



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

AKKUVARASTOT OMAKOTITALOISSA

Battery storages in detached houses

Joonas Ihalainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta
LUT Energia, sähkötekniikka

Joonas Ihalainen

AURINKOSÄHKÖ JA ENERGIAVARASTOT OMAKOTI-TALOISSA

2014

Kandidaatintyö.

40 s.

Tarkastaja: professori Jukka Lassila

Energian varastointi on noussut keskeiseksi energia-alan teemaksi viime vuosina. Erityisesti uusiutuvan tuotannon lisääntyminen ja energian käytön tehostaminen ovat edesautta-
neet energiavarastoratkaisuiden mukaantuloa. Työssä tarkastellaan litiumrautafosfaattiak-
kujen käytön kannattavuutta omakotitaloissa. Tavoitteena on selvittää, millä reunaehdoilla
näiden akkujen käyttö energiavarastoina tulee kannattavaksi Lappeenrannan olosuhteissa.
Kannattavuutta selvitetään litiumrautafosfaattiakkujen markkina-analyysin ja teknistalou-
dellisen analyysin sekä Matlab-simulaation avulla.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology

LUT School of Technology

LUT Institute of Technology, Electrical Engineering

Joonas Ihalainen

Battery storages in detached houses

2014

Bachelor's Thesis.

40 p.

Examiner: professor Jukka Lassila

Energy storing has risen as essential theme in energy business. Especially the increase of renewable energy production and the increase in efficiency of energy usage has supported the entry of energy storage solutions. In this Bachelor's Thesis the profitability of lithium iron phosphate battery usage in detached houses is examined. The goal of this thesis is to define the preconditions in which the usage of these batteries becomes profitable in the climate circumstances of Lappeenranta. The profitability is examined with market analysis and techno-economic analysis of lithium iron phosphate batteries as well as with Matlab simulation.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet	4
1. Johdanto	5
2. Sähkön kotitalouskäyttö ja Pientuotanto	5
2.1 Kotitaloussähkönkäyttö	6
3. Akkuenergiavarastot	7
3.1 Markkinakatsaus	9
4. Analysointityökalu	11
4.1 Ohjelman toiminta	12
5. Teknistaloudellinen analyysi.....	16
6. Yhteenveto ja Johtopäätökset	24
LÄHTEET	25
LIITTEET	27

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

P_{max} Talouden suurin tehopiikki

1. JOHDANTO

Energian varastointi on noussut keskeiseksi energia-alan teemaksi viime vuosina. Erityisesti uusiutuvan tuotannon lisääntyminen ja energian käytön tehostaminen ovat edesauttaneet energiavarastoratkaisuiden mukaantuloa.

Energiavaraston suurin etu on sen mahdollistama verkon rasituksen vähentäminen leikkaamalla talouden tehonkulutuspiikkejä, jolloin myös sähkön hinta on usein korkeimmillaan. Riippuen akun koosta tyhjentyntä akkua voisi sitten ladata esimerkiksi yöllä sähkön hinnan ollessa edullisimmillaan.

Akkutekniikka on edistynyt ja edullistunut huomattavasti viimeisen kahden vuosikymmenen aikana (Brad Plumer 2013). Tästä huolimatta ne eivät kumminkaan ole ikuisia, vaan ne kestävät tehokkaina energiavarastoina vain tietyn ajan tai tietyn määrän lataus- ja purkusykliä. Suuren kapasiteetin omaavat akkujärjestelmät ovat myös erittäin kalliita ja voivat kattaa yli puolet koko voimalakokonaisuuden hinnasta. Tästä syntyy pulma; mikä olisi optimaalinen akkuvaraston koko otettaessa huomioon sen hinta, talouden sähkökäyttö ja mahdollinen pientuotanto. Työn tavoitteena on selvittää, millä reunaehdoilla akkujen käyttö on kannattavaa omakotitaloissa.

Työn akkutekniikka rajataan li-ion akkuihin, sillä ne omaavat pitkän eli-ian sekä suuren lataus- ja purkusyklikapasiteetin. Talotyypit rajataan omakotitaloihin ja ilmasto-olosuhteet Lappeenrannan olosuhteisiin.

2. SÄHKÖN KOTITALOUSKÄYTTÖ JA PIENTUOTANTO

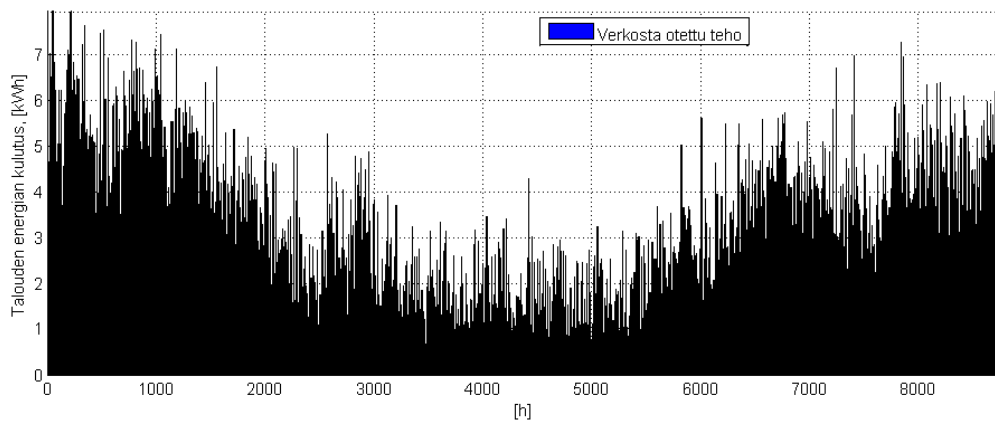
Useissa omakotitaloissa on käytetty sähkön pientuotantoa, kuten esim. muutaman kilowatin suuruisia aurinkovoimaloita jo monen vuoden ajan. Pientuotantoa käytetään leikkaamaan talouden verkosta ottamaa tehoa. Toisaalta varsinkin aurinkovoimaloiden tuotanto on korkeimmillaan keskipäivällä, kun taas omakotitalouksien kulutus on suurimmillaan iltpäivällä ja illalla. Mikäli tämä pientuotanto olisi liitetty akkujärjestelmään, ja talouden sähköjärjestelmä olisi asetettu käyttämään akkuvirtaa hyväkseen sähkönkulutuksen ylittäessä tietyn rajan, kuluisi akusta illalla sama määrä energiaa pientuotannosta huolimatta.

Toisin sanoen vaikka talouden oma pientuotanto voisi vähentää akkuvaraston käytön tarvetta, ovat suurimmat tehopiikit yleensä yleisimmän pientuotantomuodon eli aurinkovoiman tuotantoajan ulkopuolella. Aurinkovoimala voisi vähentää akun vuoden täysiä purku-

ja lataussyklejä, mutta se ei vaikuttaisi talouden tarvitsemaan akkukokoon. Tästä syystä pientuotanto jätettiin pois tarkemmasta tarkastelusta.

2.1 Kotitaloussähkökäyttö

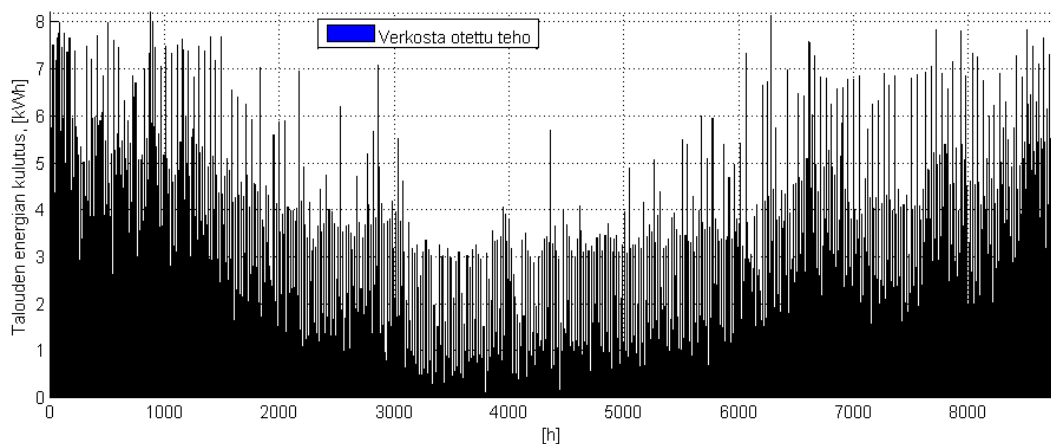
Tarkastellaan seuraavaksi erilaisten kotitalouksien sähkönkulutuskuvaajia. Kulutuskäyriä nähdään kuvassa 2.1.



Kuva 2.1 Erään suoran sähkölämmityksen omaava talous.

Yllä olevassa kuvassa nähdään tyypillinen kulutuskäyrä sähkölämmitteisessä asunnossa. Kulutus on talvikuukausina kesäkuukausia korkeampi.

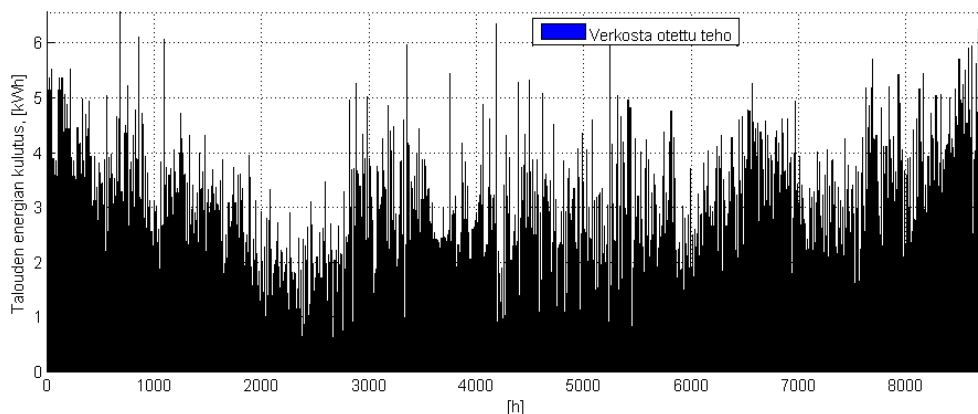
Kuvassa 2.2 on esitetty osittain varaavan sähkölämmityksen omaavan asunnon kulutuskäyrä.



Kuva 2.2 Erään osittain varaavan sähkölämmityksen omaava talous.

Kuten kuvassa 2.1, myös kuvan 2.2 kulutus on suurempaa talvikuukausina. Lisäksi osittain varaavan lämmitysjärjestelmän ansiosta sähkön kulutuksessa on vuorokauden sisällä suurempia vaihteluita.

Kuvassa 2.3 on kyseessä omakotitalon kulutuskäyrä, mihin ei sisälly sähkölämmitystä tai sähkökuuasta.



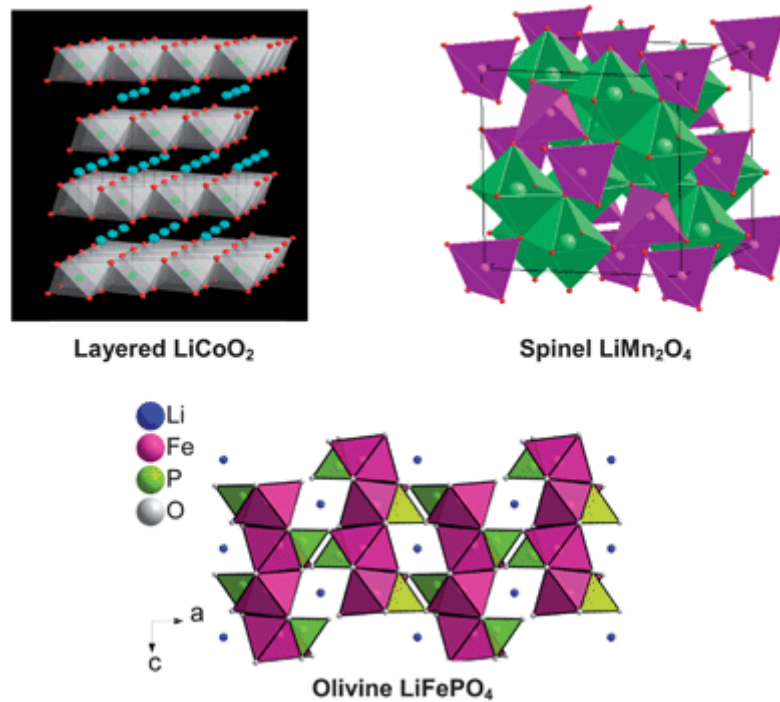
Kuva 2.3 Omakotitalo, jossa ei ole sähkölämmitystä tai sähkökuuasta.

Sähkölämmityksen korvaus toisella lämmityskkeinolla näkyy heti talouden kulutuskäyrässä. Talvi- ja kesäkuukausien välillä ei ole selvää eroa sähkön kulutuksen suhteen.

3. AKKUENERGIAVARASTOT

Työssä keskitytään akkuenergiavarastoihin ja erityisesti litium-ion -tekniikkaan.

Markkinoilta löytyy monia erilaisia litium-ion akkuja. Niiden rakenteelliset (kemialliset) erot kohdistuvat suurimmaksi osaksi katodissa käytettäviin materiaaleihin. Olemassa olevia li-ion akkukatodeja on mm. litiumkoolttioksidi (LiCoO_2), litiummangaanioksidi (LiMn_2O_4), litiumrautafosfaatti (LiFePO_4), litium nikkeli mangaani koolttioksidi (LiNiMnCoO_2), litiumnikkelikoolttialumiinioksidi (LiNiCoAlO_2) sekä litiumtitaaniitti ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$). (Battery University 2014). Eri akkukemioiden rakenteellisiä eroja on havainnollistettu kuvassa 3.1.



Kuva 3.1 Akkukatodien rakenteellisia eroavaisuuksia (A. Manthiram , A. Vadivel Murugan , A. Sarkar and T. Muraliganth 2008)

LCO -akkuja (litiumkobolttioksidi) käytetään usein esim. matkapuhelimissa, kannettavissa tietokoneissa ja kameroissa. Joka tapauksessa sen elinikä on verrattaen pieni eli noin 1000 sykliä. (Battery University, 2015). Lisäksi LCO -akut kuumenevat suuresti vikatiloissa (Chil-Hoon Doh and Angathevar Veluchamy, 2010).

LMO- eli litiummangaanioksidiakut ovat hyvin turvallisia, eivätkä lämpene $80\text{ }^\circ\text{C}$ korkeampiin lämpötiloihin edes suuren kuorman kanssa (battery University 2015). LMO-akkuja käytetään sähkötyökaluissa, lääketieteellisissä laitteissa kuin myös hybridi- ja sähköautoissa.

LFP- eli litiumrautafosfaattiakut omaavat pitkän sykli-ian, parhaimmillaan 2000 sykliä. Ne ovat erittäin turvallisia, sillä ne pysyvät alhaisissa lämpötiloissa myös vikatilanteissa. Lisäksi muihin litiumakkuihin verrattaessa LFP-akut kestävät paremmin täydessä varauksessa pitämistä. Akun haittapuolina ovat muita litiumakkutyyppejä pienempi jännite ja nopeampi itsepurku. (Battery University, 2015).

NMC- eli litiumnikkelimangaanikobolttioksidiakut ja NCA- eli litiumnikkelikobolttialumiinioksidiakut ovat ominaisuuksiltaan samanlaisia mm. eliniän ja nimellisjännitteen osalta. NCA-akut ovat NMC-akkuja hintavampia.

LTO- eli litiumtitaaniattiakut omaavat muita litiumakkuja pitemmän eliniän, mutta samalla ne ovat erittäin kalliita ja omaavat pienen nimellisjännitteen. Batteryuniversity.com-sivuston mukaan LTO-akut pystyvät 3000-7000 lataus-purkusykliin.

Näistä vaihtoehtoista valittiin LFP sen suurikapasiteettisten akkujen saatavuuden, hinnan ja pitkäikäisyyden perusteella.

3.1 Markkinakatsaus

Maailman markkinoita läpi käydessä LiFePO₄-akkuja löytyi runsaasti niin Euroopasta, kuin myös Aasiasta sekä USAsta. Työssä keskitytään akkujärjestelmiin, joiden kapasiteetti on muutamia kilowattitunteja.

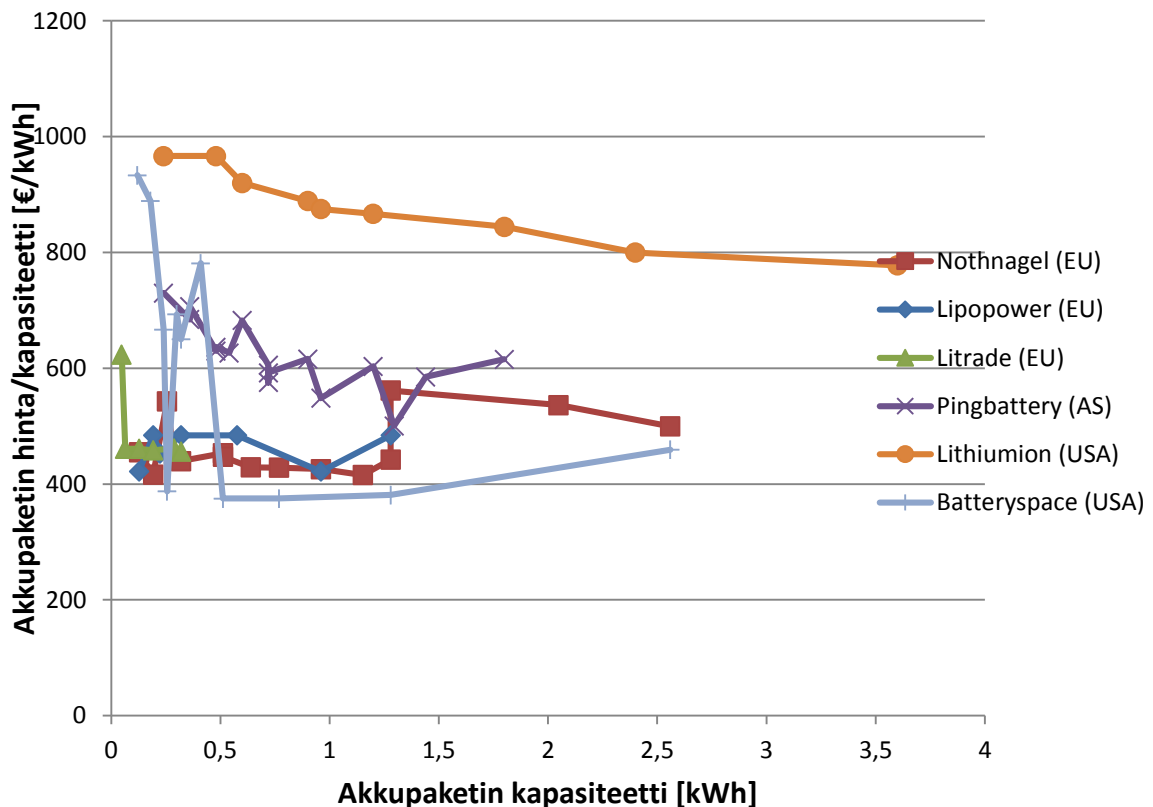
Läpikäydyillä Keskieurooppalaisilla sivuilla suurin osa akuista oli alle yhden kWh kapasiteetiltaan. Suurimman kapasiteetin omaava saatavilla oleva yksittäinen akku löytyi nothnagel-marine.de-sivustolta. Taulukossa 3.1 (Liite I) nähdään sivuston 12,8 V jännitteen omaavien akkupakettien kapasiteetteja sekä hintoja. Taulukot löytyvät liitteestä I. Samalla sivustolla myydään myös 3,2 V akkuja, joiden hintatietoja nähdään taulukossa 3.2 (Liite I). Niiden hinta-kapasiteetti-suhde vaihtelee samoilla lukemilla 12,8 V akkujen kanssa.

Verkkosivujen shop.lipopower.de ja litrade.de tuotevalikoima oli nothnagel-marine.de-sivutoa suppeampi. Sivustoilta löytyi lähes pelkästään 3,2 V akkuja. Taulukossa 3.3 nähdään shop.lipopower.de sivuston 3,2 V akkujen hintatietoja. Litrade.de sivuston tarjonta on shop.lipopower.de-sivua kattavampi. Hintatietoja taulukossa 3.4 (Liite I). Näiltä sivuilta nothnagel-marine.de sivun 90 Ah ja 12,8 V akku omaa parhaan hinta-kapasiteettisuhteen.

Aasian markkinoilta työhön etsittiin kaksi sivustoa. Pingbattery.com myi akkupaketteja, joiden jännitteet olivat jo valmiiksi korkeita: 24, 36, 48 ja 60 V. Taulukossa 3.5 (Liite I) sivuston hintatietoja. Taulukossa käytetyn dollarin kurssi on 1 USD = 0,8 €. Toinen aasialainen sivusto electway-store.com myi ainoastaan pieniä LiFePO₄ akkuja. Näiden hinta oli matala muihin verkkokauppoihin verrattuna. Hintatiedot löytyvät taulukosta 3.6 (Liite I). Elektway-store.com myi ainoastaan pieniä, alle 100 Wh akkuja, mutta niiden hinta-kapasiteetti-suhde oli erittäin alhainen. Suurin sivulla myyty akku oli kapasiteetiltaan 64 Wh ja hinta-kapasiteetti-suhde oli 287,5 €/kWh.

USAn markkinoilta työhön valittiin verkkokaupat lithiumion-batteries.com ja batteryspace.com. Taulukossa 3.7 (Liite I) nähdään lithiumion-batteries.com sivuston akkupakettien hintatietoja. Lithiumion-batteries.com sivun valikoimasta löytyi läpi käytyjen verkkokauppojen suurin yksittäinen akkupaketti. Batteryspace.com omasi muutaman tuotteen, joka oli Euroopan sivustoja halvempi hinta-kapasiteetti-suhteeltaan. Hintatiedot ovat näkyvissä taulukossa 3.8 (Liite I). Verkkokaupan batteryspace.com 12,8 V akkujen hinta-kapasiteetti-suhde on pienin verrattuna muihin markkinakatsauksessa käsitellyistä verkkokauppojen tarjoamista 12,8 V akuista.

Kuvaan 3.8 on koottu tarkasteltujen akkujen €/kWh suhdetta akun kapasiteettiin eri tarkasteltujen verkkokauppojen kesken. Kyseinen hinta kattaa vain investointikulut.



Kuva 3.8.

Akkupakettien kWh hintoja suhteutettuna kapasiteettiin.

Läpikäytyjen Eurooppalaisten verkkokauppojen hinta- vaihtelu oli kaikkein pienintä ja yli 200 Wh akuista muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta niiden hinta oli myös pienin. Edullisin hinta-kapasiteetti-suhde löytyi electroway-store.com sivulta. Nämä akut olivat erittäin pieniä, joten niitä joutuisi ostamaan suuria määriä useamman kWh:n saavuttamiseksi. Tar-

kasteluissa mukana olleiden amerikkalaisten jälleenmyyjien tarjoamat akkupaketit olivat kaikkein kalleimpia. Osa battery-space.com sivun akuista oli tarkastelussa mukana olleiden eurooppalaisten akkupakettien hinta-kapasiteetti-suhteeltaan edullisempia.

Björn Nykvist ja Måns Nilsson ovat tutkineet li-ion akkujen hintakehitystä aikaväliltä 2005 – 2014. Tutkimus julkaistiin maaliskuussa 2015. Kuvassa 3.9 nähdään heidän julkaisema kuvaaja li-ion akkujen hintakehityksestä tältä ajalta sekä mahdollinen hintakehitys tulevaisuudessa.

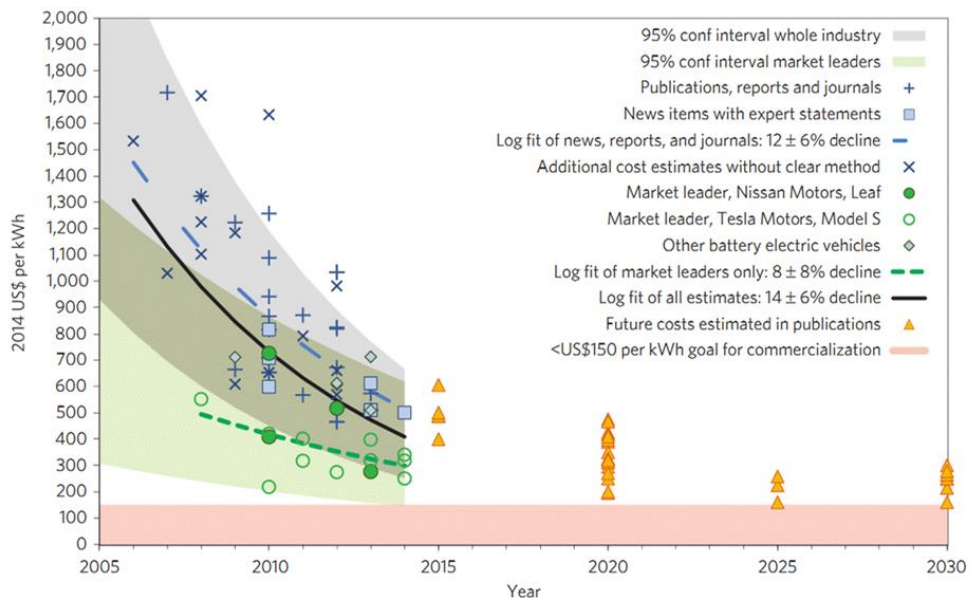


Figure 1 | Cost of Li-ion battery packs in BEV. Data are from multiple types of sources and trace both reported cost for the industry and costs for market-leading manufactures. If costs reach US\$150 per kWh this is commonly considered as the point of commercialization of BEV.

Kuva 3.9. Akkupakettien hintakehitys viimeisen kymmenen vuoden aikana.

Kuvasta huomataan li-ion akkupakettien hinnan jyrkkä lasku. Hinta on laskenut kymmenen vuoden kuluessa noin puoleen ja tämän ennustetaan tapahtuvan uudestaan seuraavan kymmenen vuoden aikana.

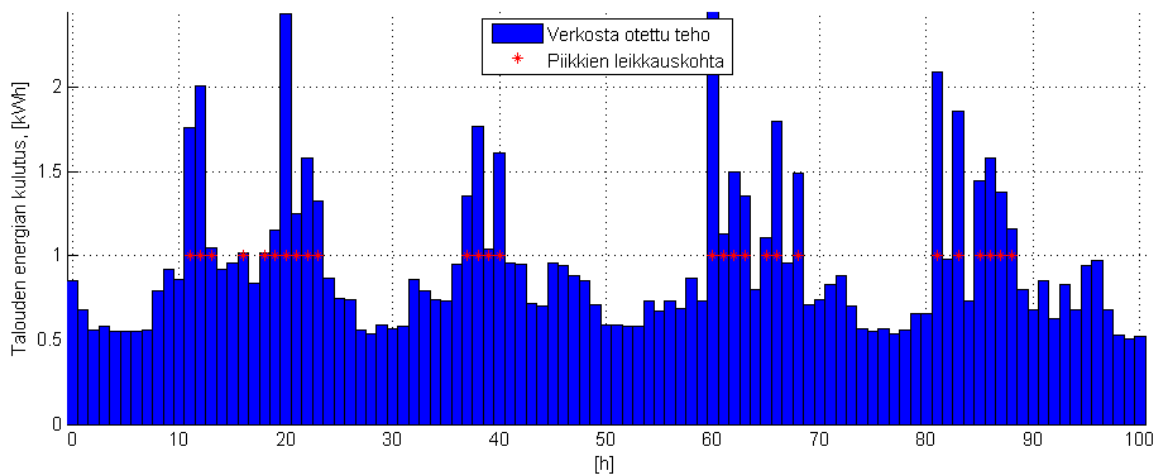
4. ANALYSOINTITYÖKALU

Eri talouksien sähkönkulutusprofiili voi vaihdella hyvinkin suuresti riippuen esimerkiksi talon koosta, lämmitysjärjestelmästä ja sähkönkäyttötottumuksista. Toki suurimmalle osalle talouksista löytyy suuntaa antavia kulutusmalleja, mutta pelkästään näiden mallien perusteella sopivan akkukoon ennustaminen voi tuottaa virheitä. Täten työtä varten kehitet-

tiin matlab-ohjelma, joka laski Excel-tiedostosta luetun kulutusdatan sekä määritellyn verkosta otettavan maksimi tehon avulla optimaalisen akkukoon. Ohjelman koodi on esitetty liitteessä II.

4.1 Ohjelman toiminta

Ohjelman alussa määritellään leikattavan tehopiikin vähimmäisarvo kilowatteina, akun hyötysuhde, maksimi syklien määrä, sen investointihinta/kWh ja akun elinikä. Tämän jälkeen luetaan talouden tunnitaiset kulutustiedot Excel-tiedostosta. Seuraavaksi käydään läpi ja merkitään kaikki kohdat, joissa verkosta otettavan tehon arvo ylittää tehopiikin leikkauksen arvon. Saadut tulokset piirretään kuvaajaan. Esimerkki laskennasta on esitetty kuvassa 4.1



Kuva 4.1

Esimerkkikuvaaja 100 tunnin ajalta.

Esimerkissä on otettu erään talouden kulutus 100 tunnin ajalta. Tehopiikin leikkauksen arvo on asetettu yhteen kilowattiin, eli kaikki sellaiset hetket, jolloin talouden tarvitsema sähköteho ylittää 1 kW, hoidetaan akkuvarastoa hyödyntäen. Esimerkkikuvaajassa reilun neljän vuorokauden aikana arvo ylittyy yhteensä 27 kertaa.

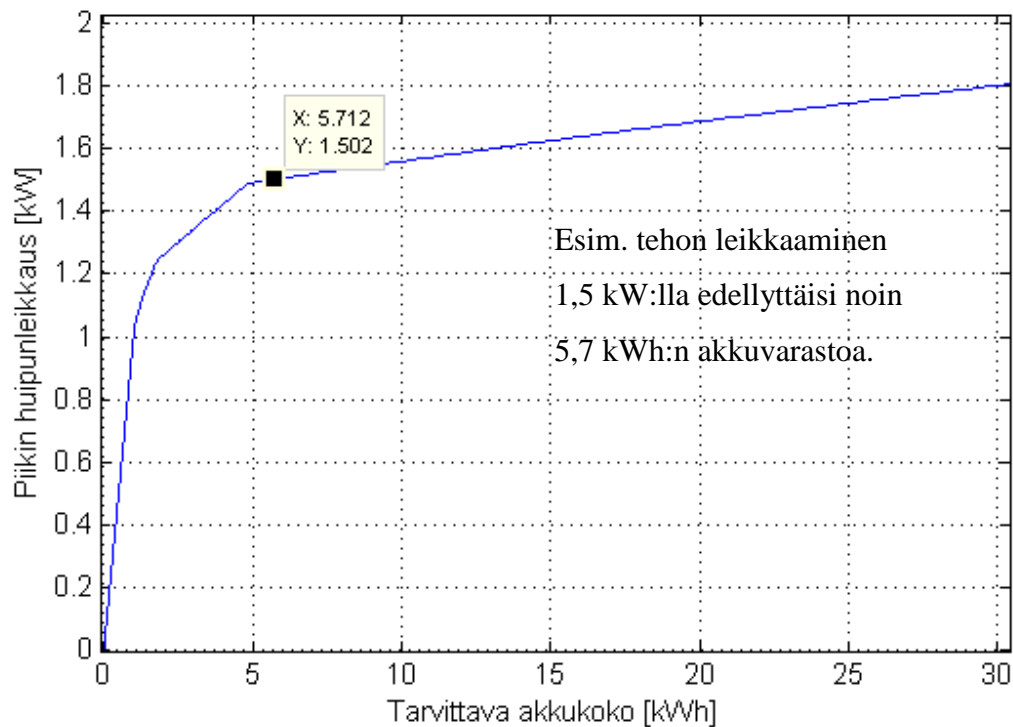
Seuraavaksi määritellään leikattavien tehopiikkien alkuajankohdat kulutusvektorilla ja verkosta saatavilla oleva tuntikohtainen teho, jota voidaan käyttää puretun akun lataamiseen. Tämä saatavilla oleva latausvirta saadaan tehopiikin leikkauksen arvon (esimerkissä 1 kW) ja sen hetkisen kulutuksen erotuksesta. Mikäli erotus on negatiivinen, on kyseessä leikattava tehopiikki. Seuraavaksi lasketaan leikattavien tehopiikkien välissä oleva kokonaislatauskapasiteetti. Saatu latauskapasiteetti kerrotaan ohjelman alussa määritellyllä akun

hyötysuhteella. Näin tiedetään, kuinka paljon akkuun ladatusta energiasta on mahdollista saada takaisin.

Seuraavaksi muodostetaan uusi vektori leikattavista tehopiikeistä. Jos tehopiikki on yli tunnin mittainen, lasketaan leikattava energia yhteen ja asetetaan se omaksi alkiokseen vektoriin.

Sitten määritellään tarvittava akkukoko. Ensin ohjelma määrittää akun kooksi suurimman leikattavan tehopiikin kuluttaman tehon. Tämän jälkeen ohjelma tekee akun varauksesta välimuuttujan. Ohjelma käy kulutuskäyrää läpi tehopiikki kerrallaan. Jokaisen tehopiikin kohdalla akun varauksesta vähennetään tehopiikin leikkauksessa kuluva energia ja tehopiikin jälkeen akkua ladataan, kunnes se on täysi tai vastaan tulee seuraava leikattava tehopiikki. Jos vastaan tulee tilanne, jossa akussa oleva energia menee negatiiviseksi, lisätään energian itseisarvo akun kokoon ja muutetaan akun energiamuuttujan arvo nollassi. Kuvan 4.1 mukaisessa tilanteessa talouteen olisi riittänyt 4,4 kWh akku.

Akkukoon selvityksen jälkeen ohjelma ajaa erillisen funktion, joka käy läpi kaikki edelliset laskutoimitukset for-lauseen sisällä muuttaen tehopiikin leikkauksen arvoa tasaisin välein kulutuskäyrän suurimmasta arvosta nolnaan ja tallentaa saadut akkukoot vektoriksi. Sitten vektorin avulla muodostetaan käyrä, joka näyttää tarvittavan akkukoon suhteen tehopiikin huipun leikkauksen määrään. Kuvaaja ajetusta esimerkistä nähdään kuvassa 4.2.

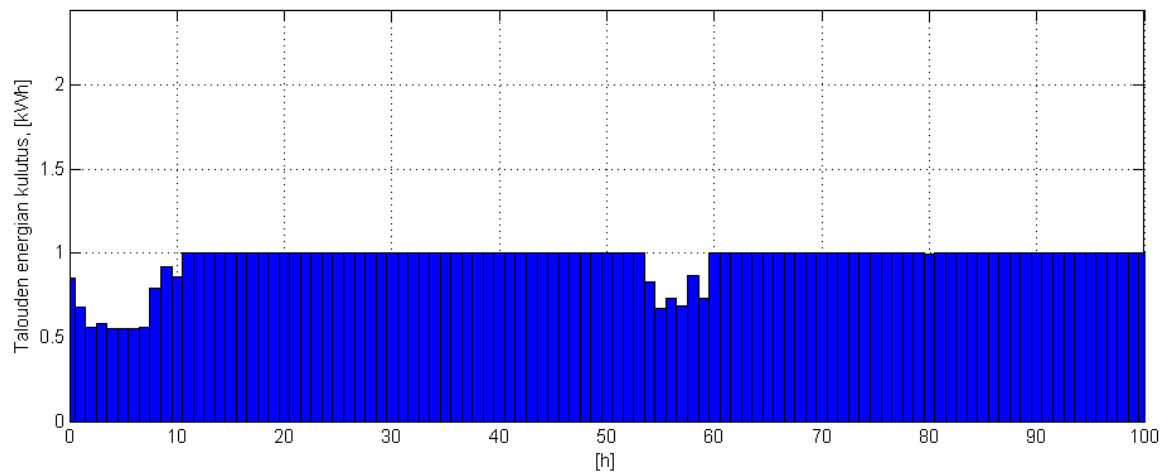


Kuva 4.2 Tarvittava akkukoko kulloisenkin tehopiikin huipun leikkaamiseen.

Kuvaajan y-akselin arvot ovat kääntäenverrannollisia tehopiikin leikkauksen arvoon nähden. Eli toisin sanoen tehopiikin huipunleikkauksen arvo kertoo, miten paljon suurimman tehopiikin huippua leikataan. Ohjelmassa käytetty tehopiikin leikkauksen arvo merkitsee talouden kuluttamaa tehon arvoa, jonka ylityksen jälkeen aletaan käyttää akkuenergiaa.

Sitten tehdään samalla periaatteella vastaavan lainen kuvaaja akkuun ladattavalle energialle suhteessa piikinhuipunleikkaukseen. Esimerkki liitteessä III kuvassa III.2.

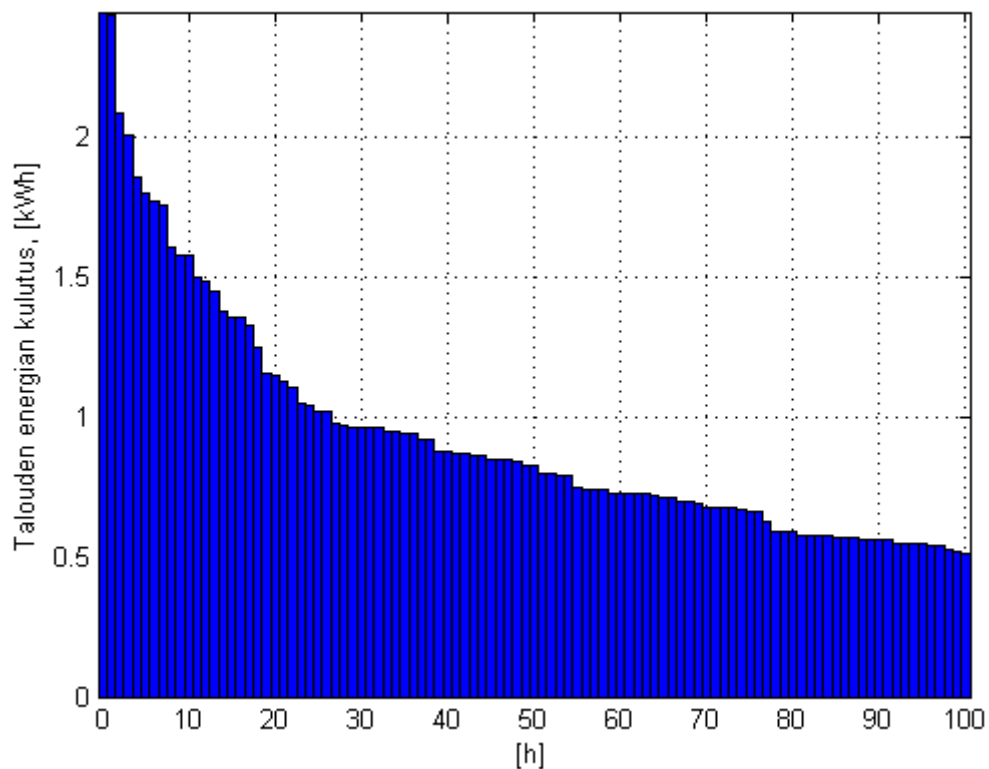
Seuraavaksi suoritettavana asiana ohjelma tekee uuden summavektorin sähkönkulutuksen ja -tuoton erotuksesta akun käyttöönoton jälkeen. Saadut tiedot piirretään erilliselle kuvaajalle. Kuvassa 4.4 nähdään tilanne, jossa kuvan 4.1 järjestelmään on liitetty 4,4 kWh akku ja suurimmaksi sallituksi verkosta otetuksi tehoksi on asetettu 1 kW.



Kuva 4.4 Edellisen esimerkin verkosta ottama teho akun käyttöönoton jälkeen.

Akku pyritään lataamaan heti täyteen jokaisen tehopiikin jälkeen, sillä seuraavan tehopiikin ajankohtaa ei voi ennustaa varmasti.

Viimeisenä ohjelma asettaa alkuperäisen kulutuskäyrän arvot suuruusjärjestykseen ja piirtää niistä kuvaajan. Esimerkki kuvassa 5.4.

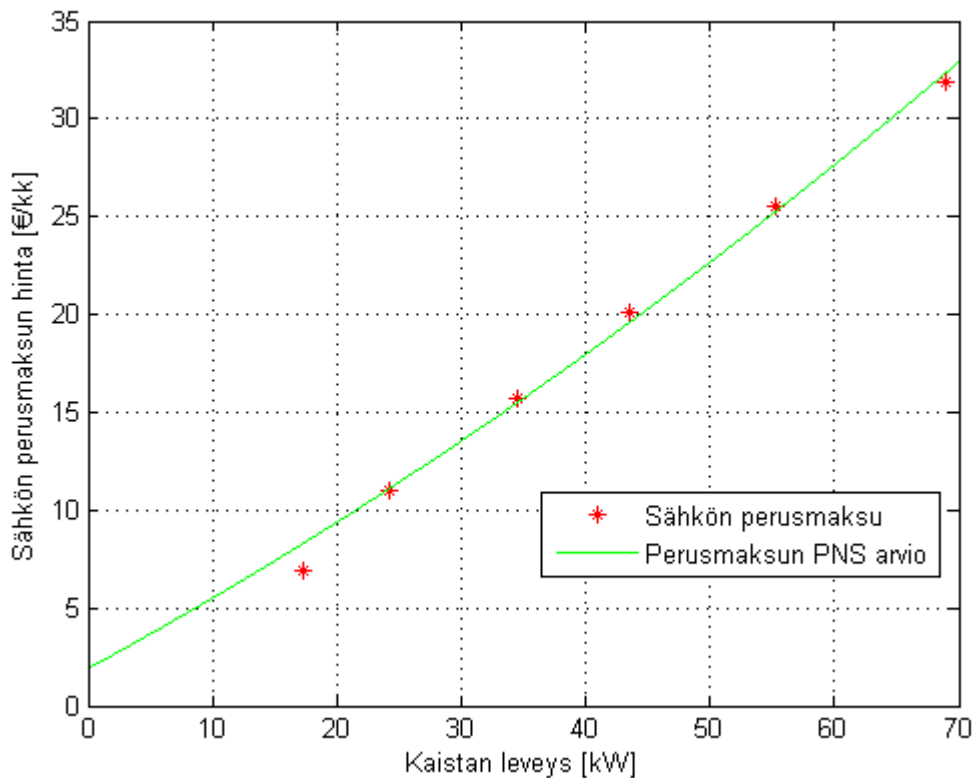


Kuva 5.4 Kulutuskäyrä asetettu suuruusjärjestykseen.

Kuvaajasta voidaan arvioida akun käytön määrää tehopiikkien huipunleikkaamisessa.

5. TEKNISTALOUELLINEN ANALYYSI

Analyysin tarkoituksena on selvittää, millä reunaehdoilla akun käyttö olisi kannattavaa tehoiikkejä leikattaessa. Päämuuttujina ovat akun hinta ja sähkönsiirron perusmaksu. Pienin saatavilla oleva kolmivaiheinen kaista on noin 17 kW eli 3 x 25 A (Lappeenrannan energiaverkot OY). Koska pienempiä tehokaistoja ei toistaiseksi ole, ratkaistiin mahdollisten pienempien tehokaistojen hinnat käyttäen PNS -menetelmää olemassa olevia hintoja apuna käyttäen (Kuva 5.1).



Kuva 5.1. Kaistanleveyden perusmaksun PNS -arvio.

Sovituksen mukaan tällöin esim. 10 kW kaistan perusmaksu olisi noin 5,48 €/kk, joka on nykyistä edullisinta kolmivaiheista kaistaa 1,4 €/kk edullisempi. Eli 10 kW kaistaa käytettäessä ja 17 kW kaistaan verraten vuodessa säästöä kertyisi 16,8 €.

Aloitetaan kannattavuuden vertailu eri akun hinnan arvoja käyttäen. Sähkönkulutuskäyrä hankittiin noin 150 m² alaisesta kaasulämmitteisestä omakotitalosta, jonka vuotuinen sähkönkulutus on noin 7 MWh, ja jonka suurin keskimääräinen kulutus tunnissa on 10,28

kWh. Taulukossa 5.1 vertaillaan eri tehopiikin leikkauksen kannattavuuksia nykyisellä akun hinnalla, joka on noin 450 €/kWh.

Taulukko 5.1 Eri tehopiikinleikkauksien mahdollistamasta kaistan pienentämisestä kertyvät kulut tai säästöt.

Perusmaksu	Piikin leikkaus	Akun koko	Akun hinta/kWh	Akun hinta	Annuiteetti	Syklejä/a	Ladattu energia	Annuiteetti vs. säästöt
[€/a]	[kW]	[kWh]	[€/kWh]	[€]	[€/a]	kpl/a	[kWh]	[€/a]
65,77	10	0,29	450	131	13	1	0	-8
61,30	9	1,29	450	581	56	6	8	-47
56,87	8	2,29	450	1031	99	10	26	-86
52,47	7	4,12	450	1854	179	11	50	-161
48,10	6	6,12	450	2754	265	12	80	-243
43,77	5	8,12	450	3654	352	12	112	-326
39,47	4	10,12	450	4554	439	14	152	-408
35,21	3	12,74	450	5733	552	14	204	-517
30,97	2	18,19	450	8186	789	15	298	-749
26,78	1	71,01	450	31955	3079	14	1102	-3035

Esimerkiksi, jos akuilla leikattaisiin jokainen 7 kW ylittävä tehopiikki, tarvittaisiin tässä taloudessa 4,12 kWh akku, jonka investointihinta olisi 1854 €. Vuosittain tämä akku kävisi läpi 11 täyttä purku- ja latausykliä. Olettaen, että akku on uusittava 15 vuoden käytön tai 2000 täyden lataus- ja purkusyklin jälkeen, tulee ko. akun annuiteetiksi 179 €/a. Annuiteetti vs. säästöt osio kertoo pienemmän kaistan sähkönperusmaksun hinnasta kertyvän säästön ja akun annuiteetin erotuksen. Arvo -161 €/a tulee 11 kW (70,27 €/a) kaistan ja 7 kW (52,47 €/a) kaistan perusmaksun erotuksesta, josta vähennetään akun annuiteetti. Kaistan ollessa 11 kW talous ei tarvitse akkua. Liitteessä III on muita kuvaajia taulukoon 5.1 liittyen.

Laskiessa akkupakettien hintaa 200 €/kWh jäävät säästöt edelleen negatiiviseksi. Lasketut arvot näkyvät taulukossa 5.2.

Taulukko 5.2 Eri tehopiikinleikkauksien mahdollistamasta kaistan pienentämisestä kertyvät kulut tai säästöt.

Perusmaksu	Piikin leikkaus	Akun koko	Akun hinta/kWh	Akun hinta	Annuiteetti	Syklejä/a	Ladattu energia	Annuiteetti vs. säästöt
[€/a]	[kW]	[kWh]	[€/kWh]	[€]	[€/a]	kpl/a	[kWh]	[€/a]
65,77	10	0,29	200	58	6	1	0	-1
61,30	9	1,29	200	258	25	6	8	-16
56,87	8	2,29	200	458	44	10	26	-31
52,47	7	4,12	200	824	79	11	50	-62
48,10	6	6,12	200	1224	118	12	80	-96
43,77	5	8,12	200	1624	156	12	112	-130
39,47	4	10,12	200	2024	195	14	152	-164
35,21	3	12,74	200	2548	245	14	204	-210
30,97	2	18,19	200	3638	351	15	298	-311
26,78	1	71,01	200	14202	1368	14	1102	-1325

Taulukosta nähdään, että vaikka annuiteetti laskikin alle puoleen taulukkoon 5.1 verrattuna, jäivät säästöt siitä huolimatta negatiiviseksi. Lasketaan akun hintaa edelleen taulukossa 5.3.

Taulukko 5.3 Kertyvät kulut ja säästöt akkujen hinnan ollessa 100 €/kWh.

Perusmaksu	Piikin leikkaus	Akun koko	Akun hinta/kWh	Akun hinta	Annuiteetti	Syklejä/a	Ladattu energia	Annuiteetti vs. säästöt
[€/a]	[kW]	[kWh]	[€/kWh]	[€]	[€/a]	kpl/a	[kWh]	[€/a]
65,77	10	0,29	100	29	3	1	0	2
61,30	9	1,29	100	129	12	6	8	-3
56,87	8	2,29	100	229	22	10	26	-9
52,47	7	4,12	100	412	40	11	50	-22
48,10	6	6,12	100	612	59	12	80	-37
43,77	5	8,12	100	812	78	12	112	-52
39,47	4	10,12	100	1012	97	14	152	-67
35,21	3	12,74	100	1274	123	14	204	-88
30,97	2	18,19	100	1819	175	15	298	-136
26,78	1	71,01	100	7101	684	14	1102	-641

Olettaen siis, että perusmaksu pysyy samana, olisi akkujen käyttö kyseisessä taloudessa kannattavaa vasta, kun akkupakettien hinta laskisi noin viides osaan nykyisestä. Tällöinkin se olisi kannattavaa vain pienimmällä mahdollisella akkuinvestoinnilla. Vähäinen syklien määrä selittyy liitteessä III olevan talouden piikikkästä kulutuskäyrästä.

Seuraavaksi tarkasteltiin perusmaksun hintojen muutoksen vaikutusta akkupaketin hankinnan kannattavuuteen. Akkupaketin hinta pidettiin alustavasti nykytasolla (450 €/kWh). Ensimmäinen testiajo kaksinkertaisella perusmaksulla näkyy taulukossa 5.4.

Taulukko 5.4 Kertyvät kulut ja säästöt sähkönperusmaksun ollessa kaksinkertainen nykytilanteeseen nähden.

Perusmaksu	Piikin leikkaus	Akun koko	Akun hinta/kWh	Akun hinta	Annuiteetti	Syklejä/a	Ladattu energia	Annuiteetti vs. säästöt
[€/a]	[kW]	[kWh]	[€/kWh]	[€]	[€/a]	kpl/a	[kWh]	[€/a]
131,54	10	0,29	450	131	13	1	0	-4
122,60	9	1,29	450	581	56	6	8	-38
113,74	8	2,29	450	1031	99	10	26	-72
104,94	7	4,12	450	1854	179	11	50	-143
96,20	6	6,12	450	2754	265	12	80	-221
87,54	5	8,12	450	3654	352	12	112	-299
78,94	4	10,12	450	4554	439	14	152	-377
70,42	3	12,74	450	5733	552	14	204	-482
61,94	2	18,19	450	8186	789	15	298	-710
53,56	1	71,01	450	31955	3079	14	1102	-2992

Jotta edes pienin piikinhuipunleikkaus tuottaisi säästöjä, oli perusmaksun hintaa nostettava kolminkertaiseksi nykyisestä. Perusmaksun vaikutukset annuiteetti vs. säästöihin näkyy taulukossa 5.5.

Taulukko 5.5 Kertyvät kulut ja säästöt sähkönperusmaksun ollessa kolminkertainen nykytilanteeseen nähden.

Perusmaksu	Piikin leikkaus	Akun koko	Akun hinta/kWh	Akun hinta	Annuiteetti	Syklejä/a	Ladattu energia	Annuiteetti vs. säästöt
[€/a]	[kW]	[kWh]	[€/kWh]	[€]	[€/a]	kpl/a	[kWh]	[€/a]
197,31	10	0,29	450	131	13	1	0	1
183,90	9	1,29	450	581	56	6	8	-29
170,61	8	2,29	450	1031	99	10	26	-59
157,41	7	4,12	450	1854	179	11	50	-125
144,30	6	6,12	450	2754	265	12	80	-199
131,31	5	8,12	450	3654	352	12	112	-273
118,41	4	10,12	450	4554	439	14	152	-346
105,63	3	12,74	450	5733	552	14	204	-447
92,91	2	18,19	450	8186	789	15	298	-671
80,34	1	71,01	450	31955	3079	14	1102	-2948

Taulukoista 5.2 – 5.5 voidaan päätellä, että pelkästään sähkönperusmaksun kasvaessa tai akkujen hinnan edullistuessa ei tulla saamaan ratkaisevia muutoksia akkujen käytön kannattavuuteen. Tarkastellaan seuraavaksi akun edullistamisen ja sähkönperusmaksun kasvattamisen yhteisvaikutusta taulukoissa 5.6 ja 5.7.

Taulukko 5.6 Kertyvät kulut ja säästöt akun hinnan ollessa 200 €/kWh vaihtelevalla sähkönperusmaksulla.

Perusmaksu	Piikin leikkaus	Akun koko	Akun hinta/kWh	Akun hinta	Annuiteetti	Syklejä/a	Ladattu energia	Annuiteetti vs. säästöt
[€/a]	[kW]	[kWh]	[€/kWh]	[€]	[€/a]	kpl/a	[kWh]	[€/a]
2x nykyises-								
131,54	10	0,29	200	58	6	1	0	3
122,60	9	1,29	200	258	25	6	8	-7
113,74	8	2,29	200	458	44	10	26	-17
104,94	7	4,12	200	824	79	11	50	-44
96,20	6	6,12	200	1224	118	12	80	-74
87,54	5	8,12	200	1624	156	12	112	-103
78,94	4	10,12	200	2024	195	14	152	-133
70,42	3	12,74	200	2548	245	14	204	-175
61,94	2	18,19	200	3638	351	15	298	-272
53,56	1	71,01	200	14202	1368	14	1102	-1281
3x nykyises-								
197,31	10	0,29	200	58	6	1	0	8
183,90	9	1,29	200	258	25	6	8	2
170,61	8	2,29	200	458	44	10	26	-4
157,41	7	4,12	200	824	79	11	50	-26
144,30	6	6,12	200	1224	118	12	80	-51
131,31	5	8,12	200	1624	156	12	112	-77
118,41	4	10,12	200	2024	195	14	152	-103
105,63	3	12,74	200	2548	245	14	204	-140
92,91	2	18,19	200	3638	351	15	298	-233
80,34	1	71,01	200	14202	1368	14	1102	-1238

Akkupakettien hinnan ollessa 200 €/kWh eivät säästöt ole vielä merkittäviä, mutta sähkönperusmaksun ollessa kolminkertainen, ja tehopiikkejä leikattaessa 10 kW kulutuksen kohdalta 15 vuoden kuluessa kuluttaja säästää noin kaksinkertaisen rahamäärän, joka kului akkua ostettaessa. Tarkastellaan seuraavaksi samaa tilannetta, jos akkupakettien hinta olisi 100 €/kWh.

Taulukko 5.7 Kertyvät kulut ja säästöt akun hinnan ollessa 100 €/kWh vaihtelevalla sähkönperusmaksulla.

Perusmaksu	Piikin leikkaus	Akun koko	Akun hinta/kWh	Akun hinta	Annuiteetti	Syklejä/a	Ladattu energia	Annuiteetti vs. säästöt
[€/a]	[kW]	[kWh]	[€/kWh]	[€]	[€/a]	kpl/a	[kWh]	[€/a]
2x nykyisestä								
131,54	10	0,29	100	29	3	1	0	6
122,60	9	1,29	100	129	12	6	8	6
113,74	8	2,29	100	229	22	10	26	5
104,94	7	4,12	100	412	40	11	50	-4
96,20	6	6,12	100	612	59	12	80	-15
87,54	5	8,12	100	812	78	12	112	-25
78,94	4	10,12	100	1012	97	14	152	-36
70,42	3	12,74	100	1274	123	14	204	-53
61,94	2	18,19	100	1819	175	15	298	-97
53,56	1	71,01	100	7101	684	14	1102	-597
3x nykyisestä								
197,31	10	0,29	100	29	3	1	0	11
183,90	9	1,29	100	129	12	6	8	14
170,61	8	2,29	100	229	22	10	26	18
157,41	7	4,12	100	412	40	11	50	14
144,30	6	6,12	100	612	59	12	80	8
131,31	5	8,12	100	812	78	12	112	1
118,41	4	10,12	100	1012	97	14	152	-5
105,63	3	12,74	100	1274	123	14	204	-18
92,91	2	18,19	100	1819	175	15	298	-57
80,34	1	71,01	100	7101	684	14	1102	-554

Tällöin kertyvät säästöt alkavat olla jo merkittäviä. Sähkönperusmaksun ollessa kolminkertainen nykyisestä tasosta, olisi akun hankinta erittäin kannattavaa leikattaessa tehopiikkejä vielä 7 kW kohdalta. Eniten säästöä kuluttajalle kertyisi leikatessa tehopiikkejä 8 kW kohdalta, jolloin 15 vuoden kuluessa kuluttaja jäisi 270 € voitolle verrattuna tilanteeseen, jossa hänellä ei olisi akkuvarastoa.

Samanlainen tarkastelu tehtiin toiselle taloudelle, jonka vuotuinen sähkönkulutus oli noin 3,3 MWh, joka oli alle puolet ensimmäisen tarkasteltavan talouden kulutuksesta. Lisäksi tämän talouden suurin tunnin keskimääräinen kulutus oli 4,99 kW. Talouden kulutus, akun koon ja ladattavan energian suhde tehopiikkien huipunleikkauksen suhteeseen näkyy liitteessä IV. Kyseisen talouden tehopiikkien leikkaus osoittautui kannattavaksi vasta, kun

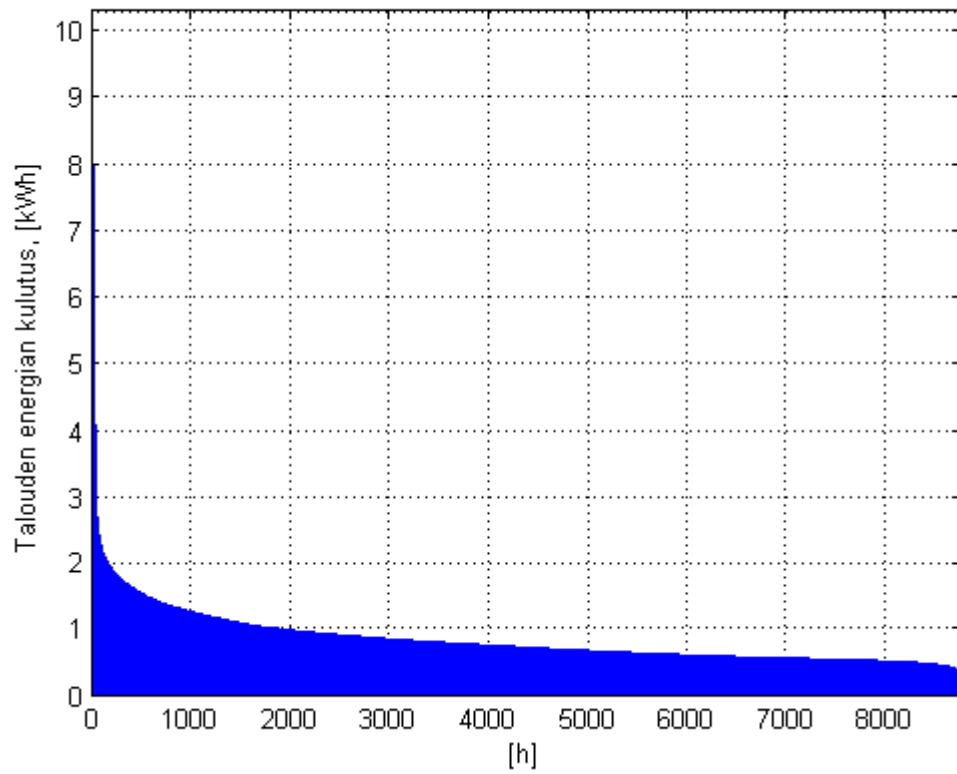
sähkönperusmaksu oli kolminkertainen nykyiseen verrattuna ja akun hinta kW kohden oli 100 €. Tilanne on nähtävissä taulukossa 5.8.

Taulukko 5.8 Kertyvät kulut ja säästöt eräässä taloudessa akun hinnan ollessa 100 €/kWh ja sähkön perusmaksun ollessa kolminkertainen.

Perusmaksu	Piikin leikkaus	Akun koko	Akun hinta/kWh	Akun hinta	Annuiteetti	Syklejä/a	Ladattu energia	Annuiteetti vs. säästöt
[€/a]	[kW]	[kWh]	[€/kWh]	[€]	[€/a]	kpl/a	[kWh]	[€/a]
118,41	4	0,99	100	99	10	2	2	3
105,63	3	1,99	100	199	19	6	13	7
92,91	2	3,15	100	315	30	12	44	8
80,34	1	6,88	100	688	66	41	315	-15

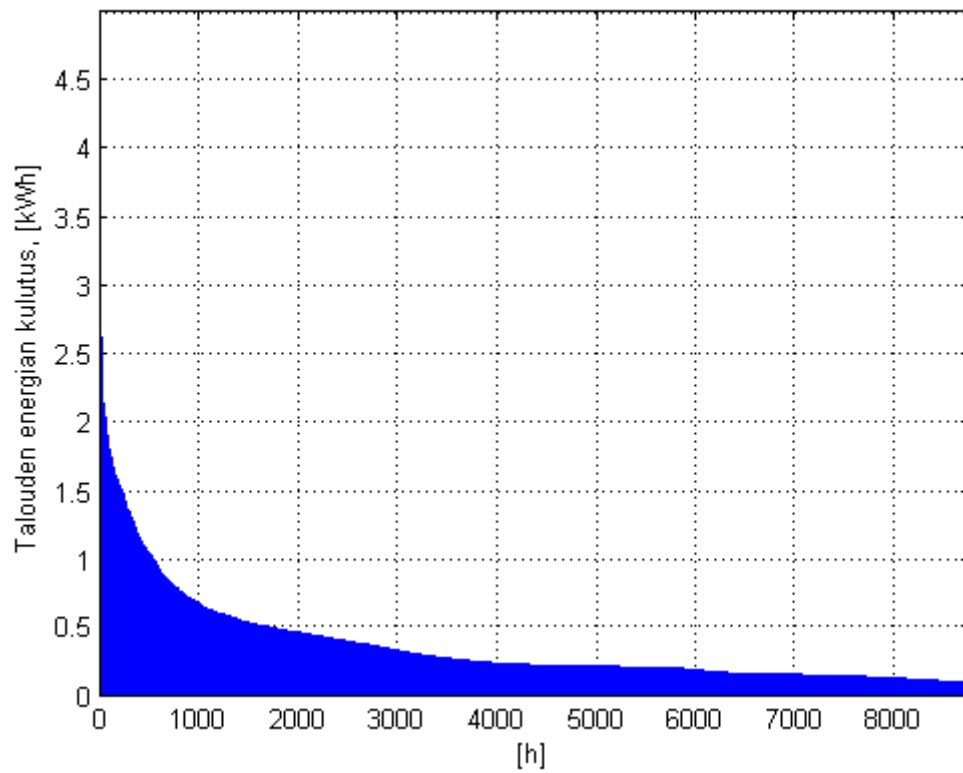
Huomattavaa taulukossa 5.8 on akun syklien määrän suuri kasvu siirryttäessä 2 kW tason leikkauksesta 1 kW tason leikkaukseen. Akun hankinta osoittautui kannattavaksi vasta, kun sähkönperusmaksu ja akun hinta oli tarkastelun ääripäissä. Tämä kertoo osaltaan, miten talouden energiankulutus on jakautunut vuoden ajalle. Verrattuna aiempaan talouteen akun hankinta ei siis ole yhtä kannattavaa.

Nimetään aiemmin tarkasteltu talous taloudeksi A ja taulukossa 5.8 tarkasteltavaa taloutta taloudeksi B. Verrattaessa taloutta A talouteen B, A:n kulutus oli selvästi piikkikämpää. Vertailun vuoksi molempien talouksien vuoden tunnitset kulutukset asetettiin kuvaajaan suuruusjärjestykseen. Kuvaajista pyrittiin etsimään korrelaatiota akkuvaraston hankinnan kannattavuuteen. Talouden A ja B kulutuskuvaajat näkyvät kuvissa 5.2 ja 5.3.



Kuva 5.2

Talous A:n kulutus suuruusjärjestyksessä, $P_{max} = 10,28 \text{ kW}$



Kuva 5.3

Talous B:n kulutuskäyrä suuruusjärjestyksessä, $P_{max} = 4,99 \text{ kW}$

Suurimman tehopiikin koon lisäksi muita eroja kuvaajissa on mm. 500. tunnin kohdalla olevan tehopiikin suhde P_{max} -arvoon. Kuvassa 5.2 sen suhde on noin 0,15 ja kuvassa 5.3 se on noin 0,2. Tästä voimme päätellä, että talouden B kulutuskäyrässä on enemmän lähellä P_{max} -arvoa olevia tehopiikkejä. Aiemmat taulukot huomioon ottaen voidaan siis päätellä, että akkuvaraston käyttö on suotuisampaa taloudelle, jossa lähellä P_{max} -arvoa olevia tehopiikkejä on vähän.

6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä tutkitaan akkujärjestelmän kannattavuutta omakotitaloissa. Kannattavuutta selvitetään itse kirjoitetun Matlab-ohjelman sekä litiumrautafosfaattiakkujen markkina- ja teknis-taloudellisen analyysin avulla. Tarkasteltavien talouksien sijainti on Etelä-Suomessa.

Työssä havaitaan, että nykypäivänä li-ion akkujärjestelmän käyttö talouden tehopiikkien leikkauksiin ei ole vielä kannattavaa. Jotta tämä olisi kannattavaa, on akkujen hinnan tiputtava vielä vähintään puoleen nykyisestä ja sähkönperusmaksun on noustava kaksinkertaiseksi. Tämäkin vain tilanteissa, jossa talouden tehopiikkien vaihtelut ovat suuria, ja jonka suurimmat tehopiikit ovat harvassa.

Sähkön kulutus ja akun käyttö simuloidaan Matlab-ohjelmalla. Simuloinnin suurin virhe syntyyneen akun vuosittaisten syklien ja akkuun ladatun energian määrässä, sillä simuloinnissa käytetty akun hyötysuhde ei ole tarkkaan määritelty arvo vaan arvioitu lukema.

LÄHTEET

A. Manthiram *, A. Vadivel Murugan , A. Sarkar and T. Muraliganth, Nanostructured electrode materials for electrochemical energy storage and conversion, [verkkodokumentti]. [Viitattu 3.9.2015] Saatavissa: <http://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2008/ee/b811802g>

Atlantechsolar, Types of photovoltaic solar panels [verkkodokumentti]. [viitattu 9.12.2014]. Saatavissa http://www.atlantechsolar.com/types_photovoltaic_solar_panels.html

Batteryspace, litiumrautafosfaattiakkujen hintatietoja. [viitattu 22.12.2014]. Saatavissa <http://www.batteryspace.com/lifepo4batterypacks.aspx>

Battery University, BU-205: Types of Lithium-ion [verkkodokumentti]. [viitattu 4.12.2014]. Saatavissa http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion

Björn Nykvist & Måns Nilsson, Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles, Nature climate Change, [verkkodokumentti], [viitattu 13.9.2015], saatavissa: <http://www.nature.com/nclimate/journal/v5/n4/full/nclimate2564.html>

Brad Plumer, Expensive batteries are holding back electric cars. Can that change?, The washington post, [verkkodokumentti], [viitattu 21.8.2015], saatavissa: <http://www.washingtonpost.com/news/wonkblog/wp/2013/04/02/expensive-batteries-are-holding-back-electric-cars-what-would-it-take-for-that-to-change/>

Chil-Hoon Doh and Angathevar Veluchamy, Thermo-chemical process associated with lithium cobalt oxide cathode in lithium ion batteries [verkkodokumentti]. [viitattu 14.7.2015]. Saatavissa <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/10407.pdf>

Electway-store, litiumrautafosfaattiakkujen hintatietoja. [viitattu 22.12.2014]. Saatavissa http://www.electway-store.com/index.php?main_page=index&cPath=79

Energy informative, Which Solar Panel Type is Best? Mono- vs. Polycrystalline vs. Thin Film, verkkodokumentti. [viitattu 9.12.2014]. Saatavissa <http://energyinformative.org/best-solar-panel-monocrystalline-polycrystalline-thin-film/>

Lithiumion-batteries, litiumrautafosfaattiakkujen hintatietoja. [viitattu 22.12.2014]. Saatavissa <http://www.lithiumion-batteries.com/products/12-volt-lithium-ion-batteries/>

Litrade, litiumrautafosfaattiakkujen hintatietoja. [viitattu 22.12.2014]. Saatavissa <http://litrade.de/shop/Akkus-Zubehoer/Thundersky-Winston-LiFeYPo4/>

Lipopower, litiumrautafosfaattiakkujen hintatietoja. [viitattu 22.12.2014]. Saatavissa <http://shop.lipopower.de/CALB-Sky-Energy> sekä http://shop.lipopower.de/Winston_1

Li-ion Battery Model, Octavio Salazar, verkkodokumentti. [viitattu 14.6.2015] Saatavissa <http://cseweb.ucsd.edu/~trosing/lectures/battery.pdf>

Nothnagel-Marine, litiumrautafosfaattiakkujen hintatietoja. [viitattu 22.12.2014]. Saatavissa http://www.nothnagel-marine.de/index.php?cat=c255_LiFePO4-Lithium-Batteries.html

Photovoltaik4all, Axitec AXIpower AC-250P poly aurinkopaneelin hintatiedot [verkkodokumentti]. [viitattu 5.12.2014]. Saatavissa <http://www.photovoltaik4all.de/en/pv4all-grid/solarpanels/axitec-solar/87/axitec-axipower-ac-250p-poly?c=192>

Pingbattery, litiumrautafosfaattiakkujen hintatietoja. [viitattu 22.12.2014]. Saatavissa <http://www.pingbattery.com/>

LIITTEET

Ah	Jännite [V]	Hinta [€]	kWh	€/kWh
20	12,8	139	0,256	542,97
40		229	0,512	447,27
60		329	0,768	428,39
90		479	1,152	415,80
100		719	1,28	561,72
160		1099	2,048	536,62
200		1279	2,56	499,61

Taulukko 3.1. Nothnagel-marine.de sivuston 12,8 V akkujen hintatietoja.

Ah	Jännite [V]	Hinta [€]	kWh	€/kWh
40	3,2	58,25	0,128	455,08
60		79,9	0,192	416,15
90		127,15	0,288	441,49
100		140,73	0,32	439,78
160		232,14	0,512	453,40
200		274,54	0,64	428,97
300		409	0,96	426,04
400		566	1,28	442,19

Taulukko 3.2. Nothnagel-marine.de sivuston 3,2 V akkujen hintatietoja.

Ah	Jännite [V]	Hinta [€]	kWh	€/kWh
40	3,2	54	0,128	421,88
60		93	0,192	484,38
70		101,5	0,224	453,13
300		405	0,96	421,88
400		620	1,28	484,38

Taulukko 3.3. Verkkokauppa shop.lipopower.de akkujen hintatietoja.

Ah	Jännite [V]	Hinta [€]	kWh	€/kWh
15	3,2	29,95	0,048	623,96
20		29,5	0,064	460,94
40		59	0,128	460,94
60		88	0,192	458,33
90		132,99	0,288	461,77
100		146	0,32	456,25

Taulukko 3.4. Sivun litrade.de akkujen hintatietoja.

Ah	Jännite [V]	Hinta [\$]	Hinta [€]	kWh	€/kWh
10	24	219	175,2	0,24	730,00
15		308	246,4	0,36	684,44
20		378	302,4	0,48	630,00
30		545	436	0,72	605,56
10	36	318	254,4	0,36	706,67
15		423	338,4	0,54	626,67
20		518	414,4	0,72	575,56
36		811	648,8	1,296	500,62
10	48	382	305,6	0,48	636,67
15		533	426,4	0,72	592,22
20		658	526,4	0,96	548,33
30		1053	842,4	1,44	585,00
10	60	512	409,6	0,6	682,67
15		693	554,4	0,9	616,00
20		905	724	1,2	603,33
30		1385	1108	1,8	615,56

Taulukko 3.5. Pingbattery.com sivun akkujen hintatietoja.

Ah	Jännite [V]	Hinta [\$]	Hinta [€]	kWh	€/kWh
8	3,2	11	8,8	0,0256	343,75
9		12	9,6	0,0288	333,33
10		13	10,4	0,032	325,00
12		15	12	0,0384	312,50
20		23	18,4	0,064	287,50

Taulukko 3.6. Verkkokaupan electway-store.com akkujen hintatietoja.

Ah	Jännite [V]	Hinta [\$]	Hinta [€]	kWh	€/kWh
20	12	290	232	0,24	966,67
40		580	464	0,48	966,67
50		690	552	0,6	920,00
75		1000	800	0,9	888,89
80		1050	840	0,96	875,00
100		1300	1040	1,2	866,67
150		1900	1520	1,8	844,44
200		2400	1920	2,4	800,00
300		3500	2800	3,6	777,78

Taulukko 3.7. Verkkokauppa lithiumion-batteries.com akkujen hintatietoja

Ah	Jännite [V]	Hinta [\$]	Hinta [€]	kWh	€/kWh
10	12	140	112	0,12	933,33
15		200	160	0,18	888,89
20		200	160	0,24	666,67
25		260	208	0,3	693,33
20	12,8	124	99,2	0,256	387,5
25		260	208	0,32	650
32		400	320	0,4096	781,25
40		240	192	0,512	375
60		360	288	0,768	375
100		610	488	1,28	381,25
200		1470	1176	2,56	459,375

Taulukko 3.8. Verkkokauppa batteryspace.com akkujen hintatietoja.

```

% Kandityö, © Joonas Ihalainen

clear all
close all

% parametrejä
pt = 0; % paneelien teho [kW]
pl = 1; % piikin leikkaus [kW]
akun_hyotysuhde = 0.9;

PM_kerroin = 3; %Perusmaksun kerroin
syklit = 2000;
Akun_investointihinta = 100; % €/kWh
Akun_elinika = 15; % vuotta

%%
% Luetaan sähkön kulutus excel-tiedostosta.
SK = xlsread('Killenkuja8SK_JoonasIhalainen.xlsx','B3557:B3657'); % koko vuosi
A1:A8760 Killenkuja8SK_JoonasIhalainen
l_SK = length(SK); % edellinen
B7:B8766
x = 0:l_SK-1;

% Luetaan sähkön keskimääräinen tuotto excel-tiedostosta.
% Ref-muuttujat ovat excelistä poimittuja vertailuarvoja, joden avulla
% lasketaan parametrilla pt määritellyn aurinkovoimalan tuotto vertailtavan
% voimalan olosuhteissa.
if pt > 0
    ref_ST = xlsread('Kandi_Excel_JoonasIhalainen','Tuotanto','B3557:B3657'); %koko
    vuosi B7:B8766
    ref_nimellisteho = xlsread('Kandi_Excel_JoonasIhalainen','Tuotanto','B4');
    l_ST = length(ref_ST); % Muuttujien l_SK ja l_ST tulisi olla yhtäsuuria, sillä
    % ST ja SK piirretään samaan kuvaajaan.
    ST = pt./(ref_nimellisteho./1000).*ref_ST;
else
    ST = zeros(l_SK,1);
    l_ST = length(ST);
end

if l_SK ~= l_ST
    error('Vektorien SK ja ref_ST on oltava samanpituisia.')
end

%%

Balance = SK - ST;
% Piirretään sähkönkulutus, -tuotanto ja -summakäyrä.
set(figure,'name','Kulutus ja tuotanto','Position',[25 550 1100 400])
% plot(x,SK,'r')
% bar(x,SK,1,'r','EdgeColor','none')
grid on
hold on
% plot(x,ST,'g')

```



```

% for i = 1:L2
%     purku = Balance(piikin_paikka(i)) - p1;
%     akku(i) = purku;
% end

% Lasketaan saatavilla oleva tunnittainen latauskapasiteetti ja tehdään saaduista
% arvoista vektori lataus_k. Teho, jolla akkua voidaan ladata ylittämättä haluttua
% rajaa on "kulutuksen maksimiarvo" - ("kulutus" - "tuotanto").
lataus_k = zeros(1,l_SK);
for i = 1:l_SK
    lataus = p1 - Balance(i);
    lataus_k(i) = lataus;
end

% Määritetään kokonaislatauskapasiteetti ennen jokaista piikin alkua
% laskemalla yhteen piikkien välissä käytettävissä oleva teho.
L3 = length(piikin_alku);
latauskapasiteetti_ideaalinen = zeros(1,L3+1);
for i = 1:L3
    summa = 0;
    % Lasketaan ensimmäistä piikkiä edeltävä latauskyky.
    if i == 1
        for j = 1:piikin_alku(i)
            if lataus_k(j) > 0
                summa = summa + lataus_k(j);
            end
        end
        latauskapasiteetti_ideaalinen(i) = summa;

    else
        for k = piikin_alku(i-1):piikin_alku(i)
            if lataus_k(k) > 0
                summa = summa + lataus_k(k);
            end
        end
        latauskapasiteetti_ideaalinen(i) = summa;
    end
end

% Lisätään latauskapasiteetti-vektroiin viimeisen piikin jälkeinen
% latauskapasiteetti.
summa = 0;
for i = piikin_alku(end):length(SK)
    if lataus_k(i) > 0
        summa = summa + lataus_k(i);
    end
end
latauskapasiteetti_ideaalinen(end) = summa;

% Lasketaan, kuinka paljon akkuun mahdollisesti syötettävästä virrasta
% voidaan saada takaisin
latauskapasiteetti = akun_hyotysuhde * latauskapasiteetti_ideaalinen;

% Laketaan piikkien kokonaiskulutus. Lasketaan yli tunnin mittaisten
% kulutuspiikkien kokonaiskulutus yhteen ja lisätään saadut lukuarvot

```



```

% vektoriin.
i = 1;
j = 1;
akun_kaytto = zeros(1,L3);
while i <= L2
    % Laitetaan ensimmäinen kulutusrajan (pl) ylittävä arvo muistiin
    akkuvirran_kaytto = Balance(piikin_paikka(i)) - pl;
    % Jos seuraavakin arvo ylittää kulutusrajan, summataan se muistissa
    % olevaan arvoon
    try
        while piikin_paikka(i+1) == piikin_paikka(i)+1
            akkuvirran_kaytto = akkuvirran_kaytto + Balance(piikin_paikka(i+1)) -
pl;
                i = i+1;
        end
        % Jos kyseessä on viimeinen kulutusrajan ylittävä arvo, estetään
        % indeksointivirhe catch-komennolla ja lisätään viimeinen muuttujan
        % kok_kulutus-arvo vektoriin akun_kaytto.
        catch
            akun_kaytto(j) = akkuvirran_kaytto;
            i = i+1;
            break
        end
        akun_kaytto(j) = akkuvirran_kaytto;
        i = i+1;
        j = j+1;
    end
end

% Lasketaan tarvittava akun koko. Määritetään akun minimikooksi suurimman
% piikin käyttämä teho.
Varaus_Temp = max(akun_kaytto); % Välimuuttuja
Varaus_ref = max(akun_kaytto);

% For-lauseen sisällä akkua puretaan piikki
% kerrallaan. Jos akun varaus menee negatiiviseksi, lisätään tämä
% negatiivisen arvon itseisarvo akun maksimikokoon ja asetetaan akun varaus
% nolllaksi. Piikin jälkeen akkua ladataan piikin edessä olevan
% latauskapasiteetin verran aina akun maksimivaraukseen asti.
for i = 1:L3
    Varaus_Temp = Varaus_Temp - akun_kaytto(i);
    if Varaus_Temp < 0
        Varaus_ref = Varaus_ref - Varaus_Temp;
        Varaus_Temp = 0;
    end
    Varaus_Temp = Varaus_Temp + latauskapasiteetti(i+1);
    if Varaus_Temp > Varaus_ref
        Varaus_Temp = Varaus_ref;
    end
end

Tarvittava_akkukapasiteetti = Varaus_ref;
latauskapasiteetti;
akun_kaytto;
% Akun_koko

%%

```

```

[Tarvittava_akkukapasiteetti_V,pl_V] = Akun_kokokayra(Balance,SK,...
    akun_hyotysuhde,l_SK,x);
set(figure,'name','Akku/Piikki','Position',[1200 550 600 400])
plot(Tarvittava_akkukapasiteetti_V,max(pl_V)-pl_V)
grid on
axis tight
set(gca,'FontSize',11)
ylabel('Piikin huipunleikkaus [kW]')
xlabel('Tarvittava akkukoko [kWh]')

[ladattu_teho_V,purettu_teho_V,pl_V] = Akuun_ladattava_teho(Balance,SK,...
    akun_hyotysuhde,l_SK,x);
set(figure,'name','Akkuun ladattu teho','Position',[1200 50 600 400])
plot(ladattu_teho_V,max(pl_V)-pl_V,'b')
legend('Akkuun ladattu energia','Location','Best')
grid on
axis tight
set(gca,'FontSize',11)
ylabel('Piikin huipunleikkaus [kW]')
xlabel('Energia [kWh]')

[Investointi_Hinta, syklihintaa, syklien_maara_vuodessa, Annuiteetti,...
    Vaihtovalii,elinika] = Akku_kustannukset( syklit, Akun_investointihinta,...
    Tarvittava_akkukapasiteetti, length(SK), akun_kaytto, Akun_elinika);

sprintf('Tarvittava akkukapasiteetti piikejä \nleikattaessa %d kW kohdalta: %0.2f
kWh.\nAkun lataushyötysuhde on %0.2f'
,pl,Tarvittava_akkukapasiteetti,akun_hyotysuhde)
if Vaihtovalii == Akun_elinika
    sprintf('Akun investointihinta on %0.2f €\nLataus-/purkusyklien määrä vuodessa:
%0.2f\nOlettaen akun vanhenevan %d vuoden kuluessa,\naku ehtii käymään läpi %0.2f
lataus-/purkusykliä.\nYhden lataus-/purkusyklin hinnaksi %0.2f €\nAkun annuiteetti:
%0.2f €\nAkku tulee vaihtaa %0.2f vuoden vä-
lein',Investointi_Hinta,syklien_maara_vuodessa, Akun_elinika, elinika, syklihintaa,
Annuiteetti, Vaihtovalii)
else
    sprintf('Akun investointihinta on %0.2f €\nLataus-/purkusyklien määrä vuodessa:
%0.2f\nAkun kestäessä %d lataussykliä, tulee\nyhden lataus-/purkusyklin hinnaksi
%0.2f €\nAkun annuiteetti: %0.2f €\nAkku tulee vaihtaa %0.2f vuoden vä-
lein',Investointi_Hinta,syklien_maara_vuodessa, syklit, syklihintaa, Annuiteetti,
Vaihtovalii)
end
sprintf('Suurin kulutus/h: %0.2f kWh',max(SK))

% sum(akun_kaytto)/akun_hyotysuhde

%% Excel-tiedostoon kirjoitus
perusmaksu = [26.78 30.97 35.21 39.47 43.77 48.10 52.47 56.87 61.30 65.77
70.27].*PM_kerroin;
% [a_v_s] = saastot( pl,SK,perusmaksu,Annuiteetti );
% Vektori = [perusmaksu(pl) pl Tarvittava_akkukapasiteetti Akun_investointihinta
Investointi_Hinta Annuiteetti syklien_maara_vuodessa
sum(akun_kaytto)/akun_hyotysuhde a_v_s];
% tiedosto = 'Kandi_dataa.xlsx';
% Kirjoita_tiedostoon(Vektori,tiedosto)

```

```

%%

T_A = Tarvittava_akkukapasiteetti;
Balance_New = Balance;
vajaa_akku = T_A;

% Rakennetaan uusi summakäyrä piikkien leikkaamisen jälkeen

for i = 1:L3
    % Määritellään vajaan akun kW määrä.
    vajaa_akku = vajaa_akku - akun_kaytto(i);
    mahd_ladattavuus = T_A - vajaa_akku;
    try
        for j = piikin_alku(i):piikin_alku(i+1)

            % Jos kahden piikin välissä on latauskapasiteettia (lataus_k) ja akku
ei
            % ole ladattu täyteen, käytetään tämä teho akun lataamiseen ja
            % muutetaan kulutuksen summavektoria asian mukaisesti.
            if lataus_k(j) > 0 && vajaa_akku < T_A

                % Jos käytettävissä oleva latauskapasiteetti on suurempi,
                % mitä akkuun voi ladata, ladataan akkua vain tarvittava
                % määrä.
                if mahd_ladattavuus < akun_hyotysuhde * lataus_k(j)
                    mahd_ladattavuus/akun_hyotysuhde;
                    vajaa_akku = T_A;

                    Balance_New(j) = Balance_New(j) +

                % Muutoin käytetään kaikki latauskapasiteetti akun
                % lataamiseen.
                else
                    vajaa_akku = vajaa_akku + akun_hyotysuhde * lataus_k(j);
                    mahd_ladattavuus = T_A - vajaa_akku;
                    Balance_New(j) = pl;
                end

                % Jos latauskapasiteetti on negatiivinen, tarkoittaa se
                % kulutusrajan ylittävää piikinpaikkaa. Tällöin rajan
                % ylitettävä virta otetaan akusta ja verkkosta otettu teho jää
                % pl-vakion (määritetty ohjelman alussa) tasolle.
                elseif lataus_k(j) < 0
                    Balance_New(j) = pl;
                end
            end
        end

        % Catch komento viimeistä piikkiä varten; laskee saman asian viimeisen
        % piikin jälkeen tapahtuvalle summakäyrälle käyrälle, kuin mitä
        % ylempänä lasketaan piikkien välissä.
    catch
        for j = piikin_alku(i):length(Balance_New)
            if lataus_k(j) > 0 && vajaa_akku < T_A
                if mahd_ladattavuus < akun_hyotysuhde * lataus_k(j)
                    mahd_ladattavuus/akun_hyotysuhde;
                    Balance_New(j) = Balance_New(j) +
                end
            end
        end
    end
end

```

```

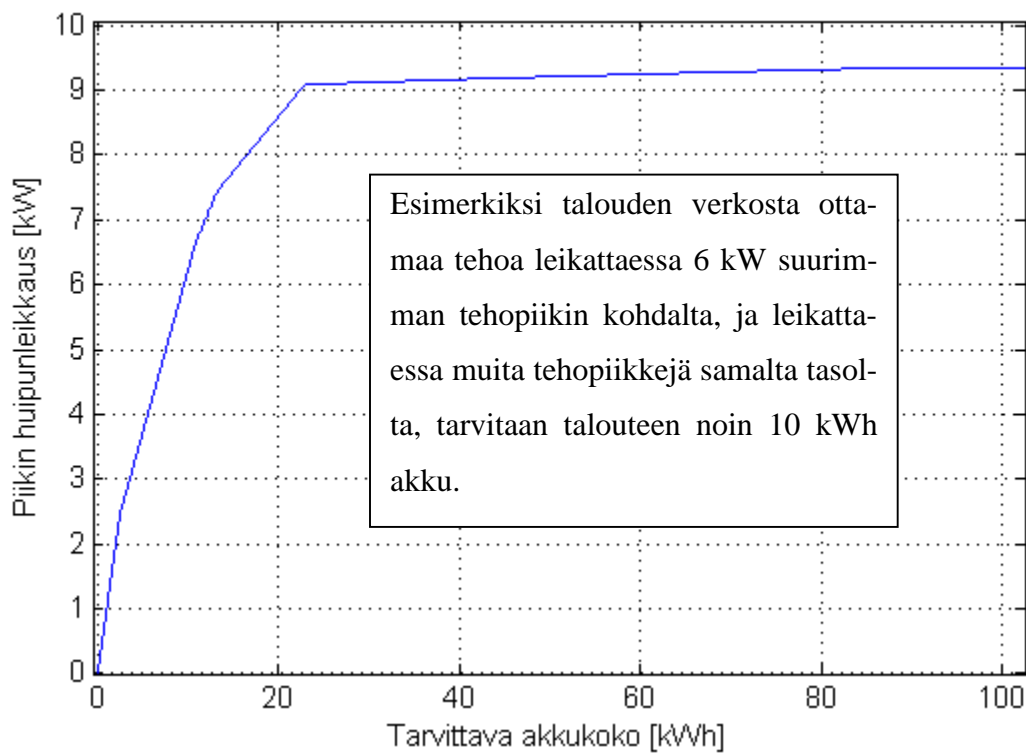
        vajaa_akku = T_A;
    else
        vajaa_akku = vajaa_akku + akun_hyotysuhde * lataus_k(j);
        mahd_ladattavuus = T_A - vajaa_akku;
        Balance_New(j) = pl;
    end
elseif lataus_k(j) < 0
    Balance_New(j) = pl;
end
end
end
end

% Piirretään uusi kaunis kulutuskäyrä erilliseen kuvaajaan =)
figure('name','Verkosta otettu teho piikin leikkauksen jälkeen',...
    'Position',[25 50 1100 400])

bar(x,Balance_New,1,'b')
set(gca,'FontSize',11)
ylabel('[kWh]')
xlabel('[h]')
grid on
axis([x(1) x(end) yLimits(1) yLimits(2)])

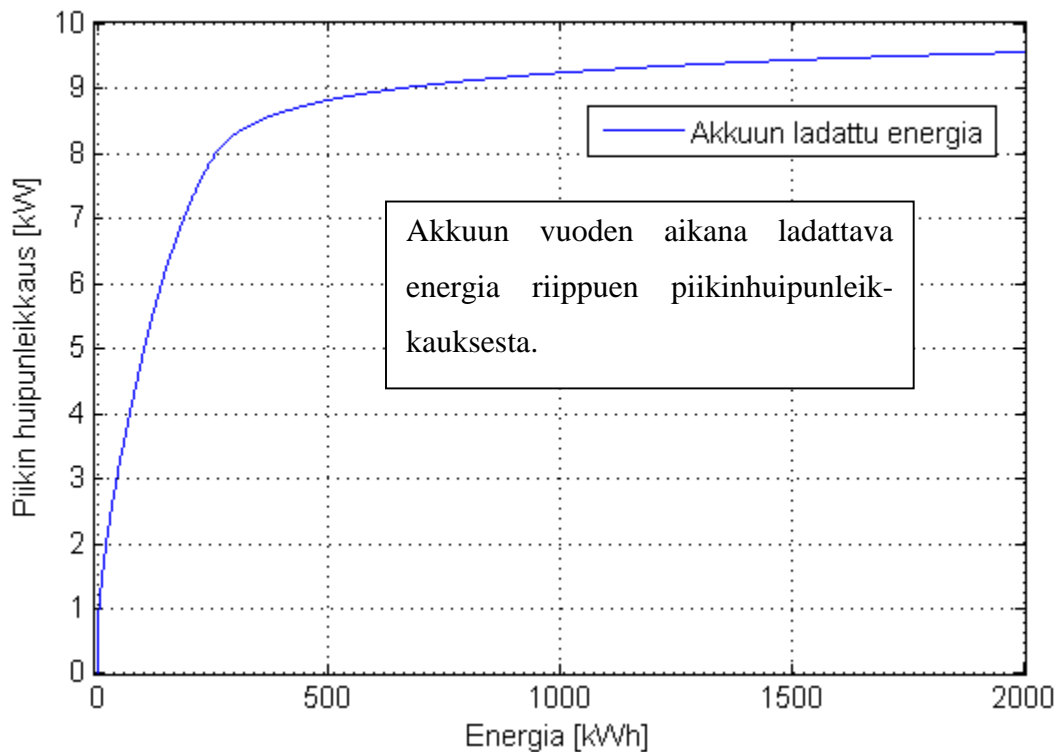
figure('name','Kulutus Shcraiba')
sortSK = sort(SK,'descend');
bar(x,sortSK,1,'b')
ylabel('[kWh]')
xlabel('[h]')
axis tight
grid on
% close all
% eof

```



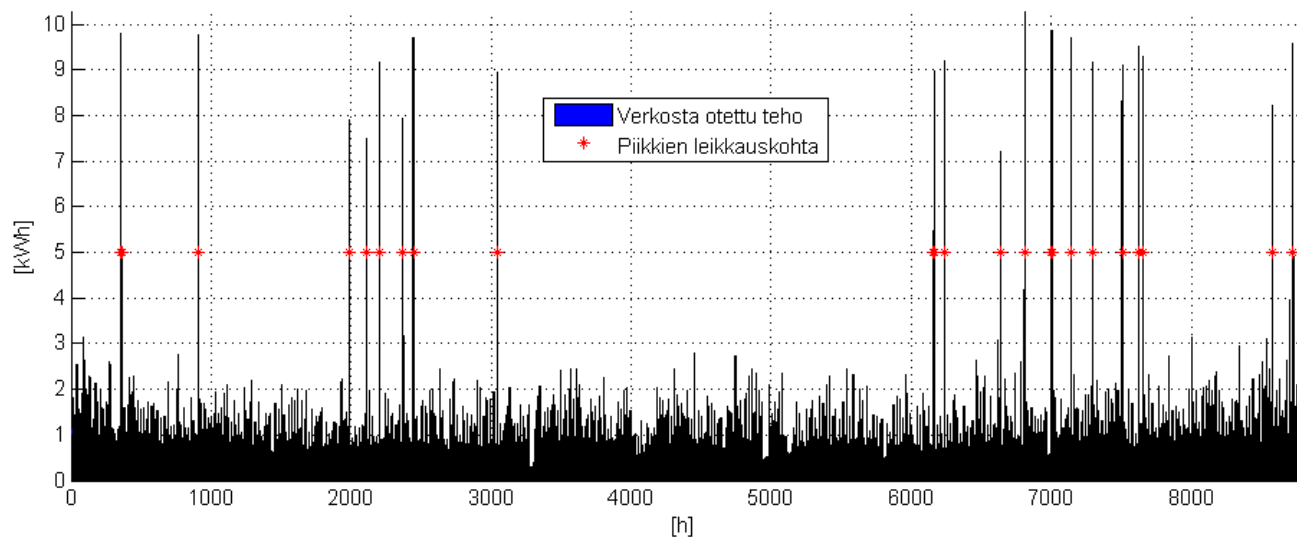
Kuva III.1

Akkukoon suhde piikinhuipunleikkauksen määrään.

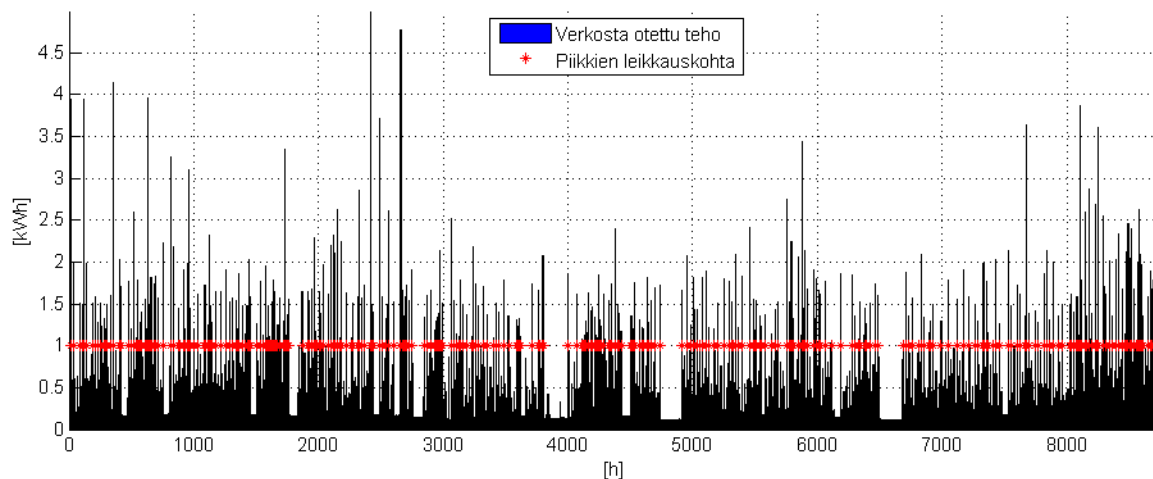


Kuva III.2

Akkuun ladattavan energian suhde piikinhuipunleikkauksen määrään.

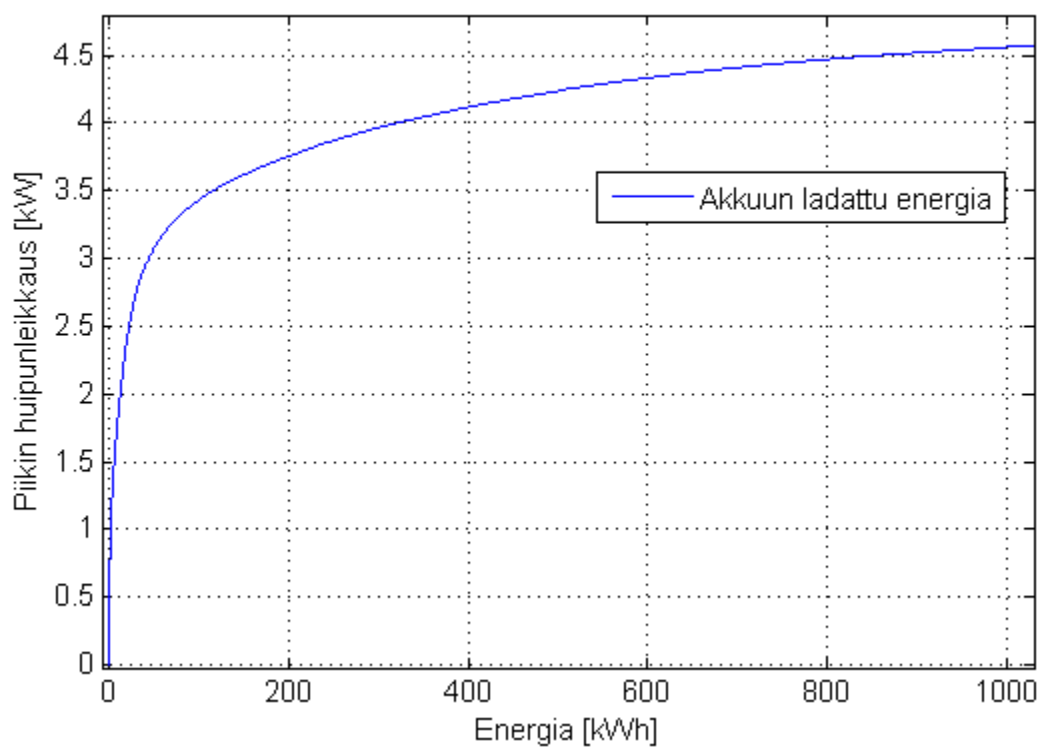


Kuva III.3 Talouden tunnitainen vuoden kulutuskuvaaja ohjelman leikatessa tehopiikkejä 5 kW tasolta.



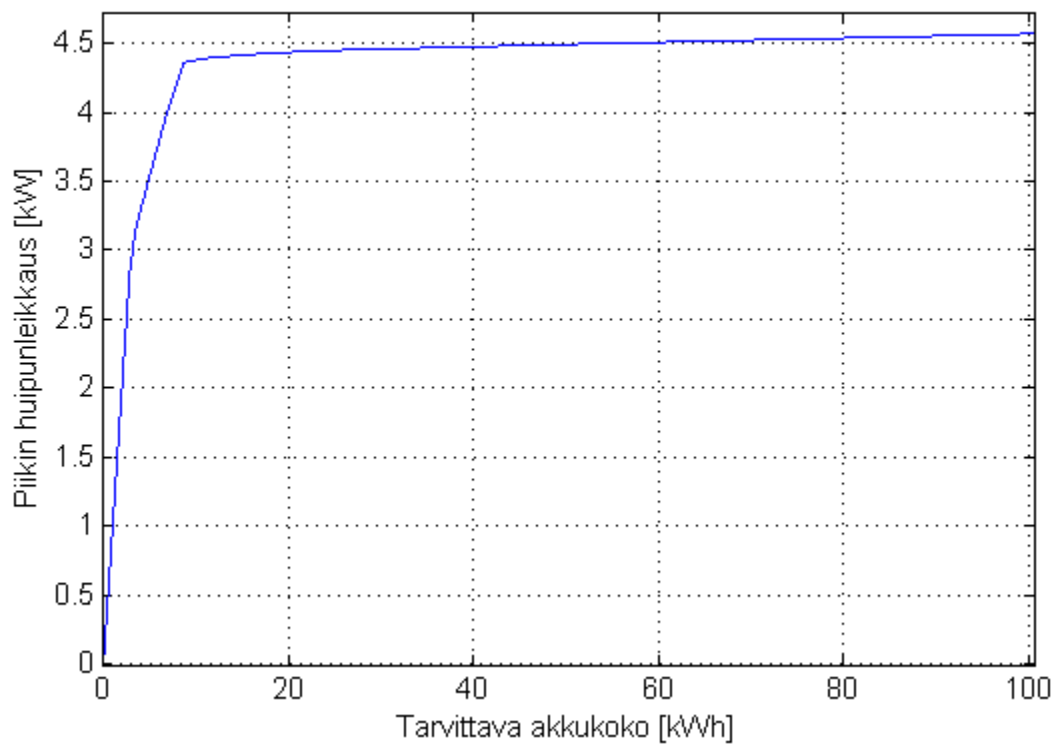
Kuva IV.1

Erään talouden kulutusikäyrä.

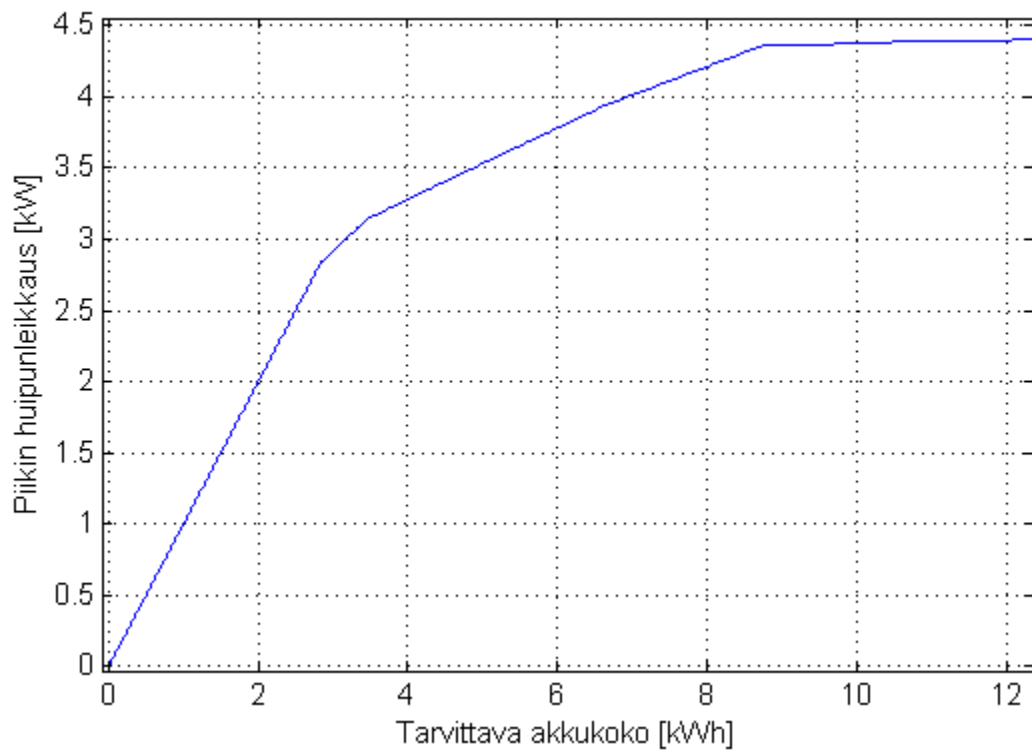


Kuva IV.2

Akkun ladattu energia suhteessa tehopiikin huipunleikkauksen määrään.



Kuva IV.3 Tarvittava akkukoko suhteessa piikinhuipunleikkaukseen.



Kuva IV.4 Tilanne kuvasta IV.3 pienemmällä x-akselin välillä.