



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

VALTTERI VARONEN
SÄHKÖVARASTOJEN KÄYTTÖ VERKKOLIIKETOIMINNASSA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Pertti
Järventausta
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
26. huhtikuuta 2017

TIIVISTELMÄ

VALTTERI VARONEN: Sähkövarastojen käyttö verkkoliiketoiminnassa

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 69 sivua, 8 liitesivua

Syyskuu 2017

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Sähköverkot ja -markkinat

Tarkastaja: professori Pertti Järventausta

Avainsanat: sähkövarasto, sähkön varastointitekniikat, verkkoliiketoiminta, sähkömarkkinalaki, valvontamenetelmät

Sähkövarastojen käyttö verkkoliiketoiminnassa ei tällä hetkellä ole sähkömarkkinalain mukaan mahdollista. Sähkövarastoa on määritelty erillisenä käsitteenä sähkömarkkinadirektiivissä eikä sähkömarkkina-alaissa. Näin ollen sähkövarasto tulkitaan sähkökäyttöpaikaksi, joka kuluttaa ja tuottaa sähköä. Sähkömarkkinalain mukaan verkonhaltija voi osallistua sähkömarkkinoille vain erikseen määritellyissä tapauksissa (esimerkiksi häviösähkön hankinta), jolloin se ei voi omistaa ja käyttää sähkövarastoa.

Euroopan komissio on julkaissut ehdotuksen uudesta sähkömarkkinadirektiivistä. Ehdotuksen mukaan verkonhaltija voi omistaa ja käyttää sähkövarastoa ainoastaan poikkeustapauksissa silloin, kun markkinaehtoiset toimijat eivät ole osoittaneet kiinnostusta varaston omistamiseen, se on verkon kannalta tarpeellista ja sääntelyviranomaisen on arvioinut poikkeuksen tarpeellisuuden.

Tämän työn tavoitteena oli tutkia erilaisia sähkön varastointitekniologioita, varastojen käyttötarkoituksia, kustannuksia sekä arvioida tutkimuksen perusteella sähkövarastojen soveltuvuutta verkkoliiketoimintaan. Tavoitteiden saavuttamiseksi tehtiin kirjallisuuskatseaus sekä kyselytutkimus jakeluverkonhaltijoille.

Akut ovat sähkön varastointitekniologioista soveltuvimpia jakeluverkkokäyttöön. Tämä johtuu muun muassa niiden verraten suuresta energiatiheudesta, korkeasta hyötysuhteesta, nopeasta vasteajasta sekä laajasta teho- ja energiakapasiteettiskaalasta. Jakeluverkoissa sähkövarastoja voidaan hyödyntää parhaiten jännitteen säätöön, sähkön toimitusvarmuuden ja laadun parantamiseen sekä verkkoinvestointien lykkäämiseen tai estoon.

Kyselytutkimuksen perusteella verkonhaltijat pitivät varaston todennäköisimpinä käyttötarkoituksina sähkön toimitusvarmuuden parantamista sekä jännitteen säätöä. Suurin osa verkonhaltijoista oli sitä mieltä, ettei direktiiviehdotuksen sisältö ole varaston omistuksen osalta perusteltu, vaan verkonhaltijalle pitäisi sallia varaston omistus ilman erillistä lupaa.

Sähkönjakelunprosessiin on löydettävä teknisesti toimivat ratkaisut, joiden kokonaiskustannukset pitkällä aikavälillä ovat mahdollisimman pienet. Vaikka sähkön varastointiin on olemassa toimivia teknologioita, niiden kustannukset verkkotoiminnan tarpeisiin ovat usein suuret hyötyihin verrattuna. Sen vuoksi direktiiviehdotuksen mukainen varaston omistuksen arviointi on tämän työn tulosten valossa perusteltu, ja sähkövaraston käyttöä osana verkkoliiketoimintaa on arvioitava tapauskohtaisesti.

ABSTRACT

VALTTERI VARONEN: Electrical Energy Storages in Network Business

Operations

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 69 pages, 8 Appendix pages

September 2017

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Power Systems and Market

Examiner: Professor Pertti Järventausta

Keywords: electrical energy storage, energy storage technologies, network business operations, Electricity Market Act, regulation methods

There exist barriers that prevent the use of electrical energy storages in network business operations because there is no definition of energy storage in the present electricity market directive or in the Finnish electricity market act. Therefore, an energy storage can be regarded as an electricity generation system. A distribution system operator (DSO) cannot own generation and therefore a DSO cannot own and operate energy storage facilities. A proposal for a new electricity directive has been published. According to the proposal a DSO can own and operate storage facilities only if other parties have not expressed their interest to own the storage, the storage facilities are necessary for the grid and the regulatory authority has assessed the necessity.

The purpose of this thesis was to research different energy storage technologies and applications in electricity grid, to evaluate costs of storage and to assess the suitability of storage in network business operations. To achieve this a literature review and a questionnaire, which was sent to the Finnish DSOs, were carried out.

Battery energy storages are the most suitable energy storage technologies to be used in the distribution network. This is mainly because of their relatively high energy density, high efficiency, fast response time and broad scale of energy and power capacity. In distribution networks, energy storages can be used for voltage control, power quality and reliability applications and to defer or prevent network investments. The questionnaire revealed that the DSOs considered voltage control and power quality and reliability applications as the most suitable uses for storage. Most of the DSOs disagreed with the directive proposal and stated that ownership of storage facilities should be possible for DSOs without an approval.

Technologically feasible solutions that have the smallest overall costs in the long run should be used in electricity distribution. Although there are feasible storage solutions, the costs of storage technologies are still high compared to their benefits in most cases. Therefore, the proposal regarding the ownership of storage facilities is reasonable and the use of energy storages in network business operations should be evaluated in each case separately.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Helsingissä Energiavirastolle. Työn tarkastajana toimi professori Pertti Järventausta Tampereen teknilliseltä yliopistolta, ja Energiavirastolla työtäni ohjasi verkkoinsinööri Joel Seppälä.

Diplomityön aihe oli ajankohtainen, mielenkiintoinen sekä haastava, ja haluan kiittää Energiavirastoa mahdollisuudesta tehdä diplomityöni virastolle juuri tästä aiheesta. Eri-tyisesti haluan kiittää Joelia innokkaasta ja pitkäjänteisestä työn ohjauksesta sekä hyvistä näkökulmista ja vinkeistä työhön liittyen sekä johtaja Veli-Pekka Saajoa työn ohjaamiseen osallistumisesta. Perttiä haluan kiittää täsmällisestä työn tarkastamisesta sekä aktiivisesta otteesta työn suunnitteluun. Lisäksi haluan kiittää kaikkia energiavirastolaisia hyvästä ja innostavasta työilmapiiristä sekä kaikesta avusta työn tekemiseen.

Lopuksi kiitos perheelleni ja ystävilleni tuesta diplomityön tekemisen ja koko opintojeni ajan.

Helsingissä, 18.8.2017

Valtteri Varonen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	SÄHKÖVARASTOT VERKKOTOIMINNAN NÄKÖKULMASTA	3
2.1	Sähkövarasto nykyisessä lainsäädännössä	4
2.2	Euroopan komission puhtaan energian paketti.....	6
3.	SÄHKÖN VARASTOINTITEKNOLOGIOITA	8
3.1	Yleistä sähkövarastojen ominaisuuksista	8
3.2	Sähkömekaaniset varastot	11
3.2.1	Pumppuvoimalaitos.....	11
3.2.2	Paineilmavarasto	12
3.2.3	Vauhtipyörä.....	13
3.3	Sähkökemialliset varastot.....	13
3.3.1	Perinteiset akkuteknologiat	14
3.3.2	Virtausakut	14
3.4	Sähkömagneettiset varastot	15
3.5	Muita varastointiteknologioita	16
3.6	Sähkövarastojen teknologinen kehittyneisyys	17
4.	SÄHKÖVARASTOJEN KÄYTTÖKOHTEET	19
4.1	Käyttökohteiden luokittelu.....	19
4.2	Verkon toimintaa tukevat palvelut	20
4.2.1	Voimajärjestelmän tehtasapaino	20
4.2.2	Jännitteen säätö	21
4.3	Kuormitushuipun pienentäminen ja investointien lykkäys jakeluverkossa ..	22
4.4	Sähkön laatu ja toimitusvarmuus	23
4.5	Sähkövarasto uusiutuvan energian tuotannossa	25
4.6	Muita käyttökohteita	28
4.7	Yhteenveto käyttökohteista	28
4.8	Case-esimerkkejä	32
4.8.1	Suvilahden sähkövarasto	32
4.8.2	Suomenniemen sähkövarasto	32
4.8.3	Batcave-akkuprojekti	33
5.	SÄHKÖVARASTOJEN ELINKAARIKUSTANNUKSET	35
5.1	Elinkaarikustannuksen annuiteetin laskeminen	36
5.1.1	Investointikustannukset.....	36
5.1.2	Käyttö- ja ylläpitokustannukset	37
5.1.3	Varaston vaihto-, kierrätys- ja hävityskustannukset	39
5.2	Erilaisten sähkövarastojärjestelmien elinkaarikustannuksia	39
5.3	Sähkövaraston energiakapasiteetin ja purkaussyörien määrän vaikutus elinkaarikustannuksiin.....	41
5.4	Sähkövarasto asiakkaan kokemien keskeytysten estossa.....	44
5.5	Muut toimitusvarmuutta parantavat ratkaisut	48

6. SÄHKÖVARASTOJEN HYÖDYNNETTÄVYYS SUOMEN SÄHKÖVERKOSSA.....	50
6.1 Lomakekysely	50
6.2 Kyselyn rakenne.....	51
6.3 Sähkövarastojen käytön todennäköisyys ja käyttötarkoitukset.....	53
6.4 Sähkövarastojärjestelmien teknologia ja kustannukset.....	56
6.5 Kyselyssä mainittuja sähkön varastoinnin suurimpia esteitä	58
6.6 Sähkövarastoihin liittyvä regulaatio ja puhtaan energian paketti.....	58
7. YHTEENVETO	61
LÄHTEET.....	65

LIITE A: YHTEENVETO VALVONTAMENETELMISTÄ

LIITE B: LOMAKEKYSELYPOHJA

LYHENTEET JA MERKINNÄT

aFRR	Automaattinen taajuudenhallintareservi
AJK	Aikajälleenkytkentä
CAES	engl. Compressed Air Energy Storage, paineilmaparasto
DLC	engl. double-layer capacitor, superkondensaattori (kaksikerroksinen)
EU	Euroopan Unioni
FCR	Taajuuden vakautusreservi
FCR-D	Taajuusohjattu häiriöreservi
FCR-N	Taajuusohjattu käyttöreservi
FRR	Taajuuden palautusreservi
KAH	Keskeytyksistä aiheutunut haitta
KOPEX	Kontrolloitavissa oleva operatiivinen kustannus
mFRR	Nopea häiriöreservi
IEA	Kansainvälinen energiajärjestö
LCOE	engl. Levelized Cost of Energy, annualisoitu energian hinta
NaS	Natriumrikki
NiCd	Nikkelikadmium
NiMH	Nikkelimetallihydridi
PHS	engl. Pumped Hydro Storage, pumppuvoimalaitos
PJK	Pikajälleenkytkentä
TRL	engl. Technology Readiness Level, teknologian kehittyneisyyttä kuvaava asteikko
SMES	engl. Superconducting Magnetic Energy Storage, suprajohtava energiavarasto
VRB	engl. Vanadium Redox Battery, vanadiinivirtausakku
C_{BoP}	Oheislaitteiden kustannus tehoyksikköä kohden
C_{BoP}	Sähkövaraston oheislaitteiden kustannukset
c_e	Varasto-osan kustannus energiayksikköä kohden
c_{el}	Sähkövaraston lataamiseen käytettävän sähkön hinta
C_{EoL}	Sähkövaraston kierrätys- ja hävityskustannukset
c_{EoL}	Sähkövaraston kierrätys- ja vaihtokustannus tehoyksikköä kohden
c_f	Kiinteät käyttö- ja ylläpitokustannukset tehoyksikköä kohden
C_I	Sähkövaraston investointikustannukset
C_{LC}	Annualisoitu elinkaarikustannus
$C_{O\&M}$	Sähkövaraston käyttö- ja ylläpitokustannukset
$C_{O\&M,f}$	Kiinteät käyttö- ja ylläpitokustannukset
$C_{O\&M,v}$	Muuttuvat käyttö- ja ylläpitokustannukset
C_{PCS}	Sähkövaraston tehoelektroniikan tai muun sähkön muuntojärjestelmän kustannukset
C_R	Sähkövaraston vaihtokustannukset
c_r	Varasto-osan vaihtokustannus tehoyksikköä kohden
d	Sähkövaraston toimintapäivien lukumäärä vuodessa
d_{cf}	Käyttö- ja ylläpitokustannusten muutosprosentti
DoD_{max}	Suurin mahdollinen purkaussyvyys
e	Sähkön hinnan vuotuinen muutosprosentti
E	Sähkövaraston energiakapasiteetti
E_{ch}	Sähkövaraston latauksen aikana tapahtuvat häviöt
E_{dis}	Sähkövaraston purkamisen aikana tapahtuvat häviöt

E_{in}	Sähkövaraston lataamisen kuluva energia
E_{out}	Sähkövarastosta ulos tuleva energia
E_{PHS}	Pumppuvoimalaitoksen energiakapasiteetti
E_{st}	Varastoinnin aikana tapahtuvat häviöt
i	Laskentakorkokanta
L_{el}	Sähkön hinnan annuiteettikerroin
L_m	Käyttö- ja ylläpitokustannusten annuiteettikerroin
n	Purkaussyklien vuotuinen määrä
P	Sähkövaraston nimellisteho
r	Varasto-osan vaihtoajankohta
t	Purkausaika tunteina
t_d	Sähkövaraston päivittäinen toiminta-aika tunteina
Y	Sähkövarastojärjestelmän pitoaika
η	Hyötysuhde

1. JOHDANTO

Sähkön tuotannon on vastattava kysyntää, jotta verkko pysyy tasapainossa. Uusiutuvat energialähteet, kuten tuuli- ja aurinkovoima, poikkeavat perinteisistä sähköntuotantomenetelmistä, sillä ne eivät välttämättä tuota sähköä silloin, kun sitä tarvitaan. Uusiutuvien energialähteiden käyttö sähkön tuotannossa lisääntyy tulevaisuudessa, ja tuotannon muuttuminen pääosin ennustettavissa olevasta tuotannosta enemmän epäsäännölliseksi aiheuttaa ennustamattomuutta ja lisää tarvetta joustavuudelle. Energiavarastot ovat yksi keino saada sähköenergiajärjestelmän käyttöön lisää joustavuutta ja tehostaa esimerkiksi uusiutuvien energialähteiden käyttöä.

Sähkövarasto on yksi energiavaraston tyyppi, joka ottaa sähköenergiaa verkosta ja syöttää sen myöhemmin takaisin verkkoon. Sen lisäksi, että sähkövaraston avulla sähköenergiaa voidaan varastoida myöhempää käyttöä varten, sähkövarastoja pystytään hyödyntämään useaan verkon käyttöä tukevaan toimintoon. Tällaisia ovat esimerkiksi jännitteen- ja taajuudensäätö, kulutshuippujen tasaaminen ja sähkönkäyttäjän kokemien keskeytysten vähentäminen. Koska verkko on suunniteltava kestäväin suurin mahdollinen kuormitus, esimerkiksi kulutshuippujen tasaaminen jakeluverkossa voi tuoda kustannussäästöjä, kun verkon kapasiteettia ei tarvitse kasvattaa. Asiakkaan kokemat keskeytykset taas vähenevät, jos varastosta pystytään syöttämään asiakkaan kuormaa keskeytysten aikana. (Eyer & Corey 2010)

Varastointiteknologiat mahdollistavat myös sähköenergian varastoinnin kotitalouksissa. Esimerkiksi sähköverkon kuormituksen ollessa suuri voidaan kotitalouksissa käyttää varastosta saatavaa energiaa, mikä pienentää verkon kuormitusta. Jos kuluttajalla on omaa pientuotantoa, voidaan tuotettua energiaa varastoida myöhempää käyttöä varten. Tässä työssä keskitytään kuitenkin lähinnä jakeluverkkotasolla hyödynnettäviin sähkövarastoihin työn laajuuden rajoittamiseksi.

Tämän hetkinen lainsäädäntö asettaa haasteita sähkövarastojen hyödyntämiseen verkko- liiketoiminnassa. Nykyinen lainsäädäntö ei tunne käsitteenä sähkövarastoa, ja sähkövarasto voidaan rinnastaa sähkön tuotantolaitokseksi (Gouardères 2015). Verkonhaltija voi osallistua sähkömarkkinoille vain tiukasti määritellyissä tapauksissa, ja se ei voi omistaa esimerkiksi sähkön tuotantoa. Sähkövarastot aiheuttavat haasteita myös verotuksen sekä sähkön jakelu- ja myyntitariffien näkökulmasta. Esimerkiksi sähkövaraston käytöstä voidaan joutua maksamaan kaksinkertaiset tariffit, koska sähkövarasto latautuessaan kuluttaa sähköä ja purkautuessaan syöttää sähköä verkkoon (Gouardères 2015). Sähkövarastojen verotus- ja tariffikysymykset jätetään tämän työn ulkopuolelle.

Yhtenä tämän työn tavoitteena on tarkastella, olisiko sähkövarasto varteenotettava vaihtoehto sähköjakeluprosessiin perinteisten ratkaisujen rinnalle. Sähköjakeluprosessilla tarkoitetaan tässä työssä prosessia, jolla sähkötoimitus asiakkaalle toteutetaan. Se sisältää jakeluverkon suunnittelun, rakennuttamisen, käytön ja käytönaikaisen kunnossapidon. Sähkömarkkinalain 1 §:n mukaan lain tarkoituksena on muun muassa turvata sähkönloppukäyttäjille hyvä sähkönltoimitusvarmuus ja kilpailukykyinen hinta (Sähkömarkkinalaki 2013). Sen vuoksi tavoitteena on löytää sähkönjakeluprosessiin teknisesti toimivat ratkaisut, joiden kokonaiskustannukset pitkällä aikavälillä ovat mahdollisimman pienet. Sähkövarastojen täytyy siksi olla sekä teknisesti toimivia että taloudellisesti tehokkaita, jotta niitä on järkevää hyödyntää osana sähkönjakeluprosessia.

Sähkömarkkinadirektiivi on uudistumassa, ja Euroopan komissio on julkaissut ehdotuksen uudesta direktiivistä. Tässä direktiiviehdotuksessa myös sähkönl varastointi on otettu huomioon ja sähkönlvarasto käsitteenä on määritelty. Ehdotus ottaa muun muassa kantaa jakelu- ja siirtoverkonhaltijan rooliin sähkönlvaraston omistuksessa ja käytössä. Sen mukaan verkonhaltija saa ainoastaan poikkeustapauksessa omistaa ja käyttää sähkönlvarastoa, jos varaston käyttö on verkon kannalta perusteltua ja varastolle ei löydy markkinapohjaisia omistajia (Euroopan komissio 2016). Toinen työn tavoite onkin antaa Energiavirastolle työkaluja arvioida varaston omistuksen edellytyksiä.

Toisessa luvussa tarkastellaan sähkönlvarastoja nykyisten normien näkökulmasta ja esittelee lyhyesti direktiiviehdotuksen sisältö varastojen omistuksen osalta. Luku käsittelee sähkönlvarastoja sekä nykyisen sähkönlmarkkinadirektiivin että Suomen sähkönlmarkkinalain näkökulmasta. Luvussa selvitetään, mitä rajoituksia lainsäädäntö asettaa sähkönlvarastojen käytölle verkkotoiminannassa ja mihin nämä rajoitukset perustuvat. Luvussa esitetään myös direktiiviehdotuksessa esitetyt muutokset sähkönlvarastojen osalta.

Varastojen teknisen sopivuuden selvittämiseksi kolmannessa luvussa käsitellään lyhyesti sähkönlvarastoihin liittyvää teoriaa. Se sisältää lyhyen kuvauksen erilaisista sähkönlvarastotyypeistä ja niiden ominaisuuksista. Neljännessä luvussa käsitellään varastojen teoreettisia käyttökohteita sähkönlverkossa. Taloudellisen tehokkuuden selvittämiseksi viidennessä luvussa käsitellään sähkönlvarastojen elinkaarikustannuksia sähkönjakeluverkon kannalta olennaisissa käyttökohteissa. Sähkönlvarastojen elinkaarikustannusten muodostumisesta ei tässä työssä tehdä tutkimusta, vaan kustannukset perustuvat kirjallisuuden lähteisiin.

Työn lopuksi kuudennessa ja seitsemännessä luvussa esitellään tähän työhön tehty tutkimus sähkönlvarastojen käyttökohteista jakeluverkossa Suomessa. Tutkimus toteutetaan kyselynä jakeluverkonhaltijoilta, ja sen tarkoitus on selvittää, millaisiin tarkoituksiin sähkönlvarastoa voitaisiin käyttää sähkönjakeluverkossa Suomessa ja tutkia verkonhaltijoiden mielipiteitä sähkönl varastoinnista sekä direktiiviehdotuksen sisällöstä.

2. SÄHKÖVARASTOT VERKKOTOIMINNAN NÄKÖKULMASTA

Sähköverkkotoiminta on Suomessa luvanvaraista toimintaa, jota Energiavirasto valvoo. Sähkömarkkinalain 588/2013 3 §:n mukaan sähköverkkotoiminnalla tarkoitetaan ”sähköverkon asettamista vastiketta vastaan sähkön siirtoa tai jakelua ja muita sähköverkon palveluja tarvitsevien käyttöön; sähköverkkotoimintaan kuuluvat verkonhaltijan harjoittama sähköverkon suunnittelu, rakentaminen, ylläpito ja käyttö, verkon käyttäjien sähkölaitteiden liittäminen sähköverkkoon, sähkön mittaus, asiakaspalvelu sekä muut sähkön siirtoon tai jakeluun liittyvät toimenpiteet, jotka ovat tarpeen verkonhaltijan sähköverkossa tapahtuvaa sähkön siirtoa tai jakelua ja muita verkon palveluja varten.” (Sähkömarkkinalaki 2013)

Sähkömarkkinalain 4 §:n mukaan ”sähköverkkotoimintaa saa harjoittaa Suomessa sijaitsevassa sähköverkossa vain Energiamarkkinaviraston myöntämällä luvalla (sähköverkkolupa).” (Sähkömarkkinalaki 2013) Jokaiselle jakeluverkkoyhtiölle on määritelty omat vastuualueet, ja verkkoyhtiöt toimivat vastuualueellaan monopoliasemassa. (Lakervi & Partanen 2008) Sähkömarkkinalaista tulevia valvonnan päätavoitteita ovat verkkopalveluiden hinnoittelun kohtuullisuus ja korkea laatu. Lisäksi valvonnalla pyritään takaamaan tasapuolisuus ja verkon kehittäminen sekä liiketoiminnan pitkäjänteisyys, jatkuvuus, kehittäminen ja tehokkuus. (Energiavirasto 2015b)

Sähkömarkkinalain 24 §:n 2. momentin mukaan ”verkkopalvelujen hinnoittelun on oltava kokonaisuutena arvioiden kohtuullista.” (Sähkömarkkinalaki 2013) Tämänhetkiset sähköverkkotoiminnan hinnoittelun kohtuullisuuden valvontamenetelmät ovat voimassa vuosille 2016–2023, ja ne perustuvat lakiin sähkö- ja maakaasumarkkinoiden valvonnasta 590/2013. Hinnoittelun kohtuullisuuden arvioinnissa kullekin verkonhaltijalle lasketaan kohtuullinen tuotto ja toteutunut oikaistu tulos. Kohtuullisen tuoton ja toteutuneen oikaistun tuloksen laskennan periaate on esitetty kuvassa liitteessä A. Kohtuulliseen tuottoon vaikuttaa muun muassa sähköverkkotoimintaan sitoutunut omaisuus. Sähköverkkotoimintaan sitoutuneeseen omaisuuteen vaikuttaa sähköverkon nykykäyttöarvo, joka lasketaan verkkokomponenttien määrän, pitoaikojen ja keski-ikien perusteella. Energiavirasto on määritellyt verkonarvoon laskettavat verkkokomponentit sekä niiden yksikköhinnat ja pitoaikavälin. (Energiavirasto 2015b)

Oikaistun tuloksen laskennassa verkkoyhtiön liikevoitosta tai -tappiosta vähennetään erilaisten kannustimien vaikutus, joiden tarkoitus on kannustaa verkonhaltijaa esimerkiksi investoimaan verkkoon, kehittämään sähkönsiirron ja -jakelun laatua sekä toimimaan kustannustehokkaasti. Kun kannustimien osuus liikevoitosta tai -tappiosta on vähennetty, saadaan toteutunut oikaistu tulos, jota verrataan kohtuulliseen tuottoon. Jos oikaistu tulos

on suurempi kuin kohtuullinen tuotto, syntyy ylijäämä ja vastaavasti toisinpäin alijäämä. Verkonhaltijoiden hinnoittelun kohtuullisuudesta annetaan valvontapäätökset tällä hetkellä voimassa olevan vahvistuspäätöksen mukaan neljän vuoden välein. (Energiavirasto 2015b)

Osana tätä työtä tarkastellaan sähkövarastojen taloudellista tehokkuutta sähköjakeluprosessissa. Sähköverkkotoiminnan tehokkuus tarkoittaa asiakkaan haluaman palvelun aikaansaamista mahdollisimman alhaisin kustannuksin. Koska sähköverkkotoiminta on niin sanottu luonnollinen monopoli, markkinoilta ei kohdistu painetta verkkotoiminnan hinnoitteluun. Jos valvontaa ei olisi, kustannustehottomuutta voitaisiin tällöin kompensoida korkeammilla hinnoilla. (Energiavirasto 2015b)

2.1 Sähkövarasto nykyisessä lainsäädännössä

Sähkömarkkinalain 77 §:n mukaan ”sähkömarkkinoilla toimivan yrityksen on eriytettävä sähköverkkotoiminta muista sähköliiketoiminnoista sekä sähköliiketoiminnot muista yrityksen harjoittamista liiketoiminnoista” (Sähkömarkkinalaki 2013). Muut sähköliiketoiminnot koostuvat sähköntuotanto- ja sähkönmyyntitoiminnoista (Energiavirasto 2015c). Sähkömarkkinalain 78 §:n mukaan ”eriyttämisellä tarkoitetaan tässä laissa sitä, että tilikausittain on laadittava tuloslaskelma ja tase eriytettävälle sähköliiketoiminnoille sekä yhdistetty tuloslaskelma ja tase muille yrityksen harjoittamille liiketoiminnoille” (Sähkömarkkinalaki 2013).

Lisäksi sähkömarkkinalain 60 §:n mukaan ”jakeluverkonhaltija, jonka 400 voltin jakeluverkossa siirretty vuotuinen sähkömäärä on ollut kolmen viimeksi päättyneen kalenterivuoden aikana vähintään 200 gigawattituntia, toimii osana sähkön tuotantoa tai toimitusta harjoittavaa yritystä tai saman tahon määräysvallassa olevaa yritysryhmää, tulee verkonhaltijan olla oikeudelliselta muodoltaan, organisaatioltaan ja päätöksenteoltaan riippumaton yrityksen tai yritysryhmän sähköntuotanto- ja sähkönmyyntitoiminnoista (oikeudellisesti eriytetty jakeluverkkotoiminta).” (Sähkömarkkinalaki 2013)

Sähkövarastoa ei ole määritelty käsitteenä sähkömarkkinadirektiivissä 2009/72/EY eikä sähkömarkkinalaissa. Tästä syystä sähkövaraston asema eriyttämisvelvollisuuden näkökulmasta on epäselvä. Euroopan parlamentin julkaiseman tutkimuksen mukaan epäselvyyksien vuoksi sähkövaraston katsotaan usein olevan sähkön tuotantolaitos (Gouardères 2015). Energiaviraston suosituksessa sähkö- ja maakaasuliiketoimintojen eriyttämisestä todetaan: ”Kapasiteetiltaan suuret kiinteät energiavarastot, jotka kykenevät syöttämään keskijänniteverkkoon eivät voi kuulua verkkoliiketoimintaan.” Koska sähkövarastot eivät kuulu verkkotoimintaan, eivät ne myöskään voi kuulua sähköverkko-omaisuuteen eikä niille siten saa kohtuullista tuottoa. (Energiavirasto 2015c)

Nykyinen lainsäädäntö kuitenkin sallii varaston tuottamien palveluiden oston kolmansilta osapuolilta. Verkkoyhtiön ostamat palvelut kasvattavat kontrolloitavissa olevia operatiivisia kustannuksia (KOPEX). KOPEX-kustannukset vaikuttavat tehostamiskannustimeen, jonka tarkoitus on kannustaa verkonhaltijaa toimimaan kustannustehokkaasti. Toiminta on tehokasta silloin, kun toimintaan käytetyt kustannukset ovat mahdollisimman pienet suhteessa toiminnasta saatuihin tuotoksiin. Siten KOPEX-kustannusten kasvu voi joissain tapauksissa pienentää verkkoyhtiön sallittua tuottoa. Toisaalta sähkövarastopalveluiden tuomat edut esimerkiksi asiakkaan kokemien keskeytysten vähentämisessä voivat vaikuttaa positiivisesti toisiin kannustimiin, jolloin tehostamiskannustimessa näkyvä negatiivinen vaikutus voi kompensoitua toisaalla. (Energiavirasto 2015c)

Valtioneuvoston asetuksessa sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta 66/2009 (jäljempänä mittausasetus) säädetään käyttöpaikan ja sähköntuotantolaitoksen varustamisesta mittauslaitteistolla sähköverkossa. Asetuksen 6. luvun 2 §:n mukaan ”sähköverkkoon liitetty sähkönkäyttöpaikka tulee varustaa sähkönkulutuksen mittaavalla mittauslaitteistolla”. Lisäksi 4 §:n mukaan ”sähkönkulutuksen ja pienimuotoisen sähköntuotannon mittauksen tulee perustua tuntimittaukseen ja mittauslaitteiston etäluentaan (tuntimittausvelvoite).” (Mittausasetus 2009) Asetuksen 6. luvun 3 §:n mukaan ”sähköntuotantolaitos, joka syöttää sähköä sähköverkkoon siinä siirrettäväksi, tulee varustaa mittauslaitteistolla.” Lisäksi samassa pykälässä säädetään, ettei nimellisteholtaan enintään 100 kVA:n sähköntuotantolaitteistoa tarvitse varustaa erillisellä mittauslaitteistolla, jos sähkönkäyttöpaikka, jossa tuotantolaitteisto sijaitsee, on varustettu tuntimittauslaitteistolla. (Mittausasetus 2016) Koska sähkövarastoa ei ole laissa määritelty, ei sen asema mittauksen kannalta ole selvä.

Taseselvityksessä määritetään sähkömarkkinaosapuolien väliset sähköntoimitukset. Jakeluverkonhaltija tekee omassa jakeluverkossaan taseselvityksen, jossa se määrittää alueellaan toimivien sähkömyyjien sähköntoimitukset tuntitasolla. Tuntipohjaisessa taseselvityksessä se tapahtuu yleensä siten, että jakeluverkonhaltija määrittää yhtiön alueen kokonaistaseen tunneittain tuotanto- ja rajapistemittausten avulla. Sen jälkeen määritetään käyttöpaikkakohtainen sähköntoimitus tuntimittauksista ja joissakin tapauksissa myös kuormituskäyrien perusteella. Jakelualueen kokonaissähkönkäytön ja käyttöpaikkakohtaisen erotuksena saadaan verkossa tapahtuneet häviöt, joihin kuluvaan sähkön verkkoyhtiö ostaa sähkömarkkinoilta. (Partanen et al. 2014)

Kuten edellä mainittiin, mittausasetuksen mukaan sähkön tuotanto- ja kulutuskäyttöpaikat on varustettava mittauksella. Verkkoon kytketyt sähkövarastot saattavat aiheuttaa vääristymiä taseselvitykseen, jos varastoa ei käsitellä mitattuna käyttöpaikkana. Jos varaston verkosta ottamaa ja verkkoon syöttämää sähköä ei mitata, ei tiedetä sähkövarastoihin ladatun tai niiden verkkoon syöttämän sähkön osuutta taseselvityksessä. Tämä voi teoriassa johtaa esimerkiksi siihen, että yhden tunnin aikana verkon häviöt ovat taseselvityksen mukaan negatiiviset.

Sen lisäksi, että sähkövarasto syöttää sähköä verkkoon, se myös kuluttaa sähköä latautessaan. Sähkömarkkinalaissa on määritelty kantaverkonhaltijan ja oikeudellisesti eriytetyn jakeluverkonhaltijan oikeus hankkia ja toimittaa sähköä. Sähkömarkkinalain 30 §:n mukaan ”kantaverkonhaltija ja oikeudellisesti eriytettyä jakeluverkkotoimintaa harjoittava verkonhaltija voi hankkia ja toimittaa sähköä, jos toiminnan tarkoituksena on:

- 1) sähköverkon häviöenergian hankinta;
- 2) järjestelmävastuuseen kuuluvien tehtävien hoitaminen;
- 3) siirtorajoitusten hallinta;
- 4) verkon rakentamista, käyttöä ja kunnossapitoa palvelevien siirrettävien varavoi- makoneiden käyttö ja niillä tuotetun sähkön toimitus verkkoon;
- 5) omakäyttösähkön hankinta yhteisön toimitiloihin, sähköasemille tai linkkiasemiin taikka muihin näitä vastaaviin yhteisön kohteisiin;
- 6) jakeluverkonhaltijan sähkötoimitus tähän lakiin perustuvan velvollisuuden no- jalla loppukäyttäjälle tilanteessa, jossa vähittäismyyjän toimitus on keskeytynyt myyjästä aiheutuvasta syystä.” (Sähkömarkkinalaki 2013)

Oikeudellisesti eriytetty jakeluverkonhaltija voi siis hankkia sähköä varastoon vain sähkömarkkinalain 30 §:n mukaisiin tilanteisiin. Se ei myöskään voi toimittaa sähkövaras- toilla tuotettua sähköä, ellei kyse ole 30 §:n mukaisista tilanteista.

2.2 Euroopan komission puhtaan energian paketti

Euroopan komissio julkaisi marraskuussa 2016 niin kutsutun puhtaan energian paketin (engl. clean energy for all Europeans), joka sisältää muun muassa ehdotuksen uudesta sähkömarkkinadirektiivistä. Direktiivit ovat yksi EU:n toimielinten käytössä olevista oi- keudellisista välineistä. Direktiivi edellyttää EU-maita saavuttamaan tietyt tavoitteet, mutta jäsenmaat saavat itse päättää keinot, joilla tavoitteet saavutetaan. (EUR-Lex 2015) Direktiiviehdotuksessa energian varastointi on määritelty käsitteenä ja siinä selvennetään siirto- ja jakeluverkonhaltijan roolia energiavarastojen suhteen. Direktiiviehdotuksessa energian varastoinnilla tarkoitetaan ”sähköjärjestelmässä tuotetun sähkön tietyn määrän siirtämistä käyttöhetkeen joko loppuenergiana tai muunnettuna toiseksi energiankanta- jaksi.” (Euroopan komissio 2016)

Direktiiviehdotuksessa suhtaudutaan sähkövarastojen käyttöön myönteisesti ja varastot tunnustetaan keinoksi lisätä joustavuutta verkkoon. Esimerkiksi artiklan 32 ”Jakeluver- konhaltijoiden tehtävät jouston käytössä” mukaan EU:n jäsenvaltioiden on luotava tarvit- tava sääntelykehys, jolla mahdollistetaan ja kannustetaan jakeluverkonhaltijoita hankki- maan palveluita sellaisista resursseista, joilla voidaan tehostaa jakeluverkon toimintaa ja jotka tukevat verkon tehokasta käyttöä. Tällaisia resursseja ovat erityisesti hajautettu tuo- tanto, kysyntäjousto ja varastot. Lähtökohtaisesti verkonhaltijan kuuluisi ostaa näitä pal- veluita markkinaperusteisilla menettelyillä. (Euroopan komissio 2016)

Artikla 36 ”Varastojen omistaminen” käsittelee jakeluverkonhaltijan mahdollisuutta omistaa energiavarasto. Lähtökohtaisesti jakeluverkonhaltijat eivät saa omistaa, kehittää, hallinnoida tai käyttää energiavarastoja, vaan etusija annetaan markkinapohjaisille toimijoille, joilta verkonhaltija voi ostaa varastopalveluita. Artiklassa määritellään kuitenkin poikkeus, jonka mukaan jakeluverkonhaltijalle voidaan myöntää lupa omistaa ja hallinnoida varastoja, mikäli avoimen tarjouskilpailun jälkeen varastolle ei ole löytynyt muita omistajia. Tämän lisäksi varaston käytön on oltava perusteltua verkon tehokkaan, luotettavan ja turvallisen toiminnan kannalta. Sääntelyviranomaisen arvioi poikkeuksen tarpeellisuuden ja myöntää luvan varaston omistamiselle. Vaikka jakeluverkonhaltijalle myönnetään lupa omistaa ja käyttää sähkövarastoa, on se silti eriyttämismääräyksen alainen. Lisäksi sääntelyviranomaisen on järjestettävä säännöllisin väliajoin, mutta vähintään viiden vuoden välein, julkinen kuuleminen, löytyykö varastolle halukkaita markkinapohjaisia omistajia. Jos uusi omistaja löytyy, jäsenvaltioiden on varmistettava jakeluverkonhaltijan asteittainen luopuminen varaston omistuksesta. (Euroopan komissio 2016)

Direktiiviehdotuksen tarkka sisältö voi vielä tarkentua ennen kuin se tulee voimaan. Ehdotus on tällä hetkellä jäsenvaltioiden kommentoitavana, ja kommentteja käsitellään alustavasti kesän 2017 aikana. Valtioneuvosto on laatinut U-kirjelmän (U 6/2017 vp) eduskunnalle direktiiviehdotuksen sisällöstä. U-kirjelmällä lähetetään eduskunnalle tietoa EULainsäädäntöehdotuksista (Eduskunta 2017a). Valtioneuvoston kanta on, että ”lähtökohtaisesti monopoliasemassa olevien verkkoyhtiöiden osallistuminen sähkömarkkinoille tulee olla selkeästi rajattua ja sallittua vain perustelluissa poikkeustapauksissa. Verkkoyhtiöille tulisi kuitenkin sallia varastointilaitteistojen käyttö ja omistus sähkömarkkinoiden ulkopuolella verkon omiin tarpeisiin. Verkkoyhtiöiden omistusoikeuden muutoksissa tulee huomioida myös perustuslain takaama omaisuusuoja.” (Eduskunta 2017b) U-kirjelmää on käsitelty talousvaliokunnassa, joka yhtyy valtioneuvoston kantaan korostaen tiettyjä näkökohtia. Sähkövarastojen omistuksen, käyttämisen ja operoinnin osalta talousvaliokunta ”pitää tärkeänä, että varastointilaitteistojen käyttö ja omistus olisi verkkoyhtiöille jatkossakin mahdollista sähkömarkkinoiden ulkopuolella verkon omiin tarpeisiin.” (Eduskunta 2017c)

3. SÄHKÖN VARASTOINTITEKNOLOGIOITA

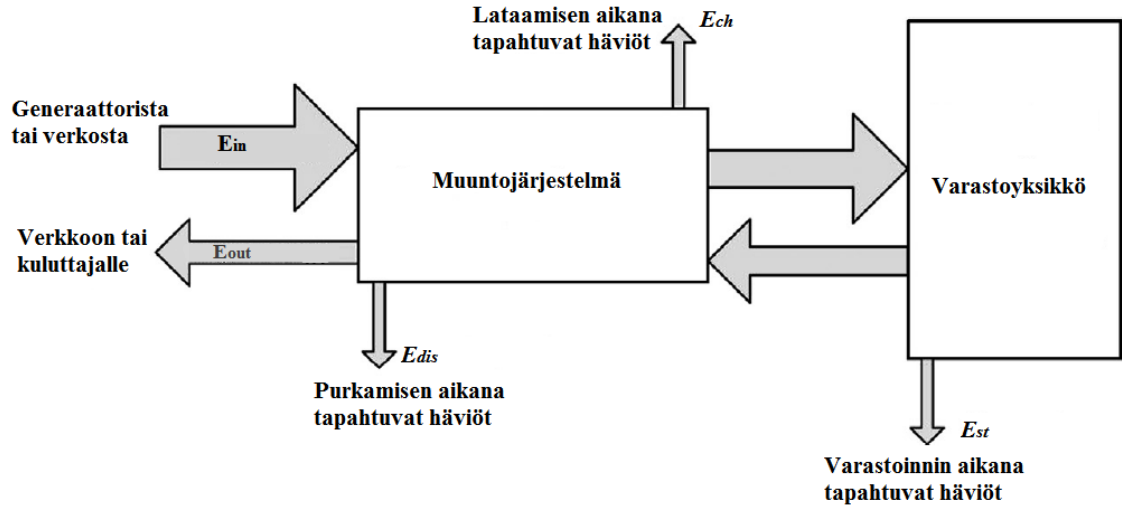
Sähkövarastoon voidaan siirtää sähköenergiaa ja varastoida se myöhempää käyttöä varten. Varastointi auttaa siten tasoittamaan energian kysynnän ja tarjonnan välisiä eroja. Sähkövarastoja voidaan sijoittaa sähköenergiajärjestelmässä tuotannon tai loppukäyttäjän yhteyteen sekä siirto- ja jakeluverkkoon. (International Energy Agency 2014b) Sähkövarastoon energiaa voidaan varastoida eri muodoissa, esimerkiksi potentiaali-, lämpö- tai liike-energiana. Tässä työssä sähkövarastolla tarkoitetaan energiavarastoa, jonka lataamiseen käytetään sähköenergiaa ja varastosta ulostuleva energia on sähköenergiaa.

Tässä luvussa käsitellään sähkön varastointiteknologioihin liittyvää teoriaa. Luvussa käsitellään lyhyesti erilaisia varastointiteknologioita ja niiden ominaisuuksia. Erilaisten sähkövarastojen toimintamekanismeja ei käsitellä kovin syvällisesti, koska varastojen toiminnan tarkka tunteminen ei tämän työn kannalta ole oleellista. Olennaista on esitellä varastointiteknologioiden ominaisuuksista ne, joilla on vaikutusta varaston tekniseen sopevuuteen sähköverkossa.

Sähköä ei voida varastoida sellaisenaan, joten se täytyy muuttaa muuksi energiamuodoksi varastoinnin ajaksi. Varastot voidaan luokitella varastoitavan energianmuodon mukaan sähkömekaanisiin-, magneettisiin ja -kemiallisiin varastoihin. Mekaanisia sähkövarastointiteknologioita ovat pumppuvoimalaitos, paineilmaparasto ja vauhtipyörä. Sähkökemiallisia varastoja ovat akut ja vetyvarasto. Sähkömagneettisia varastoja ovat taas suprajohtavat energiavarastot ja superkondensaattorit. (Díaz-González et al. 2016)

3.1 Yleistä sähkövarastojen ominaisuuksista

Sähkövarasto sisältää kaksi pääosaa, jotka ovat sähkön muuntojärjestelmä (engl. power conversion system) ja varasto-osa (engl. storage container). Sähkövaraston periaatekuva on esitetty kuvassa 1. Muuntojärjestelmää käytetään säätämään varaston jännite, virta ja muut ominaisuudet siten, että ne vastaavat kuorman vaatimuksia. Se sisältää esimerkiksi akkujärjestelmissä tehoelektroniikan, joka vaaditaan sähkön muuntamiseen vaihtosähköstä tasasähköksi ja toisinpäin. Pumppuvoimalaitoksessa muuntojärjestelmä taas koostuu turbiinista ja pumpusta. Varasto-osa taas sisältää energian varastointiin vaadittavan tilan. (Zakeri & Syri 2015)



Kuva 1. Sähkön varastointiprosessi. Perustuu lähteeseen (Zakeri & Syri 2015).

Sähkönvarastointiprosessi koostuu kolmesta osasta: varaston latautumisesta, sähkön varastoinnista ja varaston purkautumisesta. (Zakeri & Syri 2015) Jokaisessa varastoinnin vaiheessa tapahtuu häviöitä, jotka on kuvassa 1 merkitty E_{ch} , E_{st} ja E_{dis} . Sähkövaraston syöttämä energia E_{out} saadaan vähentämällä nämä häviöt varaston lataamiseen kuluvasta energiasta E_{in}

$$E_{out} = E_{in} - (E_{ch} + E_{st} + E_{dis}). \quad (1)$$

Varaston hyötysuhde voidaan esittää muodossa

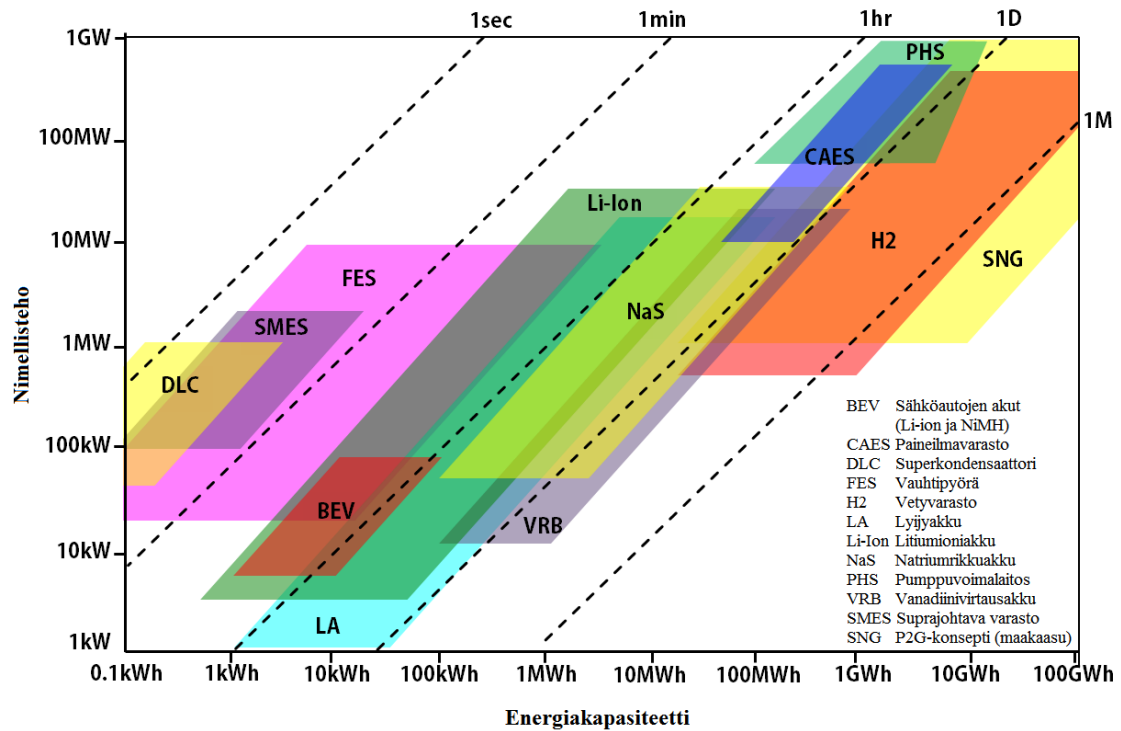
$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}}. \quad (2)$$

Sähköverkkokäytössä sopivan varastointiteknologian valintaan vaikuttavat muun muassa energia- ja tehokapasiteetti, elinikä, vasteaika, itsepurkautuminen ja hyötysuhde. Taulukossa 1 on esitetty tämän työn kannalta oleellisia sähkövarastoihin liittyviä suureita ja niiden määrittämiä.

Taulukko 1. Sähkövarastojen suureita. Perustuu lähteeseen (Kousksou et al. 2014).

Suure	Yksikkö	Kuvaus
Tehokapasiteetti	W	Varaston nimellisteho
Energiakapasiteetti	Wh	Varastosta saatava teho, kun varasto purkautuu täydestä tyhjäksi. Ts. nimellisteho * purkausaika
Vasteaika	s	Aika, joka kuluu siihen, että varasto pystyy tuottamaan halutun ulostulotehon.
Itsepurkautuminen	%/d	Häviöt, jotka syntyvät varastointivaiheessa
Kalenterielinikä	a	Varaston oletettu elinikä vuosina
Syklinen elinikä	kpl	Varaston oletettu suurin mahdollinen purkaussyklien määrä
Hyötysuhde	%	Ulostuloenergian ja lataamiseen käytetyn suhde.

Kuvassa 2 on esitetty myöhemmin tässä luvussa esiteltävien varastointitekniologioiden nimellisteho energiakapasiteetin funktiona IEC Market Strategy Boardin (2011) mukaan.



Kuva 2. Varastointitekniologioiden vertailu nimellistehon ja energiakapasiteetin suhteen. Perustuu lähteeseen (IEC Market Strategy Board 2011).

Kuvasta 2 huomataan, että esimerkiksi akkutekniologiat tarjoavat paljon erilaisia vaihtoehtoja purkausajan ja tehon suhteen. Akut sopivatkin tämän vuoksi lähes kaikkiin sovel-luskohteisiin. Kuvan oikeassa yläkulmassa olevat tekniologiat pumppuvoimalaitos, paineil-mavarasto, vetyvarasto ja P2G-konsepti on tarkoitettu suurten energiamäärien varas-tointiin ja ne pystyvät tuottamaan gigawattiluokan ulostulotehon. Ne soveltuvat siten par-haiten voimajärjestelmän tuotantotason sovelluksiin esimerkiksi tasaamaan energiātuot-tannon kausivaihteluita ja varastoimaan ylijäämäenergiaa. Superkondensaattorilla ja SMES-varastolla pystytään tuottamaan melko suuri ulostuloteho, mutta energiakapasi-teetti on selvästi muita tekniologioita lyhempi.

Verkkokomponentin elinikä on keskeinen tekijä tarkasteltaessa sen sopivuutta osaksi säh-könjakeluprosessia, koska elinikä vaikuttaa komponentin kannattavuuteen. Sähkövaras-tojen eliniät vaihtelevat hyvin paljon tekniologiasta riippuen, ja varaston elinikää voi olla vaikea arvioida muun muassa melko vähäisten käyttökokemusten vuoksi. Lisäksi siihen vaikuttavat useat käyttötavasta ja -ympäristöstä riippuvat tekijät, joita esitellään myöhem-min tässä luvussa. Esimerkiksi akuilla elinikä on yleensä 10–20 vuotta (Palizban & Kau-haniemi 2016). Jos tarkastellaan Energiaviraston määrittelemiä verkkokomponenttien pi-toaikoja, suurin osa pitoajoista on yli 40 vuotta. Energiaviraston yksikköhintaluettelon mukaan esimerkiksi keskijänniteverkon maakaapelien pitoaika voi olla enintään 50 vuotta ja päämuuntajien 60 vuotta. (Energiavirasto 2015a) Akun elinikä on siis olla jopa

kuudesosan muiden verkkokomponenttien eliniästä. Toisaalta sähkövaraston eliniän ei välttämättä tarvitse olla muiden verkkokomponenttien kanssa samaa luokkaa, jos varastoa voitaisiin käyttää esimerkiksi väliaikaisratkaisuna verkkoinvestointien lykkäämiseen.

Tämän työn näkökulman huomioiden toinen ominaisuus eliniän lisäksi on sähkövaraston hinta verrattuna muiden verkkokomponenttien hintaan. Sähkövarastojen hinnat vaihtelevat paljon ja teknologian ollessa melko uutta hintaa on vaikea arvioida. Moni varastointiteknologioista on vielä kehittymättömiä eikä laajasti kaupallisesti saatavilla. Tällä hetkellä hinnat ovat yleisesti korkeampia kuin muiden verkkokomponenttien ja sähkövarastoinvestoinnin kannattavaksi tekeminen voi aiheuttaa haasteita. Sähkövarastojen kustannuksia käsitellään enemmän luvussa 5.

3.2 Sähkömekaaniset varastot

Sähkömekaanisia varastoja ovat pumppuvoimalaitos, paineilmaparasto ja vauhtipyörä. Sähkömekaanisissa varastoissa energia varastoidaan mekaaniseksi energiaksi eli potentiaali- tai liike-energiaksi. Esimerkiksi pumppuvoimalaitoksessa energia varastoidaan veden potentiaalienergiaksi ja muutetaan liike-energiaksi altaiden korkeuseron avulla. Vauhtipyörässä energia taas varastoidaan pyörivän pyörän liike-energiaksi.

3.2.1 Pumppuvoimalaitos

Teknologisesti pitkälle kehittynyt ja laajalti ympäri maailman käytössä oleva mekaaninen sähkövarastointiteknologia on pumppuvoimalaitos (engl. pumped hydro storage, PHS). Yhdysvaltojen energiaministeriön ylläpitämän energiavarastotietokannan mukaan vuonna 2016 maailmalla oli asennettua pumppuvoimalaitoskapasiteettia noin 160 GW, joka muodostaa yli 99 % kaikesta asennusta varastointikapasiteetista (Sandia Corporation 2016). Pumppuvoimalaitos toimii kuten tavallinen vesivoimalaitos, mutta vettä voidaan pumpata takaisin ala-altaasta yläaltaaseen. Pumppausvaiheessa voimalaitoksen turbiini voi toimia pumppuna tai pumppausta varten voi olla erillinen yksikkö. Jotta voimalaitoksen toiminta olisi kannattavaa, pumppaus täytyy ajoittaa ajankohtiin, jolloin sähkön hinta on alhaisimmillaan. Kun sähköä tarvitaan, vesi virtaa yläaltaasta ala-altaaseen tuottaen sähköä. (Alanen et al. 2003)

Pumppuvoimalaitokset ovat suuria laitoksia, joita käytetään yleensä voimajärjestelmän tuotantotasolla pitkäaikaisvarastointiin tasaamaan esimerkiksi energiantuotannon kausivaihteluita. Esimerkiksi suurin osa Euroopan pumppuvoimalaitoksista on rakennettu varastoimaan ydinvoimaloiden ja hiilivoimalaitosten tuottamaa ylijäämäenergiaa (Gouardères 2015). Pumppuvoimalaitoksia voidaan käyttää lisäksi loistehon kompensointiin ja verkon taajuuden säätöön. Pumppuvoimalaitokset ovat teholtaan yleensä sadasta megawattista muutamaan gigawattiin. Tällä hetkellä suurin toiminnassa oleva pump-

puovoimalaitos sijaitsee Yhdysvalloissa ja sen teho on noin 3 GW. Pumppuvoimalaitokseen voidaan varastoida energiaa jopa 1–2 vuoden ajaksi (Alanen et al. 2003), ja sen elinikä voi olla 50–60 vuotta (Huff et al. 2013).

Pumppuvoimalaitoksella on pieni energiatiheys, minkä vuoksi se tarvitsee suuren tilan. Laitoksen tuottama energia (jouleina) voidaan laskea yhtälöstä

$$E_{PHS} = \rho ghV, \quad (3)$$

jossa ρ on veden tiheys, g putoamiskiihtyvyys, h putouskorkeus ja V yläaltaaseen varastoidun veden tilavuus (Díaz-González et al. 2016). Esimerkiksi laitos, jossa on lieriön muotoisen vesiallas, jonka halkaisija on 50 metriä ja syvyys 5 metriä, pystyy tuottamaan energiaa noin 5,4 MWh putouskorkeuden ollessa 200 metriä. Sopivia rakennuspaikkoja pumppuvoimalaitokselle saattaa olla vaikea löytää, sillä se vaatii kahden suuren vesialtaan rakentamista ja vähintään 100 metrin putouskorkeutta (Díaz-González et al. 2016). Suurien vesialtainen ja patojen rakentaminen vaikuttaa myös ympäristöön negatiivisesti. Pumppuvoimalaitoksen rakentaminen on pitkä ja kallis prosessi. Toisaalta pitkä elinikä tasoittaa elinkaarikustannuksia. (Kousksou et al. 2014)

3.2.2 Paineilmavarasto

Paineilmavarastossa (engl. Compressed Air Energy Storage, CAES) energia varastoidaan mekaanisesti puristamalla ilmaa varastoon kompressorin avulla. Ilmavarastona voidaan käyttää esimerkiksi maanalaisia onkaloita. Kun varasto latautuu, voimalan generaattori toimii moottorina, joka tuottaa mekaanista energiaa kompressorille. Kun sähköä tarvitaan, varastossa oleva paineilma lämmitetään, laajennetaan ja johdetaan turbiiniin, joka pyörittää generaattoria. Maanalaiset paineilma-varastot ovat kehittyneimpiä ja kustannustehokkaimpia, mutta on olemassa myös paineilma-varastoja, joissa varasto-osa sijaitsee maan päällä. Maanpäälliset paineilma-varastot ovat teholtaan pienempiä ja nopeampia rakentaa kuin maanalaiset, mutta rakennuskustannukset ovat korkeammat. (Huff et al. 2013)

Maanalaiset paineilma-varastot ovat tehoiltaan muutamia satoja megawatteja ja purkausajat vaihtelevat 8 tunnista 26 tuntiin. Energiakapasiteetit ovat maanalaisissa paineilma-varastoissa siten huomattavia. Vaikka teknologia on kehittynyt, paineilma-varastoja on tällä hetkellä käytössä vain muutama sopivien rakennuspaikkojen puutteesta johtuen. Paineilmavarastoa käytetään pumppuvoimalaitoksen tavoin tuotantotasolla suuren energiamäärän varastointiin, mutta pumppuvoimalaitokseen verrattuna sen investointikustannukset ovat pienemmät ja varasto vie vähemmän tilaa, koska ilmavarasto sijaitsee yleensä maan alla. Maanpäälliset paineilma-varastot ovat teholtaan muutaman kymmenen megawatin suuruusluokkaa ja purkaus aika vaihtelee kahden ja kuuden tunnin välillä. Energiakapasiteetti on siis pienempi kuin maanalaisessa paineilma-varastossa (Huff et al. 2013; Kousksou et al. 2014)

Paineilmavarasto on pumppuvoimalaitoksen tavoin teknologia, joka pystyy tuottamaan suuria energiamääriä, joten se soveltuu käytettäväksi keskitetyssä energiantuotannossa esimerkiksi kuorman tasapainotukseen suuressa kuormitustilanteessa. Paineilmavarastoja voitaisiin periaatteessa hyödyntää myös jakeluverkkotasolla, mutta pienen kokoluokan hajautetut paineilmavarastot vaatisivat kehittyneempää teknologiaa esimerkiksi kompressorin ja turbiinin osalta. (Chatzivasileiadi et al. 2013)

3.2.3 Vauhtipyörä

Vauhtipyörä varastoi liike-energiaa tyhjiössä pyörivään pyörään, joka on yhdistetty sähkökoneeseen. Ladattaessa kone toimii moottorina, joka pyörittää vauhtipyörää, jolloin energia varastoituu liike-energiaksi. Purettaessa kone toimii generaattorina, jolloin vauhtipyörään varastoitunut liike-energia muuttuu sähköenergiaksi. (Alanen et al. 2003) Vauhtipyörän etuna on, että se voidaan ladata ja purkaa useita tuhansia kertoa eikä sen toimintaan vaikuta käyttölämpötila. Vauhtipyörä voidaan purkaa myös täysin tyhjäksi ilman vaikutusta käyttöikänsä. (Kousksou et al. 2014)

Vauhtipyörän haittoina ovat pieni energiatiheys ja suuret häviöt (Kousksou et al. 2014). Se saattaa purkautua itsestään jopa muutamassa tunnissa, mikä rajoittaa vauhtipyörän käytön vain lyhyttä purkausaikaa vaativiin sovelluksiin. Varauksen ylläpitämiseksi vauhtipyörää on ladattava usein. (Ruester et al. 2012) Myös turvallisuuteen pitää kiinnittää erityistä huomiota, koska vauhtipyörällä on suuri pyörimisnopeus (Alanen et al. 2003). Vauhtipyörä voidaan käyttää parhaiten sovelluksissa, joissa tarvitaan paljon tehoa lyhyen aikaa, esimerkiksi yksittäisten kriittisten kuormien sähkönlaadun turvaamiseen. Vauhtipyörää voidaan käyttää lisäksi akkujen yhteydessä toimimaan lyhyttä purkausaikaa vaativissa tilanteissa, jolloin akkujen elinikä pitenee. (Ruester et al. 2012)

3.3 Sähkökemialliset varastot

Sähkökemiallisia varastoja ovat erilaiset akut. Akkuja on käytetty energiavarastoina jo pitkään, ja markkinoilla on useita erilaisia akkuteknologioita. Sähköverkkosovelluksissa käytetyimpiä akkuja ovat lyijy-, litium-, nikkeli- ja natriumpohjaiset akut. Akun ominaisuudet vaihtelevat paljon akkuteknologiasta riippuen ja niitä voidaan käyttää useissa eri voimajärjestelmän osissa aina sähkön tuotannosta kotitalouksiin asti. Ominaisuuksien ansiosta akut ovat sopivin vaihtoehto erityisesti jakeluverkkotason sovelluksiin. (U.S. Department of Energy 2013)

3.3.1 Perinteiset akkuteknologiat

Lyijypohjaiset akut ovat vanhimpia akkuteknologioita markkinoilla. Ne ovat halpoja, luotettavia ja niillä on melko korkea hyötysuhde (70–90 %). Lyijyakuilla on kuitenkin akkuteknologioista alhaisin syklinen elinikä sekä suppea toimintalämpötila. (Kousksou et al. 2014; Díaz-González et al. 2016)

Litiumioniakkuja käytetään paljon pienen kokoluokan sovelluksissa, kuten matkapuhelimissa, mutta niitä on mahdollista hyödyntää myös sähköverkoissa. Litiumioniakut purkautuvat hyvin vähän itsestään, niillä on korkea hyötysuhde (n. 90 %), pitkä elinikä ja korkea energiatiheys. (Ruester et al. 2012) Litiumioniakun elinikä riippuu kuitenkin vahvasti käyttölämpötilasta, ja erityisesti korkea lämpötila vähentää käyttöikää. Käyttöikää vähentävät myös tilanteet, joissa akun varaus laskee alhaiseksi, minkä vuoksi se ei välttämättä sovellu käytettäväksi sovelluksissa, jotka vaativat akun purkamista kokonaan. (Kousksou et al. 2014)

Nikkeliakuista yleisiä ovat nikkelikadmium (NiCd)- ja nikkelimetallihydridiakut (NiMH). NiCd-akut kilpailevat lyijyakkujen kanssa, koska niillä on hieman korkeampi energiatiheys, suurempi elinikä ja pienemmät huoltokustannukset. NiCd-akut eivät kuitenkaan ole menestyneet kaupallisesti yhtä hyvin kuin lyijyakut, koska ne ovat kalliimpia. Lisäksi kadmium on myrkyllistä ja haitallista ympäristölle. NiMH-akku on vaihtoehto NiCd-akulle. Se on ympäristöystävällisempi ja sillä on suurempi (noin 25–30 %) energiatiheys kuin NiCd-akulla. (Kousksou et al. 2014)

Natriumpohjaisista akuista tässä käsitellään natriumrikkiakkua (NaS). NaS-akkuteknologia on vielä kehitysvaiheessa, mutta joitakin akkuja on otettu käyttöön. NaS-akut ovat yksi lupaavimmista korkean tehon teknologioista (Díaz-González et al. 2016). NaS-akuilla on korkea energiatiheys ja hyötysuhde sekä vähäinen huoltotarve. Lisäksi niillä on nopea vasteaika ja erittäin alhainen itsepurkautuminen. Haittapuolina akussa ovat korkea hinta ja korkea käyttölämpötila (300–350 °C), jonka vuoksi se vaatii erillisen laitteiston käyttölämpötilan saavuttamiseksi. (Kousksou et al. 2014) Toisaalta NaS-akussa tapahtuvat kemialliset reaktiot ovat eksotermisiä eli ne tuottavat lämpöä, minkä vuoksi akun hyötysuhde pysyy korkeana. Kehitystyötä vaaditaan vielä akun eliniän nostamiseksi. (Díaz-González et al. 2016)

3.3.2 Virtausakut

Edellä mainittujen perinteisten akkuteknologioiden lisäksi hieman erilainen akkuteknologia on virtausakku. Virtausakkuteknologioita on useita, mutta vanadiiniakku (engl. vanadium redox battery, VRB) ja sinkkibromiakku ovat yleisimpiä käytössä olevia akkuja (Kousksou et al. 2014). Virtausakut eroavat perinteisistä akuista siten, että nestemäiset elektrolyytit ovat erillisissä tankeissa, joista ne johdetaan kennolle, joissa sähköntuotanto

tapahtuu. Virtausakun rakenteen ansiosta akun teho ja energiakapasiteetti voidaan mitoit-
taa helposti ja ne voidaan määritellä erikseen toisin kuin muissa akkuteknologioissa, mikä
on yksi virtausakun eduista. Energiakapasiteetti voidaan mitoitaa elektrolyyttitankkien
tilavuutta muuttamalla ja akun teho kennojen pinta-alaa ja määrää muuttamalla. (Díaz-
González et al. 2016)

Virtausakku voidaan purkaa täysin tyhjäksi ilman vaikutusta elinikään, joten virtaus-
akulla onkin pidempi elinikä ja korkeampi purkaussyklien määrä kuin perinteisillä
akuilla. Virtausakun itsepurkautuminen on myös vähäistä tankkien ansiosta. (Kousksou
et al. 2014) Erityisesti VRB-akulla on alhaiset huoltokustannukset, koska siinä käytetään
samaa elektrolyyttiä sekä anodilla että katodilla, joten elektrolyytit eivät saastu toisistaan.
(Díaz-González et al. 2016) Virtausakkujen huono puoli on akun rakentamisen monimut-
kaisuus, sillä akku vaatii paljon erillisiä osia muihin akkuihin verrattuna. Monimutkaisuus
lisää myös korjauskustannuksia. Lisäksi virtausakuilla on pienempi energia- ja tehotehiys
verrattuna muihin akkuihin. (Carnegie et al. 2013)

3.4 Sähkömagneettiset varastot

Sähkömagneettisia varastoja ovat SMES-varasto (engl. superconducting magnetic energy
storage) ja superkondensaattori. SMES:n toiminta perustuu suprajohtavaan käämin avulla
synnytettyyn magneettikenttään, johon energiaa varastoidaan. Käämi jäädytetään lähelle
absoluuttista nollapistettä, jolloin suprajohtavan materiaalin resistanssi häviää kokonaan.
Näin saadaan luotua voimakas magneettikenttä. (Ruester et al. 2012) SMES-varastolla on
korkea hyötysuhde (n. 95 %) ja nopea vasteaika. Díaz-González et al. (2016) mukaan
SMES-varaston hyötysuhde on suurempi kuin millään muulla varastointiteknologialla.
SMES:a voidaan hyödyntää parhaiten tehosovelluksissa, sillä sen tehotehiys on suuri,
mutta energiatiheys pieni. SMES:n ongelmana on myös todella kylmän toimintalämpöti-
lan vaatimus sekä melko nopea itsepurkautuminen, joka on noin 10–15 % tunnissa.
(Kousksou et al. 2014)

Sähkökemiallisen kondensaattorin (superkondensaattorin) toimintaperiaate on sama kuin
perinteisellä kondensaattorilla, mutta se kykenee varastoimaan energiaa suurempia mää-
riä. (Kousksou et al. 2014) Superkondensaattorin rakenne muistuttaa akkua, mutta se
eroaa akuista siten, että superkondensaattorin kennoissa ei tapahdu kemiallista reaktiota,
vaan energia on varastoitu sähköstaattisesti kennoon (Díaz-González et al. 2016).
SMES:n tapaan superkondensaattoreita voidaan hyödyntää parhaiten tehosovelluksissa.
Superkondensaattoria käytetään usein sovelluksissa, joissa purkausaikaa vaaditaan muu-
tamasta sekunnista muutamaan minuuttiin. Tehotehiys saattaa olla jopa 10 kertaa suu-
rempi kuin akuilla, joten superkondensaattori soveltuu käytettäväksi pientä fyysistä ko-
koa vaativiin sovelluksiin. Purkaussyklien määrä on käytännössä rajoittamaton, mutta no-
peasykliset toiminnot rajoittavat varaston syöttämää energiaa. Elinikä superkondensaat-
toreilla on 10 vuoden luokkaa. Hyötysuhde superkondensaattoreilla on suurimmillaan
noin 80 %, mutta itsepurkautuminen saattaa olla jopa 40 % päivässä. (Alanen et al. 2003)

Superkondensaattori ei ole erityisen sopiva sovelluksiin, joissa tarvitaan paljon tehoa ja energiaa, minkä vuoksi niiden käyttö on keskittynyt lähinnä kannettaviin laitteisiin sekä autoteollisuuteen. Superkondensaattorit ovat lisäksi kalliita verrattuna muihin lyhyen purkausajan varastoihin. (Díaz-González et al. 2016)

3.5 Muita varastointiteknologioita

Jotta kaikki aiemmin esitetyn sähkövaraston määritelmän täyttävät teknologiat esitellään, täytyvät myös vetyvarastot sekä sähkön muuntaminen kaasuksi (engl. power-to-gas, P2G) ottaa huomioon. Varastointiteknologioiden luokittelussa P2G ja vetyvarastot kuuluvat sähkökemiallisiin varastoihin.

Vetyä voidaan tuottaa monesta fossiilisesta polttoaineesta, mutta myös vedestä elektrolyysin avulla käyttäen esimerkiksi uusiutuvaa energiaa elektrolyysiin tarvittavan sähköenergian lähteenä. Vedyn tuottamisen jälkeen se voidaan kuljettaa putkia pitkin käyttökohteeseen tai varastoida, minkä jälkeen sitä voidaan käyttää sähkön tuottamiseen. Järjestelmä koostuu vedyn valmistusprosessista, vedyn varastoinnista ja polttokennosta, joka tuottaa sähköä vedystä. Vedyn valmistukseen, varastointiin ja polttokennoihin on olemassa useita erilaisia teknologioita. Yksi teknologioista on käänteinen polttokennoteknologia (engl. regenerative fuel cell, RFC), joka sisältää vedyn tuottamisen elektrolyysin avulla, vedyn varastointiosan ja polttokennojärjestelmän, joka tuottaa sähköä vedystä. (Díaz-González et al. 2016)

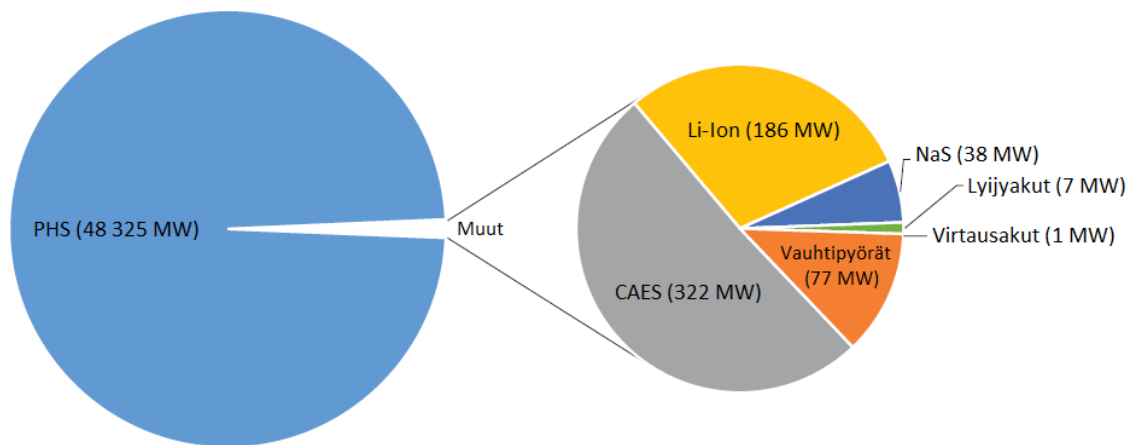
Varastointikapasiteetti on riippuvainen varastoidun vedyn määrästä, joten vetyjärjestelmät voivat tuottaa sähköä useita tunteja. Esimerkiksi RFC-järjestelmiä voidaan rakentaa kapasiteetiltaan 10 MWh/10 MW suuruisiksi. Teknologia on lupaava epäsäännöllisten uusiutuvien energialähteiden tuottaman sähkön varastointiin. Näiden järjestelmien latauspurkaussyklien määrä on suuri ja ulostulotehon muutosnopeus korkea. Teknologian huono puoli on alhainen hyötysuhde (n. 40 %:n luokkaa), joka on pienin kaikista tässä työssä käsiteltävistä varastointiteknologioista. (Díaz-González et al. 2016)

P2G-konsepti viittaa vetykaasun valmistamiseen sähköenergian avulla. Kaasua voidaan käyttää sellaisenaan esimerkiksi teollisuudessa tai se voidaan muuntaa takaisin sähköksi. P2G-konseptissa kaasu valmistetaan yleensä uusiutuvista energialähteistä saatavan sähköenergian avulla, joten se on yksi merkittävä uusiutuvien energialähteiden integroimisen sekä päästöjen vähentämisen keino. P2G-konseptissa sähköenergiaa käytetään vetykaasun valmistukseen elektrolyysin avulla, ja vetykaasusta voidaan hiilidioksidin avulla valmistaa maakaasua. P2G-konsepti voi hyödyntää jo olemassa olevia maakaasuputkia kaasun siirtämiseen. Maakaasua voidaan käyttää useisiin eri tarpeisiin, kuten teollisuuteen ja liikenteeseen, mutta myös sähköntuotantoon. (Díaz-González et al. 2016)

3.6 Sähkövarastojen teknologinen kehittyneisyys

Teknologian kehittyneisyyttä voidaan arvioida esimerkiksi TRL (Technology Readiness Level) -asteikolla. Euroopan komissio on määritellyt asteikon yhdeksän portaiseksi. Euroopan tiedeakatemioiden raportissa (EASAC 2017) varastointitekniikat sijoittuvat asteikolla sijoille 7–9. Kehittyneimpiä eli TRL 9 varastointitekniologioita ovat raportin mukaan pumppuvoimalaitos sekä litiumioni-, natriumrikki- ja lyijyakut. Jotta teknologia luokitellaan asteikolla TRL 9 -luokan teknologiseksi, täytyy sen olla todistetusti toimiva käyttöympäristössä sekä sillä täytyy olla kilpailevaa valmistusta. TRL 8 -tekniologioita ovat vauhtipyörät ja paineilmavarastot. TRL 8 tarkoittaa, että teknologia on valmis ja kilpailukykyinen. TRL 7 -luokan tekniologioita ovat taas virtausakut sekä P2G-konsepti. TRL 7 -luokan määrittäminen on, että teknologian prototyyppiä testataan käyttöympäristössä.

Kuvassa 3 on esitetty vuoden 2016 syyskuussa verkkoon kytketty varastointikapasiteetti Euroopan unionin 28 jäsenmaassa sekä Norjassa ja Sveitsissä Yhdysvaltojen energiainministeriön sähkövarastotietokannan (Sandia Corporation 2016) mukaan. Kuvasta 3 huomataan, että myös EU:ssa asennettu varastointikapasiteetti muodostuu lähes kokonaan pumppuvoimalaitoksista. Akkutekniologioista litiumioniakkukapasiteettia on eniten. Arvion mukaan EU-maissa sekä Norjassa ja Sveitsissä on yhteensä noin 34 100 verkkoon kytkettyä litiumioniakkua, joista noin 34 000 on kuluttajien akkuja. Esimerkiksi pumppuvoimalaitoksia on näissä maissa yhteensä 157 ja paineilmavarastoja 3 kappaletta. (EASAC 2017)



Kuva 3. Verkkoon kytketty käytössä oleva varastointikapasiteetti EU-maissa sekä Norjassa ja Sveitsissä syyskuussa 2016. Perustuu lähteisiin (EASAC 2017; Sandia Corporation 2016)

Kuten aiemmin on mainittu, pumppuvoimalaitoskapasiteettia on eniten kaikista asennetuista varastointitekniikoista. Tällä hetkellä akkutekniologioista yleisin on litiumioniakku energiavarastotietokannan mukaan (Sandia Corporation 2016). Energiavarastoihin liittyvä tutkimus myös keskittyy suurimmaksi osaksi akkutekniologioihin ja erityisesti

litiumakkuteknologiaan saman tietokannan mukaan. Tietokantaan oli kirjoitushetkellä ilmoitettu yhteensä 1628 energiavarastoprojektia, joista 985 projektissa käytettiin sähkökemiallisia akkuja. Näistä 624 oli litiumpohjaisia akkuja.

Akkuteknologioiden hintojen odotetaan laskevan tulevaisuudessa. Erityisen huomattavaa hinnan aleneminen on litiumioni-, NaS- ja virtausakuilla. Esimerkiksi Cole et al. (2016) arvioivat tutkimuksessaan, että litiumakkuteknologiaan perustuvien varastojärjestelmien keskimääräiset hinnat laskevat 57 % nykyisestä vuodesta 2015 vuoteen 2050 mennessä. Suurimmillaan ennustettu lasku on tutkimuksen mukaan 81 % ja pienimmillään 34 %. Euroopan komission julkaiseman raportin (European Commission 2017) mukaan akkujen hinnan odotetaan laskevan jopa 70 % vuoteen 2030 mennessä.

4. SÄHKÖVARASTOJEN KÄYTTÖKOHTEET

Sähkön kysyntä vaihtelee jatkuvasti, ja sähkön hinta sähkömarkkinoilla muuttuu kysynnän ja tarjonnan mukaan. Kysynnän ollessa korkea sähköä tuotetaan perustuotantoa kalliimmilla tuotantomuodoilla, minkä vuoksi hinta on korkeampi suuremman kysynnän aikaan. Sähköntuottajat voivat hyötyä sähkövarastoista siten, että korkeamman kysynnän aikaan osa sähkönkulutuksesta voitaisiin kattaa varastosta saatavalla energialla sen sijaan, että kalliimpia tuotantomuotoja käynnistettäisiin. Uusiutuvien energialähteiden, kuten tuuli- ja aurinkovoiman, tuottamaa ylijäämäenergiaa voitaisiin myös varastoida ja käyttää myöhemmin korkeamman kysynnän aikaan. Tämä voisi siten laskea sähkön hintaa. (IEC Market Strategy Board 2011)

Sähköntuotanto sijaitsee yleensä kaukana kulutuskohteista ja tuotanto on keskitettyä, mikä tarkoittaa, että yksi tuotantolaitos vastaa laajojen alueiden sähköntuotannosta. Sähköverkon vikatilanteet vaikuttavat siten useaan käyttäjään, jos vika on lähellä tuotantoa. Sähkövarastoja pystytään rakentamaan lähemmäs kulutusta, joten ne pystyvät turvaamaan kuluttajien sähkönsaannin verkon keskeytystilanteen aikana. Osa sähkönkuluttajista on erittäin riippuvaisia keskeytyksettömästä jakelusta, jolloin lyhyetkin katkot voivat olla haitaksi. Nopeasti reagoivilla sähkövarastoilla pystyttäisiin turvaamaan myös näiden kriittisten kuormien keskeytyksetön sähkön saanti. Seurauksena tuotannon ja kulutuksen pitkistä välimatkasta ovat myös verkon pullonkaulatilanteet, joissa kysyntä on liian suurta verkon siirtokapasiteettiin verrattuna. (IEC Market Strategy Board 2011)

Seuraavissa kappaleissa käsitellään yksityiskohtaisemmin sähkövarastojen käyttökohteita sähköverkossa ja niihin sopivia varastointiteknologioita. Tässä luvussa käsitellään sähkövarastojen käyttökohteita kaikissa voimajärjestelmän osissa kuluttajan varastot pois lukien. Koska työn sisältö keskittyy pääasiassa jakeluverkkotasolla hyödynnettäviin varastoihin, tarkoituksena on löytää näistä jakeluverkkoon soveltuvat käyttökohteet ja teknologiat. Luvun lopuksi esitellään kolme Suomessa sijaitsevaa verkkoon kytkettyä sähkövarastoa.

4.1 Käyttökohteiden luokittelu

Sähkövarastojen käyttökohteet voidaan jakaa energia- ja tehosovelluksiin. Tehosovellukset vaativat varastolta suuren ulostulotehon verrattuna varaston syöttämään energiaan. Varastot, joita käytetään tehosovelluksiin, eivät yleensä pysty varastoimaan suuria määriä energiaa tehoyksikköä kohden. Energiasovelluksissa varastolta taas vaaditaan ominaisuutta luovuttaa sähköenergiaa minuuttien tai tuntien ajan. Tehosovelluksissa varastoilla on siis usein lyhyt purkaus aika (sekuntien ja minuuttien luokkaa) ja energiasovelluksissa tätä pidempi purkaus aika. (Eyer & Corey 2010)

Varaston purkausajalla on suuri vaikutus valittavaan sovellukseen. Sähkövarastot voidaan luokitella varastoitavan energiamuodon lisäksi myös purkausajan perusteella kolmeen luokkaan. Lyhyen purkausajan varastoilla purkausaika on tyypillisesti sekunneista minuutteihin. Tällaisia varastoja ovat vauhtipyörä, superkondensaattori ja SMES. Akut taas kuuluvat tyypillisesti keskipitkän purkausajan kategoriaan, missä purkausaika on minuuteista tunteihin. Pitkän purkausajan varastoilla purkausaika on tunneista päiviin. Näitä varastoja ovat pumppuvoimalaitos, paineilmaparasto, vetyvarastojärjestelmät ja P2G-konsepti. (Díaz-González et al. 2016)

Sovelluksia voidaan jakaa myös kapasiteetti- ja energiasovelluksiin. Kapasiteettisovellusten tarkoitus on vähentää tarvetta verkon kapasiteetin kasvattamiselle. Siten esimerkiksi verkkoyhtiöt tarvitsevat tällaisiin sovelluksiin sopivia varastoja. Varaston avulla voidaan esimerkiksi lykätä tarvetta uuden muuntajan hankinnalle. Sähkömarkkinoilla toimivat toimijat taas tarvitsevat yleensä energiasovelluksiin sopivia varastoja. Energiasovelluksiin soveltuvia varastoja käytetään ehkäisemään tarvetta esimerkiksi sähköenergian ostamiselle markkinoilta tai tuottamiselle muista lähteistä. (Eyer & Corey 2010)

4.2 Verkon toimintaa tukevat palvelut

Sähköverkon tehtävä on toimittaa tuotettu sähköenergia kuluttajille käyttämällä siirto- ja jakeluverkkoa. Energiaa tuottavien lähteiden lisäksi sähköverkko tarvitsee toimiakseen verkon käyttöä tukevia toimintoja (engl. ancillary services). Nämä toiminnot tukevat sähkön toimitusta tuotannosta kulutukseen ja samalla pitävät yllä verkon käyttövarmuutta. Näitä toimintoja ovat esimerkiksi tuotannon ja kulutuksen tehotasapainon hallinta, jännitteensäätö ja erilaiset reservit.

4.2.1 Voimajärjestelmän tehotasapaino

Tehotasapainon avulla pidetään sähkön tuotanto ja kulutus tasapainossa eli ylläpidetään verkon taajuutta oikealla tasolla. Perinteisesti taajuutta ylläpidetään erilaisilla reserveillä sekä säätösähkömarkkinoilla, ja kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj vastaa tehotasapainon ylläpidosta Suomessa (Sederlund 2008). Taajuusreservit voidaan jaotella kolmeen luokkaan. Taajuuden vakautusreservejä (Frequency Containment Reserve, FCR) käytetään jatkuvasti taajuuden hallintaan. Taajuuden vakautusreservit on jaettu taajuusohjattuun häiriöreserviin (FCR-D) ja taajuusohjattuun käyttöreserviin (FCR-N). (Fingrid 2017a) Nämä reservit ovat automaattisesti aktivoituvia pätötehoreservejä eli ne reagoivat automaattisesti taajuuden muutoksiin. Käyttöreservin tarkoitus on pitää taajuus normaalilla taajuusalueella eli 49,9–50,1 Hz:n välillä. Häiriöreservin tarkoitus taas on pitää taajuus vähintään 49,5 Hz:ssä, jos taajuus laskee alle normaalialueen. (Fingrid 2017c)

Toinen reservilaji on taajuuden palautusreservi (Frequency Restoration Reserve, FRR), jonka tarkoituksena on palauttaa taajuus normaalialueelle ja vapauttaa vakautusreservit takaisin käyttöön. Palautusreservit jaetaan automaattiseen taajuudenhallintareserviin

(aFRR) sekä manuaalisiin tuotteisiin (mFRR), joita ovat säätösähkömarkkinat, säätökapasiteettimarkkinat ja nopea häiriöreservi. (Fingrid 2017b) Kolmas reservilaji on korvaava reservi (Replacement Reserve, RR), jonka avulla valmistaudutaan häiriötilanteiden jälkeisiin uusiin häiriöihin palauttamalla palautusreservit takaisin valmiuteen. Tämä reservilaji ei ole käytössä pohjoismaisessa voimalajärjestelmässä. (Fingrid 2017a) Pohjoismaisella tasolla automaattisesti taajuuden muutoksista aktivoituvasta reservistä puhutaan myös taajuuden primäärisäätönä ja manuaalisesti aktivoituvasta alas- tai ylössäätötarjouksesta sekundäärisäätönä (Sederlund 2008).

Verkossa on oltava riittävästi tahtigeneraattoreiden tarjoamaa pyörivää reserviä, joka reagoi automaattisesti tuotannon ja kulutuksen välisiin muutoksiin. (Díaz-González et al. 2016) Säätökapasiteetin tarjoaminen vaatii voimalaitokselta mahdollisuutta säätää ulostulotehoa. Joillakin voimalaitoksilla osittaisella ulostuloteholla toimiminen lisää polttoaineen kulutusta ja tätä kautta päästöjä. Joidenkin uusiutuvien energialähteiden generaattorit eivät välttämättä ole tahtigeneraattoreita, joten ne eivät pysty tarjoamaan pyörivää reserviä. Uusiutuvien energialähteiden käytön lisääntyessä pyörivän reservin määrä verkossa vähenee. Sähkövarastot voisivat tarjota ratkaisun tähän ongelmaan. (Eyer & Corey 2010)

Fingrid on määrittänyt vaatimukset reservituotteille, ja varaston täytyy täyttää nämä vaatimukset, jotta se voi osallistua reservimarkkinoille. Esimerkiksi FCR-N-reserviin osallistuvan kohteen säädön vähimmäiskoon täytyy olla 0,1 MW ja aktivoitumisaika enintään kolme minuuttia 0,1 Hz:n suuruisen taajuusmuutoksen seurauksena. FCR-D-reserviin osallistuvan voimalaitosreservin säädön vähimmäiskoon täytyy olla 1 MW ja reservistä täytyy aktivoitua puolet viidessä sekunnissa. Reservin täytyy olla täysin aktivoitunut, kun taajuus on ollut 30 sekuntia alle 49,5 Hz. Automaattisella taajuudenhallintareservillä säädön vähimmäiskoko on 5 MW ja aktivoitumisaika kaksi minuuttia. Manuaalisilla tuotteilla vähimmäiskoko on 10 MW ja aktivoitumisaika enintään 15 minuuttia. (Fingrid 2017)

Sähkövarastoilla pystytään tarjoamaan säätöä muuttamalla varaston ulostulotehoa tehotarpeen mukaan. Varastoa voidaan käyttää sekä taajuuden ylös- että alassäätöön joko purkamalla tai lataamalla. Monet varastointiteknologiat kestävät hyvin toimintaa osittaisella ulostuloteholla, mikä on tärkeää säätövoiman kannalta. Sähkövarastot ovat soveltuvia erityisesti taajuuden vakautusreserviksi lyhyen vasteajan ansiosta. Akut, vauhtipyörät, SMES-varastot ja superkondensaattorit ovat sopivia varastointiteknologioita tehotasapainon ylläpitoon. (Díaz-González 2016)

4.2.2 Jännitteen säätö

Verkon jännitteelle on määritelty standardissa SFS-EN 50160 rajat, joiden sisällä jännitteen on normaalitilanteessa pysyttävä asiakkaan liittymispisteessä. Ensisijaisesti jännitteen hallinta toteutetaan verkostosuunnittelun keinoin. Lisäksi jännitetasoa ylläpidetään

muun muassa käänikytkimien avulla ja huolehtimalla loistehon tasapainosta tuottamalla tai kuluttamalla sitä sen mukaan, täytyykö jännitettä nostaa vai laskea. Loistehotasapainosta huolehditaan jakeluverkkotasolla erilaisilla loistehonkompensointilaitteilla, kuten kondensaattoriparistoilla tai reaktoreilla. Siirto- ja jakeluverkonhaltijat vastaavat siitä, että verkon jännite on asiakkaan liittymispisteessä standardin määrittelemissä rajoissa. (Lakervi & Partanen 2008)

Loistehon kompensoinnissa hajautetut lähellä kulutusta sijaitseva varastot voisivat olla toimiva ratkaisu. Loistehon siirto verkossa pitkiä matkoja ei ole järkevää, koska se laskee siirrettävän pätötehon määrää. Loisteho kannattaa siis tasapainottaa verkon pisteissä, joissa se on tarpeellista. Koska useimmat varastot kytketään verkkoon tehoelektroniikan avulla, ne pystyvät säätämään sekä pätö- että loistehoa. Lisäksi nopea vasteaika ja täsmällinen vaste ovat tärkeitä. Tähän soveltuvia varastoja ovat esimerkiksi sähkömagneettiset varastot, vauhtipyörät, superkondensaattorit ja akut. (Díaz-González et al. 2016)

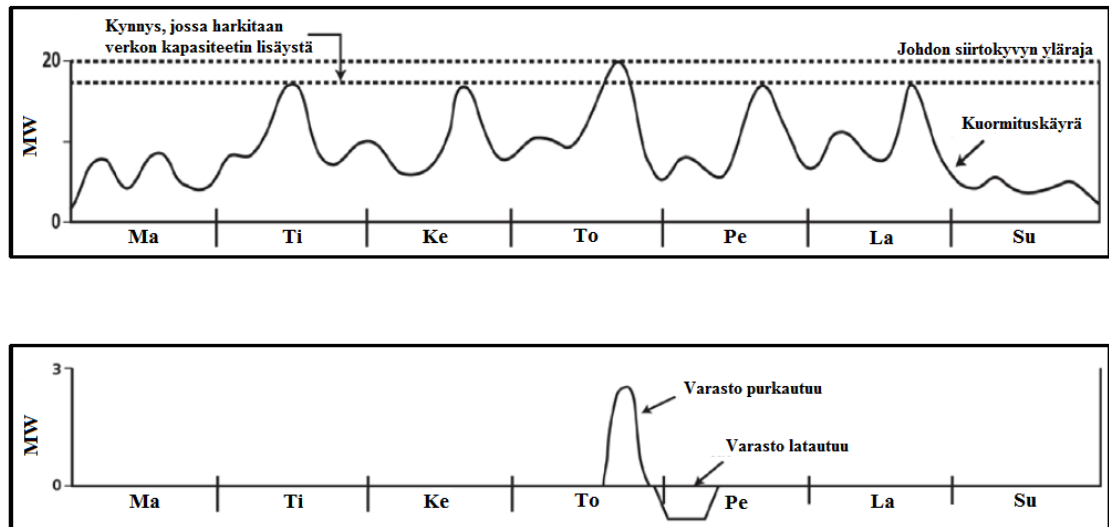
4.3 Kuormitushuipun pienentäminen ja investointien lykkäys jakeluverkossa

Kuormitushuipun pienentämisellä (engl. peak shaving) tarkoitetaan tilannetta, jossa on tarkoitus pienentää kuorman verkosta ottamaa tehoa suurimman kuormitustilanteen aikana verkon näkökulmasta. Verkon kuormitushuiput eivät yleensä ole pitkäkestoisia, mutta verkko on silti mitoitettava kestämaan ne. Normaalikuormituksella verkko on tällöin ylimitoitettu. Kuormitushuipun pienentämisellä on tarkoitus vähentää kustannuksia, joita huippukuorma aiheuttaa, kuten uusien johtojen rakentaminen, johtojen korvaaminen tai muuntajien uusiminen. Kuormitushuippujen pienentämisellä voidaan myös estää huippukuormituksen aikana käytettävien huippuvoimalaitosten käynnistämistä ja estää uuden ainoastaan huippukuormitusta varten olevan tuotannon rakentamista. (Koller et al. 2015)

Verkon siirtokapasiteetti suunnitellaan yleensä arvioimalla nykyisen huippukuormituksen kasvua vuosiksi eteenpäin. Koska sähkövarasto voidaan asentaa melko nopeasti mihin verkon kohtaan tahansa, sen avulla voidaan nopeasti helpottaa pullonkaulatilanteita väliaikaisesti, kunnes verkon siirtokapasiteettia voidaan nostaa. Jos varastolla on käyttöikä jäljellä, se voidaan mahdollisuuksien mukaan siirtää toiseen paikkaan samaa käyttötarkoitusta varten. Näin varastoa voidaan hyödyntää koko sen eliniän ajan. (Koller et al. 2015)

Sähkövarastojen avulla kuormitushuippuja voidaan pienentää verkon näkökulmasta asentamalla hajautettuja varastoja lähelle kulutusta. Varastoja ladataan alhaisen kysynnän aikaan ja puretaan huippukuormituksen aikana. Varastojen nopean vasteajan ansiosta, varastot pystyvät käynnistymään nopeasti ja niiden tuottamaa tehoa voidaan helposti säätää. Varasto voitaisiin asentaa esimerkiksi pienentämään teollisuusasiakkaan sähkön huippukulutusta, jolloin sekä asiakas että verkkoyhtiö hyötyvät siitä. (Koller et al. 2015)

Kuvassa 4 on esitetty kuvitteellisen johdon kuormituskäyrä viikon ajalta. Varasto on asennettu muuntamon yhteyteen pienentämään muuntajan huippukuormaa. Kyseisen johdon siirtokyvyn yläraja 20 MW. Torstaina verkonhaltijan määrittämä tehokynnys ylittyy ja varasto purkautuu vähentäen johtolähtöä syöttävän muuntajan kuormaa, jolloin uuden muuntajan investointi lykkäänny. Varasto latautuu yöllä kuormituksen ollessa vähäistä. Huomion arvoista on se, että varaston ei tarvitse välttämättä olla teholtaan tai energia-kapasiteetiltaan kovin suuri, kun se riittää tuottamaan tarvittavan määrän energiaa investoinnin lykkäämiseksi.



Kuva 4. Sähkövarasto huippukuorman pienentämiseen. Perustuu lähteeseen (Huff et al. 2013).

Kuormitushuipun pienentämiseen käytettävän varaston ominaisuudet riippuvat pienentävän kulutushuipun koosta ja kestosta. Jo pienellä varastolla voidaan lykätä kuormitushuipun kattamiseksi tehtävää investointia. Esimerkiksi kuvan 4 tapauksessa varasto täytyy käynnistää vain kerran viikossa ja sen nimellisteho on noin kuudesosan johdon siirtokyvyn ylärajasta. Sopivia varastointiteknologioita jakeluverkossa ovat lähes kaikki akut (U.S. Department of Energy 2013).

4.4 Sähkön laatu ja toimitusvarmuus

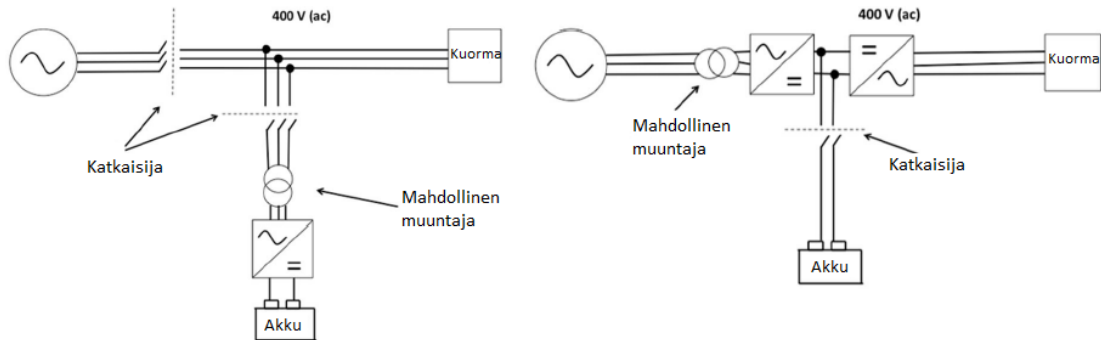
Sähköverkkoyhtiö vastaa asiakkaan sähkön toimituksesta ja sen laadusta. Suomessa sähkömarkkinalain määrittelemien toiminnan laatuvaatimusten mukaan asiakkaan kokemat enimmäiskeskeytysajat saavat olla asemakaava-alueella 6 tuntia ja muilla alueilla 36 tuntia. Nämä vaatimukset tulevat voimaan vuoden 2028 loppuun mennessä. (Sähkömarkkinalaki 2013) Etenkin paljon ilmajohtoja sisältävässä verkossa tämä voi aiheuttaa verkkoon suuria investointipaineita.

Luvussa 2 esitettiin lyhyesti verkkoyhtiöiden hinnoittelun kohtuullisuuden arvioinnin periaate. Kohtuullisista tuottoa verrataan toteutuneeseen oikaistuun tulokseen, jossa on huomioitu erilaisten kannustimien vaikutus. Yksi näistä kannustimista on laatukannustin, joka kannustaa verkonhaltijoita kehittämään sähkönsiirron ja -jakelun laatua. Asiakkaan kokemat sähkökatkot vähentävät verkkoyhtiöiden sallittua tuottoa. (Energiavirasto 2015b)

Suomessa suurin osa asiakkaille keskeytyksen aiheuttaneista sähköverkon vikatilanteista tapahtuu keskijänniteverkossa, ja nämä vikatilanteet aiheuttavat keskeytyksiä keskijänniteverkon syöttämässä pienjänniteverkossa, vaikka pienjänniteverkossa ei olisi vikaa. Sähkövarastot voisivat vähentää asiakkaiden kokemia keskeytyksiä syöttämällä energiaa keskijänniteverkossa olevan keskeytyksen aikana, jolloin varasto ja kuormat olisivat saarekekäytössä. (Haakana et al. 2013)

Asiakkaan kokemien keskeytysten estoon käytettävän varaston ominaisuudet riippuvat varaston syöttämän kuorman koosta ja estettävien keskeytysten pituudesta. Akut ovat tähän sovellukseen sopivin varastointiteknologia. (Palizban & Kauhaniemi 2016) Asiakkaan kokemien keskeytyksen estoon käytettävien varastojen hyöty syntyy pääasiassa lyhyiden keskeytysten, kuten pika- ja aikajälleenkytkentöjen (PJK ja AJK) aiheuttamien keskeytysten estosta, koska niitä on verkossa eniten ja varaston ei tarvitse tällöin olla energiakapasiteetiltaan kovin suuri. Pidempien keskeytysten estämiseksi varastolta vaadittaisiin tuntien purkausaikaa. Tällöin suurin osa varaston energiakapasiteetista jäisi käyttämättä, koska tuntien keskeytyksiä verkossa esiintyy harvoin. (Markkula et al. 2016)

Keskeytysten estoa varten sähkövarastojärjestelmän pitäisi toimia niin nopeasti, ettei asiakas kokisi lainkaan keskeytystä. Jos sähkövarasto kytketään rinnan vaihtosähköverkon kanssa, keskeytyksen estossa saattaa olla ongelmia, koska katkaisijoiden ja tehoelektronikan toiminnassa esiintyy hitautta. Tällöin asiakas kokee lyhyen keskeytyksen ennen kuin varasto alkaa syöttää kuormaa. Yksi ratkaisu tähän on verkon kanssa sarjaan kytkettävä varasto, mutta kytkentä vaatii AC-DC-AC-muunnoksen, joka lisää häviöitä. Kuvassa 5 on havainnollistettu nämä kaksi kytkentätapaa. (Vilppo et al. 2017)



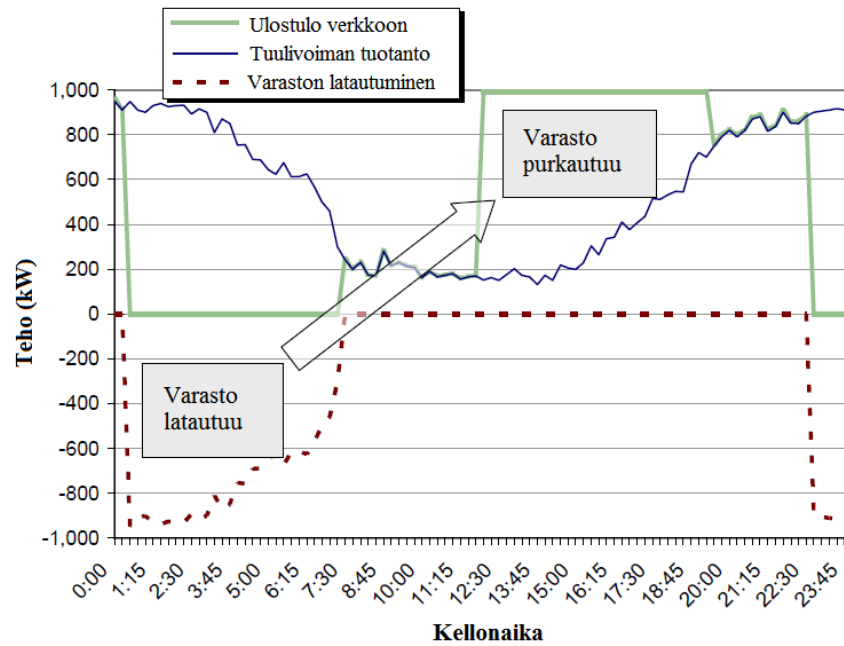
Kuva 5. Sähkövaraston rinnan- ja sarjaankytkennät. Perustuu lähteeseen (Vilppo et al. 2017)

Sähkön laatu koostuu toimitusvarmuuden lisäksi myös jännitteen laadusta. Jännitteen laatu koostuu muun muassa taajuudesta, jännitetason vaihtelusta, epäsymmetriasta ja harmonisista yliaalloista. Varasto voisi kytkentälaitteineen esimerkiksi absorboida jännitepiikkejä. Varastolta, jota käytetään jännitteen laadun parantamiseen, vaaditaan tyypillisesti purkausaikaa muutamasta sekunnista muutama minuuttiin. (Eyer & Corey 2010)

4.5 Sähkövarasto uusiutuvan energian tuotannossa

Sähkövarastoilla on kaksi pääasiallista tehtävää uusiutuvan energian tuotannossa: varastoida voimaloiden tuottamaa energiaa ja vakauttaa vaihtelevaa tuotantoa. Uusiutuvat energialähteet voidaan jakaa epäsäännöllisen ja perustuotannon energialähteisiin, joista jälkimmäisen ulostuloteho on pääsääntöisesti tasaista. Epäsäännöllisiä energialähteitä ovat esimerkiksi tuuli- ja aurinkovoima ja perustuotantoa maalämpö, biomass ja joskus myös vesivoima. (Eyer & Corey 2010)

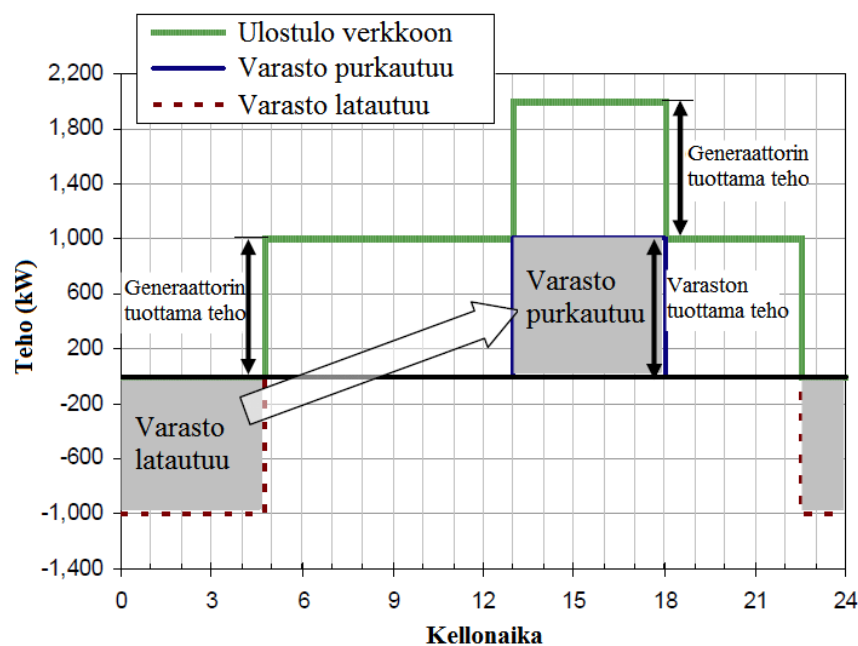
Epäsäännöllisen uusiutuvan energian varastointi on hyödyllistä silloin, kun tuotantoa on paljon, mutta kysyntä on alhainen esimerkiksi yöaikaan. Alhaisen kysynnän aikaan epäsäännöllisen uusiutuvan energian tuotantoa voidaan joutua rajoittamaan, koska kysyntä pystytään kattamaan perustuotannolla, jota ei ole järkeä rajoittaa. Kuvassa 6 on esitetty esimerkkitalanne tuulivoimalayksikön ja sähkövaraston toiminnasta, jossa yöllä tuulivoimalla tuotettu sähkö varastoidaan ja syötetään verkkoon päivällä, kun tuulivoiman tuotanto on vähäisempää. (Eyer & Corey 2010)



Kuva 6. Tuulivoimatuotannon ajallinen siirto. Perustuu lähteeseen (Eyer & Corey 2010).

Kuvasta 6 huomataan, että suurin osa päivällä verkkoon syötetystä tehosta on varastoitu yöllä. Ilman varastoa päivällä verkkoon syötetty teho olisi paljon vähäisempää, mutta varaston avulla järjestelmä pystyy tuottamaan tasaisen 1 MW:n ulostulon noin kello 12:30–20:00 välisenä aikana. Kuvan 6 kaltaisissa tilanteissa, joissa tuulivoiman tuotantoa siirretään ajallisesti, varastolta vaaditaan muutamien tuntien purkausaikaa.

Kuvassa 7 on esitetty tilanne, jossa varasto on kytketty perustuotantoa olevan uusiutuvan energialähteen yhteyteen. Generaattorin sekä varaston ulostuloteho on 1 MW ja varaston purkausaika 5 tuntia. Kuvasta huomataan, että varaston avulla järjestelmän ulostuloteho pystytään kaksinkertaistamaan kello 13–18 välisenä aikana, jolloin kysyntä on suurta ja sähkön hinta korkeampi.



Kuva 7. Perustuotannon ajallinen siirto. Perustuu lähteeseen (Eyer & Corey 2010).

Uusiutuvien energialähteiden ulostuloteho voi olla erittäin vaihtelevaa. Toinen käyttötarkoitus sähkövarastoille uusiutuvien energialähteiden yhteydessä on epäsäännöllisen energialähteen käyttö lähes tasaista tehoa tuottavana energialähteenä eli vaihtelevan tehotuotannon vakauttaminen. Tarkoituksena on käyttää varastoa siten, että uusiutuvan energialähteen ja varaston tuottaman tehon summa on lähes vakio. Esimerkiksi aurinkovoimalan ulostuloteho vaihtelee nopeasti pilvisyyden mukaan ja voi tippua hetkessä täydestä tehosta nolnaan. Tämä vaihteleva tehotuotanto voi aiheuttaa tarvetta muille energialähteille, joiden ulostuloteho voi vaihdella myös nopeasti, jotta teho saadaan pidettyä sähköjärjestelmässä tasaisena ja kysynnän tarpeisiin vastattua. Kuitenkin monet perinteiset energialähteet soveltuvat parhaiten käytettäväksi tasaisella ulostuloteholla, joten ne eivät sovellu tasaamaan uusiutuvista energialähteistä aiheutuvaa vaihtelevaa tehoa. (Eyer & Corey 2010)

Vakauttamisen tarkoituksena voi olla vähentää tehoon liittyviä maksuja tai vähentää tarvetta hankkia verkkokomponentteja, joita suuresti vaihteleva teho voisi pakottaa hankkimaan. Ajallisen siirron tarkoituksena on taas lisätä uusiutuvilla energialähteillä tuotetun energian arvoa siirtämällä sen tuotantoa suuremman kysynnän ajalle ja estää uusiutuvien energialähteiden tuotannon rajoittaminen. (Eyer & Corey 2010)

Tuotannon vakauttamiseen käytettävältä varastolta vaaditaan yleensä melko pitkiä purkausajoja riippuen, kuinka hyvin uusiutuvan energialähteen tuotanto ajoittuu suuren kysynnän aikaan. Esimerkiksi aurinkovoimalan tuotanto on suurinta päivällä, jolloin myös kysyntä on suurempaa kuin yöllä. Tuulivoimatuotanto taas vaihtelee ympäri vuorokau-

den. Tuulivoimatuotannon vakauttamiseen tarvitaan siksi pidempää purkausaikaa. Varaston täytyy myös olla luotettava, koska järjestelmältä vaaditaan tasaista ulostuloa. (Eyer & Corey 2010) Sekä ajalliseen siirtoon että tuotannon vakauttamiseen sopivia varastointiteknologioita ovat pumppuvoimalaitos, CAES ja sähkökemialliset varastot. (Palizban & Kauhaniemi K. 2016)

4.6 Muita käyttökohteita

Sähkövarastoja voidaan hyödyntää sähköverkon jännitteellistämässä (engl. black start). Normaalitylanteessa voimalaitos saa toimintaansa varten tarvitseman sähkön sen omista generaattoreista. Jos voimalaitos ei ole käynnissä, käynnistämiseen tarvittava sähkö otetaan verkosta. Verkon suurhäiriön jälkeen voimalaitokset täytyy käynnistää uudelleen ulkoisista lähteistä, koska verkosta ei ole saatavilla käynnistämiseen tarvittavaa sähköä. Varastoja voidaan käyttää apuna suurhäiriön jälkeiseen jännitteen palautukseen. (U.S. Department of Energy 2013)

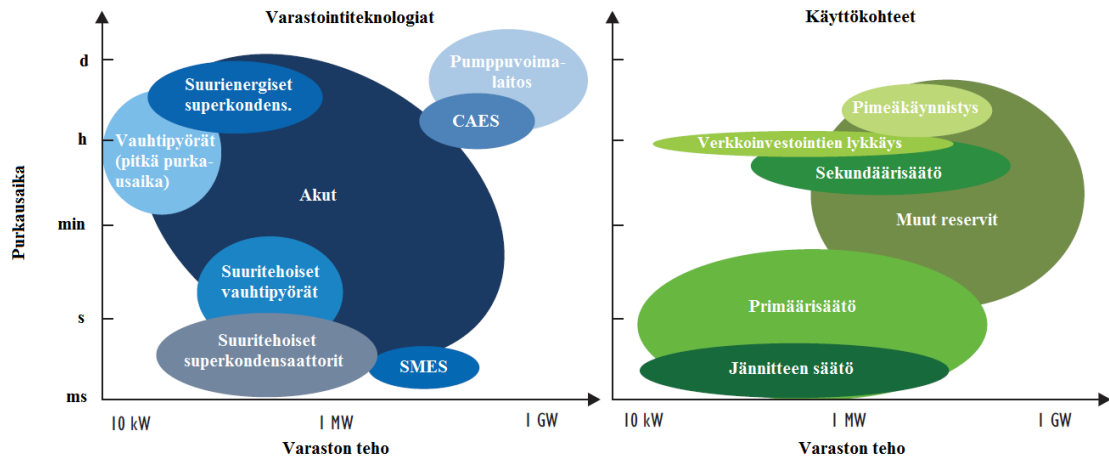
Koska tuotettua sähköenergiaa voidaan varastojen avulla käyttää myöhemmin, sähkövarastoja voidaan hyödyntää niin kutsutussa energia-arbitraasissa. Arbitraasilla tarkoitetaan tilannetta, jossa tehdään taloudellista voittoa hyödyntämällä tuotteen hinnan vaihteluja (Investopedia 2017). Sähkövarastojen avulla voidaan tehdä voittoa hyödyntämällä sähkönhinnan vaihteluja alhaisen ja korkean kysynnän aikaan. Varastoa siis ladataan alhaisen kysynnän aikaan, jolloin sähkö on halvempaa ja puretaan korkeamman kysynnän aikaan, jolloin sähkö on kalliimpaa. (Eyer & Corey 2010)

Arbitraasiin soveltuvia varastoja ovat suuren kokoluokan varastot, jotka pystyvät tuottamaan sähköä useita tunteja. Soveltuvia teknologioita ovat esimerkiksi pumppuvoimalaitos ja paineilmaparasto. Jotta varastosta saataisiin paras hyöty, täytyisi varaston pystyä purkautumaan sen syöttämän kuorman koko huippukuormitusajan. (Eyer & Corey 2010) Varastolta vaaditaan Eyer ja Corey (2010) mukaan vähintään kahden tunnin purkausaikaa. Yleinen purkausaika on verkon huippukuormitusaika.

4.7 Yhteenveto käyttökohteista

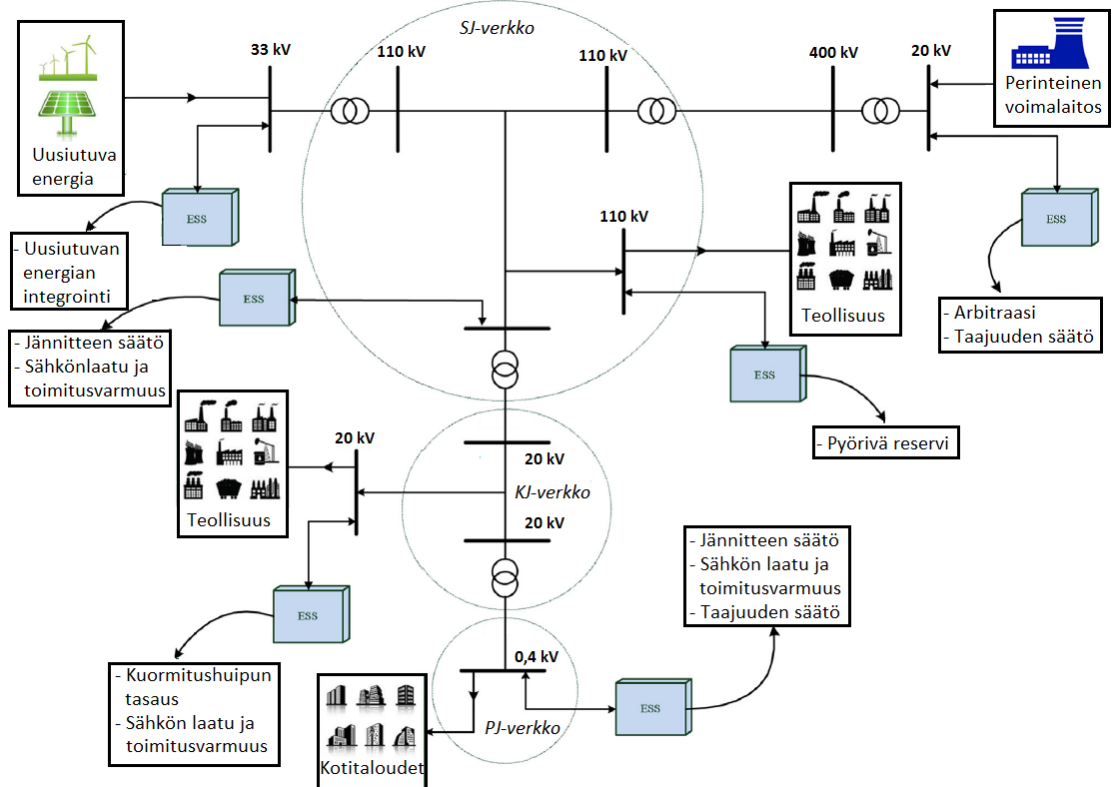
Sähkövarastot voivat tarjota useita erilaisia palveluita sähköverkossa. Varaston tuottamat palvelut riippuvat sen ominaisuuksista, ja yhdellä varastolla voi olla useita käyttökohteita sähköverkossa. Vaikka varastointiteknologioita on olemassa useita, läheskään kaikki niistä eivät sovi käytettäväksi tämän työn kannalta keskeisissä kohteissa eli jakeluverkototasolla. Esimerkiksi fyysinen koko ja rakennuspaikkojen puute rajoittavat sekä pumppuvoimalaitoksen että paineilmaparastojen käyttöä. Korkeat varastointihäviöt taas rajoittavat vauhtipyörien ja superkondensaattoreiden käyttöä, koska niiden varausta on ylläpidettävä jatkuvasti. Seuraavaksi esitellään varastojen mahdollisia käyttökohteita sähköverkossa.

Kuvassa 8 on esitetty Kansainvälisen energiajärjestön (IEA) näkemys erilaisiin käyttökohteisiin soveltuvista akkuteknologioista. Kuvasta nähdään, että akut sopivat lähes kaikkiin käyttökohteisiin. Suuritehoiset pienenergiset varastot, kuten SMES-varastot tai suuritehoiset superkondensaattorit, sopivat hyvin jännitteen ja taajuuden säätöön. CAES ja pumppuvoimalaitos taas sopivat paljon energiaa ja tehoa vaativiin sovelluksiin, kuten jännitteellistämiseen, erilaisiksi reserveiksi ja arbitraasiin.



Kuva 8. Varastointitekniikat ja sovelluskohteet. Perustuu lähteeseen (International Energy Agency 2014a).

Sähkövarasto voi sijaita voimajärjestelmässä useissa eri kohdissa. Varastojen sovelluskohteita löytyy esimerkiksi sähkön tuotannosta, siirto- ja jakeluverkosta, uusiutuvan energian integroimisesta ja loppukäyttäjien sähköhallinnasta. Kuvassa 9 on esitetty sähkövarastojen mahdollisia sijoituspaikkoja voimajärjestelmässä ja esimerkkejä sähkövarastojen käyttökohteista.



Kuva 9. Esimerkkejä sähkövarastojen käyttökohteista ja sijoituspaikoista sähköverkossa. Perustuu lähteeseen (Palizban & Kauhaniemi K. 2016).

Sähkövarastojen suuri hyöty on yhden varaston soveltuvuus yleensä useaan käyttökohteeseen. Taulukossa 2 on esitetty suuntaa antava kuvaus varastointiteknologioiden ja käyttökohteiden yhteensopivuudesta. Taulukosta huomataan, että akut ovat sopivampia useimpiin käyttökohteisiin. Ainoastaan energia-arbitraasiin ne eivät sovellu. Magneettisilla varastoilla on taas vähiten käyttökohteita, ja ne soveltuvat parhaiten sähkön laatuun ja jännitteen säätöön liittyviin sovelluksiin.

Taulukko 2. Varastointiteknologioiden ja käyttökohteiden yhteensopivuus. Perustuu lähteisiin (Díaz-González et al. 2016; Palizban & Kauhaniemi K. 2016; Ruester et al. 2012; U.S. Department of Energy 2013).

	Mekaaniset varastot			Kemialliset varastot				Magneettiset varastot	
	PHS	CAES	FES	LA	Li-ion	NaS	VRB	SMES	DLC
Primäärisäätö	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Sekundäärisäätö	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Jännitteen säätö	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Kuormitushuipun pienentäminen	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Sähkön toimitusvarmuus	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Sähkön laatu	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Energia-arbitraasi	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Pimeäkäynnistys	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Ajallinen siirto (uusiutuva energia)	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Tuotannon tasoittaminen (uusiutuva energia)	●	●	●	●	●	●	●	●	●

● Sopiva sovellus
● Mahdollinen sovellus
● Sopimaton sovellus

Taulukon 2 koostamisessa käytetyt lähteet ovat joiltain osin ristiriidassa keskenään. Esimerkiksi Palizbanin ja Kauhaniemen (2016) mukaan paineilmavarastolle mahdollinen käyttötarkoitus on sähkön toimitusvarmuuden parantamisessa. Yhdysvaltojen energiaministeriön tutkimuksen (U.S. Department of Energy 2013) sekä Ruester et al. (2012) mukaan paineilmavarasto on sopimaton toimitusvarmuuden parantamiseen. Paineilmavarastointiteknologia vaatii kuitenkin kehitystä, jotta pienimpiä hajautettuja varastoja voitaisiin hyödyntää jakeluverkkotasolla, kuten luvussa 3 todettiin. Lisäksi paineilmavaraston vasteaika on minuuttien luokkaa (Zakeri & Syri 2015), joten lyhyiden asiakkaan kokemien keskeytysten estoon se ei sovellu, minkä vuoksi se on merkitty taulukossa 2 punaisella. Toinen esimerkki ristiriidasta lähteiden välillä on magneettisten varastojen soveltuvuus taajuuden säätöön. Palizbanin ja Kauhaniemen (2016) mukaan magneettiset varastot eivät sovellu taajuuden säätöön. Yhdysvaltojen energiaministeriön tutkimuksessa ei ole lainkaan käsitelty magneettisia varastoja. Ruester et al. (2012) mukaan superkondensaattorit sopivat taajuuden säätöön ja Díaz-González et al. (2016) mukaan sekä superkondensaattori että SMES sopivat taajuuden primäärisäätöön. Kuten 3 luvussa mainittiin, SMES ja superkondensaattori pystyvät syöttämään suuria määriä tehoja verkkoon nopealla vasteajalla, mutta niiden purkaus aika on yleensä lyhyt. Tämän vuoksi magneettisten varastojen mahdolliseksi sovellukseksi on taulukossa 2 merkitty taajuuden primäärisäätö.

4.8 Case-esimerkkejä

Seuraavaksi esitellään kolme Suomessa sijaitsevaa verkkoon kytkettyä sähkövarastoa.

4.8.1 Suvilahden sähkövarasto

Helen Oy otti elokuussa 2016 käyttöön teholtaan 1,2 MW ja energiakapasiteetiltaan 600 kWh olevan litium-ioni akkuvaraston Helsingin Suvilahden aurinkovoimalan läheisyyteen. Varasto on kytketty osaksi Kalasataman rengasverkkoa. Varaston investointikustannus oli noin 2 miljoonaa euroa, jolloin varastojärjestelmän kustannukseksi energiayksikköä kohden tulisi noin 3300 €/kWh ja tehoyksikköä kohden noin 1700 €/kW. (Sipola 2016)

Varaston pääasiallinen tehtävä on parantaa sähköverkon tehotasapainoa. Sähkövarasto tuottaa palveluita yhtäaikaisesti sekä kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:lle että jakeluverkkoyhtiö Helen Sähköverkko Oy:lle. Ensimmäisten käyttökuukausien aikana varasto on pystynyt tuottamaan kantaverkon tarpeisiin nopeaa taajuusohjattua taajuuden säätöä ja jakeluverkon tarpeisiin loistehon kompensointia verkon hyötysuhteen parantamiseksi ja jännitteen ylläpitoa. Loistehon kompensointi toteutetaan sähkövaraston inverttereillä, jotka mahdollistavat lisäksi varaston lataamisen ja purkamisen vaihtosähköverkosta. Lisäksi ne pystyvät säätämään varaston tehonsyöttöä millisekuntien vasteajalla. Invertterit muodostavatkin suurimman osan sähkövaraston investointikustannuksista akuston kustannusten ollessa vain noin kolmasosa kokonaiskustannuksista. Varasto pystyy myös tasoittamaan viereisen aurinkovoimalan tuotantoa. Vuonna 2017 varasto kytketään Kalasataman metroaseman sähkönsyöttöön, jolloin se pystyy tasoittamaan metron kiihdyttämisestä aiheutuvia tehopiikkejä. (Karppinen 2014)

4.8.2 Suomenniemen sähkövarasto

Suomenniemessä Etelä-Karjalassa sijaitsee tutkimuskäyttöön tarkoitettu 1,7 kilometriä pitkä LVDC-verkko, jonka yhteyteen on asennettu litiumrautafosfaattiakku. LVDC-verkko on osa Järvi-Suomen Energia Oy:n sähköjakeluverkkoa, ja siihen on kytketty neljä asiakasta. Akun energiakapasiteetti on 2x30 kWh, ja sen nimellisteho on 30 kW ja huipputeho 60 kW. Arvioitu syklinen elinikä akulla on 80 % purkaussyvyydellä 2000 purkaussykliä. (Nuutinen et al. 2015) Varastojärjestelmän investointikustannus oli noin 60 000 euroa eli 1000 €/kWh, ja varasto-osan investointikustannus oli noin 300 €/kWh. (Kaipia 2015)

Yleensä sähkövarasto kytketään verkkoon tehoelektroniikan avulla, joka vastaa varaston lataamisesta ja purkamisesta. Joihinkin DC-verkkoihin on kuitenkin mahdollista kytkeä sähkövarasto ilman tehoelektroniikkaa ja tällaista rakennetta haluttiin tutkia Suomenniemen LVDC-verkossa. Tämän vuoksi sähkövarasto on asennettu tasasuuntaaja-aseman

yhteyteen. Koska tasasuuntaajan minimijännite on tässä tapauksessa 707 V, on tasasuuntaaja-asetalle kytkettävän sähkövaraston jännitetasot oltava oikeanlaiset, jottei tasasuuntaajan minimijännite alitu. Näin ollen esimerkiksi lyijyakku ei ole tähän tarkoitukseen sopiva, koska täyden ja lähes tyhjän akun ulostulojännitteiden ero on niin suuri, että akun mitoittaminen olisi epätaloudellista. Litiumrautafosfaattiakku valittiin, koska sillä tyhjän akun jännite saadaan vastaamaan tasasuuntaajan minimijännitettä ja täyden akun jännite maksimijännitettä. (Nuutinen et al. 2015)

Sähkövaraston tehtävänä on mahdollistaa LVDC-verkon saarekekäyttö eli sillä voidaan syöttää asiakkaan kuormia esimerkiksi LVDC-verkkoa syöttävässä keskijänniteverkossa olevan keskeytyksen ajan. LVDC-verkossa on tarkoitus tutkia asiakkaiden kuormien ohjausta, jolloin esimerkiksi keskeytystilanteessa suuret kuormat voidaan kytkeä pois, jolloin akku pystyy syöttämään asiakkaan kuormia pidempään. Lisäksi akun avulla voidaan rajoittaa keskijänniteverkosta otettua tehoa siten, että osa asiakkaiden tarvitsemasta tehosta tulee akusta ja osa verkosta. Akun kapasiteettia voidaan tarjota myös verkon taajuustukeen FCR-N-markkinoille sekä loistehon kompensointiin. (Nuutinen et al. 2015; Nuutinen 2017)

4.8.3 Batcave-akkuprojekti

Fortum Oyj otti maaliskuun 2017 alussa käyttöön pohjoismaiden suurimman litiumioniakkuvaraston, joka sijaitsee Fortumin Järvenpään voimalaitoksen yhteydessä. Tämän Batcave-nimen saaneen sähkövaraston nimellisteho on 2 MW ja energiakapasiteetti 1 MWh. Varastojärjestelmän investointikustannus oli noin 1,6 miljoonaa euroa. (Fortum 2017) Varastojärjestelmän kustannukseksi energiayksikköä kohden tulisi siis noin 1600 €/kWh ja tehoyksikköä kohden noin 800 €/kW. Batcave-projektin tarkoituksena on tutkia suuren kokoluokan akkuvaraston teknologiaa ja arvioida sen soveltuvuutta verkon teho-
tasapainon ylläpitoon. Lisäksi projektissa tutkitaan akun taloudellisia hyötyjä ja mahdollisuuksia pohjoismaisilla reservimakkinoilla vesivoiman ohella. Valmistajan arvion mukaan akun hyötysuhde taajuuden säätöön tarkoitettussa käytössä on aluksi noin 98 % ja kymmenen vuoden päästä noin 96 %. (Saulny 2017)

Valmistajan mukaan ideaalinen akun sisäinen käyttölämpötila on noin 25–55 °C, ja lämpötilan laskiessa alle 0 °C:n varaston energiakapasiteetti alkaa pienentyä. Sen vuoksi varastojärjestelmä sisältää lämmitys- ja viilennyslaitteiston, joka pitää lämpötilan 10–30 °C:n välillä. Lämpötila vaikuttaa lisäksi akun elinikään. Akun odotettu kalenterielinikä on normaalissa käyttölämpötilassa yli 20 vuotta, mutta lämpötilan noustessa, kalenterielinikä laskee, minkä vuoksi oikean lämpötilan ylläpitäminen on tärkeää. Koska akun käyttölämpötila on suunniteltu pysymään keskimäärin 25 °C:ssa, voidaan akun kalenterielinäksi olettaa yli 20 vuotta. Akun käyttöönoton jälkeen haasteita onkin aiheuttanut akun lämpeneminen. (Nieminen 2017; Saulny 2017)

Elinikään vaikuttavat myös akun varaustaso etenkin korkeammissa lämpötiloissa sekä purkaussyvyys. Varaustaso kertoo, kuinka täyteen akku on ladattu ja purkaussyvyys, kuinka tyhjäksi akku on purettu. Korkeammissa lämpötiloissa akun odotettu kalenterielinikä laskee korkeammilla varaustasoilla. Suuri purkaussyvyys taas laskee odotettua purkaussyklien enimmäismäärää. Batcave-projektissa syklien määrä rajoittaa akun eliniän odotetta enemmän kuin kalenterielinikä. Eliniän maksimoimiseksi sekä varaustason että purkaussyvyuden rajoittamista varten on asetettu 10 %:n rajat tarkoittaen, että suurin sallittu energiakapasiteetti varastolla on 0,9 MWh ja pienin 0,1 MWh. (Saulny 2017)

5. SÄHKÖVARASTOJEN ELINKAARIKUSTANNUKSET

Tässä luvussa arvioidaan sähkövarastojen taloudellista tehokkuutta sähköjakelujärjestelmässä. Tarkoituksena on esittää kustannuskomponentit, joista sähkövarastojärjestelmän elinkaarikustannukset koostuvat sekä eri tekijöiden vaikutuksen elinkaarikustannuksiin. Elinkaarikustannuslaskennan tarkoitus on arvioida varastojärjestelmän kokonaiskustannuksia koko pitoajalta. Näitä kustannuksia voidaan verrata jonkin perinteisen ratkaisun kustannuksiin taloudellisen tehokkuuden arvioimiseksi. Perinteisellä ratkaisulla tarkoitetaan esimerkiksi maakaapelointia keskeytysten vähentämiseksi tai uuden johdon rakentamista siirtokapasiteetin kasvattamiseksi.

Sähkövarastojärjestelmän elinkaarikustannukset koostuvat kiinteästä hankintakustannuksesta, kiinteistä ja muuttuvista käyttö- ja ylläpitokustannuksista sekä varaston poistamisesta, hävittämisestä ja kierrättämisestä aiheutuvista kustannuksista. Lisäksi elinkaarikustannukset voivat sisältää varasto-osan (esimerkiksi akkujen tapauksessa akuston) vaihdosta aiheutuvia kustannuksia, koska varasto-osan elinikä on yleensä lyhempi kuin muun järjestelmän. Elinkaarikustannuslaskennassa otetaan huomioon kaikki kustannukset varaston käyttöajalta nykypäivän rahanarvossa laskettuna. Kustannukset voidaan muuttaa vuotuisiksi kustannuksiksi annuiteettimenetelmää käyttäen. Annuiteettimenetelmässä kustannukset jaetaan pitoaikaa vastaaville vuosille yhtä suuriksi vuotuisiksi kustannuseriksi. Näistä tekijöistä saadaan elinkaarikustannuksen annuiteetti C_{LC} , joka lasketaan yleensä varaston nimellistehoyksikköä kohden vuodessa (esim. €/kW,a). (Díaz-González et al. 2016)

Jakamalla annuiteetti varaston vuotuisella toiminta-ajalla, saadaan energiakustannus LCOE (engl. Levelized Cost of Electricity), jonka yksikkö on esimerkiksi snt/kWh. LCOE-kustannuksen avulla voidaan laskea varaston verkkoon syöttämän sähkön hinta energiayksikkö kohden. LCOE voidaan laskea yhtälöstä

$$LCOE = 100 \frac{C_{LC}}{n \cdot t}, \quad (4)$$

jossa n on purkusyklien määrä vuodessa ja t purkausaika tunteina. Jos purkaussyklien määrä ja purkausaika eivät ole tiedossa, voidaan niiden tilalla käyttää varaston päivittäistä toiminta-aikaa tunteina t_d ja vuotuisten toimintapäivien lukumäärää d . Varastojen elinkaarikustannukset ovat siis hyvin riippuvaisia käyttötarkoituksesta, joka määrittää esimerkiksi varaston lataus- ja purkusyklien määrän. Varaston elinikä taas riippuu useimpien varastointitekniologioiden kohdalla purkaussyklien määrästä. (Zakeri & Syri 2015)

5.1 Elinkaarikustannuksen annuiteetin laskeminen

Kirjallisuudessa on esitetty useita tapoja laskea varastojen elinkaarikustannuksia, mutta tämän luvun laskelmat perustuvat Díaz-González et al. (2016) käyttämään tapaan. Elinkaarikustannuksen annuiteetti voidaan esittää muodossa

$$C_{LC} = C_I + C_{O\&M} + C_R + C_{EoL}, \quad (5)$$

jossa C_I on varaston hankinnasta aiheutuvat investointi- ja asennuskustannukset, $C_{O\&M}$ käyttö- ja ylläpitokustannukset varaston eliniän ajalta, C_R varaston vaihtokustannukset ja C_{EoL} varaston hävittämisestä ja kierrätyksestä aiheutuvat kustannukset. Seuraavaksi käsitellään kunkin kustannuskomponentin laskentaa.

5.1.1 Investointikustannukset

Investointikustannukset koostuvat varasto-osan C_{STO} (engl. storage container costs), tehoelektroniikan ja muun sähkön muuntamiseen tarkoitetun laitteiston C_{PCS} (engl. power conversion system costs) ja varaston muiden oheislaitteiden C_{BoP} (engl. balance of plant costs) kustannuksista. Siten kokonaisinvestointikustannukset $C_{I,T}$ ovat

$$C_{I,T} = C_{STO} + C_{PCS} + C_{BoP}. \quad (6)$$

Hankintahinta jaetaan koko varaston suunnitellun eliniän ajalle annuiteettimenetelmää käyttäen ja ilmoitetaan kustannuksena tehoyksikköä kohden, kuten muutkin elinkaarikustannuksen kustannusosat. Annuiteettimenetelmää varten tarvitaan annuiteettikerroin CRF , joka voidaan esittää muodossa

$$CRF = \frac{i(1+i)^Y}{(1+i)^Y - 1}, \quad (7)$$

jossa i on korkokanta ja Y on varastojärjestelmän pitoaika vuosina. Kaavassa 5 esitetty investointikustannuksen annuiteetti C_I voidaan laskea kaavasta

$$C_I = \frac{C_{I,T}}{P} CRF, \quad (8)$$

jossa P on varaston nimellisteho.

Varasto-osan kustannus on verrannollinen varaston energiakapasiteettiin. Varasto-osan kustannus voidaan laskea kaavasta

$$C_{STO} = c_e \frac{E}{\eta \cdot DoD_{max}}, \quad (9)$$

jossa c_e on varastointiteknologiaan perustuva kustannus energiayksikköä kohden (€/kWh), E varaston energiakapasiteetti, η on kaavassa 2 esitetty hyötysuhde ja DoD_{max}

käytetyn varastointiteknologian suurin mahdollinen purkaussyvyys. Koska kaikkia varastointiteknologioita ei voida purkaa täysin tyhjäksi, purkaussyvyydellä otetaan huomioon purkamatta jäävä energia.

Purkaussyvyydellä on suuri vaikutus sähkövaraston purkaussykliä enimmäismäärään. DoD_{max} -arvo kertoo, kuinka tyhjäksi akku voidaan purkaa, jotta esimerkiksi varaston ulostulosjännite säilyy tarvittavalla tasolla. Purkaussyvyys vaikuttaa merkittävästi esimerkiksi joidenkin akkuteknologioiden elinikään akun, minkä vuoksi monia akkuteknologioita ei voida purkaa täysin tyhjäksi. Esimerkiksi litiumioniakkua voidaan purkaa lataussyvyuden ollessa 80 % muutama yleensä tuhat kertaa. Díaz-González et al. (2016) mukaan esimerkiksi purkaussyvyuden ollessa noin 2 % litium-ioniakkua voidaan purkaa 400 000 kertaa.

Muuntojärjestelmän kustannukset voidaan laskea kaavasta

$$C_{PCS} = c_p P, \quad (10)$$

jossa c_p on varastointiteknologiaan perustuva kustannus tehoyksikköä kohden (€/kW). C_{PCS} sisältää esimerkiksi akkujen tehoelektroniikasta tai pumppuvoimalaitoksen generaattorista ja turbiinista aiheutuvat kustannukset.

Oheislaitteiden kustannukset sisältävät esimerkiksi muuntajien, suojalaitteiden ja muiden varaston verkkoon liittämiseen tarvittavien komponenttien kustannukset. Lisäksi ne sisältävät varaston lämpötilan hallintaan sekä varaston valvontaan ja hallinnointiin tarvittavien laitteiden kustannukset. Oheislaitteiden kustannukset voidaan laskea kaavasta

$$C_{BOP} = c_{BOP} P, \quad (11)$$

jossa c_{BOP} on oheislaitteiden kustannus tehoyksikköä kohden (€/kW). Esimerkiksi pumppuvoimalaitoksen oheislaitteiden kustannukset ovat merkittäviä, koska laitos voi vaatia omia rakennuksia esimerkiksi laitoksen hallintaa ja valvontaa varten sekä muuntajia ja johtoja laitoksen verkkoon liittämiseksi. Pienempien varastojen, kuten akkujen, osalta oheislaitteiden kustannukset eivät ole niin suuria, koska varastot voidaan liittää esimerkiksi jo olemassa olevan sähköaseman tai voimalaitoksen yhteyteen.

5.1.2 Käyttö- ja ylläpitokustannukset

Käyttö- ja ylläpitokustannukset koostuvat kiinteistä ja muuttuvista kustannuksista. Kiinteät kustannukset eivät riipu järjestelmän käyttöasteesta sen eliniän aikana. Vuotuiset kiinteät käyttö- ja ylläpitokustannukset $C_{O\&M,f}$ lasketaan kaavasta

$$C_{O\&M,f} = c_f L_m, \quad (12)$$

jossa c_f on vuotuiset kiinteät käyttö- ja ylläpitokustannukset tehoyksikköä kohden vuodessa (€/kW,a). Jos halutaan ottaa huomioon käyttö- ja ylläpitokustannusten vuotuinen muutos, täytyy vuotuiset käyttö- ja ylläpitokustannukset kertoa termillä L_m , joka saadaan kaavasta

$$L_m = CRF \sum_{x=1}^Y \frac{(1+d_{cf})^x}{(1+i)^x}, \quad (13)$$

jossa d_{cf} on käyttö- ja ylläpitokustannusten vuotuinen muutosprosentti. Jos varastojärjestelmän käyttö- ja ylläpitokustannusten oletetaan pysyvän vakiona koko varastojärjestelmän eliniän ajan, d_{cf} saa arvon 0, jolloin L_m arvon 1.

Jos varastointiteknologiana käytetään varastoa, jonka itsepurkautuminen on merkittävää (esimerkiksi vauhtipyörä), täytyy varausta ylläpitää lataamalla varastoa sen ollessa käytämätön. Tässä tapauksessa kiinteissä kustannuksissa täytyy huomioida varauksen ylläpitämiseen kuluvaan sähkön hinta. Tämän luvun laskennassa tarkastellaan kuitenkin vain sellaisia varastointiteknologioita, joiden itsepurkautuminen on todella vähäistä verrattuna muuhun käyttöön, joten varauksen ylläpitämiseen kuluvaan sähkön kiinteitä kustannuksia ei huomioida.

Muuttuvat käyttö- ja ylläpitokustannukset ovat kustannuksia, jotka riippuvat varaston käyttöasteesta ja koostuvat varaston lataamiseen käytettävän sähkön kustannuksista. Muuttuvat käyttö- ja ylläpitokustannukset voidaan laskea kaavasta

$$C_{O\&M,v} = \frac{c_{el}}{\eta} n \cdot t \cdot L_{el}, \quad (14)$$

jossa c_{el} on lataussähkön hinta ja termin L_{el} avulla voidaan huomioida sähkön hinnan vuotuinen muutos. Purkaussyklien vuotuinen määrä n ja varaston purkausaika t voidaan jälleen korvata termeillä t_d ja d , kuten kaavassa 4. Hyötysuhde η ottaa huomioon häviöt, joita tapahtuu latauksen, varastoinnin ja purkamisen aikana. Termi L_{el} voidaan laskea kaavasta

$$L_{el} = CRF \sum_{x=1}^Y \frac{(1+e)^x}{(1+i)^x}, \quad (15)$$

jossa e on sähkön hinnan vuotuinen muutosprosentti. Jos sähkön hinnan oletetaan pysyvän vakiona, L_{el} saa arvon 1, kuten kaavan 13 tapauksessa. Paineilmavaraston elinkaarikustannuksia laskettaessa täytyisi sähkön hinnan lisäksi ottaa huomioon maakaasun hinta. Koska paineilmavarastoa ei nykyisen teknologian puitteissa voida järkevästi hyödyntää jakeluverkossa, rajataan paineilmavarastoon liittyvät elinkaarikustannukset tämän työn ulkopuolelle.

Kaavassa 5 olevat kokonaiskäyttö- ja ylläpitokustannukset $C_{O\&M}$ ovat kiinteiden ja muuttuvien käyttö- ja ylläpitokustannusten summa

$$C_{O\&M} = C_{O\&M,f} + C_{O\&M,v}, \quad (16)$$

jossa kokonaiskäyttö- ja ylläpitokustannusten yksikkö on €/kW,a.

5.1.3 Varaston vaihto-, kierrätys- ja hävityskustannukset

Joissakin sähkövarastoissa, kuten akuissa, sähkövarastojärjestelmän elinikää voidaan jatkaa vaihtamalla varasto-osa. Esimerkiksi tehoelektroniikan elinikä on usein pidempi kuin akuston, jolloin on järkevää vaihtaa ainoastaan akusto (Díaz-González et al. 2016). Vaih- tokustannukset lasketaan kaavasta

$$C_R = \frac{c_r \cdot t}{\eta} \cdot CRF \cdot \frac{1}{(1+i)^r}, \quad (17)$$

jossa c_r on varasto-osan arvioitu hankintahinta (€/kWh) vaihtoajanhetkellä ja r varasto- osan vaihtoajankohta eli kulunut aika vuosina varastojärjestelmän rakentamisesta.

Kun varasto on saavuttanut elinikänsä, se täytyy poistaa verkosta. Varastoihin käytetään useita erilaisia materiaaleja ja mahdollisesti ympäristölle vaarallisia aineita, jotka täytyy hävittää ja kierrättää asianmukaisesti. Sähkövarastojärjestelmien käyttökokemusten ol- lessa vähäisiä, näitä kustannuksia on kuitenkin hyvin vaikea arvioida ja yleistää. Varas- tojärjestelmän purkamisesta voi aiheutua myös kustannuksia, jotka saattavat olla huomattavia etenkin suurissa varastojärjestelmissä, kuten pumppuvoimalaitoksissa ja paineilma- varastoissa. (Díaz-González et al. 2016) Kierrätys- ja hävityskustannus on sähkövarasto- järjestelmän jäännösarvo, joka on negatiivinen, koska oletetaan, että varaston purkaminen aiheuttaa kustannuksia eikä varastojärjestelmän osia voida myydä. Kierrätyksestä ja hä- vityksestä aiheutuvien kustannusten annuiteetti lasketaan kaavasta

$$C_{EoL} = c_{EoL} \cdot CRF \cdot \frac{1}{(1+i)^Y} = c_{EoL} \cdot \frac{i}{(1+i)^Y - 1}, \quad (18)$$

jossa c_{EoL} on kierrätys- ja hävityskustannukset (€/kW) (Zakeri & Syri 2015). Koska kier- rätys- ja hävityskustannuksista ei löydy lainkaan tietoa, ne jätetään tässä työssä huomioi- matta laskuissa.

5.2 Erilaisten sähkövarastojärjestelmien elinkaarikustannuksia

Seuraavaksi esitetään kolmen erilaisen jakeluverkossa hyödynnettävän varastointitekno- logian investointikustannuksia sekä elinkaarikustannuksiin vaikuttavia ominaisuuksia. Nämä tiedot on kerätty lähteistä (González et al. 2016; Zakeri & Syri 2015). Vertailtaviksi varastointiteknoologioiksi valitaan kolme erilaista akkuteknologiaa: lyijy-, litiumioni- ja vanadiinivirtausakku. Litiumioniakku valitaan, koska se on käytetyin akkuteknologioista, kuten luvussa 3 todettiin. Lisäksi sen hinnan oletetaan alenevan merkittävästi tulevaisuu- dessa. Lyijyakku taas on akkuteknologioista kehittynein ja pitkään käytetty. VRB-akun

ominaisuudet, kuten pitkä elinikä, suuri lataus-purkaussyklien määrä ja korkea purkaus-syvyys, tekevät siitä hyvän vaihtoehdon. Myös VRB-akkujen hinnan odotetaan alenevan tulevaisuudessa.

Taulukossa 3 on esitetty elinkaarikustannuslaskennassa tarvittavia tietoja sekä niille eri lähteissä esitettyjä arvoja. Zakeri ja Syri (2015) esittävät tutkimuksessaan kirjallisuuskat-sauksen sähkövarastojärjestelmien kustannuksista, ja tekijät ovat keränneet kustannustie-dot useasta eri lähteestä, joista on esitetty keskiarvot taulukossa 3.

Taulukko 3. Varastointiteknologioiden elinkaarikustannuksiin vaikuttavia tekijöitä.

	Yksikkö	Lyijyakku		Litiumioniakku		VRB	
		D-G ¹	Z&S ²	D-G	Z&S	D-G	Z&S
c_e	€/kWh	150	618	750	795	600	467
c_p	€/kW	150	378	150	383	150	465
c_{BoP}	€/kW	50	87	50	80	50	25
c_f	€/kW	5	3,4	5	6,9	5	8,5
c_r	€/kW	150	172	750	369	300	130
η	%	75	70–90	90	85–95	85	65–85
Kalenterielinikä	a	5–15	5–15	14–16	5–15	10–20	5–10
Syklinen elinikä	kpl	2 000	4 500	3 000	4 500	10 000	13 000
Dod_{max}	%	80	80	80	80	100	100

Kuten taulukosta 3 huomataan, kustannusarviot vaihtelevat paljon lähteessä riippuen, minkä vuoksi on vaikea esittää yleispäteviä kustannuksia varastointiteknologioille. Zakerin ja Syrin (2015) tutkimuksessa eri lähteistä poimitujen litiumioniakun varasto-osan kustannukset olivat 470–1249 €/kWh ja VRB-akun 433–640 €/kWh. Eri lähteistä otettuja kustannuksia vertaillaessa täytyy kiinnittää huomiota myös sähkövaraston teho- ja energiakapasiteettiin. Zakerin ja Syrin (2015) tutkimuksessa litiumakun varasto-osan kustannus on pääasiassa megawattiluokan järjestelmille, joiden purkausaika on 0,5–2 tuntia. Díaz-González et al. (2016) taas ovat arvioineet kustannukset nimellisteholtaan 10 MW:n akuille, joiden purkausaika on yksi tunti. Tämä voi osaltaan selittää lähteiden välisten tietojen eroavaisuutta, koska tietyn kokoluokan sähkövaraston kustannukset eivät välttämättä ole yleistettävissä. Taulukossa 3 lähteiden väliset kustannukset ovat samaa suuruusluokkaa, mutta esimerkiksi lyijyakun varasto-osan kustannus c_e eroaa lähteiden välillä huomattavasti.

Muuntojärjestelmän kustannus c_p on samaa luokkaa kaikille taulukossa 3 oleville teknologioille. Tämä johtuu siitä, että muuntojärjestelmät ovat samantapaisia kaikille akkuteknologioille. Díaz-González et al. (2016) ovat oletaneet kustannuksen alhaisemmaksi kuin Zakeri ja Syri (2015). Oheislaitteiden kustannukset c_{BoP} ovat selvästi alhaisemmat kuin

¹Díaz-González et al. (2016)

²Zakeri & Syri (2015)

varasto-osan tai muuntojärjestelmän. Pienin kustannuskomponentti akkujärjestelmien elinkaarikustannuksissa ovat kiinteät käyttö- ja ylläpitokustannukset.

Díaz-González et al. (2016) olettavat varasto-osan vaihtokustannuksen c_r lyijy- ja litiumioniakun osalta olevan sama kuin varasto-osan kustannus, joten he eivät ole ottaneet huomioon akkujen tulevaisuuden hinnan alenemista. Zakeri ja Syri (2015) taas arvioivat vaihtokustannusten olevan selvästi alhaisemmat kuin varasto-osan kustannuksen. VRB-akun vaihtokustannukset ovat alhaisimmat verrattuna varasto-osan kustannukseen. Tämä johtuu siitä, että c_e on kustannus, joka sisältää sekä akun kennojen että elektrolyytisäiliön kustannukset. Virtausakkujen tapauksessa ainoastaan kennosto täytyy vaihtaa.

Vaihtokustannuksia laskettaessa on määritettävä ajanhetki r , jolloin varasto-osa vaihdetaan. Varastojen elinikää on vaikea arvioida. Esimerkiksi VRB-akun eliniäksi Díaz-González et al. (2016) arvioivat 10–20 vuotta ja Zakeri ja Syri (2015) 5–10 vuotta. Elinikään vaikuttavat purkaussyvyys, käyttölämpötila ja lataustapa. Käyttökohde määrittää, kuinka monta purkaussykliä varaston täytyy tehdä vuodessa. Joskus akun suurin mahdollinen kalenterielinikä voi määrittää vaihtoajankohdan, vaikka purkaussyklien enimmäismäärä ei täytyisikään. Esimerkiksi VRB-akulla on suuri purkaussyklien maksimimäärä verrattuna muihin akkuteknologioihin, mutta elinikä on samaa luokkaa kuin litium-ioniakulla.

5.3 Sähkövaraston energiakapasiteetin ja purkaussyklien määrän vaikutus elinkaarikustannuksiin

Seuraavaksi havainnollistetaan esimerkkilaskeman avulla sähkövarastojärjestelmän energiakapasiteetin ja vuotuisten purkaussyklien määrän vaikutusta elinkaarikustannuksiin varaston nimellistehon pysyessä vakiona. Varaston nimellisteho ja purkausaika valitaan käyttökohteen ja sijoituspaikan perusteella. Elinkaarikustannusten laskemiseksi sähkövarastojärjestelmälle täytyy arvioida myös purkaussyklien määrä, joka määräytyy käyttötarkoituksen mukaan. Nimellisteho valitaan sähkövarastojärjestelmän syöttämän kuorman mukaan. Purkausajan valinta riippuu käyttötarkoituksesta ja on optimointitehtävä. Jos varaston käyttötarkoitus on esimerkiksi investointitarpeen lykkäys, valitaan purkausaika siten, että varasto pystyy syöttämään kuormaa huippukuormituksen ajan. Asiakkaan kokemien keskeytyksen estoa varten täytyy määrittää, kuinka pitkiä keskeytyksiä varastolla halutaan estää.

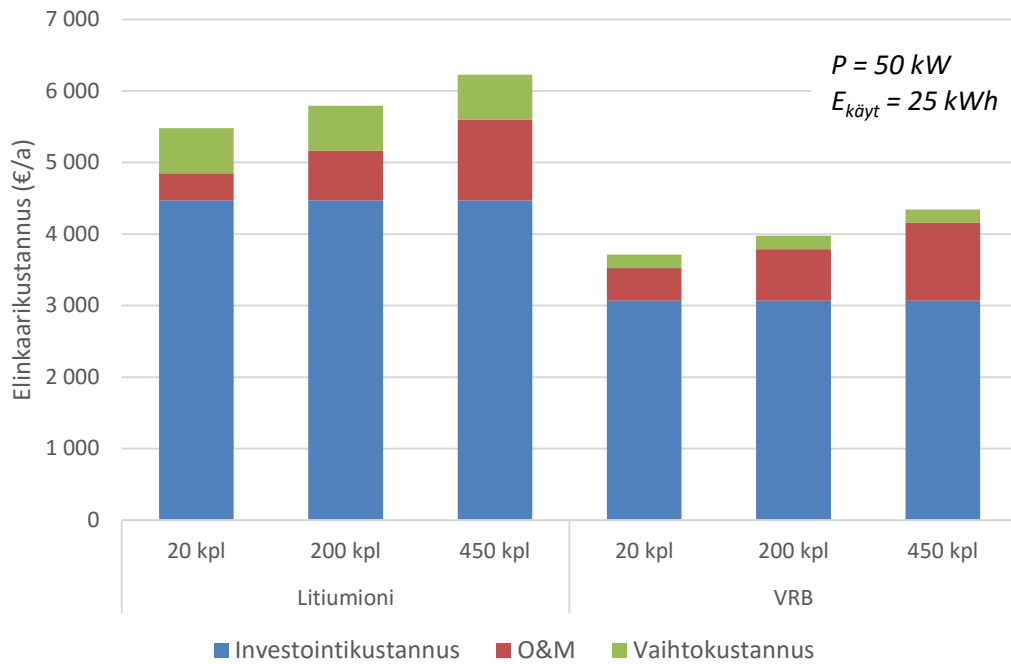
Taulukossa 4 on esitetty esimerkkilaskemassa käytetyn sähkövarastojärjestelmän kustannusparametrit ja elinkaarikustannuslaskennassa käytetyt arvot. Lyijy Akku on jätetty laskemasta pois, koska taulukossa 3 esitetyt tiedot poikkesivat hyvin paljon tutkittujen lähteiden välillä. Lisäksi lyijy Akku ei ominaisuuksiensa vuoksi ole erityisen soveltuva verkkokäyttöön. Esimerkkilaskelmassa sähkövarasto asennetaan jakelumuuntajan yhteyteen turvaamaan erään muuntopiiriin asiakkaiden sähkönsaanti. Muuntopiirin keskikuormituksen oletetaan olevan 50 kW, joka valitaan myös varaston nimellistehoksi.

Taulukko 4. Laskennassa käytettävät parametrit.

	Yksikkö	Litiumioniakku	VRB
C_e	€/kWh	750	467
C_p	€/kW	383	465
C_{BoP}	€/kW	80	25
C_f	€/kW	6,9	8,5
C_r	€/kWh	369	130
η	%	90	85
Kalenterielinikä	a	10	10
Syklinen elinikä	kpl	4500	13 000
Dod_{max}	%	80	100

Varastojärjestelmän pitoajaksi valitaan 20 vuotta ja vuotuisten syklien määrän pitoajan aikana oletetaan olevan pienempi kuin varaston syklisen eliniän. Tällöin varasto-osan kalenterielinikä määrittää vaihtoajankohdan, ja varasto-osa täytyy vaihtaa kerran järjestelmän pitoaikana. Korkokannaksi valitaan 5 % ja lataussähkön hinnaksi 0,05 €/kWh. Laskentakorko perustuu verkkoliiketoiminnassa käytettävän pääoman painotetun keskikustannuksen malliin. Laskennassa täytyy ottaa huomioon litiumioniakun suurin mahdollinen purkaussyvyys, joka on 80 % täydestä kapasiteetista, jolloin litiumioniakun energiakapasiteetin täytyy olla suurempi kuin VRB-akun, jotta akuista on mahdollista saada sama määrä energiaa.

Laskennassa vertaillaan varastojärjestelmien kustannuksia purkaussykliin määrän ja purkausajan funktiona. Koska varastoille on valittu nimellistehot, kustannusten yksikkö supistuu muotoon €/a. Kuvassa 10 on esitetty sähkövarastojärjestelmien elinkaarikustannukset ja niiden jakaumat kustannuskomponenteittain purkaussykliin määrän funktiona purkausajan ollessa vakio. Akkuteknologioiden kustannukset on laskettu purkaussykliin määrällä 20, 200 tai 450 kappaletta vuodessa. Taulukon 4 arvoilla 450 purkaussykliä on litiumioniakulle suurin mahdollinen purkaussykliin määrä vuodessa, jos varastojen kalenterieliniän oletetaan olevan 10 vuotta. Vastaava luku VRB-akulle olisi 1300. Jos siis halutaan, että akusto tarvitsee vaihtaa vain kerran 20 vuoden aikana, voi tässä esimerkissä litiumioniakulla olla teoriassa enintään 450 ja VRB-akulla 1300 purkaussykliä vuodessa. Jos purkaussykliin vuotuinen määrä olisi tätä korkeampi, syklinen elinikä rajoittaisi varaston käyttöaikaa kalenterieliniän sijasta. Varastojen käytettävissä oleva energiakapasiteetti $E_{käyt}$ on 25 kWh.

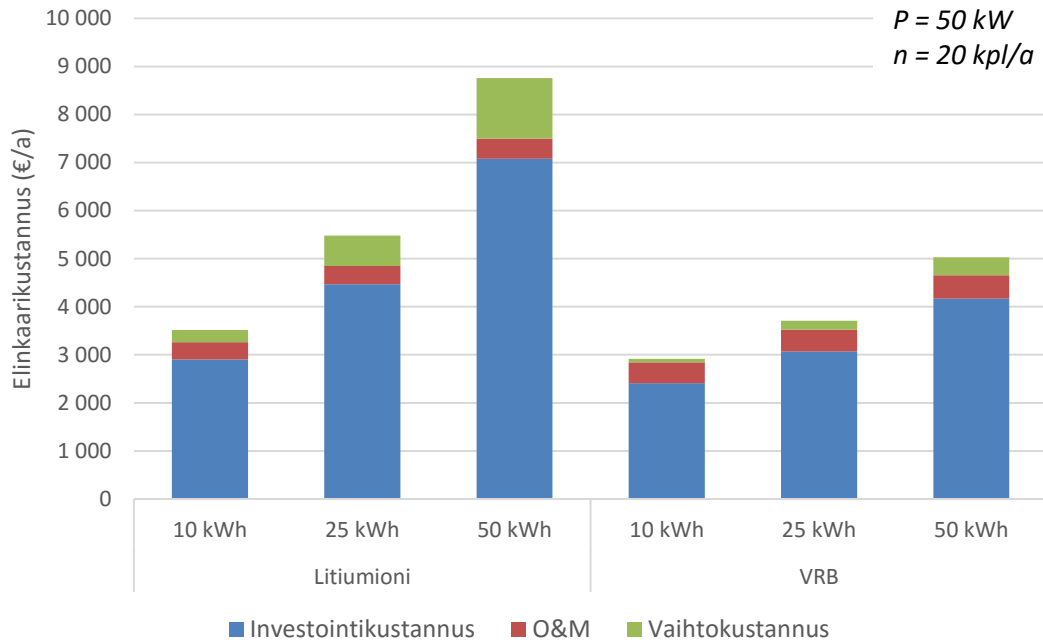


Kuva 10. Sähkövarastojärjestelmien elinkaarikustannukset purkaussyklien määrillä 20, 200 ja 450 kpl/a.

Litiumioniakun elinkaarikustannuksiksi laskettiin taulukon 4 arvoilla yhteensä noin 5480–6230 €/a ja VRB-akun 3710–4340 €/a. Kuvassa 10 on eroteltu kustannusten jakautuminen kustannuskomponenteittain. Investointikustannukset ovat suurin kustannuskomponentti, ja esimerkiksi 20 vuotuisella purkaussyklillä käyttö- ja ylläpitokustannukset (O&M) muodostavat litiumioniakulla noin 7 % ja VRB-akulla noin 12 % kokonaiskustannuksista. Sähkövaraston kokonaisinvestointikustannus $C_{I,T}$ on litiumioniakulla noin 55 700 €, jolloin kustannus energiayksikköä kohden on noin 2200 €/kWh. VRB-akulla kokonaisinvestointikustannus on noin 38 200 €, jolloin kustannus energiayksikköä kohden on 1500 €/kWh. Akkujen investointikustannukset ovat samaa luokkaa kuin luvussa 4.8 esiteltyjen esimerkkikohteiden. Tämän esimerkin litiumioniakku on kustannuksiltaan suurempi kuin Suomenniemiä sekä Batcave-projektin akut, mutta pienempi kuin Suvilahden.

Kuvasta 10 huomataan, että purkaussyklien määrän kasvattaminen kasvattaa ainoastaan käyttö- ja ylläpitokustannuksia, koska purkaussyklien määrän kasvattaminen kasvattaa vain lataukseen kuluvan sähkön määrää. Purkaussyklien määrän kymmenkertaistaminen kasvattaa järjestelmän elinkaarikustannuksia tässä esimerkissä alle 10 % molemmissa tapauksissa. Siksi purkaussyklien määrän tarkka arviointi varastojärjestelmien kustannuksia määritettäessä ei ole tarpeen. Toisaalta, jos purkaussyklien määrä kasvaa niin paljon, että akun suurin mahdollinen purkaussyklien määrä ylittyy, tarvitaan akun vaihto ennen sen kalenterieliniän loppumista, mikä kasvattaa vaihtokustannuksia. Tämä on kuitenkin jakeluverkkosovelluksissa epätodennäköistä.

Seuraavaksi vertaillaan elinkaarikustannuksia käytävissä olevan energiakapasiteetin funktiona purkaussyklien määrän pysyessä vakiona. Kuvassa 11 on esitetty sähkövarastojärjestelmien elinkaarikustannukset energiakapasiteetin funktiona purkaussyklien määrän ollessa 20 kappaletta vuodessa. Kustannukset on laskettu siten, että käytävissä oleva energiakapasiteetti akun purkautuessa kokonaan on 10, 25 tai 50 kWh.



Kuva 11. Sähkövarastojärjestelmien elinkaarikustannukset, kun käytävissä oleva energiakapasiteetti on 10, 25, 50 kWh.

Litiumioniakun elinkaarikustannuksiksi laskettiin yhteensä 3510–8760 €/a ja VRB-akun 2920–5030 €/a. Kuvasta 11 huomataan, että energiakapasiteetin kasvattaminen kasvattaa kaikkia kustannuskomponentteja, ja suurin vaikutus sillä on investointikustannuksiin. Käytävissä olevan energiakapasiteetin viisinkertaistuessa litiumioniakkujärjestelmän vuotuiset kustannukset kasvavat noin 150 % ja VRB-akkujärjestelmän noin 70 %. Tämän vuoksi on tärkeää määrittää tarkkaan, kuinka suuri energiakapasiteetti varastolla on tarpeen olla, jotta koko energiakapasiteetti voitaisiin hyödyntää mahdollisimman hyvin.

5.4 Sähkövarasto asiakkaan kokemien keskeytysten estossa

Osana oikaistun tuloksen laskentaa lasketaan laatukannustin, johon asiakkaan kokemat keskeytykset vaikuttavat. Laatukannustin lasketaan vähentämällä kunkin vuoden toteutuneet keskeytyskustannukset eli keskeytyksistä aiheutunut haitta (KAH) keskeytyskustannusten vertailutasosta, joka on neljännellä valvontajaksolla (1.1.2016–31.12.2019) vuosien 2008–2015 toteutuneiden keskeytyskustannusten keskiarvo. Toisin sanoen tarkasteltavan vuoden keskeytyskustannusten ollessa pienempi kuin vertailutaso laatukannustin on positiivinen, jolloin toteutunut oikaistu tulos pienenee. (Energiavirasto 2015b)

Keskeytyskustannukset lasketaan keskeytysten lukumäärän, keskeytysaikojen ja keskeytysten yksikköhintojen perusteella. Neljännellä valvontajaksolla keskeytyksistä otetaan keskeytyskustannusten laskennassa huomioon keskijännitejakeluverkosta aiheutuvien suunniteltujen ja odottamattomien keskeytysten lukumäärä ja keskeytysaika sekä pika- ja aikajälleenkytkentöjen (PJK ja AJK) lukumäärä. Keskeytysten yksikköhinnat on esitetty taulukossa 5. Ne perustuvat Energiaviraston teettämiin selvityksiin ja kuvaavat asiakkaan kokemaa keskeytyksestä aiheutuvaa haittaa. Yksikköhinnat on esitetty vuoden 2005 rahanarvossa ja ne korjataan laskentavuoden rahanarvoon kuluttajahintaindeksin avulla. (Energiavirasto 2015b)

Taulukko 5. Keskeytyksistä aiheutuneen haitan yksikköhinnat (Energiavirasto 2015b).

Odottamaton keskeytys		Suunniteltu keskeytys		Aikajälleenkytkentä	Pikajälleenkytkentä
$h_{E,odott}$	$h_{W,odott}$	$h_{E,suunn}$	$h_{W,suunn}$	h_{AJK}	h_{PJK}
€/kWh	€/kW	€/kWh	€/kW	€/kW	€/kW
11,0	1,1	6,8	0,5	1,1	0,55

Muuntopiirin keskeytyskustannukset vuonna t lasketaan kaavalla

$$KAH_t = (t_{odott,t} * h_{E,odott} + k_{odott,t} * h_{W,odott} + t_{suunn,t} * h_{E,suunn} + k_{suunn,t} * h_{W,suunn} + k_{AJK,t} * h_{AJK} + k_{PJK,t} * h_{PJK}) * \frac{W_t}{T_t} * \frac{KHI_t}{KHI_{2005}}, \quad (19)$$

jossa t_t on odottamattomista tai suunnitelluista keskeytyksistä aiheutunut keskeytysaika, k_t odottamattomista tai suunnitelluista keskeytyksistä tai pika- ja aikajälleenkytkennöistä aiheutunut keskeytysmäärä, W_t siirretyn energian määrä vuonna t , T_t vuoden t tuntien määrä, KHI_t kuluttajahintaindeksi vuonna t ja KHI_{2005} on kuluttajahintaindeksi vuonna 2005. (Energiavirasto 2015b) Kuluttajahintaindeksit jätetään laskujen yksinkertaistamisen vuoksi huomioimatta. Lisäksi indeksi on ollut melko vakaa viime vuosina.

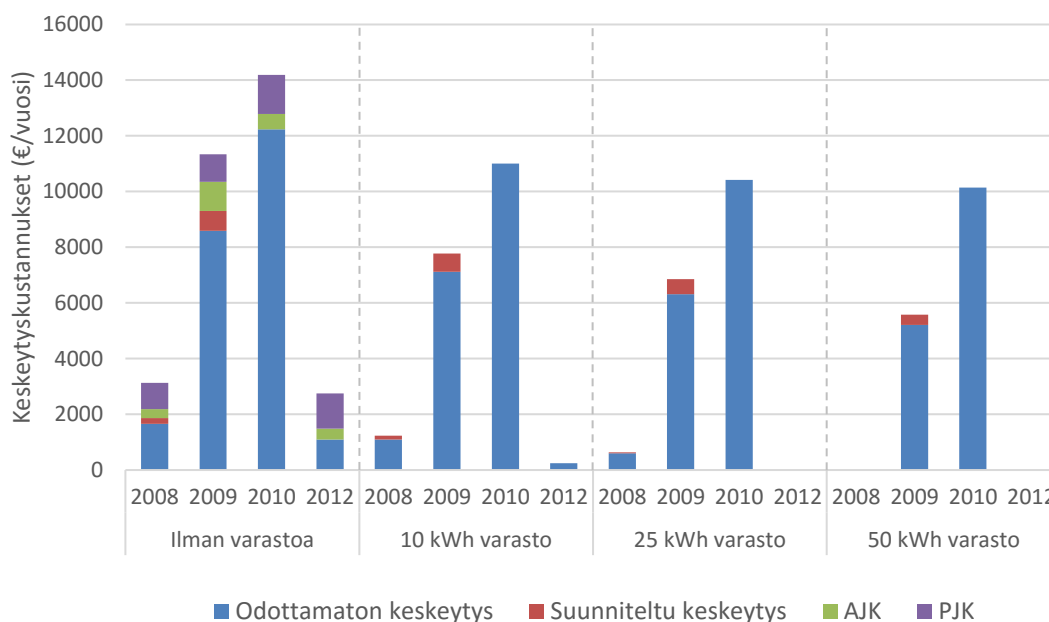
Seuraavaksi lasketaan keskeytyskustannukset yhdelle muuntopiirille. Keskeytyskustannukset lasketaan erään verkkoyhtiön haja-asutusalueella sijaitsevan muuntopiirin vuosien 2008, 2009, 2010 ja 2012 keskeytystietojen perusteella. Kyseiset vuodet on valittu laskentaan, koska vuosina 2009 ja 2010 muuntopiiri on ollut suurhäiriöiden vaikutusalueella ja vuosina 2008 ja 2012 keskeytykset ovat olleet tavanomaisella tasolla. Näin varaston kannattavuutta voidaan vertailla sekä tavanomaisina että suurhäiriövuosina. Laskentaa varten tarkasteluvuosien kaikkien keskeytysten tyypit ja pituudet ovat tiedossa, ja yhteenvedo keskeytyksistä on esitetty taulukossa 6. Muuntopiiriin keskitehona käytetään laskussa 50 kW, jolloin kaavan 19 termi $\frac{W_t}{T_t}$ saa laskemissa arvon 50 kW.

Taulukko 6. Muuntopiirin keskeytysajat ja -määrät.

Vuosi	Odottamaton kesk.		Suunniteltu kesk.		AJK	PJK	Keskeytykset yhteensä	
	Määrä (kpl)	Kesto yht. (h)	Määrä (kpl)	Kesto yht. (h)	Määrä (kpl)	Määrä (kpl)	Määrä (kpl)	Kesto (h)
2008	5	2,52	1	0,52	6	34	46	3,04
2009	14	14,23	1	2,02	19	36	70	16,25
2010	14	20,86	0	0	10	51	75	20,86
2012	9	1,10	0	0	7	46	62	1,10

Kyseisellä muuntopiirillä oli vuonna 2008 viisi kappaletta odottamattomia keskeytyksiä, joista kaikki olivat alle tunnin mittaisia. Vuonna 2009 odottamattomia keskeytyksiä oli 9 enemmän, ja yli tunnin keskeytyksiä oli 4 kappaletta, joista pisin oli hieman yli kahdeksan tunnin mittainen. Loput keskeytykset kyseisenä vuonna olivat alle puolen tunnin mittaisia. Vuonna 2010 odottamattomia keskeytyksiä oli saman verran kuin vuonna 2009, mutta pisin keskeytys oli lähes 19,5 tunnin mittainen. Muut keskeytykset olivat alle puolen tunnin mittaisia. Vuonna 2012 odottamattomia keskeytyksiä oli yhdeksän kappaletta, joista kaikki olivat alle puolen tunnin mittaisia.

Esimerkkilaskelmassa laskettiin keskeytyskustannukset muuntopiirille ilman sähkövarastoa sekä tilanteessa, jossa muuntopiiriin oli kytketty varasto, jonka käytettävissä oleva energiakapasiteetti oli 10, 25 tai 50 kWh. Näin ollen varastolla pystyttäisiin estämään kaikki enintään 12, 30 tai 60 minuutin mittaiset keskeytykset. Laskennassa oletetaan, että asiakkaan kokemat pika- ja aikajälleenkytkennät voidaan varaston avulla poistaa kokonaan. Tulokset on esitetty kuvassa 12. Kuvassa keskeytyskustannukset on jaoteltu keskeytystyypeittäin



Kuva 12. Keskeytyskustannukset vuosittain esimerkkilaskelman muuntopiirissä.

Kuvasta nähdään, että vuosina 2008–2010 suurin osa keskeytyskustannuksista koostuu odottamattomien keskeytysten aiheuttamista kustannuksista. Vuonna 2012 taas suurin osa kustannuksista aiheutuu pikajälleenkytkennöistä. Yksittäisiä vuosia tarkasteltaessa varaston kannattavuus on heikoin vuosina 2008 ja 2012, jolloin myös keskeytyksiä on vähiten. Vuonna 2008 50 kWh:n sähkövarastolla pystytään poistamaan kaikki asiakkaan kokemat keskeytykset, ja vuonna 2012 kaikki keskeytykset pystytään poistamaan 25 kWh:n varastolla. Suurin säästö varaston avulla saadaan vuonna 2009, jolloin yli puolen tunnin keskeytyksiä oli neljä kappaletta. Vuoden 2010 keskeytyskustannukset kyseisellä muuntopiirillä koostuivat lähes kokonaan yhden pitkän myrskyn aiheuttamista keskeytyskustannuksista, minkä vuoksi säästö ei kyseisinä vuonna ole suurempi kuin vuonna 2009, vaikka keskeytyskustannukset ovat suuremmat. Sähkövarasto on kuvan 12 perusteella tässä muuntopiirissä kannattavin silloin, kun muuntopiiri on ollut suurhäiriöiden vaikutusalueella, koska silloin varaston kapasiteetti saadaan parhaiten hyödynnettyä ja keskeytyskustannuksia on mahdollista pienentää suhteessa enemmän.

Taulukossa 7 on esitetty yhteenveto esimerkkilaskelman tuloksista sekä aiemmin lasketut varastojen hinnat kannattavuuden vertailua varten. Lisäksi taulukkoon on lisätty vertailun vuoksi vuotuiset elinkaarikustannukset litiumioniakulle, jonka investointikustannuksena on käytetty luvussa 4.8 esitellyn Batcave-akun investointikustannuksia. Koska akusta oli tiedossa vain investointikustannus $C_{I,T}$ (n. 1600 €/kWh), käyttö- ja ylläpitokustannuksina sekä vaihtokustannuksena on käytetty samoja arvoja kuin esimerkin litiumioniakulla. Taulukossa 7 sähkövarastojen nimellisteho on 50 kW ja energiakapasiteetti 10, 25 tai 50 kWh sekä vuotuisten purkaussyklien määrä 20 kappaletta. Tämä purkaussyklien määrä

on riittävä, koska pika- ja aikajälleenkytkennät ovat kestoaltaan niin lyhyitä, ettei varasto ehdi merkittävästi purkautua kytkennän aikana.

Taulukko 7. Yhteenveto esimerkkilaskelman tuloksista (€/vuosi).

	Keskeytys- kustannukset keskimäärin	Sähkövaraston kustannukset			Nettotulos		
		Li-ion	VRB	Batcave	Li-ion	VRB	Batcave
Ilman varastoa	7 850	-	-	-	-	-	-
10 kWh varasto	5 070	3 510	2 920	1 900	-730	-140	880
25 kWh varasto	4 480	5 480	3 710	4 220	-2 110	-340	-850
50 kWh varasto	3 930	8 760	5 030	8 100	-4 840	-1 110	-4 180

Taulukossa 7 keskeytyskustannukset on esitetty keskiarvona neljän tarkasteluvuoden kokonaiskeskeytyskustannuksista. Nettotulos-sarakkeessa sähkövaraston kustannusta on verrattu siihen, kuinka paljon keskeytyskustannuksia saadaan pienennettyä varaston avulla. Taulukosta 7 huomataan, ettei verkkoyhtiö hyötyisi esimerkkilaskelman tapauksessa litiumioniakun tai VRB-akun käytöstä keskeytysten estossa, jos kustannusten laskennassa käytetään taulukon 4 arvoja. Sen sijaan 10 kWh:n litiumioniakku Batcave-projektin akun investointikustannuksilla olisi kannattava. Kustannukset eivät kuitenkaan välttämättä ole suoraan vertailtavissa, sillä Batcaven akku on kokoluokaltaan suurempi ja eri käyttötarkoitukseen ja -ympäristöön rakennettu varastojärjestelmä. Suomenniemien akun investointikustannus oli luvun 4.8 esimerkeistä pienin, mutta varasto on kytketty DC-verkkoon, mikä pienentää investointikustannuksia. Tässä esimerkissä 10 kWh:n sähkövarasto on kannattavin, vaikka suuremmilla varastoilla keskeytyskustannuksia voidaan pienentää enemmän. Sähkövaraston energiakapasiteetin kasvattaminen kasvattaa siis kustannuksia hyötyä enemmän. Esimerkin perustella on siis mahdollista, että jo nykyisillä hinnoilla sähkövarastojärjestelmän avulla voitaisiin pienentää keskeytyskustannuksia varastojärjestelmän vuotuisia kustannuksia enemmän.

5.5 Muut toimitusvarmuutta parantavat ratkaisut

Verkon toimitusvarmuutta voidaan parantaa useilla eri verkostorakenteilla. Tällaisia rakenteita ovat esimerkiksi maakaapelointi, johtojen tienvarteen rakentaminen sekä kauko-ohjattavien kytkinlaitteiden ja muun automaation lisääminen. Maakaapelointi on ratkaisuista lähes ainut keino, jolla voidaan ehkäistä voimakkaiden myrskyjen aiheuttamia suurihäiriöitä avojohtoverkossa. (Lakervi ja Partanen 2008) Keskijännitelähdön kaapelointi parantaa kaikkien sen syöttämien muuntopiirien toimitusvarmuutta. Sähkövaraston avulla taas voidaan parantaa yksittäisten muuntopiirien tai käyttöpaikkojen toimitusvarmuutta. Näin ollen sähkövarastojärjestelmiä voidaan tarvita useita, jotta toimitusvarmuus

paranisi mahdollisimman monella käyttöpaikalla ja jotta vaikutus olisi yhtä laaja kuin esimerkiksi maakaapeloinnilla. Huomioitavaa on myös, ettei sähkövarastojärjestelmän asentaminen poista vian korjaamisen tarvetta, mistä aiheutuu kustannuksia, jolloin sähkövaraston kannattavuus heikkenee. Myös maakaapeliverkossa esiintyy vikoja, mutta vikataajuus on 10–50 % avojohtojen vikataajuudesta. Toisaalta vian tarkka paikallistaminen ja korjaaminen on kaapeliverkossa hitaampaa ja vian korjauskustannukset yleensä suuremmat kuin ilmajohtoverkossa. (Lakervi ja Partanen 2008)

Varastojärjestelmän ja muiden toimitusvarmuutta parantavien rakenteiden kustannusten laajempi vertailu jätetään tämän työn ulkopuolelle, sillä varastojärjestelmän kannattavuus täytyy arvioida tapauskohtaisesti ottaen huomioon muiden toimitusvarmuutta parantavien ratkaisujen vaikutukset ja kustannukset kyseisellä alueella. Lisäksi sähkövarastojärjestelmien ja muiden ratkaisujen vertailu ei välttämättä ole suoraviivaista. Tätä havainnollistetaan seuraavan esimerkin avulla.

Lasketaan maakaapeloinnin kustannukset, kun 10 kilometrin keskijännitelähtö kaapeloidaan, jolloin sen syöttämien asiakkaiden toimitusvarmuus paranee. Maakaapelointi vähentää asiakkaiden kokemien odottamattomien keskeytysten sekä jälleenkytkentöjen määrää huomattavasti. Lasketaan maakaapeloinnin hinta käyttämällä yksikköhintaluettelon (Energiavirasto 2015a) mukaista poikkipinta-alaltaan 95 mm² maakaapelin ja tavallisen kaivuolosuhteen kaapeliojan hintaa. 10 kilometrin mittaisen kaapeloinnin vuotuiseksi kustannukseksi tulisi 5 %:n korkokantaa käyttämällä noin 30 600 €/vuosi. Kaapeloinnin vuotuinen hinta on kalliimpi kuin aikaisemmin lasketussa esimerkissä sähkövarastojärjestelmän vuotuinen kustannus. Esimerkissä sähkövarastojärjestelmän pitoaika oli 20 vuotta ja varasto-osan 10 vuotta. Näin ollen 40 vuoden aikana koko varastojärjestelmä tulisi vaihtaa kerran ja varasto-osa neljä kertaa. Lisäksi varastojärjestelmiä voidaan tarvita useita, jotta niiden vaikutus ulottuisi yhtä laajalle kuin kaapeloinnin. Toisaalta esimerkiksi haja-asutusalueella verkon reunoilla sijaitsevien yksittäisten käyttöpaikkojen toimitusvarmuuden parantaminen voi aiheuttaa korkeita investointikustannuksia, jolloin sähkövaraston käyttö voisi olla perusteltua etenkin, jos käyttöpaikkojen pysyvyys ei ole varmaa. Näin ollen varaston avulla voitaisiin mahdollisesti lykätä epävarmaa verkkoinvestointia. Sähkövarastojen hinnan laskiessa ja teknologian kehittyessä ne voisivat tarjota kustannustehokkaan keinon toimitusvarmuuden parantamiseen.

Yksi sähkön varastointiin liittyvistä haasteista on kustannustietojen puute ja taloudellisen tehokkuuden arvioinnin vaikeus. Eri lähteissä esitetyt kustannusarviot perustuvat suurelta osin erilaisiin oletuksiin ja yleistyksiin. Kustannukset eivät kuitenkaan aina ole skaalattavissa eri kokoluokan varastoihin luotettavasti. Lisäksi useat teknologiat ovat vasta tulleet markkinoille ja käytössä olevia järjestelmiä on vähän, minkä vuoksi kustannukset ovat usein järjestelmäkohtaisia, mikä lisää lähteiden välisiä ristiriitoja kustannuksissa. (Zakeri & Syri 2015). Koska yksi varasto pystyy tuottamaan parhaassa tapauksessa useita eri hyötyjä, taloudellisen tehokkuuden arvioinnista tulee vieläkin haastavampaa (U.S. Department of Energy 2013).

6. SÄHKÖVARASTOJEN HYÖDYNNETTÄVYYS SUOMEN SÄHKÖVERKOSSA

Kuten työssä on käynyt aiemmin ilmi, useat sähkön varastointiteknologiat ovat vielä nuoria ja kehittymättömiä, ja etenkin jakeluverkkotasolla sähkön varastoinnista on vielä melko vähän tietoa saatavilla. Aiheeseen liittyvä kirjallisuus keskittyy usein Yhdysvaltojen ja Aasian markkinoille eikä samanlaista mallia voida välttämättä suoraan soveltaa esimerkiksi pohjoismaiseen käyttöympäristöön. Lisäksi kirjallisuudessa keskitytään usein sähkövarastojen hyödyntämiseen sähkömarkkinoilla ja uusiutuvan energian yhteydessä, jolloin jakeluverkkokäyttökohteet jäävät vähälle huomiolle.

Luvussa 4 selvitettiin sähkövarastojen käyttökohteita, joista tunnistettiin potentiaaliset jakeluverkon käyttökohteet. Diplomityötä varten toteutettiin kysely, jonka tarkoitus oli kerätä lisää tietoa sähkövarastojen potentiaalisista käyttötarkoituksista sähkönjakeluverkoissa Suomessa. Lisäksi kyselyn tavoitteena oli saada tietoa verkonhaltijoiden mielipiteistä liittyen sähkön varastointiin sekä direktiiviehdotuksen sisältöön. Koska Suomessa on tällä hetkellä 79 jakeluverkonhaltijaa, tutkimus päätettiin toteuttaa lomakekyselynä internetissä mahdollisimman laajan otannan saavuttamiseksi. Seuraavissa kappaleissa kerrotaan lyhyesti kyselytutkimuksen teoriasta sekä esitetään tutkimuksen rakenne ja tulokset.

6.1 Lomakekysely

Lomakekysely on tiedonkeruumenetelmä, jossa jokainen vastaaja vastaa samoihin kysymyksiin ennalta määrättyssä järjestyksessä. Lomakekyselyitä ovat esimerkiksi kyselyt, joihin vastaaja vastaa itsenäisesti tai haastattelut, joissa haastattelija kysyy ennalta määritetyt kysymykset. Koska kaikilta vastaajilta kysytään samat kysymykset, lomakekyselyn avulla voidaan kerätä tietoa tehokkaasti suurelta joukolta ennen kvantitatiivista analyysiä. Lomakekyselyssä on tärkeää varmistaa, että kyselyn avulla saadaan kerättyä oikeaa tietoa, joka vastaa tutkimuskysymykseen. Lomakekyselyitä käytetään yleensä tutkimaan mielipiteitä tai asenteita, mutta sitä voidaan käyttää myös tutkimaan ja selittämään muuttujien välisiä suhteita eli korrelaatioita. (Saunders et al. 2009)

Lomakekyselyt voidaan luokitella kahteen luokkaan sen mukaan, miten paljon tutkija on kontaktissa vastaajiin. Kyselyitä, jotka vastaaja täyttää itsenäisesti, ovat esimerkiksi internetkyselyt tai postitse lähetettävät kyselyt. Kyselyitä, joissa tutkija on kontaktissa vastaajaan, ovat esimerkiksi puhelinkyselyt ja strukturoidut haastattelut, joissa tutkija kysyy vastaajalta etukäteen laaditut kysymykset ja ei saa poiketa niistä. Lomakekyselyn tyyppi määrittää, miten varma tutkija voi olla vastaajan henkilöllisyydestä ja siitä, että haluttu henkilö vastaa kyselyyn. Puhelinkyselyissä ja haastatteluissa tutkija voi varmistua siitä,

että vastaaja on haluttu henkilö. Kyselyissä, jotka vastaaja täyttää itsenäisesti, tämä voi olla haastavaa, koska kyselyyn vastaaja ei välttämättä ole sama henkilö, jolle kysely on osoitettu. (Saunders et al. 2009)

6.2 Kyselyn rakenne

Kysely toteutettiin internetissä huhtikuun 2017 aikana käyttäen SurveyPal-kyselyohjelmistoa. Kyselylinkki lähetettiin jakeluverkonhaltijoiden toimitusjohtajille, mutta vastaukset ovat yhtiökohtaisia, jolloin varsinaisella vastaajalla ei ollut merkitystä. Kyselyn aluksi vastaajia pyydettiin kuitenkin antamaan yhteystietonsa mahdollisten epäselvien vastausten tarkentamista tai lisätietojen antamista varten. Kysely oli jaettu kahteen osaan. Ensimmäisessä osassa kartoitettiin vastaajien tuntemusta ja mielipiteitä sähkön varastoinnin nykytilaan liittyen, ja toinen osa keskittyi direktiiviehdotuksen artiklan 36 sisältöön. Kyselypohja kokonaisuudessaan on esitetty liitteessä B.

Kyselyssä oli yhteensä 14 kysymystä, joista suurin osa oli erilaisia väittämiä sähkön varastointiin liittyen. Kyselyn kahdessa ensimmäisessä kysymyksessä selvitettiin vastaajien perehtyneisyyttä sähkön varastointiin sekä direktiiviehdotuksen artiklan 36 sisältöön. Ensimmäisen kysymyksen tarkoitus oli kartoittaa verkkoyhtiöiden tietämyksen tasoa sähkön varastoinnista, siihen käytettävistä teknologioista sekä varastoinnin mahdollisuuksista ja esteistä. Kysymyksen avulla myöhempien vastausten luotettavuutta voitiin arvioida ja etsiä yhteyttä perehtyneisyyden tason ja vastausten välillä. Toisessa kysymyksessä selvitettiin yhtiöiden tietoa direktiiviehdotuksen sisällöstä sähkövarastojen omistukseen eli artiklaan 36 liittyen. Kysymyksen tarkoitus oli selvittää, ovatko yhtiöt lainkaan kuulleet direktiiviehdotuksesta ja onko ehdotuksen vaikutuksia verkkoliiketoimintaan ehdittyä jo pohtia.

Varsinaisen kyselyn ensimmäisen osan kysymykset liittyivät sähkön varastoinnin nykytilaan vuonna 2017. Kolmannessa kysymyksessä vastaajia pyydettiin arvioimaan, kuinka todennäköisenä he pitävät sähkövaraston hyödyntämistä jakeluverkkotoiminnassa seuraavan viiden ja 20 vuoden aikana. Seuraavassa kysymyksessä kysyttiin, mihin käyttötarkoituksiin sähkövarastoa voisi hyödyntää verkkoyhtiön verkossa. Kysymyksessä oli annettu kolme eri käyttötarkoitusta, joiden käyttötodennäköisyyttä vastaajaa pyydettiin arvioimaan asteikolla 1–5. Nämä kolme käyttötarkoitusta olivat asiakkaan kokemien keskeytysten vähentäminen, investointitarpeen lykkäys tai esto sekä jännitteen säätö. Nämä käyttötarkoitukset valittiin kyselyyn, koska ne todettiin aiemmin luvussa 4 olevan soveltuvia sähkövaraston käyttökohteita jakeluverkkossa. Lisäksi vastaaja pystyi syöttämään avoimeen tekstikenttään muita mahdollisia käyttötarkoituksia ja arvioimaan niiden käyttötodennäköisyyttä. Tämän kysymyksen tarkoitus oli kerätä tietoa verkonhaltijoiden näkemyksistä sähkövarastojen käyttötarkoituksiin Suomen jakeluverkkossa. Näin saatiin parempi kuva verkonhaltijoiden tarpeista varastoinnin suhteen kuin pelkän kirjallisuuskat-

sauksen avulla. Käyttötarkoitusten kartoitus auttaa myös arvioimaan sähkövarastojen soveltuvuutta verkon kokonaistehokkuuden, luotettavuuden ja toimitusvarmuuden parantamiseksi direktiiviehdotuksen näkökulmaa ajatellen.

Viides ja kuudes kysymys liittyivät sähkövarastojärjestelmän kustannuksiin. Kysymyksissä vastaajaa pyydettiin arvioimaan sähkövarastojärjestelmän kokonaiskustannuksia verrattuna varastosta saatavaan hyötyyn sekä sähkövarastojärjestelmän investointikustannusten suhdetta käytönaikaisiin kustannuksiin.

Seuraavissa kysymyksissä selviteltiin vastaajien mielipiteitä varastointiteknologiaan liittyviin väitteisiin sekä varastojärjestelmän pitoaikaan. Kysymyksissä esitettiin väitteitä sähkövaraston verkkoon liittymisen ja varasto-osan teknologian kehittyneisyydestä sekä varastojärjestelmien luotettavuudesta. Lisäksi vastaajia pyydettiin arvioimaan sähkövarastojärjestelmistä saatavilla olevaa käyttökokemusta, tietoa sekä osaamista ja varastojärjestelmien saatavuutta. Väitteiden tarkoituksena oli selvittää, miten verkonhaltijat näkevät sähkövarastojärjestelmien kehittyneisyyden nykytilan sekä saatavuuden markkinoilla. Kuten aiemmin kirjallisuudesta on käynyt ilmi, sähkövarastojärjestelmien kehittyneisyys vaihtelee paljon teknologiasta riippuen ja varastojärjestelmiä ei välttämättä ole yhtä helpposti saatavilla kuin esimerkiksi perinteisiä verkkokomponentteja.

Yhdeksäs kysymys taas koski sähkövarastoihin liittyvää regulaatiota. Väittämien tarkoitus oli selvittää, tulisiko vastaajan mielestä sähkövaraston olla osa verkkoliiketoimintaa vai tulisiko sen tuottamia palveluja hankkia ainoastaan kilpailuilta markkinoilta. Lisäksi vastaajilta kysyttiin, näkevätkö he sähkömarkkinalain mukaisen eriyttämismääräyksen esteenä sähkövarastojen käyttöönotolle. Ensimmäisen osan lopuksi vastaajia pyydettiin arvioimaan sähkövarastojen tarpeellisuutta tällä hetkellä sekä arvioimaan suurimpia esteitä varastoinnille omin sanoin.

Kyselyn toisessa osassa vastaajia pyydettiin arvioimaan direktiiviehdotuksen artiklaa 36. Kyselyn toisen osan alussa artikla 36 alkuperäisessä muodossaan oli vastaajien luettavissa, jotta vastaajat saivat selkeämmän käsityksen artiklan sisällöstä. Toisen osan ensimmäinen kysymys kartoitti vastaajien mielipiteitä artiklasta 36. Koska direktiiviehdotus antaa mahdollisuuden verkonhaltijoille hakea poikkeuslupaa sähkövaraston omistukseen, seuraava kysymys selvitti vastaajien halukkuutta hakea poikkeuslupaa. Viimeisessä kysymyksessä kysyttiin vastaajien mielipidettä sähkövarastopalveluiden ostamisesta markkinapohjaisilta toimijoilta.

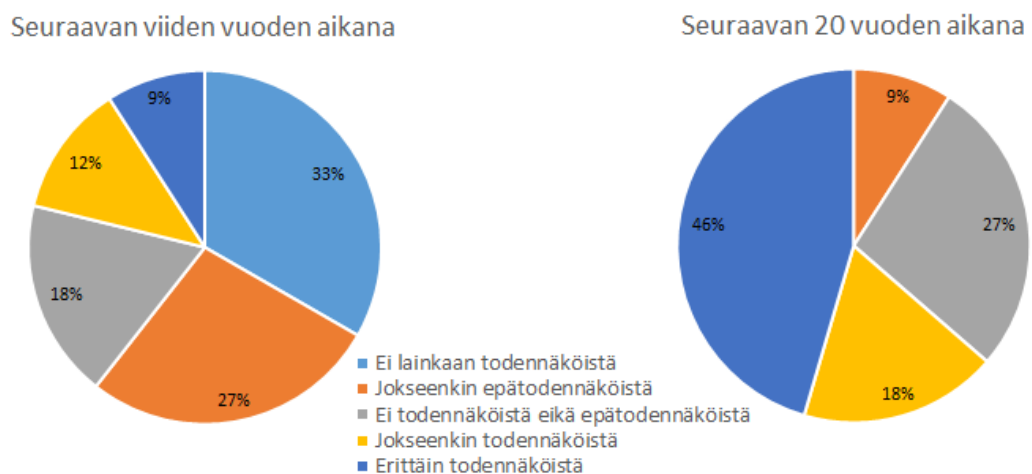
Kyselyn vastauslinkki lähetettiin kaikille 79 jakeluverkonhaltijalle sekä kantaverkonhaltijalle, ja vastauksia kyselyyn tuli yhteensä 33. Vastausprosentti oli siten 41, mutta vastanneiden jakeluverkonhaltijoiden verkkopituus ja asiakasmäärä vastaavat noin 70 % kaikkien verkonhaltijoiden kokonaisverkkopituudesta ja -asiakasmäärästä. Vastanneet verkkoyhtiöt luokiteltiin käyttöpaikkamäärien mukaan suuriin, keskisuuriin ja pieniin yh-

tiöihin sekä verkkotyyppin mukaan maaseutu-, taajama- ja kaupunkiverkkoihin korrelaatioiden löytämiseksi. Suureksi yhtiöksi luokiteltiin yli 20 000 käyttöpaikan yhtiöt ja pieniksi alle 5000 käyttöpaikan yhtiöt. Luokittelussa käytettiin vuoden 2015 käyttöpaikkamääriä.

Kyselyyn vastaajista lähes kaikki olivat jollain tasolla tutustuneet sähkön varastointiin. Varastointiin perehtyneisyyttä pyydettiin arvioimaan viisiportaisella asteikolla. Noin 70 % vastaajista oli sitä mieltä, että heidän yhtiössään varastointiin oltiin perehdytty hieman tai pääpiirteittäin. Ainoastaan noin kymmenesosa kyselyyn vastanneista ilmoitti, ettei yhtiössä ole käyty lainkaan keskustelua sähkön varastoinnista. Tulosten mukaan sähkön varastointi on verkonhaltijoille tuttu asia, mutta siihen ei toisaalta ole perehdytty kovin syvällisesti. Tämä selittyy sillä, että sähkön varastointi Suomessa on vielä kokeiluasteella ja verkkoon liitettviä sähkövarastoja vain muutama.

6.3 Sähkövarastojen käytön todennäköisyys ja käyttötarkoitukset

Vastaajista noin 60 % arvioi, että sähkövaraston hyödyntäminen heidän yhtiössään seuraavan viiden vuoden aikana ei ole lainkaan todennäköistä tai on jokseenkin epätodennäköistä. Noin 20 % taas arvioi, että seuraavan viiden vuoden aikana sähkövaraston hyödyntäminen on jokseenkin tai erittäin todennäköistä. Kuvassa 13 on esitetty varaston hyödyntämisen todennäköisyys vastaajien mielestä.



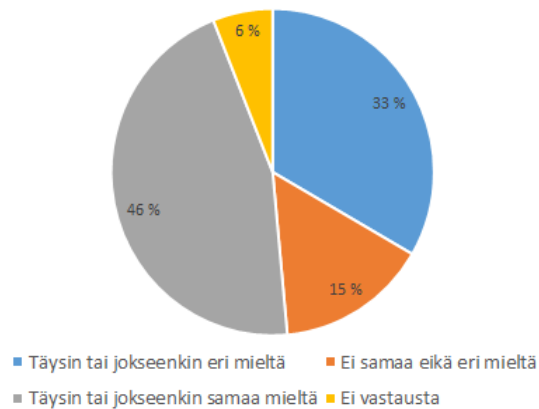
Kuva 13. Sähkövaraston hyödyntämisen todennäköisyys vastaajien mielestä.

Vastaajien arvioidessa sähkövaraston hyödyntämisen todennäköisyyttä seuraavan 20 vuoden aikana tilanne muuttuu lähes päinvastaiseksi. Kaikki vastaajat uskoivat varaston olevan hyödynnettävissä seuraavan 20 vuoden aikana jollain todennäköisyydellä. Noin 63 % vastaajista oli sitä mieltä, että varaston hyödyntäminen on jokseenkin tai erittäin todennäköistä seuraavan 20 vuoden aikana. Vain noin 10 % uskoi varaston käytön olevan

jokseenkin epätodennäköistä. Tulosten perusteella jakeluverkkoyhtiöt eivät usko sähkövarastojen olevan hyödynnettävissä vielä lähitulevaisuudessa, mutta jossain vaiheessa sähkövarastojen uskotaan tulevan osaksi sähköverkkoja. Yhteyttä yhtiön verkkotyypin tai käyttöpaikkamäärän ja varaston käytön todennäköisyyden välillä ei ollut havaittavissa.

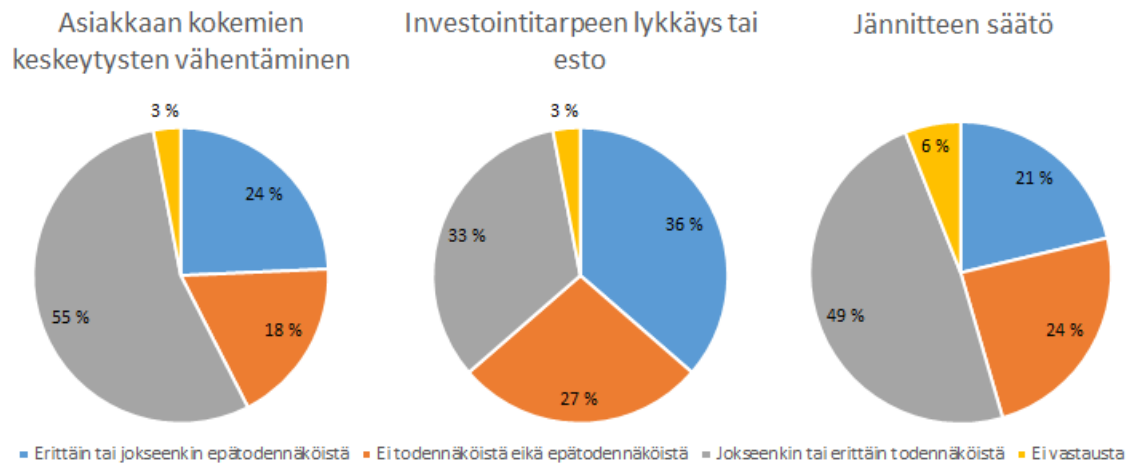
Lähes puolet vastaajista oli sitä mieltä, että tällä hetkellä käytössä olevat verkkorakenteet ovat riittäviä, minkä vuoksi sähkövarasto olisi tarpeeton heidän verkossaan. Noin kolmasosa oli kuitenkin sitä mieltä, että sähkövarasto olisi tarpeellinen jo tällä hetkellä verkossa. Kuvassa 14 on esitetty tämän kysymyksen vastausten jakautuminen.

Tällä hetkellä käytössä olevat verkkorakenteet ovat riittäviä, joten sähkövarasto olisi tarpeeton verkossamme



Kuva 14. Sähkövaraston tarpeellisuus vastaajien verkossa tällä hetkellä.

Tulokset sähkövaraston mahdollisista käyttökohteista on esitetty kuvassa 15. Kolmesta ehdotetusta käyttötarkoituksesta asiakkaan kokemien keskeytysten vähentäminen oli vastaajien mielestä todennäköisin käyttötarkoitus varastolle, sillä 55 % vastaajista piti sitä jokseenkin tai erittäin todennäköisenä käyttökohteena sähkövarastolle. Investointitarpeen lykkäys tai esto taas jakoi mielipiteitä tasaisesti. Noin kolmasosa vastaajista piti varaston käyttöä siihen erittäin tai jokseenkin epätodennäköisenä. Toinen kolmasosa taas piti sitä jokseenkin tai erittäin todennäköisenä.



Kuva 15. Erilaisten sähkövaraston käyttötarkoitusten käyttötodennäköisyys.

Kolmas arvioitava käyttökohde oli jännitteen säätö. Lähes puolet vastaajista piti jännitteen säätöä erittäin tai jokseenkin todennäköisenä käyttökohdeena sähkövarastolle. Verkko-tyypin ja vastausten välillä ei ollut korrelaatiota, mikä on yllättävää, koska esimerkiksi maaseutuverkossa asiakkaan kokemien keskeytysten vähentäminen sähkövaraston avulla on luultavasti todennäköisempää kuin kaupunkiverkossa, jossa keskeytyksiä on muutenkin vähän.

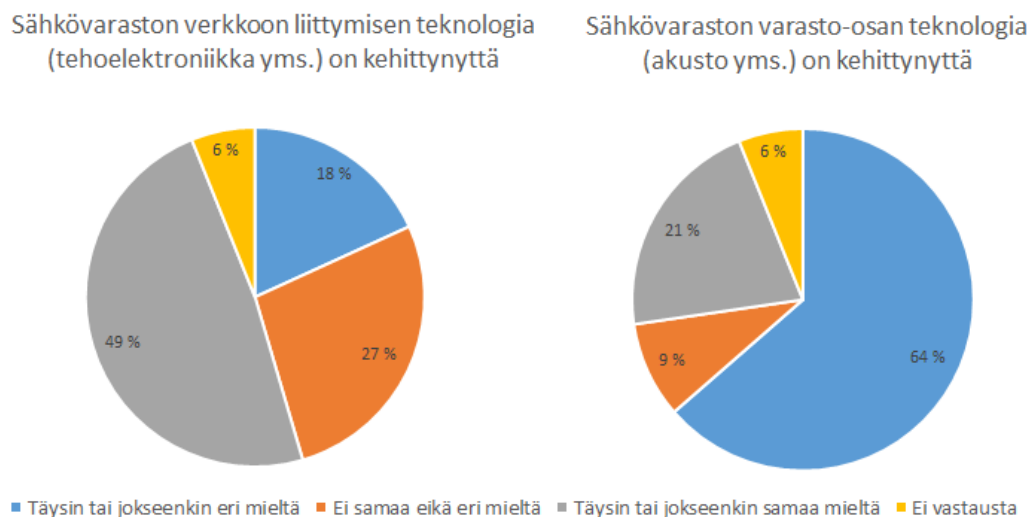
Vastaajat pystyivät myös itse nimeämään muita sopivia käyttökohteita varastoille. Vastauksissa tuli esiin useita sellaisia käyttökohteita, joiden on tarkoitus lykätä tai estää verkkoinvestointeja. Vastaajat kertoivat muun muassa, että sähkövarastoa voisi käyttää huippukuormien tasaamiseen tai muuntajakokojen optimointiin suurissa kulutuskeskittymissä, jotka molemmat liittyvät suoraan verkkoinvestointien lykkäämiseen tai estoon. Myös sähkön laadun parantaminen varaston avulla sekä tehotarpeen kattaminen hetkellisesti esimerkiksi poikkeustilanteessa voisi olla vastaajien mukaan mahdollista. Avoimissa vastauksissa tuli ilmi, että varastoja voisi käyttää myös reservimarkkinoilla tai yli-tuotannon varastointiin, jotka ovat kuitenkin markkinaehtoista toimintaa eivätkä sähköverkkoliiketoimintaa. Sähkövaraston käyttökohteissa onkin tärkeää erottaa markkinaehtoiset ja verkkoliiketoimintaan kuuluvat käyttökohteet. Jos verkonhaltijalle myönnetään lupa omistaa ja käyttää sähkövarastoja, täytyy verkonhaltijalle olla selvää, mihin se voi varastoa hyödyntää verkkoliiketoiminnan puitteissa.

Kokonaisuutena vastaukset käyttötarkoitusten todennäköisyyden arvioinnissa olivat melko hajautuneita, mutta asiakkaan kokemien keskeytysten vähentäminen oli näistä kolmesta vaihtoehdosta todennäköisin käyttötarkoitus. Investointitarpeen lykkäys tai esto jatkoi enemmän mielipiteitä ja sitä pidettiin epätodennäköisimpänä vaihtoehtona sähkövaraston käyttötarkoitukselle. Yksi mahdollinen selitys tälle voisi olla, ettei verkkoa yleensä suunnitella siten, että se olisi aivan siirtokykynsä rajoilla. Investoinnit täytyy tehdä pitkäjänteisesti ja kuormituksen kasvu on arvioitava hyvissä ajoin etukäteen. Investointitarpeen lykkäämistä varaston avulla voidaankin luultavasti pitää viimeisenä vaihtoehtona.

Verkkoyhtiöt luultavasti näkevät myös perinteisten verkkoinvestointien olevan tällä hetkellä tehokkaampi ja turvallisempi ratkaisu verkon vahvistukseen kuin investoinnin lykkyä esimerkiksi muutamalla vuodella sähkövaraston avulla.

6.4 Sähkövarastojärjestelmien teknologia ja kustannukset

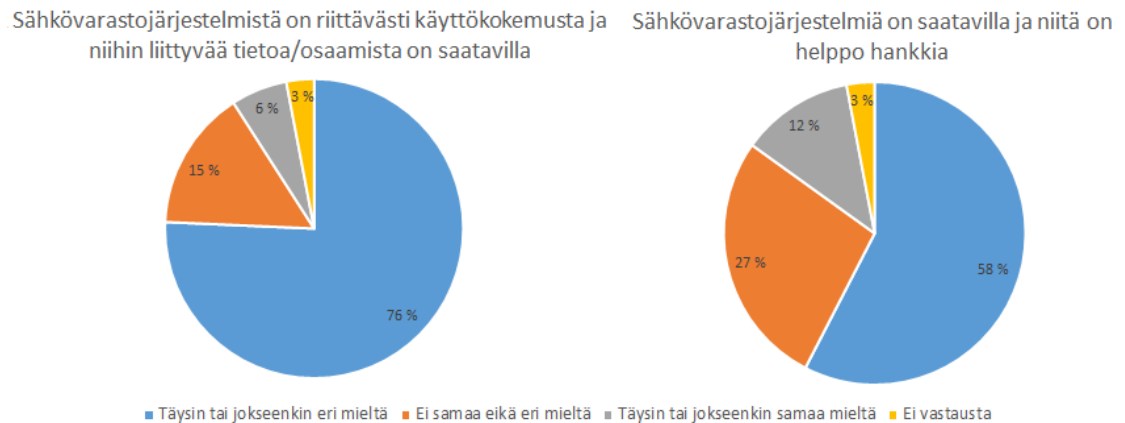
Kyselyssä kysymykset 5–8 liittyivät sähkövarastojärjestelmissä käytettävään teknologiaan, järjestelmien pitoaikaan sekä kustannuksiin. Noin puolet vastaajista oli täysin tai jokseenkin samaa mieltä siitä, että sähkövaraston verkkoon liittymisen teknologia, eli esimerkiksi tehoelektroniikka akkuvarastojärjestelmissä, on kehittynyttä. Sähkövarastojärjestelmien varasto-osan kehittyneisyyttä vastaajat arvioivat heikoksi. Noin 20 % vastaajista oli täysin tai jokseenkin samaa mieltä siitä, että varasto-osan teknologia on kehittynyttä. Vastauksia liittymisen ja varasto-osan teknologioista on havainnollistettu kuvassa 16.



Kuva 16. Sähkövaraston verkkoon liittymisen teknologian ja varasto-osan kehittyneisyys.

Varastointitekniologioiden kehittyneisyyden arvioinnin ja varastointiin perehtyneisyyden välillä oli havaittavissa hieman yhteyttä. Ne vastaajat, jotka olivat vähemmän perehtyneitä sähkön varastointiin, arvioivat varasto-osan teknologiaa vähemmän kehittyneeksi kuin ne, jotka olivat perehtyneet varastointiin hyvin tai syvällisesti. Noin 80 % vähemmän varastointiin perehtyneistä arvioi varasto-osan teknologian kehittymättömäksi. Toisaalta vain kuusi vastaajista ilmoitti, että heidän yhtiössään oltiin perehdytty varastointiin hyvin tai syvällisesti. Vastaavasti 17 yhtiötä ei ollut lainkaan tai oli hieman perehtynyt varastointiin, joten vastauksia tarvittaisiin enemmän, jotta yhteyttä varastointitekniologioiden kehittyneisyyden arvioinnin ja varastointiin perehtyneisyyden välillä voisi tutkia paremmin.

Vastaajien mielestä sähkövarastoihin liittyvien käyttökokemusten ja tiedon sekä osaamisen saatavuus on heikko. Lähes 80 % vastaajista oli täysin tai jokseenkin eri mieltä siitä, että käyttökokemuksia ja varastoihin liittyvää tietoa ja osaamista on saatavilla. Noin 60 % vastaajista taas oli täysin tai jokseenkin eri mieltä siitä, että sähkövarastojärjestelmiä on helposti saatavilla ja niitä on helppo hankkia. Vastauksia näihin väittämiin on havainnollistettu kuvassa 17.



Kuva 17. Sähkövarastoihin liittyvän käyttökokemuksen ja sähkövarastojärjestelmien saatavuus.

Vastaukset ovat linjassa tässä työssä aiemmin tehtyjen havaintojen kanssa. Käyttökokemusten, tiedon ja osaamisen puute sekä sähkövarastojärjestelmien saatavuus aiheuttavat ongelmia muun muassa elinkaarikustannusten arvioinnissa, kuten edellisessä luvussa todettiin. Tiedon puute aiheuttaa myös epäselvyyttä sähkön varastointitekniologioiden nykytilasta ja teknologian kehittyneisyydestä, mikä näkyy varasto-osan teknologista kehittyneisyyttä arvioineessa kysymyksessä, sillä enemmän varastointiin perehtyneet olivat teknologian kehittyneisyydestä eri mieltä kuin vähemmän aiheeseen perehtyneet.

Sähkövarastojärjestelmän kustannusten jakautumista investointi- sekä käyttö- ja ylläpito-kustannuksiin vastaajien oli vaikea arvioida, sillä noin 40 % vastaajista ei osannut arvioida investointi- sekä käyttö- ja ylläpito-kustannusten suhdetta. Lähes kaikki, jotka eivät osanneet arvioida kustannusten suhdetta, olivat vähemmän varastointiin perehtyneitä. Noin 36 % vastanneista arvioi, että kaksi kolmasosaa sähkövarastojärjestelmän elinkaarikustannuksista muodostuu investointikustannuksista. Luvussa 5 tehdyn esimerkkilaskelman mukaan sähkövarastojärjestelmän investointikustannukset muodostivat kaikissa tarkasteltavissa tapauksissa yli 80 % varastojärjestelmän elinkaarikustannuksista, jos varasto-osan vaihtokustannusta ei oteta huomioon. Sähkövarastojärjestelmän suuret kustannukset ovat vastaajien mielestä haaste, sillä noin 70 % vastaajista arvioi kokonaiskustannusten olevan merkittävästi tai jonkin verran suuremmat kuin varastosta saatava hyöty.

6.5 Kyselyssä mainittuja sähkön varastoinnin suurimpia esteitä

Kyselyssä vastaajia pyydettiin nimeämään suurimpia esteitä varastojen käytölle. Vastauksia tähän avoimeen kysymykseen saatiin yhteensä 23 vastaajalta. Vastauksissa toistuneet esteet luokiteltiin viiteen kategoriaan: kustannukset, regulaatio, teknologia, käytökokemukset ja muut syyt. Kustannuksiin liittyviä esteitä nimettiin yhteensä 15 vastauksessa. Seuraavaksi yleisin este vastaajien mielestä oli verkkotoiminnan regulaation liittyvät asiat, joita nimettiin yhdeksässä vastauksessa. Regulaatioon liittyvistä haasteista vastaajat nostivat esille muun muassa eriyttämisperiaatteet sekä sen, että regulaatiomalli ei tällä hetkellä kannusta sähkövarastojen käyttöön. Tämän vuoksi onkin tärkeää, että sähkövarastoja varten tehdään selkeät pelisäännöt etenkin, jos verkonhaltijoille myönnetään lupia varastojen omistukseen. Lisäksi varastopalveluostojen käsittelyä valvontamallissa täytyisi selkeyttää.

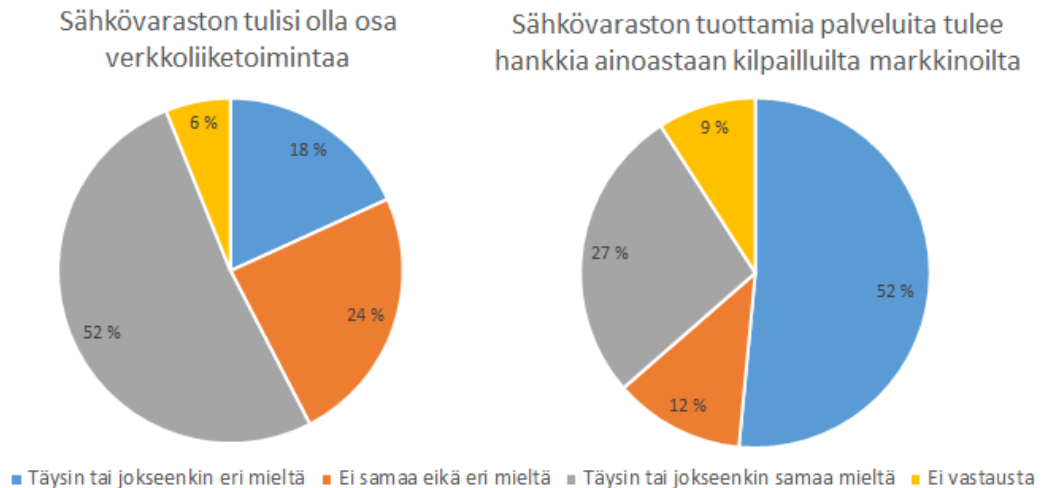
Teknologiaan liittyviä haasteita nimettiin kahdeksassa vastauksessa. Teknologiaan liittyviä haasteita olivat muun muassa teknologian kehittymättömyys, sopivuus verkkokäyttöön sekä varastojen lyhytikäisyys. Vähemmän sähkön varastointiin perehtyneiden yhtiöiden vastauksissa teknologiaan liittyviä haasteita tuotiin enemmän esille kuin enemmän varastointiin perehtyneiden yhtiöiden vastauksissa. Ainoastaan yhdessä enemmän varastointiin perehtyneen yhtiön vastauksessa teknologian kehittymättömyys nimettiin esteeksi. Sähkön varastointiin liittyvän tiedon puute aiheuttaa luultavasti tietämättömyyttä teknologian kehittyneisyydestä ja sen mahdollisuuksista. Esimerkiksi eräässä vastauksessa nimettiin teknologiaan liittyväksi haasteeksi se, ettei tällä hetkellä ole olemassa kaupallisia ratkaisuja verkkotoiminnan tarpeisiin. Kuten luvussa 3 mainittiin, kaupallisia ratkaisuja on olemassa ja pelkästään EU-maissa verkkoon asennettuja akkuja on satoja, jos kuluttajien varastot rajataan pois. Lisäksi akkuteknologioista litiumioni, natriumrikki- ja lyijyakut ovat teknologisesti kehittyneitä.

Käyttökokemusten, tiedon ja osaamisen puutteeseen liittyviä esteitä nimettiin viidessä vastauksessa. Muita esteitä sähkön varastoinnille vastaajien mielestä olivat muun muassa verotukseen liittyvät epäselvyydet sekä varastoidun sähkön käsittely tasehallinnassa.

6.6 Sähkövarastoihin liittyvä regulaatio ja puhtaan energian paketti

Kyselyn lopuksi vastaajilta pyydettiin mielipiteitä sähkövarastoihin liittyvään regulaatioon sekä direktiiviehdotuksen artiklaan 36 liittyen. Hieman yli puolet vastaajista oli täysin tai jokseenkin samaa mieltä siitä, että sähkövaraston tulisi olla osa verkkoliiketoimintaa. Hieman alle neljäsosalla ei ollut mielipidettä varaston sisällyttämisestä verkkoliiketoimintaan. Vastausten osuudet muuttuvat hieman kysyttäessä, tulisiko sähkövaraston tuottamia palveluita hankkia ainoastaan kilpailluilta markkinoilta. Lähes kaikki yhtiöt,

jotka olivat sitä mieltä, että varaston tulisi kuulua verkkoliiketoimintaan, olivat myös eri mieltä siitä, että varaston tuottamia palveluita tulisi hankkia ainoastaan kilpailluilta markkinoilta. Regulaatioon liittyvissä kysymyksissä ei ollut havaittavissa yhteyttä yhtiön verkotyypin, koon tai varastointiin perehtyneisyyden ja vastausten välillä. Vastausten jakautumista on havainnollistettu kuvassa 18.



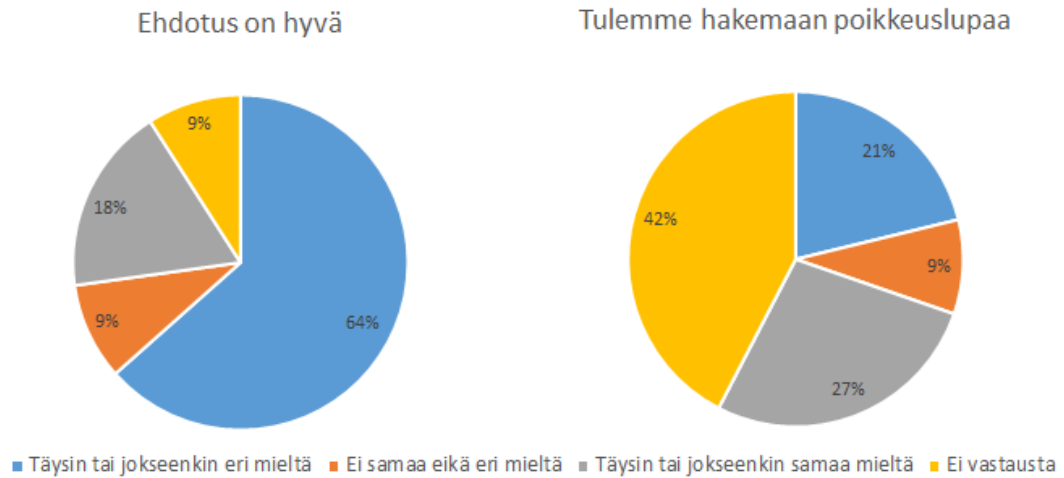
Kuva 18. Sähkövarastoihin liittyvä regulaatio.

Vastaajista, jotka olivat sitä mieltä, että sähkövaraston tulisi olla osa verkkoliiketoimintaa, noin 70 % piti sähkövarastojen kustannuksia suurempina kuin siitä saatavaa hyötyä ja noin 50 % arvioi, että varasto-osan teknologia on kehittymätöntä. On yllättävää, että melko suuri osa vastaajista pitää varastojen kustannuksia korkeana ja teknologiaa kehittymättömänä, mutta haluaa silti sähkövarastojen olevan osa verkkoliiketoimintaa. Toisaalta suurin osa vastaajista uskoi varastojen käytön olevan todennäköistä vasta usean vuoden kuluttua, jolloin teknologia on luultavasti kehittyneempää ja kustannukset alhaisempia.

Perehtyneisyys sähkömarkkinadirektiiviehdotuksen artiklaan 36 oli jakautunut melko taiseisesti. Noin kolmasosa ilmoitti, ettei heidän yhtiössään tunneta direktiiviehdotuksen sisältöä artiklan 36 osalta. Kolmasosa taas oli kuullut direktiiviehdotuksen sisällöstä ja kolmasosa jo tutkinut ehdotuksen vaikutuksia verkkoliiketoimintaan. Direktiiviehdotuksen artiklan 36 vaikutuksia verkkoliiketoimintaan tutkineiden melko suuri määrä oli yllättävä, koska direktiiviehdotus on melko uusi ja sähkön varastointiin hyvin tai syvästi perehtyneiden määrä ei ollut kuin 18 %. Yhtiön koon tai varastointiin perehtyneisyyden ja direktiiviehdotuksen sisältöön perehtyneisyyden välillä ei havaittu korrelaatiota.

Kuvassa 19 on esitetty vastausten jakautuminen kyselyn viimeisten kysymysten osalta. Vastausten perusteella vain noin viidesosa oli sitä mieltä, että direktiiviehdotuksen sisältö artiklan 36 osalta on hyvä. Suurin osa vastaajista oli siis sitä mieltä, ettei sähkövarastojen omistusta pitäisi rajoittaa. Tämä käy ilmi myös avoimen kohdan vastauksista, joissa moni vastaaja epäili sähkövarastopalveluntarjoajien löytymistä Suomessa muualla kuin suurien

kaupunkien alueella. Etenkin haja-asutusalueella, joissa varaston tarve voisi olla suurin, palveluntarjoajia ei välttämättä ole lainkaan.



Kuva 19. Direktiiviehdotuksen artiklan 36 sisältö.

Vastauksissa pohdittiin myös sähkövarastoinvestoinnin pysyvyyttä tilanteessa, jossa verkonhaltijan sähkövaraston omistajuus täytyy kilpailuttaa tasaisin väliajoin. Direktiiviehdotuksen mukaan jäsenvaltioiden on varmistettava verkonhaltijoiden asteittainen luopuminen sähkövarastotoiminnasta. Ehdotuksessa ei kuitenkaan täsmennetä, mitä asteittainen luopuminen käytännössä tarkoittaa. Vaarana on, että verkonhaltija investoi varastoon ja markkinapohjaisen omistajan löytyessä verkonhaltijan täytyy luopua varaston omistuksesta, vaikka varasolla olisi vielä pitoaikaa jäljellä.

Noin 40 % vastanneista ei osannut sanoa, tulevatko he hakemaan poikkeuslupaa varaston omistukseen. Tämä johtuu luultavasti siitä, että direktiiviehdotus on vielä uusi ja sen toteutuminen sellaisenaan ei ole varmaa. Lisäksi sähkövarastot eivät ole tulossa verkkoon vielä lähitulevaisuudessa, kuten ensimmäisistä kysymyksistä kävi ilmi. Artiklan kohta varaston omistuksen uudelleenarvioinnista voi aiheuttaa verkonhaltijoissa epävarmuutta poikkeusluvan hakemisen suhteen.

7. YHTEENVETO

Sähkövarastoja voidaan käyttää kaikissa sähkövoimajärjestelmän osissa aina tuotannosta sähkön loppukäyttöön saakka. Sähkövarasto voidaan määritellä resurssiksi, joka ottaa sähköä verkosta ja syöttää sen myöhemmin takaisin verkkoon. Sähkövaraston avulla verkkoon on mahdollista saada lisää joustavuutta, kun tuotettua sähköä ei tarvitse käyttää heti. Esimerkiksi säästä riippuvien uusiutuvien energialähteiden, kuten tuuli- ja aurinkovoiman, korvatta perinteisiä sähkön tuotantomuotoja sähkön varastoinnin tarve kasvaa, koska nämä energialähteet eivät tuota sähköä tasaisesti ja ennustettavasti.

Sähkövarastojen käyttöön liittyy haasteita, joista useat liittyvät lainsäädäntöön ja sähköverkkoliiketoiminnan valvontaan. Sähkömarkkinalain mukaan sähkömarkkinoilla toimivan yrityksen on eriytettävä verkkoliiketoiminta muista sähköliiketoiminnoista eli sähköntuotanto- ja sähkönmyyntitoiminnoista. Eriyttämällä tarkoitetaan sitä, että tilikausittain on laadittava tuloslaskelma ja tase eriytettävälle sähköliiketoiminnoille. Koska sähkövarastoa ei ole määritelty käsitteenä Suomen sähkömarkkinalaissa, sähkövarastot voidaan rinnastaa sähkön tuotantolaitokseksi. Sähkövarasto myös ottaa sähköenergiaa verkosta latautuessaan. Sähkömarkkinalaki asettaa rajoitteita verkonhaltijalle hankkia ja toimittaa sähköä. Lain mukaan oikeudellisesti eriytetty jakeluverkonhaltija voi hankkia sähköä ainoastaan tiettyihin tarkoituksiin, kuten omiin toimitiloihin ja verkon häviöihin. Näin ollen verkonhaltija ei voi Suomessa voimassa olevien normien mukaan omistaa ja käyttää sähkövarastoa. Sähkövaraston tuottamien palvelujen ostaminen palveluntarjoajalta on kuitenkin mahdollista. Palvelujen osto kuitenkin kasvattaa KOPEX-kustannuksia, mikä ei välttämättä ole verkonhaltijan kannalta suotuisaa.

Euroopan komissio on julkaissut ehdotuksen uudesta sähkömarkkinadirektiivistä, jossa sähkövarasto on määritelty käsitteenä ja sen omistamiseen liittyviä asioita tarkennettu. Direktiiviehdotuksen artiklan 36 mukaan verkonhaltija ei pääsääntöisesti voi omistaa ja käyttää sähkövarastoja. Ehdotus kuitenkin mahdollistaa poikkeuksen, jonka mukaan verkonhaltijalle voidaan myöntää lupa varaston omistukseen ja käyttöön, jos varastolle ei avoimen tarjouskilpailun jälkeen löydy muita omistajia ja varaston käyttö on perusteltua verkon tehokkaan, luotettavan ja turvallisen toiminnan kannalta. Lisäksi sääntelyviranomaisen täytyy arvioida poikkeuksen tarpeellisuus ja antaa hyväksyntä varaston omistukselle. Artiklassa säädetään myös, että sähkövaraston omistus on arvioitava uudestaan vähintään viiden vuoden välein.

Tässä diplomityössä tutkittiin sähkövaraston sopivuutta sähkönjakeluprosessiin ja osaksi verkkoliiketoimintaa. Työn aluksi tarkasteltiin sähkövarastojen teknistä sopivuutta sähköverkkoon sekä niiden taloudellista tehokkuutta. Teknisen sopivuuden arvioimiseksi tehtiin kirjallisuuskatsaus erilaisten sähkön varastointiteknologioiden ominaisuuksista ja

käyttökohteista sähköverkossa. Sähkön varastointiteknologioita on useita ja varastointiteknologiat voidaan luokitella esimerkiksi varastoitavan energiamuodon mukaan sähkömekaanisiin, -kemiallisiin ja -magneettisiin varastoihin. Sähkökemialliset varastot eli akut ovat soveltuvimpia jakeluverkkokäyttöön. Akkujen teho- ja energiakapasiteettiskaala on suuri, mikä mahdollistaa akkujen käytön niin tehoa kuin energiaa vaativiin sovelluksiin. Niillä on suuri energiatiheys, minkä vuoksi ne mahtuvat pieneen tilaan. Lisäksi akkujen vasteaika on nopea, mikä tarkoittaa, että ne pystyvät reagoimaan nopeasti tehotarpeen muutoksiin. Akkujen elinikä kuitenkin rajoittaa niiden käyttöä sähköverkossa verrattuna perinteisiin verkkokomponentteihin. Esimerkiksi litiumioniakun pitoaika on yleensä 10–20 vuoden luokkaa, mikä on lyhyempi kuin useiden verkkokomponenttien.

Jakeluverkossa sähkövarastoilla on kolme pääasiallista käyttökohdetta: verkkoinvestointien lykkäys tai esto, sähkön laadun ja toimitusvarmuuden parantaminen sekä jännitteen säätö. Sähkövaraston avulla verkkoinvestointeja voidaan lykätä tai estää huippukuormia leikkaamalla. Tällöin varastolla voidaan syöttää kuormaa verkon huippukuormituksen aikana, minkä avulla voidaan viivästyttää esimerkiksi uuden johdon tai muuntajan rakentaminen. Verkon jännitettä taas voidaan säätää sähkövaraston tehoelektroniikan avulla loistehoa kompensoimalla. Varaston avulla sähkön toimitusvarmuutta voidaan parantaa vähentämällä asiakkaiden kokemia keskeytyksiä syöttämällä asiakkaan kuormaa verkossa olevan keskeytyksen aikana. Tämä hyödyttää asiakkaan lisäksi myös verkonhaltijaa, sillä keskeytykustannukset pienenevät. Kaikkien keskeytysten esto varaston avulla voi kuitenkin olla haastavaa, sillä asiakkaalla voi esiintyä lyhyitä keskeytyksiä varastosta huolimatta. Tämä voidaan estää kytkemällä varasto verkon kanssa sarjaan tai käyttämällä DC-verkkoa, johon varasto voidaan suoraan kytkeä.

Sähkövarastojen elinkaarikustannukset koostuvat investointikustannuksesta, käyttö- ja ylläpitokustannuksista, varasto-osan mahdollisista vaihtokustannuksista sekä hävitys- ja purkukustannuksista. Koska sähkön varastointiteknologiat ovat vielä melko nuoria ja käyttökokemuksia on vähän, kustannustiedot vaihtelevat paljon eri lähteiden välillä ja ne perustuvat usein oletuksiin ja yleistyksiin. Kustannukset eivät välttämättä ole luotettavasti skaalattavissa eri kokoluokan varastoille, vaan kustannuksia täytyy arvioida yleensä tapauskohtaisesti. Lisäksi sähkövarastosta saatavien tuottojen arviointi on haastavaa, koska yhtä varastoa voidaan teoriassa käyttää useaan käyttötarkoitukseen. Elinkaarikustannusten ja tuottojen arviointi onkin yksi sähkön varastointiin liittyvistä haasteista.

Luvussa 5 tehtiin esimerkkilaskelma sähkövarastosta saatavan hyödyn arvioimiseksi asiakkaan kokemien keskeytysten estossa. Kun asiakas kokee keskeytyksen sähkön jakelussa, aiheutuu siitä haittaa, jolle lasketaan arvo keskeytyskustannusten avulla. Laskenta osoitti, että kyseisessä muuntopiirissä tarkasteltavan ajanjakson aikana varaston vuotuiset kustannukset olivat lähes kaikissa tapauksissa suuremmat kuin varaston avulla syntynyt säästö keskeytyskustannuksissa. Laskennassa havaittiin, että varasto oli kannattavin silloin, kun kyseinen muuntopiiri oli ollut suurhäiriön vaikutusalueella, jolloin keskeytykset

olivat pitkiä ja niitä oli useita. Lisäksi on otettava huomioon, ettei sähkövarasto vähennä vian korjaamisen kustannuksia, vaan ainoastaan asiakkaalle aiheutunutta haittaa.

Työtä varten toteutettiin lomakekysely, johon Suomen jakeluverkonhaltijoita pyydettiin vastaamaan. Kyselyn avulla kartoitettiin verkonhaltijoiden näkemyksiä sähkön varastoinnista sekä sähkövarastojen mahdollisia käyttökohteita jakeluverkossa. Lisäksi kyselyn avulla selvitettiin verkonhaltijoiden mielipiteitä direktiiviehdotuksen artiklan 36 sisällystä. Kyselyn tulosten perusteella jakeluverkonhaltijat uskovat varastojen käytön olevan todennäköistä seuraavan 20 vuoden aikana, muttei vielä seuraavan viiden vuoden sisään. Käyttökohteista vastaajat pitivät todennäköisimpinä asiakkaan kokemien keskeytysten estoa sekä jännitteen säätöä. Suurin osa vastaajista oli sitä mieltä, ettei direktiiviehdotuksen sisältö artiklan 36 osalta ole perusteltu, vaan verkonhaltijoille pitäisi sallia sähkövaraston omistus ja käyttö ilman erillistä lupaa, jos se on verkon kannalta tarpeellista.

Sähkömarkkinalain mukaan verkkopalvelujen on oltava korkealaatuisia ja hintojen kohtuullisia. Asiakkaan haluamat palvelut on saatava aikaan mahdollisimman alhaisin kustannuksin. Voimassa olevien normien mukaan sähkövarastojen käyttö verkkoliiketoiminnassa ei ole mahdollista, mutta tämän työn tulosten perusteella sähkövarastojen hyödyntäminen osana verkkoliiketoimintaa voi olla joissain tapauksissa perusteltua, minkä vuoksi sitä on tarkasteltava tapauskohtaisesti. Vaikka sähkön varastointiin on olemassa teknisesti toimivia ratkaisuja, ovat niiden kustannukset verkkotoiminnan tarpeisiin silti usein suuret hyötyihin verrattuna. Sähkövarastoista saadaan suurin hyöty, kun yhtä varastoa voidaan käyttää useaan käyttötarkoitukseen. Verkonhaltija voi kuitenkin käyttää varastoa vain rajattuihin verkon kannalta olennaisiin käyttötarkoituksiin, jolloin osa varaston potentiaalista voi jäädä käyttämättä. Esimerkiksi keskeytysten estossa varasto on suurimman osan ajasta käyttämättä ja koska suurin osa keskijänniteverkon keskeytyksistä on lyhyitä keskeytyksiä, varaston koko kapasiteetti jää hyödyntämättä. Markkinapohjainen varaston omistaja taas voi hyödyntää kaikkia varaston käyttötarkoituksia, jolloin varaston koko potentiaali on hyödynnettävissä.

Sähkön varastointiteknologioiden kehittyessä ja varastoinnin yleistyessä sähkövarastojen hinnat laskevat tulevaisuudessa. Sähkövarastojen täytyisi olla kustannustehokkaita, jotta verkonhaltijoiden olisi järkevää hyödyntää niitä. Kustannustehokkuutta arvioitaessa myös perinteiset ratkaisut on hyvä ottaa huomioon ennen kuin jakeluverkonhaltijalle voidaan myöntää lupa varaston omistukseen ja käyttöön. Sähkövarastoa ei voida täysin rinnastaa perinteisiin verkkokomponentteihin sen ominaisuuksien vuoksi. Näin ollen direktiiviehdotuksen artiklan 36 sisältö varaston omistuksen osalta on tämän työn tulosten valossa perusteltu, ja luvan myöntäminen varaston omistukseen on tehtävä tapauskohtaisesti. Jotta verkonhaltija saisi varastolle kohtuullista tuottoa, täytyisi se laskea osaksi verkonarvoa. Tätä varten täytyisi tehdä laajempi selvitys sähkövarastojen kustannuksista, jotta varastoille voitaisiin määrittää esimerkiksi yksikköhinnat.

Ennen kuin verkonhaltijalle voidaan myöntää lupa varaston omistukseen, täytyisi lainsäädäntöä selkeyttää esimerkiksi sähkövaraston lataamiseen tarvittavan sähkön hankinnan, mittausasetuksen sekä verkonhaltijoita koskevan eriyttämisvelvollisuuden osalta. Koska direktiiviehdotuksen mukaan verkonhaltijan tulisi pääsääntöisesti hankkia sähkövaraston tuottamia palveluita kolmansilta osapuolilta, täytyisi määrittää, miten sähkövarastopalvelujen ostamista käsitellään valvontamallissa, jotta se voitaisiin katsoa tasavertaiseksi muiden verkkoinvestointien kanssa. Nykyisten valvontamenetelmien valossa sähkövarastoja ei ole aiheellista tarkastella syvällisesti, sillä sähkövarastojen sisällyttäminen verkkoliiketoimintaan edellyttää lainsäädäntömuutoksia, jolloin Energiaviraston on arvioitava lainsäädäntömuutoksien vaikutus valvontamenetelmiin.

LÄHTEET

Alanen, R., Koljonen, T., Hukari, S., Saari, P. (2003). Energian varastoinnin nykytila, VTT Tiedotteita 2300, VTT, Espoo, 169 s.

Carnegie, R., Gotham, D., Nderitu, D., Preckel, P.V. (2013). Utility Scale Energy Storage Systems: Benefits, Applications, and Technologies, State Utility Forecasting Group, 90 p.

Chatzivasileiadi, A., Ampatzi, E., Knight, I. (2013). Characteristics of electrical energy storage technologies and their applications in buildings, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 25, pp. 814-830

Cole, W. J., Marcy, C., Krishnan, V. K., Margolis, R. (2016). Utility-scale lithium-ion storage cost projections for use in capacity expansion models, North American Power Symposium (NAPS), pp. 1-6.

Díaz-González, F., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O. (2016). Energy Storage in Power Systems, 1st ed. John Wiley & Sons Inc, United Kingdom, 311 p.

EASAC (2017). Valuing dedicated storage in electricity grids, European Academies Science Advisory Council, EASAC policy report 33, 2017, 42 p.

Eduskunta (2017a). Eduskunnan tiedonsaanti EU-asioista, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.6.2017): https://www.eduskunta.fi/FI/euasiat/EU_lainsaadantoasiat/Sivut/default.aspx

Eduskunta (2017b). Valtioneuvoston U-kirjelmä U 6/2017 vp, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.6.2017): https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/Kirjelma/Sivut/U_6+2017.aspx

Eduskunta (2017c). Valiokunnan lausunto TaVL192017 vp – U 6/2017 vp, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 20.6.2017): https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/Lausunto/Sivut/TaVL_19+2017.aspx

Energiavirasto (2015a). Sähkönjakeluverkon verkkokomponentit ja yksikköhinnat 2016–2023, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 25.1.2017): <https://www.energiavirasto.fi/web/guest/verkkokomponentit-ja-yksikkohinnat-2016-2023>

Energiavirasto (2015b). Valvontamenetelmät neljännellä 1.1.2016 – 31.12.2019 ja viidennellä 1.1.2020 – 31.12.2023 valvontajaksolla, Helsinki, 120 s.

Energiavirasto (2015c). Energiaviraston suositus – Sähkö- ja maakaasuliiketoimintojen laskennallinen ja oikeudellinen eriyttäminen. Dnro 2449/421/2015, 36 s. Saatavissa: https://www.energiavirasto.fi/documents/10191/0/Eriytt%C3%A4missuositus+2449_421_2015.pdf/b1e97829-3dca-48fd-8c2b-efaeaf7d4bb

EUR-Lex (2015). Euroopan unionin direktiivit, EUR-Lex – I14527, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21.6.2017): <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=LEGIS-SUM:I14527>

EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON DIREKTIIVI 2009/72/EY, annettu 13 päivänä heinäkuuta 2009, sähkön sisämarkkinoita koskevista yhteisistä säännöistä ja direktiivin 2003/54/EY kumoamisesta (2009). L 211/55. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/ALL/?uri=celex%3A32009L0072>

Euroopan Komissio (2016). Ehdotus EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON DIREKTIIVI sähkön sisämarkkinoita koskevista yhteisistä säännöistä, COM(2016) 864 final. Saatavissa: [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:52016PC0864R\(01\)&from=EN](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:52016PC0864R(01)&from=EN)

European Commission (2017). Energy storage – the role of electricity, Commission Staff Working Document, SWD(2017) 61 final, Brussels, 25 p.

Eyer, J.M., Corey, G.P. (2010). Energy storage for the electricity grid: benefits and market potential assessment guide: a study for the DOE Energy Storage Systems Program, USDOE, United States, 93 p.

Fingrid (2017a). Reservilajit, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.7.2017): <http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservilajit/Sivut/default.aspx>

Fingrid (2017b). Taajuuden palautusreservit, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.7.2017): http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservilajit/Taajuuden_palautusreservit/Sivut/default.aspx

Fingrid (2017c). Taajuuden vakautusreservit, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 7.3.2017): http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservilajit/Taajuuden_vakautusreservit/Sivut/default.aspx

Fortum (2017). Pohjoismaiden suurin akku otettiin käyttöön Järvenpäässä, Fortum Oyj, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 4.7.2017): <https://www.fortum.com/fi/media/pages/pohjoismaiden-suurin-akku-otettiin-kayttoon-jarvenpaassa.aspx>

Gouardères, F. (2015). Energy Storage: Which Market Designs and Regulatory Incentives are needed?, Study for the ITRE Committee, European Union, 84 p.

Haakana, J., Lassila, J., Kaipia, T., Partanen, J. (2013). Utilisation of energy storages to secure electricity supply in electricity distribution networks, 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013), Stockholm, 10–13 June, 2013, IET, pp. 1-4.

Huff, G., Akhil, A.A., Kaun, B.C., Rastler, D.M., Chen, S.B., Cotter, A.L., Bradshaw, D.T., Gauntlett, W.D., Currier, A.B. (2013). DOE/EPRI Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA, SAND2013-5131, Sandia Report, United States, 166 p.

IEC Market Strategy Board (2011). Electrical Energy Storage, International Electrotechnical Commission, Geneva, 78 p.

International Energy Agency (2014a). Power of Transformation - Wind, Sun and the Economics of Flexible Power Systems, OECD Publishing, Paris, France, 234 p.

International Energy Agency (2014b). Technology Roadmap: Energy Storage, OECD/IEA, France, 64 p.

Investopedia (2017). Arbitrage, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21.2.2017): <http://www.investopedia.com/terms/a/arbitrage.asp>

Kaipia, T. (2015). Jakeluverkkoon (kiinteästi) liitetyt energiavarastot, verkkoyhtiö ja sähkömarkkinat, esitysmateriaali, Sähkön laadun hallinta -asiantuntijaseminaari, Luosto, Sodankylä, 9.–13.2.

Karppinen, J. (2017). Pohjoismaiden suurin sähkövarasto taipuu moneen, Helen blogi, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 24.2.2017): <http://blogi.helen.fi/pohjoismaiden-suurin-sahkovarasto-taipuu-moneen/>

Koller, M., Borsche, T., Ulbig, A., Andersson, G. (2015). Review of grid applications with the Zurich 1 MW battery energy storage system, Electric Power Systems Research, Vol. 120, pp. 128-135

Kousksou, T., Bruel, P., Jamil, A., El Rhafiki, T, Y Zeraouli. (2014). Energy storage: Applications and challenges, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 120, pp. 59-80.

Lakervi, E., Partanen, J. (2008). Sähkönjakelutekniikka, Otatieto, Helsinki, 295 s.

Markkula, J., Vilppo, O., Järventausta, P., Hakala, T., Lähdeaho, T. (2016). Profitability of different li-ion batteries as back-up power in LVDC distribution network, CIRED Workshop 2016, Helsinki, 14–15 June, 4 p.

Mittausasetus (2009). Valtioneuvoston asetus sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta, A 66/2009. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2009/20090066>

Mittausasetus (2016). Valtioneuvoston asetus sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta annetun valtioneuvoston asetuksen muuttamisesta, A 217/2016. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20160217>

Nieminen R. (2017). Project Manager, Business Development, Trading and asset optimization, Fortum Power & Heat Oy. Sähköpostihaastattelu 3.7.2017.

Nuutinen, P., Lana, A., Kaipia, T., Mattsson, A., Pinomaa, A., Peltoniemi, P., Karppanen, J., Partanen, J., Silventoinen, P., Matikainen, M. (2015). Implementing a battery energy storage system with a converterless direct connection to an LVDC distribution network, 23rd International Conference on Electricity Distribution, Lyon, 15–18 June, 5 p.

Nuutinen, P. (2017). Tutkijatohtori, LUT Sähkötekniikka, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähköpostihaastattelu 21.4.2017.

Palizban, O., Kauhaniemi K. (2016). Energy storage systems in modern grids – Matrix of technologies and applications, Journal of Energy Storage, Vol. 6, pp. 248-259

Partanen, J., Viljainen, S., Lassila, J., Honkapuro, S., Salovaara, K., Annala, S., Makkonen, M. (2014). Sähkömarkkinat - opetusmoniste, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 85 s.

Ruester, S., Vasconcelos, J., He, X., Chong, E., Glachant, J. (2012). Electricity Storage: How to Facilitate its Deployment and Operation in the EU, THINK Report, 81 p. Saatavissa: <http://www.eui.eu/Projects/THINK/Research/Topic8.aspx>.

Sandia Corporation (2016). DOE Global Energy Storage Database, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 26.1.2017): http://www.energystorageexchange.org/projects/data_visualization

Saulny, N. (2017). Operation and Profitability of Batteries in Electricity Reserve Markets, master's thesis, Aalto University, School of Engineering, Espoo, 76 p. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201707046003>

Saunders, M., Lewis, P., Thornhill, A. (2009). Research Methods for Business Students, 5th edition, Prentice Hall, Harlow, 614 p.

Sederlund, J. (2008). Taajuuden ylläpito sähköjärjestelmässä, Fingrid Oyj:n lehti, No. 3, s. 30–31

Sipola T. (2016). Helen varastoi sähköä jättiakuun, Reilua energiaa – Energiaviraston sidosryhmälehti, No. 4, s. 10–12

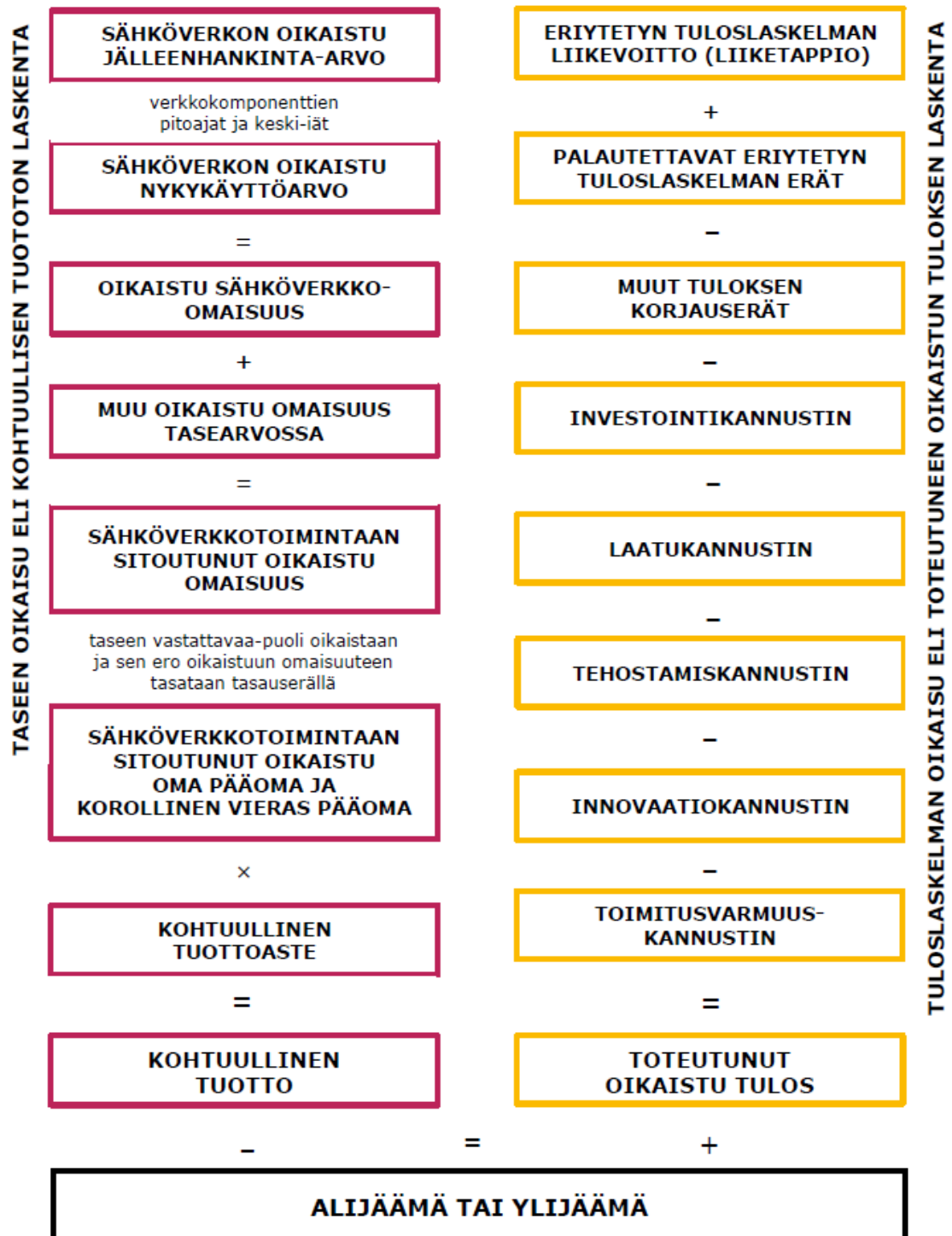
Sähkömarkkinalaki (2013). L 588/2013. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130588>

U.S. Department of Energy (2013). Grid Energy Storage, USDOE, 66 p.

Vilppo, O., Markkula, J., Järventausta, P., Repo, S., Hakala, T. (2017). Cost-benefit analysis for using the li-ion batteries in low-voltage network for decreasing outage time experienced by customers, 24th International Conference on Electricity Distribution, Glasgow, 12–15 June, 5 p.

Zakeri, B., Syri, S. (2015). Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 42, pp. 569-596

LIITE A: YHTEENVETO VALVONTAMENELTEMISTÄ



Kuva 20. Yhteenveto valvontamenetelmistä valvontajaksoille 2016–2019 ja 2020–2023 (Energiavirasto 2015b).

LIITE B: LOMAKEKYSELYPOHJA

Arvoisa verkkonhaltija,

Teen Energiavirastolle diplomityötä, jonka aiheena on ”Sähkövarastojen käyttö verkkoliiketoiminnassa”. Diplomityön tarkastaa professori Pertti Järventausta Tampereen teknillisestä yliopistosta.

Kiinnostus sähkövarastoja kohtaan on ollut kasvussa, ja verkkoyhtiön roolista sähkövaraston omistuksessa on käyty paljon keskustelua. Tällä hetkellä sähkövaraston asema sähkömarkkinain kannalta on epäselvä, sillä sähkövarastoa ei ole käsitteenä määritelty laissa. Energiaviraston linjaus on ollut, etteivät kapasiteetiltaan suuret kiinteät varastot voi kuulua verkkoliiketoimintaan.

Euroopan komissio julkaisi marraskuussa 2016 niin kutsutun talvipaketin, joka sisältää ehdotuksen uudeksi sähkömarkkinadirektiiviksi. Direktiiviehdotuksessa energiavaroisto on määritelty käsitteenä ja verkkonhaltijan roolia varastojen omistuksessa selvennetty. Direktiiviehdotuksen mukaan kanta- tai jakeluverkonhaltija ei pääsääntöisesti voi omistaa, käyttää ja hallinnoida varastoa. Direktiiviehdotus mahdollistaa kuitenkin poikkeuksen, jonka mukaan verkkonhaltijalle voidaan myöntää lupa varaston omistukseen, käyttöön ja hallintointiin tietyillä ehdoilla.

Diplomityön tavoitteena on selvittää, voisiko varastoja käyttää verkkoliiketoiminnassa. Tätä varten työssä arvioidaan sähkövarastojen teknistä sopivuutta ja taloudellista tehokkuutta sähkönjakelujärjestelmässä. Lisäksi selvitetään, millaisiin käyttötarkoituksiin sähkövarastoja voitaisiin käyttää jakeluverkossa Suomessa. Tämän kyselyn tarkoituksena on selvittää verkkonhaltijoiden mielipiteitä ja ajatuksia sähkön varastointiin liittyen. Kysely on jaettu kahteen osaan. Ensimmäisessä osassa selvitetään, mihin tarkoitukseen verkkonhaltijat voisivat varastoa mahdollisesti käyttää ja mitä esteitä varastoinnille on. Toisessa osassa selvitetään mielipiteitä direktiiviehdotukseen liittyen.

Mikäli teillä on jotain kysyttävää, keskustelen mielelläni aiheesta lisää.

Pyydän vastaamaan kyselyyn 21.4.2017 mennessä.

Kiitos vastauksista!

Valtteri Varonen
Diplomityöntekijä
Energiavirasto – Verkot
puh. 029 5050 089
valtteri.varonen@energiavirasto.fi

Lisätietoja antavat myös verkkoinsinööri Joel Seppälä (puh. 029 5050 488) ja johtaja Veli-Pekka Saajo (puh. 029 5050 023).

1. Valitse vaihtoehdoista se, joka parhaiten kuvaa sähkön varastoinnin tietämystä yhtiössänne*

- Sähkön varastoinnista ei ole käyty yhtiössämme lainkaan keskustelua
- Olemme perehtyneet aiheeseen hieman ja olemme keskustelleet varastoinnista yleisellä tasolla
- Olemme perehtyneet aiheeseen, tunnemme pääpiirteittäin varastoinnissa käytettävät teknologiavaihtoehdot, varastoinnin mahdollisuudet, esteet ja teknologian nykytilan
- Olemme perehtyneet aiheeseen, tunnemme hyvin varastoinnissa käytettävät teknologiavaihtoehdot, varastoinnin mahdollisuudet, esteet ja teknologian nykytilan
- Olemme perehtyneet aiheeseen, tunnemme syvällisesti varastoinnissa käytettävän teknologian, varastoinnin mahdollisuudet, esteet ja teknologian nykytilan. Olemme tehneet aiheesta tutkimusta ja/tai pilotoineet varastointia
- En osaa sanoa
- En halua vastata

2. Olemme tiedostaneet Euroopan komission direktiiviehdotuksen ratkaisun varastointiin liittyen*

- Emme tunne direktiiviehdotuksen sisältöä tältä osin
- Olemme kuulleet direktiiviehdotuksen sisällöstä
- Olemme tutkineet direktiiviehdotuksen vaikutuksia verkkoliiketoimintaan
- En osaa sanoa
- En halua vastata

Ensimmäinen osa: Nykytilanne vuonna 2017

Tässä osassa pohditaan sähkön varastoinnin nykytilannetta vuonna 2017. Pyydän vastaamaan kysymyksiin juuri teidän yhtiönne näkökulmasta.

3. Kuinka todennäköisenä pidätte sähkövaraston hyödyntämistä jakeluverkkotoiminnassanne

	ei lainkaan todennäköistä	1	2	3	4	erittäin todennäköistä	5	En halua osaa vastata
seuraavan viiden vuoden aikana? *	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
seuraavan 20 vuoden aikana? *	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

4. Mihin käyttötarkoitukseen sähkövarastoa voisi mahdollisesti käyttää verkossanne?

	ei lainkaan todennäköistä	1	2	3	4	erittäin todennäköistä	5	En halua osaa vastata
Asiakkaan kokemien keskeytysten vähentäminen *	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Investointitarpeen lykkäys tai esto *	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Jännitteen säätö *	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Joku muu käyttötarkoitus, mikä?

Anna arvio käyttöönoton todennäköisyydestä (asteikolla 1 ... 5).

Toinen osa: Euroopan komission talvipaketti

Direktiiviehdotuksen mukaan verkonhaltija ei voi pääsääntöisesti omistaa sähkövarastoa, mutta ehdotuksessa mahdollistetaan kuitenkin poikkeustapaukset. Lyhyesti sanottuna ja vapaasti suomennettuna toimivaltainen viranomainen voi myöntää verkonhaltijalle luvan varaston omistukseen, mikäli avoimen tarjouskilpailun jälkeen varastolle ei löydy halukkaita markkinapohjaisia omistajia ja varaston käyttö on perusteltua verkon tehokkaan käytön kannalta. Lisäksi varaston omistus tulee kilpailuttaa vähintään viiden vuoden välein. Mikäli varastolle löytyy markkinapohjainen omistaja, täytyy verkonhaltijan luopua kyseisestä toiminnasta.

Alkuperäinen teksti talvipaketista:

Article 36

Ownership of storage facilities

1. Distribution system operators shall not be allowed to own, develop, manage or operate energy storage facilities.

2. By way of derogation from paragraph 1, Member States may allow distribution system operators to own, develop, manage or operate storage facilities only if the following conditions are fulfilled:

- (a) other parties, following an open and transparent tendering procedure, have not expressed their interest to own, develop, manage or operate storage facilities;
- (b) such facilities are necessary for the distribution system operators to fulfil its obligations under this regulation for the efficient, reliable and secure operation of the distribution system; and
- (c) the regulatory authority has assessed the necessity of such derogation taking into account the conditions under points (a) and (b) of this paragraph and has granted its approval.

3. Articles 35 and Article 56 shall apply to distribution system operators engaged in ownership, development, operation or management of energy storage facilities.

4. Regulatory authorities shall perform at regular intervals or at least every five years a public consultation in order to re-assess the potential interest of market parties to invest, develop, operate or manage energy storage facilities. In case the public consultation indicates that third parties are able to own, develop, operate or manage such facilities, Member States shall ensure that distribution system operators' activities in this regard are phased-out.

Talvipaketti luettavissa kokonaan [tästä linkistä](#).

Arvioikaa direktiiviehdotuksen artiklan 36 esittämää ratkaisua.

12. Direktiiviehdotuksen mukaan verkonhaltija ei voi pääsääntöisesti omistaa sähkövarastoja.

täysin eri mieltä täysin samaa mieltä En halua osaa vastata

1 2 3 4 5 sanoa

Ehdotus on hyvä *

Millä perusteella?

13. Direktiiviehdotus antaa mahdollisuuden hakea poikkeuslupaa varaston omistukseen.

täysin eri mieltä täysin samaa mieltä En halua osaa vastata

1 2 3 4 5 sanoa

Tulemme hakemaan poikkeuslupaa *

14. Talvipaketin mukaan varastojen omistus pitäisi ensisijaisesti olla markkinapohjaisilla toimijoilla. Jos verkonhaltija ei voisi omistaa ja hallinnoida sähkövarastoa, varastojen tuottamia palveluita voisi ostaa markkinapohjaisilta toimijoilta.

Mitä mieltä olette sähkövarastopalveluiden ostamisesta?