

Hajautetun energiajärjestelmän toteutusmahdollisuudet virtausakkuteknologialla

Pro gradu -tutkielma, 25.7.2016

Tekijä:

KRISTIINA SIILIN

Ohjaajat:

JUHA KARPPINEN, HELEN OY

JUSSI MAUNUKSELA, JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO
FYSIKAN LAITOS

Tiivistelmä

Siilin, Kristiina

Hajautetun energiajärjestelmän toteutusmahdollisuudet virtausakkuteknologialla

Pro gradu -tutkielma

Fysiikan laitos, Jyväskylän yliopisto, 2016, 90 sivua

Työssä tutkittiin virtausakkuteknologian soveltuvuutta osana hajautetun energiajärjestelmän toteutusta. Hajautettu virtausakku on laaja energiaverkosto, joka mahdollistaa energiansiirron ja -varastoinnin. Energia varastoidaan virtausakun elektrolyyttiin, jota säilytetään kaukolämpöverkoston kaltaisessa laajassa putkiverkostossa. Elektrolyyttiä siirretään putkiverkostossa maan alla pumppaamalla ja hajautetun akun lataaminen ja purkaminen suoritetaan tuotannon ja kulutuksen yhteydessä kennopinojen välityksellä.

Tutkimus keskittyi hajautetun virtausakun soveltuvuuteen uusiutuvan energian varastoinnissa sekä kulutuksen teho-optimointiin huipunleikkauksessa. Tutkimusta varten ohjelmoitiin Matlab-simulointimalli, jonka avulla simuloitiin erilaisia tapauksia. Hajautetun virtausakun teknologia- ja kustannusastetta verrattiin litium-ioni akkuteknologialla toteutettuihin energiajärjestelmiin sekä pienessä että isossa mittakaavassa.

Simuloinnin tuloksien nojalla teknologian rajoitteita ovat virtausakkujen heikko energiatiheys ja järjestelmän hyötysuhde. Lisäksi nykyisellä teknologialla tutkitun järjestelmän toteutusta estää ympäristön mahdollinen saastuminen energiajärjestelmän toiminnan vikatilanteissa, kuten putkiverkoston vuototilanteissa. Tämän hetkinen teknologiastatus ja kustannusrakenne suosivat litium-ioni akkuteknologiaa, jonka havaittiin suoriutuvan parhaiten tutkituista toiminallisuuksista.

Avainsanat: Virtausakku, hajautettu energiajärjestelmä, energian varastointi, uusiutuva energia, energiaratkaisut

Abstract

Siilin, Kristiina

Feasibility Study of Utilizing Flow Battery Technology as a Distributed Energy System

Master's thesis

Department of Physics, University of Jyväskylä, 2016, 90 pages.

The objective of this research was to plan and simulate distributed energy system configured using flow battery technology. A distributed flow battery is an expansive energy network which enables the transportation and storage of produced energy. The energy is stored in the electrolyte and stored in a pipe network similar to district heating. The electrolyte is pumped underground and the energy is charged or discharged via cell stacks at the production or consumption sites.

The focus of the research was renewable energy storage and power optimization in peak shaving of consumption. A Matlab simulation model was configured to simulate the case studies. The status of flow battery technology and costs were compared to energy systems configured with large- and small-scale lithium-ion batteries.

The results indicate that the energy density and system efficiency of flow battery is restricting the energy system's performance. In addition the contamination of environment is a great risk with current flow battery technology in case of leakage. The current state of storage technologies and their cost structures also favor the lithium-ion technology. Another apparent result was that lithium-ion batteries outperform the distributed flow battery.

Keywords: Flow battery, distributed energy system, energy storage, renewable energy, energy solutions

Esipuhe

Tutkimukseni hajautetun energiajärjestelmän totutusmahdollisuuksista virtausakkuteknologialla on tehty helsinkiläisen energiayhtiön, Helen Oy:n toimeksiantona. Uusiutuvan energian varastointi on aiheena ajankohtainen ja työlleni valittu tutkimuskysymys tukee Helenin Energiaratkaisut-yksikön tutkimus- ja kehitystoimintaa. Aiheeni käsittelee energianvarastoinnin haasteita virtausakkuteknologian näkökulmasta. Kulunut puolivuotinen on ollut ennen kaikkea mielenkiintoinen ja tutkielmaa kirjoittaessani olen lisäksi päässyt perehtymään sähkönvarastointiin työni aiheen vierestä.

Haluan kiittää ohjaajaani Juha Karppista Heleniltä mielenkiintoisen aiheen ehdottamisesta. Erityiskiitos kuuluu myös molemmille, Juha Karppiselle Heleniltä ja Jussi Maunukselalle Jyväskylän yliopistolta työni ohjauksesta ja viisaista neuvoista. Lämmin kiitos myös muille minua työssäni auttaneille, Tero Korhoselle Heleniltä kaukolämpö-osaamisesta ja verkoston suunnitteluavusta, Pirjo Heineelle Helen Sähköverkko Oy:stä datan tarjoamisesta tutkimuskäyttöni sekä Pertti Kauraselle ja David Lloydille Aalto yliopistosta näkemyksistä virtausakkuihin liittyen. Perheeni ja ystäväni tuki on ollut minulle myös erityisen tärkeää ja haluan osoittaa kiitokseni myös heille

Helsingissä 15. heinäkuuta 2016

Kristiina Siilin

Sisältö

Tiivistelmä	3
Abstract	5
Esipuhe	7
1 Johdanto	15
2 Virtausakut	17
2.1 Virtausakun toiminta ja rakenne	17
2.1.1 Elektrodit	18
2.1.2 Elektrolyytti	20
2.1.3 Ioniläpäiseväkalvo	20
2.1.4 Pumput	20
2.2 Virtausakkuteknologiat	21
2.3 Virtausakkujen sovelluskohteet	22
3 Hajautettu energiajärjestelmä	25
3.1 Energian siirto sähkö- ja kaukolämpöverkossa	25
3.1.1 Sähköverkko	25
3.1.2 Kaukolämpöverkko	27
3.2 Energian varastointi sähkö- ja kaukolämpöverkossa	28
3.2.1 Akkukäyttöinen sähkövarasto	30
3.2.2 Lämpövarasto	31
4 Virtausakun arvolupaus	33
5 Mallinnus	35
5.1 Hajautettu virtausakku	35
5.2 Energian siirto hajautetulla virtausakulla	35

5.3	Hajautetun virtausakun varastointi- ja siirtokykyjen vertautuvuus sähkö- ja kaukolämpöverkkoon	37
5.4	Oletukset ja käytettävät parametrit	38
5.5	Hajautetun virtausakun mallinnus	38
5.5.1	Virtausakun kennon sähkökemiallinen malli	38
5.5.2	Virtausakun kennopinon sähköinen malli	42
5.5.3	Virtausakun mekaaninen malli	44
5.5.4	Hajautetun virtausakun hyötysuhteiden ja käyttöasteen mallinnus	45
5.6	Toteutettavuus ja kannattavuus	47
5.7	Kustannusrakenne	51
6	Tapaustutkimus	53
6.1	Litium-ioni akkujärjestelmä	57
6.1.1	Simulointimalli	57
6.1.2	Tulokset	59
6.2	Hajautetun virtausakun aurinko-osuus	60
6.2.1	Simulointimalli	60
6.2.2	Tulokset	62
6.3	Hajautetun virtausakun teho-optimointi	62
6.3.1	Simulointimalli	62
6.3.2	Tulokset	65
7	Tulosten tarkastelu	73
7.1	Energiajärjestelmien suorituskyky - aurinko-osuus	73
7.2	Energiajärjestelmien suorituskyky - teho-optimointi	75
7.3	Hajautetun ja keskitetyn energiajärjestelmän kustannukset	77
8	Päätäntö	79
A	Moodyn taulukko	86
B	Kerrostalon kulutusprofiilin kuukausierittely	87
C	540 kWh hajautetun virtausakun yhden kerrostalon kuorman huipulleikkauksen kuukausierittely	88

D	540 kWh litium-ioni akun yhden kerrostalon kuorman huipunleikkauksen kuukausierittely	89
E	Akkujärjestelmien kustannusarviot <i>M</i>	90

Lyhenteet

AC/AC-hyötysuhde	Järjestelmän kokonaishyötysuhde vaihtojänniteverkosta mitattuna
BoP	Balance of Plant, Järjestelmän tehoelektroniikka ja apujärjestelmät
DC/AC-muunnin	Tasavirran muuntaminen vaihtovirraksi
DC/DC-hyötysuhde	Järjestelmän tasajännitteestä mitattu hyötysuhde
DN	Kaukolämpöputken halkaisija
Fe/Cr	Rauta-kromi virtausakkukemia
Mpuk	Kaukolämmön kaksiputkielementti
NASA	National Aeronautics and Space Administration, USA:n Ilmailu- ja avaruushallintovirasto
O&M	Operation&Maintenance, Käyttö- ja huoltokustannukset
PNNL	Pacific Northwest National Laboratory, Yhdysvaltojen kansallinen energialaboratorio
PP	Polypropeeni, kiteinen muovi
PTFE	Polytetrafluorieteeni, teflon
PVC	Polyvinyylikloridi, kova muovi
PVDH	Polyvinyyliidenifluoridi, kestävä muovi
SOC	State of Charge, varausaste
Zn/Br	Sinkki-bromidi virtausakkukemia
Zn/poly-I	Sinkki-polyjodidi virtausakkukemia
2Mpuk	Kaukolämmön yksiputkielementti

1 Johdanto

Suomessa on luotettavat ja toimintavarmat lämmitys- ja sähkönsiirtoverkot, joilla siirretään suuria määriä voimalaitoksilla tuotettua energiaa. Energia-alan murros tulee näkymään energiaverkon rakenteessa ja energiantuotantomuodoissa, kun runsaasti hiilidioksidipäästöjä aiheuttavista tuotantomuodoista pitäisi päästä eroon. Ympäristölupaukset päästöjen vähennyksien osalta pakottavat siirtymään vähäpäästöisiin ja uusiutuviin energialähteisiin. Helenin tavoite vuoteen 2020 mennessä on vähentää 20 % hiilidioksidipäästöjä vuoden 1990 tasoon verrattuna, jolloin päästöt olivat 400 g/kWh [1]. Pidemmän aikavälin tavoite on puolestaan hiilineutraali energiantuotanto vuoteen 2050 mennessä.

Hiilineutraali energiantuotanto tarkoittaa päästöttömiksi luokiteltujen energialähteiden käyttöä energiantuotannossa. Nykyisen lainsäädännön mukaan esimerkiksi biomassan polttaminen luokitellaan päästöneutraaliksi [2]. Yleisimmät voimalaitosten polttoaineet, kivihiili ja maakaasu, aiheuttavat kuitenkin hiilidioksidipäästöjä, jotka pitää saada kuriin. Päästötavoitteiden saavuttamiseksi muun muassa Helenin Hanasaaren voimalaitos ajetaan alas vuoteen 2024 mennessä. Hanasaassa kivihiilellä, pelletillä ja näiden seospoltolla tuotetulle energialle on siten löydettävä korvaavaa energiantuotantoa. Tulevaisuuden energiajärjestelmissä hajautettu tuotanto tulee enenevässä määrin lisääntymään [3].

Hajautettu energiantuotanto asettaa haasteita energiajärjestelmän hallinnalle kokonaisuutena ja tuotannon varalle on asennettava energiavarastoja. Varastointiratkaisu määräytyy sovelluskohteen tarpeista. Pumppuvoimaa on käytetty sähkön varastointiin vuosikausia ja sitä on asennettu maailmanlaajuisesti jo yli 100 GW. Pumppuvoiman lisäksi akkukäyttöiset sähkövarastot tulevat lisääntymään muiden varastointiteknologioiden ohessa [4]. Uusiutuvien energialähteiden osalta aurinko- ja tuulienergian lisääminen pienentävät sähköverkon inertiaa. Sähköverkon inertian pieneneminen epästabiloi verkkoa, jolloin sähkövarastojen lisäarvo korostuu, sillä sähkövarastojen avulla pystytään niiden nopean vasteajan ansiosta reagoimaan sähköverkon jännite- ja taajuusvaihteluihin.

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan kokonaisuutta, joka sekä siirtäisi että varas-

toisi energiaa. Työssä tutkittu hajautettu energiajärjestelmä yhdistää hajautetun uusiutuvan energiantuotannon sekä kulutuksen laajalla, energian siirtoon käytettävällä putkiverkostolla kaukolämpöverkoston tapaan. Putkiverkosto on iso hajautettu energiavarasto ja siirtoreitti, joka teknologian sallimissa rajoissa voisi tulevaisuudessa kuljettaa ja varastoida sekä lämpöä että sähköä. Työssä keskitytään virtausakku-tekniikkaan, missä energia varastoidaan kennopinoissa kiertävään elektrolyyttiin.

Tässä tutkimuksessa kehitetään malli hajautetulle virtausakkuverkostolle, joka tulee olemaan hyvä lähtökohta tulevaisuuden jatkotutkimuksille, kun virtausakku-tekniikka on riittävän kypsä käytettäväksi osana esitetyn kaltaista energiajärjestelmää. Mallin avulla tutkitaan hajautetun virtausakun toimintaa aurinkosähkön väliaikaisvarastona ja toimintaa kulutuskohteen tehopiikkien tasoituksessa. Hajautetun virtausakun suorituskykyä verrataan litium-ioni akkujärjestelmään tulosten arvioimiseksi. Hajautetun virtausakun etu verrattuna perinteisiin virtaus- ja litium-ioni akkuihin on joustava energianvarastointikapasiteetin ja tehon määrittäminen sekä sähkönsiirron ja -varastoinnin yhdistäminen.

2 Virtausakut

2.1 Virtausakun toiminta ja rakenne

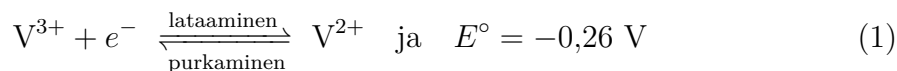
Tässä kappaleessa esitellään virtausakun toiminta ja rakenne käyttäen esimerkkinä vanadiini-virtausakkua, joka on tieteellisten julkaisujen perusteella eniten tutkittu ja kattavimmin raportoitu [5–7]. Vanadiini-virtausakun toiminta ja rakenne ovat yleistettävissä muihin virtausakkuteknologioihin. Teknologiakohtaiset erot fysikaalisissa ja kemiallisissa ominaisuuksissa täytyy kuitenkin tarkemmassa tarkastelussa huomioida tapauskohtaisesti.

Vanadiini-virtausakun rakenteen periaatekuva on esitetty kuvassa 1. Virtausakku koostuu ulkoisista elektrolyyttitankeista, kennopinoista sekä tankkeja ja kennopinoja yhdistävästä putkistosta ja pumpuista. Kennopinon sisällä on useita sarjaan kytkettyjä kennoja, joiden elektrodeina käytetään bipolaarielektrodeita. Elektrodienvälissä on elektrolyyttejä erottava ioniläpäisevä kalvo sekä molemmissa puolikennoissa omat hiilihuopasuodattimet ja virrankeräimet.

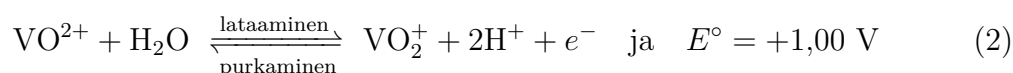
Virtausakun toiminta perustuu hapettuvien ja pelkistyvien ionien reaktioihin virtausakun puolikennoissa. Vanadiinilla on neljä perättäistä hapetusastetta, + 2, + 3, + 4 ja + 5, jotka mahdollistavat metallin käytön vanadiini-virtausakun molemmissa puolikennoissa. Saman alkuaineen käyttö sekä positiivisen puolikennon katolyytissä että negatiivisen puolikennon anolyytissä estää elektrolyyttien sekoittumisesta ioniläpäisevän kalvon välityksellä aiheutuvat haitat. Monissa teknologioissa ominaisuuksiltaan eroavat anolyytti ja katolyytti sekoittuessaan vaurioittavat akkua ja heikentävät sen toimintakykyä.

Latauksen aikana energianlähteen tuottama sähköenergia muuttuu kennossa hapetus-pelkistysreaktioiden seurauksena kemialliseksi energiaksi ja varastoituu akkuun. Akun varauksen purkautuessa ulkoisen kuorman hyväksi akkuun varastoitunut kemiallinen energia muuttuu takaisin sähköenergiaksi. Vanadiini-virtausakun latautuessa anolyytin vanadiini-ionit pelkistyvät ja vastaanottavat elektroneja. Vanadiinin hapetusaste muuttuu siis $+3 \rightarrow +2$. Varauksen purkautuessa anolyytissä tapahtuu hapetusreaktio ja vanadiini-ionit luovuttavat elektroneja. Hapetusreaktio muuttaa

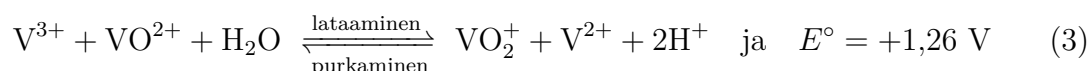
vanadiinin hapetusasteen takaisin $+2 \rightarrow +3$. Negatiivinen puolireaktio ja reaktion standardi kennopotentiali E° ovat



Positiivisessa puolikennossa latauksen aikana tapahtuu päinvastainen reaktio, eli katolyytin vanadiini-ionit hapettuvat. Vanadiini-ionit luovuttavat elektroneja ja niiden hapetusaste muuttuu $+4 \rightarrow +5$. Varauksen purkautuessa vanadiini-ionit pelkistyvät ja vastaanottavat elektroneja, hapetusaste muuttuu siis $+5 \rightarrow +4$. Positiivinen puolireaktio ja standardi kennopotentiali ovat



Kokonaiskennoreaktio ja kennopotentiali ovat

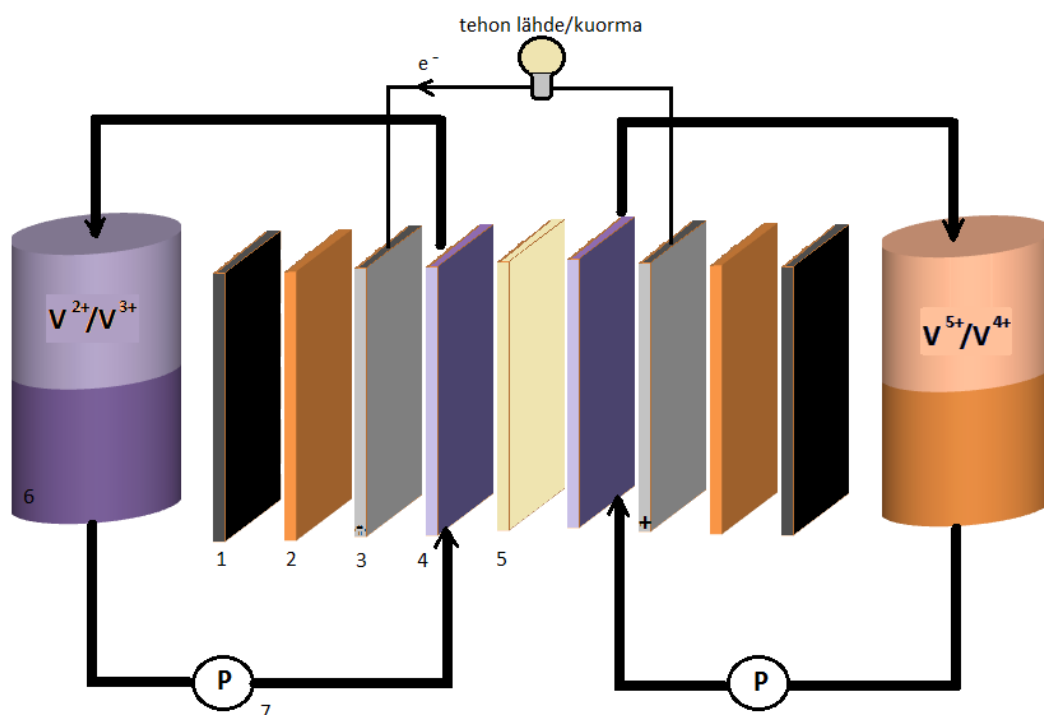


Virtausakussa elektronit kulkevat ulkoisessa piirissä, minne ne pääsevät elektrodien ja virrankeräinten välityksellä kuten kuvasta 1 nähdään. Varauksen tasapainottamiseen tarvittavat positiiviset ionit liikkuvat puolestaan elektrolyyttien välillä ioniläpäisevän kalvon välityksellä. Vanadiini-virtausakussa varausta tasapainottavat H^+ -ionit.

2.1.1 Elektrodit

Virtausakussa kemialliset hapetus-pelkistysreaktiot tapahtuvat elektrolyytissä kuvan 1 merkittyjen elektrodien välittömässä tuntumassa. Hapetuksen aikana irronneet elektronit liikkuvat elektrodien ja virrankeräimien välityksellä ulkoiseen piiriin tuottaen sähkövirtaa. Elektrodien efektiivinen pinta-ala määrittää akusta saatavan tehon yhdessä kennojen lukumäärän kanssa.

Elektrodimateriaalina käytetään vanadiini-virtausakuissa grafiitista valmistettuja bipolaarielektrodeja ja huokoista grafiittihuopaa. Huokoista grafiittihuopaa käytetään efektiivisen pinta-alan parantamiseksi. Vanadiinin V^{5+} -ionimuodon voimakkaasti hapettavan luonteen takia hiili ja grafiitti ovat harvoja elektrodimateriaaleja, joita vanadiini-virtausakuissa voidaan käyttää. Bipolaarielektrodien ja huovan sähköjohtokyvyt vaikuttavat kennon sisäiseen resistanssiin, eli latauksen ja purkamisen aikana tapahtuvaan jännitehäviöön.



Kuvio 1. Periaatekuva vanadiini-virtausakun rakenteesta. Akku koostuu päätylevyistä (1), virrankeräimistä (2), bipolaari elektrodeista (3), hiilihuopasuodattimista (4), ioniläpäisevästä kalvosta (5), elektrolyyttitankeista (6) ja elektrolyyttejä kierrättävistä pumpuista (7).

2.1.2 Elektrolyytti

Elektrolyytti on yksi akun tärkeimmistä komponenteista, sillä sen konsentraatio ja tilavuus määräävät akun energianvarastointikapasiteetin. Pääsääntöisesti virtausakuteknologioissa elektrolyyttiliuos on joko voimakkaasti hapan tai emäksinen, jotta varausta kuljettavat ionit liukenevat. Elektrolyytin energiatiheys määräytyy metalli-ionien liukoisuudesta, eli suurimmasta mahdollisesta reaktiivisen aineen konsentraatiosta elektrolyyttiliuoksessa. Vanadiini-virtausakussa vanadiini-ionien liukoisuuteen vaikuttavat sekä rikkihappoliuoksen konsentraatio että vallitseva lämpötila.

Vanadiini-virtausakun toimintalämpötila on rajattu tarkasti välille 10 – 40 °C ja elektrolyytin rikkihapon konsentraation ylärajaksi suositellaan 6 M [8]. Suositusten ulkopuolella vanadiini-ionit saostuvat elektrolyyttiliuokseen ja pienentävät akun kapasiteettia. Vanadiini-virtausakun elektrolyytin asettamat rajoitteet mahdollistavat käytännön sovelluksissa energiatheyden 25 – 30 Wh/l.

Virtausakut rakennetaan energiavarastoa tarvitsevien sovellusten läheisyyteen, jolloin elektrolyytti voidaan helposti varastoida isoihin tankkeihin. Tankkien koon kasvattaminen mahdollistaa energiavarastointikapasiteetin kasvattamisen ja kompensoi elektrolyytin matalaa energiatheyttä.

2.1.3 Ioniläpäiseväkalvo

Ioniläpäisevän kalvon tarkoituksena on estää anolyytin ja katolyytin keskinäinen sekoittuminen. Vanadiini-virtausakussa vanadiini-ionien diffusioituminen kalvon lävitse heikentää sekä akun coulombista hyötysuhdetta että akun kapasiteettia. Ideaalitalanteessa kalvo läpäisee ainoastaan varausta tasapainottavat ionit ja estää aktiivisen aineen läpipääsyn. Ioniläpäisevän kalvon sähkönjohtavuus sekä ionijohtavuus vaikuttavat myös kennon sisäiseen resistanssiin.

2.1.4 Pumput

Elektrolyyttien kierrättämiseen elektrolyyttitankkien ja kennojen välillä tarvitaan mekaanista työtä tekevät pumput. Pumppujen tarvitsema pumppausteho voidaan ottaa virtausakusta, mikä pienentää akusta saatavaa tehoa, eli sen kokonaishyötysuhdetta. Pumppaustehon tarpeeseen vaikuttavat käytettävä elektrolyytin tilavuusvirta sekä kennopinossa ja putkistossa tapahtuvat painehäviöt.

2.2 Virtausakkuteknologiat

Virtausakkujen tutkimus ja kehitys alkoivat 1970-luvulla. Ensimmäisten teknologiakehittäjien joukossa on NASA Yhdysvalloista (National Aeronautics Space Administration), joka kehitti virtausakkuja muun muassa bulkkivarastoksi, kysynnän ja tarjonnan yhteensovittamiseksi sekä uusiutuvan energian käytettävyyden parantamiseksi. NASA kehitti ja testasi 1970-luvulla pääasiallisesti rauta-kromi-virtausakkuja (Fe/Cr) [5, 9]. Samanaikaisesti Yhdysvalloissa muun muassa Exxon kehitti sinkki-bromidi-virtausakkua (Zn/Br) [10]. Myös vanadiini-pohjaiset elektrolyytit olivat tunnettuja 1970-luvun lopulla [9]. Aluksi niiden tutkimukseen keskittyi NASA, mutta 1980-luvun puolivälin jälkeen merkittävin tutkimus- ja kehitystyö vanadiini-virtausakkujen osalta on tapahtunut Australiassa New South Walesin yliopistossa Maria Scyllas-Kazacosin tutkimusryhmän johdolla, jotka kehittivät ja patentoivat täysin vanadiiniin pohjautuvan virtausakkukemian [5]. Vanadiini virtausakkuja on tutkittu Scyllas-Kazacosin tutkimusryhmän rinnalla japanilaisten yritysten toimesta ja niiden kaupallinen myynti on alkanut pitkällisen kehitystyön jälkeen vuonna 1993 [9].

Vanadiini-virtausakun matalasta energiatiheydestä huolimatta se on saavuttanut kaupallisen aseman ja sen teknologiakehitys on edellä rauta-kromi- ja sinkki-bromidi-virtausakkujen kehitystä. Vanadiini-virtausakkuja on kaupallisesti saatavilla useilta eri tahoilta. Muutamia virtausakkuja myyviä yrityksiä ovat UniEnergy Technologies, American Vanadium yhdessä Gildemeisterin energia ratkaisujen kanssa, Imergy, The REDT Energy Storage ja Prudent Energy. Sinkki-bromidi-virtausakkuja kaupallisesti myyvät ainoastaan RedFlow ja EnSync.

Virtausakkujen kehittäminen on ajankohtainen tutkimuskohde, sillä uusiutuvan energian käyttöön painostetaan nykyisen energiantuotannon päästöjen vähentämiseksi. Uusia akkuteknologioita kehitetään muun muassa yliopistojen laboratorioissa, mutta myös Yhdysvaltojen kansallinen laboratorio Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) on yhtenä tutkimusalueenaan keskittynyt virtausakkujen tutkimukseen. PNNL on mukana Bin Lin tutkimusryhmän kehityshankkeessa[11], missä tutkimusryhmä kehittää sinkki-polyjodidi-virtausakkua (Zn/poly-I). Yhdysvalloissa Harvardin yliopistossa Michael J. Azizin tutkimusryhmä on puolestaan kehittämässä orgaanista kinoni-virtausakkua [12]. Myös Suomesta, Aalto-yliopistosta löytyy virtausakkuihin keskittyvä tutkimusryhmä, joka David Lloydin johdolla kehittää

kuparivirtausakkua [13].

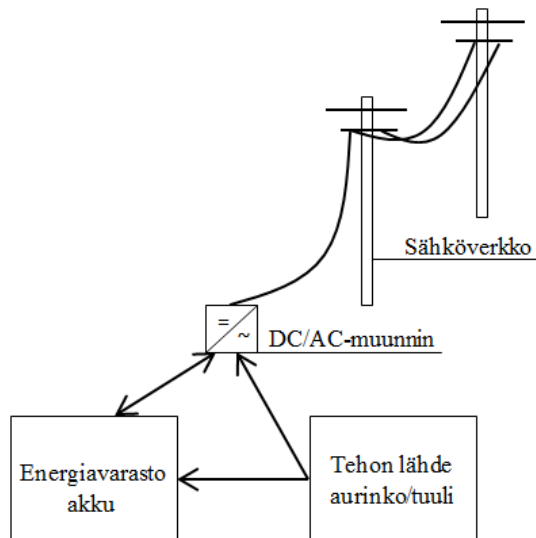
Virtausakkujen elektrolyytti on yksi tärkeä tutkimuskohde, sillä elektrolyytin energiatiheys ja käytönkestävyys määrittävät akun toimintakyvyn ja sen turvallisuuden. Olemassa olevia virtausakkukemioita parannetaan ja ympäristöystävällisempiä virtausakkukemioita kehitetään, kuten edellä on mainittu. Vanadiini-virtausakussa elektrolyytti on valmistettu rikkihapposta. Myös rauta-kromi ja sinkki-bromidi virtausakuissa on hapan elektrolyyttiliuos, jonka vuoksi nykyisten virtausakkujen elektrolyyttiliuos vaatii huolellista säilytystä muun muassa vuotojen varalta.

2.3 Virtausakkujen sovelluskohteet

Virtausakut soveltuvat hyvin suurenkokoluokan sovelluksiin. Virtausakkujen etuna on tehon ja energian riippumattomuus toisistaan. Tehon ja energian kasvattaminen lisäämällä vastaavasti kennojen lukumäärää ja elektrolyytin määrää mahdollistavat akun sovittamisen käyttökohteen tarpeisiin. Virtausakku vie kuitenkin paljon tilaa, jonka takia se soveltuu parhaiten paikalle asennettavien paljon tehoa ja energiaa tarvitsevien sovellusten yhteyteen. Virtausakkujen etuna perinteisiin litium-ioni-, lyijy- ja natrium-rikki-akkuihin verrattuna on niiden laaja lataus- ja purkusyvyysalue, pitkäkestoinen purkuaika, nopea vasteaika, turvallisuus ja skaalautuvuus.

Tyypillisiä virtausakkujen sovelluskohteita ovat etäiset käyttökohteen, joiden sähköverkkoyhteys on epävakaata, tarve uusiutuvan energian varastointiin ja sen kapasiteetin lisäämiseen, kysyntäjousto sekä verkon tuki, joka mahdollistaa taajuuden säätelyn, verkkojännitteen ylläpidon ja äkillisiin tehopiikkeihin reagoimisen.

Virtausakkujen teho ja energia riippuvat sovelluskohteesta sekä käyttötarpeesta. Tyypillisesti virtausakkusovelluksissa on merkittävä energianvarastointikapasiteetti, kuten Skotlantiin Gighan saarelle on asennetussa 1,62 MWh:n REDTenergyn vanadiini-virtausakussa [14] ja Kiinaan asennettavassa UniEnergy Technologiesin yhteistyökumppani Rongke Powerin 800 MWh:n vanadiini-virtausakussa [15]. Nykyisellään virtausakut kytketään DC/AC-muuntimien kautta suoraan sähköverkkoon ja energian siirto tapahtuu sähköinä, kuten muidenkin akkuteknologioiden tapauksessa. Kuvassa 2 on havainnollistettu nykyistä sähkönsiirtoverkkoa. Vaihtoehtoinen energiansiirtotapa siirtäisi sähkön sijaan elektrolyyttiin varautunutta kemiallista energiaa.



Kuvio 2. Nykyisin akkujen avulla yhdistetään uusiutuvat energianlähteet suoraan sähkösiirtoverkkoon.

3 Hajautettu energiajärjestelmä

3.1 Energian siirto sähkö- ja kaukolämpöverkossa

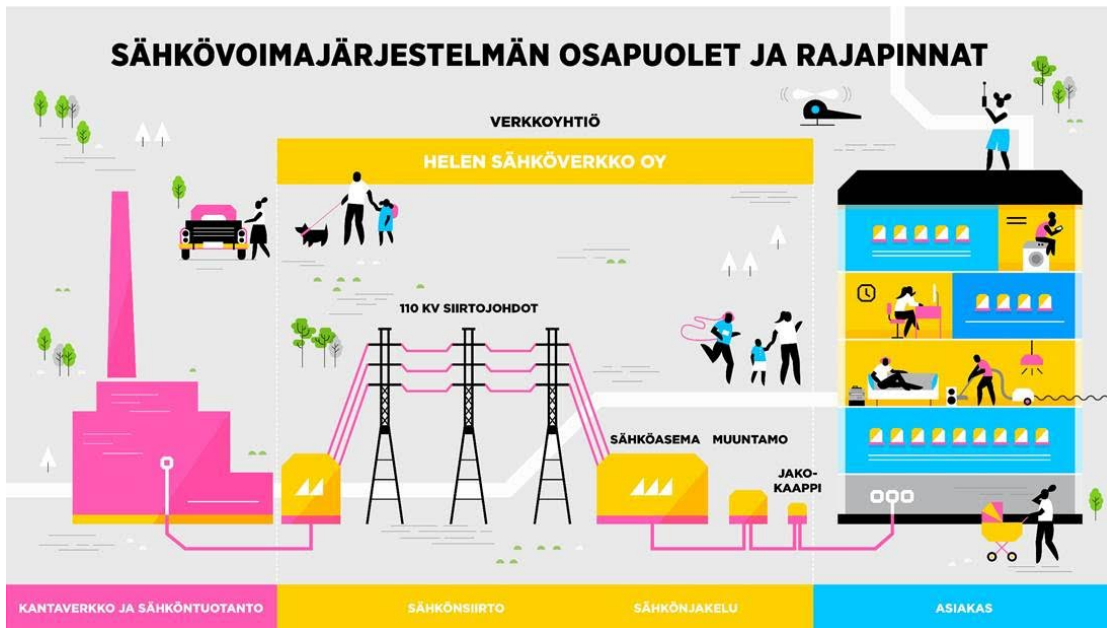
Energiaa on siirretty sähkö- ja kaukolämpöverkossa nykyisen kaltaisella verkostolla kauan. Aluksi sähköä tuotettiin paikallisesti sekä siirrettiin vain lähialueille. Sähköverkko on kuitenkin kehittynyt teknologian kehittyessä sekä kulutuksen kasvaessa. Ajan saatossa sähkönsiirto on muuttunut muun muassa tasajännitteisestä vaihtojännitteiseksi ja siirtojännitteitä on kasvatettu. Nykyään Suomessa on koko maan kattava jakeluverkosto, jonka lisäksi se on yhdistetty pohjoismaiden yhteiskäyttöverkkoon Nordel.

Kaukolämpö puolestaan on 1950-luvun alusta asti Suomessa käytössä ollut lämmitysmuoto. Kaukolämpö on levinnyt laajalle ja kattaa nykyään lähes jokaisen kaupungin ja taajaman. Vuonna 2014 suurin osa Suomen asuinrakennusten lämmitykseen kulutetusta energiasta oli peräisin kaukolämmöstä, jonka osuus oli 32 % [16].

3.1.1 Sähköverkko

Sähköä siirretään voimalinjoja pitkin. Fingrid omistaa Suomen kantaverkon, joka koostuu verkon runkojohdoista, joihin suuret voimalaitokset, teollisuus ja alueelliset jakeluverkot ovat liittyneet. Kuvassa 3 on havainnollistettu sähköverkon rakennetta. Fingrid huolehtii sähkön luotettavasta ja häiriöttömästä jakelusta. Energian siirto sähköverkkoja pitkin on hyötysuhteeltaan hyvä ja vuotuiset siirtohäviöt ovat noin 3 % [17]. Helen Sähköverkko Oy:n kaikkien verkkotasojen verkostohäviöt olivat vuonna 2015 2,6 % jakelualueen kokonaiskulutuksesta. Verkon suunnittelussa huomioidaan taloudellisuus, luotettavuus, turvallisuus sekä sähkön laadun takaaminen [18].

Sähköverkoilla siirretään paljon sähkötehoa ja siirtämiseen käytetään korkeita jännitteitä. Kantaverkko on niin kutsuttu suurjänniteverkko, missä siirtojännitteet ovat 420 kV, 245 kV sekä 110 kV. Sähkötehoa siirretään kolmivaiheisena ja se muunnetaan käyttötarvetta vastaavaksi jännitteeksi lähellä kulutuskohdetta. Keski-jänniteverkon jännite on 20 kV tai 10 kV ja pienjänniteverkon jännite 0,4 kV.



Kuvio 3. Sähköverkko koostuu tuotantolaitoksista, sähkönsiirtoverkosta, sähköasemista ja muuntajista. Sähkönsiirto tapahtuu korkeajänniteisenä häviöiden minimoimiseksi, jonka takia sähköverkon osien välille tarvitaan muuntajia. (Kuva: Markku Hyvärinen, Helen Sähköverkko Oy, 2015).

Suomessa sähköverkko toimii 50 Hz:n taajuudella ja taajuuden ylläpito on yksi sähkön laatukriteeri.

Suurin osa asiakasta häiritsevistä laatuhaistoista johtuu katkoksista alue- ja jakeluverkossa, mutta myös asiakkaan sähkölaitteet vaikuttavat liityntäpisteen sähkönlaatuun. Maakaapeleiden käyttö sähkön siirrossa on toimintavarmempaa ilmajohdoilla siirtämiseen verrattuna. Vuotuiset sääolosuhteet vaikuttavat toimintavarmuuteen ja suurimmat haitat koetaan pitkien siirtoetäisyyksien päässä maaseudulla ja taajamissa. Vuoden 2014 aikana toimituskatkoksien kokonaiskesto asiakasta kohti oli keskimäärin noin 2 tuntia [19]. Sähkö- ja kaukolämpöverkon toimintavarmuuksia ja häviöitä on vertailtu taulukossa 1.

3.1.2 Kaukolämpöverkko

Kaukolämpöverkosto koostuu meno- ja paluuputkista, joiden avulla lämpöenergiaa siirretään voimalaitoksilta asiakkaille ja takaisin. Kaukolämpöverkoston rakennetta on havainnollistettu kuvassa 4. Siirtoputkisto koostuu siirto- ja jakelujohdoista. Kaukolämpöputket ovat pääasiassa kiinnivaahdotettuja putkia, eli teräksinen virtausputki ja polyeteenisuojakuori on eristetty ja kiinnitetty yhteen polyuretaanieristeellä. Putkia on saatavilla yksi- ja kaksiputkielementteinä, joita kutsutaan vastaavasti 2Mpuk- ja Mpuk-putkiksi. 2Mpuk-putkessa on yksi teräksinen virtausputki suoja-kuoren sisällä, kun taas Mpuk-putkessa on kaksi virtausputkea vierekkäin saman suoja-kuoren sisällä [20].

Kaukolämpöverkko on mitoitettu kestäämään maksimissaan 1,6 MPa paine. Asiakkaille taataan normaaleissa käyttöolosuhteissa vähintään 60 kPa paine-ero. Menoveden lämpötila on ympäröivistä sääolosuhteista riippuen 65 – 115 °C ja paluueden lämpötila 40 – 60 °C. Kaukolämpöjohtojen mitoitus tehdään tarvittavan lämpötehon perusteella. Veden tilavuusvirta Q sekä meno- ja paluueden lämpötilaero ΔT vaikuttavat saatavaan lämpötehoon Φ . Lämpötehon laskemiseen tarvitaan lisäksi veden ominaislämpökapasiteetti c_p , joka kertoo kuinka paljon lämpöenergiaa aineeseen sitoutuu massaa ja lämpöastetta kohden, sekä veden tiheys ρ :

$$\Phi = c_p \rho Q \Delta T. \quad (4)$$

Vettä halutaan pumpata mahdollisimman pienellä teholla, jolloin myös veden virtausnopeus hidastuu. Hidas virtausnopeus mahdollistaa maksimaalisen jäähtymisen, eli meno- ja paluuputkien lämpötilaero kasvaa, kun asiakkaan laitteilla on enemmän aikaa absorboida lämpöä. Pienemmän virtausnopeuden ja tilavuusvirran käyttö mahdollistaa myös siirtoputkien dimensioiden pienentämisen [20].

Vuoteen 2014 mennessä kaukolämpöverkostoa on rakennettu Suomessa yhteensä 14 300 km [21]. Pitkien siirtolinjojen takia kaukolämmön siirrossa tapahtuu myös siirtohäviöitä. Siirtohäviöitä ovat muun muassa lämpöhäviöt sekä painehäviöt, jotka aiheutuvat kitkahäviöistä putkistovirtauksissa. Myös vuotohäviöt ovat mahdollisia ja johtavat vesihävikkiin ja tuotetun lämpöenergian hukkaamiseen. Kaukolämpövesi on käsitelty kemikaaleilla muun muassa hapen poistamiseksi, pH:n ja kovuuden säätämiseksi sekä veden värjäämiseksi. Vuotojen helpompi ja nopeampi havaitseminen perustuu kiertoveden värillisyyteen [22].

Kaukolämpöverkoston hyötysuhde lasketaan myydyn ja hankitun lämmön suhteena, josta nähdään myös suoraan verkoston häviöiden osuus. Kaukolämpöverkon hyötysuhde on keskimäärin 91 % ja se vaihtelee järjestelmän kokoluokan mukaan [23]. Keskimäärin kaukolämpöverkon häviöt ovat siis 9 %. Suurissa verkoissa käytettävillä kookkailla virtausputkilla on pienempiin siirtoputkiin verrattuna pienempi vaippa-ala lämmönsiirtokykyyn suhteutettuna, jolloin suurien verkkojen lämpöhäviöt ovat vähäisemmät pienempiin kaukolämpöverkkoihin verrattuna [24]. Sähkö- ja kaukolämpöverkossa tapahtuvat häviöt sekä niiden toimintavarmuudet on koottu taulukkoon 1.

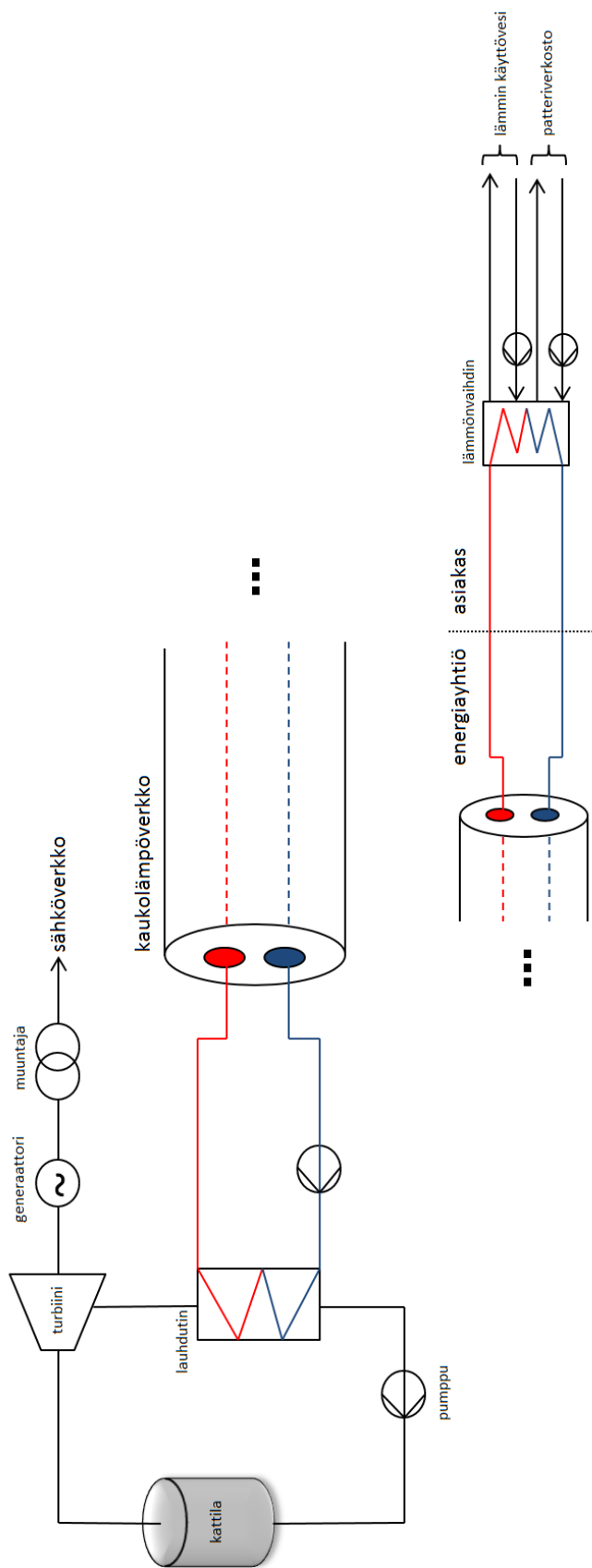
Taulukko 1. Sähkö- ja kaukolämpöverkon siirtovarmuuksien ja -häviöiden vertailu.

	Kaukolämpöverkko	Sähköverkko
Siirtovarmuus (%)	99,9 [25]	99,9 [19]
Hyötysuhde (%)	91 [23]	97 [17]
Häviöt (%)	9 [23]	3 [17]

3.2 Energian varastointi sähkö- ja kaukolämpöverkossa

Energian varastointi on keskeisessä roolissa, kun kysyntä ja tarjonta eivät vastaa toisiaan. Sähkön varastointiin on olemassa useita eri teknologioita. Sähköenergiaa voidaan varastoida sähkökemiallisesti akkuihin, mutta myös mekaanisena energiana vauhtipyöriin, paineilmaan ja pumppuvoimalaitoksiin. Lisäksi kondensaattoreita ja suprajohtavia keloja voidaan käyttää sähköenergian varastointiin.

Myös lämpöä voidaan varastoida. Lämmön varastointi vaatii väliaineen, johon lämpö sidotaan. Vedellä on hyvä lämmönvarastointikyky ja sitä käytetään esimerkiksi lämpöakuissa väliaineena. Lämpöakkuja ovat muun muassa isot vesisäiliöt, jotka pystyvät varaamaan runsaasti energiaa.



Kuvio 4. Kaukolämpöverkon rakenne. Tuotantolaitos ja kaukolämpöverkosto kuuluvat energiayhtiölle ja asiakkaan vastuulla on hankkia lämmönvaihtimien takana oleva tekniikka. Tuotantolaitoksen ja asiakkaan liityntäpisteen välillä on haaroittunut kaukolämmön putkiverkosto, joka koostuu runko-, siirto- ja jakelujohdoista.

3.2.1 Akkukäyttöinen sähkövarasto

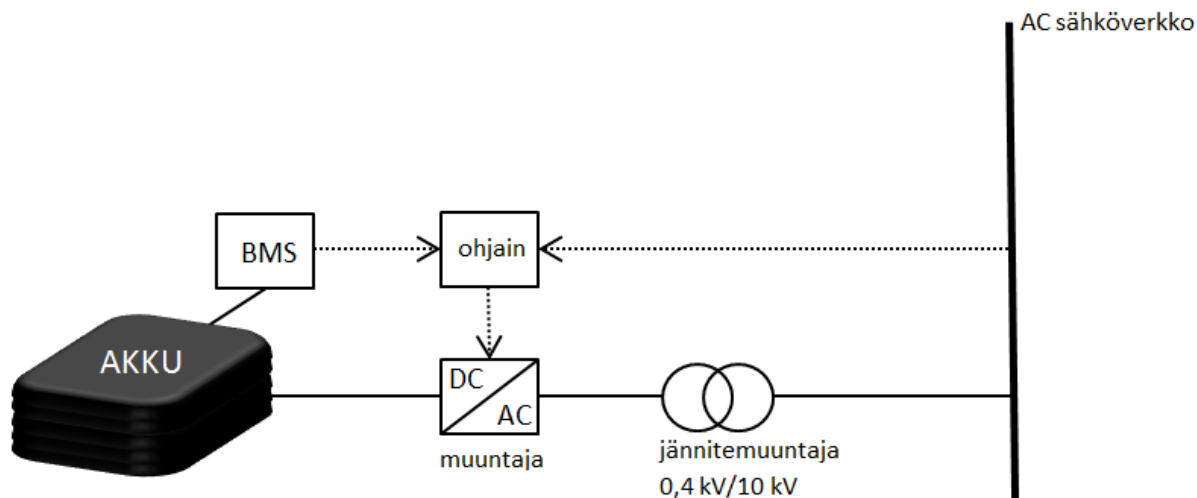
Pienessä mittakaavassa sähkövarastoina käytetään akkuja, jotka varastoivat sähköenergian kemialliseksi energiaksi akun sisällä oleviin kennoihin. Energianvarastointitarpeen kasvaessa sähköön varastointiin käytetään muun muassa pumppuvoimaloita, jotka nykyisellään muodostavat suurimman osan (yli 95 %) maailman sähköön varastointikapasiteetista [26].

Akkujen koko riippuu energianvarastointitarpeesta ja niitä löytyy sekä sähköverkon että kotitalouksien tarpeisiin. Sähköverkon yhteydessä akkujen avulla säädetään verkon taajuutta ja jännitettä, jotka riippuvat verkon kuormitustilanteesta. Akkuja asennetaan myös uusiutuvan energiantuotannon yhteyteen tuotantolaitoksille ja kuluttajille. Pienemmän kokoluokan akkujen käyttö on yleistä kotitalouksissa, joihin on integroitu omaa energiantuotantoa.

Omilla kotitalousakuilla asiakkaalla on lisäksi mahdollisuus vaikuttaa oman sähköön ostoajankohtaan ja taata itselle katkoton sähkö saanti esimerkiksi sähkökatkojen aikana. Toimituskatkosten lisäksi kuluttaja voi hakea säästöä sähkölaskuunsa ostamalla sähköä edullisempien tuntien aikana, kuten yöllä. Hintatietoisella ostamisella ja kysyntäjouston hyödyntämisellä voi lisäksi ehkäistä yleistä sähköverkon tehopulaa ja vähentää verkon huippukuormitustilanteita. Yksityiskäyttöön asennettavia litium-ioni sähkövarastoja myyvät muun muassa Tesla, Mercedes-Benz ja BYD[27–29]. Akkujen koko vaihtelee 2,5 kilowattitunnista 30 kilowattituntiin ja kotitalousakkujen teknologiana käytetään litium-ioni-teknologiaa, joka hyvän energiatiheydensä ansiosta mahdollistaa suhteellisen pienen laitekoon. Litium-ioni akkujen lisäksi kotitalouksiin on saatavilla lyijyakkuja, Redflown sinkki-bromidi virtausakkuja ja Aquion Energyn AHI suolavesiakkuja [30, 31].

Esimerkiksi Teslan Powerwall-akun hinta veroineen on Suomessa arvioitu olevan 4000 €. Kyseisen litium-ioni-akun DC/DC-hyötysuhde on 92 % ja se on käyttövarma ratkaisu energian varastointiin [27]. Akun mukana ei kuitenkaan tule ohjausjärjestelmää tai muuntajaa, jotka lisäävät osaltaan hankintakustannuksia sekä pienentävät akun kokonaishyötysuhdetta. Litium-ioni-akun AC/AC-hyötysuhde putoaa 83 %:iin, jos oletetaan DC/AC-muuntimen hyötysuhteeksi 95 %. Akun hankintahinta on korkea, jolloin sen hankintaan kannustaa todellinen tarve energian varastoinnille.

Virtausakkujen hyötysuhde litium-ioni-akkuihin verrattuna on heikompi. Virtausakut soveltuvat verkon yhteyteen, kuten edellä on mainittu. Virtausakkujen hyötysuhde vaihtelee valmistajan ja käytön mukaan. Esimerkiksi American Va-



Kuvio 5. Akkujärjestelmä tarvitsee energiaa varastoivan akun lisäksi myös ohjausjärjestelmän (BMS), joka mittaa akun käytön aikana muuttuvia parametreja. Ohjaimen tehtävä on ohjata järjestelmän toimintaa sekä BMS signaalin että AC sähköverkosta mitatun informaation pohjalta. Lisäksi AC sähköverkkoon kytkeminen vaatii akun tuottaman tasajännitteen muuntamisen vaihtojännitteeksi ja edelleen jännitteen muuntamisen jännitemuuntajalla siirtojännitettä vastaavaksi.

nadiumin CellCube-virtausakkujen DC/DC-hyötysuhteeksi on luvattu 70 – 80 % riippuen akun koosta [32]. Myös virtausakkujen AC/AC-hyötysuhde on DC/DC-hyötysuhdetta heikompi ja riippuu DC/AC-muuntimen hyötysuhteesta. Sähkön ja lämmön varastointia on vertailtu hyötysuhteiden sekä toimintavarmuuksien osalta taulukossa 2.

3.2.2 Lämpövarasto

Lämmön kulutusta tasataan lämpöakuilla. Aamulla, kun rakennuksia lämmitetään ja ihmiset käyvät suihkussa lämmön tarve kasvaa yöaikaan verrattuna. Lämpöakkuja varataan siis yöllä sähkön ja lämmön yhteistuotannolla, jolloin voidaan vähentää tarvetta lämpökeskuksien käytölle aamun kuormitushuippuina. Lämpöakkujen avulla voidaan lisäksi parantaa kaukolämpöverkon toimintavarmuutta putkistovuotojen yhteydessä.

Lämpöakkuja voidaan käyttää kaukolämmön varastointiin joko lyhyt- tai pitkä-

Taulukko 2. Sähkön ja lämmön varastoinnin vertautuvuus hyötysuhteen ja toimintavarmuuden osalta.

	Lämmön varastointi	Sähkön varastointi
Toimintavarmuus (%)	100	100
Hyötysuhde (%)	50-90 [37]	92 (DC/DC, litium) [27] 70-80 (DC/DC, virtaus) [32]
Häviöt	Lämpöhäviöistä	Varauksen itsepurkautumisesta Tehoelektronikasta Kennon sisäisistä häviöistä

aikaisvarastoina. Lyhytaikainen varastointi soveltuu varastointiajaltaan muutamista tunneista viikkoihin, kun taas pitkäaikaisvarastossa lämpöä voidaan varastoida useita kuukausia. Lämpöakuissa varastoinnin häviöt aiheutuvat lämpöhäviöistä ja riippuvat paljon ympäristön sääolosuhteista. Kylmemmällä säällä hukkalämpöä tulee enemmän kuin lämpimällä. Lämpöakkujen häviöihin vaikuttaa myös varastointi aika. Pitkäaikaislämpövaraston lämpöhäviöiden osuus on arviolta 50 %, jos akku varataan kerran kesällä ja puretaan kerran talvella. Todellisuudessa lämpöhäviöt ovat pienemmät käyttösyklin lyhentyessä [33].

Helen Oy:n lämpöakut sijaitsevat Vuosaaressa ja Salmisaaressa vastapainevoimalaitosten yhteydessä ja niiden yhteenlaskettu tehokapasiteetti on 200 MW [34]. Kaukolämmityksen lisäksi kiinteistöjä voidaan nykyisin viilentää kaukojäähdytyksellä, jolloin myös jäähdytysvarastoja tarvitaan samasta syystä kuin lämpövarastojakin. Suomessa jäähdytysenergian kysynnän arvioidaan kasvavan tulevaisuudessa ja tällä hetkellä Suomen suurin kaukojäähdytyksen toimittaja on Helen Oy [35]. Helen Oy:llä on kaksi isoa jäähdytysakkua, jotka sijaitsevat maan alla. Pasilassa sijaitsevan jäähdytysakun tilavuus on 11500 m³ ja Esplanadin puiston alla sijaitsevan akun tilavuus 25000 m³ [36]. Jäähdytysakkujen tehokapasiteetti ja tilavuus ovat vähäisemmän kysynnän takia vielä pienemmät suhteessa lämpöakkuihin.

4 Virtausakun arvolupaus

Sähköä saadaan tuotantolaitosten toimiessa ja keskeytys tuotannossa keskeyttää myös sähkön saannin. Lisäksi kysynnän on vastattava tuotantoa, jotta sähköverkko pysyy stabiilina. Ylimääräinen tuotanto johtaa energiahävikkiin, kun taas tuotantoa suurempi kysyntä johtaa tehopulaan. Kysynnän ja tarjonnan yhteensovittamiseksi voidaan käyttää sähkövarastoja, joissa sähköenergia muutetaan toiseen energiamuotoon ja varastoidaan myöhempää käyttöä varten. Sähkövarastoja voidaan käyttää kysyntäjoustop lisäksi myös sähkön laadun takaamiseen. Sähkövarastojen avulla voidaan siten parantaa sähköverkon luotettavuutta ja toimintavarmuutta.

Sähkövarastoista akkujen, tarkemmin virtausakkujen, etuna on niiden skaalautuvuus. Tehon ja energian riippumattomuus toisistaan sekä niiden helppo räätälöiminen käyttötarpeen mukaan tekevät virtausakuista houkuttelevan teknologian. Lisäksi virtausakut kestävät tuhansia lataus-purkusykliä ja käyttösykliä puitteissa akun koko varauskapasiteetti on mahdollista hyödyntää. Virtausakut ovat turvallisia käyttää eikä niiden käytöstä aiheudu meluhaittoja.

Hajautettu virtausakku puolestaan koostuu nimensä mukaisesti toisiinsa yhdistetyistä hajallaan olevista kenno Pinoista, jotka kokonaisuudessa toisiinsa yhdistettyinä muodostavat yhden ison akun. Hajautettujen kennojen lävitse virtaa sama elektrolyytti, kuitenkin samoin kuin keskitetyissä virtausakuissa, eli anolyytillä ja katolyytillä on omat elektrolyyttikierrat. Seuraavissa luvuissa on tarkemmin kuvattu hajautetun virtausakun konsepti.

Hajautetun virtausakun lisäarvo keskitettyyn virtausakkuun verrattuna tulee asiakkaiden mahdollisuudesta joustavasti sekä ostaa energiaa virtausakkuverkostosta että myydä itse tuottamaansa energiaa takaisin verkostoon. Hajautettu virtausakku yhdistäisi joustavasti energian varastoinnin ja siirtämisen. Lisäksi kysynnän ja tarjonnan kohtaaminen ei ole välttämätöntä hajautetussa virtausakkuverkostossa, ja siten myös kysyntäjoustop käyttö olisi mahdollista. Hajautetun virtausakun hyötynä olisi energian jatkuva saatavuus ja sen siirtämisen ja varaamisen helppous.

Sähkön ja lämmön yhteis-siirto haastaisi nykyiset energiansiirtomenetelmät. Jos virtausakun elektrolyytin fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet kestäisivät kohon-

neita lämpötiloja, voitaisiin ohmisista häviöistä aiheutunut elektrolyytin lämpeneminen hyödyntää lämmönvaihtimien avulla lämmitysenergiaksi. Aalto-yliopistossa kehitteillä oleva kupari-virtausakku toimii yli 50 °C lämpötilassa [13]. Vastaavanlaisia korkeanlämpötilan virtausakkuja voisi hyödyntää siten kemiallisen energian siirtämisen lisäksi lämpöenergian siirtoon. Hyödynnettävissä olevan lämpötehon suuruuteen vaikuttavat sekä lämpötila-ero että nesteen kyky varastoida lämpöä, kuten luvussa 3.1.2 on todettu. Lämpöä varastoivan väliaineen ominaisuuksilla, eli elektrolyytillä, on suuri merkitys. Elektrolyytin tulisi kyetä varastoimaan runsaasti lämpöä ja sen kemiallisten ominaisuuksien tulisi kestää kohonneita lämpötiloja käytön aikana.

Varastointikapasiteetin kasvaessa virtausakku haastaa lisäksi litium-ioni-akun. Litium-ioni-akku on herkkä ulkoisille lämpötiloille ja sen varausastetta täytyy seurata tarkasti syväpurkamisen ja ylilataamisen osalta. Litium-ioni akun itsepurkautuminen joissain tapauksissa johtaa pysyvään kapasiteetin menetykseen, jota virtausakuilla ei tapahdu. Virtausakuissa on huomattavasti laajemmat toiminta-alueet sekä laitevalmistajien mukaan enemmän käyttösyklejä litium-ioni-akkuihin verrattuna. Kotitalouksiin litium-ioni-akku on helpompi ostaa ja markkinoilla on jo olemassa kokoluokaltaan kotitalouksien tarpeita vastaavia akkuja. Mikäli virtausakuissa käytettäviä kennopinoja voisi ostaa yksittäin, myös hajautettuun virtausakkuverkostoon liittyminen helpottuisi ja halpenisi. Hajautettuun virtausakkuverkostoon liittymistä voisi tällöin verrata kaukolämpöverkoston liittymisellä.

5 Mallinnus

5.1 Hajautettu virtausakku

Hajautetussa energiajärjestelmässä eri teknologiat yhdistyvät ja muodostavat joustavan, toisiaan tukevan energiajärjestelmän. Hajautetun virtausakun uusi konsepti on mallinnettu luvussa 5. Kuvassa 6 on yksinkertainen kaaviokuva hajautetun virtausakun avulla toteutetusta energiajärjestelmästä. Kuvaan on merkitty ympyröimällä työn kannalta olennaiset osat, jotka merkittävästi vaikuttavat järjestelmän toimintaan. Hajautetussa virtausakussa on erotettavissa kolme keskeistä osakokonaisuutta: kennopinot, putkiverkosto ja pumput.

Työssä esitetään sähkökemiallinen, sähköinen ja mekaaninen malli energiajärjestelmän toiminnalle. Sähkökemiallinen malli kuvaa virtausakun kennoissa tapahtuvia reaktioita ja niiden vaikutusta kennon mitattaviin ominaisuuksiin kuten jännitteeseen ja sähkövirtaan, joita puolestaan mallinnetaan sähköisellä mallilla. Hajautetun virtausakun mekaaninen malli kuvaa järjestelmän virtausmekaniikkaa ja pumppujen toimintaa. Hajautetun energiajärjestelmän suunnittelun ja mallinnuksen lähtökohtana on käytetty jo olemassa olevaa tietoa virtausakkujen toiminnasta ja kaukolämpöverkosta.

5.2 Energian siirto hajautetulla virtausakulla

Virtausakussa energia on sitoutunut kemiallisesti metalli-ioneihin, jotka liikkuvat elektrolyytin mukana elektrolyytti-liuokseen liuenneina. Elektrolyyttiä siirtämällä voidaan siirtää siten myös runsaasti energiaa. Energian siirrossa tapahtuvat siirtohäviöt aiheutuvat putkistoverkon muodoista sekä virtauksesta aiheutuvasta kitkasta. Häviöiden kompensoimiseksi tarvitaan elektrolyyttiä kierrättävät pumput, joiden kuluttama teho pienentää akusta saatavaa tehoa. Siirron aikana elektrolyytti säilyttää varauksensa, kunhan se ei pääse kosketuksiin hapen kanssa. Hapen diffuusion estäminen onnistuu eristämällä siirtoputket. Siirtohäviöiden lisäksi häviöitä aiheutuu akun kyvystä muuntaa kemiallista energiaa ja sähköenergiaa toisikseen. Molempien häviöiden osuus tulee huomioida järjestelmän kannattavuutta arvioitaessa.



Kuvio 6. Yksinkertaistettu esitys hajautetusta virtausakusta, joka rakentuu kahdesta maantieteellisesti erillään olevasta kennopinosta ja niiden maanalaisesta putkiverkkoyhteydestä. Putkiverkostossa kiertää elektrolyytti, jota pumpataan pumpuilla. Virtausakun kennossa anodilla ja katodilla kiertävät omat toisistaan erotetut elektrolyytit, anolyytti ja katolyytti, joiden suljettua kiertoa kutsutaan negatiiviseksi ja positiiviseksi puolikierroksi vastaavasti.

Työssä esitettävän hajautetun virtausakun rakentamiselle suurin este on ympäristökysymykset, jotka nousevat esiin elektrolyytin kemiallisesta luonteesta. Kaukolämmöstä tiedetään, miten tärkeä asia verkoston virheetön toiminta on. Vuodot tulisi estää eikä putkisto saisi rikkoutua. Vaikka riskit tiedetään ja niihin on varauduttu, voi vuodon sattuessa ympäristöön valua litroittain nestettä. Nykyisillä virtausakuteknologioilla riski ympäristön happamoitumisesta mahdollisen vuodon sattuessa on vielä liian suuri. Tässä työssä esitetään kuitenkin hajautetun virtausakun rakennetta ja toimintaa kuvaava malli tulevaisuuden teknologiakehitystä ja ratkaisuja silmällä pitäen. Tarkastelun painopiste on akun toiminnallisuudessa, uusiutuvan energian käytön lisäämisessä sekä järjestelmän toteutettavuudessa kustannusten kannalta.

Happamille elektrolyyttiliuoksille voi käyttää kemikaalien siirtämiseen ja pumppaamiseen tarkoitettuja putkia ja pumppuja. Kemikaalien siirtämiseen soveltuvia putkia ovat haponkestävä teräs, titaani sekä muoviputket (PVC, PVDF, PP, PTFE). Kemikaalien pumppaamiseen soveltuvia pumppuja ovat keskipakopumput ja letkupumput. Kemikaalien pumppaamiseen tarkoitetut pumput takaavat rakenteensa puolesta turvalliset toimintaolosuhteet siten, että pumpattava neste ei pääse vuotamaan. Tavallisissa pumpeissa tiivisteet estävät vuodot pumpeissa, mutta kemikaalien aggressiivisuuden takia kemikaalipumppujen tiivistämiseen on käytettävä muita ratkaisuja. Keskipakopumpeissa voidaan käyttää magneettivetoista pumppua,

joissa ei ole lainkaan akselitiivisteitä. Letkupumpuissa puolestaan ainoastaan letku on kosketuksissa virtaavan nesteen kanssa eikä tiivisteitä siten tarvita.

Myös venttiilien valinnalla on iso rooli putkistoverkoston suunnittelussa. Kemiikaalijärjestelmiin soveltuvia venttiilejä ovat pallo- ja läppäventtiilit ja niiden avulla pystytään eristämään verkoston osia esimerkiksi vuodon sattuessa. Venttiilien tiivistemateriaalit ovat putkiverkoston kuluvia osia ja vaativat säännöllistä huoltoa. Mikäli halutaan pitkäikäinen ja toimintavarma järjestelmä, tulee tiivisteet ja muut verkoston kuluvat osat huoltaa ja vaihtaa uusiin säännöllisesti. Virtausputket lisäksi eristetään, jolloin lämpöhäviöt pinentyvät ja sovelluksen toimintalämpötila pysyy yllä. Energiavarastona maan alainen putkisto on suuri ja sen laajennuskapasiteetti on teoriassa rajaton. Putkiverkostoon on lisäksi mahdollista liittää ulkoiset elektrolyttisäiliöt, joilla voidaan edelleen kasvattaa akun energianvarastointikapasiteettia.

5.3 Hajautetun virtausakun varastointi- ja siirtokykyjen vertautuvuus sähkö- ja kaukolämpöverkkoon

Hajautetussa virtausakussa on komponentteja sekä kaukolämpöverkosta että sähköverkosta. Energian siirto on analoginen kaukolämpöverkon energian siirtoon. Kuten kaukolämpöverkko, myös hajautettu virtausakkuverkosto on mitoitettava tarvittavan tilavuusvirran ja siirrettävän energian mukaan. Putkien dimensiot, pumput sekä välipumppaamojen tarve on arvioitava ja mitoitettava verkoston kuormituksen mukaan. Lisäksi energia liikkuu väliaineeseen sitoutuneena: kaukolämmössä lämpöenergia hyödynnetään lämmönvaihtimien avulla ja virtausakussa kemiallinen energia muunnetaan sähköksi kennojen avulla.

Virtausakku on kuitenkin varastointikyvyltään muiden perinteisten akkujen kaltainen ja liitettävissä sähköverkkoon. Virtausakku tarvitsee toimiakseen akun ohjausjärjestelmän sekä DC/AC-muuntimen. Sähkön jakeluverkostoon liittyminen vaatii lisäksi jännitemuuntajan verkon ja akun väliin. Pienjänniteverkossa akku voidaan puolestaan mitoittaa invertterin avulla suoraan vastaamaan tarvittavaa käyttöjännitettä.

Hajautetun virtausakun käyttövarmuus on kaukolämpöverkoston kaltainen ja järjestelmistä on tunnistettavissa samat riskit. Nykyiseen sähkönsiirtoverkkoon verrattuna sähkökatkoista olisi mahdollista päästä kokonaan eroon maanalaisen putkiston ja riittävän varastointikapasiteetin ansiosta. Energiahävikkiä aiheutuisi kuitenkin

kaukolämmön tapaan virtausputkien vuodoista. Lisäksi menetetyt elektrolyytin korvaaminen energianvarastointikapasiteetin ylläpitämiseksi tulisi aiheuttamaan kaukolämmön vesihävikkiin verrattuna isommat kustannukset.

5.4 Oletukset ja käytettävät parametrit

Hajautetun virtausakun mallinnuksessa ovat voimassa energian säilymlaki sekä massan säilymlaki. Elektrolyytin osalta oletetaan lisäksi, että sen konsentraatio on tasainen sekä elektrolyyttivarastossa että kennossa, ja että se on sähköisesti neutraali. Todellisuudessa akun varausaste, SOC riippuu ajasta, mutta työssä oletetaan elektrolyyttivaraston olevan iso, johon suhteutettuna varausasteen muutos on pieni ja siten kyseessä on ajasta riippumaton prosessi [38]. Sähkökemiallista mallia varten on lisäksi oletettu että vanadiini-ionien aktiivisuudet voidaan jättää huomioimatta, sillä elektrolyyttiliuokset ovat laimeita. Mallissa ei myöskään oteta huomioon kennossa tapahtuvia sivureaktioita ja oletetaan lämpötila vakioksi. Mekaaninen malli puolestaan olettaa elektrolyyttien olevan kokoon puristumattomia. Anolyytin ja katolyytin tiheys ja viskositeetti oletetaan yhtäsuuriksi ja ne pysyvät vakiona riippumatta akun varausasteesta. Taulukossa 3 on taulukoitu työssä tarvittavia parametreja vanadiini-virtausakun osalta.

5.5 Hajautetun virtausakun mallinnus

5.5.1 Virtausakun kennon sähkökemiallinen malli

Latauksen ja purkamisen aikana virtausakun kennossa elektrolyyttiin liuenneiden varausta kuljettavien ionien konsentraatio muuttuu elektrolyytin kokonaiskonsentraation pysyessä vakiona. Mallinnuksen lähtökohtana on käytetty vanadiini-virtausakkua ja virtausakun sähkökemiallista toimintaa kuvaavat yhtälöt on esitetty vanadiini-virtausakulle. Vanadiini-virtausakun varausaste SOC voidaan määrittellä vanadiini-ionien konsentraatioiden avulla

$$\text{SOC} = \frac{c_{V^{2+}}}{c_{\text{tot.}}} = \frac{c_{V^{5+}}}{c_{\text{tot.}}} = 1 - \frac{c_{V^{3+}}}{c_{\text{tot.}}} = 1 - \frac{c_{V^{4+}}}{c_{\text{tot.}}}, \quad (5)$$

missä $c_{\text{tot.}}$ on elektrolyytin vanadiinin kokonaiskonsentraatio ja c_i vanadiinin eri ionimuotojen $i = V^{2+}, V^{3+}, V^{4+}, V^{5+}$ konsentraatiot.

Tasapainotilassa yksittäisen kennon napojen välillä akussa on standardi kenno-potentiaali E° . Akkua ladattaessa ja purettaessa sen varausaste muuttuu ja elekt-

Taulukko 3. Hajautetun virtausakun mallinnuksessa tarvittavat parametrit. Mallinnus perustuu raportoituihin vanadiini-virtausakun parametreihin, joita on käytetty hyväksi työn tapaustutkimuksissa. Parametrien arvot on otettu S. König et al. tutkimuksesta [39].

Suure	Arvo	Yksikkö
Vanadiinin konsentraatio $c_{\text{tot.}}$	1,6	mol/l
Elektrolyytin tiheys ρ	1354	kg/m ³
Dynaaminen viskositeetti μ	0,004928	Pa·s
Energiatiheys ED	25	Wh/l
Hiilihuovan huokoisuus ε	0,93	-
Kuidun halkaisija d_f	$1,76 \cdot 10^{-5}$	m
Elektrodin pinta-ala A_{kenno}	0,25	m ²
Elektrodin poikkipinta-ala A_{poikki}	0,0025	m ²
Virtausputken halkaisija D	0,08	m
Kennon resistanssi, lataus $R_{\text{kenno,l}}$	1,89	Ωcm^2
Kennon resistanssi, purku $R_{\text{kenno,p}}$	2,00	Ωcm^2
Kozeny-Carman vakio K	4,28	-
Faradayn vakio F	96485	As/mol
Kaasu vakio R	8,314	J/K · mol
Lämpötila T	293	K
Pumpun hyötysuhde η_{pumppu}	0,9	-

rolyytin ja elektrodien välille muodostuu potentiaaliero. Käytön aikana kenno ei ole enää tasapainossa. Latauksen ja purkamisen aikana kennopotentiaali E voidaan määrittää Nernstin yhtälön avulla, joka ottaa huomioon akun varausasteeseen vaikuttavat konsentraation muutokset. Kennopotentiaalinn mallinnuksessa käytetään yksinkertaistettua Nernstin yhtälöä ja tarkastelusta jätetään huomioimatta protonien konsentraation vaikutus. Vanadiini-virtausakkujen kokeellisesti mitattu kennopotentiaali on noin 140 mV Nernstin yhtälöllä laskettua teoreettista kennopotentiaalia korkeampi, eli virhe on noin kymmenen prosenttia [40]. Tässä työssä käytetään suppeampaa Nernstin yhtälöä, jolla saadaan työn tarkoituksiin riittävän tarkka ja suuntaa antava malli kennon jännitekäyttäytymiselle

$$E = E^\circ + \frac{RT}{nF} \ln Q_r = E^\circ + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{c_{\text{hapetus}}}{c_{\text{pelkistys}}} \right). \quad (6)$$

Nernstin yhtälössä (6) R on kaasuvakio ja F on Faradayn vakio. T on vallitseva lämpötila ja n on hapetus-pelkistysreaktiossa liikkuvien elektronien lukumäärä. Kennopotentiaaliin vaikuttaa lisäksi reaktio-osamäärä Q_r . Olettamalla elektrolyyttiliuos laimeaksi, voidaan ionien aktiivisuudet jättää tarkastelun ulkopuolelle ja siten reaktio-osamäärä voidaan ilmoittaa hapettuvien ionien c_{hapetus} ja pelkistyvien ionien $c_{\text{pelkistys}}$ konsentraatioiden suhteenä.

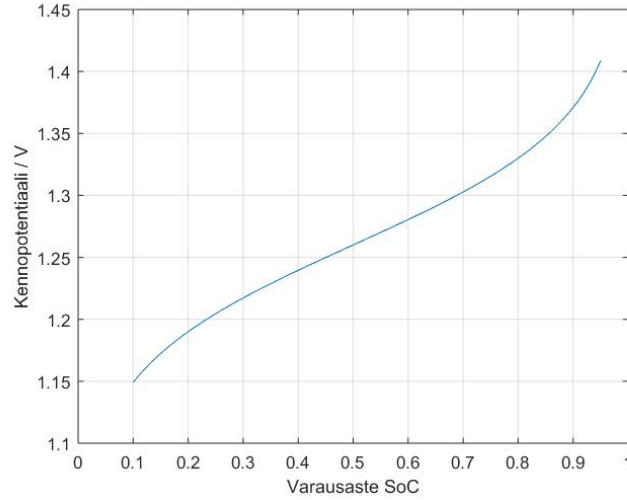
Vanadiini-virtausakussa latauksen aikana V^{2+} - ja V^{5+} -ionit hapettuvat ja V^{3+} - ja V^{4+} -ionit pelkistyvät. Yhdistämällä yhtälöt (5) ja (6) voidaan kennopotentiaalia tarkastella varausasteen funktiona:

$$E = E^\circ + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{(\text{SOC})^2}{(1 - \text{SOC})^2} \right). \quad (7)$$

Vanadiini-virtausakulle yhtälössä (7) johdettu kennopotentiaalinn riippuvuus varausasteesta on esitetty kuvassa 7, mistä nähdään kennopotentiaalinn lähes lineaarinen riippuvuus varausasteesta, jos toiminta-alue rajataan välille 0,2 – 0,80

Varattujen hiukkasten liike kennossa saa aikaan sähkövirran. Varattujen vanadiini-ionien lisäksi vanadiini-virtausakun rikkihappo-pohjaiseen elektrolyyttiin on liuenneena protoneita H^+ sekä HSO_4^- - ja SO_4^{2-} -ioneita. Työssä keskitytään kuitenkin mallintamaan ainoastaan vanadiini-ionien vaikutusta kennon jännitteeseen ja virtaan, sillä kennossa tapahtuvien reaktioiden kinetiikan mallinnukseen liittyy epävarmuutta [41].

Faradayn lain mukaan elektrodilla reagoineen aineen määrä on suoraan verrannollinen siirtyneeseen varaukseen. Akkua ladattaessa anodin puolella V^{3+} -ionien ja



Kuvio 7. Vanadiini-virtausakun kennon kennopotentiaalin riippuvuus varausasteesta.

katodin puolella V^{4+} -ionien konsentraatiot pienenevät. Purettaessa puolestaan V^{2+} -ionien ja V^{5+} -ionien konsentraatiot pienenevät vastaavasti. Elektrolyytin virratessa kennon lävitse sen vanadiini-ionikonsentraatio muuttuu Δc verran ($0 < \Delta c < 1$). Virta I on latauksen tai purkamisen aikana käytetty virta, joka riippuu akun varausasteesta ja kennojen jännitehäviöistä. Faradayn lain avulla voidaan laskea elektrolyytin tilavuusvirta Q virtausakun käytön aikana, kun virta kulkee kennojen N_{kenno} lävitse,

$$Q = \frac{N_{\text{kenno}} I}{F \Delta c \cdot c_i}. \quad (8)$$

Vanadiini-ionien konsentraatiot c_i voidaan ilmoittaa kennon varausasteen avulla, kuten yhtälössä (5), jolloin yhtälö (8) saadaan latauksen ja purkamisen aikana muotoon

$$\begin{cases} Q_l = \frac{N_{\text{kenno}} I}{F \Delta c \cdot (1 - \text{SOC}) \cdot c_{\text{tot.}}} & \text{lataus} \\ Q_p = \frac{N_{\text{kenno}} I}{F \Delta c \cdot \text{SOC} \cdot c_{\text{tot.}}} & \text{purkaminen} \end{cases} \quad (9)$$

Elektrolyytin tilavuusvirran yhteys konsentraation muutokseen on esitetty yhtälössä (9). Kennossa yhden kierroksen aikana tapahtuva konsentraation muutos kasvattaa alkukonsentraatiota latauksen aikana $1 + \Delta c$ verran ja pienentää purkamisen aikana $1 - \Delta c$ verran. Kierrosten lukumäärä x , jotka elektrolyytin täytyy tehdä kennon lävitse halutun varausasteen saavuttamiseksi, voidaan laskea, jos asetetaan

varausasteen alku- ja loppuarvoiksi SOC_a ja SOC_1 vastaavasti

$$\text{SOC}_a \cdot (1 \pm \Delta c)^x = \text{SOC}_1 \quad \Leftrightarrow \quad x = \frac{\log \frac{\text{SOC}_1}{\text{SOC}_a}}{\log (1 \pm \Delta c)}. \quad (10)$$

Edelleen tilavuusvirran ja puolikierron tilavuuden V avulla voidaan laskea, kuinka kauan ajallisesti yksi kokonainen elektrolyyttikierto kestää. Karkea arvio lataus- ja purkusyklien kestolle t saadaan, kun otetaan lisäksi huomioon halutun varausasteen saavuttamiseksi tarvittavien kiertojen lukumäärä

$$t = x \cdot \frac{V}{Q}. \quad (11)$$

Lataus- ja purkuvirrat aiheuttavat suljetussa virtapiirissä häviöitä ja ne pienentävät kennon napojen välistä todellista jännitettä. Jännitettä pienentävät kennoon muodostuvat konsentraatio ja aktivointi ylipotentiaalit, joita merkitään vastaavasti $\eta_{\text{kon.}}$ ja $\eta_{\text{akt.}}$. Lisäksi kennon sisäisestä resistanssista aiheutuvat ohmiset häviöt RI pienentävät akun todellista käyttöjännitettä. Kaiken kaikkiaan kennopinossa tapahtuvia jännitehäviöitä voidaan kuvata ekvivalenttiresistanssilla $R_{\text{ekv.}}$. Virtausakun sisäinen resistanssi on suurempi purkamisen aikana kuin lataamisen aikana. Vanadiini-virtausakun yhden kennon sisäiseksi resistanssiksi on arvioitu $R_{\text{kenno,l}} = 1,89 \Omega\text{cm}^2$ lataamisen ja $R_{\text{kenno,p}} = 2,00 \Omega\text{cm}^2$ purkamisen aikana [42]. Kennopinon ekvivalentti resistanssi on

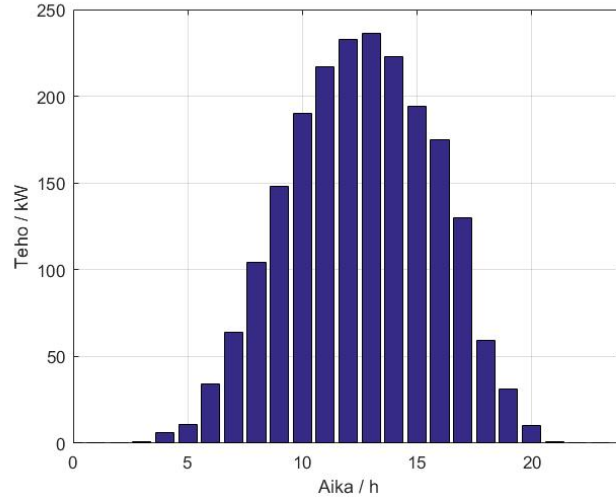
$$R_{\text{ekv.,i}} = N_{\text{kenno}} \cdot \frac{R_{\text{kenno,i}}}{A_{\text{kenno}}}. \quad (12)$$

5.5.2 Virtausakun kennopinon sähköinen malli

Luvussa 5.5.1 kuvattu kennopotentiaali E on yhden kennon napojen välinen jännite ja kertomalla se kennopinossa olevien kennojen lukumäärällä N_{kenno} , saadaan kennopinon tasapainojännite V_{OCV} . Akun käyttöjännite $V_{\text{käyttö}}$ on todellisuudessa V_{OCV} :ta pienempi, sillä suljetussa piirissä kulkeva sähkövirta johtaa kennojen sisällä luvussa 5.5.1 kuvattuihin jännitehäviöihin $V_{\text{häviö}}$. Ekvivalentin vastuksen avulla laskettuna kennopinon jännitehäviöt ovat

$$V_{\text{häviö,i}} = R_{\text{ekv.,i}} I. \quad (13)$$

Sähkövirran suunta on potentiaalilin gradientin suuntaan, jolloin akkua ladattaessa virta on negatiivinen ja purettaessa positiivinen [43]. Akun kennopinon käyttöjännite



Kuvio 8. Helsingin Suvilahden aurinkovoimalan mitattu tuotantoprofiili 29.6.2015 [44].

ladatessa ja purettaessa on

$$\begin{cases} V_{\text{käyttö,l}} = N_{\text{kenno}}E + R_{\text{ekv.}}I = V_{\text{OCV}} + V_{\text{häviö,l}} & \text{lataus} \\ V_{\text{käyttö,p}} = N_{\text{kenno}}E - R_{\text{ekv.}}I = V_{\text{OCV}} - V_{\text{häviö,p}} & \text{purkaminen} \end{cases} \quad (14)$$

Virtausakun maksimikäyttövirta $I_{\text{max.}}$ puolestaan määräytyy maksimaalisesta virrantiheydestä $j_{\text{max.}}$, kun elektrodin efektiivinen pinta-ala on A ,

$$I_{\text{max.}} = j_{\text{max.}}A. \quad (15)$$

Lisäksi latauksen ja purkamisen aikana lataus- ja purkuvirtaa rajoittavat elektrolyytin tilavuusvirta ja varausaste yhtälön (9) mukaisesti.

Akun lataus- ja purkutehot saadaan akun käyttöjännitteen ja lataus- tai purkuvirran tulona. Lataus- ja purkuteho riippuvat käyttöolosuhteista. Jos akkua ladataan aurinko- tai tuulisähköllä, riippuu latauksen tehoprofiili sääolosuhteista. Tyypillinen aurinkoisen päivän aurinkosähkön tuotantoprofiili on esitetty kuvassa 8, mistä nähdään tuntikohtainen teho. Kuten kuvasta 8 nähdään, ajoittuu aurinkosähkön tuotanto keskipäivän paikkeille.

Akun purkutarve määräytyy kulutuskohteen pohjakuorman ja vaihtelevan kulutuksen mukaan. Työssä kulutuskohdetta mallinnetaan anonymisoidulla kerrostalon keskiarvokulutusprofiililla. Lataus- ja purkutehot ovat ajasta riippuvaisia ja saadaan laskettua Ohmin lain mukaan:

$$P = V_{\text{käyttö}}I. \quad (16)$$

Akku, jonka teho on P tuottaa energiaa $E(t)$ tehdessään työtä. Energia saadaan integroimalla tuotettu tai kulutettu teho käyttöajan t yli

$$E(t) = \int_0^t P(t)dt. \quad (17)$$

5.5.3 Virtausakun mekaaninen malli

Akku varastoi energianlähteen tuottamaa energiaa, mutta osan varastoimastaan energiasta se joutuu käyttämään elektrolyytin kierrättämiseen lataus- ja purkutilanteissa. Pumppujen avulla kompensoidaan käytön aikana järjestelmässä tapahtuvat painehäviöt Δp . Hajautetussa virtausakussa painehäviöt koostuvat 1) elektrolyytin virtauksesta suorassa putkessa aiheutuvasta kitkasta, 2) putkiston muodoista kuten mutkista, liittymistä ja venttiileistä sekä 3) kennon hydraulisesta resistanssista. Lisäksi pumppaustehoon vaikuttavat elektrolyytin tilavuusvirta Q sekä pumpun hyötysuhde η_{pumppu} .

Suorassa virtausputkessa painehäviö voidaan laskea putken pituuden s , halkaisijan D ja poikkipinta-alan A_{poikki} sekä elektrolyytin tiheyden ρ ja tilavuusvirran avulla

$$\Delta p_{\text{kitka}} = f \frac{s\rho Q^2}{2DA_{\text{poikki}}^2}. \quad (18)$$

Yhtälössä (18) f on kitkakerroin ja se määräytyy virtauksen turbulentsuudesta tai laminaarisuudesta. Turbulentille virtaukselle virtauksen kitkakerroin voidaan määrittää Reynoldsin luvun ja virtausputken suhteellisen karheuden avulla Moodyn taulukosta [45]. Moodyn taulukko löytyy liitteestä A. Laminaariselle virtaukselle Reynoldsin luvun Re ja kitkakertoimen välinen riippuvuus on lineaarinen ja se voidaan laskea helposti.

$$f_{\text{lam.}} = \frac{64}{Re}. \quad (19)$$

Reynoldsin luku määräytyy tilavuusvirrasta, virtausputken dimensioista sekä tiheydestä ja dynaamisesta viskositeetista μ , ja se kertoo virtauksen luonteen. Virtausputken poikkipinta-ala on A_{putki} . Laminaariselle virtaukselle $Re < 2100$ ja turbulentille virtaukselle $Re > 4000$. Laminaarisen ja turbulentin virtauksen välissä on kriittinen alue, jossa virtaus muuttuu laminaarisesta turbulentiksi. Reynoldsin luku putkivirtaukselle lasketaan kaavalla

$$Re = \frac{\rho D Q}{\mu A_{\text{putki}}}. \quad (20)$$

Putkiston muodonmuutokset vaikuttavat myös painehäviöihin. Putkiston muodot otetaan huomioon muodolle ominaisen muotokertoimen ξ_i avulla. Muotopainehäviöt voidaan laskea summaamalla yksittäiset muotohäviöt yhteen

$$\Delta p_{\text{muoto}} = \sum_i \left(\xi_i \frac{\rho Q^2}{2A_{\text{putki}}^2} \right). \quad (21)$$

Hydraulinen resistanssi aiheuttaa painehäviön kennon sisällä ja se voidaan laskea yhdessä kennossa, kun lisäksi tiedetään elektrolyytin dynaaminen viskositeetti, elektrodin pituus l , kuidun halkaisija d_f , Kozeny-Carman-vakio K , hiilihuovan huokoisuus ε sekä poikkipinta-ala A_{poikki} , jonka läpi elektrolyytti virtaa

$$H_{\text{kenno}} = \frac{\mu l}{\frac{d_f^2}{16K} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \cdot A_{\text{poikki}}}. \quad (22)$$

Kun otetaan huomioon kennopinossa olevien kennojen lukumäärä N_{kenno} , voidaan hydraulisen resistanssin aiheuttama painehäviö kennopinossa laskea

$$\Delta p_{\text{kennopino}} = \frac{QH_{\text{kenno}}}{N_{\text{kenno}}}. \quad (23)$$

Kokonaispainehäviö $\Delta p_{\text{tot.}}$ lasketaan yksittäisten painehäviöiden summana. Jos akku koostuu $N_{\text{kennopino}}$ -määrästä kennopinoja, saadaan painehäviöksi

$$\Delta p_{\text{tot.}} = \Delta p_{\text{kitka}} + \Delta p_{\text{muoto}} + N_{\text{kennopino}} \Delta p_{\text{kennopino}}. \quad (24)$$

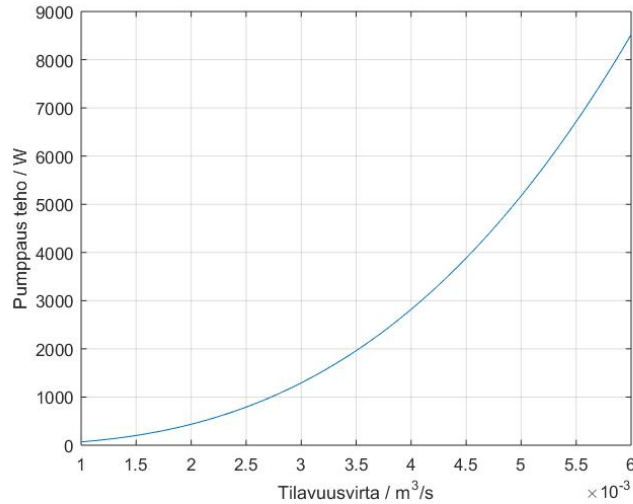
Pumppaustehon laskemisessa tulee huomioida molemmat puolikierrat, sillä molemmilla kierroilla on omat pumput. Pumppaamiseen tarvittava pumppausteho voidaan laskea, kun tiedetään pumppujen hyötysuhde

$$P_{\text{pumppu}} = \frac{\Delta p_{\text{tot.}} Q}{\eta_{\text{pumppu}}}. \quad (25)$$

Pumppausteho riippuu voimakkaasti elektrolyytin tilavuusvirrasta ja niiden välistä riippuvuutta on havainnollistettu kuvassa 9

5.5.4 Hajautetun virtausakun hyötysuhteiden ja käyttöasteen mallinnus

Virtausakun toimintakykyä voidaan kuvata akun eri muuttujien hyötysuhteilla. Virtausakussa muuttujia ovat jännite, virta, energia ja teho. Akun hyötysuhteet määritetään täysien purku- ja lataus-sykliden suhteena. Jännitehyötysuhde kertoo akun sisäisistä häviöistä, joita ovat aktivaatio ja konsentraatio ylipotentiaalit sekä ohmiset häviöt. Sisäisien häviöiden takia akun lataukseen tarvitaan korkeampi



Kuvio 9. Hajautetun virtausakun elektrolyytin pumppamiseen tarvittavan pumppaustehon riippuvuus käytettävästä tilavuusvirrasta. Tehokäyrän laskemiseksi on käytetty luvussa 5.4 esitettyjä vanadiini-virtausakun parametreja.

jännite kuin mitä akkua purettaessa on mahdollista tuottaa. Coulombinen hyötysuhde kertoo ei-toivotuista sivureaktiosta kennon sisällä, kuten elektrolyytissä, ja sitä mitataan purku- ja latausvirran suhteena. Coulombiset häviöt sekä jännitehäviöt vaikuttavat yhdessä akussa tapahtuviin energiahäviöihin. Energiahyötysuhde määritellään jännite- ja coulombisen hyötysuhteen tulona ja se on purettaessa hyödynnetyn ja ladattaessa varatun energian suhde. Virtausakun toimintaa kuvaava tehohyötysuhde on myös tärkeä muuttuja. Kun energiahyötysuhteeseen otetaan huomioon myös virtausakun elektrolyytin pyörittämiseen kuluva pumppausenergia, saadaan määritettyä koko järjestelmän hyötysuhde. Elektrolyyttiä pumppaavat pumput kuluttavat akkuun varastoitunutta energiaa ja siten pienentävät järjestelmän kokonaishyötysuhdetta.

Hajautetulle virtausakulle saadaan tehohyötysuhde yhtälöllä (26) hyödynnettävissä olevien purku- ja lataustehojen P_{purku} ja P_{lataus} suhteena. Lataus- ja purkuteho riippuvat akun varausasteesta. Jos rajataan akun käyttö varausasteiden 20 % ja 80 % välille, voidaan kennopinon jännitekäyttäytymistä approksimoida lineaarisena, jolloin myös lataus- ja purkuteho ovat suoraan verrannollisia varausasteeseen. Hajautetun virtausakun hyötysuhde on siirtohäviöiden vuoksi heikompi kuin perinteisen virtausakun vastaava.

$$\eta_{\text{teho}} = \frac{P_{\text{purku}} - P_{\text{pumppu}}}{P_{\text{lataus}} + P_{\text{pumppu}}} \quad (26)$$

Energiahyötysuhde ja samalla koko järjestelmän hyötysuhde riippuvat lataukseen ja purkamiseen kuluneesta ajasta ja se lasketaan yhtälöllä (27). Hajautetun virtausakun järjestelmän kokonaishyötysuhde saadaan lataus- ja purkuenergian avulla huomioimalla lisäksi pumppaushäviöt käytön aikana.

$$\eta_{\text{tot.}} = \frac{\int_0^{t_{\text{purku}}} (P_{\text{purku}}(t) - P_{\text{pumppu}}(t)) dt}{\int_0^{t_{\text{lataus}}} (P_{\text{lataus}}(t) + P_{\text{pumppu}}(t)) dt} \quad (27)$$

Vuorokaudessa tarkasteltuna elektrolyytin pumppaus vakioteholla kuluttaa energiaa

$$E_{\text{pumppu}} = P_{\text{pumppu}} \cdot 24 \text{ h.} \quad (28)$$

Energiajärjestelmää kuvaa energiatuotannon käyttöaste, joka on kulutuksen kannalta riittävä, kun nettoenergia saadaan katettua. Hajautetun virtausakun uusiutuvan energian käyttöaste määräytyy siitä, kuinka paljon aurinkopaneelit tuottavat energiaa. Energiajärjestelmän aurinko-osuus SF kuvaa, sitä kuinka suuri osa kulutetusta energiasta on peräisin auringosta. Hajautetun energiajärjestelmän aurinko-osuus voidaan määrittää yhtälöllä (29) ja sen avulla voidaan verrata energiajärjestelmiä sähkövaraston kanssa sekä ilman.

$$SF = \frac{E_{\text{auringosta}}}{E_{\text{kulutus}}}, \quad (29)$$

missä $E_{\text{auringosta}}$ on kulutetun sekä sähkövarastosta puretun aurinkopaneeleilla tuotettu energian yhteenlaskettu energia. Sähkövarastoon varastoidun energian osalta huomioidaan myös varastoinnin häviöt. E_{kulutus} on puolestaan kulutuskohteen kuluttama energia kokonaisuudessaan.

5.6 Toteutettavuus ja kannattavuus

Hajautetun virtausakun toteutettavuus ja kannattavuus liittyvät läheisesti yhteen. Vaikka järjestelmä olisi toteutettavissa, sitä ei välttämättä ole kannattava toteuttaa. Kannattavuuden arvioinnissa on tärkeää huomioida järjestelmän toimintakyky ja -varmuus sekä kokonaiskustannukset. Järjestelmän heikko hyötysuhde, riskit energiantuotannon luotettavuudessa ja energiaverkoston huono mekaaninen kestävyys vaikuttavat negatiivisesti järjestelmän kannattavuuteen.

Hajautetun virtausakun etuja (+) ja mahdollisia ongelmia (–) on vertailtu alla:

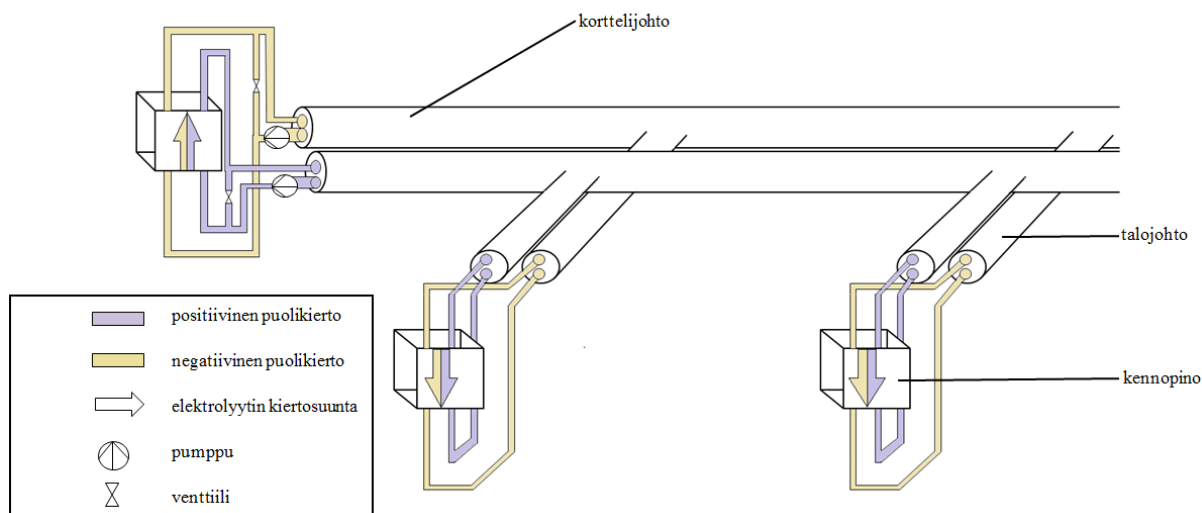
- | | |
|---|---|
| + Kestävä sähkövarasto säännöllisellä kunnossapidolla | – Vuodot putkistossa |
| + Joustava lataus- ja purkumahdollisuus | – Putkien korroosio |
| + Poistaa sähköjakelun suurimmat laatuhaitat | – Pumppauksen hukkaenergia |
| + Laaja ja kattava jakeluverkosto | – Elektrolyyttien sekoittuminen ja siten kapasiteetin menetys |
| + Tehokapasiteetin lisäys helppoa | |
| + Energiakapasiteetin lisäys helppoa | |
| + Sähkön- ja lämmönsiirron yhdistäminen tulevaisuudessa | |

Nykyisillä teknologioilla hajautetun virtausakun toteutukseen liittyy ympäristön kannalta merkittäviä riskejä. Lisäksi pumppauksesta aiheutuva energiahävikki pienentää järjestelmän kannattavuutta. Myös elektrolyyttien sekoittuminen aiheuttaa huoltotoimenpiteitä ja elektrolyytin parantelua tai uuteen vaihtamisen, joka on merkittävä kustannuserä ja heikentää järjestelmän kannattavuutta sekä hankaloittaa sen toteutettavuutta.

Virtausakussa on paljon liikkuvia ja kuluvia osia, mutta säännöllisellä huollolla sen käyttöikä voidaan pidentää. Lisäksi kuluvien osien kuten tiivisteiden vaihtaminen ajoissa parantaa akun toimintavarmuutta ja kestävyyttä. Sähkön siirrossa varastointikapasiteetilta sopivaksi mitoitettu hajautettu virtausakku takaa energian siirron katkottomuuden, sillä ilmajohtojen sijaan energia siirtyisi maan alla. Lisäksi maan alainen putkiverkosto on laaja, mikäli siirtoverkostona hyödynnetään kaukolämpöverkkoa.

Teknologiakehityksen ansiosta tulevaisuudessa mahdollisuus sähkön- ja lämmönsiirron yhdistämiselle on merkittävä etu hajautetun virtausakun toteutettavuuden ja kannattavuuden näkökulmasta. Työssä mallinnetusta järjestelmästä piirretty havainnollistava kuva on esitetty 10. Työssä esitetty hajautetun virtausakun malli ja energiajärjestelmän simulaatiot painottuvat kuitenkin ainoastaan sähkönsiirtoon, mutta malli on laajennettavissa myös lämmönsiirtoon.

Elektrolyytin säilytysastiana käytettävä maanalainen putkiverkosto määrää hajautetun virtausakun energianvarastointikapasiteetin, mikäli ulkoisia elektrolyytitankkeja ei käytetä. Putkiverkoston fyysinen tilavuus V_p määräytyy karkeasti siirtoputkien pituudesta sekä halkaisijasta. Kaukolämpöverkostossa käytettävien



Kuvio 10. Hajautettua virtausakkua havainnollistava kuva. Järjestelmä on toteutettu käyttäen kahta rinnakkaista Mpuk-putkea sekä kortteli-, että talojohdoissa. Korttelijohto on vedetty voimalaitoksella lataavasta kennopinosta ja siihen on edelleen liitetty talojohdot, jotka yhdistävät kulutuskohteiden kennopinot elektrolyyttiverkostoon.

Mpuk-putkien halkaisijat löytyvät taulukosta 4 ja niitä voidaan käyttää viitearvoina hajautetun virtausakun putkiverkoston suunnittelussa. Hajautetun akun energianvarastointikapasiteetti E_{kapa} voidaan laskea elektrolyytin energiatiheyden ED ja tilavuuden avulla

$$E_{\text{kapa}} = ED \cdot V_p. \quad (30)$$

Kennopinojen kytkennät puolestaan määräävät akusta saatavan tehon, joka on käyttöjännitteen ja -virran tulo. Kennopinojen sarjankytkentä kasvattaa käyttöjännitettä ja rinnankytkentä käyttövirtaa.

Maan alle asennettu kemikaalia kuljettava putkisto vaatii aina suoja-putken tai tiiviin kanaalin varsinaisen virtausputken ympärille [47]. Siten hajautetun virtausakun putkiverkoston suunnittelussa tulee olla huolellinen. Kemikaaliputkiston suunnittelussa tulee ottaa huomioon samoja asioita kuin kaukolämpöverkoston suunnittelussa, kuten maan routiminen ja lämpötila. Erityistä huomiota kemikaaliputkiston suunnittelussa tulee kuitenkin kiinnittää laitteiden huolto- ja puhdistusmahdollisuuksiin sekä liitoksiin, läpivienteihin ja putkiston tuentaan.

Taulukko 4. Kaukolämmössä käytettävien Mpuk-virtausputkien halkaisijat. Merkintänä on vakiintunut DNX , missä X on halkaisija millimetreissä [46].

Mpuk-putken koko DN (mm)
20+20
25+25
32+32
40+40
50+50
65+65
80+80
100+100
125+125
150+150

5.7 Kustannusrakenne

Hajautetun energiajärjestelmän kokonaiskustannuksiin kuuluu alkuinvestointien lisäksi kiinteitä ja muuttuvia kustannuksia. Muuttuviin kustannuksiin vaikuttaa energiajärjestelmän käyttöaste, mutta kiinteät kustannukset ovat siitä riippumattomia. Alkuinvestointeja sekä kiinteitä ja muuttuvia kustannuksia on arvioitu hajautetulle virtausakulle taulukossa 5. Vertailun vuoksi samaan taulukkoon on esitetty myös sähköverkkoon liitettävän litium-ioni-akun kustannusrakenne.

Perinteisen litium-ioni-akun kustannusrakenne eroaa uuden konseptin hajautetun virtausakun kustannusrakenteesta infrastruktuurin osalta. Perinteisen litium-ioni-akun liittäminen sähköverkkoon vaatii sähköliittymän solmimisen, jonka lisäksi akun kautta sähköverkossa siirretystä energiasta täytyy maksaa siirtomaksu sekä sähkövero. Sen lisäksi akun ja sähköverkon väliin on asennettava muuntaja, jota hajautetussa akussa ei tarvita. Hajautetun virtausakun alkuinvestointeihin kuuluvat puolestaan hajautettu putkiverkosto, sen rakentaminen sekä pumpput ja niiden asennus.

Karkea arvio mahdollisista kustannuksista antaa arvion hajautetun virtausakun potentiaalista sähkön- ja lämmönsiirtomarkkinoilla sekä itse investoinnin kannattavuudesta verrattuna nykyteknologiaan. Taulukossa 5 taulukoitujen kustannusten avulla voidaan laskea sähkövarastojärjestelmien kustannusten kasvu järjestelmäkoon kasvaessa. Litium-ioni-akku on luonnollinen vertailukohta, sillä se on asennetuista teknologioista yleisin ¹. Tarkempi erittely energiajärjestelmien kustannuksista on laskettu liitteessä E.

Litium-ioni akun energiakapasiteettiin perustuva hinta on merkittävästi korkeampi virtausakun vastaavaan verrattuna. Litium-ioni akun alkuinvestointeihin vaikuttaa lisäksi liitetäänkö akku pien- vai korkeajänniteverkkoon. Korkeajänniteliittymän hinta määräytyy liittymistehon ja asennuskulujen mukaan. Hajautetun virtausakun osalta infrastruktuurin rakentaminen muodostaa merkittävimmän kustannuserän akkujärjestelmän alkuinvestoinneista.

¹Myös Helen Oy on hankkinut Landis+Gyr Oy:ltä Toshibaan 1,2 MW:n litium-ioni-akun, joka liitetään Helen Sähköverkko Oy:n sähköverkkoon.

Taulukko 5. Hajautetun virtausakun kustannusrakenteeseen vaikuttavat kiinteät ja muuttuvat kustannukset. Vanadiini-virtausakun ja litium-ioni akun kustannusarviot on otettu PNNL:n raportista PNNL- 21388, jonka lisäksi hinta-arviot on muutettu euroiksi ($\$ 1 = 0,899 \text{ €}$, 15.3.2016) [48]. Putkiverkoston hankinta- ja rakennuskustannukset on arvoitu Helen Oy:ltä saadun kaukolämpöverkoston rakennuskustannuksista. Keskiänniteliittymän ja -muuntajan hinta-arviot on tehty vastaavasti viitteiden [49, 50] perusteella.

Kustannukset	Vanadiini-virtausakku	Litium-ioni-akku
Alkuinvestoinnit		
• Akku, €/kWh	193	899
• Akkujärjestelmä, €/kW	999	-
• Infrastrukturi		
– Putkisto, €/m	1000	-
– Pumpput, €/kpl	2000-4000	-
– Sähköverkon palvelumaksut		
* keskiänniteliittymä, €/kVA+€	-	45 + 8000
* pienjänniteliittymä, 3x250A, €	-	9900
– Keskiännite muuntaja		
* 100-160 kVA, €	-	4920
* 200 kVA, €	-	6450
* 1245 kVA, €	-	19 510
• Tehoelektroniikka ja apujärjestelmät	274	274
(BoP, Balance of Plant), €/kW		
Kiinteät ja muuttuvat kustannukset		
vuodessa		
• Käyttö ja huolto (O&M), €/kW	37	4

6 Tapaustutkimus

Tässä luvussa kuvataan luvussa 5 mallinnetun hajautetun energiajärjestelmän toimintaa tapauskohtaisesti sekä raportoidaan Matlabilla ohjelmoitu simulointimalli ja esitetään saadut tulokset. Hajautetun virtausakun konseptia ja sen soveltuvuutta testattiin kahdella toiminnallisuudella muuttamalla varastointikapasiteettia ja kuormitusta. Kiinnostus kohdistui energiavaraston toimintakykyyn hajautetun järjestelmän muiden parametrien muuttuessa.

Uusiutuvan energian tuotantoon vaikuttavat vallitsevat sääolosuhteet sekä vuorokauden- ja vuodenaika. Simulointimallin avulla tutkittiin vaihtelevan tuotannon ja eri kulutusprofiilien vaikutusta hajautetun akun toimintaan sekä varastointikapasiteetin riittävyteen. Matlab-ohjelmalla simuloitiin myös kulutuskohteen huipunleikkautta energiavaraston avulla. Huipunleikkauksessa kulutuksen tehopiikit tasoitetaan sähkövaraston avulla, jolloin sähköverkon kuormitus pienenee kulutuskohteen liityntäpisteessä.

Lisäksi oli kiinnostavaa selvittää, kykeneekö akku toimimaan saarekekäytössä, kun energiantuotannossa on katkoksia. Eli kuinka pitkän vikasuojan hajautettu virtausakku antaa kulutuskohteille tuotantokatkoksissa ja miten sen toiminta vertautuu vastaavanlaisessa tilanteessa litium-ioni akkuun. Jos varastointikapasiteetti on riittävä, simulointimallin avulla on mahdollista selvittää voiko hajautettu virtausakku toimia vikatilanteissa sähköverkon tukena.

Ympäristöystävällisen energiantuotannon näkökulmasta otettiin lisäksi kantaa siihen, kuinka paljon aurinkosähkön osuus lisääntyy kulutetusta energiasta hajautetun virtausakun avulla. Aurinko-osuus kertoo, kuinka suuri osa kokonaisenergiankulutuksesta on aurinkosähköä. Mitä suurempi aurinko-osuus on, sitä vähemmän myös hiilidioksidipäästöjä syntyy tarvittavan energian tuotannossa.

Matlab-simulointimalliin ladattiin valitut kulutus- ja tuotantoprofiilit sekä hajautetun virtausakun parametrit. Järjestelmän toimintaa simuloitiin vuoden kestäväällä ajanjaksolla vuoden 2015 huhtikuusta vuoden 2016 maaliskuuhun. Simuloimalla selvitettiin aurinko-osuuden muutos lisättäessä varastointikapasiteettia, hajautetun virtausakun soveltuvuus huipunleikkaukseen, sekä verrattiin hajautetun virtausakun

toimintaa litium-ioni akkuun. Tapauskohtaiset simulointimallit on tarkemmin kuvattu luvuissa 6.1.1, 6.2.1 ja 6.3.1. Kuvassa 11 on havainnollistettu energiajärjestelmää ilman sähkönvarastointimahdollisuutta ja kuvassa 12 puolestaan energiajärjestelmää, kun siihen on lisätty varastointikapasiteettia.

Tapaustutkimuksien osalta tarkasteltava järjestelmä rajattiin yhteen kortteliin Helsingin Kalasatamassa. Kyseiseen kortteliin on valmiiksi rakennettu kaukolämpöverkosto, jota käytettiin mallina hajautetun virtausakun putkiverkoston suunnittelussa ja simuloinnissa. Simulointimallissa hajautetun virtausakun putkiverkosto yhdistää suljetulla kierrolla energiajärjestelmän kerrostalot ja kierron varrelle lisättiin kerrostaloja kuorman kasvattamiseksi. Mallinnetun alueen karttakuva on esitetty kuvassa 13, johon kulutuskohteet on värjätty vaaleanpunaisella ja keskitetty kennopino punaisella. Kortteliverkoston liittyneet kulutuskohteet nimettiin A ja B, ja niitä vastaavat rakennukset näkyvät myös kuvassa 13. Jokaiseen kulutuskohteeseen simuloitiin oma kennopino, jonka kautta akkua purettiin tehontarpeen mukaan. Samaa korttelia tarkasteltiin myös litium-ioni akkujärjestelmän näkökulmasta.

Kalasatama on kasvukeskittymä Helsingissä, minne rakennetaan uutta ja älykkästä energiaverkostoa. Sähkövarastot ovat tärkeä osa älykkästä energiajärjestelmää. Suvilahti on Kalasataman lähistöllä sijaitseva kaupunginosa, missä sijaitsee Helen Oy:n Suvilahden aurinkovoimala ja Kalasataman rengasverkkoon liitetty litium-ioni sähkövarasto. Älykäs energiajärjestelmä voi sisältää myös hajautettuja pienemmän kokoluokan sähkövarastoja. Kiinteistökohtaista sähkövarastoa ja integroitua aurinkoenergiantuotantoa pilotoidaan Viikin Ympäristötalolla. Viikin Ympäristötalo on energiatehokas toimistorakennus, jonne on asennettu aurinkopaneelit, litium-ioni akku sekä sähköauton latauspiste.

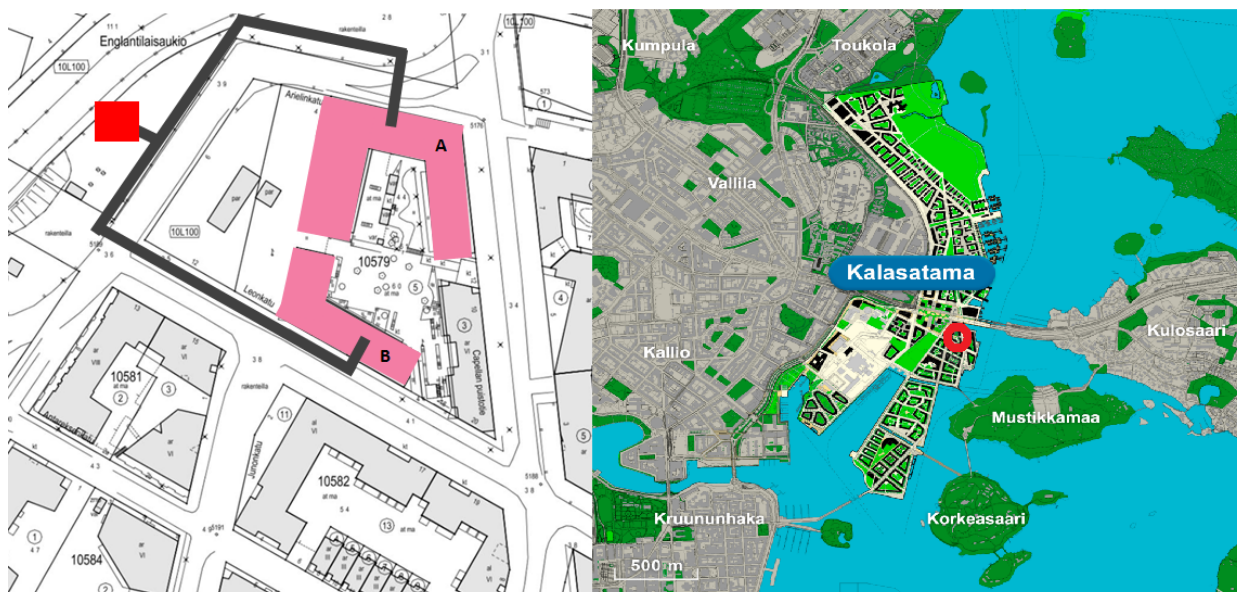
Tapaustutkimuksissa akun latausprofiilina käytettiin Helen Oy:n Suvilahden 340 kWp:n aurinkovoimalan mitattua tuotantoprofiilia huhtikuulta 2015 maaliskuulle 2016. Lisäksi pientuotannon simuloinnissa käytettiin Viikin Ympäristötalon 60 kWp:n aurinkopaneelien mitattua tuotantoprofiilia samalta ajanjaksolta. Kulutusprofiilit puolestaan saatiin Helen Sähköverkko Oy:ltä anonymisoituna datana. Hajautetun virtausakun energianvarastointikapasiteetti mitoitettiin Kalasataman korttelin kaukolämpöverkoston mukaan ja vastaavaa varastointikapasiteettia käytettiin myös litium-ioni akulle.



Kuvio 11. Aurinkovoimalaitos voidaan kytkeä suoraan kulutuskohteeseen, jolloin aurinkosähköä on mahdollista käyttää, kun kulutus vastaa tuotantoa.



Kuvio 12. Aurinkoenergian osuutta pystytään kasvattamaan, kun käytetään sähkövarastoa aurinkosähkön väliaikaisvarastona.



Kuvio 13. Hajautetun virtausakun putkiverkoston rakenne on suunniteltu käyttäen hyväksi Kalasatamassa sijaitsevan korttelin kaukolämpöverkoston. Kuvaan on merkitty vaaleanpunaiset kulutuskohteet A ja B, sekä keskitetty kennopino punaisella. (Kuva: Kalle Järvenpää, 2013 [51])

6.1 Litium-ioni akkujärjestelmä

6.1.1 Simulointimalli

Simuloitu litium-ioni akkujärjestelmä muodostuu aurinkopaneelien, sähkövaraston ja kulutuskohteen keskitetystä energiajärjestelmästä. Simulointimalli on rakennettu siten, että aurinkopaneelien tuotanto käytetään lyhentämättömänä kulutuskohteessa ja ylimääräinen tuotanto varastoidaan akkuun. Mikäli tuotanto ei kata kulutusta tai sitä ei ole, otetaan energia sähkövarastosta. Viime kädessä tarvittava energia ostetaan sähköverkosta, jonka välityksellä myös sähkö siirtyy.

Simulointimallilla simuloidaan vuoden kestävä ajanjakso tunnin aika-askelilla. Litium-ioni akun energiakapasiteetti ja varausaste tarkistetaan kerran tunnissa, jolloin tuloksen perusteella akun purkaminen tai lataaminen joko sallitaan tai estetään. Simulointimalliin on asetettu minimivarausasteeksi 0,2, jota pienemmillä varausasteen arvoilla akun purkaminen on estetty. Maksimivarausasteeksi puolestaan asetettiin 0,8, jota suuremmilla varausasteen arvoilla akun lataaminen on estetty. Akun koko kapasiteetti on käytössä, kun litium-ioni akun varausaste on välillä 0 – 1. Sähkövarauksen liikkua sähköverkon tai aurinkopaneelien ja sähkövaraston välillä

Taulukko 6. Litium-ioni akkujärjestelmän simulointimallin parametrit.

Parametri	Symboli	Arvo	Yksikkö
Tuotettu teho	P_aurinko	todellinen	W
Kulutettu teho	P_kuorma	todellinen	W
Tuotetun ja kulutetun erotus	P_erotus	P_aurinko–P_kuorma	W
Keskiarvo kuorma	P_avekuorma	25771	W
Maksimi kapasiteetti	E_kapamax	540000	Wh
Hetkellinen kapasiteetti	E_kapa	E_kapa + 0.95·P_erotus	Wh
Varausaste	soc	E_kapa/E_kapamax	-
Auringosta otettu teho	P_auringosta	0 – 1	-
Aurinko-osuus	solarf_litium	sum(P_auringosta)/ numel(P_auringosta)	-

tapahtuu häviöitä muun muassa sisäisten häviöiden, siirtohäviöiden ja muuntohäviöiden johdosta. Ison litium-ioni akun AC/AC-hyötysuhteeksi on arvioitu 85 % ja pienemmän kiinteistökohtaisen akun vastaavaksi 90 %. Varastoidun ja puretun energian häviöt on huomioitu sekä ladattaessa että purettaessa joko 7,5 % tai 5 % lataus- ja purkutehojen alenemana.

Litium-ioni akun varausaste määritetään simulointimallissa akussa jäljellä olevan energianvarastointikapasiteetin ja maksimi varastointikapasiteetin suhteena. Simulointimalliin asetetut parametrit litium-ioni akkujärjestelmän simulointia varten löytyvät taulukosta 6. Aurinko-osuus lasketaan tarkasteluajanjakson aikana käytetyn aurinkosähkön ja koko kulutuksen suhteena siten, että aurinkosähköllä katettu kulutus saa normitetun arvon 1, osittain aurinkosähköllä katettu kulutus normitetun arvon väliltä 0 – 1 ja tuotantokatkoksien aikana normitetun arvon 0.

Teho-optimoinnissa seurataan puolestaan akun varausasteen käytöstä ja asetetaan akku purkamaan ainoastaan, kun kulutuskohteen kuorma ylittää keskiarvokuorman. Kulutushuiput leikataan akun avulla aina, kun energianvarastointikapasiteettia on jäljellä.

6.1.2 Tulokset

Suvilahden aurinkovoimala on huomattavasti ylimitoitettu yhden kerrostalon kulu-
tustarpeeseen. Kerrostalon A aurinko-osuus on 33,7 % energiajärjestelmässä, missä
on vain kulutusta ja tuotantoa. Litium-ioni akun avulla aurinko-osuus pystytään
kaksinkertaistamaan verrattuna järjestelmään ilman akkua. Yhden kulutuskohteen
tarpeisiin 540 kWh:n akku on kapasiteetiltaan riittävä eikä aurinko-osuus merkit-
tävästi kasva, vaikka varastointikapasiteettia kasvatettaisiinkin. Kaksinkertaista-
malla litium-ioni akun energianvarastointikapasiteetti, kasvaa aurinko-osuus 1,8 %.
Litium-ioni akun energianvarastointikapasiteetin vaikutusta aurinko-osuuteen on
havainnollistettu taulukossa 7.

Litium-ioni akkujärjestelmää havainnollistettiin myös pienemmässä mittakaa-
vassa. Aurinkoenergian pientuotannolla saadaan katettua 19,8 % kerrostalon A
sähköntarpeesta. Aurinkosähkön osuus kasvaa 2,2 % kiinteistökohtaisen 45 kWh:n
litium-ioni akun avulla. Edelleen, jos kaksinkertaistetaan kiinteistökohtaisen litium-
ioni akun energianvarastointikapasiteetti 90 kWh:iin, saadaan energiajärjestelmän
aurinko-osuudeksi 22,8 %. Myös pienemmän energiajärjestelmän tulokset on esitetty
aurinko-osuuden osalta taulukossa 7.

Huipunleikkauksen osalta simulointitulokset kuvaavat kulutuskohteen sähkö-
verkosta ostetun sähkön määrää tarkasteluajanjaksolla. Tuloksissa kulutuskohteen
kuorma on esitetty sinisenä graafina sähköverkon liityntäpisteen näkökulmasta.
Keskiarvokulutuksen ylittävät kulutushuiput pyrittiin leikkaamaan akun avulla.
Keskiarvokulutus on merkitty suorituskykyä havainnollistaviin kuvaajiin punaisella
suoralla. Punaisen suoran ylittävät piikit vastaavat kerrostalon kulutusta, kun akun
varausaste on ollut liian matala purettavaksi. Pysty akselin teho on puolestaan nolla,
kun kerrostalon energiantarve on otettu akusta.

Simulointien perusteella 540 kWh:n litium-ioni akku soveltuu kesäaikaan hyvin
huipunleikkaukseen, jolloin keskiarvokulutuksen ylittäviä piikkejä ei esiinny. Huipun-
leikkausta simuloitiin myös 45 kWh:n kiinteistökohtaisella akulla, jolloin tulokset
ovat hieman heikommat. Talvella riippumatta sähkövaraston koosta, kun aurinkoe-
nergiaa ei ole saatavilla, ei kulutushuippuja pystytä leikkaamaan aurinkosähköllä.
Sähköverkkoon liitetyn akun suorituskyky huipunleikkauksessa on esitetty kuvas-
sa 17 ja pienemmän kiinteistökohtaisen akun suorituskyky kuvassa 18. Kuvassa 17
energianvarastointikapasiteetin kasvattamista on tarkasteltu isomman litium-ioni
akun osalta, mutta sen kasvattaminen ei tulosten perusteella merkittävästi paranna

Taulukko 7. Energiajärjestelmien aurinko-osuuksien vertailu litium-ioni akun kanssa ja ilman.

Aurinkopaneelien nimellisteho	60 kWp	340 kWp
Akun kapasiteetti		
ilman akkua	19,8 %	33,7 %
45 kWh	22,0 %	38,7 %
90 kWh	22,8 %	42,5 %
540 kWh	23,8 %	60,8 %
1080 kWh	24,0 %	62,7 %

akun suorituskykyä huipunleikkauksessa.

6.2 Hajautetun virtausakun aurinko-osuus

6.2.1 Simulointimalli

Virtausakun ja hajautetun energiajärjestelmän Matlab-mallinnuksessa on tehty yksinkertaistavia oletuksia ja mallin käyttö jatkotutkimuksiin tulee vaatimaan mallin tarkentamista. Hajautettua virtausakkua on mallinnettu suljettuna kiertona, missä elektrolyytti kiertää jatkuvasti samaan suuntaan ja kennopinot on sijoitettu verkoston varrelle tasaisin välimatkoin. Matlab-mallissa tarkastellaan kahden kennopinon välistä elektrolyyttiä yhtenä palana, eikä elektrolyyttien sekoittumista huomioida.

Simulointimallissa hajautetun akun lataaminen tapahtuu keskitetysti kennopinon kautta, joka on liitetty aurinkopaneeleihin. Aurinkopaneelien tuottama teho muutetaan Matlab-mallissa akkua lataavaksi sähkövirraksi luvussa 5.5.2 esitetyn yhtälön (16) avulla. Kennojen jännitehäviöt on otettu huomioon ekvivalenttiresistanssin avulla yhtälöllä (13). Lasketun sähkövirran avulla määritetään elektrolyytin konsentraation muutos sen ohittaessa kennopino ja sen laskemiseksi yhtälö (9) on johdettu luvussa 5.5.1. Konsentraation muutoksen avulla yhtälöllä (10) lasketaan edelleen akun varausaste, kun elektrolyytti poistuu kennopinosta.

Hajautettu virtausakku koostuu lataavan kennopinon lisäksi putkiverkoston varrelle kerrostaloon asennetusta kennopinosta, joka purkaa akkua kerrostalon kuluksen mukaan. Myös purkuvirta lasketaan purkutehosta jännitehäviöiden avulla.

Purkuvirran avulla lasketaan edelleen konsentraation muutos ja sen aiheuttama varausasteen aleneminen. Mikäli purkuvirta on liian suuri tai akun varausaste liian matala, ei akkua pureta elektrolyytin virratessa kennopinoon.

Varausaste määrittää akun toimintarajat ja todellisen käytettävissä olevan energiasisällön. Hajautetun virtausakun mallissa lataus on sallittua, kunhan varausaste on alle 0,8. Minimissään akun varausaste saa puolestaan pudota 0,2, mutta akun purkamisen on estetty jo silloin, kun varausaste on alle 0,3. Simulointimallissa purkamisen salliva tai kieltävä varausaste on lataavasta kennopinosta poistuvan elektrolyytin varausasteen arvo ja latauksen salliva tai kieltävä varausasteen arvo purkavasta kennopinosta poistuvan elektrolyytin varausasteen arvo.

Luvussa 5.1 olevasta hajautetun virtausakkujärjestelmän yksinkertaisesta kuvasta 6 nähdään simulointimallin toimintaperiaate. Matlabin simulointimallilla on lisäksi mahdollista simuloida kahden hajautetun kulutuskohteen vaikutusta korttelia-
kun varastointikapasiteetin riittävyteen, jolloin kuvassa 6 esitellyn kierron varrelle lisätään kennopino. Kennopinot ovat suljetun kierron varrella sarjassa toisiinsa nähden ja edellisestä kennopinosta poistuva varausaste määrää seuraavaan kennoon mennessä onko purkamisen sallittua. Toinen kulutuskohte huomioidaan samoin kuin ensimmäinenkin. Purkuvirta määräytyy kulutuskohteen tehon tarpeesta, jonka avulla lasketaan kennopinosta poistuvan elektrolyytin konsentraation muutos ja varausaste.

Virtausakkujen mallinnuksessa on tärkeää huomioida elektrolyytin pumppauksesta aiheutuvat häviöt. Aurinko-osuuden ja luvussa 6.3.1 kuvatun teho-optimoinnin simulointimalleissa elektrolyytin pumppaukseen hukattu teho on huomioitu lisäämällä pumppausteho kuorman kuluttamaan tehoon, jolloin kokonaisuudessaan akun purkuteho on pumppauksen ja kulutuksen yhteenlaskettu kuorma. Elektrolyytin pumppaus on simuloitu luvussa 5.5.3 esitetyn mallin pohjalta ja pumppausteho on laskettu yhtälöllä (25). Hajautetun virtausakun aurinko-osuuden simulointimallin parametrit löytyvät taulukosta 8.

Aurinko-osuus on laskettu samoin kuin luvussa 6.1.1 litium-ioni akulle. Aurinko-osuus ilman akkua saadaan normittamalla aurinkosähkön osuus kulutuksesta välille 0 – 1. Hajautetun virtausakun tapauksessa puolestaan apuparametrille I_{kulutus} annetaan arvo 1, kun akkua puretaan ja arvo 0, kun akun varausaste on liian alhainen eikä akkua ole mahdollista purkaa.

Hajautetun virtausakun koko määräytyy simulointimallissa putkiston tilavuu-

desta, joka pidetään vakiona. Työssä haluttiin kuitenkin simuloida kortteliakun kapasiteetin riittävyttä, joten järjestelmän energianvarastointikapasiteetin kasvatamiseksi simulointimalliin mallinnettiin lisäksi ulkoiset elektrolyyttitankit, joiden tilavuutta säätämällä saatiin lisää varastointikapasiteettia. Kapasiteetin lisäyksellä selvitettiin, mikä olisi optimaalisin sähkövaraston koko aurinko-osuuden sekä huipunleikkauksen näkökulmasta.

6.2.2 Tulokset

Suvilahden aurinkovoimalan tuotannolla aurinko-osuus on sama kuin luvussa 6.1.2 raportoitu 33,7 %. Suvilahden kokoisen aurinkovoimalan energian tuotannosta kuukaudessa jää käyttämättä keskimäärin yli puolet. Kuukausikohtainen erittely käyttämättä jääneestä aurinkoenergiasta löytyy taulukosta 9.

Sähkövaraston avulla aurinkosähkön käyttöaste paranee. Hajautetun energiajärjestelmän aurinko-osuus riippuu sähkövaraston koosta ja mitä suurempi energianvarastointikapasiteetti on, sitä suurempi on myös aurinko-osuus. 540 kWh:n kortteliakulla aurinko-osuudeksi saadaan 34,8 % ja energiakapasiteetin kasvaessa aurinko-osuuskin kasvaa. Kesällä aurinko-osuus on selvästi korkeampi kuin talvella. Syitä hajautetun virtausakun heikolle kokonais-suorituskyvylle on pohdittu luvussa 7.1. Varastointikapasiteetin ja kuukausien vaikutusta aurinko-osuuteen on havainnollistettu taulukossa 9.

6.3 Hajautetun virtausakun teho-optimointi

6.3.1 Simulointimalli

Teho-optimointia varten ohjelmoitu simulointimalli noudattaa samaa toimintaperiaatetta kuin aurinko-osuutta kuvaava simulointimalli. Teho-optimoinnissa kuitenkin sen sijaan, että yritetään hyödyntää kaikki auringosta peräisin oleva energia, hajautettua akkua käytetään huipunleikkaukseen. Kulutushuiput ajoittuvat tietyille vuorokauden tunneille ja hajautetun virtausakun avulla kerrostalon kulutusta voidaan tasoittaa.

Teho-optimointia varten määritetään kulutuskohteen keskiarvokuorma, jota suuremmat kulutuspiikit pyritään leikkaamaan pois. Simulointimallissa akku on asetettu purkamaan, kun kulutus ylittää lasketun keskiarvokuorman. Purkamista ohjaavat samat ehdot kuin aurinko-osuuden simulointimallissa, eli mikäli elektrolyytin

Taulukko 8. Hajautetun virtausakkujärjestelmän simulointimallin parametrit aurinko-osuudelle. Lukuarvot vastaavat 540 kWh:n hajautettua virtausakkua.

Parametri	Symboli	Arvo	Yksikkö
Tuotettu teho	P_kenno	todellinen	W
Kulutettu teho	P_kuorma	todellinen	W
Kulutetun ja tuotetun erotus	P_erotus	P_kenno–P_kuorma	W
Teho, jolloin kulutus ja tuotanto yhtäaikaista	P_kulutus	0 – 1	-
Suhteellinen akun purkuvirta	I_kulutus	0 – 1	-
Painehäviö verkostossa	deltap_tot	80155	Pa
Pumppausteho	P_pumppu	125,2	W
Tilavuusvirta	Q	1,25	l/s
Konsentraation muutos	deltac	$(N_kenno \cdot I) / (F \cdot ctot \cdot Q \cdot (1 - SoC))$	-
Varausaste	SoC	$SoC \cdot (1 \pm deltac)$	-
Akun purkuvirta	I_purku	todellinen	A
Aurinko-osuus ilman akkua	solarf	$\text{sum}(P_kulutus) / \text{numel}(P_kulutus)$	-
Aurinko-osuus akun kanssa	solarf_akku	$\text{sum}(I_kulutus) / \text{numel}(I_kulutus)$	-

Taulukko 9. Selvästi ylimitoitettun aurinkovoimalan liittäminen suoraan kulutuskohteeseen johtaa merkittävään tuotetun aurinkosähkön hukkaamiseen.

	Kuluttettu energia (MWh)	Tuotettu energia (MWh)	Hukkaenergia (MWh)	Hukatun energian osuus tuotetusta (%)	Aurinko-osuus (%) 0,54 MWh:n akku	Aurinko-osuus (%) 1,08 MWh:n akku	Aurinko-osuus (%) 2,16 MWh:n akku
Tammikuu	24,80	0,16	0	0	6	0,3	0,3
Helmi- kuu	20,59	2,73	1,02	37	6	4	4
Maaliskuu	19,45	15,61	9,77	63	32	33	26
Huhtikuu	17,39	27,44	18,79	68	51	65	66
Toukokuu	16,54	44,07	33,54	76	54	88	94
Kesäkuu	15,69	41,79	31,04	74	69	94	96
Heinäkuu	14,38	42,48	32,71	77	71	98	100
Elokuu	16,20	43,37	33,67	78	56	94	95
Syyskuu	17,08	20,82	13,67	66	40	46	40
Lokakuu	18,90	13,07	7,64	58	29	24	21
Marraskuu	21,02	2,12	0,26	12	6	4	3
Joulukuu	23,71	0,74	0	0	2	0,8	1
Yhteensä	225,8	254,5	182,1	72	35	47	49

Taulukko 10. Hajautetun virtausakkujärjestelmän teho-optimointi - simulointimallin parametrit.

Parametri	Symboli	Arvo	Yksikkö
Tuotettu teho	P_kenno	todellinen	W
Kulutettu teho	P_kuorma	todellinen	W
Kulutetun ja tuotetun erotus	P_erotus	P_kenno - P_kuorma	W
Kulutus ja tuotanto yhtäaikaista	P_kulutus	P_kuorma	W
Keskiarvo kuorma	P_avekuorma	25771	W
Verkosta otettu teho	P_verkko	todellinen	W
Painehäviö verkostossa	deltap_tot	80155	Pa
Pumppausteho	P_pumppu	125,2	W
Tilavuusvirta	Q	1,25	l/s
Konsentraation muutos	deltac	$(N_kenno \cdot I) / (F \cdot ctot \cdot Q \cdot (1 - SoC))$	-
Varausaste	SoC	$SoC \cdot (1 \pm deltac)$	-

varausaste on alle 0,3 tai purkuvirta on liian suuri, akun purkaminen on estetty.

Akun lataaminen suoritetaan aurinkopaneelien yhteyteen mallinnetulla kennopinolla ja myös latausta rajoittavat samat ehdot kuin aurinko-osuuden simulointimallissa. Suurin sallittu elektrolyytin varausaste on 0,8, jonka jälkeen akun lataus on estetty. Teho-optimoinnin simulointimallissa käytetyt parametrit löytyvät taulukosta 10.

6.3.2 Tulokset

Hajautettu virtausakku on teho-optimoinnin osalta heikompi kuin vastaava litiumioni akku. Tässä kappaleessa on vertailun vuoksi raportoitu tarkemmin myös litiumioni akun suorituskyky teho-optimoinnissa. Akkujen suoriutumista teho-optimoinnista on ensisijaisesti mitattu akun kapasiteetilla. Mikäli energiakapasiteetti ja siten akun varausaste ovat luvussa 6.3.1 määritettyjen rajojen ulkopuolella,

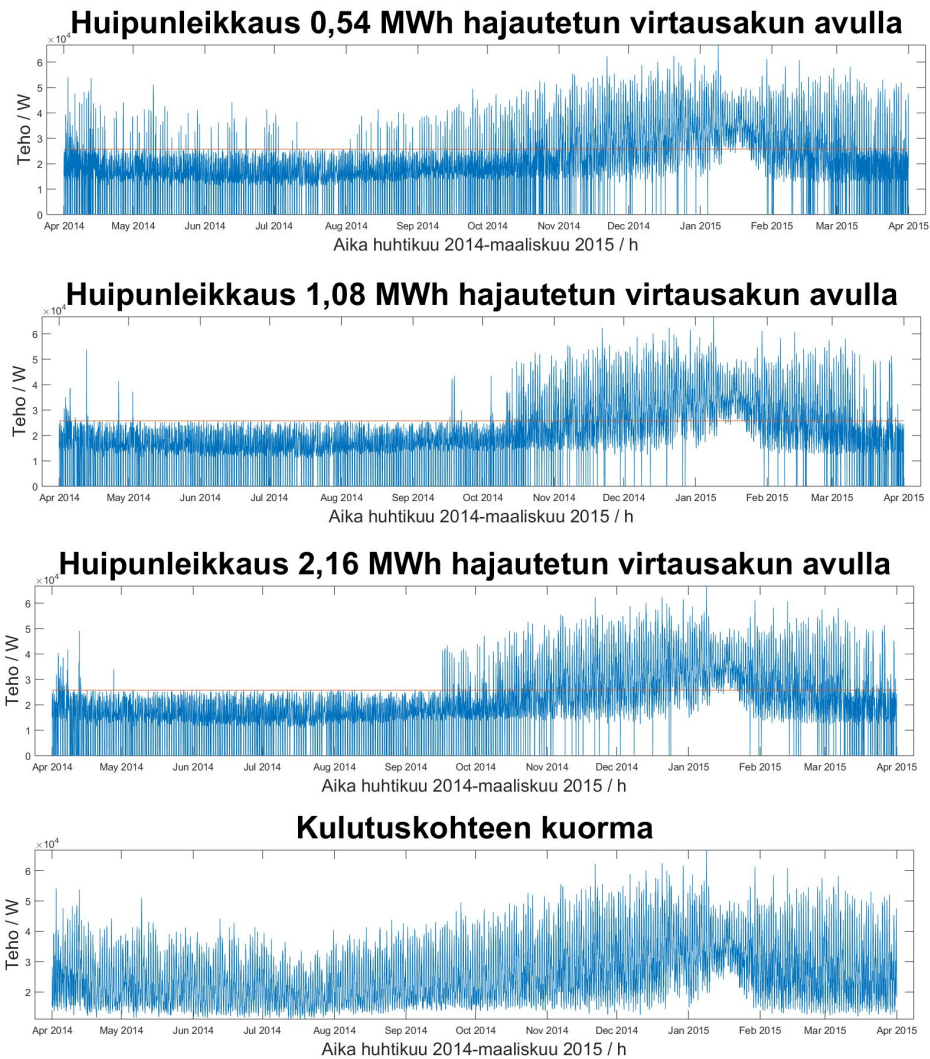
ei akun kapasitetti ole riittävä teho-optimoinnille, jolloin sen suorituskyky heikkenee.

Kuvasta 14 nähdään hajautetun virtausakun suoriutuminen kerrostalon A huipunleikkauksessa: sininen käyrä on kerrostalon verkosta ottama teho akun kanssa tai ilman ja punainen suora osoittaa akun aktivoitumispuheen. Kun kerrostalon kuorma ylittää punaisen suoran osoittaman keskiarvokuorman, akun tehtävä on syöttää kulutusta vastaava teho kerrostalolle. Kuvassa 14 on vertailtu hajautetun virtausakun energianvarastointikapasiteetin vaikutusta kortteliakun suorituskykyyn. Parhaiten kortteliakulla pystytään leikkaamaan keskiarvokuorman ylittävää kulutusta kesällä, jolloin akussa on parhaiten kapasiteettia jäljellä tehopiikin ilmetessä. Tämä näkyy kuvassa sinisten piikkien harvemmassa esiintymistiheydessä talveen verrattuna. Talvella huipunleikkaus on systemaattisesti heikkoa lukuun ottamatta satunnaisia akun aktivoitumisia. Satunnaiset akun aktivoitumiset havaitaan kuvassa 14, kun teho putoaa hetkellisesti noltaan. Tulosten nojalla hajautetun virtausakun suorituskyky paranee kesällä, kun energiavarastointikapasiteetti kaksinkertaistetaan. Tarkempi kuukausierittely 540 kWh:n kortteliakun suorituskyvystä löytyy liitteestä C. Edelleen liitteessä B on kerrostalon A kulutuksen tarkempi kuukausierittely.

Yhden kerrostalon huipunleikkaus on varsin heikkoa 540 kWh:n kortteliakulla ja kuvasta 15 nähdään, että toisen kulutuskohteen lisääminen heikentää järjestelmän suorituskykyä huipunleikkauksessa entisestään. Toisen kerrostalokuorman johdosta hajautetun akun huipunleikkaus heikkenee molempien kulutuskohteiden osalta.

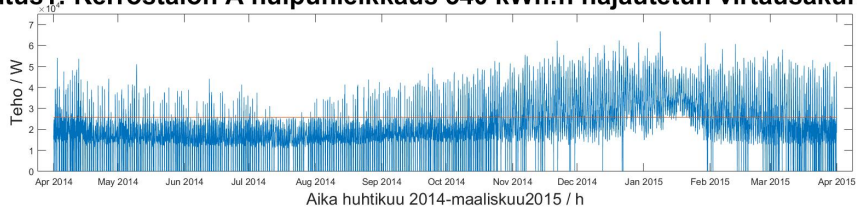
Toisaalta jos kulutusta on murto-osa kerrostalon kulutuksesta, pystytään hajautetulla virtausakulla tehokkaampaan huipunleikkaukseen. Pienempää kuormaa mallinnettiin kerrostalon pohjakuorman kulutusprofiililla. Kuvassa 16 näkyy kuinka hajautettu kortteliakku suoriutuu pohjakuorman huipunleikkauksesta. Kuvassa on vertailtu suorituskykyä energianvarastointikapasiteetin muuttuessa. Huipunleikkausta tarvitsevan kuorman pienentyessä jo 540 kWh:n hajautettu virtausakku suoriutuu tehtävästä paremmin. Vertaamalla kuvia 14 ja 16 nähdään hyvin pienemmän kulutuksen vaikutus kortteliakun suorituskykyyn.

Litium-ioni akku suoriutuu huipunleikkauksesta kesäaikaan vaivatta ja litium-ioni teknologialla 540 kWh:n sähkövarasto yhdistettynä Suvilahden aurinkovoimalan tuotantoon on riittävä. Akun energianvarastointikapasiteetti ei merkittävästi vaikuta litium-ioni akun suorituskykyyn huipunleikkauksessa. Kuvassa 17 on vertailtu energiavarastointikapasiteetin vaikutusta energiajärjestelmän suorituskykyyn. Liitteessä D on vielä tarkempi kuukausikohtainen erittely 540 kWh:n akun suorituskyvystä

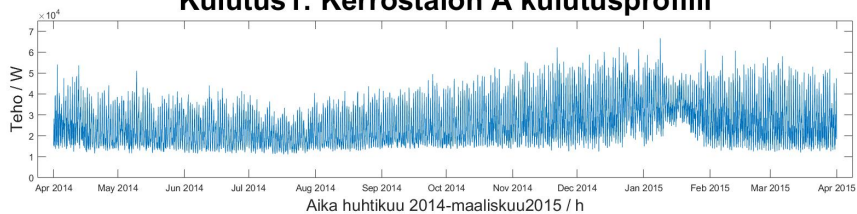


Kuvio 14. 540 kWh:n, 1,08 MWh:n ja 2,16 MWh:n hajautettujen virtausakkujen suorituskykyjen vertautuvuus yhden kerrostalon kuorman huipunleikkauksessa. Kulutuskohteen tehon tarve on katettu hajauettulla virtausakulla, kun sininen tehokäyrä on alle punaisella merkityn keskiarvokuorman. Keskiarvokulutuksen ylittävä teho joudutaan ottamaan sähköverkosta.

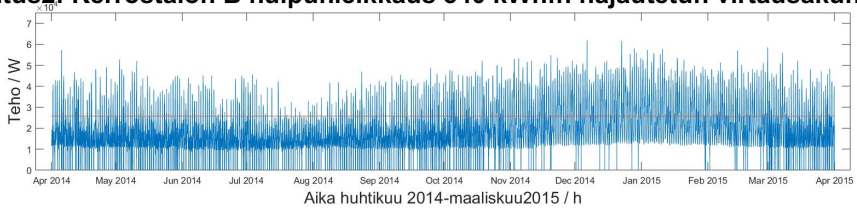
Kulutus1: Kerrostalon A huipunleikkaus 540 kWh:n hajautetun virtausakun avulla



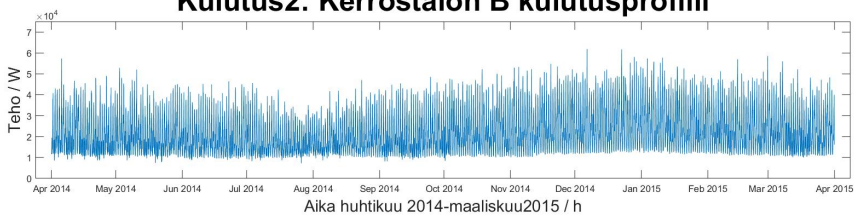
Kulutus1: Kerrostalon A kulutusprofiili



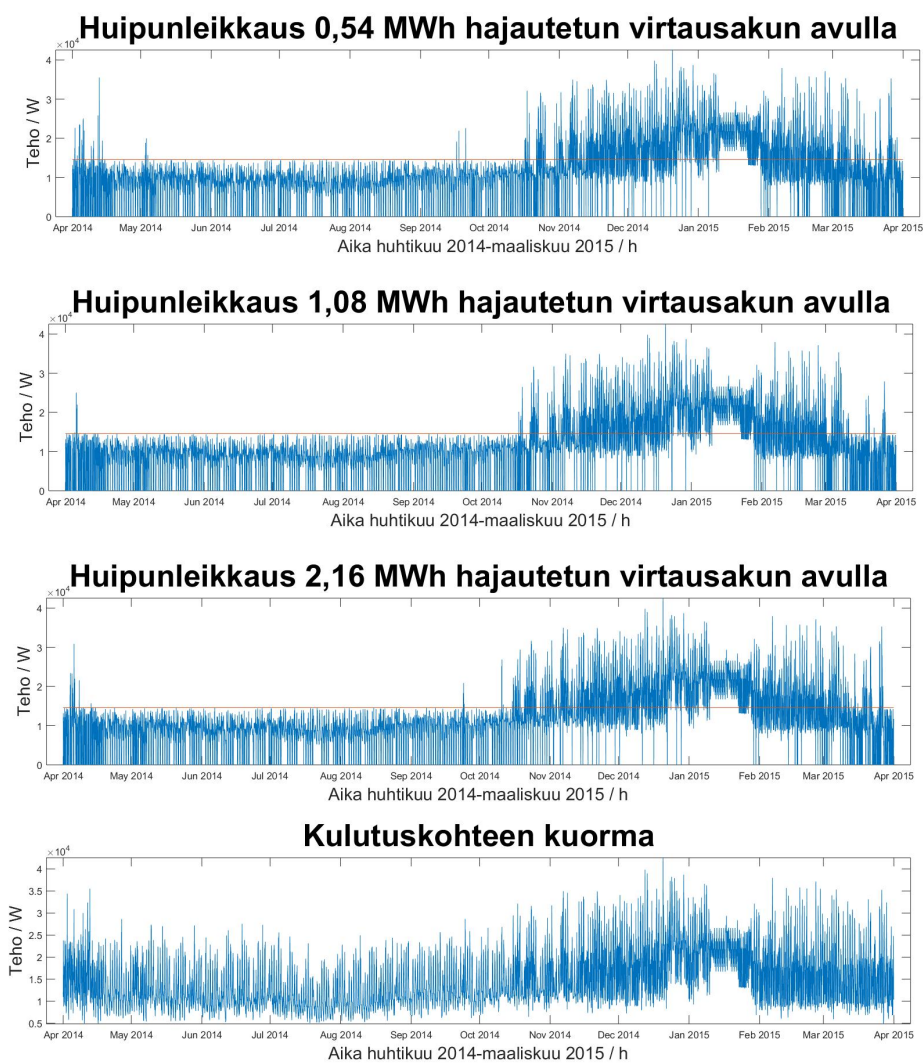
Kulutus2: Kerrostalon B huipunleikkaus 540 kWh:n hajautetun virtausakun avulla



Kulutus2: Kerrostalon B kulutusprofiili



Kuvio 15. 540 kWh:n hajautetun virtausakun suorituskyky kahden hajautettuun energiajärjestelmään liitetyn kerrostalon kulutuksien huipunleikkauksessa. Huipunleikkakseen tulisi aktivoitua punaista keskiarvokuormaa suuremmilla tehoilla.

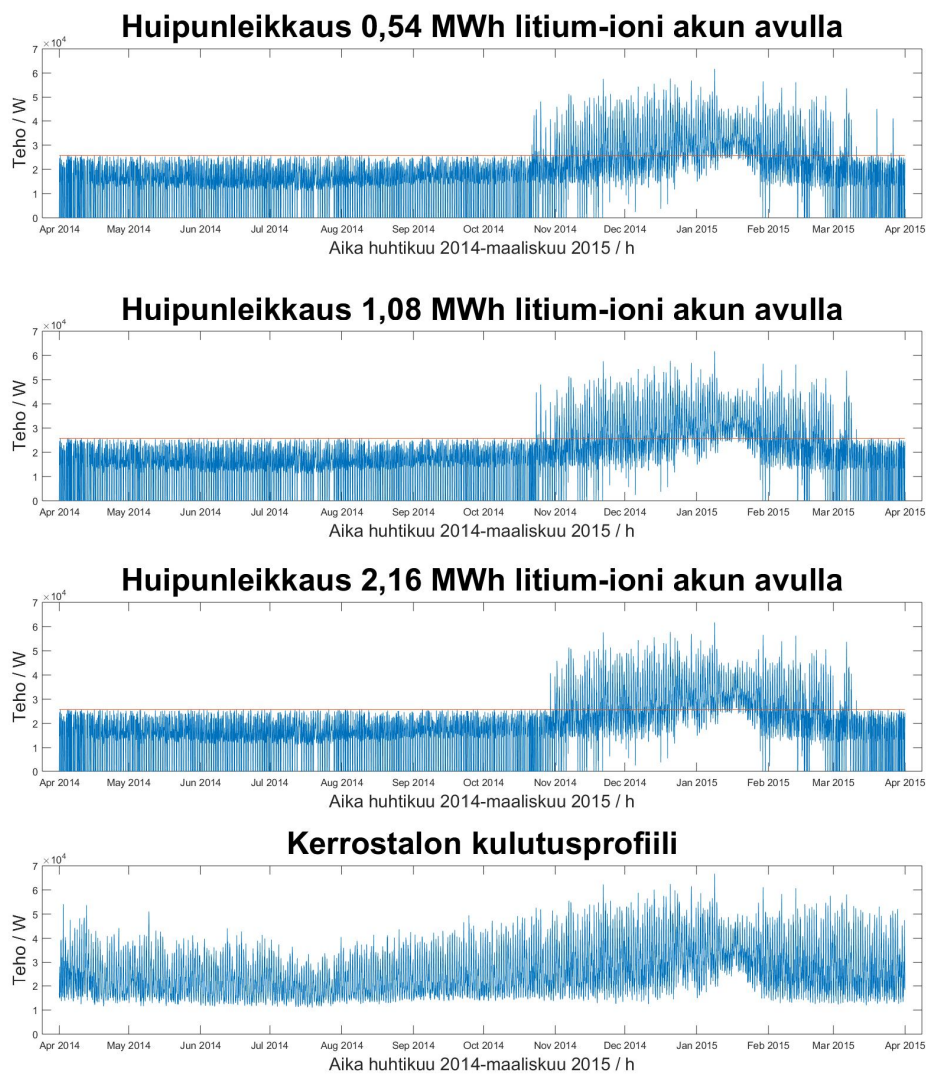


Kuvio 16. 540 kWh:n, 1,08 MWh:n ja 2,16 MWh:n hajautettujen virtausakkujen suorituskykyjen vertautuvuus yhden kerrostalon pohjakuorman huipunleikkauksessa. Kerrostalon pohjakuormaa vastaavat kulutusprofiili ja keskiarvokuorma johtavat hajautettujen virtausakkujen parempaan käytettävyyteen, sillä siniset tehopiikit saadaan leikattua lähes kokonaan kesällä.

huipunleikkauksessa.

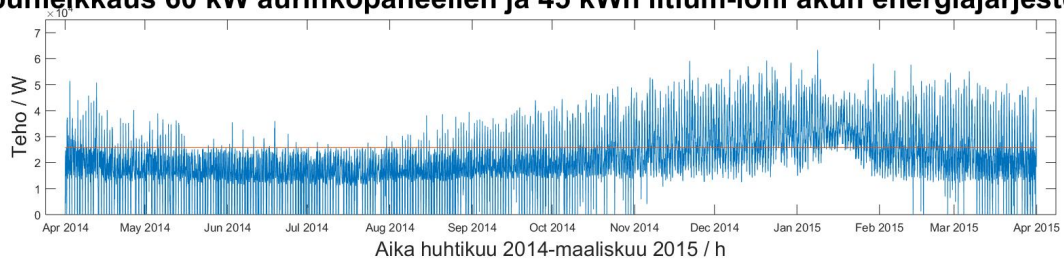
Litium-ioni akun kaltainen suorituskyky olisi toivottavaa myös virtausakulta, mutta heikko energiatiheys ja pumppaushäviöt heikentävät hajautetun virtausakun hyötysuhdetta ja siten suorituskykyä huipunleikkaukseen. Kuten hajautetun virtausakun tapauksessa, myöskään litium-ioni akku ei kykene huipunleikkaukseen talvella.

Isojen sähköverkkoa tukevien sähkövarastojen vertailukohtaksi otettiin kiinteistökohtainen 45 kWh:n litium-ioni akku. Kiinteistökohtaisella 45 kWh:n litium-ioni akulla pystyisi leikkaamaan kerrostalon A kulutushuiput kuvan 18 mukaisesti. Pienen energiajärjestelmän suorituskyky huipunleikkauksessa on vastaava kuin 540 kWh:n kortteliakulla. Jos litium-ioni akuista siirryttäisiin kortteliakkuun, vaatisi yhden kulutuskohteen huipunleikkaus 12 kertaa enemmän energianvarastointikapasiteettia nykyisellä virtausakkuteknologialla litium-ioni akkuun verrattuna.

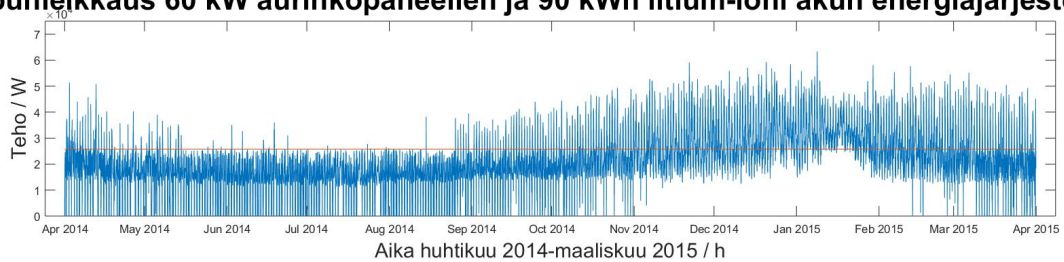


Kuvio 17. 540 kWh:n, 1,08 MWh:n ja 2,16 MWh:n litium-ioni akkujen suorituskykyjen vertautuvuus yhden kerrostalon kulutuksen huipunleikkauksessa. Litium-ioni akulla huipunleikkaus onnistuu hyvin ja punaisella merkityn keskiarvokuorman ylittävä huipputeho saadaan leikattua talvea lukuunottamatta.

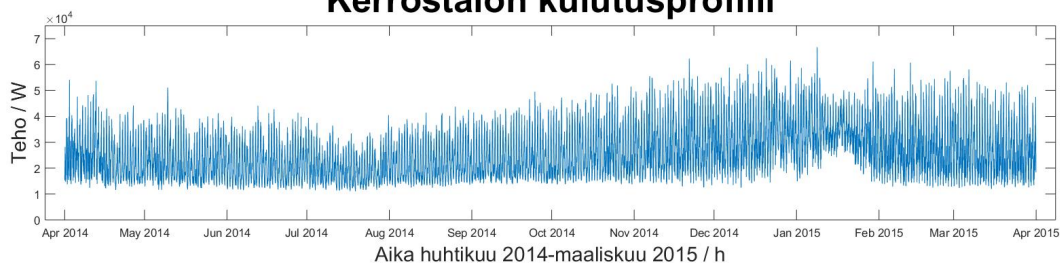
Huipunleikkaus 60 kW aurinkopaneelien ja 45 kWh litium-ioni akun energiajärjestelmällä



Huipunleikkaus 60 kW aurinkopaneelien ja 90 kWh litium-ioni akun energiajärjestelmällä



Kerrostalon kulutusprofiili



Kuvio 18. 45 kWh:n ja 90 kWh:n litium-ioni akkujen suorituskyky kerrostalon A kulutuksen huipunleikkauksessa, kun energiajärjestelmään on lisäksi asennettu 60 kW:n aurinkopaneelit. Sininen tehokäyrä ilmaisee kerrostalon verkosta ottaman tehon määrän ja punaisella on merkitty kerrostalon A keskiarvokuomaa.

7 Tulosten tarkastelu

Hajautetun virtausakun ja keskitetyn litium-ioni akun energiajärjestelmien vertailussa täytyy muistaa, että järjestelmien rakenne on erilainen simulointimallissa. Erilainen rakenne vaikuttaa sekä aurinko-osuuden että teho-optimoinnin simulointituloksiin. Keskitetty litium-ioni akku on asennettu sähköverkon, aurinkovoimalaitoksen ja kulutuskohteen solmupisteeseen. Aurinkopaneelien tuotanto siirtyi suoraan kulutuskohteeseen muuntajan kautta. Kun tuotantoa oli kulutusta enemmän, siirtyi sähkö aurinkopaneelista muuntajan kautta sähkövarastoon. Hajautettu virtausakku ladattiin tuotannon yhteydessä, jonka jälkeen energia siirrettiin putkiverkostossa pumppaamalla purettavaksi.

Energiajärjestelmien aurinko-osuuksia simuloitaessa pyrittiin maksimoimaan aurinkosähkön osuus kulutetusta energiasta. Teho-optimointia simuloitaessa pyrittiin minimoimaan keskiarvokulutuksen ylittävä sähköverkosta otettavan sähkön osuus. Siten huipunleikkauksen avulla on mahdollista pienentää tarvittavan sähköliittymän kokoa, joka osaltaan vaikuttaa vuosittaisiin energiakustannuksiin.

7.1 Energiajärjestelmien suorituskyky - aurinko-osuus

Hajautetun virtausakun tapauksessa häviöitä oli litium-ioni akkua enemmän. Aurinkovoimalan tuottama sähkö varattiin elektrolyyttiin ja siirrettiin pumppaamalla putkiverkostossa. Lopuksi varastoitu energia purettiin. Järjestelmässä tapahtui energiahäviöitä katkeamattomana pyörivän prosessin jokaisessa vaiheessa. Simulointitulokset vahvistavat käsitystä siitä, ettei virtausakuteknologia kaikilta ominaisuuksiltaan yllä litium-ioni akun tasolle. Huomionarvoista on kuitenkin se, että hajautetun virtausakun tulokset aurinko-osuuden osalta muuttuisivat, jos kerrostalossa olisi lisäksi omaa tuotantoa.

Lisäämällä kerrostaloon aurinkopaneeleita, saataisiin todennäköisesti suurempi osa kulutuksesta katettua aurinkosähköllä, mutta hajautetun energiaverkon kokonaihäviöt tuskin muuttuisivat merkittävästi. Simuloimalla mallinnetun hajautetun virtausakun häviöt voi laskea karkeasti elektrolyytin varausasteen avulla. Akun

latauksen aikana energiahäviöt ovat pienemmät kuin purkamisen aikana. Oletetaan, että elektrolyytin varausaste on suoraan verrannollinen varauskapasiteetin ja maksimivarauskapasiteetin suhteeseen. Hajautetun virtausakun suurin käytettävissä oleva energiakapasiteetti on 324 kWh, joka määräytyy varausasteen toimintarajoista.

Jos akku ladataan 46,38 %:sta 90,84 %:iin kun aurinkopaneelit tuottavat energiaa tunnin ajan 128 kW:n teholla, teho joka todellisuudessa kuluu on akun sisäisten häviöiden takia 142,6 kW. Sisäisten häviöiden kompensoimiseksi tarvitaan siis 10,2% lisätehoa, jos koko auringon tuottama energia varastoidaan. Toisaalta ilman apusähköä aurinkopaneelien tuottamasta energiasta saadaan häviöiden jälkeen talteen 114,9 kWh. Purkuhäviöt ovat hajautetulla virtausakulla latausta suuremmat. Jos akkua puretaan tunti 90,84 %:sta 84,51 %:iin 14,82 kW:n teholla, kuluu tunnin aikana energiaa yhteensä 20,51 kWh. Purkuhäviöt ovat 27,7 % ja aiheutuvat akun sisäisistä häviöistä sekä elektrolyytin pumppauksesta. Suurimmat lataus- ja purkuhäviöt aiheutuvat kennojen sisäisistä häviöistä, kuten resistanssista.

Energiahäviöiden osalta täytyy miettiä, kuvaako simulointimalli järjestelmää hyvin ja onko parametrit, kuten purku- ja latausvirrat tai konsentraation muutos, laskettu oikein. Simuloitujen lataus-purkusyklien tarkastelu osoittaa, että akkua purettaessa konsentraation muutos on voimakkaampaa matalalla varausasteella, jolloin suurella purkuvirralla purkaminen johtaa merkittävämpiin energiahäviöihin. Käytöstä selittää siten simulointimallissa käytetty konsentraation muutoksen laskukaava. Laskukaavan soveltuvuuden tarkistaminen vaatisi todellisen käyttäytymisen selvittämistä ja sen perusteella mallin tarkennusta. Virtausakun häviöitä voi pienentää myös järjestelmän komponenttien toiminnan optimoinnilla, mutta optimoinnin huomioiminen vaatisi edelleen tarkempaa simulointimallia.

Simuloimalla saaduista tuloksista voidaan päätellä, että litium-ioni akun avulla varastoitu aurinkosähkö kyetään nykyisellään hyödyntämään paremmin. Kortteliakun tuloksista puolestaan nähdään, ettei tuotetun energian ajallisen siirtämisen hyötysuhde ole korkea, sillä hajautetun virtausakun aurinko-osuus on samaa suuruusluokkaa kuin ilman sähkövarastoa. Hajautetun virtausakun simulointitulokset ovat kuitenkin suuntaa-antavia, eivätkä siten ole täysin vertailukelpoisia litium-ioni akun tulosten kanssa. Hajautetun virtausakun matala suorituskyky on osin myös yksinkertaisen simulointimallin syytä.

Jos hajautetun virtausakun putkiverkostoa verrataan kaukolämpöverkoston vastaavaan, havaitaan että kaukolämpöverkoston energiansiirtokapasiteetti on huomattavasti suurempi.

tavasti kortteliakkua parempi. Tutkitulla Kalasataman korttelialueella kaukolämpöä toimitetaan yhteensä kuuteen kerrostaloon. Tilavuudeltaan vastaavanlainen hajaute-
 tun virtausakun verkosto kattaa simulointitulosten perusteella vain kohtalaisesti yh-
 den kerrostalon päivittäisen energiantarpeen. Kasvattamalla varastointikapasiteettia
 saadaan luonnollisesti kasvatettua myös aurinko-osuutta ja kaiken kaikkiaan paran-
 nettua energian saatavuutta. Parhaimmillaan energiajärjestelmän koon kasvaessa
 noin puolet kerrostalon A tehontarpeesta voidaan ottaa kortteliakusta.

Hajautetun kortteliakun tapauksessa on epäedullista, että aurinko paistaa vain
 muutaman tunnin vuorokaudesta, kun energiankulutusta on kuitenkin vuorokauden
 ympäri. Tämän tarkastelun nojalla hajautettu virtausakku ei sovellu uusiutuvan
 energian kausivarastoksi. Ilman energiantuotantoa täyteen varatun kortteliakun
 kapasiteetti riittää noin kahdeksan tunnin ajaksi kerrostalon A kulutustarpeeseen.
 Hajautettua energiajärjestelmää voi siten parhaiten hyödyntää lyhytaikaiseen varas-
 tointiin ja energian fyysiseen siirtämiseen. Sähkövarastoa täytyisi kuitenkin ladata
 säännöllisesti, jotta sen käyttöastetta voitaisiin parantaa esimerkiksi talvella.

Kortteliakun avulla on mahdollista ylläpitää energiankulutusta esimerkiksi säh-
 kökatkojen aikana sekä reagoida äkillisiin ja lyhytaikaisiin verkon häiriöihin, jos
 akussa on kapasiteettia jäljellä. Hajautetun virtausakun käyttö vikasuojana vaatisi
 kuitenkin akun latauksen ja purkamisen optimoinnin, jolloin pelkkä aurinkosähkö ei
 riitä virtausakun lataamiseen.

7.2 Energiajärjestelmien suorituskyky - teho-optimointi

Huipunleikkauksen simulointi sekä hajautetulla virtausakulla että litium-ioni akulla
 osoittaa, että sähkövaraston varastointikapasiteetti ei riitä ajoittaisten tehopiikkien
 tasaukseen, mikäli akkua ladataan ainoastaan aurinkosähköllä. Litium-ioni akun
 varastointikapasiteetti on kuitenkin simulointitulosten perusteella riittävä kesällä, jo-
 ten akun lataus talvella sähköverkosta mahdollistaisi sähkövaraston ympärivuotisen
 käytön huipunleikkauksessa. Energiajärjestelmien simulointitulosten nojalla siten
 myös säästöt vuotuisissa energiakustannuksissa jäivät toteutumatta. Vuoden aika-
 na molemmilla teknologioilla huipunleikkaus aktivoituu sekä kesällä että ajoittain
 talvella, mutta huippukuormaa jää silti verkkoon päin, kun kaikkia tehopiikkejä ei
 pystytä tasoittamaan.

Voisi olettaa, että akkuun päin suuntautuvien tehopyyntöjen harventuessa akun
 kapasiteetti riittäisi paremmin. Tuloksista kuitenkin voidaan päätellä samoja asioita

kuin luvussa 7.1 on nostettu esiin, eli energiantuotannon satunnaisuus ja hajautetun virtausakun purkuhäviöt pienentävät merkittävästi energiajärjestelmän käytettävyyttä. Kesällä osasyynä litium-ioni akun parempaan käytettävyyteen on energiajärjestelmän rakentuminen keskitetysti, jolloin kulutushuiput voidaan leikata suoraan aurinkopaneelien tuottamalla sähköllä.

Energiajärjestelmän käyttöasteen parantaminen onnistuisi molempien tutkittujen akkuteknologioiden osalta, mikäli akkua ladattaisi lisäksi sähköverkosta. Ilman sähköverkon tukea akun varausasteen ylläpito on mahdotonta pimeinä kausina. Litium-ioni akun osalta pelkkä spot-hintaisen sähkön ostaminen todennäköisesti poistaisi simuloimalla havaitut ongelmat. Hajautetun virtausakun osalta siirtohäviöiden kompensoiminen vaatisi lisäksi energianvarastointikapasiteetin kasvattamisen. Simulointimallia olisi mielenkiintoista muokata siten, että akun lataaminen onnistuisi myös sähköverkosta, jolloin edellinen pohdinta energiajärjestelmien toiminnasta olisi mahdollista todentaa.

Hajautetun virtausakun varastointikapasiteetin kasvattaminen pakottaisi joko putkiverkoston kasvattamiseen tai ulkoisten elektrolyyttitankkien asentamiseen. Luvussa 5.7 taulukossa 5 on eritelty hajautetun virtausakun rakentamisesta ja käytöstä aiheutuvat kulut. Taulukosta nähdään, että putkiverkoston laajentamisesta aiheutuvat kulut kasvavat nopeasti per asennettu putkimetri. Yhteenvetona siten voidaan sanoa, ettei verkoston kokoa kannata kasvattaa, mikäli päämäärä on kulutuksesta aiheutuvien energiakustannusten leikkaus. Sähkönsiirto perinteistä sähköverkkoa pitkin on edelleen kustannusten kannalta kaikista kannattavinta.

Kuten kuvia 14 ja 17 vertaamalla havaitaan, vaatii hajautettu virtausakku vähintään energianvarastointikapasiteetin kaksinkertaistamisen, jotta suorituskyky ylittää kesäaikaan huipunleikkauksessa litium-ioni akun tasolle. Tämä on seurausta hajautetun virtausakun häviöistä ja hajautetun tuotannon sijainnista etäällä kulutuskohteesta.

Hajautetun virtausakun tuloksia parantaisi teknologian suurempi energiatiheys, jolloin pienempään tilavuuteen mahtuisi enemmän energiaa. Suurempi energiatiheys sallisi myös lataus- ja purkuvirtojen kasvattamisen, joka mahdollistaisi akun nopeamman lataamisen. Energiatiheyden kasvaessa vakiona pysyvien pumppaushäviöiden merkitys pienenesi akun hyötysuhteen kannalta.

7.3 Hajautetun ja keskitetyn energiajärjestelmän kustannukset

Hajautettu tuotanto tulee yleistymään tulevaisuudessa, kun isoja tuotantolaitoksia suljetaan muun muassa päästöpakotteiden takia. Hajautetussa tuotannossa on etunsa, mutta mikäli energiantuotanto on epäsäännöllistä, kannattaa hyödyn maksimoimiseksi järjestelmään integroida myös varastointikapasiteettia. Työn tulosten valossa on edelleen tehokkaampaa siirtää sähköä perinteisesti sähkönsiirtolinjoja pitkin. Sähkönsiirron häviöt ovat huomattavasti pienemmät kuin energian siirrossa nesteenä putkia pitkin.

Kustannusten osalta on vertailtu kolmea energiajärjestelmää; hajautettua virtausakkuja verrataan hajautettuun ja keskitettyyn litium-ioni akkujärjestelmään. Työstä tuttuun hajautettuun virtausakkuun verrataan hajautettua litium-ioni akkujärjestelmää, joka koostuu 12 kappaleesta 45 kWh:n sähköverkkoon kytkettyjä kiinteistökohtaisia akkuja. Toinen verrattava energiajärjestelmä on keskitetty litium-ioni akkujärjestelmä, missä yhteen kulutuskohteeseen on asennettu sähköverkkoon liitetty 540 kWh:n akku. Kustannusarviot on tehty taulukon 5 perusteella, jonka lisäksi 45 kWh:n litium-ioni akun osalta sähköliittymän hinta on arvioitu pienjänniteverkon 3x250 A sulakekoon mukaan ja arvona käytettiin 9 900 € [52].

Hajautetussa 45 kWh:n litium-ioni akun verkostossa kustannuksia aiheuttavina komponentteina huomioitiin akku, muuntaja sekä sähköliittymä. Keskitetylle korkeajänniteverkkoon kytketylle litium-ioni akulle lasketussa karkeassa arviossa otettiin huomioon samat komponentit kuin pienellekin hajautetulle litium-ioni akkujärjestelmälle. Hajautetun virtausakun osalta kustannusarvio muodostuu akusta, putkiverkostosta sekä pumpuista. Lisäksi hajautetun virtausakun kustannuksia on arvioitu ilman infrastruktuurin osuutta kustannuksiin. Luvussa 5.7 esitettyjen arvojen pohjalta on laskettu karkea kustannusarvio ja tulokset on raportoitu taulukkoon 11. Kustannuslaskennan erittely on liitteessä E.

Litium-ioni akuille karkea arvio hankintakustannuksille on, että 1 MW:n kapasiteetti maksaa miljoona euroa, joka vastaa hyvin laskennan tulosta. Kustannusarvioista havaitaan, että keskitetty litium-ioni akku on edullisin ja hajautettu pien-litium-ioni akkujärjestelmä on samassa hintaluokassa. Mikäli hajautetun pien-litium-ioni akun kulutuskohteiden sulakekokoa olisi mahdollista pienentää, laskisivat energiajärjestelmän hankintakustannukset hieman. Sulakekoon pienentämisellä on siis mahdollista

Taulukko 11. Akkujärjestelmien kustannusvertailu hankinta- ja asennuskustannusten osalta.

Energiajärjestelmä	PV kapasiteetti (kW)	Akkujen määrä	Akun energia- kapasiteetti (kWh)	Kustannukset M€
Hajautettu litium	60	12	45	0,66
Keskitetty litium	340	1	540	0,51
Hajautettu virtausakkuverkosto	340	2*	540	3,7
Hajautettu virtausakku	340	1*	540	0,30

*kennopinoa

säästää energiakustannuksissa, joka tukisi kiinteistöjen päätöstä sähkövaraston hankkimiselle. Tutkimuksen nojalla säästöjä kustannusten osalta saataisiin kuitenkin vain litium-ioni akun osalta.

Hajautettu virtausakku on selkeästi kallein, mutta mikäli kaukolämpöverkoston käyttäminen energian siirtoon nykyisessä muodossa olisi mahdollista, putoaisivat hajautetun virtausakun kustannukset monta kymmenystä. Hajautetun virtausakun suurimmat kustannukset muodostuvat putkiverkoston rakentamisesta. Hajautettu virtausakku näyttäisi houkuttelevalta litium-ioni akkuihin verrattuna, mikäli infrastruktuuri siirron osalta olisi valmiina.

8 Päätäntö

Tässä työssä tutkittiin hajautetun virtausakun avulla toteutettua energiajärjestelmää, jota mallinnettiin Matlab-simulointimallilla. Tutkimuksen kohteiksi valittiin uusiutuvan energian käytettävyys ja kulutuskohteiden teho-optimointi huipunleikkauksessa. Hajautetun virtausakun suorituskykyä verrattiin tapauskohtaisesti litium-ioni akkuun, jonka lisäksi energiajärjestelmien hankintakustannuksia verrattiin.

Hankintakustannusten osalta hajautettu virtausakku on kallein vertailluista akkujärjestelmistä. Jos energiansiirtoverkoston voidaan käyttää kaukolämpöverkoston, putoavat hajautetun virtausakun hankintakustannukset niin paljon, että myös virtausakkuteknologialla olisi mahdollista kilpailla litium-ioni akkuteknologian kanssa. Kaukolämpöverkoston käyttö virtausakun elektrolyytin siirrossa ei kuitenkaan nykyisellä teknologialla onnistu, joten litium-ioni akku on ylivoimaisesti kustannustehokkain sähkövarasto sekä sähköverkon tueksi että kulutuskohteisiin.

Hajautetun virtausakun elektrolyytin energiatihedden paraneminen parantaisi energiajärjestelmän toimintavarmuutta ja kasvattaisi sähkövaraston käyttöastetta. Nykyisellä vanadiini-virtausakkuteknologialla elektrolyytin vanadiinikonsentraatio rajoittaa energiatihedyyttä ja siten energianvarastointikapasiteettia. Nykyisillä virtausakkuteknologioilla jo 540 kWh:n kortteliakun kapasiteetin rajat tulevat vastaan simulointitulosten perusteella. Teknologiakehityksellä ja elektrolyytin parantelulla saisi kasvatettua elektrolyytin konsentraatiota, jolloin samaan tilavuuteen olisi mahdollista varastoida enemmän energiaa.

Sähkövaraston lataaminen uusiutuvilla energialähteillä ei kata koko vuoden sähkön kulutustarvetta. Energian tuottamiseen tarvitaan aurinko- ja tuulisähkön lisäksi muitakin energialähteitä. Kuluttajalle toimintavarman energiajärjestelmän toteuttaminen vaatii siten edelleen toimivan sähkönsiirtoverkoston. Sähkönsiirtoverkoston avulla voidaan joko ladata sähkövarastoja tai syöttää suoraan kulutushetkellä tarvittava energia kulutuskohteisiin. Spot-hinnan avulla optimoitu energiankulutus parantaa yhdessä litium-ioni sähkövaraston kanssa kustannustehokkuutta.

Vaikka tutkimuksen alkuolettaimus oli, että hajautetun energiajärjestelmän elektrolyytin volyyymi mahdollistaisi toimintavarman ja luotettavan energiaverkoston,

törmätään tuloksia tarkasteltaessa jatkuvasti siihen, ettei akun varastointikapasiteetti riitä. Elektrolyytin lisääminen kasvattaa energianvarastointikapasiteettia, joka on paljon puhuttu virtausakkujen etu. Se on myös hajautetun akun tapauksessa sovelluksen kompastuskivi, sillä isomman tilavuuden siirtäminen kuluttaa enemmän pumppausenergiaa ja siten pienentää akusta saatavilla olevaa energiakapasiteettia.

Tulevaisuudessa olisikin tärkeää nähdä kehitystä energianvarastointikapasiteetin osalta. Virtausakkuteknologia on kestävä kymmenientuhansien lataus-purkusykliden teknologia, mutta sen toimintavarmuudessa on vielä parantamista. Energiatiheyden tulisi kahdeksankertaistua, jotta teknologian energianvarastointikyky olisi kilpailukykyinen litium-ioni akkuteknologian kanssa. Tutkimus kuitenkin osoittaa, että jo alle nelinkertaisella energiatiheydellä hajautettu kortteliakku pystyisi parantamaan aurinko-osuutta yli kymmenen prosenttia ja leikkaamaan huippukuorman yhden kerrostalon kulutuksesta kaikkina muina aikoina paitsi talvella.

Hajautetun energiajärjestelmän tutkimus oli kapea katsaus kahden toiminnallisuuden toteuttamiseksi hajautetulla virtausakkuteknologialla. Tuloksien nojalla on järkevää odottaa teknologian kehitystä, ennen kuin tutkittu energiajärjestelmä kannattaa niin hyötysuhteen kuin kustannustenkaan osalta. Suomen toimintavarmojä lämmön- ja sähkönsiirtoverkostoja ei siis kannata ryhtyä korvaamaan. Rinnakkaista siirtomenetelmää kannattaa tulevaisuudessa vielä punnita uudelleen, vaikka virtausakkuteknologioiden osalta saavutettaisiinkin riittävän kypsä sovellus.

Tutkimusta olisi mielenkiintoista jatkaa järjestelmän skaalautuvuuden osalta. Tutkimuksessa tarkasteltiin ainoastaan energianvarastointikapasiteetin osalta eri järjestelmäkokoja. Jatkossa mallia voisi kuitenkin laajentaa suuremman alueen ja kulutustarpeen tarkasteluun. Lisäksi työstä rajattu lämmönsiirron mahdollisuus olisi mielenkiintoinen tutkimuskohde. Mikäli tulokset osoittaisivat lämmönsiirron mahdolliseksi, toisi se merkittävän lisäarvon hajautetulle virtausakulle. Tutkimuksen tarpeisiin tehty simulointimalli on yksinkertainen ja sen laajentaminen ja tarkentaminen on täysin mahdollista jatkotutkimuksia ajatellen.

Lähteet

- [1] Helen Oy. *Ilmasto vaikutukset*. 2016. URL: <https://www.helen.fi/helen-oy/vastuullisuus/hiilineutraali-tulevaisuus/ilmastovaikutukset/> (viitattu 29.06.2016).
- [2] Motiva Oy. *Bioenergian käyttö*. 2016. URL: http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/bioenergia/bioenergian_kaytto (viitattu 29.06.2016).
- [3] VTT. *Future energy systems*. 2015. URL: <http://www.vttresearch.com/services/low-carbon-energy/future-energy-systems> (viitattu 11.07.2016).
- [4] C. Pieper ja H. Rubel. "Revisiting Energy Storage There Is a Business Case". *The Boston Consulting Group* (2011), s. 1–19. URL: <http://www.bcg.com/documents/file72092.pdf>.
- [5] G. Kear, A. A. Shah ja F. C. Walsh. "Development of the all-vanadium redox flow battery for energy storage: a review of technological, financial and policy aspects". *Journal of Energy Research* 36 (11 2011), s. 1105–1120. DOI: 10.1002/er.1863.
- [6] X. Ke et al. "Flow distribution and maximum current density studies in redox flow batteries with a single passage of the serpentine flow channel". *Journal of Power Sources* 270 (2014), s. 646–657. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.07.155.
- [7] S. Roe, C. Menictas ja M. Skyllas-Kazacos. "A High Energy Density Vanadium Redox Flow Battery with 3 M Vanadium Electrolyte". *Journal of The Electrochemical Society* 163 (1 2016), A5023–A5028. DOI: 10.1149/2.0041601jes.
- [8] F. Rahman ja M. Skyllas-Kazacos. "Vanadium redox battery: Positive half-cell electrolyte studies". *Journal of Power Sources* 189 (2009), s. 1212–1219. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2008.12.113.
- [9] P. Leung et al. "Progress in redox flow batteries, remaining challenges and their applications in energy storage". *RSC Advances* 27 (2012), s. 10125–10156. DOI: 10.1039/c2ra21342g.

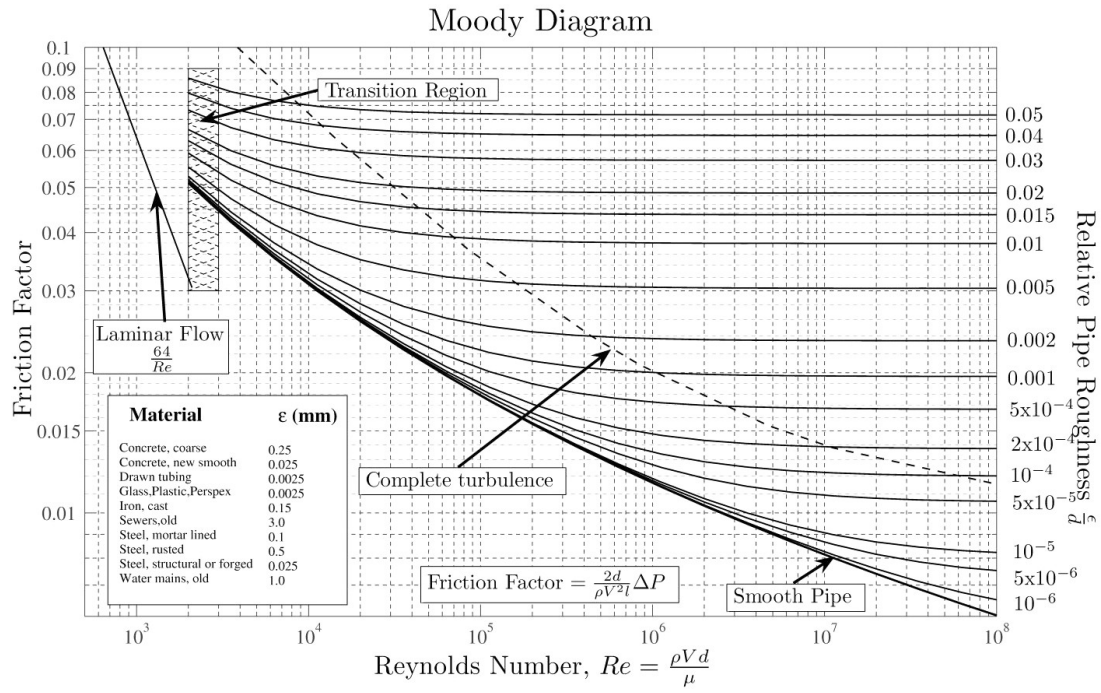
- [10] P. C. Butler et al. *Zinc/Bromine Batteries*. Sandia Report SAND2000-0893. Sandia National Laboratories, 2000.
- [11] B. Li et al. "Ambipolar zinc-polyiodide electrolyte for high energy density aqueous redox flow battery". *Nature Communications* 6.6303 (2015), s. 1–8. DOI: 10.1038/ncomms7303. URL: <http://www.nature.com/ncomms/2015/150224/ncomms7303/full/ncomms7303.html> (viitattu 29.02.2016).
- [12] M. L. Perry. "Expanding the chemical space for redox flow batteries". *Science* 349 (6255 2015), s. 1452. DOI: 10.1126/science.aad0698.
- [13] D. Lloyd et al. "Preparation of a cost-effective, scalable and energy efficient all-copper redox flow battery". *Journal of Power Sources* 292 (2015), s. 87–94. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.04.176.
- [14] C. E. Scotland. *Gigha Battery Project*. 2015. URL: <http://www.communityenergyscotland.org.uk/gigha-battery-overview.asp> (viitattu 27.01.2016).
- [15] UniEnergy Technologies. *UniEnergy Technologies Strategic Partner to Deliver World's Largest Battery*. Tekninen raportti. UET UniEnergy Technologies, 2016. URL: <http://www.vanadispower.com/resources/Press+release++UET+Strategic+Partner+to+Deliver+World's+Largest+Battery+05312016.pdf> (viitattu 12.07.2016).
- [16] SVT. *Asumisen energiankulutus*. 2014. URL: http://www.stat.fi/til/asen/2014/asen_2014_2015-11-20_tie_001_fi.html (viitattu 03.02.2016).
- [17] SVT. *Energia*. 2015. URL: http://tilastokeskus.fi/tup/suoluk/suoluk_energia.html (viitattu 04.02.2016).
- [18] J. Elovaara ja L. Haarla. *Sähköverkot 1*. 1. painos. Otatieto, 2011.
- [19] Energiateollisuus ry. *Sähkön keskeytystilasto 2014*. 2015. URL: <http://energia.fi/julkaisut/sahkon-keskeytystilasto-2014> (viitattu 09.03.2016).
- [20] Energiateollisuus ry. *Kaukolämpöjohtojen suunnittelu- ja rakentamisohjeet*. Suositus L11. Energiateollisuus ry, 2013. URL: http://energia.fi/sites/default/files/images/suositusl11_2013_kl-johtojen_suunnittelu_ja_rakentamisohjeet.pdf (viitattu 13.01.2016).
- [21] Energiateollisuus ry. *Kaukolämpöverkko*. Tekninen raportti. Energiateollisuus ry, 2015. URL: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/kaukolampo-ja-kaukojaahdytys/kaukolampoverkko> (viitattu 03.02.2016).

- [22] Energiateollisuus ry. *Kaukolämmön kiertoveden käsittely*. Suositus KK3. Energiateollisuus ry, 2007. URL: http://energia.fi/sites/default/files/suosituskk3_2007.pdf (viitattu 03.02.2016).
- [23] Energiateollisuus ry. *Kaukolämmön käyttotaloudelliset tunnusluvut 2014*. Tekninen raportti. Energiateollisuus ry, 2015. URL: http://energia.fi/sites/default/files/images/kayttotaloudelliset_tunnusluvut_2014.pdf (viitattu 09.03.2016).
- [24] T. Viander. ”Kaukolämpöverkon käytön optimointi”. Diplomityö. Lappeenranta teknillinen yliopisto, 2014.
- [25] Energiateollisuus ry. *Kaukolämmön toimintaperiaate*. URL: <http://energia.fi/koti-ja-lammitys/kaukolammitys/toimintaperiaate> (viitattu 09.03.2016).
- [26] IEA-ETSAP ja IRENA. *Electricity Storage Technology Brief*. Tekninen raportti. The International Renewable Energy Agency, 2012. URL: <https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA-ETSAP%20Tech%20Brief%20E18%20Electricity-Storage.pdf> (viitattu 12.07.2016).
- [27] Tesla Motors. *Tesla Powerwall*. 2016. URL: <https://www.teslamotors.com/powerwall> (viitattu 09.03.2016).
- [28] Mercedes-Benz. *Mercedes-Benz Energy Storage*. 2016. URL: <https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/next/connectivity/mercedes-benz-energystorage/> (viitattu 03.07.2016).
- [29] BYD Company. *BYD Mini Energy Storage*. 2016. URL: <http://www.byd.com/energy/mini.htm> (viitattu 03.07.2016).
- [30] Redflow Limited. *ZBM2 – 10KWH FLOW BATTERY*. 2015. URL: <http://redflow.com/products/redflow-zbm-2/> (viitattu 12.07.2016).
- [31] Aquion. *The Aspen Battery Series*. 2016. URL: <http://aquionenergy.com/businesses-utilities/maintenance-free-battery/> (viitattu 12.07.2016).
- [32] American Vanadium Corp. *Technical data*. 2016. URL: <http://www.americanvanadium.com/cellcube-technical-data.php> (viitattu 09.03.2016).
- [33] Pöyry. *Kotkan kaupunki-uusiutuvan energian kuntakatselmus -projekti*. Tekninen raportti. Pöyry, 2014. URL: http://www.kotka.fi/instancedata/prime_product_julkaisu/kotka/embeds/kotkawwwstructure/24039_KatariinanAkkuJulkinen.pdf (viitattu 21.03.2016).

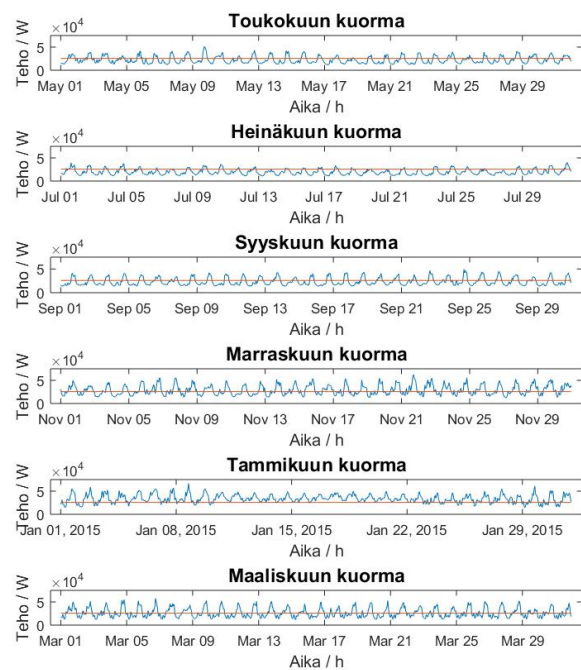
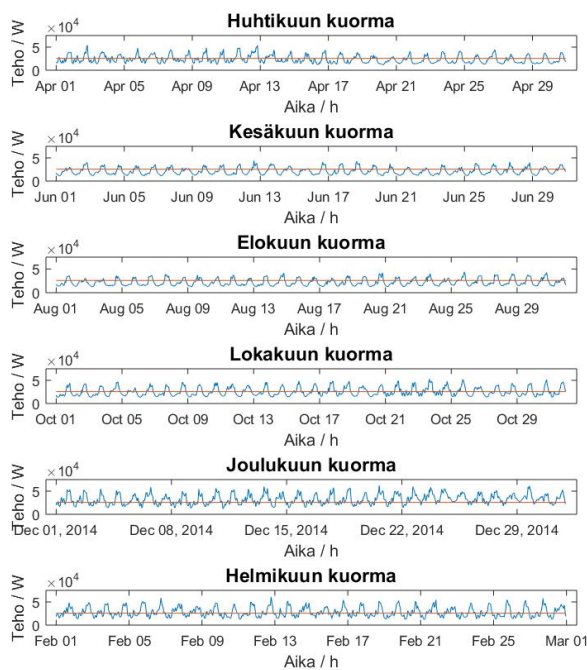
- [34] Helen Oy. *Uusi kaukolämpöennätys tehtiin Helsingissä*. 2016. URL: <https://www.helen.fi/uutiset/2013/helsingin-energialle-kansainvalinen-ymparistopalkinto/> (viitattu 12.07.2016).
- [35] Energiateollisuus ry. *Kaukolämpövuosi 2015*. Tekninen raportti. Energiateollisuus ry, 2016. URL: http://kaukolampoekstra.fi/sites/kaukolampoekstra.fi/files/documents/Kaukol%C3%83%C2%A4mp%C3%83%C2%B6vuosi_2015_20160113.pdf (viitattu 12.07.2016).
- [36] Helen Oy. *Helsingin Energialle kansainvälinen ympäristöpalkinto*. 2013. URL: <https://www.helen.fi/uutiset/2013/helsingin-energialle-kansainvalinen-ymparistopalkinto/> (viitattu 12.07.2016).
- [37] IEA-ETSAP ja IRENA. *Thermal Energy Storage Technology Brief*. Tekninen raportti. The International Renewable Energy Agency, 2013. URL: <https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA-ETSAP%20Tech%20Brief%20E17%20Thermal%20Energy%20Storage.pdf> (viitattu 09.03.2016).
- [38] Q. Xu, T. Zhao ja P. Leung. "Numerical investigations of flow field designs for vanadium redox flow batteries". *Applied Energy* 105 (2013), s. 47–56. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.12.041.
- [39] S. König, M. Suriyah ja T. Leibfried. "Model based examination on influence of stack series connection and pipe diameters on efficiency of vanadium redox flow batteries under consideration of shunt currents". *Journal of Power Sources* 281 (2015), s. 272–284. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2015.01.119.
- [40] K. Knehr ja E. Kumbur. "Open circuit voltage of vanadium redox flow batteries: Discrepancy between models and experiments". *Electrochemistry Communications* 13.4 (2011), s. 342–345. DOI: 10.1016/j.elecom.2011.01.020.
- [41] A. Shah, M. Watt-Smith ja F. Walsh. "A dynamic performance model for redox-flow batteries involving soluble species". *Electrochimica Acta* 53.27 (2008), s. 8087–8100. DOI: 10.1016/j.electacta.2008.05.067.
- [42] M. Skyllas-Kazacos ja C. Menictas. "The Vanadium Redox Battery for Emergency Back-Up Applications". *Telecommunications Energy Conference* (1997), s. 463–471. DOI: 10.1109/INTLEC.1997.645928. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=645928> (viitattu 22.03.2016).

- [43] M. Tang. *Lecture 5: Voltage Drops*. Lecture notes. Battery Technologies ja Markets, 2010.
- [44] Helen Oy. *Aurinkovoimalan tuotantotiedot*. 2016. URL: <https://www.helen.fi/sahko/kodit/aurinkovoimalat/suvilahti/> (viitattu 16.03.2016).
- [45] F. M. White. *Fluid Mechanics*. 7. painos. McGraw-Hill, 2011.
- [46] Euroheat & Power. *Kaukolämpö ja PUR-eristetyt putkistot*. Hinnasto. Euroheat & Power, 2015.
- [47] TUKES. *Vaarallisten kemikaalien varastointi*. Opas. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, 2015.
- [48] V. Viswanathan et al. *National Assessment of Energy Storage for Grid Balancing and Arbitrage, Phase II, Volume 2: Cost and Performance Characterization*. Tekninen raportti. The Pacific Northwest Laboratory, 2013. URL: http://energyenvironment.pnnl.gov/pdf/National_Assessment_Storage_PHASE_II_vol_2_final.pdf (viitattu 15.03.2016).
- [49] Lahti Energia. *Liittymismaksut 1.1.2010 alkaen*. 2010. URL: <http://www.lahtienergia.fi/sahkon-siirto/palvelut-ja-hinnastot/liittymismaksut-keski-ja-suurjaenniteverkossa> (viitattu 13.07.2016).
- [50] Keuruun kaupunki. *Verkkotöiden kustannuslaskenta*. 2014. URL: <https://www.keuruu.fi/ptk/kokous/20142306-5-3.PDF> (viitattu 13.07.2016).
- [51] Helsingin kaupunki. *Perustietoa / Karttoja ja aikatauluja*. 2013. URL: <http://www.uuttahelsinki.fi/fi/kalasadama/perustietoa/karttoja-ja-aikatauluja> (viitattu 13.07.2016).
- [52] Lahti Energia. *Liittymismaksut 1.1.2010 alkaen*. 2010. URL: <http://www.lahtienergia.fi/sahkon-siirto/palvelut-ja-hinnastot/liittymismaksut-pienjaenniteverkossa> (viitattu 15.07.2016).

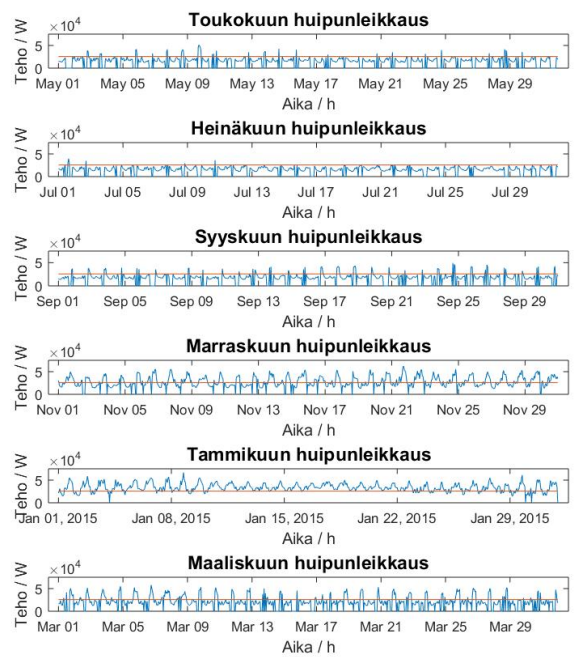
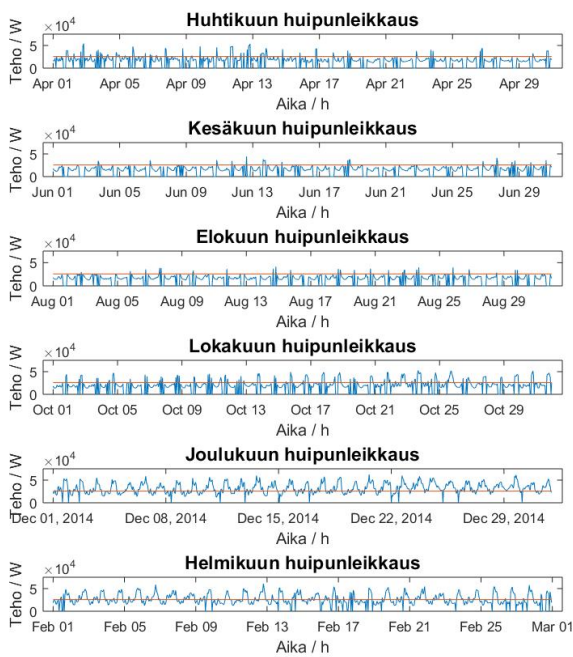
A Moodyn taulukko



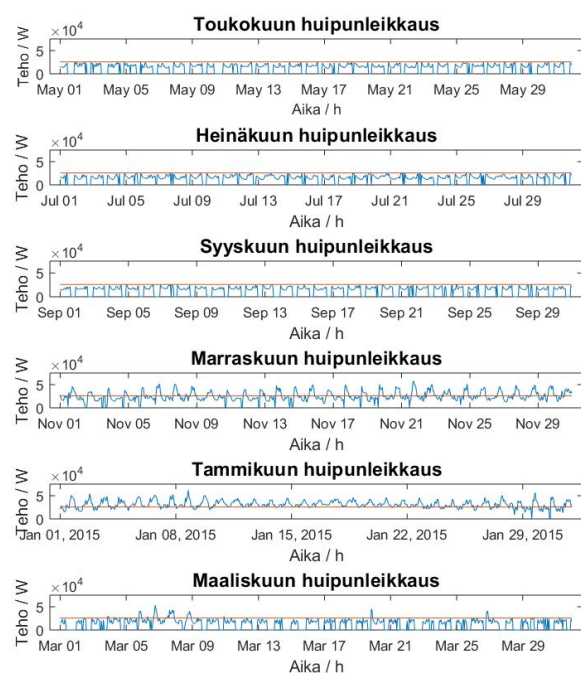
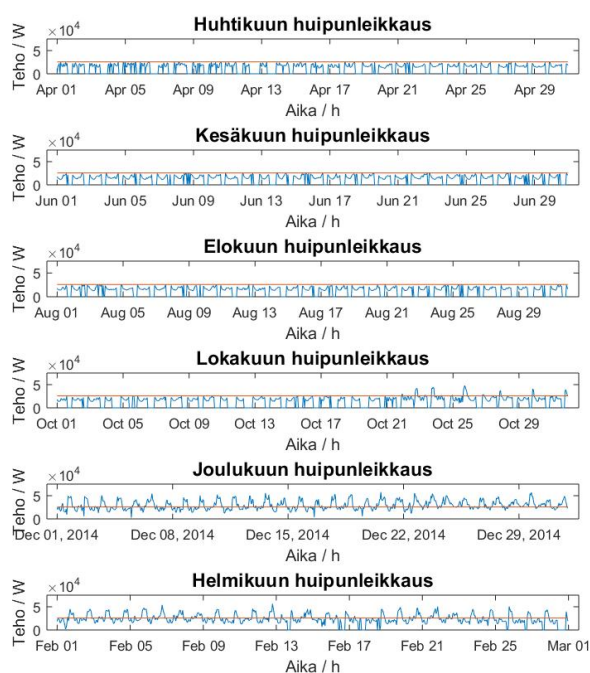
B Kerrostalon kulutusprofiilin kuukausierittely



C 540 kWh hajautetun virtausakun yhden kerrostalon kuorman huipunleikkauksen kuukausierittely



D 540 kWh litium-ioni akun yhden kerrostalon kuorman huipunleikkauksen kuukausierittely



E Akkujärjestelmien kustannusarviot M

Hajautettu pienistä 45 kWh litium-ioni akkuyksiköistä koostuva energiajärjestelmä Hajautetun litium-ioni akun kustannukset on laskettu perustuen energiakapasiteettiin (12x45 kWh), sähköliittymän tehoon (pienjännite 3x250A) [52] sekä muuntajaan (100-160 kVA) [50]:

$$M = 12 \cdot (45 \text{ kWh} \cdot 899 \text{ e/kWh} + 9900 \text{ e} + 4920 \text{ e}) = 663300 \text{ e}. \quad (31)$$

Keskitetty litium-ioni akku Keskitetyn litium-ioni akun kustannukset on laskettu perustuen energiakapasiteettiin (540 kWh), sähköliittymän tehoon (keskijännite $e/\text{kVA} + e$) [49] sekä muuntajaan (200 kVA) [50]:

$$M = 540 \text{ kWh} \cdot 899 \text{ e/kWh} + 200 \text{ kVA} \cdot 45 \text{ e/kVA} + 8000 \text{ e} + 6450 \text{ e} = 508910 \text{ e}. \quad (32)$$

Hajautettu virtausakku verkosto Hajautetun virtausakkuverkon kustannukset on laskettu perustuen energiakapasiteettiin (540 kWh) [48], rakennettavan putkiston pituuteen (3580 m) sekä pumppuihin (x2):

$$M = 540 \text{ kWh} \cdot 193 \text{ e/kWh} + 3580 \text{ m} \cdot 1000 \text{ e/m} + 2 \cdot 2000 \text{ e} = 3688220 \text{ e}. \quad (33)$$

Kennopinon avulla virtausakku verkostoon liittyminen Jos hajautettu virtausakkuverksoto olisi olemassa, pelkän kennopinon (x1) avulla energiajärjestelmään liittymisen kustannukset on laskettu perustuen akkujärjestelmän kustannuksiin, kuten kennopinoon (€/kW) sekä tarvittavan energian kustannuksiin (540 kWh) [48]:

$$M = 200 \text{ kW} \cdot 999 \text{ e/kW} + 540 \text{ kWh} \cdot 193 \text{ e/kWh} = 304020 \text{ e}. \quad (34)$$