



Akustovaraston hyödyntäminen osana sähköverkkoa

Olli Mikonmäki

OPINNÄYTETYÖ
Joulukuu 2024

Sähkö- ja automaatiotekniikan insinööritutkinto (240 op)
Sähkövoimatekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen Ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma (240 op)
Sähkövoimatekniikka

MIKONMÄKI OLLI:
Akustovaraston hyödyntäminen osana sähköverkkoa

Opinnäytetyö 44 sivua, joista liitteitä 8 sivua
Joulukuu 2024

Tämä opinnäytetyö tehtiin ALTEN Finland Oy:n asiakkaan esiselvitystarpeesta akustovaraston hyödyntämisestä osana prosessituotantolaitoksen sähköverkkoa. Opinnäytetyössä selvitetään, kuinka akustovarastoja voidaan hyödyntää osana prosessituotantolaitoksen sähköverkkoa tällä hetkellä ja lähitulevaisuudessa. Työssä perehdytään akustovaraston valintaan oleellisesti vaikuttaviin tekijöihin sekä selvitetään akustovaraston soveltumista asiakkaan ehdottamaan soveltamiskohteeseen.

Opinnäytetyössä tarkastellaan erilaisia akustovarastoissa hyödynnettäviä akuteknologioita ja perehdytään tyypillisen akustovaraston fyysiseen rakenteeseen. Lisäksi vertaillaan akustovarastoa sen kanssa kilpaileviin energianvarastointimenetelmiin ja selvitetään millaisia käytännön toteutuksia sekä ominaisuuksia niillä on.

Tässä työssä perehdytään lisäksi energiamurrokseen, akustovaraston hyödyntämiskeinoihin ja analysoidaan asiakkaalta saatujen lähtötietojen mukainen esimerkkitapaus. Esimerkkitapauksen analysoinnissa sovelletaan aikaisemmin tutkittua tietoa ja sen perusteella luodaan asiakkaalle laaja kuva tämän hetken energiavarastoinvestointiin vaikuttavista tekijöistä.

Opinnäytetyön menetelmä oli tutkimuksellinen ja sen tietolähteinä käytettiin laajasti alan kirjallisuutta, vertaisarvioituja verkkolähteitä ja opintojen aikana omaksettua tietoa. Työn tuloksena saatiin kattava esiselvitys akustovarastoinvestoinnin sekä muiden energianvarastointityyppien ominaisuuksista. Laajempien lähtötietojen avulla työn tuloksena saatua esiselvitystä voivat hyödyntää energiavarastoinvestointia harkitsevat toimijat, toteuttaakseen kohteisiinsa optimaalisesti soveltuvan energiavarastoratkaisun.

Asiasanat: akku, akustovarasto, energiavarasto, energiamurros, sähköverkko

ABSTRACT

Tampereen Ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Electrical and Automation Engineering Degree (240 ECTS)
Power Engineering

MIKONMÄKI OLLI:

Exploiting battery storage as part of the electricity network

Bachelor's thesis 44 pages, appendices 8 pages
December 2024

The study was done for customer of ALTEN Finland Oy who needed a pre-study on how a battery storage could be utilised as part of electricity network at process plant. The aim of this study is to explore how battery storages can be utilised as part of the electricity network at present and soon. The study examines the factors that affect the choice of battery storage and the suitability of the battery storage for the application proposed by the customer.

The first part of the study examines various battery technologies used in battery storage systems and explores the physical structure of typical battery storage. In the next chapter of the study battery storage will be compared to different types of energy storages. The practical implementations and characteristics of different types of energy storages will be compared.

Third part of the study explores how battery storage works as part of an electricity grid including the energy transition, the ways of utilising the battery storage, and an example case from the customer. In analysing the example case, the previously studied information is applied, and the aim was to give the customer a clear picture of the drivers of the battery storage investment and how they match the example case.

The method of the study was research-based and information for the study was collected from books and peer-reviewed web articles. The result of the study is a comprehensive document of the characteristics of energy storage field, which will be useful for operators and designers who plan to set up or invest in energy storage.

Key words: battery, battery storage, energy storage, energy transition, electricity network

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	AKUSTOVARASTO	7
2.1	Akkuteknologiat.....	7
2.1.1	Lyijyakku.....	8
2.1.2	Ni-MH-akku	8
2.1.3	Virtausakut	9
2.1.4	Litiumionakut	10
2.1.5	Suola-akut	11
2.2	Akustovaraston rakenne	13
2.2.1	Akkumoduulit.....	14
2.2.2	Akustovaraston ohjaus	15
2.2.3	Akustovaraston hyötysuhde	15
3	KILPAILEVAT ENERGIAVARASTOTYYPIT.....	17
3.1	Potentiaalienergiavarastot.....	18
3.2	Kineettiset energiavarastot.....	19
3.3	Lämpöenergiavarastot	19
3.4	Pneumaattiset energiavarastot	20
3.5	Kemialliset energiavarastot.....	20
4	AKUSTOVARASTO OSANA SÄHKÖVERKKOA.....	21
4.1	Energiamurros.....	21
4.2	Prosessituotantolaitoksen sähköverkko	24
4.2.1	UPS-Järjestelmät.....	24
4.3	Akustovaraston hyödyntämiskeinot.....	25
4.3.1	Energiakauppa akustovarastolla.....	25
4.3.2	Tasepoikkeamamaksujen leikkaaminen	26
4.3.3	Säätösähkömarkkinat	26
4.3.4	Tehotariffien leikkaaminen.....	27
4.3.5	Sähköverkon tukeminen	27
4.3.6	Black start -jälleenkäynnistys	27
4.3.7	Sähkön laadun varmistaminen	28
5	ESIMERKKISOVELLUS	29
6	POHDINTA	31
	LÄHTEET.....	32
	LIITTEET	37
	Liite 1. Kulutushuippujen leikkaaminen (esitelmä)	37

LYHENTEET JA TERMIT

AC	Alternative current; Vaihtosähkö
BMS	Battery Management System; Akunhallintajärjestelmä
DC	Direct current; Tasasähkö
Dod	Depth of Discharge; Purkaussyvyys
EMC	Electromagnetic Compability; sähkömagnettinen yhteensopivuus
HVAC	Heating, ventilation and air conditioning; Lämmitys, ilmanvaihto ja ilmastointi
kVA	Kilovolttiampeeri
kW	Kilowatti
kWh	Kilowattitunti
LFP	Lithium iron phosphate; Litium-rautafosfaatti
Li-ion	Lithium-ion; Litiumioni
MW	Megawatti
MWh	Megawattitunti
Na-S	Natrium-sulfur; Natriumrikki
Ni-Cd	Nickel-cadmium; Nikkeli-Kadmium
Ni-MH	Nickel-metal hydride; Nikkelimetallihydridi
NMC	Nickel manganese cobalt; Nikkelimagnaanikoboltti
PCS	Power Conversion System; Tehonsiirtojärjestelmä
RTE	Round Trip Efficiency; Hyötysuhde sisääntulevan ja ulostulevan energian välillä
SoC	State of Charge; Varaustila
SoH	State of Health; Kuntoisuus
VFB	Vanadium Flow Battery; Vanadium-virtausakku
ZEBRA	Zero Emission Battery Research

1 JOHDANTO

Akustovarastojen hyödyntäminen osana sähköverkkoja on kasva trendi, mikä on nähtävissä viime vuonna julkaistusta The World Bank Group:n ohjeistuksesta. Viime vuosina akustovarastoja kohtaan kasvanut investointihalukkuus on herättänyt kiinnostuksen myös sähköverkkoyhtiöiden ulkopuolisissa toimijoissa.

Tämä opinnäytetyö tehdään ALTEN Finland Oy:n asiakkaan toimeksiantona. Työssä tutkitaan akustovarastojen hyödyntämismahdollisuuksia osana prosessituotantolaitoksen sähköverkkoa. Tavoitteena tässä työssä on tehdä laaja esiselvitys, jossa tarkastellaan akustovarastoja ja niiden tuomia mahdollisuuksia osana sähköverkkoa.

Selvitys aloitetaan tutustumalla yksittäisen akuston ominaisuuksiin ja akustovaraston rakenteeseen. Perehtymällä akustovaraston toimintaan liittyviin keskeisiin osa-alueisiin sekä niiden kanssa kilpailevien energiavarastotyyppien ominaisuuksiin, luodaan käsitys energianvarastointisektorilla käytössä olevien teknologioiden tuomista mahdollisuuksista sekä rajoitteista.

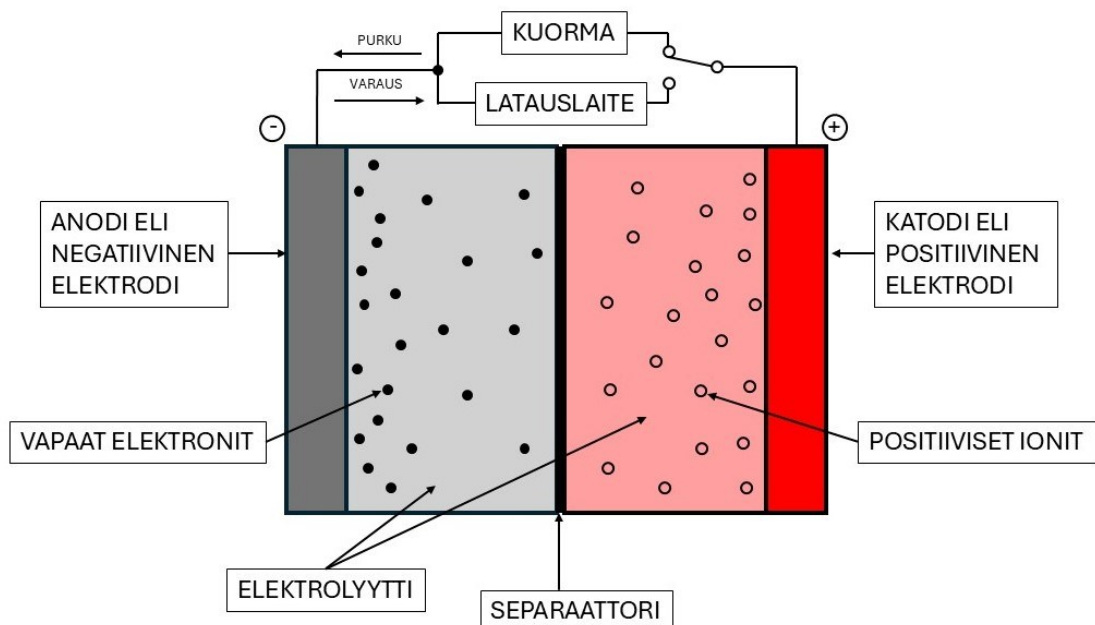
Akustovarasto ei itsessään tuota toimijalle lisäarvoa, vaan se tarvitsee rinnalleen ulkoisen sähköverkon. Tässä työssä selvitetään lisäksi yleisessä sähköverkossa tapahtuvan energiamurroksen vaikutusta akustovarastoinvestointeihin sekä akustovarastojen mahdollisia hyödyntämiskeinoja osana muuta sähköverkkoa. Työn tilanneelta asiakkaalta saatiin lisäksi yksi mahdollinen sähkövaraston hyödyntämiskohde, jonka tarkemmassa analysoinnissa käytettiin tässä opinnäytetyössä aiemmin omaksuttua tietoa.

2 AKUSTOVARASTO

2.1 Akkuteknologiat

Erilaisia akustovarastoissa hyödynnettäviä akkuteknologioita on olemassa kymmeniä. Tällä hetkellä valmistettavista akustoista suurin osa perustuu litiumionteknologiaan. Akustovarastoissa käytettäviä akkuteknologioita on olemassa useita, mutta niiden rakenne on muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta samankaltainen.

Kuviossa 1 on esitetty tyypillisen akkukennon rakenne sekä virran kulkusuunnat akkua ladattaessa ja purettaessa. Tyypillisesti akkukenno sisältää varauksia kuljettavan nestemäisen elektrolyytin lisäksi positiivisen elektrodin eli katodin ja negatiivisen elektrodin eli anodin. Akkukennon elektrolyyttiliuoksessa on lisäksi ohut separaattori, jonka tehtävä on erottaa akun anodi ja katodi fyysisesti toisistaan, päästämien kuitenkin varauksenkuljettajat kulkemaan positiivisen ja negatiivisen elektrolyyttiliuoksen välillä (Orendorff 2012, s.61).



KUVIO 1. Akun rakenne (EASE 2018)

2.1.1 Lyijyakku

Lyijyakku on laajimmalle levinnyt akkuteknologia. Sen on kehittänyt ranskalainen fyysikko Gaston Planté vuonna 1859 (Eriksson 2001, s. 3). Lyijyakun kenno koostuu kahdesta lyijylevystä, jotka ovat upotettuina rikkihappoa sisältävään elektrolyyttiin. Lyijylevyjen välissä on separaattori. Lyijyakku on yleisesti käytetty akkutyypin, jota käytetään erityisesti ajoneuvoissa polttomoottorin käynnistinmoottorin tehonlähteenä. Kyseisen akkutyypin ominaisuuksista suurin heikkous on huono energiakapasiteetti massan suhteen, joka on korkeintaan noin 50 Wh/kg. Akustovarastoissa huono energiakapasiteetti massan suhteen ei ole kriittinen ongelma, mutta lyijyakun lyhyt noin 500 latausyklin pituinen elinkaari ja huono syväpurkauksien kesto ovat. Lyijyakun nimellinen kennojännite on noin 2 voltia. (Fusalba, Martinet & Brunet 2013, s.185)

2.1.2 Ni-MH-akku

Ni-MH-akku rakentuu varautuneesta positiivisesta elektrodista, joka koostuu nikkelioksidihydoksidistä ja negatiivisesta elektrodista, joka koostuu vetyjä absorboivasta metalliseoksesta. Elektrolyyttinä Ni-MH-akussa ovat hydroksidi ja vesimolekyylit, jotka kuljettavat vetyioneja elektrodilta toiselle. Negatiivisen elektrodin metalliosan koostumuksia on Ni-MH-akuissa erilaisia. Metalliseoksia ovat esimerkiksi AB₂- ja AB₅-seokset. (Broussely & Pistoia 2007, s.77–78)

Ni-MH-akku on käytännössä korvannut vanhemmat Ni-Cd-akut. Ni-Cd-akkujen suosion hiipuminen on johtunut pääosin kadmiumin myrkyllisyydestä. Ni-MH-akun etuna Ni-Cd-akkuun verrattuna on lisäksi se, etteivät Ni-MH-akun sisältämät vesimolekyylit osallistu sen sähkökemialliseen reaktioon, mistä johtuen akkukennosta pystytään valmistamaan energiatiheämpi (Broussely & Pistoia 2007, s.228). Ni-MH-akun hyviä puolia ovat myös sen varauksensäilytyskyky sekä suurempi energiakapasiteetti massan suhteen. Energiakapasiteetin suhde massaan on Ni-MH-akuissa parhaimmillaan noin 120 Wh/kg ja akkukennojen nimellinen kennojännite on noin 1,2 voltia. (Fusalba, Martinet & Brunet 2013, s.189)

2.1.3 Virtausakut

Virtausakut eroavat tavallisesta akkurakenteesta siinä, että ne sisältävät akkukennoston ulkopuolisia komponentteja, joita ovat elektrolyyttisäiliöt, -pumput ja putkistot. Virtausakussa joko nestemäisiä tai kaasumaisia elektrolyyttejä säilytetään erillisissä säiliöissä, joista niitä pumpataan akkukennoston positiiviselle ja negatiiviselle puolelle. Akkukennostossa on kennon ulkopuolelle tulevat elektrodit kuten tavallisissakin akuissa. Positiivisen ja negatiivisen elektrolyytin erottava separaattori on myös virtausakuissa kuten tavallisessakin akkurakenteessa. (Rajarithnam & Vassallo 2016, s. 11)

Erilaisia virtausakkuvariaatioita on testattu useita, niiden elektrodipari rakentuu esimerkiksi seuraavista materiaaleista:

- vanadium
- sinkki/bromi
- vety/bromi
- rauta/bromi
- kromi
- koboltti
- sinkki/cerium
- natrium/jodi
- kupari
- rauta/ilma
- sinkki/polyjodi
- polytiofeeni
- nestemäinen litium/bromi
- rauta/vanadium (Rajarithnam & Vassallo 2016, s. 3)

Virtausakun etuna on erillisten elektrolyyttisäiliöiden sallima mahdollisuus elektrolyyttiliuosten vaihtamiseen, mikä mahdollistaa virtausakuille pitkän elinkaaren (yli 12 000 sykliä). Lisäksi virtausakun akkukapasiteetin kasvattaminen on helppoa. Alkuperäisten elektrolyyttisäiliöiden vaihtaminen isompiin kasvattaa akun kapasiteettia. Tehon lisääminen vaatii isompaa separaattoripinta-alaa, joka on hankalemmin toteutettavissa. Virtausakku tarvitsee ulkoisten komponenttiansa

takia enemmän tilaa ympärilleen, kuin muut tyypillisemmät akkuteknologia rakenteet. (EASE 2016)

VFB-virtausakku

VFB-akku on patentoitu vuonna 1986. Suurin osa VFB-akkuteknologian patenteista on japanilaisten ja kanadalaisten hallussa, minkä takia sen suosio esimerkiksi kiinassa on ollut heikkoa (Li 2015, s. 807). VFB-akussa on muihin virtausakkuihin verrattuna etuna se, että VFB-akun molemmat elektrolyytit ovat vanadiumia. Tämän takia positiivisen ja negatiivisen elektrolyytin vähäinen sekoittuminen ei vaikuta akun toimintaan. (Minke 2018, s. 66)

VFB-akun energiakapasiteetin suhde massaansa on noin 25 Wh/kg, joka on huomionpi kuin esimerkiksi lyijyakussa. Se ja virtausakulle tyypillinen monimutkaisempi akkurakenne ovat VFB-akun suurimpia heikkouksia. VFB-akkuteknologiaa pidetään kuitenkin yhtenä lupaavimmista tulevaisuuden akustovarastoteknologioista (Minke 2018, s. 66). (Vynnycky 2011, s. 2242)

Sinkki-bromiakku

Sinkki-bromiakun kehittämiseen investoitiin paljon 1970 ja 1980-luvuilla, kunnes kyseisen akkuteknologian ongelmat tulivat yleisesti tietoon. Niitä olivat esimerkiksi galvanoitavan sinkkielektronin kiteytymisestä johtuvat oikosulut ja elektrodien sekä akkukuoren korroosiosta johtuva bromin tihkuminen rakennemateriaaleihin. Nämä ongelmat veivät huomiota sinkki-bromi-akusta muihin virtausakku-tyyppeihin. (Rajarithnam & Vassallo 2016, s. 2–3)

Sinkki-bromiakkujen energiatiheys massayksikköä kohden on noin 60–85 Wh/kg. Niiden etuna on edullinen elektrolyytin ja muiden raaka-aineiden hinta. Sinkki-bromiakkujen valmistaminen on myös edullisempaa kuin monien muiden virtausakkutyyppeiden. (Rajarithnam & Vassallo 2016, s. 2–3)

2.1.4 Litiumionakut

Litiumionakut ovat tällä hetkellä suosittu akkuteknologia akustovarastoratkaisuissa. Litiumionakkujen etuna on niiden yli kolmen voltin nimelliset kennojännitteet, jotka ovat parhaimmillaan kolminkertaisia verrattuna NiMH-akkuihin ja kaksinkertaisia verrattuna lyijyakkuihin. Korkeasta nimellisestä kennojännitteestä ja pienestä sisäisestä resistanssista johtuen litiumionakut ovat hyvin energiatiheitä, ja niissä tapahtuu vain vähän itsepurkautumista. (Seongyun ym. 2020, s.1)

Suosituimmat litiumionakkutyypit akustovarastokäytössä ovat tällä hetkellä NMC-akku ja LFP-akku. NMC-akun katodi rakentuu nimensä mukaisesti nikkelistä, magnaanista ja koboltista. LFP-akun katodi materiaaleina käytetään vastaavasti litiumrautafosfaattia.

NMC-akku

NMC-akun etuna on sen korkea nimellinen kennojännite 3,7 V sekä sen suuri C-arvo, joka tarkoittaa sitä, että akun kyky purkaa ja varata energiaa ovat akun kapasiteettiin nähden hyvät. NMC-akun heikkoudet ovat sen kilpailevaan LFP-akkuteknologiaan verrattuna hankalasti saatavat ja kalliit raaka-aineet sekä sen lyhyempi elinkaari noin 1000–2000 lataussykliä.

LFP-akku

LFP-akku on litiumionakuista matalajännitteisempi. Sen nimellinen kennojännite on noin 3,2 V, mikä on kuitenkin huomattavasti korkeampi kuin lyijy- tai NiMH-akulla. LFP-akku on lisäksi halvempi sekä ympäristöystävällisempi valmistaa kuin sen kanssa kilpaileva litiumioniteknologiaan perustuva NMC-akku. LFP-akun elinikä on litiumionakuksi pitkä eli noin 2500–3000 lataussykliä.

2.1.5 Suola-akut

Suola-akkuteknologian perustana on elektrolyytti, joka on valmistettu suolaliuoksesta eli natriumista. Suolaliuoksen pitäminen nestemäisenä vaatii korkeita lämpötiloja, mikä on suola-akkujen heikkous. Pelkästään akun varauksen purkamisesta ja lataamisesta syntyvät kemialliset reaktiot akkukennon sisällä eivät tuota tarpeeksi lämpöenergiaa säilyttääkseen suola-akun suolaliuoksen sulana. Toimiakseen on suola-akun lämpötila pidettävä tyypillisesti 270 C° ja 360 C° välillä.

Tämä johtuu siitä, että akun sisältämän suolaliuoksen on pysyttävä koko ajan sulana. Suola-akku tarvitsee siis rinnalleen erillisen lämmitysjärjestelmän, joka heikentää suola-akun kokonaishyötysuhdetta. Korkealla akun lämpötilalla on myös positiivinen vaikutus. Korkean toimintalämpötilan etuna on suola-akun edullisemmat jäähdytyskustannukset sekä parempi toimintavarmuus asennuskohteissa, joissa on valmiiksi korkea ympäristönlämpötila. Lisäksi etuna suolaliuoksen korkeasta käyttölämpötilasta on akkumateriaalien kiinteä olomuoto huoneenlämmössä, minkä seurauksena suola-akkua on mahdollista säilyttää pidempiä aikoja varastoituna turvallisesti. (Armand ym. 2023, s.10)

Toinen suola-akkujen heikkous on niiden kapasiteettiin nähden huono tehonsiirtokyky. Tyypillisen suola-akun C-arvo on noin C/8. Positiivinen puoli on, että suola-akuissa ei synny eksotermisiä reaktioita, jonka takia ne ovat lähtökohtaisesti turvallisempia kuin esimerkiksi litiumiontyyppiset akut. (Armand ym. 2023, s.10)

Na-S

NaS-akku oli ensimmäisiä suola-akkutyyppejä, jotka tulivat markkinoille 1990-luvun alussa. Sen positiivisen elektrodin materiaalina on rikki. positiivinen elektrodi on kiinteä keraaminen putki, joka on upotettuna negatiivisena elektrodina toimivaan natriumiin. Näiden välissä on beeta-alumiinioksidista valmistettu kiinteä elektrolyytti. NaS-akun lämpötila on pidettävä 300–360 C° välillä. (EASE 2018)

NaNiCl

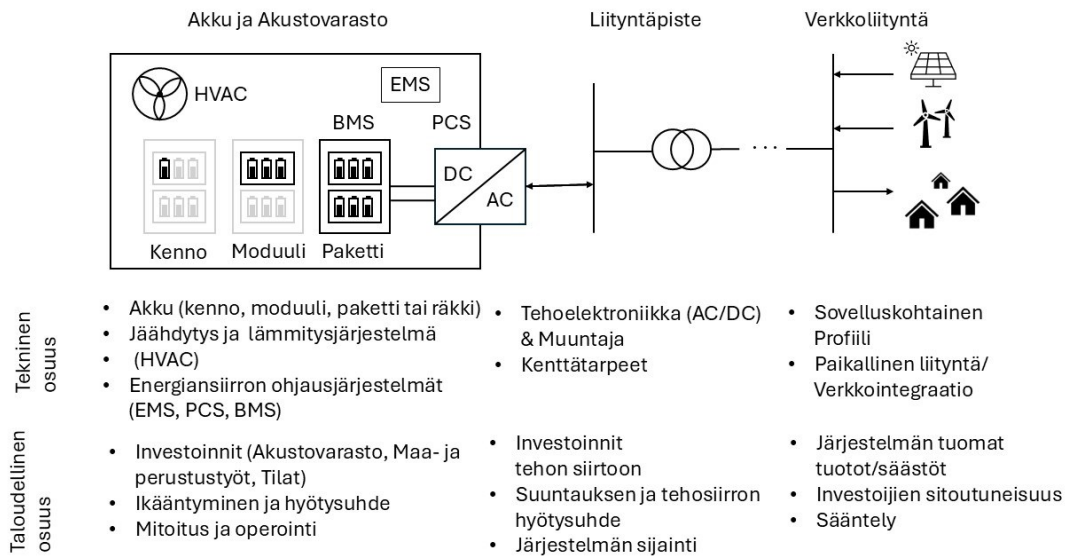
NaNiCl-akku on yksi markkinoilla olevista suola-akkuteknologioista. Se tuli markkinoille 90-luvun puolivälissä ja tunnetaan myös nimellä ZEBRA-akku. Se on samankaltainen kuin Na-S-akku, mutta siinä Na-S-akussa rikistä valmistettu positiivinen elektrodi on korvattu nikkelikloridista valmistetulla elektrodilla. Muutoksen seurauksena NaNiCl-akun kennojännite on korkeampi ja se kestää paremmin ylikuormitusta ja suurempia purkutehoja. Sen toimintalämpötila on matalampi noin 270 C° ja oikosulun tapahtuessa NaNiCl-akussa sen kennojännite laskee, eikä isompia vaurioita tapahdu toisin kuin esimerkiksi litiumionakuissa. (IEC 2011, s. 23–24)

2.2 Akustovaraston rakenne

Akustovaraston rakenne muodostuu kustannustehokkuuden ehdoilla, joten yli 200 kWh akustovarastojen valmistuksessa hyödynnetään tyypillisesti valmiita teräsrakenteita kuten merikontteja. Pienemmät akustovarastot valmistetaan tyypillisesti samankaltaisiin helposti siirreltäviin metallirakenteisiin. Konttirakenne mahdollisti logistiikan ensimmäistä kertaa satamissa Malcom Mclean lastatessa laivansa merikonteilla vuonna 1956 (Betancourt 2017, s.142). Siitä lähtien konttirakenteen skaalattavuutta ja edullisia logistiikkakustannuksia on hyödynnetty kasvavassa määrin myös muiden sektoreiden edullisena rakenneratkaisuna.

Teollisuuskokoluokan akustovarastot sisältävät akkupaketin lisäksi akunhallintajärjestelmän, tehonhallintajärjestelmän, DC-AC-konverterrin, HVAC-järjestelmän sekä sammutusjärjestelmän. Akustovaraston liityntärajapinnan takia voidaan tarvita lisäksi yksi tai useampi muuntaja. Muuntajat laskevat muutamia prosentteja jokaista muuntajaa kohden akustovaraston kokonaishyötysuhdetta, mikä on akustovarastoa suunniteltaessa otettava huomioon. Jokaista akustovarastoa suunniteltaessa on erikseen tarkasteltava käyttötarkoitukseen parhaiten soveltuva liityntäpisteen jännitetaso. (Hesse ym. 2017, s. 11–12)

Kuviossa 2 on esitetty tyypillisen akustovaraston rakenne. Siinä on esitetty akkumoduulien eri komponentit sekä osa akustovarastokokonaisuuden eri järjestelmistä kuten akun sisältämät akkukennot, räkkeihin tai akkupaketteihin asennettavat akkumoduulit sekä konverterrit. Liityntäpisteessä on mainittu kenttälaitteet ja muuntajan, jotka sisältävät esimerkiksi tarvittavat kojeistot, kiskostot ja kaapeloinnit. Kuvion akustovarasto on liitetty verkkoon, mutta tilanteessa, jossa akustovarastoa halutaan hyödyntää jo olemassa olevan sähköntuotannon tai -kulutuksen tasaamisessa tai käytössä voidaan akustovaraston liityntä tehdä olemassa olevaan kiskostoon/kojeistoon ennen/ilman erillistä päämuuntajaa tai verkkoliityntää. (Hesse ym. 2017, s. 2–3)



KUVIO 2. Akustovarastojärjestelmän rakenne (Hesse ym. 2017, s. 3)

2.2.1 Akkumoduulit

Akustovarastot koostuvat akkumoduuleista, joissa käytetään lieriömäisiä tai prismaattisia akkukennoja. Lieriömäisten akkukennojen etuna ovat niiden edulliset valmistuskustannukset ja saatavuus sekä suurien tuotantomäärien ja pitkälle kehitettyjen tuotantoprosessien tuoma korkealaatu. Prismaattisten kennorakenteiden etuna on kennojen suorakulmainen muoto, joka mahdollistaa akkumoduulin kokoonpanon, jossa akkukennojen välille ei jää ylimääräisiä ilmapälejä, jotka heikentäisivät akkupaketin energiatiheyttä. Yksi akkumoduuli sisältää tyypillisesti alle kymmenestä prismaattisesta kennosta useampaan kymmeneen lieriönmuotoiseen kennoon. Akkumoduulit asennetaan tyypillisesti kehikkoon ja kehikoita eli räkkejä voi tarvittavan akustokapasiteetin mukaan olla yhdessä kontissa muutamasta kappaleesta yli kymmeneen kappaleeseen. Prismaattisille akkukennoille tehdään tyypillisesti sarjakytkentä. Sarjakytkennän avulla saadaan yksittäisten akkukennojen 1–3 voltin nimellinen kennojännite nostettua akkumoduulin liityntäpinnoille noin 30–70 volttiin. Akkuvaraston nimellinen tasajännitteen suuruus on oltava riittävän korkea, jotta akun matalallakin varaustilalla (SOC) ja siitä seuraavaksi olevalla pudonneella jännitetasolla mahdollistetaan sähkötehon siirtäminen ulkoiseen sähköverkkoon.

2.2.2 Akustovaraston ohjaus

Akkukennojen turvallisesta latautumisesta ja purkautumisesta huolehtii BMS-järjestelmä. Tavallisesti jokaisessa akkumoduulissa on oma BMS-yksikkönsä, jonka lisäksi kaikilla asennetuilla moduuleilla on yksi yhteinen BMS-yksikkö. Nämä järjestelmät voivat olla myös integroituna yhteen kokonaisuuteen. Erillisiin akkumoduuleihin kiinnitetyt BMS-yksiköt huolehtivat siitä, että jokaisen akkukennon jännitetaso ja lämpötila pysyvät akun latauksen ja purkamisen aikana akkukennolle määritetyissä rajoissa. (SOC) Akkukennojen jännitteitä ja lämpötiloja seuraamalla akunhallintajärjestelmä optimoi akuston käyttöiän (SOH), tunnistaa mahdolliset vikaantuneet kennot ja pyrkii tasapainottamaan kennojen välisiä eroja. Akustovaraston ohjaamiseen tarvitaan akkujenhallintajärjestelmän lisäksi muitakin järjestelmiä. (Surya 2022, s. 1–2)

Akustovarastossa on usein erillinen tehonhallintayksikkö, joka ohjaa akustovaraston tasa- ja vaihtosuuntaajien toimintaa. Suuntaajien ohjauksen avulla hallitaan akustovaraston tehonsiirtoa. Tehonsiirtoa ohjaava järjestelmä on tyypillisesti nimetty PCS-järjestelmäksi. PCS-järjestelmään kuuluu akuston tasasähköpiirin ja sähköverkon vaihtosähköpiirin yhdistävät suuntaajat sekä niiden ohjausjärjestelmä.

2.2.3 Akustovaraston hyötysuhde

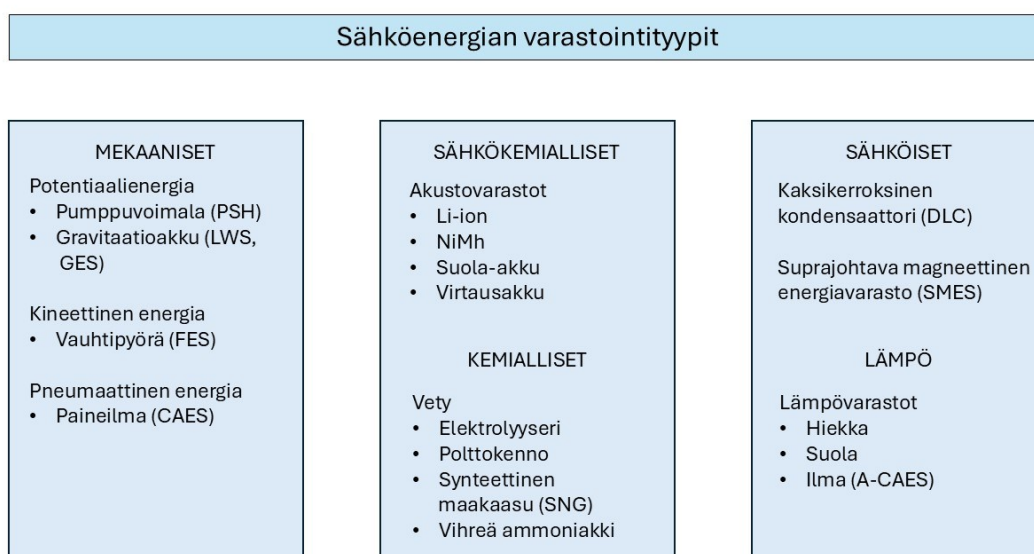
Akustovaraston tai -varastojen hyötysuhteeseen vaikuttaa akustovaraston rakenne -luvussa mainitun liityntäpisteen jännitetason lisäksi akkuun varastoitavan sähköenergian suuntaus. Kun sähköenergiaa varastoidaan akkuun yleisestä sähköverkosta, se täytyy tasasuunnata. Sähköenergiaa aurinkovoimalasta akkuun ladatessa ei tarvita sähkönsuuntausta, mutta sopivan latausjännitteen aikaansaamiseksi tarvitaan kuitenkin lataussäädintä. Yleisen sähköverkon suuntaan sähköenergiaa akustosta purkaessa, on sähkö vaihtosuunnattava. Vaihtosuuntauksesta ja tasasuuntauksesta syntyy molemmista häviöitä, joita akustovarastossa oleva PCS-järjestelmä pyrkii minimoimaan. Lisäksi akustovaraston jäähdyttäminen ja lämmittäminen heikentää akustovaraston kokonaishyötysuhdetta.

Akustovarastotoimittajat ilmoittavat tyypillisesti akustovaraston hyötysuhteen RTE-arvolla, joka kertoo akustoon varastoitavan energiamäärän suhteen siitä pu-
rettavaan energiamäärään. RTE-arvo kertoo akustovaraston hyötysuhteen, joka
on mitattu lyhenteen mukaisesti akustovaraston suojalaitteelta takaisin suojalait-
teelle kiertävästä piiristä, eikä se sisällä akustovaraston ulkopuolista sähköverk-
koa, kuten muuntajaa tai varaston ulkopuolista kaapelointia. Tyypillinen RTE-ar-
von hyötysuhde nykyisille LFP-akustovarastoille on noin 85 prosenttia.

Akustojärjestelmän kokonaishyötysuhde saadaan laskettua, kun tiedetään akus-
tovaraston RTE-arvo, kaapeloinnin impedanssit, muuntajan hyötysuhde sekä
akustovaraston ilmanvaihtoon, lämmitykseen ja jäähdytykseen kuluva keskimää-
räinen annualisoitu energian tarve.

3 KILPAILEVAT ENERGIAVARASTOTYYPIT

Kun selvitetään akustovaraston hyödyntämiskeinoja osana prosessituotantolaitoksen sähköverkkoa, on syytä tarkastella myös vaihtoehtoiset, akustovarastojen kanssa kilpailevat energian varastointimenetelmät. Akustovarasto on vain yksi mahdollinen energian varastointimenetelmä. Kun halutaan tehdä kohteeseen teknistaloudellisesti paras sähköenergian varastointiratkaisu, on tärkeää kartoittaa kohteeseen parhaiten soveltuva energianvarastointimenetelmä.



KUVIO 3. Sähköenergian varastointimenetelmät (IEC 2011, s. 17; Arasto 2023)

Taulukossa 1 on esitetty erityyppisten energiavarastoratkaisuiden ominaisuuksia, joita voidaan hyödyntää energiavarastotyyppin valinnassa, kun lähdetään kartoittamaan hankintakohteen energiavarastoinnin tarvetta.

TAULUKKO 1. Akustovaraston vertailu (AL Shaqsi ym. 2020, s. 205; Blanquiceth ym. 2023; EASE 2015, s. 26; EASE 2016; Global Energy Storage Database n.d.; GS Yuasa, 2023; Herrmann, Kelly & Price 2004, s. 1; Korpela A. 2018, s. 48; Power Technology 2024; Prieto 2024, s. 5–8; Rahman ym. 2021, s. 1)

Energiavarastotyyppi (sovellus)	Kapasiteetti (MWh)	Teho (MW)	Elinkaari (Vuotta)	Kustannus (€/kWh) (€/kW)	Hyötysuhde RTE (%)
Sähkökemiallinen energiavarasto (Akustovarasto)	1–720	1–240	10–25	100–1.300 150–3.000	70–95
Potentiaalienergiavarasto (Pumppuvoimala)	1–100.000	1–3.000	>80	40–150 400–1.500	70–85
Kineettinen energiavarasto (Vauhtipyörä)	0,1–5	1–400	>20	1.000–5.000 250–1.300	45–85 Putoaa nopeasti
Lämpöenergiavarasto (Sulasuolalämpövarasto)	1–1.680	1–280	20–30	30–65 500	50–80
Pneumaattinen energiavarasto (Paineilma)	1–10.000	1–1.000	>30	50–150 400–1.200	~55
Kemiallinen energiavarasto (Vety)	1–3.000	1–1.000	5–30	1–10 2.000–5.000	20–40

3.1 Potentiaalienergiavarastot

Potentiaalienergiavaraston toimintaperiaate on yksinkertainen. Siinä energiaa varastoidaan sovelluskohteen mukaan, joko kappaleen tai aineen massaan. Energian varastointi toteutetaan kasvattamalla käytetyn kappaleen tai aineen etäisyyttä maan massakeskipisteestä. Etäisyyden kasvattaminen sitoo energiaa ja etäisyyden pienentäminen vapauttaa energiaa. Sovelluskohteita ovat esimerkiksi pumppuvoimalaitokset, joissa vettä pumpataan yläaltaisiin, kun energiaa on saatavilla. Kun energialle on myöhemmin tarvetta, voidaan vettä laskea yläaltaasta turbiinin läpi ala-altaaseen, jolloin saadaan yläaltaassa ollut veden potentiaalienergia muutettua liike-energian kautta takaisin sähköenergiaksi. Vesialtaiden lisäksi on rakennettu mekaanisia potentiaalivarastoja, joissa ketjutaljojen

avulla nostetaan tiheitä kappaleita, joko ylös rakennuksen katonrajaan tai pinoetaan päällekkäin. Toimintalogiikka on sama kuin vesialtaissakin, kun sähköenergiaa jälleen tarvitaan, voidaan ylös nostettu kappale vapauttaa painovoiman vaaraan, jolloin se laskeutuessaan pyörittää ketjutaljan välityksellä sähkömoottorin (tahtikoneen) roottoria vastakkaiseen suuntaan, jolloin sähkömoottori toimii generaattorina.

Potentiaalienergiavarastojen vahvuutena on varastoidun energian säilyvyys pitkäkestoisessakin varastoinnissa. Sen heikkoutena on rajallinen määrä edullisia luonnonmukaisia kohteita ja kalliit perustamiskustannukset keinotekoiselle järjestelmälle.

3.2 Kineettiset energiavarastot

Kineettisissä energiavarastoissa energia on varastoituneena liikkuvaan massaan. Liikkuvaan massaan varastoituneen energian käytännönsovellutuksessa on usein kyse vauhtipyörästä. Vauhtipyöriin voidaan varastoida hetkellisesti kohtuullisia määriä energiaa ja ne luovat samalla inertiaa sähköverkkoon. Sähköverkossa oleva inertia auttaa tasapainottamaan sähköverkkoa ja säilyttämään sen taajuuden vakiona. Vauhtipyörien hyviä puolia on myös niiden pitkä käyttöikä. Vauhtipyörien heikkous on energian varastoinnin tehokkuus, kun energian varastointiaika on pidempi kuin muutamia minuutteja.

3.3 Lämpöenergiavarastot

Lämpöenergiavarastoja on käytetty tehokkaasti jo usean vuosikymmenen ajan Euroopassa (EASE/EERA 2016, s. 28). Lämpöenergiavarastoissa sähköenergiaa käytetään lämmittämään suurta määrää nestettä tai kiinteää ainetta. Lämpöenergia voidaan muuttaa takaisin sähköenergiaksi esimerkiksi turbiinin avulla, mutta lämpöenergian takaisin muuttaminen sähköenergiaksi on hyötysuhteeltaan epäedullista. Useimmissa lämpöenergiaratkaisuissa varastoitu energia hyödynnetään rakennusten lämmittämiseen osana kaukolämpöverkkoa tai sellaisenaan teollisuuden korkeita lämpötiloja vaativissa prosesseissa.

3.4 Pneumaattiset energiavarastot

Pneumaattisissa energiavarastoissa eli paineilmavarastoissa (CAES) energiaa varastoidaan ilmasäiliöihin, joihin paineistetaan kaasua sähkökäyttöisten kompressoreiden avulla. Kun sähköenergiaa tarvitaan, paineilmavarastoissa oleva paineistettu kaasu ohjataan turbiineihin, joissa paineistetun kaasun avulla pyöritetään turbiinien siipipyöriä. Turbiinien siipipyörät ovat kytkettyinä akseliin, jonka toisessa päädyssä on generaattori, jonka avulla saadaan paineistettuun kaasuun varastoitunut energia muutettua takaisin sähköenergiaksi.

Paineilmavarastojärjestelmät ovat aiemmin rakennettu maanalaisiin luoliin, jolloin niiden kustannukset on saatu pysymään kohtuullisina, mutta kuten pumppuvoimalaitosten kohdalla, lähes kaikki potentiaaliset luonnonmukaiset kohteet ovat jo käytössä. (Grazzini & Milazzo 2012, s. 462)

3.5 Kemiaalliset energiavarastot

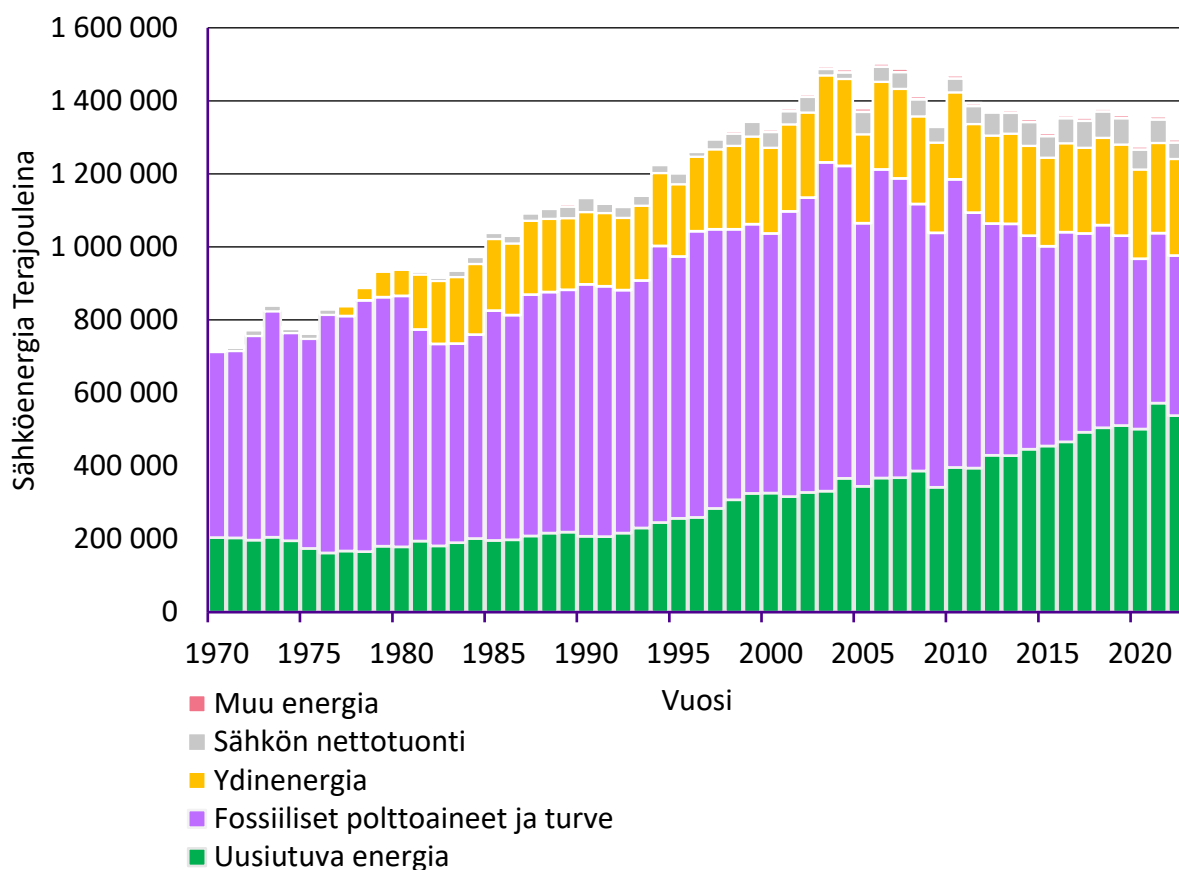
Kemiaallisena energiavarastona pidetään sähköenergian varastoimista johonkin muuhun aineeseen. Sähköenergiaa voidaan varastoida myös muihin aineisiin, mutta usein kemiallisessa energiavarastossa on kyse sähköenergian varastoimisesta vetyyn tai biopolttoaineisiin. Sähköenergian varastoinnissa vetyyn on kyse kolme vaiheisesta prosessista, jossa ensin sähköverkkoon tuotetulla sähköenergialla muutetaan vesimolekyylit vedyksi ja hapeksi elektrolyysin avulla, vety varastoidaan säiliöön ja lopuksi se muutetaan polttokennon tai generaattorin avulla takaisin sähköenergiaksi. Vetyä voidaan käyttää polttoaineena sellaisenaan tai siihen voidaan lisätä muita alkuaineita, kuten hiiltä tai typpeä, joiden avulla voidaan muodostaa helpommin käsiteltäviä polttoaineita. (EASE 2015, s.30–31)

4 AKUSTOVARASTO OSANA SÄHKÖVERKKOA

4.1 Energiamurros

Energiamurroksella tarkoitetaan muutosta, jossa vanhoista energian tuotantotavoista siirrytään kohti nykyisiä hiilineutraaleita tuotantotapoja. Perinteisesti sähköenergiaa on tuotettu taajama-alueiden ulkopuolella sijaitsevilla ja helposti säädeltävillä hiiltä tai öljyä polttavilla sähkövoimaloilla, joissa energia on tuotettu pyörivien generaattoreiden avulla. Kun sähköenergiaa on tuotettu isoissa tuotantoyksiköissä, on voimalaitosten generaattoreiden suuret pyörivät roottorit luoneet inertiaa sähköverkkoon. (Moilanen 2022, s. 7)

Energiamurroksessa on kyse siirtymisestä vanhoista sähköenergian tuotantotavoista kohti hiilineutraaleja sähkön tuotantotapoja. Tämä tarkoittaa sähkön tuotannon näkökulmasta sitä, että mahdollisimman suuri osa sähköenergiasta pyritään tuottamaan hyödyntäen uusiutuvia hiilineutraaleita energianlähteitä, kuten vettä, tuulta tai aurinkoa. Tuulella tuotetun vaihtosähkön taajuus muuttuu tuulen nopeuden mukaan ja auringolla tuotettu sähköenergia on tasasähköä, jonka teho muuttuu saatavilla olevan valon määrän mukaan. Molemmat edellä mainitut uusiutuvan sähköntuotannon muodot tarvitsevat toimiakseen vaihtosuuntausta, ennen kuin niiden tuottama sähköenergia voidaan syöttää julkiseen sähköverkkoon. Näiden energiantuotantomuotojen osuuksien kasvattaminen kokonaisenergian tuotantomäärissä (kuvio 4) johtaa esimerkiksi generaattoreiden tuottaman inertiaan vähentymiseen sähköverkossa, mikä vaikuttaa sähköverkon taajuuden nopeampaan heilahteluun ja suurempaan häiriöherkkyyteen. (Moilanen 2022, s. 7–8)

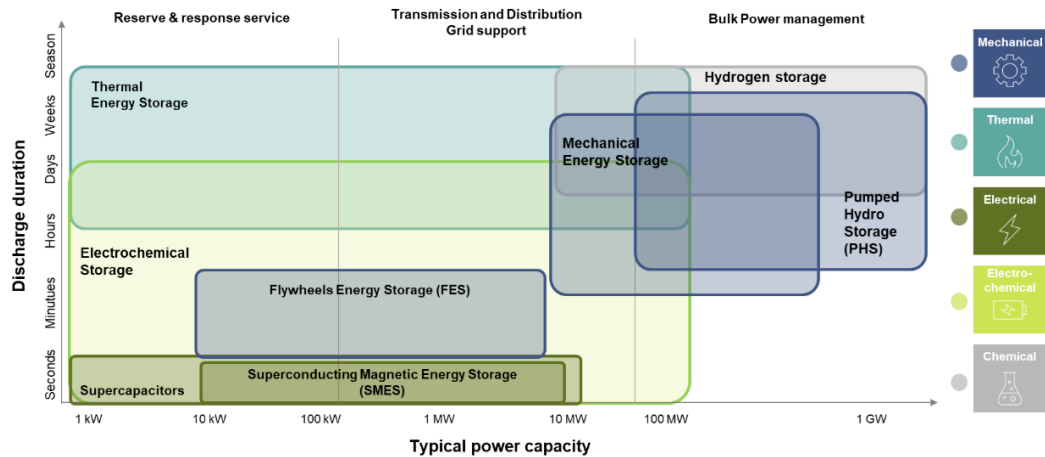


KUVIO 4. Suomen energiankulutus energialähteittäin 1970–2023* (Tilastokeskus 2022)

Yhteistä uudemmissa hiilineutraaleilla tuotantomuodoilla on lisäksi niiden sijainti, joka on lähtökohtaisesti hajautetumpi kuin perinteisillä sähkön tuotantomuodoilla. Uusiutuvista tuotantomuodoista erityisesti aurinkovoimaa voidaan rakentaa pienemmissä yksiköissä ja lähemmäs kulutuspisteitä, johtuen niiden kevyestä rakenteesta, paikallisesta päästöttömyydestä ja alhaisesta melutasosta.

Uusiutuvista tuotantomuodoista tuulivoiman ja aurinkovoiman tuotanto vaihtelee sääolosuhteiden muuttuessa vuorokauden sisällä, joten niiden tuotantomäärien ennustaminen on hankalaa. Sähköenergian tuotannon tasaamiseen tarvitaan energiavarastoja, jotka reagoivat sähköntuotannon vaihteluihin sekä lyhyellä, että pidemmällä aikavälillä. Tilanteisiin, joissa taivaalla liikkuva pilvilautta varjostaa hetkellisesti aurinkovoimalan, tarvitaan aurinkovoimalan rinnalle sähköenergia-varasto, josta sähköenergia on tarvittaessa nopeasti käytettävissä. Tyypillisesti

akustovarastot ovat olleet teknistaloudellisesti järkevin vaihtoehto nopeasti käytettävissä olevan sähköenergian varastointiin lyhytaikaisesti (kuvio 5).

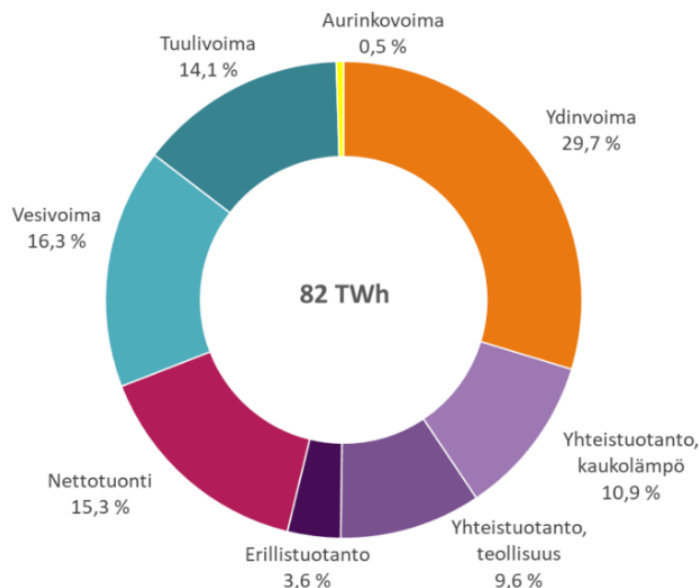


Source: Global Data (2019), IRENA (2020), WEC (2020), BNEF (2020), EU (2020), HEATSTORE project (2021)

KUVIO 5. Energiavarastojen tyypilliset tehot ja purkunopeudet (EASE 2022)

Aurinkosähkön näkökulmasta myös kausittaiselle sähköenergian varastoinnille on tulevaisuudessa tarvetta, sillä perinteisten sähkövoimaloiden vähentyessä on pystyttävä tuottamaan tarvittava sähköenergia myös talvikaudella, jolloin aurinkosähköntuotanto on vähäisempää. Viimeisimmän vuoden 2022 tilaston mukaan (kuvio 6) Suomessa aurinkosähkön tuotanto oli vain 0,5 % kokonaissähköntuotannosta, joka tarkoittaa sitä, että tällä hetkellä sähköenergian kausittaiselle varastoinnille ei Suomessa ole samanlaista tarvetta kuin maissa, joissa aurinkoenergian osuus energiantuotannosta on suurempi.

Sähkön tuotanto ja tuonti 2022



KUVIO 6. Suomen sähkön tuotanto ja tuonti 2022 (Energiateollisuus ry n.d.)

4.2 Prosessituotantolaitoksen sähköverkko

Prosessituotantolaitoksen sähköverkko on julkiseen sähköverkkoon verrattuna huomattavasti pienempi. Prosessituotantolaitoksen sähköverkon ominaispiirteitä ovat sen fyysiseen kokoonsa suhteutettuna suuri sähköenergian kulutus ja useat taajuusmuuttajakäytöt. Työn kohteena ollut prosessituotantolaitos oli liitetty valtakunnalliseen sähköverkkoon suurjännitetasolla, jolloin sen oman sisäisen sähköverkon sähkönlaatuvaatimukset eivät olleet yhtä kriittiset, kuin ne olisivat tuotantolaitoksessa, joka liittyisi yksityisten kuluttajien kanssa samaan keskijänniteverkkoon. EMC-standardin (SFS-EN IEC 61000-2-4 2024, 22) vaatimus kyseisessä tuotantolaitoksessa on sähkömagneettisten häiriöiden osalta C3, joka sallii hieman enemmän jännitteen säröytymistä (THD 10 %) kuin normaalit sähköverkot.

4.2.1 UPS-Järjestelmät

UPS-järjestelmän tarkoitus on mahdollistaa sähköjärjestelmä, jonka sähkönsyöttö ei katkea, vaikka julkinen sähköverkko vikaantuisi. Prosessituotantolaitoksella on käytössä UPS-järjestelmiä kaikissa kriittisissä toiminnoissa, jotta voidaan varmistaa prosessien turvallinen käyttö sekä alasajo julkisen sähköverkon vikaantumisen huolimatta. UPS-järjestelmät eivät sisälly tämän opinnäytetyön tarkastelukohteena oleviin akustovarastojen hyödyntämiskeinoihin, vaan ne ovat jo tällä hetkellä osa tavanomaista prosessituotantolaitoksen sähköjärjestelmää. UPS-järjestelmät ovat tyypillisesti mitoitettu niin, että niillä voidaan ylläpitää sähköjärjestelmien ohjausjännitteitä ja niihin kytkettyjä kuormia sekä siirtää sähkötehoa prosessin kriittisille laitteille korkeintaan puolentunnin ajaksi. Puolen tunnin kuluessa on tällä hetkellä käytettävät dieselkäyttöiset sähkövoimakoneet käynnistettävä, jotta tarvittava sähköntuotanto prosessin jatkumiseksi on turvattu.

4.3 Akustovaraston hyödyntämiskeinot

4.3.1 Energiakauppaa akustovarastolla

Vapailla sähkömarkkinoilla sähkönhinta vaihtelee kysynnän ja tarjonnan mukaan. Jokaiselle vuorokauden tunnille sovitaan edellisenä päivänä (day ahead-markkinalla) sähköstä maksettava tuntihinta, joka määräytyy kulutusajankohtana tarjolla olevan sähköntuotannon hinnan mukaisesti. Akustovaraston kapasiteetin avulla voidaan hyötyä vapailla sähkömarkkinoilla olevasta energian hinnan heilunnasta, lataamalla akustovarastoa silloin, kun sähköenergian hinta on edullinen ja purkamalla akustovarastoa silloin, kun sähköenergiasta maksetaan keskimääräistä parempi hinta.

Hyödyntämiskeinona energiakauppa on yksinkertainen, mutta sen haittapuolena on akustovarastojärjestelmässä tapahtuvat häviöt. Häviöitä tapahtuu esimerkiksi johtimissa, konvertterissa sekä mahdollisissa muuntajissa. Karkeasti arvioituna akustovaraston häviöt ovat noin viiden prosentin suuruisia yhteen suuntaan eli siirrettäessä sähköenergiaa, joko verkosta akkuun päin tai akusta verkkoon päin. Siirtohäviöihin vaikuttavat esimerkiksi akun, konvertterin ja johtimien lämpötilat ja

akun varausaste. Yhteensä voidaan puhua akustovarastolla olevan noin kymmenen prosentin häviöistä sähköä varatessa ja purkaessa, lisäksi akustovaraston jäädyttäminen ja lämmittäminen kuluttaa sähköenergiaa. Stabiililla sähkön hinnalla energiakauppa ei ole tällä hetkellä yksinään kannattava syy hankkia akustovarastoa.

4.3.2 Tasepoikkeamamaksujen leikkaaminen

Akustovarastoja hyödynnetään usein tuulivoimaloiden ja aurinkovoimaloiden rinnalla, jolloin akustovarastoja käytetään täyttämään edellisenä päivänä sähkön tuottajan sopimaa sähköenergian tuotantoa, kun aurinkovoimala tai tuulivoimala ei sääolosuhteiden takia saavuta sääennusteen perusteella tietyille tunneille luvattua sähköenergian tuotantomäärää. Puuttuva voimalan sähköenergian tuotantomäärä voidaan korvata akustovarastosta verkkoon syötettävällä energiamäärällä, jonka ansiosta sähköenergian tuotantolaitos säästyy korkeilta taseselvityksen ylössäättömaksuilta. (Fingrid 2023)

4.3.3 Säätosähkömarkkinat

Säätosähkömarkkinat eli reservimarkkinat ovat keino, jolla varmistetaan sähkön tuotannon ja kulutuksen tasapaino jokaisella ajan hetkellä. Fingrid järjestelmävastaavana huolehtii siitä, että reservimarkkinoilla on riittävästi säätökapasiteettia, millä toteutetaan sähkön laadulle asetetut kriteerit yleisen sähköverkon osalta. Tällä hetkellä Fingridillä on käytössä viisi erilaista säätosähkötuotetta, jotka ovat jaettu säätökapasiteetin, vasteajan sekä ohjaussignaalin perusteella. Akustovaraston sähköenergian nopean purkautumisen ja latautumisen ansiosta akustovarastolla voidaan osallistua näistä jokaiseen säätötuotteeseen. Reservimarkkinoilla sähkönenergian tasapainoa säädetään päivän sisäisen kulutuksen ja tuotannon heilunnan pitämiseksi tasapainossa (intraday-markkinat). (Fingrid 2023)

4.3.4 Tehotariffien leikkaaminen

Akustovaraston hyödyntäminen tehotariffien leikkaamiseen koskee vielä tois-
taiseksi vain keskisuuria ja suurempia kulutuspisteitä. Lähitulevaisuudessa pie-
nempiin kulutuspisteisiin asennettavien etäluettavien virtamittareiden avulla sitä
voidaan jatkossa soveltaa myös pienempien kulutuspisteiden sähkön hinnoitte-
lussa. Tehotariffi on osa sähkön hinnoittelua, johon kuuluu useimmiten perus-
maksu, tehomaksu ja loisteho (Rantanen, 2022). Tehomaksu on sähköverkkoyh-
tiöiden kannalta perusteltu, sillä siinä hinnoitteluperuste on sama kuin merkittävin
kustannusperuste (Luotola 2022, s. 11).

Tehotariffien leikkaamisessa sähkötehon käytön mukaan määräytyvää tehotarif-
fia pyritään pienentämään tukemalla omaa sähköverkkoa akustovaraston avulla.
Verkon tukeminen tapahtuu analysoimalla aikaisemman kulutusdatan perus-
teella sähköenergian kulutushuiput ja syöttämällä sähköenergiaa akustovaras-
tosta, kun sähköenergian kulutus on suurinta. Vastaavasti sähköverkon kulutuk-
sen ollessa keskimääräistä pienempää voidaan akustovarastoa ladata. (EASE
2020, s. 10)

Tehotariffimaksut määräytyvät tyypillisesti kuukauden aikana olleen suurimman
tuntitehon perusteella.

4.3.5 Sähköverkon tukeminen

Akustovarastoja voidaan hyödyntää tukemaan jo olemassa olevaa siirtoverkkoa,
jos liityntäpisteen sähköenergian kulutus on noussut tai sitä on tarkoitus nostaa
nopeammin kuin siirtoverkon kapasiteettia ehditään vahvistamaan. Kulutuspis-
teessä kasvanut tarve suuremmalle sähköenergiamäärälle voidaan syöttää akus-
tovarastosta. Akustovaraston rakentaminen on usein nopeampaa kuin kan-
taverkon uudistaminen. (Vattenfall 2020)

4.3.6 Black start -jälleenkäynnistys

Black start tarkoittaa energiavaraston hyödyntämistä tuotantolaitoksen jälleenkäynnistyksessä. Jälleenkäynnistys voidaan toteuttaa akustovaraston avulla ilman, että ulkoinen sähköenergiaa syöttävä kantaverkko on käytettävissä (EASE 2015, s. 22). Prosessituotantolaitoksella prosessit voidaan joutua ajamaan alas huoltotoimenpiteiden tai vikatilanteen takia, tällöin akustovaraston black start -toiminto on hyödyllinen ominaisuus, jotta prosessituotantolaitoksen ylösajo voidaan aloittaa mahdollisimman nopeasti. Kun prosessilaitoksen sähköjärjestelmän tila on jälleen toimintakunnossa, voidaan prosessin jälleenkäynnistys tehdä akustovaraston avulla, ilman sähkönsyöttöä ulkopuolisesta sähköverkosta.

Edellytyksenä akustovarastolla tehtävään jälleenkäynnistykseen on prosessimoottoreiden ohjauksessa käytettävät pehmokäynnistimet ja taajuusmuuttajakäytöt. Akustovarastojen kapasiteettiin suhteutettu purku- ja lataustehoa kuvaava C-arvo on tyypillisesti alle 2, jolloin suorien oikosulkumoottorikäyttöjen 6–8 kerertainen käynnistysvirta voi tuottaa ongelmia prosessin käynnistyksessä. Erityisesti jos prosessin jälleenkäynnistystä ei voida toteuttaa vaiheittain ja jälleenkäynnistysviiveiden asetteluportaita on käytössä vain vähän.

4.3.7 Sähkön laadun varmistaminen

Akustovarastoa voidaan käyttää tasoittamaan sähköverkossa olevaa jännitteen heiluntaa (EASE 2015, s. 23–24). Akustovaraston nopean vasteajan takia sitä voidaan hyödyntää sähköverkossa, jossa on paljon jännitteen säröä. Tämä on eduksi järjestelmissä, joissa vaaditaan erittäin laadukasta sähköä. Prosessituotantolaitoksen sähköverkossa on paljon taajuusmuuttajakäyttöisiä laitteita, joiden puolijohdeohjatut suuntaajat aiheuttavat jännitteen ja virran säröytymistä. Samaa tapahtuu myös uusiutuvien energian tuotantolaitosten yhteydessä, joissa sähköenergia syötetään verkkoon vaihtosuuntaajien avulla.

5 ESIMERKKISOVELLUS

Asiakas luovutti tätä opinnäytetyötä varten lähtötietoja, joita hyödynnettiin tässä selvityksessä. Lähtötietoina saatiin palovesijärjestelmään kytketyn kuormituksen suuruus. Kuormituksen teho on 250 kVA. Tehoa on kyettävä tuottamaan palovesijärjestelmälle asetettujen vaatimusten mukaisesti yhden vuorokauden ajan (asiakkaan spesifikaatio). Palovesijärjestelmän sähkönsyötön turvaamiseksi oltiin alustavien suunnitelmien mukaan asentamassa tavanomaista varavoimageraattoria. Varavoimageraattorin asentaminen vaatii tilaa ja jatkuvaa huoltoa, joten asiakasta kiinnosti varavoimageraattorin korvaaminen akustovarastolla, jonka huoltotarpeen määrä on vähäinen.

Tarkasteltaessa asiakkaan järjestelmälle asetettuja vaatimuksia huomataan, että kyseisen järjestelmän vaatima sähköenergian kapasiteetin määrä on 6,0 MWh. Litiumionityyppisen akustovaraston tyypillinen kustannusolettama akulle on tällä hetkellä noin 300 € / kWh ja kokonaiselle akustovarastojärjestelmälle noin 600 € / kWh (informaatiolähde: akustovarastovalmistajan myyntiedustaja). Oletetun hinta-arvion perusteella akustovaraston hankintahinnaksi tulisi ~ 3,6 milj. €.

Akustovaraston kapasiteetti olisi tällöin varattu kokonaan palovesijärjestelmän syöttämiseen, joten sen hyödyntäminen muilla keinoin olisi rajallista. Sähkön laadun parantaminen on kuitenkin yksi mahdollinen keino hyötyä akustovarastosta. Sähkön laadun parantamiseen on kuitenkin olemassa markkinoilla aktiivisuotimia, joiden investointikustannukset ovat hintahaarukassa 10 000–200 000 €.

Teollisuuden mahdollisiin akustovaraston hyödyntämiskeinoihin on mainittu sähkön laadun parantamisen lisäksi tehotariffien leikkaaminen ja energiamarkkinat (Hesse ym. 2017). Tässä kyseisessä prosessiteollisuuden kohteessa molemmat näistä sovellutuksista vaatisivat akustovaraston ylivoimattamista. Aikaisempien laskelmien (Liite 1.) perusteella akustovaraston hyödyntäminen pelkän tehotariffin leikkaamiseen ei ole ollut kannattavaa tavallisen teollisuusrakennuksen yhteydessä. Prosessituotantolaitoksessa jatkuvasti käynnissä oleva prosessi ei kasvata sähkötehon heiluntaa vuorokauden sisällä, mikä heikentää akustovarastoinvestoinnin takaisinmaksupotentiaalia tehotariffin leikkaamisen avulla.

Energiamarkkinoille osallistuminen akustovaraston avulla on kasvavan uusiutuvan energiantuotantosektorin takia entistä kannattavampi ratkaisu. Tälläkin hetkellä akustovaraston mitoitus energiakaupan tekemiseen pohjoismaisella energiamarkkinalla on laskettu olevan kannattavaa 5 MW/MWh akustovarastolla. Lyhyin akustovarastoinvestoinnin takaisinmaksuaika saadaan kuitenkin, kun akustovarastoa käytetään säätösähkömarkkinoilla. (Sadullaeva 2023, s. 105) Nämä akustovaraston käyttötavat eivät ole sovelluskohteessa mahdollisia ilman akustovaraston reilua ylimitoitusta.

Noin 250 kVA varavoimageneraattori asennettuna kohteeseen olisi hintaluokaltaan noin 100–150 tuhatta euroa. Varavoimageneraattori vaatii vuosittaisia testejä ja huoltotoimenpiteitä, mutta sen eliniän voidaan olettaa olevan myös huomattavasti pidempi kuin litiumakustovarastolla. Akustovaraston päästöttömän ja huoltovapaan varavoiman ja varavoimakoneen hankinnan, asennuksen, huollon ja testien välille jää vielä yli 3 milj. € eroa. Yhteenvetona akustovarasto ei sovellu pelkän varavoiman tehonlähteeksi.

6 POHDINTA

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää, kuinka akustovarastoja voitaisiin hyödyntää osana prosessituotantolaitoksen sähköverkkoa. Työssä selvitettiin akustovaraston eri hyödyntämiskeinot, joista esiteltiin seitsemän. Akustovaraston yleisten hyödyntämiskeinojen lisäksi tarkasteltiin asiakkaan ehdottamaa esimerkkitausta, jossa akustovarastoa käytettäisiin varavoimajärjestelmän tehonlähteenä. Vielä tällä hetkellä se ei ole järkevästi perusteltavissa oleva investointi pelkkänä prosessituotantolaitoksen varavoimajärjestelmänä. Akustovaraston kustannus oli moninkertainen verrattuna aiemmin käytettyyn ratkaisuun.

Akustovaraston hyödyntämiskeinoja selvittäessä ilmeni, että akustovaraston hyödyntämiskeinoista kolme ensimmäistä työssä mainittua ovat tärkeimmät keinot akustovarastoinvestoinnin takaisinmaksun mahdollistamiseksi. Keinot olivat energiakauppa, tasepoikkeamamaksujen leikkaaminen ja säätösähkömarkkinat. Tällä hetkellä akustovarasto on vielä kallis energianvarastointimenetelmä, joten niitä rakennetaan pääasiassa kolmea aiemmin mainittua liiketoimintamallia hyödyntäen. Tulevaisuudessa akustovarastojen valmistuskustannusten odotetaan laskevan, joten muista hyödyntämiskeinoista saattaa tulla teknis-taloudellisesti kannattavia.

Opinnäytetyössä selvitettiin energiavarastoinnin taustalla olevat tekijät, jotka ovat vaikuttaneet energianvarastoinnin kysynnän kasvuun ja osaltaan akustovarastojen suosion kasvuun. Työssä oli tarkoitus perehtyä enemmän prosessituotantolaitoksen sähköverkkoon ja avata esimerkkikohdetta enemmän, mutta valitettavasti heikosti saatavien lähtötietojen takia kyseisestä osiosta tuli suppea. Tämä ei kuitenkaan vaikuttanut opinnäytetyön päätavoitteeseen luoda kattava selvitys akustovarastoinvestoinnista sähköverkossa. Tämän työn perusteella on helppo lähteä suunnittelemaan omaa energianvarastointiratkaisua.

LÄHTEET

AL Shaqsi, A., Sopian, K. & Al-Hinai, A. 2020. Review of energy storage services, applications, limitations, and benefits. *Energy reports* 6 (2020). 288–306. Viitattu 24.11.2024. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.07.028>

Moilanen, A. 2022. Suuren kokoluokan energiavarastojen rooli osana sähköverkon reservimarkkinaa. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Viitattu 24.11.2024. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/749349/Moila-nen_Anniina.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Arasto, A. 2023. Green ammonia – a sustainable solution for tackling the climate crisis. VVT. Viitattu 13.11.2024. <https://www.vttresearch.com/en/news-and-ideas/green-ammonia>

Armand, M., Ortiz-Vitoriano, N., Olarte, J., Salazar, A. & Ferret, R. 2023. Salt batteries: opportunities and applications of storage systems based on sodium nickel chloride batteries : in-depth analysis. Brussels: European Parliament. Viitattu 21.11.2024. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/6e49bb41-ada8-11ed-8912-01aa75ed71a1/language-en>

Betancourt, M. 2017. Heroes of New York harbour: tales from the cities port. Guilford, Connecticut: Globe Pequot.

Blanquiceth, J., Cardemil, J., Henríquez, M. & Escobar, R. 2023. Thermodynamic evaluation of a pumped thermal electricity storage system integrated with large-scale thermal power plants. Amsterdam: Elsevier. Viitattu 22.11.2024 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113134>

Broussely, M. & Pistoia, G. 2007. Industrial applications of batteries : from cars to aerospace and energy storage. Amsterdam: Elsevier.

EASE. 2015. European Energy Storage Technology Development Roadmap Towards 2030, 2016. Viitattu 4.12.2023. <https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2015/10/EASE-EERA-recommendations-Roadmap-LR.pdf>

EASE. 2016. Chemical Energy Storage. Hydrogen. Viitattu 24.11.2024. https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/03/EASE_TD_Hydrogen.pdf

EASE. 2016. Electrochemical Energy Storage. Flow battery. Viitattu 23.11.2024. https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/03/EASE_TD_FlowBattery.pdf

EASE. 2016. Electrochemical Energy Storage. Lithium-ion battery. Viitattu 20.10.2024. https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/03/EASE_TD_Lilon.pdf

EASE. 2016. Electrochemical Energy Storage. Sodium-nickel-chloride battery. Viitattu 25.4.2024. https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/07/EASE_TD_Electrochemical_NaNiCl2.pdf

- EASE. 2016. Mechanical Energy Storage. Diabatic Compressed Air Energy Storage. Viitattu 24.11.2024. https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/07/EASE_TD_Mechanical_DCAES.pdf
- EASE. 2018. Electrochemical Energy Storage. Sodium-Sulphur (NaS) battery. Viitattu 10.11.2024. https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2018/09/2018.07_EASE_Technology-Description_NaS.pdf
- EASE. 2020. Energy Storage Applications Summary. Viitattu 4.2.2024. <https://ease-storage.eu/publication/energy-storage-applications-summary/>
- EASE. 2022. Energy Storage Targets 2030 and 2050. Viitattu 26.05.2024. <https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2022/06/Energy-Storage-Targets-2030-and-2050-Full-Report.pdf>
- Energiateollisuus ry. n.d. Sähköntuotanto ja -käyttö. Sähkötalostat. Viitattu 26.5.2024. <https://energia.fi/tilastot/sahkotilastot/sahkontuotanto-ja-kaytto/>
- Erikson, T. 2001. LiMn₂O₄ as a Li-Ion Battery Cathode. Materials Chemistry, Ångström Laboratory, Uppsala University. Viitattu 3.10.2024. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:160906/FULLTEXT01.pdf>
- Fingrid. n.d. Taseselvitys. Viitattu 5.10.2023. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/tasepalvelut/taseselvitys/taselaskennan-esimerkki/>
- Fingrid. 2023. Reserveistä ja reservimarkkinoista. Reservien perusteet 2023. Viitattu 20.01.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservien-perusteet.pdf>
- Fusalba, F., Martinet, S. & Brunet, Y. 2013. Electrochemical Storage: Cells and Batteries, in Energy Storage. United States: Wiley. pp. 173–216.
- Gatta, F.M., Geri, A., Lauria, S., Maccioni, M. & Palone, F. 2015. Battery Energy Storage Efficiency Calculation Including Auxiliary Losses: Technology Comparison and Operating Strategies. "Sapienza" University of Rome. Viitattu 25.10.2024. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7232464>
- Global data. 2021. Solana Solar Generating Plant – Molten Salt Thermal Storage System. Verkkosivu. Viitattu 24.11.2024. <https://www.global-data.com/store/report/solana-solar-generating-plant-molten-salt-thermal-storage-system-profile-snapshot/>
- Global Energy Storage Database. n.d. Projects. Verkkosivu. Viitattu 24.11.2024. <https://gesdb.sandia.gov/projects.html>
- Grazzini, G. & Milazzo, A. 2012. A Thermodynamic Analysis of Multistage Adiabatic CAES. Proceedings of the IEEE. [Online] 100 (2), 461–472. Viitattu 4.12.2023. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6015516>

GS Yuasa Corporation. 2023. The World's Largest Storage Battery Facility Delivered by GS Yuasa has Entered Service - Contributing to the Construction of a Wind Energy Transmission Network in Northern Hokkaido. Viitattu 24.11.2024. <https://newsroom.gs-yuasa.com/en/news-release/125>

Herrmann, U., Kelly, B. & Price, H. 2004. Two-tank molten salt storage for parabolic trough solar power plants. Oxford: Energy. 29 (5). 883–893. Viitattu 24.11.2024. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(03\)00193-2](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(03)00193-2)

Hesse, H., Schimpe, M., Kucevic, D. & Jossen, A. 2017. Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids. Basel: Energies. 10 (12). 2107–. Viitattu 22.11.2024. https://mdpi-res.com/energies/energies-10-02107/article_deploy/energies-10-02107-v3.pdf?version=1513587141

IEC. 2011. Electrical Energy Storage. Viitattu 10.11.2014. https://www.iec.ch/system/files/2019-09/content/media/files/iec_wp-electrical_energy_storage-en.pdf

Korpela, A., 2018. Suuren kokoluokan energianvarastointiteknologioiden teknis-taloudelliset näkymät. Tampereen Ammattikorkeakoulu. Viitattu 20.03.2024. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/356233/Energianvarastointiteknologioiden.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Li, Y., Li, Y., Ji, P. & Yang, J. 2015. Development of energy storage industry in China: A technical and economic point of review. Renewable & Sustainable Energy Reviews 49, 805–812. Viitattu 24.11.2024. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.160>

Luotola, K. 2022. Pienasiakkaan tehotariffin vaikutus asiakkaan sähkönkäyttöön. Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma. Tampereen yliopisto. Kandidaatintyö. Viitattu 05.11.2024. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/140120/Luotola-Kalle.pdf?sequence=2>

Orendorff, C. 2012. The Role of Separators in Lithium-Ion Cell Safety. Viitattu 6.11.2023. https://www.electrochem.org/dl/interface/sum/sum12/sum12_p061_065.pdf

Minke, C. & Turek, T. 2018. Materials, system designs and modelling approaches in techno-economic assessment of all-vanadium redox flow batteries – A review. Journal of Power Sources 376. 66–81. Viitattu 24.11.2024. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.11.058>

Power Technology. 2024. Top five energy storage projects in the UK. Verkkosivu. Viitattu 24.11.2024. <https://www.power-technology.com/data-insights/top-five-energy-storage-projects-in-the-uk/>

Prieto, C., Blindu, A., Cabeza, L., Valverde, J. & Garcia, G. 2024. Molten Salts Tanks Thermal Energy Storage: Aspects to Consider during Design. Basel: Energies 17, 1. Viitattu 24.11.2024. <https://doi.org/10.3390/en17010022>

Rahman, M., Gemechu, E., Oni, A. & Kumar, A. 2021. The development of a techno-economic model for the assessment of the cost of flywheel energy storage systems for utility-scale stationary applications. *Sustainable energy technologies and assessments* 47. Viitattu 24.11.2024.

<https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101382>

Rajarathnam, G. & Vassallo, A. 2016. *The Zinc/Bromine Flow Battery Materials Challenges and Practical Solutions for Technology Advancement*. 1st ed. 2016. Singapore: Springer Singapore.

Rantanen, M. 2022. Sähkösiirtotuotteet eli tariffit (Sähkön siirtotuotteen hintataulukko). Suomen Energianeuvonta Oyj. Viitattu 14.11.2024.

<https://senoyj.fi/artikkeli/sahkonsiirtotuotteet-eli-tariffit-sahkon-siirtotuotteen-hintataulukko/>

Sadullaeva, S. 2023. Valuation of energy storage technologies in the Nordic power systems and markets context with growing wind power penetration. NTNU. Viitattu 24.11.2024.

<https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/3099024>

Schmidt, O., Melchior, S., Hawkes, A. & Stafell, I. 2019. Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies. *Joule*. 3. 81–100. Viitattu 20.11.2024.

<https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.12.008>

Seongyun, P., Jeongho, A., Taewoo, K., Sungbeak, P., Youngmi, K., Inho, C. & Jonghoon, K. 2020. Review of state-of-the-art battery state estimation technologies for battery management systems of stationary energy storage systems. *JOURNAL OF POWER ELECTRONICS* 20 (6), 1526–1540. Viitattu 21.11.2024.

<https://link-springer-com.libproxy.tuni.fi/content/pdf/10.1007/s43236-020-00122-7.pdf>

SFS-EN IEC 61000-2-4:2024:en. 2024. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-4: Environment - Compatibility levels in power distribution systems in industrial locations for low-frequency conducted disturbances. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Viitattu 22.11.2024. Vaatii käyttöoikeuden.

<https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/CENELEC/ID2/6/1328589.html.stx>

Surya, S., Samanta, A., Marcis, V. & Williamson, S. 2022. Smart Core and Surface Temperature Estimation Techniques for Health-Conscious Lithium-Ion Battery Management Systems: A Model-to-Model Comparison. *Basel: Energies* 15 (2). 623-. Viitattu 21.11.2024.

<https://www.mdpi.com/1452212>

The World Bank Group. 2023. Guidelines to implement battery energy storage systems under public-private partnership structures. Viitattu 31.1.2024.

<https://documents1.worldbank.org/curated/en/099536501202316060/pdf/IDU0ed-cfc32c0825f040f509c0b0bbf49294e569.pdf>

Tilastokeskus. 2022. Energia: Energian kokonaiskulutus energialähteittäin 1970–2023*. Viitattu 8.5.2024.

https://stat.fi/tup/suoluk/suoluk_energia.html

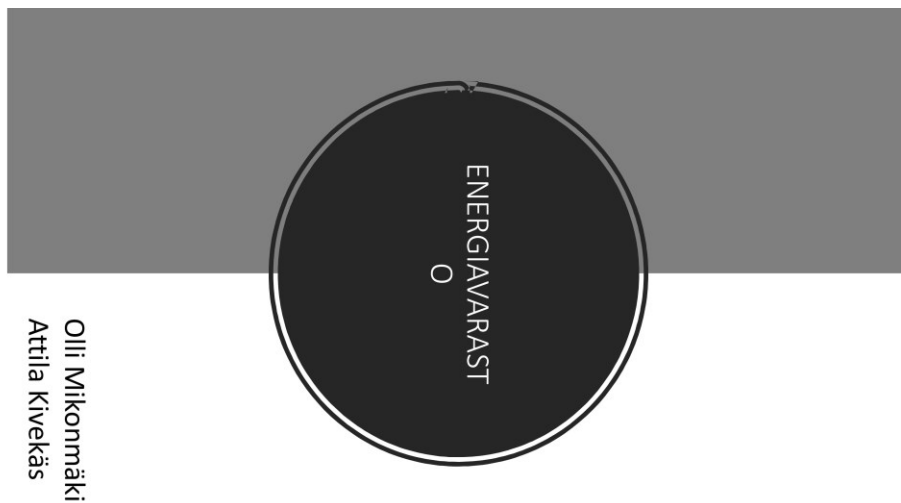
Vattenfall. 2020. Vattenfall constructing unique battery storage facility in Uppsala. Vattenfall Press Office. Viitattu 5.10.2023. <https://group.vattenfall.com/press-and-media/newsroom/2020/vattenfall-constructing-unique-battery-storage-facility-in- uppsala>

Vynnycky, M. 2011. Analysis of a model for the operation of a vanadium redox battery. Oxford: Energy 36 (4). 2242–2256. Viitattu 24.11.2024. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.060>

LIITTEET

1 (8)

Liite 1. Kulutushuippujen leikkaaminen (esitelmä)

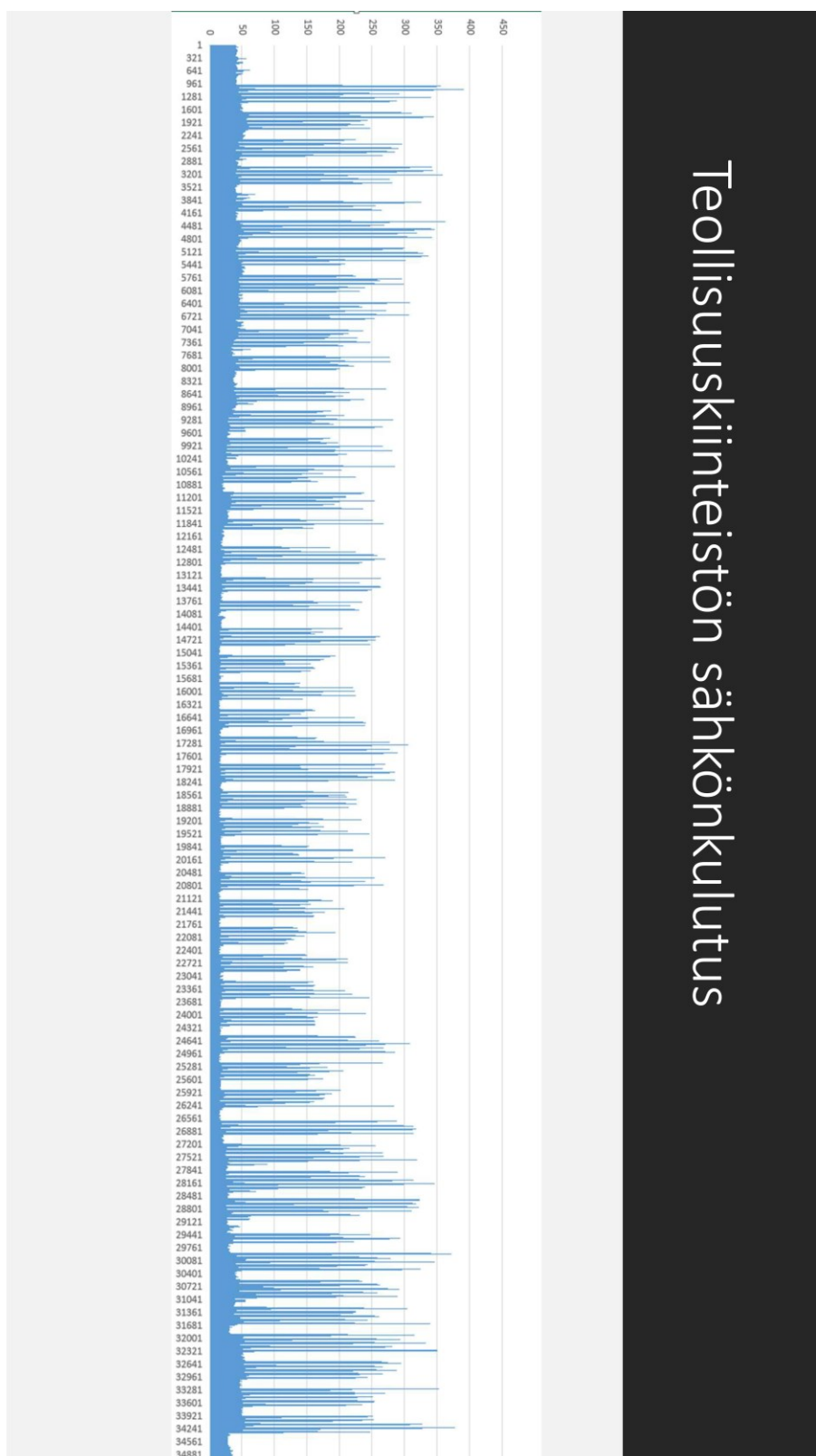


Kuva:tuote-esite

Harjoitus 6: Akustovarasto kulutuspiikkien tasaukseen

- Tehtävä: Optimoida akustovaraston koko niin, että minimoidaan kokonaiskustannukset 10 vuoden aikajänteellä
- Teollisuuskiinteistöllä kulutus on talvella pääosan ajasta n. 50 kW ja kesällä n. 20 kW. Välillä tulee kuitenkin suuria – jopa lähes 400 kW – piikkejä
- Kulutusprofiili vuoden ympäri taulukon mukaisesti. Oletetaan, että lämmitysjärjestelmän parantamisella saadaan 1.10.-31.3. piikit pois, ja keskitytään 1.4.-30.9. tuntisarjoihin tältä osin
- Sähköenergian hinta taulukon mukaisesti, energia 1.1.-31.12.
- Verkkomaksut Elenian 1.5.2023 voimaan astuvan Verkkopalveluhinnaston mukaan

3 (8)



Teollisuuskohteen tehonsiirtomaksu

Tehosiirto 2

Talvialkuperäivä 1.11.-31.3.

Siirtomaksu ma-la klo 07-22 Muu aika

Sähköveroton	41,13 €/MWh	19,52 €/MWh
Sähköveroluokka 1	63,66 €/MWh	42,05 €/MWh
Sähköveroluokka 2	41,76 €/MWh	20,15 €/MWh

Perusmaksu 71,49 €/kk

Tehomaksu 3,82 €/kW, kk

Loistehomaksu 6,80 €/kVAa, kk

- Tehomaksu määrättyy kuukauden suurimman teholuokeman mukaan

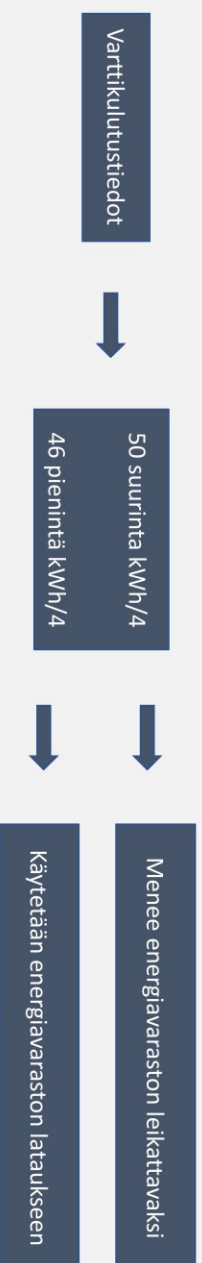
Taulukko 1. Tehomaksu		
Kuukausi	Huipputeho (kW)	Tehomaksu (€/kW)
Huhti	286	1092,52
Touko	271	1035,22
Kesä	306	1168,92
Heinä	289	1103,98
Elo	268	1023,76
Syys	308	1176,56

Lähde:Elentia hinnasto

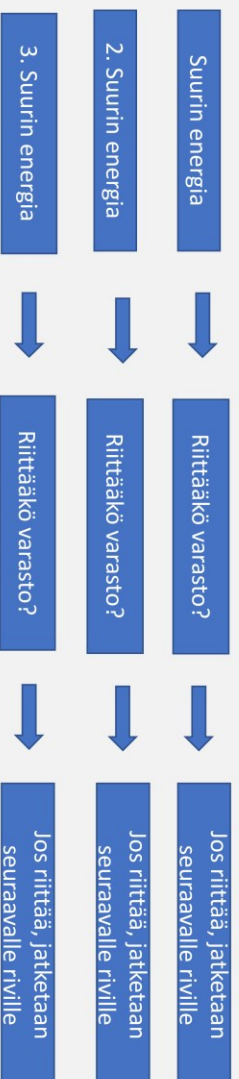
energiavarastot

- Tarkastelun kohteena on [REDACTED] pienin energiavarastomalli [REDACTED], jota on tarjolla kokoluokassa 80-360 kW ja 104-416 kWh
- Investoinnin kustannusarvio 700 €/kWh
- Tarkastelussa kulutushuippujen leikkaukseen:
 - 80 kW / 104 kWh
 - 180 kW / 208 kWh

Laskenta-algoritmi



Energiahuipun leikkaaminen



Kuukausittainen tehomaksu

Kuukausi	Huipputeho (kW)		Tehomaksu (€/kW)		Energiavarasto 1. Tehomaksu (€/kW)	Energiavarasto 3. Tehomaksu (€/kW)
	ilmian energiavarastoa	ilmian energiavarastoa	ilmian energiavarastoa	ilmian energiavarastoa		
Huhti	286	271	1 093	1 035	787	640
Touko	286	306	1 093	1 169	812	706
Kesä	286	286	1 093	1 093	863	658
Heinä	268	268	1 024	1 024	866	778
Elo	308	308	1 177	1 177	740	588
Syys					889	800



Energiavaraston koko	Kustannusarvio	Takaisinmaksuaja	
		700 €/kWh (vuosi)	350 €/kWh (vuosi)
80 kW / 104 kWh	72 800 €	44	22
180 kW / 208 kWh	145 600 €	60	30
80 kW / 104 kWh	36 400 €	22	11
180 kW / 208 kWh	72 800 €	30	15