

Annika Kuusela

**VIRTUAALIVOIMALAITOSTEN POTENTIAALI
FOSSIILISTEN VARAVOIMALAITOSTEN
KORVAAJINA**

Kanditaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastajat: Pauli Losoi
Heinäkuu 2025

TIIVISTELMÄ

Annika Kuusela: Virtuaalivoimalaitosten potentiaali fossiilisten varavoimalaitosten korvaajina

The potential of virtual power plants as a replacement for fossil-fuel reserve power plants

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Tekniikan ja luonnontieteiden kandidaattiohjelma, ympäristö- ja energiatekniikan opintosuunta

Heinäkuu 2025

Suomen sähköntuotanto on muuttunut merkittävästi viime vuosien aikana ja perustuu nykyisin vahvasti ydin-, tuuli- ja vesivoimaan. Näistä vain vesivoima tarjoaa merkittäviä joustomahdollisuuksia kulutuksen vaihteluihin ja sen rinnalle tarvitaan uusia keinoja tasapainottamaan sähköjärjestelmää. Sähköntuotannon rakenteen muuttuessa myös päästöt ovat vähentyneet merkittävästi. Sähköjärjestelmässä on kuitenkin edelleen toimijoita, jotka käyttävät täysin fossiilisia polttoaineita. Tällaisia ovat esimerkiksi Fingridin varavoimalaitokset, joita käytetään lyhytaikaisina häiriöreserveinä äkillisissä tehopulatilanteissa.

Tässä työssä tarkastellaan, voitaisiinko fossiilisilla polttoaineilla toimivat varavoimalaitokset korvata virtuaalivoimalaitoksilla. Työssä käsitellään sähköverkon taajuudenhallintaa, varavoimalaitosten roolia siinä sekä kuvataan sähkömarkkinoiden rakenne. Tarkastelun kohteena ovat Suomessa käytössä olevat varavoimalaitokset ja niiden aiheuttamat päästöt. Lisäksi työssä esitellään maailmalla ja Suomessa toimivia virtuaalivoimalaitoksia. Työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena.

Suomessa toimivat virtuaalivoimalaitokset ovat kapasiteetiltaan hyvin pienikokoisia, eikä niiden kapasiteetti tai teho riitä korvamaan varavoimalaitoksia. Virtuaalivoimalaitosten toimiessa reservimarkkinoilla manuaalisena taajuuden palautusreservinä, ne ovat kuitenkin jo vähentämässä varavoiman tarvetta. Virtuaalivoimalaitoksissa on kasvupotentiaalia, sillä Suomessa on paljon kiinteistöjä, joiden ohjattavat kuormat ja aurinkopaneelit voidaan liittää osaksi näitä ratkaisuja. Lisäksi virtuaalivoimalaitokset ovat taloudellisesti kannattavia ja tukevat siirtymää vähäpäästöiseen sähköjärjestelmään.

Avainsanat: sähkömarkkinat, tehotasapaino, varavoimalaitos, virtuaalivoimalaitos

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ TÄSSÄ TYÖSSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
 Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia:

Sovellus	Versio
Scopus AI	Huhti- ja toukokuu 2025
ChatGPT	GPT-4

Tekoälyn käyttötarkoitus

Scopus AI:ta käytettiin lähteiden etsimiseen luvussa 4.

ChatGPT:tä käytettiin yksittäisten virkemuotojen parantamiseen.

Riskien tiedostaminen

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joiden tuottamisessa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista tästä seuranneista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	Johdanto	1
2.	Varavoimaitosten rooli sähköjärjestelmässä	3
2.1	Taajuuden hallinta sähköverkossa	3
2.2	Sähkömarkkinoiden rakenne	3
2.3	Reservi- ja säätösähkömarkkinat	5
2.4	Varavoimaitokset	6
3.	Varavoimaitosten nykytila Suomessa	7
3.1	Suomen varavoimaitokset.	7
3.2	Varavoimaitosten päästöt	8
4.	Virtuaalivoimaitosten teoria ja toiminta	9
4.1	Virtuaalivoimaitoksen määritelmä.	9
4.2	Virtuaalivoimaitosten toimintaperiaate	9
4.3	Virtuaalivoimaitosten päästöt	11
5.	Virtuaalivoimaitosten potentiaali varavoimaitosten korvaajana	12
5.1	Virtuaalivoimaitokset maailmalla	12
5.2	Virtuaalivoimaitokset Suomessa	13
5.3	Virtuaalivoimaitosten mahdollisuudet korvata varavoimaitoita	14
5.4	Virtuaalivoimaitosten kasvupotentiaali	16
6.	Johtopäätökset	17
	Lähteet	18

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen torjunta on edelleen yksi aikamme suurimmista haasteista. Suomi on asettanut tavoitteeksi päästä hiilineutraaliksi vuoteen 2035 mennessä [1]. Sähköntuotannon osalta tässä tavoitteessa ollaan jo melko pitkällä, koska Suomen sähköntuotannon päästöt ovat viime vuosina vähentyneet merkittävästi. Vuonna 2024 niin kutsutun puhtaan sähkön osuus oli 95 % ja maakaasun, öljyn ja kivihiilen osuus sähköntuotannosta oli enää 2,7 %. Näillä fossiilisilla lähteillä tuotettua sähköä tuotettiin lähinnä vain kovina pakkaspäivinä, lämmöntuotannon yhteydessä muodostuvana sivutuotteena. [2]

Nykyinen Suomen sähköntuotanto nojaa vahvasti ydinvoimaan, tuulivoimaan sekä vesivoimaan. Vuonna 2024 Suomen sähköstä tuotettiin ydinvoimalla 39,1 %, tuulivoimalla 25,0 % ja vesivoimalla 17,8 %. [2] Aiemmin, kun suurin osa sähköstä tuotettiin vesivoima- ja lauhdevoimalaitoksilla, tuotantoa voitiin sopeuttaa vaihtelevaan kulutukseen. Nykyään tämä ei enää ole mahdollista, vaan kulutuksen on nyt myös sopeuduttava tuotantoon. Tämä johtuu siitä, että tuulivoima on sääriippuvaista ja ydinvoimaa ajetaan tasaisesti, koska sen säätäminen ei ole taloudellisesti kannattavaa. Näin ollen vesivoima on näistä kolmesta ainoa, joka voi joustaa kulutuksen mukaan, ja jota voidaan käyttää säätövoimana. [3]

Sähköverkon tasapainottamiseen tarvitaankin uusia muotoja vesivoiman rinnalle. Näitä on esimerkiksi Fingridin tarjoama kulutusjousto sekä virtuaalivoimalaitokset. Kulutusjouston tarkoitus on ohjata sähkön käyttöä hinnan perusteella. Esimerkiksi sähköautoa ei ladatakaan illalla korkean hinnan aikaan, vaan siirretään latausajankohta halvemmalle tunnille. Tätä tuotetta voidaan myös tarjota esimerkiksi Fingridin reservimarkkinoille, jos siirrettävä tehokapasiteetti on tarpeeksi suuri. [4]

Virtuaalivoimalaitos taas on järjestelmä, johon voidaan liittää useita hajautetun energia- tuotannon resursseja, kuten esimerkiksi aurinkopaneeleja, tuulivoimaloita, kiinteistöjen ohjattavia kuormia sekä sähkövarastoja. Virtuaalivoimalaitos hallitsee ja optimoi siihen liitettyjä resursseja ja se voi osallistua perinteisten voimalaitosten tapaan sähkömarkkinoiden eri markkinapaikoille. [5, s.251]

Sähkö on niin sanottu tuoretuote, jota tulee tuottaa koko ajan täsmälleen saman verran, kun sitä kulutetaan. Suomessa Fingrid vastaa verkon tehotasapainosta ja sillä on varavoimailaitoksia, jotka toimivat nopeana häiriöreservinä tehopulatilanteissa [6]. Vaikka varavoimailaitosten käyttö on vähäistä, niiden polttoaineena käytetään kevyttä polttoöljyä ja niistä syntyy hiilidioksidipäästöjä [7].

Tässä kandidaatin tutkielmassa arvioidaan millainen potentiaali virtuaalivoimailaitoksilla on fossiilisten varavoimailaitosten korvaamiseen. Tutkimus toteutetaan kirjallisuuskatsauksena ja tutkimuskysymykset ovat:

1. Mikä on varavoiman nykytila?
2. Millaisia virtuaalivoimailaitoksia on jo toiminnassa?
3. Minkä osuuden virtuaalivoimailaitokset voisivat korvata fossiilisista varavoimailaitoksista?

Varavoimailaitoksia ja varavoimajärjestelmiä on monenlaisia. Suurilla toimijoilla, joille sähkönsaanti on kriittistä - kuten sairaaloilla - voi olla oma varavoimailaitos häiriötilanteiden varalle. Tässä työssä varavoimailaitoksella tarkoitetaan kuitenkin vain Fingridin omistamia tai ylläpitämiä varavoimailaitoksia, joita käytetään sähköverkon taajuuden tasapainottamiseen.

Työn toisessa luvussa tarkastellaan sähköverkon taajuuden hallintaa ja sähkömarkkinoiden rakennetta, jotta ymmärretään varavoimailaitosten rooli sähköjärjestelmässä. Kolmannessa luvussa käsitellään varavoimailaitosten nykytilannetta Suomessa. Neljännessä luvussa esitellään virtuaalivoimailaitosten määritelmä ja toimintaperiaate. Viides luku keskittyy toiminnassa oleviin virtuaalivoimailaitoksiin ja niiden potentiaaliin fossiilisia varavoimailaitoksia korvaavina ratkaisuuina. Kuudennessa luvussa kootaan yhteen työn keskeiset havainnot ja johtopäätökset.

2. VARAVOIMALAITOSTEN ROOLI SÄHKÖJÄRJESTELMÄSSÄ

2.1 Taajuuden hallinta sähköverkossa

Sähkön kulutuksen ja tuotannon tulee olla joka hetki tasapainossa. Tätä tasapainoa kutsutaan tehotasapainoksi ja sitä seurataan sähköverkon taajuuden avulla. Jos sähköverkon kulutus ylittää tuotannon, sähköä tuottavien generaattoreiden pyörimisnopeus hidastuu. Vastaavasti jos tuotantoa on enemmän kuin kulutusta, generaattoreiden pyörimisnopeus kiihtyy. Näiden sähköä tuottavien koneiden pyörimisnopeus on suoraan yhteydessä sähköverkon taajuuteen: kun nopeus hidastuu, taajuus laskee ja kun nopeus kasvaa, taajuus nousee. [8, s.5] Taajuuden tulee pysyä määrätysässä arvossa, koska merkittävät taajuuspoikkeamat voivat vahingoittaa sähköjärjestelmän laitteita ja sähköverkkoon liitettjä laitoksia sekä pahimmillaan aiheuttaa laajan sähkökatkon [9].

Suomen sähköverkon taajuudeksi on säädetty 50 Hz ja sen sallittu vaihteluväli on 49,9 - 50,1 Hz [10]. Energiavirasto on nimennyt Fingrid Oyj:n Suomen kantaverkon järjestelmä-vastaavaksi. Fingridin tehtävänä on varmistaa sähköjärjestelmän käyttövarmuus ja tekninen toimivuus sekä jatkuva tehotasapainon ylläpito. [11]

Suomi kuuluu pohjoismaiseen synkronialueeseen Ruotsin, Norjan ja Tanskan itäosien kanssa. Synkronialueella alueiden sähköverkot ovat yhteydessä toisiinsa vaihtosähköyhteyksillä ja niillä on yhteinen taajuus. [12] Yksittäisten alijärjestelmien yhdistäminen yhdeksi kokonaisuudeksi parantaa toimitusvarmuutta, pienentää kustannuksia, vähentää reservien tarvetta sekä mahdollistaa tehokkaamman avun häiriötilanteissa [13].

2.2 Sähkömarkkinoiden rakenne

Sähkömarkkinat ovat iso kokonaisuus, jossa on useita markkinapaikkoja ja jokaisella niistä pyritään tasapainottamaan kulutuksen ja tuotannon suhde. Kuvassa 2.1 on esitetty kaikki sähkömarkkinapaikat sekä jokaisen markkinan toiminnan aikajänne. Vuorokausimarkkinan (day-ahead market) kaupankäynti tapahtuu päivää ennen fyysistä sähkötoimitusta ja kaupankäynnin muoto on suljettu huutokauppa. Vuorokausimarkkinalla sähkön vähittäismyyjät ja teollisuus ilmoittavat, kuinka paljon he tarvitsevat seuraavalle vuorokau-

delle sähköä. Samanaikaisesti sähköntuottajat ilmoittavat, kuinka paljon sähköä he voivat tuottaa ja mihin hintaan. Myynti- ja ostotarjoukset tehdään tuntikohtaisesti ja ne on jätettävä kello 13 mennessä. Tämän jälkeen sähköpörssit laskevat sähkön hinnan seuraavan päivän jokaiselle tunnille annettujen osto- ja myyntitarjousten sekä siirtokapasiteettien perusteella. [14]

Johdannaismarkkinat	Vuorokausimarkkinat	Reservikapasiteettimarkkinat	Päivänsisäiset markkinat	Reserviennergiamarkkinat	Toimitus	Taseselvitys	
Kaupankäynti							
10 vuotta - päivä eteenpäin	Huutokauppa: Huominen	Huutokauppa: Huominen	Huutokauppa ja jatkuva kaupankäynti	Reaaliaika			Toimituksen jälkeen
Ajanjaksot							
Vuosi, kvartaali, kuukausi ja viikko	Tunti	Tunti	15 min	15-60 min		Tasesähkö Taseselvitysjakso: 15 min	

Kuva 2.1. Sähkömarkkinoiden rakenne. Muokattu lähteestä [14].

Reservikapasiteettimarkkina on myös vuorokautta ennen tapahtuva huutokauppa. Reservikapasiteettimarkkinalla varmistetaan, että seuraavan päivän reservimarkkinalla on riittävästi toimijoita ja reservikapasiteettimarkkinalla valituksi tulleet toimijat sitoutuvat tekemään riittävästi tarjouksia seuraavan päivän reservimarkkinalle. [14]

Päivänsisäiset markkinat (intraday market) on koko ajan avoinna oleva markkinapaikka. Sähkön käytön edeltävän päivän ennustettu tilanne voi muuttua ja päivänsisäiset markkinat mahdollistavat sähkön myyjien ja tuottajien korjata tuotanto- ja kulutussuunnitelmia lähempänä käyttöhetkeä. [14]

Varsinaisen sähköntoimituksen jälkeen tasevastaavat suorittavat taseselvityksen, jossa tarkastetaan sähkömarkkinatoimijoiden toteutunut sähkönkäyttö ja -tuotanto [14]. Jos sähkömarkkinaosapuoli on käyttänyt enemmän sähköä kuin mitä on ostanut, sen on maksettava ylimääräisestä käytöstä joko kalleimman käytetyn ylössäätötarjouksen mukainen hinta tai mikäli kyseisellä tunnilla ei ole tehty ylössäätöä vuorokausimarkkinan tuntihinta. Vastaavasti, jos osapuoli on käyttänyt vähemmän sähköä kuin mitä on ostanut, hänelle maksetaan hyvitystä joko halvimmalla käytetyn alassäättötarjouksen mukaan tai, jos alassäättöä ei ole tehty, kyseisen tunnin vuorokausimarkkinahinnan mukaisesti. [15] Tämä on suuri kannustin sähkömarkkinatoimijoille ennustaa sähkön kulutus mahdollisimman tarkasti ja tukee siten tehotasapainon ylläpitoa [14].

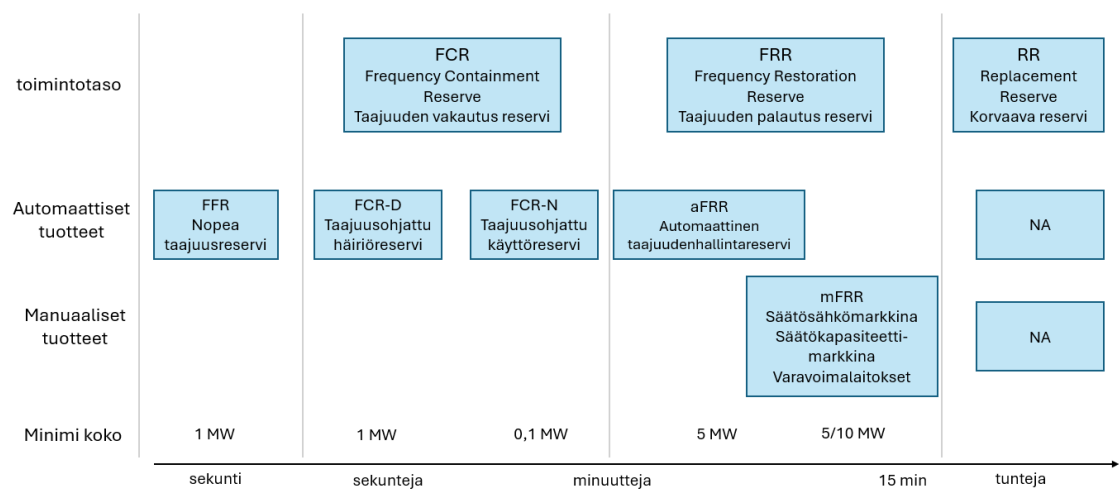
Vuorokausimarkkinat ja päivänsisäiset markkinat ovat siirtymässä aiemmasta tunnin jaksosta 15 minuutin kaupankäyntijaksoon. Tämä mahdollistaa myös muiden toimijoiden entistä paremman osallistumisen sähköjärjestelmän tasapainon ja taajuuden ylläpitoon, kun lisääntyvän uusiutuvan sähkön myötä tuotannon vaihtelut ovat aiempaa suurempia. [16] Taseselvityksessä on jo siirrytty 15 minuutin tarkastelujaksoon [15].

Sähkömarkkinoihin sisältyy vielä johdannaismarkkinat, mutta niiden tarkempi tarkastelu jätetään tämän työn ulkopuolelle, koska ne eivät ole olennaisia taajuuden tasapaino-

tuksen kannalta. Varsinainen hetkittäinen taajuuden säätö tapahtuu Fingridin reservi- ja säätösähkömarkkinalla, josta kerrotaan seuraavassa alaluvussa.

2.3 Reservi- ja säätösähkömarkkinat

Fingridin reservimarkkinoilla on useita eri tuotteita sähköverkon taajuuden tasapainottamiseen, joista jokaisella on oma merkittävä rooli. Näille tuotteille on asetettu erilaisia aikavaatimuksia, kuinka nopeasti niiden on reagoitava taajuuden muutoksiin. Ne on myös luokiteltu automaattisiin ja manuaalisiin reserveihin. Reservimarkkinoiden tuotteet, toiminnan aikamääreet ja minimikoot on esitetty Kuvassa 2.2.



Kuva 2.2. Reservimarkkinoiden tuotteet ja minimikapasiteetit. Muokattu lähteestä [17].

FFR (Fast Frequency Reserve) on nopea taajuusreservi, jota hankitaan tilanteisiin, joissa sähköjärjestelmän inertia on pientä. Inertia on sähköverkon pyöriin massoihin varastoitunutta liike-energiaa, joka auttaa vastustamaan taajuuden muutoksia. [18]

FCR (Frequency Containment Reserve) on taajuuden vakautusresevi, jota käytetään jatkuvaan taajuuden hallintaan. Taajuuden vakautusreservi on jaettu kahteen tuotteeseen. FCR-N on taajuusohjattu käyttöreservi, joka yrittää pitää taajuuden normaalialueella 49,9 - 50,1 Hz. FCR-D on taajuusohjattu häiriöreservi, joka yrittää pitää taajuuden vähintään 49,5 Hz tai enintään 50,5 Hz, kun taajuus on poikennut normaalialueelta. [19, 17]

FRR (Frequency Restoration Reserve) on taajuuden palautusreservi, johon kuuluu automaattinen taajuuden palautusreservi aFRR sekä manuaalinen mFRR. Automaattisen taajuuden palautusreservin tarkoituksena on palauttaa nimellistaajuus. Automaattinen taajuuden palautusreservi aktivoituu itsestään, kun synkronialueen taajuus poikkeaa normaalista. Aktivointi perustuu kantaverkkoyhtiön lähettämään tehonmuutossignaaliin. [20] Manuaalinen taajuuden palautusreservi sisältää säätösähkömarkkinat, säätökapasiteettimarkkinat sekä varavoimalaitokset. [19] Varavoimalaitoksista kerrotaan alaluvussa 2.4.

Pohjoismaiden kantaverkkoyhtiöt ylläpitävät pohjoismaisia säätösähkömarkkinoita, jossa myös Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid on mukana. Säätösähkömarkkinoilta hankitaan säätökapasiteettiä, jolla varmistetaan, että sähköjärjestelmässä on aina riittävästi taajuuden palautusreserviä. Tämä on tärkeää tuotannon ja kulutuksen tasapainon ylläpitämiseksi sekä sähköverkon toimintavarmuuden turvaamiseksi. Säätösähkömarkkinoille voi tehdä sekä ylös- että allassäätötarjouksia, joiden on oltava vähintään 1 MW:n suuruisia. Minimitarjousten määrä on rajoitettu viiteen kappaleeseen. Yli 5 MW tarjouksia voi jättää rajattomasti. Tarjoukset tulee jättää tai päivittää 45 minuuttia ennen käyttötunnin alkua. Tarjoukset hyväksytään hintajärjestyksessä ottaen huomioon tekniset reunaehdot. Fingrid ilmoittaa hyväksytyt tarjoukset joko elektronisella sanomalla tai puhelimitse, ja se tulee aktivoida 15 minuutin kuluessa.[21]

Säätökapasiteettimarkkinat ovat myös Fingridin ylläpitämä markkina. Säätökapasiteettimarkkinoilla varmistetaan riittävä määrä ylös- ja allassäätötarjouksia seuraavalle päivälle. Kilpailutus järjestetään edeltävänä päivänä, ja valitut reservitoimittajat sitoutuvat jättämään säätötarjouksia säätösähkömarkkinoille. [21] RR (Replacement Reserve) tarkoittaa korvaavaa reserviä, joka ei ole Suomessa käytössä.

2.4 Varavoimailaitokset

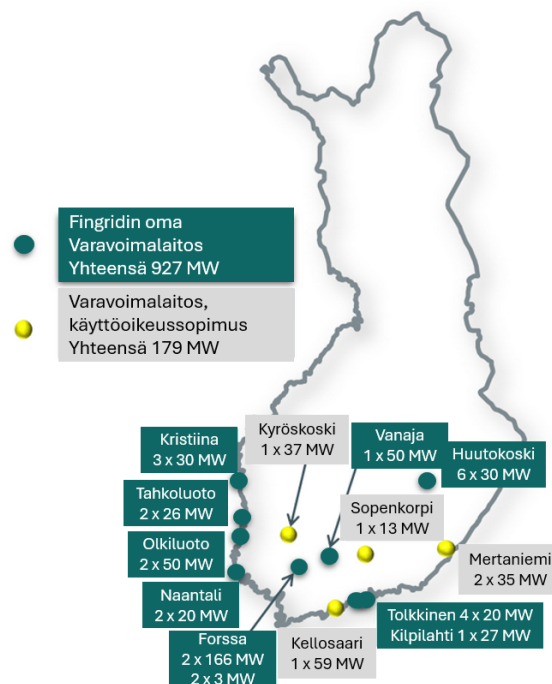
Varavoimailaitokset ovat osa manuaalista taajuuden palautusreserviä. Niitä ei käytetä kaupalliseen sähköntuotantoon, vaan ne toimivat varajärjestelmänä häiriötilanteissa. [22] Ennen varavoimailaitosten käynnistämistä kaikki säätömarkkinoilla olevat tarjoukset on hyödynnetty, varavoimailaitosten käynnistys on viimeinen toimenpide [21]. Varavoimailaitoksia käytetään esimerkiksi tilanteissa, jossa isompi voimalaitos tippuu yllättäen verkosta ja verkon tasapaino tulee saada nopeasti hallintaan [23].

Varavoimailaitokset ovat joko Fingridin omistamia tai sellaisia, joihin Fingridillä on käyttöoikeussopimus. Vuonna 2025 Fingridin omistuksessa on yhdeksän varavoimailaitosta, joiden kokonaiskapasiteetti on 927 MW. Käyttöoikeussopimuslaitoksia on neljä ja niiden kokonaiskapasiteetti on 179 MW. [22] Suomen varavoimailaitosten nykytilasta kerrotaan tarkemmin luvussa 3.

3. VARAVOIMALAITOSTEN NYKYTILA SUOMESSA

3.1 Suomen varavoimalaitokset

Suomessa on 13 varavoimalaitosta, joista yhdeksän on Fingridin omistamia ja neljän voimalaitoksen kanssa Fingrid on tehnyt pitkäaikaisen käyttöoikeussopimuksen [22]. Varavoimalaitokset ja niiden tehot on esitelty Kuvassa 3.1.



Kuva 3.1. Suomessa sijaitsevat varavoimalaitokset. Vihreällä pohjalla olevat ovat Fingridin omistamia ja harmaalla pohjalla olevat ovat pitkäaikaisia käyttöoikeussopimuslaitoksia. Muokattu lähteestä [22].

Varavoimalaitokset ovat kaasuturbiinilaitoksia, jotka ovat nopeita käynnistää. Varavoimalaitokset ovat osa manuaalista taajuuden palautusreserviä ja niiden tulee tuottaa tarvittava tehomäärä 15 minuutin kuluessa aktivointi-ilmoituksesta [17]. Kaasuturbiinilaitosten investointikustannukset ovat muihin voimalaitosmalleihin verraten matalammat ja käyttökustannukset taas kohtuullisen suuret, joten ne soveltuvat hyvin varavoimalaitosten kaltaisiksi toimijoiksi, joita käytetään vain muutamia tunteja vuodessa [24, s.9].

Vuonna 2023 Fingridin omilla varavoimailaitoksilla tuotettiin sähköä 4,9 gigawattituntia ja käyttösopimuslaitoksilla 1 gigawattitunti [25, s.156]. Samana vuonna Suomen kokonais-sähkönkulutus oli 79,8 TWh:a [26]. Varavoimailaitoksilla tuotettu sähkö kattoi siten vain noin 0,007 %:a koko vuoden sähkönkulutuksesta, mikä on erittäin pieni osuus. Tämä korostuu entisestään, kun varavoimailaitosten osuutta verrataan koko maan sähköntuotantokapasiteettiin. Vuoden 2023 lopussa Suomen sähköntuotantokapasiteetti oli noin 23 700 MW, josta varavoimailoiden osuus oli 1 205 MW [27, s.7]. Näin ollen varavoimailoiden kapasiteetti muodosti noin 5 %:a koko maan sähköntuotantokapasiteetista.

Pohjoismaiden yhteisverkossa jokaisella maalla on oltava nopeaa häiriöreserviä määrää, joka kattaa sen maan mitoittavan vikatapauksen. Mitoittava vikatapaus tarkoittaa yleensä maan suurimman sähköntuotantoyksikön irtoamista verkosta. [28, s.11] Varavoimailaitokset ovat osa nopeaa häiriöreseviä ja tämä on myös mitoitusperiaate varavoimailaitosten määrälle. Fingrid on ilmoittanut, että nykyisiä varavoimailaitosten käyttöoikeussopimuksia ei jatketa, vaan niiden tilalle hankitaan markkinaehtoisesti kapasiteettia säätökapasiteettimarkkinoilta [22].

3.2 Varavoimailaitosten päästöt

Varavoimailaitoksia käytetään vain tilanteissa, joissa kaikki muut tarjoukset säätösähkömarkkinoilla on käytetty ja varavoima on viimeinen oljenkorsi taajuuden tasapainottamiseen [22]. Varavoimailaitosten tulee olla kuitenkin koko ajan käyttövalmiudessa ja tästä syystä varavoimailaitoksia testataan ja käytetään säännöllisesti kuuden viikon välein. On arvioitu että varavoimailaitosten testaamiseen kuluu vuosittain noin 1000 kuutiota öljyä, joka vastaa 20 säiliöauton öljykuormaa [29, 30]. Varavoimailoiden hiilidioksidipäästöt muutamien vuosien ajalta on kerätty Taulukkoon 3.1.

Taulukko 3.1. Fingridin varavoimailaitosten päästöt [t_{CO_2}] vuosina 2019-2023 [31].

	2019	2020	2021	2022	2023
Forssan varavoimailaitos	2038	1351	1545	2709	1339
Huutokosken kaasuturbiinilaitos	1140	1345	1093	1087	1218
Kilpilahden kaasuturbiinilaitos	132	110	216	145	141
Kristiinan kaasuturbiinilaitos	308	625	331	343	334
Naantalın kaasuturbiinilaitos	75	300	177	216	199
Olkiluodon kaasuturbiinilaitos	386	374	471	351	406
Tahkoluodon kaasuturbiinilaitos	284	183	238	257	383
Tolkkisten kaasuturbiinilaitos	385	433	717	422	476
Vanajan kaasuturbiinilaitos	250	117	631	476	261

Vuonna 2022 varavoimailaitosten kokonaispäästöt ovat olleet 6006 t_{CO_2} e. Laskennallisesti näistä kertyvät päästöoikeusmaksut ovat olleet 481000 euroa [32].

4. VIRTUAALIVOIMALAITOSTEN TEORIA JA TOIMINTA

4.1 Virtuaalivoimalaitoksen määritelmä

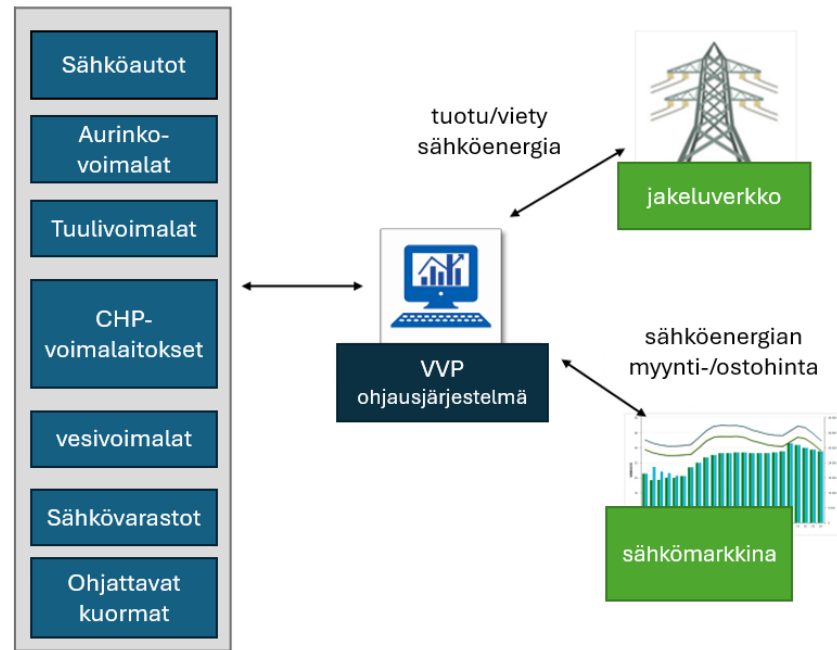
Virtuaalivoimalaitos ei ole uusi keksintö. Terminologian alkuperä voidaan jäljittää Shimon Awerbuch:iin, joka vuonna 1997 kirjassaan *The Virtual Utility: Accounting, Technology & Competitive aspects of the Emerging Industry* määritteli energianhallintajärjestelmän (VU, Virtual Utility) seuraavalla tavalla: "Energianhallintajärjestelmä (VU) on joustava yhteistyöverkosto itsenäisistä, markkinalähtöisistä toimijoista, jotka tarjoavat kuluttajien tarvitsemää tehokasta energiapalvelua ilman, että niiden tarvitsee välttämättä omistaa siihen liittyviä fyysisiä resursseja." [33, s.1]

Virtuaalivoimalaitos on järjestelmä, jolla ohjataan hajautetun energiatuotannon resursien (DER, distributed energy resource) verkostoa. Hajautettuihin energiatuotannon resursseihin voi kuulua uusiutuvia energianlähteitä, kuten aurinkopaneeleja ja tuulivoimaloita, energianvarastointijärjestelmiä sekä kysyntäjouston resursseja, joihin sisältyy kysyntäjoustojärjestelmät ja sähköautojen latauspisteet. [5, s.251] Kuvassa 4.1 on havainnollistettu virtuaalivoimalaitoksen toimintaperiaatetta.

Virtuaalivoimalaitoksen käsite ei ole yksiselitteinen. Osa virtuaalivoimaloista voi sisältää kaikki edellämainitut hajautetun energiatuotannon resurssit ja osa esimerkiksi vain kysyntäjoustojärjestelmän. Virtuaalivoimalaitoksen määritelmä ei myöskään sulje pois, etteikö siihen voisi liittää perinteisiä voimalaitoksia, kuten lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitoksia sekä vesivoimalaitoksia, mutta ne jätetään tämän työn tarkastelun ulkopuolelle.

4.2 Virtuaalivoimalaitosten toimintaperiaate

Virtuaalivoimalaitoksen toiminnan keskiössä on sen energianhallintajärjestelmä (energy management system, EMS), joka hallitsee ja optimoi siihen liitettyjen resurssien toimintaa [35]. Viestintä on kaksisuuntaista, joten virtuaalivoimalaitos voi sekä vastaanottaa tietoa jokaisen yksikön sen hetkisestä toiminnasta, että lähettää signaaleja niiden ohjaamiseksi. Energianhallintajärjestelmä voi optimoida virtuaalivoimalaitoksen toimintaa eri tavoitteiden mukaisesti, joita voivat olla esimerkiksi tuotantokustannusten tai energiahäviöiden minimointi, kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen, voiton maksimointi ja jänniteprofiilin tai sähkön laadun parantaminen. [36, s.2012]



Kuva 4.1. Kaavio virtuaalivoimalaitoksesta ja sen vuorovaikutuksesta jakeluverkon ja sähkömarkkinoiden kanssa. Virtuaalivoimalaitoksen ohjausjärjestelmä yhdistää erilaisia hajautettuja energianlähteitä isommaksi kokonaisuudeksi. Muokattu lähteestä [34].

Virtuaalivoimalaitokset on jaoteltu kahteen luokkaan niiden aggregoinnin tavoitteen mukaan. Kaupalliset virtuaalivoimalaitokset (CVPP, commercial virtual power plant) on suunniteltu ensisijaisesti osallistumaan sähkömarkkinoille optimoimalla komponenttiansa sähköntuotantoa ja -kulutusta. Tekniset virtuaalivoimalaitokset (TVPP, technical virtual power plant) on suunniteltu tarjoamaan apupalveluita kantaverkon operaattoreille esimerkiksi jännitteen ja taajuuden säätelyn kautta, ja niiden mallinnuksessa otetaan huomioon myös jakeluverkon tekniset rajoitteet. [34]

Kyberhyökkäykset muodostavat merkittävän uhan virtuaalivoimalaitoksille, sillä niiden toiminta perustuu laajasti tieto- ja viestintäteknologioiden hyödyntämiseen [37]. Virtuaalivoimalaitokset käsittelevät myös suuria määriä tietoa niihin liitetystä kuluttajista, mukaan lukien heidän energiankulutuksensa ja -tottumuksensa, minkä vuoksi myös tietoturvan merkitys on korostunut [38, s.10]. Käytössä olevia virtuaalivoimalaitosohjelmistoja on esimerkiksi Siemensin tytäryhtiö Vibecolla [39].

Kiinteistöt muodostavat merkittävän kasvupotentiaalin virtuaalivoimalaitosratkaisuille. Englannissa tarkasteltiin 12 500 m² laboratorio- ja toimistokiinteistön toimintaa mahdollisena virtuaalisena voimalaitoksena vuoden 2018 datan perusteella. Virtuaalivoimalaitokseen liitettiin kiinteistön ilmalämpöpumput, ilmanvaihtokoneet, hissit, valaistus sekä kiertovesipumput. Kiinteistön kuormitusta voitiin vähentää keskimäärin 109 kW:lla, mikä vastaa 46,4 %:a kiinteistön kokonaiskulutuksesta. Virtuaalivoimalaitos voitaisiin ottaa käyttöön neljän tunnin jaksoissa, jolloin se voisi tarjota 28 kW:n tehon kokoaikaisesti, 109 kW:n tehon 41,5 %:a ajasta ja 138 kW:n tehon 24,6 %:a ajasta. [40]

4.3 Virtuaalivoimalaitosten päästöt

Virtuaalivoimalaitosten kasvihuonepäästöihin vaikuttaa se, mitä hajautetun energiatuotannon resursseja virtuaalivoimalaitokseen on liitetty. Sillman ym. [41] tarkasteli virtuaalivoimalaitoksen päästöjä, johon oli liitetty litiumioniakusto sekä 250 kiinteistön lämmitys- ilmanvaihto- ja ilmastointijärjestelmät (heating, ventilation and air-conditioning, HVAC). Kyseisen virtuaalivoimalaitoksen hiilidioksidipäästöt todettiin muodostuvan litium-ioni akuston elinkaaripäästöistä. Sillman ym. arvioivat akuston elinkaaripäästöjä Varlet ym. [42] tutkimuksen mukaan. Elinkaaripäästöjen arvioitiin olevan 0,02-0,18 kg_{CO2e}/kWh. Tämä vaihtelu riippuu akun lataus- ja purkusyklien tiheydestä mitä useammin akkua ladataan ja puretaan, sitä pienempi on akun koko elinkaaren aikainen hiilidioksidipäästö per kWh.

Jotta kiinteistön HVAC-järjestelmän ilmastoinnin kuormia voidaan ohjata virtuaalivoimalaitoksissa, pitää ilmastointijärjestelmään olla liitettynä taajuusmuuttaja (variable-frequency drive, VFD). Taajuusmuuttaja mahdollistaa energiankulutuksen säättämisen taajuuden ja jännitteen mukaan. Jos taajuusmuuttaja asennetaan laitteistoon jälkikäteen, sen valmistuksen elinkaaripäästöt tulisi huomioida virtuaalivoimaloiden päästöissä. Useimmissa moderneissa kiinteistöissä ne ovat kuitenkin jo valmiiksi asennettuna energiatehokkuusyistä. [41] Virtuaalivoimaloihin liitetyt aurinkopaneelit myös vähentävät sähkön kokonaispäästöjä, jos niiden sähkön syöttäminen sähköverkkoon korvaa fossiilisista lähteistä tuotetun sähkön tarvetta [43].

5. VIRTUAALIVOIMALAITOSTEN POTENTIAALI VARAVOIMALAITOSTEN KORVAAJANA

5.1 Virtuaalivoimalaitokset maailmalla

Maailmalla on ollut virtuaalivoimalaitoksia toiminnassa jo useiden vuosien ajan ja niiden edut ovat laajasti tunnustettuja. Esimerkiksi Yhdysvaltojen liittovaltion hallitus sekä osavaltiot ovat tukeneet virtuaalivoimaloiden käyttöönottoa. Coloradossa on säädetty laki virtuaalivoimalaitosohjelman perustamisesta, ja Kaliforniassa on otettu käyttöön rahasto sekä uusia säädöksiä kapasiteetin lisäämiseksi. [44, s.3] Vuoden 2011 maanjäristyksen ja Fukushima ydinvoimalaonnettomuuden jälkeen myös Japanin hallitus on tukenut virtuaalivoimaloiden käyttöönottoa, koska kasvava uusiutuvan energian määrä sähköverkossa tarvitsi uusia ratkaisuja kulutuksen ja tuotannon tasapainottamiseen. Vuonna 2016 Japanissa hyväksyttiin seitsemän virtuaalivoimalahanketta, joiden kokonaisteho oli 19,1 MW. [45]

Maailmalla toimivien virtuaalivoimaloiden tehot vaihtelevat hyvin paljon. Hwang ja Kittner tarkastelivat tutkimuksessaan kymmentä Yhdysvalloissa toimivaa virtuaalivoimalaitosta. Virtuaalivoimalaitosten tehot vaihtelivat 14,6-160 MW:n välillä. Virtuaalivoimalaitoksiin liitetyt komponentit koostuivat älytermostaateista, aurinkopaneelien ja akkujen yhdistelmästä, sähköautoista ja niiden latauspisteistä sekä erillisistä akkujärjestelmistä. Monissa virtuaalivoimalaitoksissa hyödynnettiin erityisesti tavallisten asuinrakennusten sähkökuormia. [44, s.7-9]

Khan ym. tarkastelivat tutkimuksessaan useita maailmalla toimivia virtuaalivoimalaitoksia, jotka olivat tehoiltaan vielä suurempikokoisia kuin Hwangin ja Kittnerin tarkastelemat kohteet. Virtuaalivoimalaitosten tehot vaihtelivat 0,4-10 000 MW:n välillä. Suurin niistä oli Kiinassa Jiangsussa sijaitseva Stategridsin voimalaitos, jonka teho on 10 000 MW. [46, s.104667] Jiangsun virtuaalivoimalaitokseen on liitetty suuri määrä kiinteistöjen ohjattavia kuormia, kuten ilmanvaihtojärjestelmiä ja valaistusta [47, s.14]. Muita tehoiltaan suuria virtuaalivoimalaitoksia olivat Saksassa Siemensin (1 450 MW), Italiassa Sonnen (1 000 MW) sekä Australiassa AGL:n voimalaitos (1 000 MW) [46, s.104667].

5.2 Virtuaalivoimalaitokset Suomessa

Suomen ensimmäinen virtuaalivoimalaitos otettiin käyttöön vuonna 2018 Kauppakeskus Sellossa. Virtuaalivoimalaitokseen on liitetty kiinteistön ilmanvaihtojärjestelmä, aurinkopaneelit, sähköautojen latauspisteet sekä akusto. Akusto on teholtaan 2,0 MW:a ja kapasiteetiltaan 2,1 MWh:a ja aurinkopaneelien nimellisteho on 500 kWp:ä. Aurinkopaneelit tuottavat energiaa kiinteistölle ja virtuaalivoimalaitoksen avulla kiinteistö ohjaa energiankulutustaan automaattisesti ostamalla, varastoimalla ja kuluttamalla energiaa sen hetken tarpeen mukaan. [48, 49] Tämän jälkeen Suomessa on otettu käyttöön kymmenkunta muuta virtuaalivoimalaitosta, joiden tiedot on esitetty Taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1. *Esimerkkejä Suomessa toimivista virtuaalivoimalaitoksista. Taulukossa esitetään kohteiden komponentit, teho- tai kapasiteettitiedot sekä toimintamarkkina.*

Kohde	Komponentit	Teho/kapasiteetti	Markkina, joilla toimii
Sellon kauppakeskus [50]	Kiinteistön ilmanvaihto, sähköautojen latauspisteet, aurinkopaneeleja ja akusto	Akuston teho 2 MW ja kapasiteetti 2,1 MWh	Taajuuden vakautusreservi (FCR)
Lappeenrannan kaupunki [51]	17 kiinteistön ilmanvaihtokoneet	Teho 0,1 MW	Taajuuden vakautusreservi (FCR)
Elisa Oyj [52, 53]	Mobiiliverkon tukiasemien akustot	Kapasiteetti 150 MWh	Automaattinen taajuudenhallintareservi (aFRR) sekä taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D)
Sinebryhoffin tuotantolaitos [54]	Kiinteistö osana älykästä energiahallintajärjestelmää ja sähkövarasto	Sähkövaraston kapasiteetti 20 MWh	Toimii Fingridin kulutusjoustona, ei tietoa tarkasta markkinapaikasta
Levi Center Hullu Poro [55]	11 Aurora pyramidi -mökkiä osana älykästä energiahallintajärjestelmää, aurinkopaneeleja ja akusto	Akuston kapasiteetti 1,3 MWh	Toimii Fingridin kulutusjoustona, ei tietoa tarkasta markkinapaikasta
Lidl Suomi [56]	136 myymälän ilmanvaihto ja jäähdytyskoneet	Ei tiedossa	Toimii Fingridin kulutusjoustona, ei tietoa tarkasta markkinapaikasta
Suomen yliopistokiinteistöt Oy (SYK) [57, 58, 41]	250 kiinteistön HVAC-järjestelmät (noin 500 liittymäpistettä) ja litium-ioni akusto	Akuston kapasiteetti 0,1 MWh ja HVAC-järjestelmän kapasiteetti 0,43 MWh	Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N)
VR Group [59]	Kolmen kiinteistön HVAC-järjestelmät	Ei tiedossa	Toimii Fingridin kulutusjoustona, ei tietoa tarkasta markkinapaikasta
Goodman kauppakeskus [60]	Ohjattavia kuormia	Teho 0,2 MW	Toimii Fingridin kulutusjoustona, ei tietoa tarkasta markkinapaikasta

Kuten Taulukosta 5.1 nähdään, Suomessa toimivat virtuaalivoimalat toimivat useilla eri markkinapaikoilla. Sellon kauppakeskuksen, Lappeenrannan kaupungin ja Suomen yliopistokiinteistöjen virtuaalivoimalaitosten on ilmoitettu toimivan Fingridin reservimarkkinoilla taajuuden vakautusreservinä (FCR), johon niiden tehokapasiteetti on sopiva eli 0,1-1 MW:n välillä [41, s.757]. Elisa Oyj:n virtuaalivoimalaitoksen kokonaiskapasiteetti on sen verran suuri, että sen on kerrottu toimivan FCR-D:n lisäksi myös automaattisena taajuudenhallintareservinä [53].

Sinebrychoffin, Levi Centerin, Lidl Suomen, VR Groupin ja Goodmanin kauppakeskuksen virtuaalivoimalaitosten markkinapaikoista ei ollut saatavilla tarkkaa tietoa. Lähteissä kerrottiin ainoastaan yleisluontoisesti niiden osallistumisesta Fingridin kulutusjoustoan. Kulutusjoustolla tarkoitetaan sähkönkulutuksen säätämistä sähkön hinnan mukaan. Siirrettävän tehon ollessa tarpeeksi suuri, kuluttaja voi myös myydä joustonsa sähkömarkkinoille ja saada siitä taloudellista hyötyä. Myös kuluttajan oma pientuotanto voi toimia osana kulutusjousto, jos se reagoi esimerkiksi korkeisiin sähkön hintoihin vähentämällä sähkönottoa verkosta. Kulutusjoustona toimiessa voidaan osallistua useille eri markkinapaikoille. Vuonna 2024 kulutusjousto on ollut mukana kaikilla Fingridin reservimarkkinapaikoilla sekä Day-ahead- ja Intraday-markkinoilla. [4]

Suomessa toimivien virtuaalivoimalaitosten pääkomponentteina käytetään joko kiinteistöjen ohjattavia kuormia tai akustoja. Ohjattaviin kuormiin perustuvia ratkaisuja hyödyntävät Lappeenrannan kaupungin, Lidl Suomen, VR Groupin sekä Goodmanin kauppakeskuksen virtuaalivoimalaitokset. Vain akustoihin perustuva virtuaalivoimalaitos löytyy Elisa Oyj:ltä. Muut Suomessa toimivat virtuaalivoimalaitokset yhdistelevät molempia komponentteja sekä akkuja että ohjattavia kuormia jolloin voimalaitoksen kokonaiskapasiteetti kasvaa ja sen joustavuus paranee.

5.3 Virtuaalivoimalaitosten mahdollisuudet korvata varavoimaloita

Kuten aiemmasta alaluvusta käy ilmi, Suomessa toimivat virtuaalivoimalaitokset ovat tois- taiseksi melko pienikokoisia. Niistä on ilmoitettu pääasiassa vain akuston tai järjestelmän kokonaiskapasiteetti, joka kertoo varastoidun energiamäärän eikä ota kantaa millaisella teholla varastoitu energia voidaan syöttää verkkoon. Teho (watti, W) kuvaa siis hetkel- listä energiantuotanto- tai kulutuskykyä, kun taas kapasiteetti (wattitunti, Wh) tarkoittaa energian kokonaismäärää, joka voidaan tuottaa tai varastoida tietyn ajan kuluessa [61, s.458].

Kun tarkastellaan virtuaalivoimalaitosten mahdollisuuksia korvata varavoimalaitoksia, va- litaan tarkasteluun kohteet, joiden tehotiedot on ilmoitettu ja ovat näin vertailukelpoisia perinteisiin voimalaitoksiin. Kriteerit täyttäviä virtuaalivoimalaitoksia on vain kaksi: Lap- peenrannan kaupungin ja Goodmanin virtuaalivoimalaitokset, joiden yhteenlaskettu teho on 0,3 MW:a. Tämä on selvästi vähemmän kuin pienimmän Suomessa toimivan varavoi-

malaitoksen teho, joka on 3 MW:a. Näin ollen virtuaalivoimalaitokset eivät nykyisellään pysty korvaamaan edes pienintä varavoimayksikköä.

Jotta kaikki Suomessa toimivat virtuaalivoimalaitokset voidaan huomioida ja verrata niiden kokoa varavoimalaitoksiin tehdään yksinkertaistus. Varavoimalaitoksista tiedetään, että niitä käytetään noin 10 tuntia vuodessa. Virtuaalivoimalaitosten ilmoitettu kapasiteetti voidaan jakaa tällä aikamäärällä, jolloin saadaan arvioitu teho kyseiselle ajalle. Tällä tavalla laskettuna Suomessa toimivien virtuaalivoimalaitosten kokonaisteho olisi 17,7 MW:a. Virtuaalivoimalaitosten yhteenlaskettu teho vastaisi näin ollen vain noin 1,6 % varavoimalaitosten kokonaistehosta (1106 MW). Todellisuudessa tämä luku on hieman suurempi, koska useimmista kohteista oli ilmoitettu vain akustojen kapasiteetti, vaikka virtuaalivoimalaitokseen sisältyisi myös ohjattavia kuormia tai aurinkopaneeleja.

Virtuaalivoimalaitokset voivat osittain korvata perinteisiä varavoimalaitoksia, mutta niitä ei kannata käyttää samalla periaatteella, jossa kapasiteetti pidetään jatkuvasti valmiudessa mahdollisia häiriötilanteita varten. Kun virtuaalivoimalaitokset toimivat manuaalisena taajuuden palautusreservinä (mFRR) reservimarkkinoilla, ne jo nyt vähentävät varavoimalaitosten tarvetta. Tämä johtuu siitä, että ennen varavoimalaitosten käynnistämistä aktivoidaan ensin kaikki muut tarjolla olevat reservit, ja varavoiman käyttö jää viimeiseksi keinoksi [21]. Lisäksi, kuten luvussa 3 mainittiin, Fingrid on siirtymässä pois nykyisistä käyttöoikeussopimuksista hankkimalla saman verran kapasiteettia markkinaehtoisesti säätökapasiteettimarkkinoilta [21]. Tämä kertoo, että markkinaehtoiset toimijat koetaan riittävän luotettaviksi, mikä osaltaan vähentää perinteisen varavoiman tarvetta tulevaisuudessa.

Virtuaalivoimalaitosten mahdollisuuksia korvata varavoimalaitoksia tarkasteltaessa on otettava huomioon myös huoltovarmuuteen liittyvät kysymykset. Varavoimalaitokset ovat tärkeä osa sähköjärjestelmän huoltovarmuutta, viimeinen oljenkorsi taajuuden tasapainottamiseen äkillisissä tilanteissa. Varavoimalaitokset saadaan käynnistettyä manuaalisesti häiriötilanteessa, mikä tekee niistä luotettavan varavoiman lähteen. Virtuaalivoimalaitosten käyttö puolestaan edellyttää aina pääsyä ohjausjärjestelmään, jotta useiden eri toimijoiden kulutusta ja tuotantoa voidaan hallitusti säätää. Ohjausjärjestelmät ovat kuitenkin alttiita tietoverkkohäiriöille, minkä vuoksi niiden käyttö voi olla rajoittunutta tai mahdotonta juuri silloin, kun niitä tarvittaisiin eniten.

5.4 Virtuaalivoimalaitosten kasvupotentiaali

Vaikka virtuaalivoimalaitoksia on Suomessa toistaiseksi vähän ja niiden kapasiteetti on rajallinen, niissä on kasvupotentiaalia. On esimerkiksi arvioitu, että Helsingissä on noin 1100 julkista palvelurakennusta, joiden ilmanvaihtojärjestelmien yhteenlaskettu teho on yli 11 MW:a [62, s.6]. On kuitenkin hyvä huomioida, että ilmanvaihtojärjestelmien kysyntäjouston mahdollisuudet ovat rajalliset, koska ilmanlaatu erityisesti hiilidioksidipitoisuuden kasvu asettaa rajoituksia jouston kestolle [62].

Kasvupotentiaalia tukevat myös säädökset. Euroopan Unioni on tehnyt ehdotuksen, että aurinkosähköjärjestelmien asentaminen tulisi pakolliseksi kaikkiin uusiin julkisiin liikeraennuksiin, joiden hyötypinta-ala on yli 250 m², vuoteen 2026 mennessä. Lisäksi aurinkopaneelit tulisi asentaa kaikkiin uusiin asuinrakennuksiin vuodesta 2029 lähtien. [63] Mikäli ehdotus toteutuu, Suomeen rakennettaisiin merkittävä määrä uusia aurinkosähköjärjestelmiä, jotka voidaan liittää osaksi virtuaalivoimalaitosratkaisuja.

Lisäksi Suomessa toimivat virtuaalivoimalaitokset keskittyvät tällä hetkellä vain yritysten omien kiinteistöjen kuormien ohjaamiseen. Kun tarkastellaan maailmalla toimivia virtuaalivoimalaitoksia [47, s.14] [44, s.7-9], monet virtuaalivoimalaitokset hyödyntävät yksityishenkilöiden kiinteistöjen joustomahdollisuuksia. Tämä edustaa merkittävää kasvupotentiaalia myös Suomen sähköjärjestelmän näkökulmasta.

Virtuaalivoimalaitokset ovat taloudellisesti kannattavia ratkaisuja. Esimerkiksi Lappeenrannan kaupungin virtuaalivoimalaitoksen järjestelmän on kerrottu maksaneen 20 000 euroa, ja investointi oli maksanut itsensä takaisin kahdessa vuodessa [51]. Sen lisäksi, että kuormien kytkeminen pois päältä jo itsessään vähentää energiakustannuksia, virtuaalivoimalaitoksen osallistumisesta sähkömarkkinoille maksetaan erillistä korvausta.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli selvittää, missä määrin virtuaalivoimalaitokset voisivat korvata fossiililla polttoaineilla toimivia varavoimalaitoksia. Lisäksi tarkasteltiin varavoiman nykytilannetta sekä Suomessa jo toiminnassa olevia virtuaalivoimalaitosratkaisuja.

Virtuaalivoimalaitokset ovat Suomessa vielä varsin pienimuotoisia, eivätkä niiden kapasiteetti tai teho riitä korvaamaan perinteisiä varavoimalaitoksia. Suomessa toimivien virtuaalivoimalaitosten tehot vaihtelevat 0,1-0,2 MW:n välillä ja kapasiteetit taas 0,53-150 MWh välillä. Kaikkien Suomessa toimivien virtuaalivoimalaitosten yhteenlaskettu teho vastaa tällä hetkellä vain noin 1,6% varavoimalaitosten kokonaistehosta.

Virtuaalivoimalaitoksia ei kuitenkaan tule tarkastella pelkästään perinteisten varavoimalaitosten suorina korvaajina. Kun virtuaalivoimalaitokset osallistuvat taajuuden palautusreservinä (mFRR) reservimarkkinoille, ne jo osaltaan vähentävät varavoimalaitosten käyttöä. Ennen varavoiman käyttöönottoa aktivoidaan aina kaikki muut mFRR-markkinalla olevat resurssit, jolloin varavoimalaitosten käyttöönotto on viimeinen toimenpide. Myös Fingridin linjaus olla jatkamatta nykyisiä pitkäaikaisia käyttöoikeussopimuksia ja siirtyä markkinaehtoiseen kapasiteetin hankintaan kertoo siitä, että perinteisen varavoiman tarve on jo vähenemässä muiden markkinatoimijoiden ansiosta.

Tästä huolimatta varavoimalaitoksia ei voida täysin korvata tai unohtaa, vaikka se virtuaalivoimalaitosten kokonaiskapasiteetin vuoksi tulisi joskus mahdolliseksi. Varavoimalaitokset ovat edelleen tärkeä osa sähköjärjestelmän huoltovarmuutta. Ne saadaan käynnistettyä manuaalisesti häiriötilanteessa, mikä tekee niistä luotettavan varavoiman lähteen. Virtuaalivoimalaitosten käyttö puolestaan edellyttää aina pääsyä ohjausjärjestelmään, jotta useiden eri toimijoiden kulutusta ja tuotantoa voidaan hallitusti säätää. Ohjausjärjestelmät ovat kuitenkin alttiita tietoverkkohäiriöille, minkä vuoksi niiden käyttö voi olla rajoittunutta tai mahdotonta juuri silloin, kun niitä tarvittaisiin eniten.

Vaikka virtuaalivoimalaitosten nykyinen teho ja kapasiteetti eivät riitä varavoimalaitosten korvaamiseen, virtuaalivoimalaitosten kasvupotentiaali on merkittävä. Suomessa on suuri määrä sekä julkisessa, että yksityisessä omistuksessa olevia rakennuksia, joissa on ohjattavia kuormia sekä aurinkopaneeleja. Näiden yhdistäminen osaksi virtuaalivoimalaitosratkaisuja voisi kasvattaa niiden merkitystä energijärjestelmässä.

LÄHTEET

- [1] R. Huttunen, P. Kuuva, M. Kinnunen, B. Lemström ja P. Hirvonen. ”Hiilineutraali Suomi 2035 kansallinen ilmasto- ja energiastrategia” (syyskuu 2022). URL: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/164321> (viitattu 02. 02. 2025).
- [2] H.-K. Hämäläinen. ”Sähkön vuosi 2024: päästöt vähenivät 25 %, hinta palautui normaalitasolle, sähkön tuotannossa uusia ennätyksiä”. *Energiateollisuus* (tammikuu 2025). URL: <https://energia.fi/tiedotteet/sahkon-vuosi-2024-paastot-vahenivat-25-hinta-palautui-normaalitasolle-sahkon-tuotannossa-uusia-ennatyksia/> (viitattu 02. 02. 2025).
- [3] P. Järventausta, S. Repo, P. Trygg, A. Rautiainen, A. Mutanen, K. Lummi, A. Supponen, J. Heljo, J. Sorri, P. Harsia, M. Honkiniemi, K. Kallioharju, V. Piikkilä, J. Luoma, J. Partanen, S. Honkapuro, P. Valtonen, J. Tuunanen ja N. Belonogova. ”Kysynnän jousto - Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille” (2015). URL: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-3485-0>.
- [4] Fingrid. *Kulutusjousto*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 18. 03. 2025): <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/sahkomarkkinoiden-kehityshankkeet/kysyntajousto/>.
- [5] J. A. Ketchledge. *Successful Smart Grid Implementation*. 2nd Edition. PennWell, 2024, s. 251. URL: <https://app.knovel.com/s.v?EZOG1y0n>.
- [6] Fingrid. *Varavoimailaitokset*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 02. 02. 2025): <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/maankaytto-ja-ymparisto/periaatteet-ja-toimintatavat/varavoimailaitokset/>.
- [7] Fingrid. *Sähköasemien ja varavoimailaitosten ympäristövaikutusten lieventäminen*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 02. 02. 2025): <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/maankaytto-ja-ymparisto/ymparistovaikutukset/sahkoasemien-ja-varavoimailaitosten-ymparistovaikutusten-lieventaminen/>.
- [8] P. T. Moseley ja J. Garche. *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*. Elsevier, 2014, s. 5. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2012-0-01253-7>.
- [9] Fingrid. *Reservit*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 09. 04. 2025): <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/>.
- [10] Järvi-Suomen Energia. *Miten Suomen sähköverkko toimii?* Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 07. 02. 2025): <https://www.jseoy.fi/ajankohtaista/miten-suomen-sahkoverkko-toimii/>.

- [11] Fingrid. *Sähköjärjestelmän hallinta*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.04.2025): <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/sahkojarjestelman-hallinta/>.
- [12] Fingrid. *Osa pohjoismaista sähköjärjestelmää*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 07.03.2025): <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kehittaminen/pohjoismainen-sahkojarjestelma-ja-liitynnat-muihin-jarjestelmiin/>.
- [13] ENTSO-E. "Nordic Grid Code" (tammikuu 2007). URL: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/publications/nordic/planning/070115_entsoe_nordic_NordicGridCode.pdf.
- [14] Fingrid. *Markkinapaikat*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.04.2025): <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/johdanto-sahkomarkkinoihin/>.
- [15] Fingrid. *Taselaskennan esimerkki*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.04.2025): <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/taseselvitys/taselaskennan-esimerkki/>.
- [16] Fingrid. *Päivänsisäisten ja vuorokausimarkkinoiden kehityssuunta*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.04.2025): <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/sahkomarkkinoiden-kehityshankkeet/paivansisaisten-ja-vuorokausimarkkinoiden-kehityssuunta/>.
- [17] Fingrid. *Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-tuotteet)*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 06.03.2025): <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/taajuusohjattu-kaytto-ja-hairioreservi/>.
- [18] Fingrid. *Nopea taajuusreservi (FFR)*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.03.2025): <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/nopea-taajuusreservi/>.
- [19] Fingrid. *Reservimarkkinat*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.02.2025): <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/>.
- [20] Fingrid. *Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR)*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 07.03.2025): <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/automaattinen-taajuudenhallintareservi/>.
- [21] Fingrid. *Reservituotteet ja reservien markkinapaikat*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.02.2025): <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-reservien-markkinapaikat.pdf>.
- [22] Fingrid. *Varavoimailaitokset*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.02.2025): <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/varavoimailaitokset/>.
- [23] Fingrid. *Fingrid käynnisti varavoimailaitokset ajoon sähkön tasapainon ylläpitämiseksi*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.03.2025): <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2024/fingrid-kaynnisti-varavoimailaitokset-ajoon-sahkon-tasapainon-yllapitamiseksi/>.
- [24] E. Vakkilainen, A. Kivistö ja R. Tarjanne. "Sähkön tuotantokustannusvertailu" (2012), s. 9. URL: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-265-341-3> (viitattu 31.05.2025).
- [25] *Fingrid vuosikertomus 2023*. 2024, s. 156. URL: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/vuosikertomus/2023/fingrid_oyj_vuosikertomus_2023.pdf.

- [26] Motiva. *Sähkön hankinta ja kulutus*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.04.2025): https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto_suomessa/sahkon_hankinta_ja_kulutus.
- [27] Energiavirasto. *Sähkön toimitusvarmuus vuonna 2024*, s. 7. URL: <https://www.epressi.com/media/userfiles/156567/1732688164/sahkon-toimitusvarmuus-vuonna-2024.pdf>.
- [28] R. Hirvonen, P. Sulamaa ja E. Tamminen. "Kilpailu sähkömarkkinoilla: Sähkömarkkinoiden keskeiset piirteet ja toiminta" (2003), s. 11. URL: <https://hdl.handle.net/10419/63960>.
- [29] *Varavoima Harvoin käytetty, mutta silti välttämätön*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 03.03.2025): <https://www.fingridlehti.fi/varavoima-2/>.
- [30] Suomen Merimies-Unioni. *Yhden tankkerin lastin kuljettamiseen tarvitaan 400 säiliöautoa*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 01.04.2025): <https://www.smu.fi/uutiset/yhden-tankkerin-lastin-kuljettamiseen-tarvitaan-400-sailioautoa-rekkaletkan-pituus-5-kilometria/>.
- [31] Energiavirasto. "Laitoskohtaiset todennetut päästöt [tCO₂] vuosilta 2013-2023" (), s. 1–8. URL: https://energiavirasto.fi/documents/11120570/207255594/Laitoskohtaiset_tiedot_vuosien_2013-2023_p%C3%A4st%C3%A4st%C3%B6ist%C3%A4.pdf/622f216f-8453-f8c3-b6d9-ec917e2811ee/Laitoskohtaiset_tiedot_vuosien_2013-2023_p%C3%A4st%C3%A4st%C3%B6ist%C3%A4.pdf?t=1712153387476.
- [32] Energiavirasto. *Päästökaupan huutokauppatulot 511 miljoonaa euroa*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 01.04.2025): <https://energiavirasto.fi/-/paastokaupan-huutokauppatulot-511-miljoonaa-euroa>.
- [33] S. Awerbuch ja A. Preston. *The Virtual Utility: Accounting, Technology & Competitive Aspects of the Emerging Industry*. Springer Science & Business Media, joulukuu 1996, s. 1.
- [34] N. Naval ja J. M. Yusta. "Virtual power plant models and electricity markets - A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 149 (lokakuu 2021), s. 111393. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111393.
- [35] H. Saboori, M. Mohammadi ja R. Taghe. *Virtual Power Plant (VPP), Definition, Concept, Components and Types*. Maaliskuu 2011. DOI: 10.1109/APPEEC.2011.5749026.
- [36] M. M. Othman, Y. Hegazy ja A. Y. Abdelaziz. "A review of virtual power plant definitions, components, framework and optimization". *International Electrical Engineering Journal* 6.9 (2015), s. 2010–2024. URL: https://www.researchgate.net/publication/283329072_A_Review_of_Virtual_power_plant_Definitions_Components_Framework_and_Optimization (viitattu 20.05.2025).
- [37] J. Chen, J. Yan, H. Du, M. Debbabi ja M. Kassouf. *Vulnerability Analysis of Virtual Power Plant Voltage Support under Denial-of-Service Attacks*. Tammikuu 2023. DOI: 10.1109/ISGT51731.2023.10066361.

- [38] E. Heydarian-Forushani, H. H. Alhelou ja B. S. Elghali. *Virtual Power Plant Solution for Future Smart Energy Communities*. Milton, UNITED KINGDOM: Taylor & Francis Group, 2022, s. 10.
- [39] *VIBECO - Virtuaalivoimalaitosyhtiö*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22. 04. 2025): <https://vibeco.fi/>.
- [40] M. Royapoor, M. Pazhoohesh, P. J. Davison, C. Patsios ja S. Walker. "Building as a virtual power plant, magnitude and persistence of deferrable loads and human comfort implications". *Energy and Buildings* 213 (huhtikuu 2020), s. 109794. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.109794.
- [41] J. Sillman, L. Lakanen, S. Annala, K. Grönman, M. Luoranen ja R. Soukka. "Evaluation of greenhouse gas emission reduction potential of a demandresponse solution: a carbon handprint case study of a virtual power plant". *Clean Energy* 7.4 (elokuu 2023), s. 755–766. DOI: 10.1093/ce/zkad022.
- [42] T. Le Varlet, O. Schmidt, A. Gambhir, S. Few ja I. Staffell. "Comparative life cycle assessment of lithium-ion battery chemistries for residential storage". *Journal of Energy Storage* 28 (huhtikuu 2020), s. 101230. DOI: 10.1016/j.est.2020.101230.
- [43] P. I. Pimentel, J. Hinkley ja A. Brent. "Life cycle assessment of a virtual power plant: Evaluating the environmental performance of a system utilising solar photovoltaic generation and batteries". *Renewable Energies* 2.2 (heinäkuu 2024). Publisher: SAGE Publications. DOI: 10.1177/27533735241285428.
- [44] S. Hwang ja N. Kittner. "Virtual power plants: bridging utility and customer gaps to facilitate clean energy transitions". *Progress in Energy* 7.2 (huhtikuu 2025). Publisher: IOP Publishing, s. 22008. DOI: 10.1088/2516-1083/adbeb4.
- [45] K. Mesina. *Japan is keeping itself busy by making virtual power plants | Asian Power*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10. 06. 2025): <https://asian-power.com/power-utility/exclusive/japan-keeping-itself-busy-making-virtual-power-plants>.
- [46] R. Khan, N. Islam, S. K. Das, S. M. Muyeen, S. I. Moyeen, M. F. Ali, Z. Tasneem, M. R. Islam, D. K. Saha, M. F. R. Badal, H. Ahamed ja K. Techato. "Energy Sustainability Survey on Technology and Control of Microgrid, Smart Grid and Virtual Power Plant". *IEEE Access* 9 (2021), s. 104663–104694. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3099941.
- [47] G. Chugh, P. K. Singh, S. Dwivedi, R. Mackensen ja S. Liebehentze. *Opportunities for Virtual Power Plants in India*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10. 06. 2025): https://energyforum.in/fileadmin/india/media_elements/publications/20191121_Virtual_Power_Plants/Virtual_Power_Plants__Report.pdf.
- [48] Sello. *Uusi virtuaalivoimalaitos käyttöön kauppakeskus Sellossa*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21. 05. 2025): <https://www.keva.fi/uutiset-ja-artikkelit/uusi-virtuaalivoimalaitos-kayttoon-kauppakeskus-sellossa/>.

- [49] Siemens Osakeyhtiö. *Kiinteistöistä virtuaalisia voimalaitoksia*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21. 05. 2025): <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:e3324abb-3bfb-4a1e-baed-e12dd78cba2a/sello-fi-2020-web.pdf>.
- [50] Sello. *2 500 aurinkopaneelia ja Pohjois-Euroopan suurin kiinteistöön sulautettu sähkövarasto Sellon energijärjestelmä tuo säästöjä koko yhteiskunnalle*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21. 04. 2025): <https://www.sello.fi/info/ajankohtaista/2-500-aurinkopaneelia-ja-pohjois-euroopan-suurin-kiinteistoon-sulautettu>.
- [51] K. Schönberg. *Virtuaalivoimala maksoi itsensä takaisin etuajassa ja tuottaa jo rahaa kaupungille sähköauton omistaja voi kohta päästä mukaan apajille*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21. 04. 2025): <https://yle.fi/a/74-20023156>.
- [52] Elisa. *Elisan kehittämästä sähkövarastointiratkaisusta tulossa Euroopan suurin hajautettu virtuaalivoimalaitos*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21. 04. 2025): <https://elisa.fi/yhtiotieto/uutishuone/tiedotteet/elisan-kehitt%C3%A4m%C3%A4st%C3%A4-s%C3%A4hk%C3%B6varastointiratkaisusta-tulossa-euroopan-suurin-hajautettu-virtuaalivoimalaitos/73802466771647/>.
- [53] E. Lukkari. *Elisan virtuaalivoimala avuksi taajuuden vakautusreserville*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22. 05. 2025): <https://www.ostologistiikka.fi/kategoriat/talous/elisan-virtuaalivoimala-avuksi-taajuuden-vakautusreserville>.
- [54] Vibeco. *Sinebrychoffin panimo ja sähkövarasto tuottamaan joustoja sähkömarkkinoille*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21. 04. 2025): <https://vibeco.fi/referenssit/sinebrychoff/>.
- [55] M. Remes. *Aurora pyramidit maailman pohjoisin virtuaalivoimala*. Maaliskuu 2020. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21. 04. 2025): <https://www.fingridlehti.fi/aurora-pyramidit-maailman-pohjoisin-virtuaalivoimala/>.
- [56] Vibeco. *Lidlin 136 myymälää Suomessa liitetään virtuaalivoimalaitospalveluun*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21. 04. 2025): <https://vibeco.fi/referenssit/lidl-suomi/>.
- [57] Vibeco. *SYK hyödyntää datalla johtamista taistelussa ilmastonmuutosta vastaan kiinteistöt liitetään virtuaalivoimalaitokseen*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21. 04. 2025): <https://vibeco.fi/referenssit/syk/>.
- [58] Suomen Yliopisto-kiinteistöt Oy. *Yliopistojen ja Suomen Yliopistokiinteistöt Oy:n virtuaalivoimalaitos käynnistyy*. Syyskuu 2020. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 01. 02. 2025): <https://sykoy.fi/yliopistojen-ja-suomen-yliopistokiinteistot-oy-n-virtuaalivoimalaitos-kaynnistyy/>.
- [59] Siemens. *Siemens Osakeyhtiö toimittaa VR Groupille virtuaalivoimalaitospalvelun*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21. 04. 2025): <https://press.siemens.com/fi/fi/lehdistotiedote/siemens-osakeyhtio-toimittaa-vr-groupille-virtuaalivoimalaitospalvelun>.
- [60] Siemens. *Siemens toimittaa virtuaalivoimalaitospalvelun Goodman-kauppakeskukseen*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21. 04. 2025): <https://press.siemens.com/fi/fi/lehdistotiedote/siemens-toimittaa-virtuaalivoimalaitospalvelun-goodman-kauppakeskukseen>.

- [61] H. Wenzl, R. Benger ja I. Hauer. *Electrochemical Terminology*. Vol. 1. 2024, s. 465–472.
- [62] K. Härkönen, L. Hannola, J. Lassila ja M. Luoranen. "Assessing the electric demand-side management potential of Helsinki's public service building stock in ancillary markets". en. *Sustainable Cities and Society* 76 (tammikuu 2022), s. 103460. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103460.
- [63] European Parliament. *EU Solar Energy Strategy*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 03.06.2025): <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/package-repowereu-plan/file-eu-solar-strategy?sid=9201>.