



Benjam Seppänen

Sähkövarasto teollisuuskiinteistösä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Opinnäytetyö

22.5.2022

Tiivistelmä

Tekijä(t): Benjam Seppänen
Otsikko: Sähkövarasto teollisuuskiinteistössä
Sivumäärä: 31 sivua
Aika: 22.5.2022

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Sähkö- ja automaatiotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto: Sähkövoimatekniikka
Ohjaaja(t): Lehtori Jukka Karppinen

Tämän tutkimuksen aiheena oli perehtyä markkinoilta löytyviin teolliseen käyttöön suunniteltuihin litiumakkuihin, ja näiden kykyyn toimia huipputehonleikkaamisessa sähköliittymässä. Opinnäytetyö tehtiin toimeksiantona Solarvoima Oy:n tuotekehitykselle. Tavoitteena oli selvittää, mitä hyötyjä sähkövarastolla liittymään kytkettäessä on, sekä onko akusto taloudellisesti perusteltu investointi sähköä epätasaisesti kuluttavalle teollisuusyritykselle. Tutkimuksen painotus on huipputehonleikkauksen toteuttamisessa akuilla ja tämän teknisen toteutettavuuden sekä taloudellisen kannattavuuden tarkastelussa. Teknis- taloudellisen tarkastelun kohteena on pinnoitusalan yritys Alu-Relecon sähköliittymä Riihimäellä. Pilottikohteen viime vuosien sähkönkäyttöön perehdyttiin tuntitasolla. Kohteeseen valittiin huipputehonleikkaukseen soveltuva akusto, josta kannattavuuslaskelma tehtiin.

Pilottikohteen sähköliittymästä tehdyn selvityksen perusteella pelkästään akkujen huipputehonleikkauksen tuottamalla kustannussäästöillä ei investoinnista saada tässä ympäristössä mielekäästä. Työ osoittaa myös, että merkittävästi akuston kannattavuuden kohteessa vaikuttaa liittymän sähkönkäyttökäyttöjakauma, sopimuskohtainen yö- ja päivänsähkön hintaero, omatuotannon varastointi, sekä akun mahdollisuus toimia säätöreservinä verkossa. Kolmea edellä mainittua ei oteta huomioon tämän työn kannattavuuslaskelmassa.

Avainsanat: sähkövarasto, huipputehonleikkaus, SoC, BMS, peak shaving

Abstract

Author(s): Benjam Seppänen
Title: Electricity storage in an industrial property
Number of Pages: 31 pages
Date: 22 May 2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Electrical and automation engineering
Specialisation option: Electrical power Engineering
Instructor(s): Jukka Karppinen Senior Lecturer

The purpose of this thesis was to concern lithium-ion batteries designed for commercial use on peak shaving. This thesis was made as an assignment to production development of Solarvoima Oy. Aim of this research was to investigate economical benefits of battery storage systems connected to industrial property. Main focus of this study was to investigate how capable are “on the market” battery management solutions on peak shaving, load forecasting and minimizing load peak charges.

Alu-Releco is a coating company located on Riihimäki. Their grid-connection point and hourly consumption data functions as a pilot on this techno-economic research. At the end, battery available on the market and suitable for the study was selected for profitability calculation.

As a result, this calculation on pilot case indicates, savings made only with peak shaving application may not arouse a wider interest. The work also shows that the profitability of the battery at the site is significantly affected by the distribution of the electricity consumption of the subscription, the difference in the price of night and day electricity per contract, storage of own production, and the battery's ability to act as a reserve in the grid. The last three above mentioned are not taken into account in the profitability calculation of this work.

Keywords: energy storage, battery, peak shaving, peak charge

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Akkujen käyttösovellukset	2
2.1	Taajuudensäätö ja kysyntäjousto	2
2.2	Varavoima	4
2.3	Uusiutuvan varastointi ja käytön optimointi	4
2.4	Kulutushuippujen leikkaus	6
3	Huipputeholeikkauksen perusteet	6
3.1	Akkujen ohjausmenetelmiä tehonleikkaukseen	7
3.2	Adaptiivinen malli	8
3.3	Dynamic Programming	8
3.4	MPC malli	10
4	<i>Peak shaving</i> kykyisiä akkuja markkinoilla	11
4.1	Tesvolt TS HV 70	11
4.2	Tesla Powerpack	13
4.3	BYD Battery Box Commercial	14
5	Case Alu-Releco	15
5.1	Pilottikohteen esittely	15
5.2	Sähkönkulutus ja kustannukset	16
5.3	Aurinkovoimala	18
5.4	Akusto huipputehonleikkaukseen	18
6	Pohdinta	23
	Lähteet	24

1 Johdanto

Tämän insinöörityön aiheen taustalla on kiinnostus sähköistyvään infrastruktuuriin, sähköenergian varastointiin, akustojen ohjausjärjestelmiin ja niiden kehitykseen. Opinnäytetyön toimeksiantaja on Solarvoima Oy, jonka asiakkaiden keskuudessa yleinen kiinnostus akkuja kohtaan on myös kasvanut viime aikoina vahvasti. Energian kustannusten nousu ja uusiutuvien kasvava osuus sähköntuotannossa ovat asioita, jotka linkittyvät usein keskusteluun akuista. Uusiutuvilla katettu sähköntuotanto on sää- riippuvaisempaa ja vaatii rinnalleen eri tavoin säätövoimaa verrattuna perinteisiin energiantuotantotapoihin.

Business Finland avasi tänä keväänä rahoitushaun akkuteollisuuden pilotti, demo- ja investointihankkeille [1]. Kantaverkkoyhtiö Fingrid haki viime keväänä pilottikohteita reservikäyttöön kerätäkseen tietoa erilaisista säätöratkaisuista [2]. Jo tätä taustaa vasten akut monipuolisine käyttösovellutuksineen on kiinnostava ja ajankohtainen aihe.

Tämä työ keskittyy teollisuuskäyttöön suunniteltujen litiumioniakkujen ja näiden ohjausjärjestelmien *Battery Management Systemin* eli BMS:n tutkimiseen ja näillä saavutettaviin kustannussäästöihin. Tutkimuksessa esitellään markkinoilta löytyviä valmiita akustoratkaisuja ja ohjausparametrejä näiden ohjausjärjestelmien taustalla. Selvitys painottuu erityisesti huipputehonleikkauksen toteutettavuuteen ja BMS:n kykyyn toimia luotettavasti vaihtelevien kulutushuippujen leikkauksessa. Taloudellisen kannattavuuden analyysi rajoittuu tässä työssä vain tutkittavan pilottikohteen Alu-Relecon käsittelyyn. Akuston myötä loppuasiakkaan mahdollista kykyä osallistua reservimarkkinalle ja taloudellisia hyötyjä tätä kautta ei tämän työn loppuosan kannattavuus selvityksessä käsitellä.

2 Akkujen käyttösovellukset

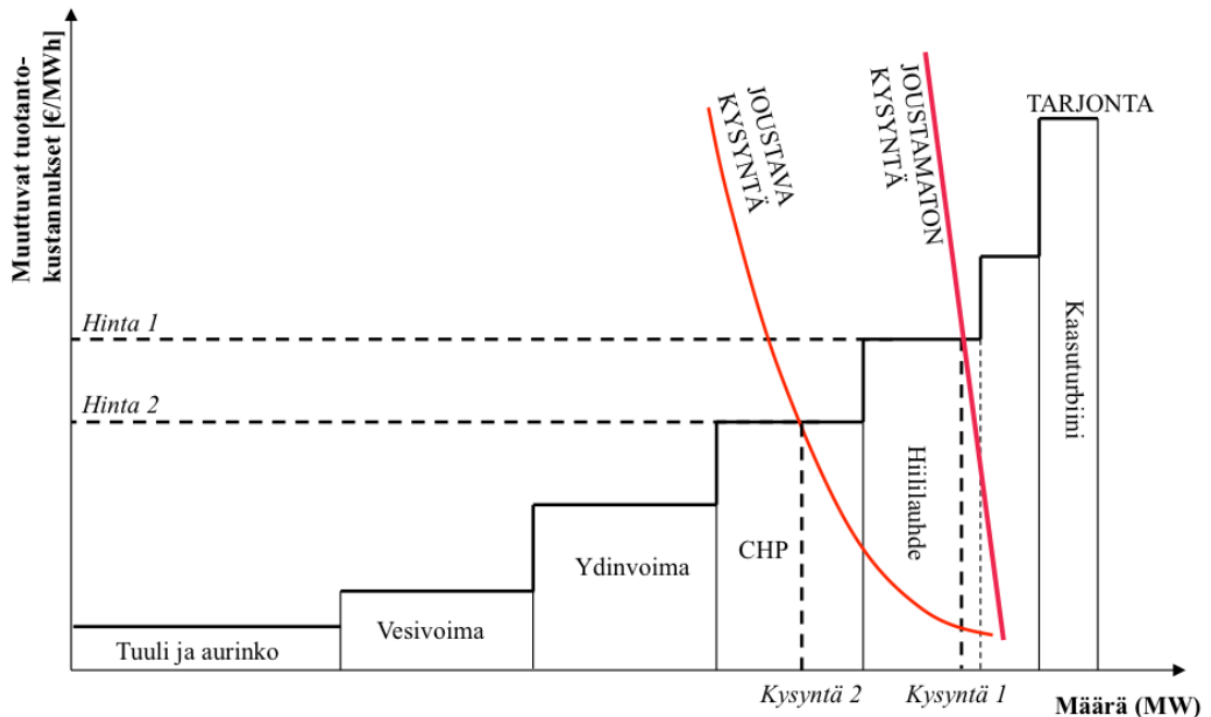
2.1 Taajuudensäätö ja kysyntäjousto

Sähköenergiaa taltioiva akku on parhaimmillaan nopeassa sähköverkon säädössä. Sähkövarastojen käytöstä taajuudensäädön tai kysyntäjouston sovelluksissa Suomessa vastaa Fingrid. Kulutuksen ja tuotannon välisestä tasapainosta kantaverkkoyhtiö huolehtii aktivoimalla säätötarjouksia ylläpitämiltään säätösähkömarkkinoilta.

Reservit ovat tuotantolaitoksen tai kulutusyksikön vapaata säätökykyistä pätötehokapasiteettia. Myös akku voi toimia reservinä. Suomessa sähköverkon taajuuden sallittu vaihtelumarginaali on 49,9 – 50,1 Hz. Kun kulutusta verkossa on enemmän kuin tuotantoa taajuus laskee. Vastaavasti kun tuotantoa on enemmän kuin kulutusta nousee taajuus yli 50 Hz:n. [3.] Suomessa sähkönkulutus on pääasiallinen jouston lähde [4]. Fossiilisilla polttoaineilla toimivista sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksista, lauhdevoimalaitoksia sekä kaasuturbiineista ollaan vaiheittain luopumassa, joka tarkoittaa, että perinteinen taajuudensäätökapasiteetti tulee vähenemään. [5.] Uusiutuvien energiantuotantomuotojen kasvaminen sähköntuotannossa on lisännyt sähköverkon hetkittäistä säätötarvetta. Tuuli- ja aurinkovoiman sääriippuvuus tekee nämä toimitusvarmuudeltaan epätasaiseksi verrattuna esimerkiksi ydinvoimaan [6]. Tilalle tarvitaan ratkaisuja tehotasapainon hallintaan. Suuret akut soveltuvat ominaisuuksiensa puolesta hyvin taajuuden säätöön. Ne voivat tuottaa, että ottaa tehoa verkosta. Akku kykenee reagoimaan muutoksiin nopeasti ja saatavaa tehoa ja tämän suuntaa voidaan säätää tarkasti. Vuoden 2020 lopussa Lappeenrannan Yliikkälässä käyttöön otettiin Pohjoismaiden suurin n. 30 mWh:n akku, joka palvelee säätöreservinä verkon vakauden varmistamiseksi. [7.]

Kysyntäjousto tarkoittaa ajoitettua sähkönkäytön siirtämistä korkean hinnan ja kulutuksen tunneilta edullisempaan ajankohtaan. Sähkön hinta markkinoilla määräytyy kulutuksen ja tuotannon perusteella osto- ja myyntitarjousten mukaan. Kuva 1 esittää, kuinka eri tuotantomuotojen välillä hinta vaihtelee. Kysyn-

täjoustosta hyötyvät kaikki sähkönkäyttäjät, kun joustavamman kysynnän ansiosta voidaan kulutusta siirtää edullisemmille tunneille. [8.]



Kuva 1. Joustava kysyntä mahdollistaa energian oston edullisempaan aikaan [8].

Teollisuudessa akkujen ja käyttöä kysyntäjoustossa taajuusohjattuna käyttöreservinä määrittelee Fingridin vaatimukset. Säädön vähimmäiskoko on 0,1 MW ja tämän tulee tunnin aikaikkunan sisällä pystyä yhtä suureen ylös ja alas säätöön. [10.] Teoreettisesti sähkövaraston tulisi olla vähintään 200 kWh, jotta se pystyisi 50 % varauksella tuottamaan 0,1 MW:n säädön vaadittuun suuntaan. Kuluttajapuolella omakotitalon pientuotanto ja sähkönkulutuksen säätely ulkoisen ohjauksen kautta voidaan luokitella kysyntäjoustoksi, mutta säätömarkkinoille ei sillä vielä ole Fingridin kokorajoitusten takia mahdollista liittyä. Pienempien sähkönkäyttäjien puolesta kauppa käyvät Aggregaattorit. Nämä yhdistävät useiden käyttöpaikkojen kulutuksia sekä varastointimahdollisuuksia suuremmaksi kokonaisuudeksi, jotta saadaan tarvittava kuorma tarjottavaksi markkinoille.

2.2 Varavoima

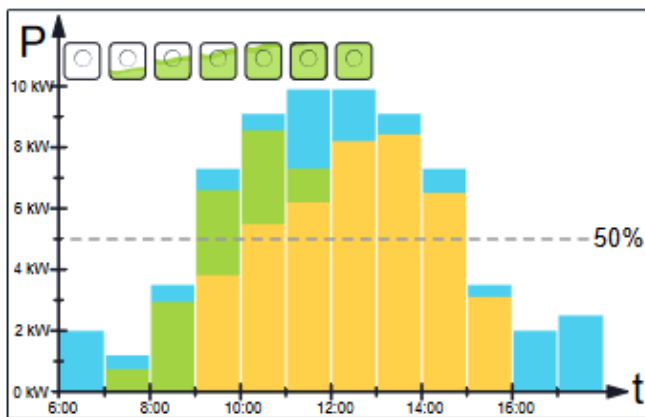
Jos sähkönsyöttö verkosta jostain syystä katkeaa, on monissa kriittisissä kohteissa saatava varavoimaa nopeasti käyttöön. Akun lisääminen sähköliittymään on edellytys saarekekäytön tai UPS-varavoiman toteuttamiseen [11]. Erilaisia akkuja hyödynnetään varavoimajärjestelmissä suurissa kohteissa, joissa energiansaanti on varmistettava kaikissa olosuhteissa. Varavoimaa edellyttäviä kohteita ovat mm. sairaalat, lääkintatilat, konesalit ja datakeskukset. Myös kotitalouksiin soveltuvia saarekekäytön mahdollistavia ”back-up” järjestelmiä löytyy jo markkinoilta kasvavissa määrin. Kotitalouksissa saarekekäytön mahdollistavaan kokonaisuuteen sisältyy usein myös aurinkopaneelit.

2.3 Uusiutuvan varastointi ja käytön optimointi

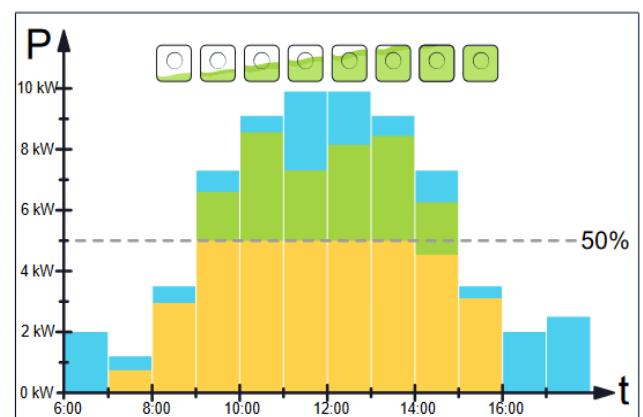
Sähkön varastoinnin kehityksen taustalla merkittävänä tekijänä on uusiutuviin energialähteisiin perustuvan tuotannon lisääntyminen. Sähkön omatuotanto aurinkopaneeleilla ei usein toteudu juuri silloin, kun sähköä eniten tarvitaan. Tällöin aurinkosähkön omakäyttöosuutta voidaan merkittävästi nostaa akuilla. Selkeä suunta on, että sähkö tuotetaan enenevässä määrin uusiutuvalla energialla ja hajautetulla tuotannolla [12]. Sähkön varastoinnin kehityksellä on Suomessa merkittävä rooli etenkin aurinko- ja tuulisähkön suuren kausivaihtelun takia. On tärkeää, että verkko kykenee reagoimaan nopeasti sähköntuotannon ja kulutustarpeen muutoksiin. Jos uusiutuvien suhteellista osuutta energiantuotannossa halutaan nostaa, on myös verkon säätökapasiteettia kasvatettava [13].

Sähkön varastointi akkuun on keskiössä myös ”Smart Grid” -ajattelussa ja sovellutuksissa. Smart Grid -verkolla tarkoitetaan älykästä sähköverkkoa, jossa kuormitusta, kulutusta ja varastointia voidaan hallita internetin välityksellä yhtenä kokonaisuutena. Kulutushuippuja pystytään tasaamaan kytkemällä esimerkiksi omakotitalon lämmitys tai sähköauton lataus pois päältä halutuksi ajaksi kulutushuipun tai epäedullisimman sähkönhinnan aikaan. [14.]

Energian käytön optimoinnissa aurinkosähkön rinnalla toimivan akuston algoritmi oppii ja ennustaa liittymän sähkönkäytön toteutumista, sähkön hintaa ja tulevaa sääennustetta. On maita, joissa on säädetty *feed-in limit*, joka tarkoittaa, että aurinkovoimala saa tuottaa ylituotannoksi verkkoon suurimmillaan tietyn määritellyn määrän tehoa. Esimerkiksi Saksassa tämä raja on 70 % asennetun voimalan nimellistehosta alle 30 kW:n aurinkovoimaloissa [15]. Tässä kohtaa akun älykäs sääennusteeseen pohjautuva latausalgoritmi astuu esiin ja akkua ladataan tasaisella kuormalla niin, että voimalan tehontuottoa ei tarvitse rajoittaa missään vaiheessa päivää. Alla olevat päiväkuvaajat esittävät, kuinka akun latausta voidaan optimoida, jos liittymässä on rajoitus suurimmasta sallitusta verkkoon syötetystä tehosta. Alla olevissa kuvaajissa (Kuvat 2 ja 3), keltainen esittää aurinkovoimalasta saatavaa tuottoa, sininen liittymän sähkönkäyttöä ja vihreä liittymän sähkönkäytön osuutta, joka menee akun lataamiseen.



Kuva 2 Akun ohjaus ilman säähajasta algoritmeja [16].



Kuva 3 Akun latauksen ohjaus sääennusteeseen pohjautuvasti [16].

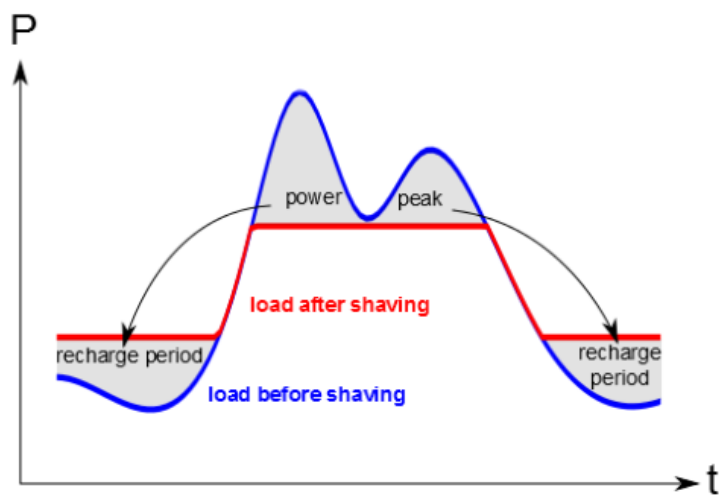
Kuvaajassa 2 näkyy aurinkovoimalan tuotot sekä akun latauskäyttäytyminen kun omatuotantoa on saatavilla ilman sääennustepohjaista ohjausta. Tässä esimerkissä *feed-in limit* on 5 kW, joka tarkoittaa että, tämän ylittävä tuotanto verkkoon on rajoitettava. Kuvassa 3 vastaava päivätuotanto, mutta akku latautuu vasta päiväaikaan, kun aurinkovoimalan tuotanto ylittää *feed-in limitin*. Tämä pohjautuu arvioon, että aurinkoenergiaa on saatavilla läpi päivän. Näin vältetään rajoittamasta tehoa, ja koko tuotanto saadaan talteen [16].

2.4 Kulutushuippujen leikkaus

Kulutushuippujen leikkaamista korvaavalla hetkellisesti muualta kuin sähköverkosta otetulla energialla kutsutaan *Peak Shaving*iksi. Sähkönkulutuksen kuukausittaisiin huipputehoihin perustuvat tehomaksut ovat useissa teollisuusliittymissä merkittävä osa energian kustannuksia. Oikein mitoitettulla akulla voidaan määrittää suurin sallittu sähköverkosta otettava teho ja tarpeen vaatiessa tämän ylittävä osa otetaan akuista. Toimiakseen luotettavasti kulutushuippujen rajaamisessa akustolta vaaditaan teknologiaa reagoida sekä suorituskykyä antaa tarvittava ulostuloteho ja tehoreserviä koko halutun kulutushuippujakson tai useamman ajalle.

3 Huipputeholeikkauksen perusteet

Huipputeholeikkauksella tavoitellaan säästöjä ensisijaisesti sähköliittymäkustannuksissa sekä tehomaksuissa. Suomessa Caruna Oy:n tehomaksut määräytyvät kuukausittaisen huipputehon mukaan. Pienjännitteellä tehomaksua veloitetaan vähintään 40 kW:n tehon, ja keskijännitteellä 200 kW:n tehon mukaan. Useilla sähkökäyttäjillä esimerkiksi teollisuudessa sähkönkulutus vaihtelee suuresti yhden päivän ja tunninkin sisällä. Tehomaksun mittausjakso on yksi tunti ja maksu määräytyy kuukausittaisen huipputehon mukaan. [17.] Tämä tarkoittaa, että sähkökäyttäjälle käy kalliiksi yksikin merkittävästi keskiarvokulutuksesta ylöspäin poikkeava tunti kuukaudessa. Kuvassa 4 esitetään huipputehonsaleikkauksen perusajatus. Akun ohjausjärjestelmään määritellään verkosta otetun tehon yläraja, jonka ylittyessä akku aktivoituu ja pyrkii pitämään verkosta otetun tehon rajan alapuolella. Kun taas liittymän sähkökäyttö on määritellyn minimitehon alapuolella, akkua ladataan.



Kuva 4 Akkua ladataan pienemmän energiantarpeen aikaan ja käytetään määritellyn yläajan ylityessä [17].

Sähköautojen suosion kasvaessa taloyhtiöt, liiketilat ym. investoivat latauspisteisiin, jotka teettävät merkittävää lisäkuormitusta mahdollisesti vuosikymmeniä sitten suunnitellulle kiinteistön sähköinfralle. Liittymäkoko on nopeasti rajoittava tekijä ja älykkäälle kuormanhallinnalle tai huipputeholeikkaukselle on tarvetta. Jotta akkujen turhaa kuluttamista ja kulutushuippujen leikkausta voidaan kannattavasti tehdä, vaatii se laitteistolta oikeita ohjausparametrejä. Haasteena on, että ei ole yhtä oikeaa ohjelmaa tai parametriä, joka kykenisi ennakoimaan tulevia sähkönkulutusjaksoja ja varmistumaan, että akun varaustasot ovat juuri vaaditulla tasolla kyseisen toteutuvan tehon kattamiseen. Jos akun purkua ohjaavana parametrinä on yksi kiinteä raja-arvo, ilmeinen riski on että akun varaustaso tyhjenee jo pienempiin raja-arvon ylittäviin tehopiikkeihin ja mahdollisesti tulevat suuremmat jäävät kokonaan kattamatta. [18.]

3.1 Akkujen ohjausmenetelmiä tehonleikkaukseen

Olemassa olevaa kirjallisuutta ja tutkimusta *peak shaving* -menetelmistä ja ohjausjärjestelmistä löytyy laajalti. Käyn läpi tässä osiossa lyhyesti muutamia valitsevia akuston ohjausperiaatteita. Akun ohjausjärjestelmästä käytetään yleisesti nimitystä *Battery Management System* (BMS). Ohjausjärjestelmän tarkoitus on säilyttää akku suorituskykyisenä mahdollisimman pitkään ja toimia luotettavasti vaadituissa tilanteissa. Yleisiä syötetietoja BMS järjestelmille ovat:

- reaaliaikainen sähkökäyttötieto liittymältä [kW]
- akuston varaustaso, akuston maksimikapasiteetti, kWh
- akuston varaustason ylä- ja alarajaarvot (SoC upper & lower limit)
- päivä, aika
- suurin sallittu ottoteho verkosta laskutuskauden ajalta + tehomaksun määräytymisperiodi.

3.2 Adaptiivinen malli

Adaptiivinen ohjausjärjestelmä kykenee itse uudelleen ohjelmoimaan toimintaansa perustuen esimerkiksi muuttuneeseen toimintaympäristöön tai tiettyjen säätöarvojen muutokseen. BMS -järjestelmässä näitä säätöarvoja eli syötetietoja voi olla esimerkiksi edellämainitut. [19.]

Jason Leadbetter ja kumppanit [19.] esittävät tutkielmassaan yksinkertaisen adaptiivisen mallin akuston purkuun, jossa käsitellään huipputehojen leikkausta asuintaloissa. Akuston purkuun raja-arvot eli *thresholdit* määriteltiin tutkittavan alueen asuinkiinteistöjen toteutuneista keskiarvokulutuksista. Tehontarpeen ylittyessä määritellyn *thresholdin* akustosta katetaan ylittävän tehontarpeen vaativa osuus. Tässä yhteydessä akkujen varaustason vaihtelevuus (State of Charge, SoC) rajattiin 15–85% akuston käyttöiän parantamiseksi. Akkujen lataus ajoitettiin yöaikaan, ja akuston purku päiväsaikaan, jos määritellyt ehdot liittymän tehonkulutuksessa eli ylempi *threshold* ylitetään. Tässä simulaatiossa huipputehoista pyrittiin leikkaamaan vain n. 1–2% osuuksia pois. Tässä tutkimuksessa ei otettu kantaa hankkeen taloudelliseen kannattavuuteen. [19.]

3.3 Dynamic Programming

A.Oudalov ja A. Beguin [21.] esittelevät tutkimuksessaan dynaamisen ohjelmointialgoritmin (DP) käyttöä kulutushuippujen leikkaamiseen. Tässä esityksessä määrittävänä tekijänä on akun varaustaso ja jokaisen akun lataus- ja pur-

kusyklin kustannus ja toteutettavuus. DP:n syöttöarvoja ovat; asiakkaan sähkökäyttödata. Esimerkiksi keskiarvio toteutuneesta historiasta tietyltä aikajännteeltä, energian ja tehomaksujen hinta sekä akun maksimi AC-ulostuloteho.

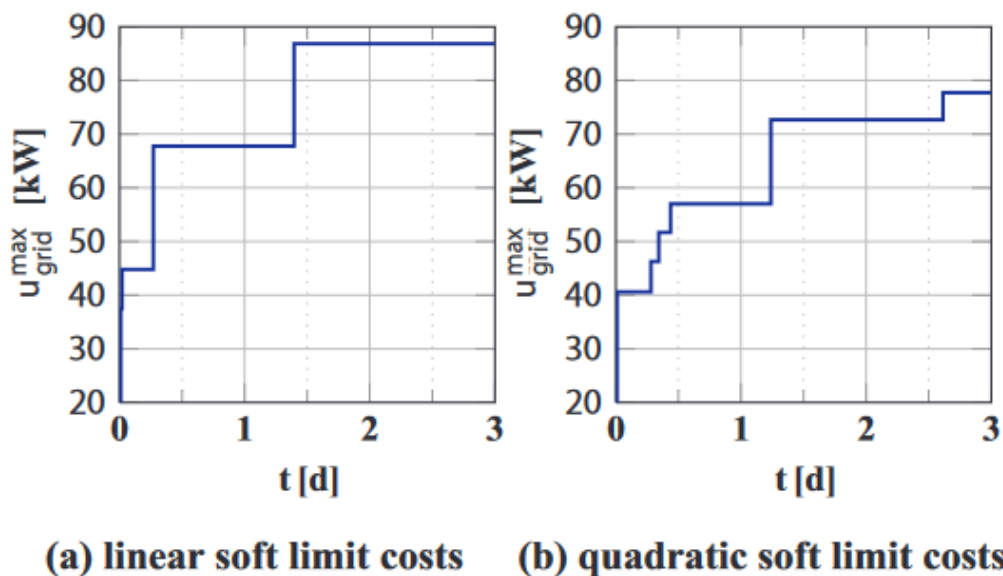
Dynaaminen ohjelmointialgoritmi määrittelee akun käyttöä ja laskee kaikki vaihtoehdot lataus- ja purkusekvenssit jokaisella tehonleikkaushetkellä. DP:n etuna on, että järjestelmä kykenee ottamaan huomioon akun fyysiset rajoitteet ja todennäköisemmin tunnistaa onko haluttu akun käyttötoimi mahdollinen tai kannattava toteuttaa. Jos esimerkiksi akun varauskyky ei riitä kattamaan tulevaa käyttöpiikkiä, järjestelmä arvioi kuinka paljon se pystyy kannattavasti tulevaa käyttöhuippua leikata. Edellä mainitun huipun leikkauksen toteuttamiseen vaikuttaa näin myös algoritmin luoma todennäköisyys tulevista sähkökäyttöpiikeistä. Kokeessa simulaatio luotiin todellisen teollisuuslaitoksen sähkönkulutusdataan perustuen.

Suurimmat ottotehot olivat luokkaa 1 mW. Sähkövaraston koko simulaatiossa oli 750 kWh ja suurin AC-teho 280 kW. Tällä mallinnuksella sähköenergian kustannukset laskivat 4 % vuodessa ja tehomaksut 8 %. Tarkemmasta taloudellisesta mielekkyydestä ja takaisinmaksuajasta ei ollut esitystä. [21.]

3.4 MPC malli

M. Koller ja kumppanit [17.] esittelevät MPC-ohjausjärjestelmään perustuvaa *peak shaving* -mallia. Model Predictive Control on ennakoivaa ohjausta tuottava monimuuttujaohjausarkkitehtuuri. Määritellyllä aikavälillä MPC-ohjain käyttää ohjelmaa ennustaakseen laitoksen tai tässä tapauksessa sähköliittymän tulevaa energiankäyttöä. Järjestelmän syöttöarvoja ovat mm. sähkönkulutusdata, sähkön hinta, tehomaksut, energian omatuotanto ja akun purkusyklin hinta akun suorituskyvyn säilymisen kannalta. Näiden perusteella ohjain laskee optimaaliset ohjaustoimenpiteet. Järjestelmässä saatavilla oleva tulevaisuuden sähkönkäyttöennuste sekä mahdollisen uusiutuvan energian tuotto-odote voidaan yhdistää palvelemaan akun taloudellisempaa toimintaa.

Tässä kokeessa MPC-kehys muodosti arvion Zurichissä sijaitsevan toimistorakennuksen tulevan päivän sähkönkäytöstä 15 minuutin aikaresoluution tarkkuudella. Järjestelmä "koulutettiin" vuoden aikaperiodin ajalle tämän rakennuksen 15 minuutin aikaprofiililla. Järjestelmään määritellään suurin sallittu ottoteho verkosta eli niin sanottu *Soft limit*. Järjestelmän merkittävä etu on siinä, että sähkönkäytön ylittäessä määritellyn *soft limitin*, se luo uuden ennen aikaresoluution päättymistä. Tämä tarkoittaa, että käytössä on määrittelemättömän iso ennustehorisontti, vaikka sähkönkulutushistoria onkin tietyn resoluution tarkkuudella tuotu ohjelmaan. Näin akun käyttöä voidaan tehostaa, sekä vältetään tulevien jo verkosta otetun kokoisten kulutuspiikkien kattaminen. [17.]



Kuva 5 Lineaariset akun purkauskustannukset minimoivat akun käyttöä, mutta kvadraaliset minimoivat akun käyttöä käytössä olevan ennustehorisontin yli [18].

4 Peak shaving -kykyä akkuja markkinoilla

4.1 Tesvolt TS HV 70

Tesvolt on saksalainen akkujärjestelmien kehittäjä ja valmistaja. Yhtiön tavoitteena on nettisivujen mukaan ytimekkäästi valmistaa niin kannattavia ja suorituskykyisiä akkujärjestelmiä kuin mahdollista [22].

Tesvolt TS HV 70 Lithium Storage System on litiumakkujärjestelmä, joka on suunniteltu käytettäväksi erityisesti teollisuuden eri sovellutuksiin. Yksi TS HV 70 -yksikkö on kapasiteetiltaan 67 tai 76 kWh, ja yksiköitä voi lisätä rinnakkain jopa 40. Näin akuston kokonaiskapasiteettia saadaan kasvatettua yli 3 MWh:n. TS HV -akustot eivät sisällä itsessään invertteriä, vaan Tesvoltin akkuvarastot ovat kehitetty yhteensopiviksi SMA:n Tripower Storage -inverttereiden kanssa. Maksimi AC-ulostuloteho yhdellä SMA STPS 60 invertterillä 75 kVa. Tesvoltin järjestelmän luvataan kestävän n. 8000 täyttä lataussykliä. Joka tarkoittaa, että koko akun kapasiteetti on käytettävissä pitkään. [22.]

TS HV 70 -akkujärjestelmän käyttösovellutuksia ovat; diesel hybrid järjestelmän yhdistäminen akkuun, Aika- ja sähköhintaperusteinen akuston lataus/purku, sää-olosuhdetta ennakoiva akuston lataus, huipputehonleikkaus, omatuotetun sähkön käytön optimointi, taajuuden ja loistehon säätö verkkoon [22].

Ohjausparametrit tehonleikkauksessa

Akuston ohjausjärjestelmästä voidaan asettaa suurin sallittu verkosta otettava teho (Peak power in W) sekä määrittää aikaperiodi, jonka perusteella huipputeholaskutus kyseisessä maassa toteutuu. Valikosta asetetaan myös ”Safety marginal in W”, joka määrittää akun käynnistymistä, kun ottoteho verkosta alkaa lähestyä asetettua peak shaving -rajaa. Tehonleikkauksen onnistumiseen vaikuttaa myös akun SoC -asetukset, joilla määritellään akun varaustasojen raja-arvot. *SoC limitit* ovat akun varaustasojen raja-arvoja, jotka esitetään prosentteina. Lower SoC limit ja on akun varauksen alaraja, jolloin akku jätetään pois toiminnasta, ja latautuu takaisin *Upper Soc Limitiin*. Kun akku saavuttaa ylemmän raja-arvon, se palaa stand by tilaan. [22.]

The screenshot shows a configuration window titled "Load-peakshaving" with a close button (X) in the top right corner. The window contains three main configuration sections, each with a label, an input field, and a warning message:

- Interval in min:** The input field contains the value "15". Below it, a warning message reads: "Please enter the interval (measurement period in minutes) of the registered power measurement. WARNING: The interval is a global parameter. Updating it will update the load-peakshaving interval for ALL strategies." A warning icon is present to the right of the input field.
- Peak power in W:** The input field contains the value "100000". Below it, a warning message reads: "Enter the initial upper threshold (maximal grid power) for the peak-shaver. This threshold will be adapted dynamically by the Energy Manager during operation. WARNING: updating the peak value is a global operation and will update the load-peak value for ALL strategies." A warning icon and a green checkmark are present to the right of the input field.
- Safety Margin in W:** The input field contains the value "2000". Below it, a warning message reads: "Please define a safety margin. Typically this should be 2% of the peak power." A warning icon and a green checkmark are present to the right of the input field.

At the bottom of the window, there are three buttons: "Confirm" (green), "Reset" (red), and "Cancel" (grey).

Kuva 6 Verkosta otettavan huipputehon ja tehomaksun hinnoitteluperiodin määrittäminen akun käyttöliittymässä [22].

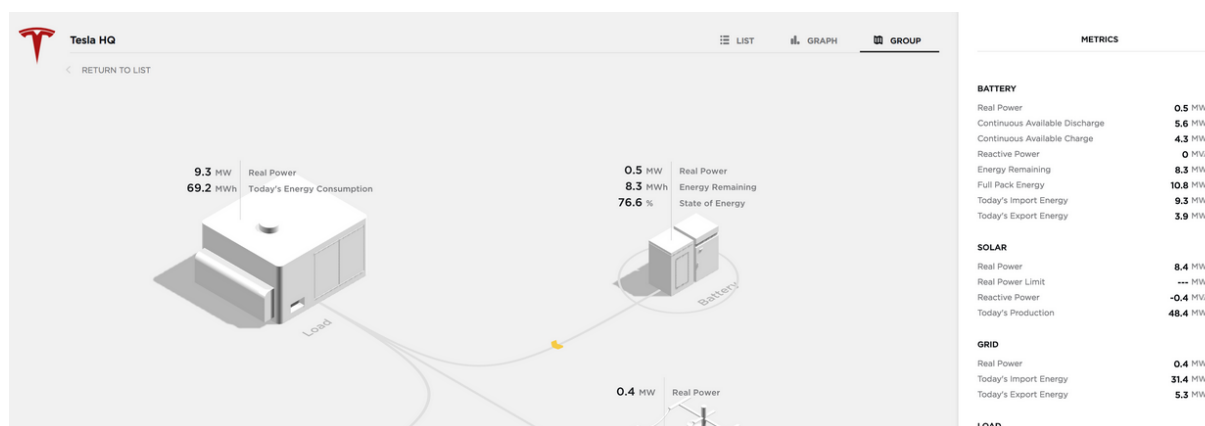
Suurin käytetty teho (tyypillisesti) 15 minuutin ajanjakson aikana. Tämä summa kerrotaan kysyntämaksulla, jonka sähkölaitos laskee asiakkaan hintaluokan perusteella [16].

4.2 Tesla Powerpack

Tesla Powerpack on teollisuusluokan sähkövarasto, joka on kehitetty vastamaan teollisuuden moninaisiin energiankäyttövaatimuksiin. Ensimmäiset Tesla Powerpackit asennettiin vuonna 2012. Tuotantoon on päätynyt ensimmäisen sukupolven 100 kWh, toisen sukupolven 210 kWh ja viimeisin päivitetty oman invertterin sisältävä 232 kWh versio marraskuussa 2020 [23.]. Tesla markkinoi Powerpackia edistyksellisenä *all in one* -kokonaisuutena, jossa kaikki tarvittava laitteiston rakentamiseen, sähköverkkoon liittämiseen, integraatioon, seurantaan ja optimointiin löytyy yhden laatikon sisältä. Laitteen oleellisia teknisiä tietoja ovat 232 kWh energiakapasiteetti ja 130 kW:n AC-ulostuloteho / powerpack -yksikkö. Powerpackin sisältämän kaksisuuntaisen invertterin teho on skaalattavissa lisäämällä uusia yksiköitä rinnalle kokoluokassa 70-700 kVa. [24.] Hinta Teslan mukaan vuonna 2021 oli 172000 USD. (Tesla 2021)

Tesla Powerhub

Powerhub on Teslan seuranta- ja ohjausalausta eri energiantuottotapojen ja mikroverkkojen hallintaan. Ohjelmistoalusta tukee Teslan tuotteista Powerpackia ja Megapackia, joiden käyttöä voidaan optimoida alustan kautta. Käyttäjät voivat seurata omaa uusiutuvan tuotantoa, sähkönkulutusta ja tämän hintaa. Alusta kykenee koneoppimista ja algoritmeja hyödyntämällä mm. kulutuksen ja oma-tuotannon ennakkointiin sekä älykkääseen kuormanohjaukseen akkua hyödyn-





Kuva 7 Powerhub -käyttöliittymä kokoaa infran energialiikenteen yhteen visuaaliseen näkymään [25].

tämällä. Palvelusta voi määrittää raja-arvon esimerkiksi verkosta otettavalle huipputeholle, ajoitetulle sähkövaraston lataukselle tai purkamiselle. Merkittävä ominaisuus Powerhub käyttöliittymässä on Autobidder, joka on reaaliaikainen kaupankäynti- ja hallinta-alusta. Autobidder luo sähkön pientuottajille mahdollisuuden hyötyä sähkövarastoistaan liittymällä sähkön reaaliaikaisille sekä vuorokausimarkkinoille, edellyttäen että sähkövarasto täyttää maakohtaiset vaatimukset. [25.]

4.3 BYD Battery Box Commercial

Battery-Box Commercial on energiavarasto, joka lupaa suorituskykyä kuluttajille sekä teollisuuteen. Litium -rautafosfaattiakustoa on tarjolla kahdessa eri koossa, 131 kWh:n ja 233 kWh:n versioina. Liittymään kytkettäessä Battery-Box vaatii toimiakseen rinnalleen invertterin, jota koje ei itsessään sisällä. Täysimittaisen takuun säilyttämiseksi BYD vaatii järjestelmään asennettavaksi ainoastaan Saksalaisen Refun inverttereitä. Commercial Box -version kanssa yhteensopiva on kaksisuuntainen Refustore 88K, jonka suurin ulostuloteho on 88 kW. [28.]

Battery-Box käyttösovellutuksia ovat; omatuotannon varastointi, aikaperusteinen energian taltiointi, peak shaving, varavoima, optimoitu sähköauton lataus, taajuudensäätö. 233kWp yksikön hinta on noin 116000 euroa [28].

	 C130	 C230
Usable Energy [1]	131 kWh	233 kWh
Max Output Current [2]	150 A	250 A
Nominal Voltage	729.6 V	777.6 V
Operating Voltage	638.4–820.8 V	680.4–874.8 V
Operating Temperature	-10°C to +50°C	
Communication	RS485 / CAN	
Dimensions (H/W/D)	2200x2600x600mm	2200x3200x600mm
Weight System	1751 kg	2593 kg
Weight Battery Module	64 kg	72 kg
Weight Battery / Inverter Rack	129 / 225 kg	
Cells	Lithium Iron Phosphate (cobalt-free)	
Enclosure Protection Rating	IP20	
Battery Module Certification	UN38.3	
Certification compliance	CE, IEC62619	
Compatible Inverters	REFUstore 88k	
Application	Peak Shaving / Time-of-Use / Self Consumption	
Warranty [3]	Maximum 10-year Performance Warranty, 5-year Product Warranty	

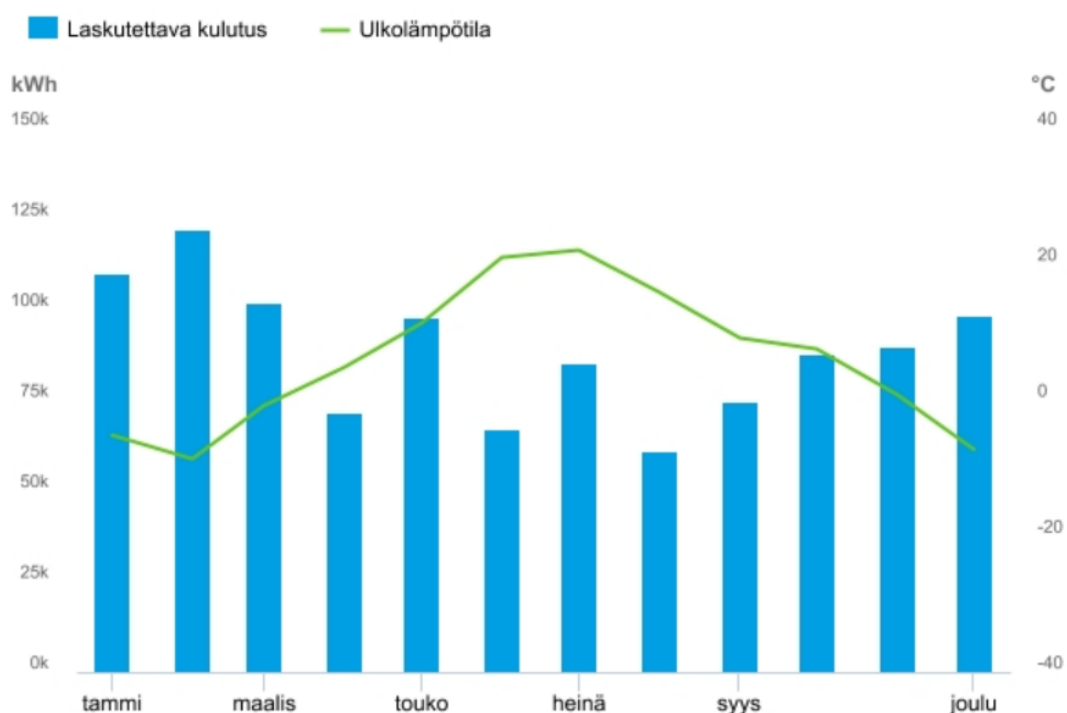
Kuva 2 BYD Battery Box Commercial 130/230 kW:n tekniset tiedot [28].

5 Case Alu-Releco

5.1 Pilottikohteen esittely

Alu-Releco on pintakäsittelyalan yritys, joka on erikoistunut fluorimuovipinnoitteisiin. Yrityksen laaja asiakaskunta jakautuu mm. paperi-, kemian- sekä metalli- ja konepajateollisuuteen. Sähköä päivittäisessä toiminnassa kuluu mm. suurten lämpökäsittelyuunien käytöstä johtuen. Liittymän vuoden 2021 sähkönkäyttö oli noin 970 000 kWh. Yrityksen toimitilojen katolle asennettiin vuonna 2018 Solarvoiman toimesta 92,4 kWp:n aurinkovoimala. Aurinkopaneelien tuottamasta sähköstä liittymän omaan käyttöön on viime vuosina jäänyt noin 90 %. Ylituotantoa syntyy pääosin viikonloppuisin, kun tuotannon laitteet eivät ole käytössä. Sähkön kohteelle toimittaa Caruna Oy keskijännitteellä 20kV:n toimituksena. Alu-Relecon valikoitumista pilottikohteeksi tuki hyvin vaihteleva sähkönkäyttö sekä suuret toistuvat tehomaksut. Akuston kapasiteetille ja taloudellisesti kan-

nattavalle toteutukselle haasteen luo ajoittain toteutuvat 600–900kWp:n sähköteho tunnit [29].



Kuva 3 Alu-Relecon kuukausittainen sähkönkulutus vuonna 2021 [29].

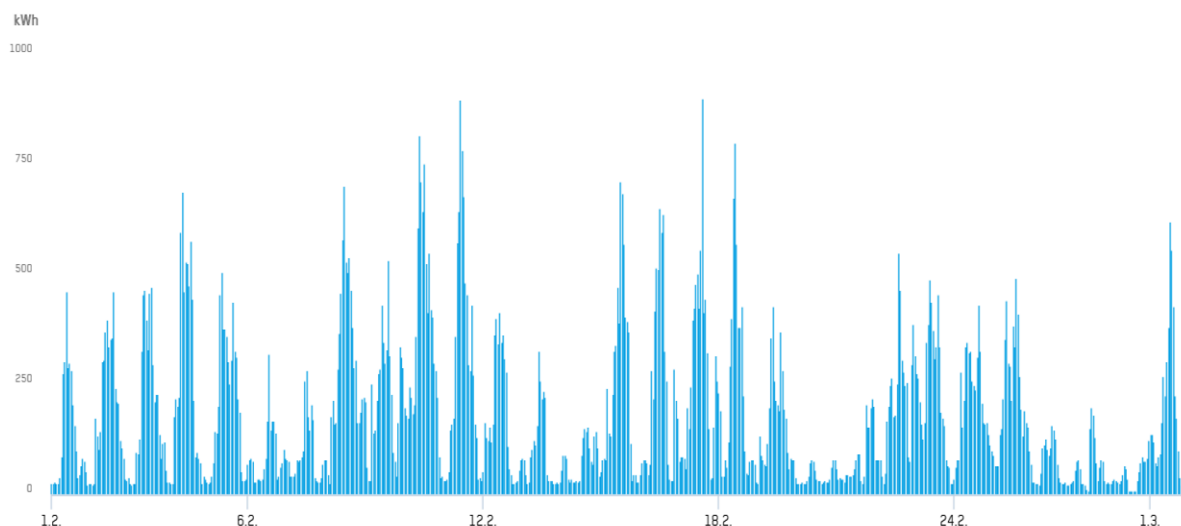
5.2 Sähkönkulutus ja kustannukset

Sähkönkulutus Alu-Relecon sähköliittymässä on kasvanut tasaisesti vuosi vuodelta. Sähköä liittymässä kului vuonna 2020 noin 0,94 mWh ja taulukon 1 mukaisesti vuonna 2021 noin 1,06 mWh. Sähköenergian kokonaiskustannus vuonna 2021 oli yrityksen ostoenergian hinnalla 4,2 c / kWh, yhteensä 108846,8 euroa. Toiminta on valmistavaa teollisuutta ja lukeutuu sähkön osalta toiseen veroluokkaan. Sähkönsiirron osuus laskusta oli 23620,24 euroa ja veron 615,14 euroa. Tehomaksut vuonna 2021 yhteensä 25034,65 euroa. Merkillepantavaa on, että tehomaksujen kustannukset ovat lähes neljännes energian kustannuksista tässä liittymässä.

Taulukko 1 Vuoden 2021 sähköenergian kulujakauma

Kuukausi	Kulutus /kWh	Vero	Siirtomaksu	Tehomaksu
Tammi	109955	69,27	2858	2024
Helmi	121981	76,86	3176,17	2827,33
Maalis	101846	64,16	2660	2155
Huhti	71646	45,13	1311	2069
Touko	98205	61,87	1797	2001
Kesä	67081	42,25	1227	2032
Heinä	85357	53,75	1562	1394
Elo	61304	38	1121	1686
Syys	74830	47	1369	1942
Loka	87634	55	1604	2448
Marras	89894	56,76	2371	2203
Joulu	98616	62	2565	2253
yht	1068349 yht	672,05	23621,17	25034,33

Sähkönkulutuksen kuukausijakaumasta huomataan, että sähkönkäyttö on pienimmillään kesäkuukausina ja talvella kulutuksen kasvaessa toteutuu myös suurimmat tehomaksut. Suoraa voidaan todeta, että omalla aurinkovoimalalla ei talven tehomaksuihin voida vaikuttaa, vaan akkua tulisi ladata verkosta yöaikaan. Korkein kuukausi tehomaksujen osalta oli helmikuu (902 kW), ja alhaisin elokuu (538 kW). Huomioitavaa on, että vuoden suurimmat ottotehotunnit ajoittuivat todennäköisesti aamulle klo 9–10, päivälle klo 12, tai iltapäivälle klo 14–15 alkaville tunnille. Kalenterikuukausista yhdeksänä (9/12), kovimman kulutuksen tunti ajoittui edellä esitettyihin aikaikkunoihin. Ympäri vuoden toteutuvien kulutushuippujen syntymisajankohta ei osoittanut riippuvuutta vuodenajasta tai ulkolämpötilasta. Huipputehon leikkauksen osalta vaihtelevasti toteutuva sähkönkäyttö luo haasteita akuston ohjausjärjestelmälle.



Kuva 4 Sähkön tuntikulutus Helmikuulta kuukauden kynttilägraafina. Suurin tehotunti 903 kWh

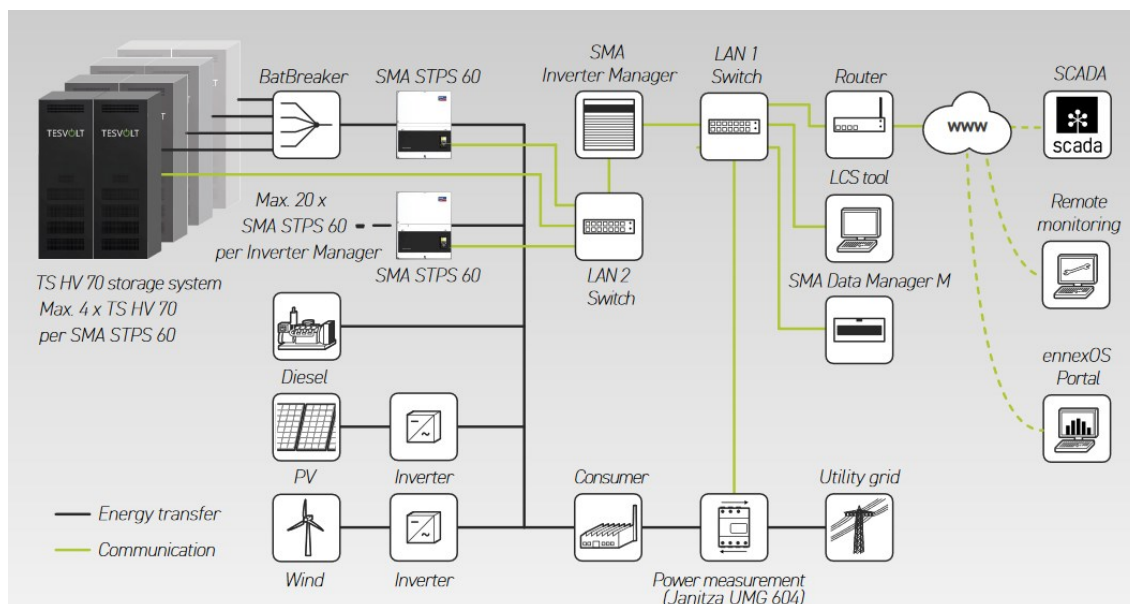
5.3 Aurinkovoimala

Vuonna 2018 Alu-Relecon toimitilojen katolle asennettiin 94 kWp:n aurinkovoimala. Järjestelmä koostuu 342 aurinkopaneelista ja kahdesta SMA STP Core 1 invertteristä. Laitteisto tuottaa sähköä suoraan liittymän käyttöön. Mahdollinen ylituotanto myydään suoraan sähköverkkoon. järjestelmä on tuottanut elinkaarensa aikana n. 306 mWh sähköä. Vuoden 2021 voimalan vuosituotanto oli. n 77000 kWh, josta n. 90 % jäi liittymän käyttöön. Ylituotanto syntyi Carunan tuntidatan perusteella muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta käytännössä vain viikonloppuisin. Tällöin yrityksen tuotanto oli pysähdyksissä. Akun mahdollisen lisäämisen myötä ei ylituotantoa verkkoon enää pääse syntymään, vaan järjestelmä ajaa ylituotannon kokonaisuudessaan akustoon.

5.4 Akusto huipputehonleikkaukseen

Alu-Relecon liittymän taloudellisen kannattavuuden selvitykseen valikoitui tarkimman lopputuloksen ja soveltuvuuden saavuttamiseksi Tesvoltin TS HV 70 -sähkövarasto. Tesvoltin laitteistosta saatavilla oli paras tieto akun ohjausparametreistä ja näiden asettamisesta. Tämänhetkinen toimitushinta yhdelle 76 kWh:n sähkövarastolle ja SMA STPS 60 invertterille tarvittavine osineen on noin

57 000 euroa [30]. Toteutuneeseen kulutukseen perustuen tämä mallinnus tehdään neljällä yhteen toimintaan liitettyllä 76 kWh:n sähkövarastolla ja kolmella STPS 60 -invertterillä. Kuvasta 7 ilmenee, että neljää TS HV 70 yksikköä voidaan ohjata yhdellä invertterillä mutta tarvittavan ulostulotehon tuottamiseksi tämä mallinnus esitetään kolmella SMA STPS-60 -invertterillä. Näin akuston kokonaiskapasiteetti on 304 kWh ja maksimi ulostuloteho inverttereillä 225 kW.



Kuva 7 Järjestelmäkaavio Tesvolt TS HV 70 standardiasennukselle [22].

Tässä laskelmassa arvioidaan huipputeholeikkauksen onnistumista kahden eri arvion perusteella. Akun huipputehokapasiteetin ollessa 225 kW, esitetyn kokoinen akkureservi saadaan täydestä tyhjäksi alle puolessatoista tunnissa. Huipunleikkausta tapahtuu käytännössä aina, kun verkosta otettava teho ylittää määritellyn kuukausittaisen raja-arvon. Välillä jaksot voivat olla lyhyitä, ja välillä useamman tunninkin mittaisia. Vaikka valmistaja esittääkin akulle 6000 täyden latauskerran (100 % Depth of Discharge) sietokykyä, peak shaving näkökulmasta on hyvin epätodennäköistä laskea akun purkukapasiteetin osuvan juuri kuukauden suurimmille ottotehotunneille. Tarkastelu tehdään noin 60 % eli 140 kW:n sekä noin 80 % eli 180 kW:n onnistuneella leikkausteholla.

Tekninen tarkastelu

Liittymän sähkönkäytön varioidessa päivä- ja kuukausitasolla merkittävästi tulisi akuston verkosta otettavan maksimitehon raja-arvot eli niin sanotut *soft limitit* asettaa joka kuukaudelle erikseen. Näin kasvatetaan todennäköisyyttä ohjausjärjestelmän onnistumiselle oikeiden kulutushuippujen leikkaamisessa. Esimerkiksi vuoden 2021 suurin ottoteho 903 kW toteutui helmikuussa ja alhaisin 442 kW heinäkuussa. Taulukossa 2 alla esitetään uudet maksimiarvot (P_max) verkosta otettavalle teholle kuukausittain.

Taulukko 2 Kuukausittaiset uudet esitetyt P_max raja-arvot ja niiden ylitykset perustuen 2021 sähkönkulutukseen enimmillään 140kW huipunleikkauksella

	Tehomaksu /kk euroa	Kuukauden suurin tehotunti v. 2021 (kW)	P_max (kW) raja-arvo	Peakshaving tilanteet kuukaudessa	Leikattu huipputeho optimitilanteessa Maks. 140kW
Tam	2024	646,7	600	2	46,7
Helmi	2827,33	903	700	12	140
Maalis	2155	688,5	600	24	88,5
Huhti	2069	661	500	3	140
Touko	2001	639,5	450	11	140
Kesä	2032	649	450	8	140
Heinä	1394	442	350	19	92
Elo	1686	538,9	400	7	138,9
Syys	1942	620	400	5	140
Loka	2448	782	500	7	140
Marras	2203	704	550	6	140
Joulu	2253	720	600	5	120
yht	25034,33	7994,6		Säästö yht. euroa / v	4618,215

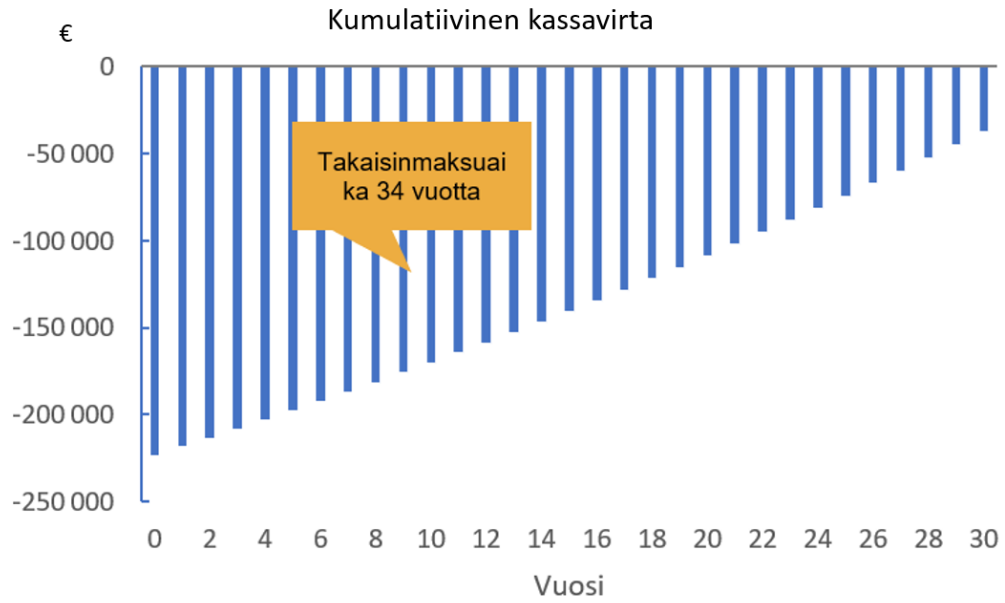
Vuodenaikojen mukainen yhtäläisyys näkyy myös edellisvuosien kulutushuipussa. Tunti on liittymän tehonmittauksessa varsin pitkä aikajakso, ja todellista otetun tehon vaihtelua tunnin sisällä ilman oikeaa mittausdataa voidaan vain arvioida. Tuntikulutustietoon perustuen voidaan varmistua syntyvien tehonleikkauksien vähimmäismäärästä näillä asetuksilla. Taulukoissa 2 ja 3 esitetään määritellyn huipputehon raja-arvon mukaan toteutuvat huipunleikkauksen toteutuvien tilanteiden määrä. Teoriassa on mahdollista, että jaksoja on huomattavasti enemmän, jos sähkönkäyttö vaihtelee suuresti tunnin mittausjakson sisällä.

Taulukko 3 Kuukauden suurin sallittu ottotehon raja-arvo ja huipunleikkaustilanteiden vähimmäismäärä 180kW huipunleikkauksella.

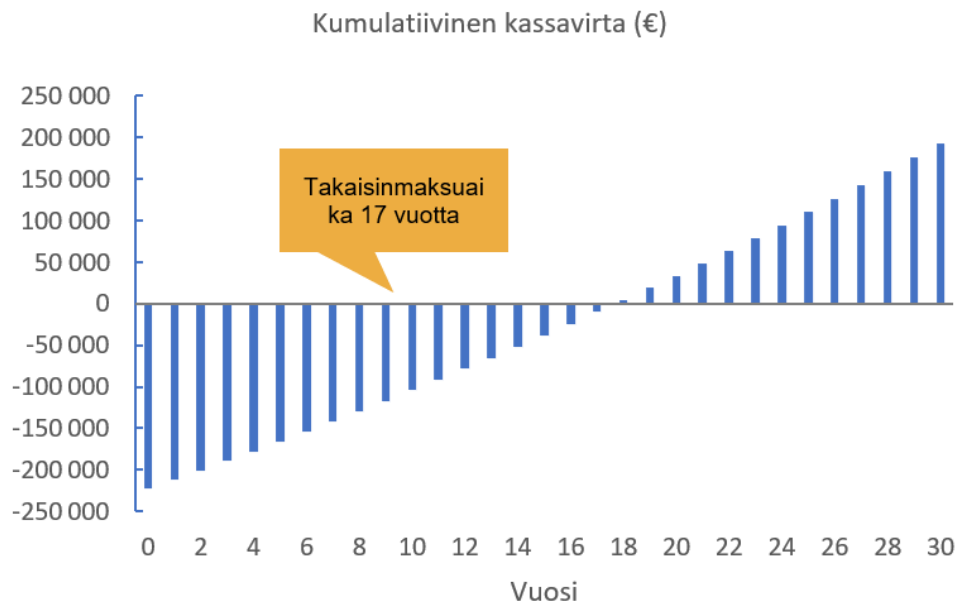
	Tehomaksu euroa / kk	Kuukauden suurin tehotunti v. 2021 (kW)	P_max (kW) raja-arvo	Peakshaving tilanteet kuukaudessa	Leikattu huipputeho optimitilanteessa Maks. 180kW
Tam	2024	646,7	600	2	46,7
Helmi	2827,33	903	700	21	180
Maalis	2155	688,5	600	25	138,5
Huhti	2069	661	500	5	180
Touko	2001	639,5	450	27	180
Kesä	2032	649	450	9	180
Heinä	1394	442	350	19	92
Elo	1686	538,9	400	7	138,9
Syys	1942	620	400	5	180
Loka	2448	782	500	7	180
Marras	2203	704	550	6	180
Joulu	2253	720	600	5	180
yht	25034,33	7994,6		Säästö yht. euroa / v	5657,715

Taloudellinen tarkastelu

Laitteiston hintalappu kokonaisuudessaan olisi tämän hetken hinnoilla noin 223 000,00 euroa. Hinta sisällä toimitus- ja asennuskustannuksia. Esitetyillä tehonleikkausasetuksilla vuotuisia säästöjä pelkästään leikatuista huipputehoista tulisi 60 % onnistuneella leikkausteholla 4618,18 euroa tai 80 % leikkausteholla 5657 euroa. Sähkövaraston ja BMS:n lisäys liittymään mahdollistaa myös sen, että ylituotantoa ei omasta aurinkovoimalasta pääsisi syntymään, vaan tämä ajettaisi akkuun. Vuosien 2020 ja 2021 aurinkovoimalan ylituotannot olivat n. 8740 kWh ja 11000 kWh. Oheiseen laskelmaan ylituotannosta omakäyttöön siirtymisen hyödyksi on asetettu 0,08 euroa / kWh. Näin suoraan laskettuna takaisinmaksuajaksi investoinnille tulisi noin 34 vuotta. Huipputehomaksut laskisivat näin ollen vuodessa 18,3 %. Huomionarvoista on se, että ero sähkövarastojen hinnassa / kWh on kahden verrokin BYD:n ja Tesvoltin välillä järjestyttävän suuri. BYD:n akun hinnaksi / kWh tulee 0,49 euroa / kWh, kun taas Saksalaisen Tesvoltin 0,73 e / kWh. Alla olevat kuvat esittävät, kuinka takaisinmaksu aika puolittuu tällä hintaerolla.



Kuva 5 Investoinnin tuotto ilman pääoman kustannusta Tesvoltin akuston hinnoilla. [30].



Kuva 6 Investoinnin tuotto Tesvoltin ohjaustekniikalla ja BYD:n akuston hinnalla / kWh [26].

6 Pohdinta

Tässä opinnäytetyössä luotiin katsaus markkinoilla olevaan akkuteknologiaan ja näiden potentiaaliin hyötyihin osana sähköverkkoa. Mielenkiintoisen selvityksen suuntaa määritteli kysymys: onko sähkövarastoon investoiminen paljon sähköä käyttävälle PK- yritykselle taloudellisesti perusteltua. Yksioikoista vastausta kysymykseen ei tämän projektin myötä saada. Takaisinmaksuaika, joka tämän selvityksen myötä Alu-Relecon sähkövarastolle saatiin, on laajempaa kiinnostusta herättääkseen eittämättä liian pitkä.

Rajaukset ja epävarmuudet

Laskelmissa ei ole otettu kantaa sähkövaraston omistajan mahdollisuuksiin osallistua reservimarkkinoille ja ansaintamalleihin tämän kautta. Pienen muutoksen sähkövaraston käyttö tekee myös sähkönsiirtomaksujen osalta, koska osa päiväsaikaan ilman akkua ostetusta sähköstä siirtyy edullisemman yö- siirron piiriin akun yöaikaan tapahtuvan lataamisen takia. Takaisinmaksuajan näkökulmasta akun ikääntymistä ja mahdollista suorituskyvyn menetystä ei tässä selvityksessä otettu huomioon.

Haasteellisen kohteesta teki runsas sähkönkulutus, suuret kulutushuiput sekä epäsäännöllisesti toteutuva sähkönkäyttö. Netistä löytyy laajasti *peak shaving* kykyisiä akkuja ja markkinavetoista puhetta näistä, mutta syvempää tietoa akuston ohjausparametreistä sekä järjestelmän kyvystä onnistua tehonleikkauksessa hyvin vaihtelevien sähkökuormien liittymissä, on vaikea löytää. On mahdollista, että tämän kokoluokan sähkönkäyttäjälle kannattavampi investointi olisi asetta suurempi mWh luokan akusto. Suuresta alkuinvestoinnista huolimatta peak shavingin sekä reservituotteena toiminnan yhdistelmällä voitaisi saavuttaa suhteessa suuremmat edut. Lisää selvitystä akustojen peak shaving algoritmien toiminnasta, ohjelmoinnista sekä mahdollisesta reservikäytöstä tarvitaan.

Lähteet

1. Akkuteollisuuden pilotointi haku. Business Finland. 31.3.2022. Verkkoaineisto.
<https://www.businessfinland.fi/ajankohtaista/haut/2021/akkuteollisuuden-pilotointi--demonstraatio--ja-investointihankkeet>
2. Pilottikohteiden haku. Fingrid. 30.3.2021. Verkkoaineisto.
<https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2021/haku-taajuusohjattujen-reservien-uusien-teknisten-vaatimusten-pilottiin-ja-webinaari/>
3. Akkutekniikka- huipputehon tasaaminen ja muut käyttöalueet. Vattenfall 29.3.2019. Verkkoaineisto.
<https://energyplaza.vattenfall.fi/blogi/akkutekniikka-huipputehon-tasaaminen-ja-muut-kayttoalueet>
4. Vauhkonen S. Sähkövarastojen käyttö sähkönjakeluverkon pitkän aikavälin suunnittelussa. DI -Työ.
https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159343/diplomityo_vauhkonen_santeri.pdf?sequen
5. Fidelix Oy. Kysyntäjousto. Verkkosivu.
<https://www.fidelix.fi/kysyntajousto/>
6. Fortum. Uusiutuvan energian tuotanto tarvitsee ydinvoimaa – vastakkainasettelu turhaa. Verkkosivu. Luettu 12.4.2022

<https://www.fortum.fi/media/2020/09/uusiutuvan-energian-tuotanto-tarvitsee-ydinvoimaa-vastakkainasettelu-turhaa>
7. Tuulivoimalehti. 11.6.2021. Verkkoaineisto.
<https://www.tuulivoimalehti.fi/aiheet/pohjoismaiden-suurin-akku-tasaa-sahkoverkon-taajuusvaihteluja-lappeenrannassa.html>
8. Honkapuro S. Kysyntäjousto hyödyttää kaikkia sähkön käyttäjiä. Verkoartikkeli. 27.4.2021
<http://smartenergytransition.fi/fi/kysyntajousto-hyodyttaa-kaikkia-sahkon-kayttajia-ja-laskee-sahkon-hintaa/>
9. Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi. Fingrid. Verkkosivu
<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/taajuusohjattu-kaytto--ja-hairioreservi/>
10. Wikipedia, Vapaa tietosanakirja: Uninterruptible Power Supply (UPS). 1.8.2020. Verkkosivu.

<https://fi.wikipedia.org/wiki/UPS>

11. Selvitys hajautetun energiantuotannon potentiaalista käyttöönoton näkymistä Suomessa. 27.11.2017. Valtioneuvosto. Verkkoartikkeli.

<https://valtioneuvosto.fi/-/10616/selvitys-hajautetun-energiantuotannon-potentiaalista-ja-kayttoonoton-nakymista-suomessa-kiinteistokohtainen-energiantuotanto-lisaantyy-aurinkosahkon-t>

12. Fingrid. Suomen Sähköjärjestelmä. Verkkosivu.

<https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/suomen-sahkojarjestelma/>

13. <https://www.solar-log.com/en/solutions-service/feed-in-management/>

14. Ritonummi T., Matikainen M. 2008. Sähkön kysyntäjoustop edistäminen. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisu: Energia ja ilmasto 15/2008. s. 55-59. Saatavissa:

<https://docplayer.fi/1247888-Sahkon-kysyntajoustop-edistaminen.html>

15. Kucevic, D.; Semmelmann, L.; Collath, N.; Jossen, A.; Hesse, H. Peak Shaving with Battery Energy Storage Systems in Distribution Grids. 28.9.2021. Verkkoartikkeli.

https://mdpi-res.com/d_attachment/electricity/electricity-02-00033/article_deploy/electricity-02-00033-v2.pdf?version=1637043043

16. Sonnen ECO 8.1. Manuaali. 2021. Verkkoaineisto

<https://www.sonnensupportaustralia.com.au/uploads/2/9/8/5/29857561/sonnen-eco-8.1-3-lfp2-user-manual-3-ph-hybrid-22286-au465en.pdf>

17. M. Koller, Theodore Borsche, Andreas Ulbig / Review of grid applications with the Zurich 1 MW battery energy storage system / 2015. Verkkoartikkeli. ResearchGate -tietokanta.

18. Jason leadbetter, Lukas Swan / Battery storage system for residential electricity peak demand shaving / 2012. Verkkoaineisto. ResearchGate -tietokanta.

19. Alexandre Oudalov, Rachid Cherkaoui, Antoine beguin. Sizing and Optimal Operation of Battery Energy Storage System for Peak Shaving Application. 2017. Verkkoaineisto. Saatavissa:

https://www.researchgate.net/profile/Rachid-Cherkaoui-2/publication/4341620_Sizing_and_Optimal_Operation_of_Battery_Energy_Storage_System_for_Peak_Shaving_Application/links/00b7d52915b0c73f51000000/Sizing-and-Optimal-Operation-of-Battery-Energy-Storage-System-for-Peak-Shaving-Application.pdf

20. Caruna Oy. Verkkopalveluhinnasto 2019. Verkkoaineisto.
https://images.caruna.fi/verkkopalveluhinnasto_caruna_oy_1.11.2019-2.pdf
21. Tesvolt. Tuote-esite TS-HV -akut. 2021. Verkkoaineisto.
http://pdf.capenergie.fr/doc-autoconso/Tesvolt_TS_brochure.pdf
22. Tesvolt. Installation & operation Manual, TS-I HV 80. Verkkoaineisto
https://www.tesvolt.com/_media/05%20SERVICE/Installationsanleitungn/TS-I-HV-80/RD.TI.027.E.ENG_v.C01.pdf
23. Wikipedia, vapaa tietosanakirja: Tesla Powerpack. 20.6.2021
https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Powerpack
24. Fred Lamvert. Electrek. 30.4.2020. Verkkoaineisto. Luettu 28.4.2022
<https://electrek.co/2020/03/31/tesla-powerpack-price-commercial-solar/>
25. Tesla. PowerHub. 2022. Verkkosivu.
<https://www.tesla.com/support/energy/tesla-software/powerhub>
26. Verkkokauppa. Zerohomebills.com. Luettu 23.4.2022
<https://www.zerohomebills.com/product/byd-c230-high-voltage-233kw-commercial-solar-battery-package/>
27. BYD. BydBatteryBox Commercial. 2022. Verkkosivu. Luettu 23.4.2022
<https://bydbatterybox.com/byd-commercial>
28. Verkkokauppa. Zerohomebills.com. Luettu 23.4.2022
<https://www.zerohomebills.com/wp-content/uploads/BYD-REFU-Commercial-Energy-Storage-Battery-Package-88-C130-Datasheet-EN.pdf>
29. Caruna Oy. Caruna+ online -verkkopalvelu. Alu-Releco Sähkönkulutustiedot
<https://www.caruna.fi/palvelut/omat-sahkoasiat>

30. Tapio Venäläinen, Solarfactory Oy. 12.4.2022 Jälleenmyyjä.