyksessä mm. siten, että "kansalaisten energiayhteisöillä on oikeus omistaa, perustaa, ostaa tai vuokrata jakeluverkkoja ja hallinnoida niitä itsenäisesti" (Lintilä 2020).

Älyverkkotyöryhmä hahmotteli loppuraportissaan (Pahkala 2018) kolme erilaista energiayhteisömallia (kiinteistön sisäinen energiayhteisö, kiinteistörajan ylittävä energiayhteisö sekä hajautettu energiayhteisö), jotka perustuivat tuolloin voimassa olleen Sähkömarkkinalain ja vanhan Sähkömarkkinadirektiiviin 2009/72/EY tulkintoihin. Älyverkkotyöryhmän raportissa ei ole kuitenkaan vielä tarkastelu uuden Sähkömarkkinadirektiivin 2019/944 sisältämiä linjauksia energiayhteisöistä.

Kansalaisten energiayhteisöt ovat jäsenyysrakenteensa, hallinnointivaatimustensa ja tarkoituksensa perusteella uudentyyppisiä yhteisöjä. Niiden olisi sallittava toimia markkinoilla tasapuolisesti edellytyksin väärinämättä kilpailua, ja markkinoiden muihin sähköalan yrityksiin sovellettavia oikeuksia ja velvoitteita olisi sovellettava kansalaisten energiayhteisöihin syrjimättömällä ja oikeasuhteisella tavalla. Direktiivissä 2019/944 jäsenvaltioille annetaan mahdollisuus sallia se, että kansalaisten energiayhteisöistä tulee joko yleisen järjestelmän mukaisia jakelu-

verkonhaltijoita tai niin sanottuja ”suljetun jakeluverkon haltijoita”. Kun kansalaisten energiayhteisölle on myönnetty jakeluverkonhaltijan asema, sitä olisi kohdeltava samalla tavalla ja sillä olisi oltava samat velvoitteet kuin jakeluverkonhaltijalla. (Euroopan unionin virallinen lehti, L 158/130 FI, 2019).

Sekä energiayhteisöjen sisäisillä että ulkoisilla energiajärjestelmälle tarjottavilla joustoilla on myös vaikutusta energiayhteisöjen ansaintamahdollisuuksiin joustomarkkinoilla sekä toisaalta kustannuksiin, mm. niiden maksamiin verkkopalvelumaksuihin. Yhteisön jäseniä ei kuitenkaan pitäisi vapauttaa asianmukaisista kustannuksista, maksuista ja veroista, joita perittäisiin samankaltaisessa tilanteessa olevilta yhteisöön kuulumattomilta loppukuluttajilta tai tuottajilta tai kun siirtoihin käytetään mitä tahansa julkista verkkoinfrastruktuuria (Euroopan unionin virallinen lehti, L 158/130 FI, 2019). Ylipäänsä asiakkaiden maksamiin verkkopalvelumaksuihin sisältyviin kustannuseriin ja niiden muodostumiseen tulisi saada lisää avoimuutta ja läpinäkyvyyttä.

Esimerkkinä energiayhteisön resurssien käytöstä lähteessä (Koskela 2019) on tarkastelu kerrostalon muodostamaa energiayhteisöä, jossa kerrostalon asukkaat yhdessä omistavat kiinteistön energiantuotanto (aurinkovoimala, PILP) ja -varasto (akku) resurssit ja asukkaiden sähkön hankinta perustuu yhteishankintaan ja yhteen yhteisen verkkoliittymän mittausten pohjalta maksettavaan tehomaksukomponentin sisältämään verkkopalvelumaksuun. Tulosten perusteella akkuvarasto parantaa merkittävästi aurinkoenergian kannattavuutta ja akkuvaraston käytön optimoinnilla on myös mahdollista mitoittaa yhteinen aurinkovoimala 2-3 suuremmaksi kuin pelkästään kulutuksen mukaan tehtävän mitoituksella.

Lisäksi joustojen kannalta merkittävä sektori-integraatio toteutuu uudella tavalla aktiivisten asiakkaiden ja energiayhteisöjen toiminnassa. Energiayhteisön paikalliset lämmitysratkaisut vaikuttavat myös sähköenergiajärjestelmään joustojen tarpeen ja potentiaalın osalta. Sähköautojen yleistymisen on toinen esimerkki sektori-integraation vaikutuksesta joustoihin. Energiaratkaisuja (sähkö, lämpö, jäädytys, liikenne) tulisikin tarkastella kokonaisvaltaisesti energiayhteisöjen tapauksessa, joskin haasteena on eri sektorien liiketoimintaympäristöjen erot ja erilainen regulaatio.

9. Esimerkkejä jouston toteutuksesta

Liikekiinteistöt

Isossa myymäläkohteessa kokeiltiin talotekniikan laitteiden keskitettyä ohjausta ja tämän soveltumista joustotarpeisiin. Ohjattavina kuormina olivat lämpöpumput, ilmanvaihto, ja valaistus. Kuormia pystyttiin pyynnöstä pudottamaan yhteensä noin 500 kW (Kähärä 2019, S-ryhmä 2015). Ensimmäisissä piloteissa säästöä haettiin sähkön spot-hintoja hyödyntämällä, mutta tästä ei juurikaan saatu rahallista säästöä. Myöhemmissä hankkeissa ohjauksia pyrittiin tarjoamaan taajuusohjatuille käyttöreservimarkkinoille. Haasteeksi muodostui mittausten tarkkuus, sillä ilman laitekohtaisia mittauksia teholtaan alle 100 kW:n myymäläkohtaisia ohjauksia ei pystytty luotettavasti todentamaan (Riski 2019, S-ryhmä 2015).

Myymälöiden varavoimakoneiden ohjauksia on pilotoitu. Saman liikeketjun omistuksessa olevissa kohteissa on ohjattavissa tällä hetkellä yhteensä 12 kappaletta 0,5 MW:n tehoisia yksiköitä. Hitaamman reagoitinopeuden vuoksi varavoimakoneet soveltuvat parhaiten säätösähkömarkkinoille. Ohjaus on piloteissa toteutettu ulkopuolisen aggregaattorin ohjauspyynnöstä ja ulkopuolisen toimittajan automaatiojärjestelmään liitettävän ohjausyksikön avulla. Haasteena on, että tämänkaltaisiin toteutuksiin ei ole vakioitua tapaa tai standardia, jonka vuoksi ohjausratkaisut joudutaan toteuttamaan aina tapauskohtaisesti. Varavoimakoneiden hyödyntämisessä on lisäksi mietittävä, miten varmistutaan polttoainelogistiikan toimivuudesta, jos ohjauksia aletaan toteuttamaan säännöllisemmin. (Kähärä 2019)

Kasvihuoneet

Noin 90 % Suomen keinovalotetuista kasvihuoneista on jo aggregoitu häiriöreservimarkkinoille. Ohjattava teho on suuruusluokaltaan yhteensä noin 200 MW. Ohjaukset on toteutettu mobiiliverkon kautta ohjattavilla ohjausyksiköillä, joiden kärkitiedon ohjaamana kohteen valaistus voidaan tarvittaessa ohjata pois päältä. Ohjattu kuorma todennetaan samaan ohjausyksikköön liitetyllä mittauksella. (Hollmen 2019)

Pakkasvarastot

Pilottihankeessa ohjattiin pakkasvaraston kompressoria sähkön spot-hinnan perusteella. Rajoitukset ohjauksien pituuksille aiheutti lämpötilaerot, jonka myötä kesällä kompressoria voitiin pitää pois päältä korkeintaan tunnin kerrallaan. Talvella poiskytkentä oli mahdollista toteuttaa pidempään. Toisessa vastaavassa pilotissa invertteriohjattua pakkasvaraston kompressoria, lähellä olevan meijerin lämpöpumppuja ja pientä vesivoimalaa ohjattiin taajuusohjatun käyttöreservin (FCR-N) tarpeisiin. Ohjattavaa kapasiteettiä saatiin yhteensä noin 200-300 kW. Ohjaus toteutettiin mobiilidatayhteydellä toimivalla ohjausyksiköllä, joka oli yhteydessä paikallisiin automaatiojärjestelmiin I/O-viestien tai väyläliitännän kautta. Onnistuneista piloteista huolimatta ohjauksia ei jatkettu pidempään, sillä jatkuvan ohjauksen yhteyttä ennenaikaisesti laiterikkoihin pidettiin mahdollisena. (Rasimus 2020, Seam Group Oy)

Prosessiteollisuus

Prosessiteollisuuden isoissa sähkökuormissa nähdään merkittävää potentiaalia kysyntäjouston tarpeisiin. Haasteina näiden kohteiden löytämisessä on se, että moni lopputuote on hyvin

herkkä prosessissa tapahtuville muutoksille, jonka takia näiden ohjauksiin ei välttämättä haluta helpolla lähteä. Esimerkkikohteena on teollisuuden prosessi, jossa sinkkialtaan sulanapitoprosessia voidaan ohjata tarpeen mukaan ajoittain pois päältä ilman merkittävää haittaa. Tätä joustokapasiteettiä hyödynnetään taajuusohjatun häiriöreservin (FCR-D) tarpeisiin. Toisessa teollisuuden kohteessa elektrolyysiprosessin tehoa voidaan lineaarisesti ohjata kumpaakin suuntaan ilman prosessin häiriintymistä. Tätä kahteen suuntaan lineaarisesti ohjattavaa kapasiteettiä on voitu tarjota taajuusohjatun käyttöreservin (FCR-N) tarpeisiin (Pietilä 2019).

Virtuaalivoimalaitos

2018 Espoossa valmistunut kauppakeskus Sello mainostaa olevansa maailman ensimmäisiä virtuaalivoimalaitoksia. Virtuaalivoimalaitos tarkoittaa tässä yhteydessä sitä, että automaatiojärjestelmällä hallitaan keskitetysti kauppakeskuksen aurinkoenergiajärjestelmää (550 kWp), akustoa (2 MW) ja talotekniikan eri järjestelmiä. Tämän ”mikroverkon” joustokapasiteettiä voidaan ohjata sähkön hinnan perusteella sekä reservimarkkinoiden tarpeisiin. (Siemens 2019)

Kotiautomaatio

Monessa asuinrakennuskohteessa on toteutettu erilaisia jousto-ohjauksia taloudellisen edun saamiseksi. Tyypillisimpiä esimerkkejä ovat sellaiset kohteet, joissa sähkön omatuotannon käyttöä kiinteistön omiin tarpeisiin pyritään maksimoimaan ja sähkösopimuksen pohjautuessa spot-tuntihintoihin, joustavia kuormia pyritään ohjaamaan halvimmille tunneille. Yksinkertaisimmillaan ohjauksia on toteutettu niin, että lämminvesivaraajan kontaktoria on ohjattu päälle kello-ohjauksella omatuotannon kannalta tuottavimmille ajankohdille. Vaihtoehtoisesti tämä ohjaus on voitu toteuttaa aurinkopaneelijärjestelmän invertterissä olevalla ohjausreleellä, joka sulkeutuu tuotannon ylittäessä asetellun rajan.

Edistyneemmillä kodin energianhallintajärjestelmillä (HEMS) pyritään kiinteistön joustavia kuormia ohjaamaan optimaalisesti omatuotannon tilanteen, mahdollisen kotiakun varauksen, sähkön tuntihinnan, sääennusteiden, olosuhdemittausten, läsnäolon ja käyttäjän asetusten perusteella. Tällöin ohjattavina kuormina ovat tyypillisesti lämminvesivaraaja, sähkölämmittimet (tila-/vyöhykekohtaisesti) ja sähköauton lataus. Markkinoilla on tarjolla myös samojen ohjausparametrien perusteella ohjattavia kotiakkuja ja ”älykkäitä” kodinkoneita, mutta kummatkin ratkaisut ovat vielä melko harvinaisia.

Markkinoilla on jo muutamia kodin energianhallintaan erikoistuneita toimijoita. Näillä ohjausjärjestelmillä pyritään kiinteistön omistajalle tuomaan taloudellista hyötyä tarkemmalla ja monipuolisemmalla lämmityksen ohjauksella sekä sähkön omatuotannon ja tuntihintojen perusteella tehdyillä sähkökuormien ja mahdollisten sähkövarastojen ohjauksilla. Ohjausjärjestelmien toimittaja voi näiden ohjausten avulla keskitetysti ohjata esimerkiksi asiakkaidensa lämminvesivaraajia ja tilojen lämmityksiä. Tällä tavoin laitetoimittajalla on mahdollisuus toimia aggregaattorina reservisähkömarkkinoilla. Ohjausjärjestelmien tekoälyn avulla kohteen rakenteiden lämpökapasiteettiä voidaan oppia tuntemaan. Tällöin voidaan esimerkiksi kohdekohtaisesti tunnistaa, miten pitkään lämmitys on mahdollista kytkeä pois ilman, että huoneiden sisälämpötila poikkeaa sallittua enempää asetusarvosta.

10. Yhteenveto ja johtopäätökset

Muutos kohti hiilineutraalia energiajärjestelmää vaatii jokaisen sektorin merkittävää uudistautumista. Energiankäytössä fossiiliset polttoaineet tulevat korvautumaan uusiutuvalla energialla tuotetulla sähköllä monissa käyttökohteissa. Liikenteessä sähköautot ja synteettiset polttoaineet tulevat korvaamaan öljyä, lämmityksessä lämpöpumpuilla tuotetaan lämpöä sekä rakennuksissa että kaukolämpöverkossa, teollisuudessa esimerkiksi raudan vetypelkistys mahdollistaa hiilineutraalin prosessin. Lisäksi vedystä ja biopohjaisesta hiilidioksidista valmistettavat synteettiset polttoaineet mahdollistavat myös vaikeasti sähköistettävien liikennemuotojen sähköistyksen sekä energian varastoinnin polttoaineena. Erityisesti vedyn tuotanto, mutta myös muut edellä kuvatut radikaalit muutostekijät tulevat lisäämään sähkönkäyttöä merkittävästi. Jos sähkön tuontiriippuvuutta pyritään samalla pienentämään, voi Suomen vuotuinen sähköenergiatuotanto jopa kaksinkertaistua nykyisestä vuoteen 2035.

Edullisin vaihtoehto uuden tuotantokapasiteetin kohdalla Suomessa on tuulivoima. Siten on oletettavaa, että kasvavaan kysyntään tullaan vastaamaan ensisijaisesti lisääntyvällä tuulivoiman tuotannolla. Tehdyissä skenaarioissa tuulivoiman kapasiteetin ennustetaan kasvavan nykyisestä jopa yli 10-kertaiseksi. Tuulivoiman tuotannon vaihdellessa säätilan mukaan tarvitaan lisää joustoresursseja, joilla varmistetaan tuotannon ja kulutuksen tasapaino kaikissa tilanteissa.

Tuulivoiman kohdalla haasteeksi muodostuvat erityisesti pidemmät, jopa 5–10 vuorokauden vähätuuliset jaksot, jolloin tarvitaan jopa useita gigawatteja muita resursseja takaamaan tehotasapainon. Tuulivoimateknologian kehittyminen (korkeammat mastot ja suuremmat turbiinit) kuitenkin parantaa tuulivoimaloiden käyttöaikoja ja siten pienentää tätä haastetta. Tuulivoimalaitosten hajauttaminen maantieteellisesti laajalle alueelle pienentää tuulenoikeuden vaihteluista aiheutuvaa kokonaistehon vaihtelua hetkellisellä tasolla. Tuulivoimatuottaja itsekin osallistuu aktiivisesti taseensa ylläpitämiseen ja tarvittaessa sitä voidaan edelleen parantaa muuttamalla tuulivoimalan säätöperiaatetta ja yhdistelemällä tuulivoima laajempaan tuotantoportfolioon. Lähitulevaisuudessa siirtyminen 15 minuutin markkinajaksoon tulee myös parantamaan tehotasapainon ylläpitoa vähentämällä sekä tuulituotannon hetkellisiä tasepoikkeamia että kuorman tasepoikkeamia. Toisaalta joustoa tarvitaan myös tehotasapainon ylläpitämiseen yllättävissä vikatilanteissa. Esimerkiksi verkkovian seurauksena tuotannosta voi poistua ennalakoimattomasti yhden ydinvoimalan tuotanto (1 600 MW), mikä tulee korvata kuormanpudotuksella ja muun tuotannon lisäämisellä. Lisäksi sähköjärjestelmään kytkettyjen pyörievien masojen, kuten suurten generaattoreiden korvautuessa taajuusmuuttajakytkentäisillä kevyemmällä generaattoreilla, järjestelmän inertia pienentyy. Inertia tarkoittaa pyörievien massojen hitautta, joka vastustaa muutoksia, ja se edesauttaa tehotasapainon hallintaa nopeissa muutoksissa, kuten voimalaitosten vikatilanteet.

Koko järjestelmän tehotasapainon ohella uutta joustotarvetta syntyy myös paikallisesti. Muun muassa sähköautojen suuret latausvirrat, muutokset lämmitystavoissa ja aurinkovoimaloiden

kaksisuuntainen tehonsyöttö kasvattavat tarvetta joustoille jakeluverkon ja loppukäyttäjän näkökulmista. Etenkin hetkelliset yhtäaikaiset suuret kuormitukset saattavat asettaa erityisiä haasteita verkkoinfrastruktuurille.

Lyhytaikaisen (sekunneista joihinkin tunteihin) jouston lähde on todennäköisimmin kysyntäjousto, tuulivoiman strateginen ohjaus sekä akkuvarastot. Akkuenergiavarastoja ei kuitenkaan kannata käyttää pidempään energianvarastointiin. Pidempään joustotarpeeseen tarvitaan muunlaisia energiavarastoja kuten lämpövarastoja ja synteettistä polttoainetta. Myös pumppuvoimalat ovat mahdollisia energiavarastoja tulevaisuudessa, esimerkiksi hyödynnettäessä vanhoissa kaivoksissa olevaa korkeuseroa. Jos kaukolämmön tuotanto tulee perustumaan suurelta osin lämpöpumppuihin, voidaan lämpövarastojen avulla tasoittaa sähköntarvetta.

Asiakkaiden sähkönkäytön jousto ja sen toteuttaminen liittyy aina kulutuskohteen järjestelmävalintoihin ja asennusten rakenteisiin. Kulutuspuolella jousto yksittäisen kohteen osalta vaikuttaa liittymän koon ja omatuotannon hyödyntämisen lisäksi muuntopiirin mitoittamiseen. Kokoomalla suuri joukko ohjattavaa kuormaa yhteen voidaan muodostaa myös markkinoille sopiva kokonaisjoustokuorma. Toisaalta tällainen aggregoitu ja hintasynkronoitu kuormien ohjaus voi aiheuttaa hetkellisen kuormituksen kasvua sähköverkkoon ja siten aiheuttaa verkon vahvistamisen ja investointien tarvetta. Tätä osaltaan tarjoaa ratkaisuja uudenlaiset tehomaksukomponentin sisältämät verkkopalvelumaksurakenteet ja paikallinen joustomarkkina joustopalveluiden hyödyntämiseksi myös jakeluverkossa ja sen tehokkaammassa käytössä. Tällaisessa kysyntäjoustopuolella asiakkaan rooli on keskeinen. Asiakkaiden tietämys kysyntäjoustopuolesta voi kuitenkin olla puutteellista. Asiakkailla on myös epätietoisuuden lisäksi erilaisia huolenaiheita kysyntäjoustopuoleen liittyen, olivatpa ne huolet oikeutettuja tai epätietoisuuteen perustuvia.

Kulutuksen muutoksessa on hyvä huomata, että uudet sähkönkulutuskohteet (mm. sähköautot ja synteettisten polttoaineiden tuotanto) liittyvät keskeisesti sektori-integraation kehittymiseen, joka osaltaan parantaa energijärjestelmän joustokykyä sekä resurssitehokkuutta. Esimerkiksi sähköautojen lataus, älykkäästi ohjattuna, on ennemminkin mahdollisuus kuin haaste sähköjärjestelmälle, jos haasteet tunnistetaan riittävän ajoissa ja luodaan teknologiset ja markkinaehtoiset ratkaisut, joilla voidaan sähköautojen tarjoamat mahdollisuudet sähköjärjestelmän kehittämiseksi hyödyntää mahdollisimman täysimääräisesti.

Tässä esitetyn perusteella voidaan todeta, että joustotarve kasvaa merkittävästi siirryttäessä hiilineutraaliin energijärjestelmään. Sähkön käytön joustavuus tulee olemaan tässä keskeistä, energiavarastojen ohella. Jotta jousto saadaan käyttöön, tarvitaan teknisiä ratkaisuja sekä kulutuspuolella että tiedonhallintaan, asiakkaiden sitouttamista sekä markkinamallit ja pelisäännöt, joilla varmistetaan, että jouston kysyntä ja tarjonta kohtaavat kokonaisuuden kannalta koordinoitusti sekä järjestelmän tasolla että paikallisesti.

Kulutuspuolella joustopotentiaaliin vaikuttavat suunnitteluvaiheessa tehtävät mitoittamiset, joihin vaikuttavat lainsäädäntö ja määräykset, tilaajan ja käyttäjän vaatimukset sekä toimialalla käytettävät vakioratkaisut. Eri laiteryhmiä, kuten lämmityksen osalta, perusohjauksratkaisut ja säätävät vaikuttavat siihen, miten eri tehot kytkeytyvät ajallisesti tai käyttötarpeen mukaan. UI-

kopuolisilla palveluilla voidaan monipuolistaa tehonhallintaa ja optimointia, tuoda kulutus näkyviin reaaliaikaisesti, ja mahdollistaa asiantunteva osallistuminen kaikille joustomarkkinoille. Automaation asentamiseen, ylläpitoon ja käyttöön liittyy kuitenkin monia turvallisuus-, tietoturva- ja vastuunäkökulmia, joita ei juurikaan ole selvitetty. Joustoressurssien tehokas hyödyntäminen edellyttää myös skaalautuvien tiedonvaihtojärjestelmien ja integraatoratkaisuiden kehittämistä.

Asiakkaiden tietoisuudessa kysyntäjoustopuolelta on parantamisen varaa, epätietoisuutta esiintyy esimerkiksi sen osalta, mille ajankohdille heidän tulisi sähkönkulutustaan siirtää, miten se käytännössä toteutetaan ja mistä kyseinen tieto olisi helposti saatavilla. Lisäksi huoli asumismukavuuden heikkenemisestä on merkittävä. Asiakkaita tulisikin valistaa sen osalta, mitä kysyntäjousto todellisuudessa tarkoittaa.

Markkinaratkaisuiden osalta Suomessa ollaan hyvässä tilanteessa. Kysyntäjousto voi osallistua aggregoituna kaikille joustomarkkinapaikoille, ja jo tällä hetkellä suurin osa esimerkiksi tajuusohjatuista häiriöreservistä on nimenomaan kulusta. Uusia markkinaratkaisuja tarvitaan lähinnä joustopuolelta paikalliseen hyödyntämiseen esimerkiksi jakeluverkon kuormituksen tai vikatilanteen hallinnassa. Tässä aihepiirissä on eurooppalaista kehitystyötä meneillään. Yksi eurooppalaisen kehityksen kohteena oleva aihe on energiayhteisöt. Uusi Sähkömarkkinadirektiivi (EU) 2019/944 määrittelee energiajärjestelmän uutena toimijana “kansalaisten energiayhteisöt”, jotka tarjoavat uudella tavalla rakentuvia paikallisista resursseista muodostuvia kokonaisuuksia, joita voidaan hyödyntää energiajärjestelmän joustopuolelta tarjoajana.

Lähteet

- Alaperä, I. Grid Support by Battery Energy Storage System Secondary Applications. Väitöskirja. LUT 2019.
- Bergmann. Finland as a Data Center Location - A Market Overview. November 2018. Saatavissa https://www.bergmann.fi/e/article/finland_as_a_data_center_location Viitattu 3.6.2020
- Elenia. Fortumin ja Elenian akusto varastoi sähköä katkojen varalle ja sähköjärjestelmän tasapainon ylläpitoon. Uutinen 28.5.2020. <https://www.elenia.fi/uutiset/fortumin-ja-elenian-akusto-varastoi-s%C3%A4hk%C3%B6%C3%A4-katkojen-varalle-ja-s%C3%A4hk%C3%B6%C2%ADj%C3%A4r%C2%ADjes%C2%ADtelm%C3%A4n>.
- Energiateollisuus. 2020. 'Materiaalipankki'. Saatavilla: https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/sahkon_tun-tidata.html#material-view . Viitattu 13.5.2020.
- Energiavirasto (2019) 'Sähkön toimitusvarmuus vuonna 2019', Markkinoiden julkaisut. Saatavilla: <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12722768/Raportti-sähkön-toimitusvarmuus-2019.pdf/9d7138aa-8893-97e3-338d-a3559edb0c9c/Raportti-sähkön-toimitusvarmuus-2019.pdf>.
- Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2018/2001 (uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämiseksi). Euroopan unioni, 11.12.2018
- Euroopan unionin virallinen lehti, L 328/92 FI, 21.12.2018
- Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2019/944. Euroopan unioni, 5. kesäkuuta 2019.
- Euroopan unionin virallinen lehti, L 158/130 FI, 14.6.2019
- Fatima, S; Hammer, I; Hämäläinen, A; Rahkola, S; Turunen, J. 2020. Final Report, Project 2.4, Concerns of demand flexibility. Aalto-yliopisto. Saatavissa: <https://wiki.aalto.fi/download/attachments/165138838/Final%20report%202020%20topic%204.pdf?api=v2>. Viitattu 1.6.2020.
- Fingrid Oyj. Sähkön kulutus Suomessa - Fingridin avoin data. Saatavissa <https://data.fingrid.fi/fi/dataset/electricity-consumption-in-finland>. Viitattu 17.6.2020.
- Fingrid Oyj, Reservimarkkinat. verkkosivu <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/> . Viitattu 30.9.2020
- Fingrid Oyj. 2017. 'Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2017-2027'. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/kantaverkon-kehittamissuunnitelma-2017-2027.pdf>.
- Frantti, A. 2018. 'Miksi vesivoima on hyvää reserviä?', Fingrid-lehti. Saatavilla: <https://www.fingridlehti.fi/vesivoima-hyvaa-reservia/> .Viitattu: 3.1.2020
- Harsia, P., Järventausta, P., Hilden, A., Kallioharju, K., Kortetmäki, A., Koskela, J., Mutanen, A., Rautiainen, A., Supponen, A., Uusitalo, S., Heljo, J. SÄTE-opas. Opas pientalojen suunnitteluun: Sähkötehojen hallinta osana rakennuksen energiatehokkuutta. TAU 2019. Pysyvä osoite <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-03-1078-3>
- HE_SML ym 2020 V2 09012020, Hallituksen esitys eduskunnalle laeiksi sähkömarkkinalain, sähkö- ja maakaasumarkkinoiden valvonnasta annetun lain ja Energiavirastosta annetun lain 1 §:n muuttamisesta, lausuntokierros, 14.2.2020
- Hollmen, K. 2019. Puhelu ja sähköpostikeskustelu Sympower Oy:n operatiivisen johtajan Katja Hollmenin kanssa 05.12.2019.

- HSL. 2019. <https://www.hsl.fi/uutiset/2019/helsingin-seudun-linjoille-tulee-30-uutta-tayssahkobussia-17915>
- Immonen, A; Kiljander, J; & Aro, M. (2020). Consumer viewpoint on a new kind of energy market. *Electric Power Systems Research*, vol. 180, s. 106153. Doi: 10.1016/j.espr.2019.106153.
- IRENA. 2017. Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN: 978-92-9260-038-9.
- Järventausta, P. et al. 2015. Kysynnän jousto - Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille (DR pooli): Loppuraportti, Tampereen teknillinen yliopisto [verkkojulkaisu]. Saatavissa: https://tutcris.tut.fi/portal/files/4776899/kysynnän_jousto_loppuraportti.pdf. Viitattu 27.11.2019
- Keppler, J. H., Cometto, M., Cameron, R. 2012. Nuclear energy and renewables: System Effects in Low-carbon Electricity Systems. OECD, Nuclear Energy Agency.
- Kivioja, N. 2019. Puhelu ja sähköpostikeskustelu Netled oy:n toimitusjohtaja Niko Kiviojan kanssa 28.11.2019.
- Koskela J., Rautiainen A., Järventausta P., Using electrical energy storage in residential buildings – Sizing of battery and photovoltaic panels based on electricity cost optimization. *Journal of Applied Energy*, April 2019, p. 1175-1189
- Kulomäki, J. 2019. Puhelu ja sähköpostikeskustelu Tampereen kaupungin käytönjohtajan, rakennuttajainsinööri Jussi Kulomäen kanssa 27.11.2019.
- Kähärä, H. 2019. Puhelu ja sähköpostikeskustelu SOK kiinteistöassän energia-asiantuntijan Hannu Kähärän kanssa 19.11.2019.
- Laaksonen, P., Kortela, V., Aho, M., Silvennoinen R. Hiilineutraali Suomi 2035. LUT 2020.
- Lassila, J., Haakana, J., Haapaniemi, J., Räisänen, O., Partanen, J. 2019. ‘Sähköasiakas ja sähköverkko 2030’. LUT-yliopisto, Lappeenranta. ISBN: 978-952-335-356-5
- Luoma Jaakko, Liike-, toimisto- ja koulurakennuksien sähkökuormat kysynnän jouston reserveinä. Diplomityö, 2015
- Luonnonvarakeskus 2019. Puutarhatilastot. [verkkoaineisto].. Saatavissa: <https://stat.luke.fi/puutarhatilastot>. Viitattu 28.11.2019
- Matilainen, Jussi, Tehotasapainon hallinta huippukulutustilanteissa. Esitys EL-TRAN -projektin vuorovaikutuspaneelissa 16.12.2016
- Ministeri Mika Lintilä, Vastaus kirjalliseen kysymykseen KKV 398/2020 vp kansalaisten energiayhteisöistä.
- Niemimaa Noora, Joustokannustin jakeluverkkoliiketoiminnan valvontamallissa kuudennella valvontajaksolla. Diplomityö, Tampereen yliopisto, 2020
- Nortio, J. 2019. Kasvihuoneet tasaavat sähköjärjestelmän häiriöitä. FINGRID-lehti. 4.9.2019 [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.fingridlehti.fi/kasvihuoneet-tasaavat/>. Viitattu 28.11.2019.
- Pahkala Tatu et. al, Joustava ja asiakaskeinen sähköjärjestelmä; Älyverkkotyöryhmän loppuraportti. Työ- ja elinkeinoministeriö, 2018
- Pietilä, P. 2019. Tapaaminen Empower Oyj:n energiamarkkinaratkaisujen johtajan Pekka Pietilän kanssa. 26.11.2019.

- Rasmus, A. 2020. Puhelu ja sähköpostikeskustelu Synchron Tech Oy:n liiketoiminta-alueen johtajan Ari Rasmusuksen kanssa 20.05.2020.
- Riski, T. 2019. Puhelu ja sähköpostikeskustelu S-Voima Oy:n portfolio managerin Tommi Riskin kanssa 26.11.2019.
- Savolainen, A. 2015. The role of nuclear and other conventional power plants in the flexible energy system. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Diplomityö.
- Seam Group Oy. 2015. Pakkasvaraston hyödyntäminen taajuusohjatuksi käyttöreserviksi. Saatavissa <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/loppuraportti-julkinnen.pdf>. Viitattu 3.9.2020.
- Siemens. 2019. Kauppakeskus Sellossa oma virtuaalivoimala: Vastaavaa ei ole toteutettu missään muualla. . Saatavissa <https://studio.kauppalehti.fi/siemens/euroopan-ekologisin-kauppakeskus-saastaa-energiaa-virtuaalivoimalalla>. Viitattu 2.1.2019.
- Sihvonen, V. 2020. Suomen energiajärjestelmän joustotarpeet ja -mahdollisuudet 2035. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. Diplomityö.
- Simolin T, Rauma K., Järventausta P., Rautiainen A., Optimized controlled charging of electric vehicles under peak power-based electricity pricing. Submitted for Special Issue of IET Smart Grid: Achieving an Integrated Smart Power Grid and Intelligent Transportation System, STG-2020-0100
- Suomen Tuulivoimayhdistys (STY). 2020. Suunnittelussa olevat hankkeet. Saatavilla: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tuulivoima-suomessa/suunnittelussa-olevat-hankkeet>. Viitattu: 24.9.2020.
- S-ryhmä. 2015. Kysyntäjoustoprojekti "HertSi". 09.12.2015. Saatavissa <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/kysyntajoustoprojekti-s-ryhmassa-loppuraportti.pdf>. Viitattu 3.9.2020.
- Sähköinen liikenne ry. 2020. Sähköisen liikenteen tilannekatsaus Q2/2020
- Söyrinki, S. 2017. Virtuaalinen palveluympäristö; Smart Energy Transition -hanke. 09.11.2017. Saatavissa <http://smartenergytransition.fi/wp-content/uploads/2017/11/Virtuaalinen-palveluymp%C3%A4rist%C3%B6.pdf>. Viitattu 10.9.2020.
- Tilastokeskus. 2019. Asumisen energiankulutus 2018. Saatavissa https://www.stat.fi/til/asen/2018/asen_2018_2019-11-21_fi.pdf. Viitattu 24.9.2020.
- Verohallinto. 2019. Verohallinnon sähköpostilla luovuttama taulukko sähkön pientuottajista 12.12.2019.
- Vainio, T. Asuntotuotantotarve 2020- 2040. VTT 2020. ISBN 978-951-38-8735-3. https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/asuminen/2020/asuntotuotantotarve-2020_2040-loppuraportti-final.pdf . Viitattu 24.9.2020
- Verbeke, S., Aerts, D., Rynders, G., Ma, X., ja Waide, P. Stijn Verbeke. Final report on the Technical Support to Development of a Smart Readiness Indicator for Buildings. Summary. EU 2020. ISBN 978-92-76-19978-6. <https://op.europa.eu/s/olw9> . Viitattu 29.9.2020
- Ympäristöministeriö 2015. D3 laskentaopas: Valaistuksen tehontihedden ja tarpeenmukaisuuden erillistarkastelut E-luvun laskennassa. https://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/d3_laskentaopas_2015.pdf. Viitattu 24.9.2020.
- Ympäristöministeriö 2020. Ympäristöministeriön asetus eräiden rakennuksen teknisten järjestelmien energiatehokkuuden vaatimuksista. <https://ym.fi/documents/1410903/0/Yma+er%C3%A4iden+rakennusten+tekni-sist%C3%A4+j%C3%A4rjestelmist%C3%A4+FI.pdf/218df272-c1b8-d8b1-66fa->

d832a4027a4c/Yma+er%C3%A4iden+rakennusten+teknisist%C3%A4+j%C3%A4rjestelmist%C3%A4+FI.pdf?t=1603809461590. Viitattu 28.10.2020

ISBN 978-952-335-582-8

ISSN-L 2243-3376

ISSN 2243-3376115

Lappeenranta 2020

 LUT
University