

JUHO SULIN
SÄHKÖVERKOSTA RIIPPUMATTOMIEN AURINKOSÄHKÖ-
JÄRJESTELMIEN LATAUS- JA KUORMASÄÄTIMEN UUSIMINEN

Diplomityö

Tarkastajat: professori Seppo Val-
kealahti ja apulaisprofessori Tuomas
Messo
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
29. elokuuta 2018

TIIVISTELMÄ

JUHO SULIN: Sähköverkosta riippumattomien aurinkosähköjärjestelmien lataus- ja kuormasäätimen uusiminen

Tampereen yliopisto

Diplomityö, 77 sivua, 6 liitesivua

Huhtikuu 2019

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Vaihtoehtoiset sähköenergiateknologiat

Tarkastajat: professori Seppo Valkealahti ja apulaisprofessori Tuomas Messo

Avainsanat: lataussäädin, kuormasäädin, sähköverkosta riippumaton, aurinkosähkö

Työn päätavoitteita ovat sähköverkosta riippumattomien aurinkosähköjärjestelmien lataus- ja kuormasäätimiin perehtyminen sekä yhden sellaisen uusiminen. Uusimisen kohteena olevan säätimen elektroniikan päivitysmahdollisuuksien selvityksen perusteella päädytään lopulta korvaavan säätimen valintaan. Työ tehtiin *Naps Solar Systemsille*.

Työn ensimmäinen osa koostuu kirjallisuusselvityksestä, joka aloitetaan tutustumalla aurinkosähköön ja akkujen tarpeellisuuteen sähköverkosta riippumattomissa aurinkosähköjärjestelmissä. Seuraavaksi käsitellään akkujen toimintaa ja elinikää osana aurinkosähköjärjestelmää. Lopuksi perehdytään erilaisiin akkuja suojeleviin lataus- ja kuormasäätimiin sekä niiden ominaisuuksiin ja säätötekniikoihin. Työn ensimmäinen osan aineistona käytetään pääosin alan kirjallisuutta, tutkimuksia, aikakauslehtien artikkeleita ja raportteja.

Työn toinen osa koostuu *Naps Solar Systemsin* vanhan lataus- ja kuormasäätimen *MMini Pron* uusimisesta. Aluksi selvitetään *MMini Pron* elektroniikan päivitysmahdollisuuksia, minkä perusteella päädytään valitsemaan korvaava säädin markkinoilta. Valinta tehdään vertailemalla ominaisuuksiltaan sopivia säätimiä. Työn toisen osan aineistona käytetään pääosin *Naps Solar Systemsin* nykyisten ja entisten työntekijöiden haastatteluiden tuloksia, elektroniikan komponentteja myyviä sivustoja sekä säädinten datalehtiä ja ohjekirjoja.

MMini Pron elektroniikan päivitysmahdollisuuksien selvityksen perusteella joidenkin komponenttien saatavuus on huono tai valmistus lopetettu. Suurimmaksi ongelmaksi muodostuu mikrokontrollerin (MCU) uusiminen. Yksi vaihtoehto olisi valita uudempi MCU samasta tuoteperheestä, jolloin *MMini Prolle* tehdyn ohjelmoinnin hyödyntäminen voisi onnistua. Se osoittautuu kuitenkin epävarmaksi ja mahdollisesti lyhytaikaiseksi ratkaisuksi. Toinen vaihtoehto olisi valita nykyaikainen MCU, jolloin päivitys olisi pitkäikäisempi. Se kuitenkin johtaisi lähes koko säätimen uudelleensuunnitteluun ja olisi diplomityön puitteissa liian suuritoinen ratkaisu. Päädytään siis valitsemaan *MMini Prolle* korvaava säädin, joksi vertailun perusteella ehdotetaan *Morningstarin SunSaver*-säätimiä.

ABSTRACT

JUHO SULIN: An upgrade of the charge and load controller used in off-grid photovoltaic power systems

Tampere University

Master of Science Thesis, 77 pages, 6 Appendix pages

April 2019

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Alternative Electrical Energy Technologies

Examiners: Professor Seppo Valkealahti and assistant professor Tuomas Messo

Keywords: charge controller, load controller, off-grid, photovoltaic power

The main objectives of the thesis are to become familiar with the off-grid photovoltaic power systems' charge and load controllers and to upgrade one such controller. Based on the investigation on the controller's electronics' upgrade options the decision of selecting a replacement controller was made. The thesis was done for *Naps Solar Systems*.

The first part of the thesis consists of a literature review that begins with the introduction of solar power and the necessity of batteries in off-grid photovoltaic power systems. Next the battery operation and lifetime are discussed as part of the photovoltaic systems. Lastly the various charge and load controllers are introduced along with their features and control techniques. The material used in the first part of the thesis consists mainly of literature in the field, studies, articles and reports.

The second part of the thesis comprises the upgrade of the *Naps Solar Systems*' old charge and load controller *MMini Pro*. At first the *MMini Pro*'s electronics' upgrade options are investigated which leads to the decision of selecting a replacement controller from the market. The selection is made by comparing commercial controllers with the suitable properties. The material used in the second part of the thesis consists mainly of the results of the interviews with the current and the former employees of *Naps Solar Systems*, the web sites of electronic components and the data sheets and the manuals of controllers.

The investigation of the *MMini Pro*'s electronics' upgrade options revealed that the availability of some of the components is limited or discontinued. The biggest problem turns out to be the upgrading of the microcontroller (MCU). One option could be the choosing of a newer MCU from the same product family in order to utilize the programming of the *MMini Pro*. However, that turns out to be an uncertain and possibly a short-term solution. Another option could be the choosing of a modern MCU which would be a longer lasting solution. However, that would lead to the redesigning of almost the whole controller which would be too demanding for a thesis. So, the decision of selecting a replacement controller for *MMini Pro* is made. Based on the comparison the *Morningstar*'s *SunSaver* controllers are recommended as the replacement.

ALKUSANAT

Kiinnostukseni uusiutuvaan energiaan, ja etenkin aurinkosähköön, heräsi kesken yliopisto-opintojeni ja pääaineenani ollut elektroniikka vaihtui vaihtoehtoiseen sähköenergiateknologioihin. Siitä lähtien aloin elätellä toiveita aurinkosähköön liittyvästä diplomityöstä. Myöhemmin diplomityöpaikkaa etsiessäni sain kuitenkin huomata, että aurinkosähköön liittyvän diplomityöpaikan löytyminen ei ollut itsestään selvää. Päädyin hakemaan paikkaa ympäri Suomea ja harkitsin myös diplomityön tekemistä yliopistolle. Lopulta minulle onneksi tarjottiin diplomityöpaikkaa Salosta ja Helsingistä. Molemmat tarjoukset olivat kiinnostavia, mutta *Naps Solar Systemsin* historia merkittävänä aurinkosähkötoimijana sai minut muuttamaan Helsinkiin.

Olen erittäin kiitollinen tästä mahdollisuudesta *Naps Solar Systemsille* ja työni ohjaajana toimineelle tekniikan tohtorille ja yrityksen teknologiajohtajalle Mikko A. Juntuselle. Ensinnäkin hän tarjosi työn aiheen ja auttoi myöhemmin sen rajaamisessa. Erityisesti häneltä saadut tarkat kommentit kannustivat perehtymään joihinkin työn alueisiin entistä perusteellisemmin ja eri näkökulmista. Olen todella kiitollinen myös kaikille muille *Naps Solar Systemsin* työntekijöille, jotka toivottivat minut lämpimästi tervetulleeksi sekä tarjosivat hyvän työyhteisön ja apunsa tarvittaessa. Erityiskiitos myös yrityksen entisille työntekijöille Asko Rasinkoskelle ja Arne Kakkoselle sekä nykyisille työntekijöille Hemmo Saliselle ja Reijo Takalalle, joiden tarjoamat tiedot ja kokemus olivat arvokkaita *MMini Pron* uusimisessa. Kiitos myös Risto Ant-Wuoriselle, joka jakaa kiinnostukseni sähköverkosta riippumattomien aurinkosähköjärjestelmien maailmaan, johon olen hänen kauttansa päässyt tutustumaan yhä paremmin.

Tampereen yliopistolle, jonka tulen aina muistamaan Tampereen teknillisenä yliopistona, olen kiitollinen mahdollisuudesta opiskella mielenkiintoisia aineita sekä vaihto-opiskelusta Taiwanissa, mikä on yksi elämäni hienoimpia kokemuksia. Erityiskiitos työn tarkastajille apulaisprofessori Tuomas Messolle ja professori Seppo Valkealahdelle, joka ohjeisti myös diplomityöpaikan valinnassa sekä antoi kommentteja työstä sen tekoprosessin aikana. Kiitokset myös Tampereen teknillisen yliopiston tukisäätiölle diplomityöapurahasta sekä yliopistolla vaihtoehtoisia sähköenergiateknologioita innostavasti luennoineille Aki Korpelalle ja Risto Mikkoselle.

Suuri kiitos myös avopuolisolleni Auni Häggmanille, joka muutti kanssani Helsinkiin, on ollut tukenani, hoitanut kotia sekä huolehtinut, että saan riittävästi unta ja ruokaa silloin, kun diplomityön teko on täyttänyt elämäni. Tuesta ja ohjeista kiitokset myös perheelleni ja ystäväilleni, jotka tarjosivat lisäksi tarpeellista vastapainoa työnteolle. Yksin tehtynä työ olisi epäilemättä ollut huomattavasti raskaampi.

Helsingissä, 19.3.2019

Juho Sulin

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	AURINKOSÄHKÖ	3
2.1	Auringon säteilyenergia	3
2.2	Puolijohteet	5
2.2.1	p- ja n-tyypin puolijohteet	8
2.2.2	pn-liitos.....	10
2.3	Valosähköinen ilmiö.....	11
2.4	Aurinkokennon rakenne ja toimintaperiaate	12
2.5	Aurinkosähköpaneelit	16
2.6	Aurinkosähköjärjestelmät	19
2.6.1	Sähköverkosta riippumattomat aurinkosähköjärjestelmät	19
2.6.2	Sähköverkkoon liitetyt aurinkosähköjärjestelmät.....	21
3.	ENERGIAN VARASTOINTI AKKUIHIN.....	23
3.1	Akuista yleisesti	23
3.2	Akut aurinkosähköjärjestelmissä.....	24
3.3	Lyijyakut	26
3.3.1	Suljetut lyijyakut.....	28
3.3.2	Lyijyakujen kapasiteetti	29
3.4	Nikkeliakut.....	30
3.5	Litiumioniakut	31
3.6	Akkujen elinikä aurinkosähköjärjestelmässä	33
3.7	Yhteenveto akuista	36
4.	LATAUS- JA KUORMASÄÄTIMET	38
4.1	Lataus- ja kuormasäätimet aurinkosähköjärjestelmissä.....	38
4.2	Lataus- ja kuormasäädinten tehtävät ja ominaisuudet	39
4.2.1	Lataussäätö	39
4.2.2	Lataussäädön viritys.....	41
4.2.3	Kuormasäätö.....	42
4.2.4	Kuormasäädön viritys	43
4.2.5	Muita ominaisuuksia	45
4.3	Säädintyypit ja säätötekniikat.....	47
4.3.1	Shuntti- ja sarjasäätö	47
4.3.2	Lataussäätö yhdessä tai useammassa vaiheessa	49
4.3.3	Pulssinleveysmodulaatio lataussäädössä.....	50
4.3.4	DC/DC -muuntimet: buck, boost ja buck-boost	52
4.3.5	Maksimitehopisteen seuranta lataussäädössä	55
4.4	Yhteenveto säätimistä	61
5.	MMINI PRO LATAUS- JA KUORMASÄÄTIMEN UUSIMINEN.....	63
5.1	Säätimen elektroniikan päivitysmahdollisuuksien selvitys	63
5.2	Korvaavan säätimen valinta	65

6. YHTEENVETO.....	69
LÄHTEET	71

LIITE A: *MMINI PRO* LATAUS- JA KUORMASÄÄTIMEN DATALEHTI

LIITE B: *SUNSAVER* LATAUS- JA KUORMASÄÄTIMEN DATALEHTI

LIITE C: *ECO-N-T* LATAUS- JA KUORMASÄÄTIMEN DATALEHTI

LIITE D: *CXNUP* LATAUS- JA KUORMASÄÄTIMEN DATALEHTI

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	engl. alternating current, vaihtovirta
AGM	engl. absorbent glass mat, imeytetty lasikuitumatto
AM0	engl. air mass zero, ilmassa ilmamassan ylärajalla
AM1,0	engl. air mass 1,0, ilmassa maan pinnalla auringon paistaessa suoraan yläpuolelta
AM1,5d	engl. air mass 1,5 direct, ilmassan maan pinnalla auringon paistaessa 48,2° kulmassa (diffuusia säteilyä ei huomioida)
AM1,5g	engl. air mass 1,5 global, ilmassan maan pinnalla auringon paistaessa 48,2° kulmassa (diffuusi säteily huomioitu)
As	arseeni
B	boori
BJT	engl. bipolar junction transistor, bipolaaritransistori
BMS	engl. battery management system, akunvalvontajärjestelmä
C	hiili
Cd	kadmium
Cd(OH) ₂	kadmiumhydroksidi
C ₃ H ₄ O ₃	etyleenikarbonaatti
DC	engl. direct current, tasavirta
DOD	engl. depth of discharge, purkauksen syvyys
ECIA	engl. Electronic Components Industry Association
EVA	engl. ethylene-vinyl acetate, etyylivinyyliaasetta
FET	engl. field-effect transistor, kanavatransistori
FLC	engl. fuzzy logic control, säätö sumealla logiikalla
GMPP	engl. global maximum power point, globaali maksimitehopiste
H ₂ O	vesi
H ₂ SO ₄	rikkihappo
IGBT	engl. insulated-gate bipolar transistor, eristehilabipolaaritransistori
IncCond	engl. incremental conductance, inkrementaalinen johtavuus
IU-kuvaaja	virran kuvaaja jännitteen funktiona
KOH	kaliumhydroksidi
LCD	engl. liquid-crystal display, nestekidenäyttö
LED	engl. light-emitting diode, hohtodiodi
LiCoO ₂	litiumkobolttioksidi
LiFePO ₄	litiumrautafosfaatti
LiPF ₆	litiumheksafluorofosfaatti
Li-ion	engl. lithium-ion, litiumioni
LMPP	engl. local maximum power point, paikallinen maksimitehopiste
LVD	engl. low voltage disconnect, kuorman irrotus
MCU	engl. microcontroller unit, mikrokontrolleri
MCU-A	<i>MMini Prossa</i> käytettävän mikrokontrollerin merkintätapa
MCU-B	uudempi MCU MCU-A:n tuoteperheestä
MOSFET	engl. metal-oxide-semiconductor field-effect-transistor, eristehila-transistori
MPP	engl. maximum power point, maksimitehopiste
MPPT	engl. maximum power point tracking, maksimitehopisteen seuranta
NiCd	nikkelikadmium
NiMH	nikkelimetallihybridi
Ni(OH) ₂	nikkelihydroksidi

NiOOH	nikkelioksidihydroksidi
Pb	lyijy
PbO ₂	lyijydioksidi
P&O	engl. perturb & observe, häirintä ja tarkkailu
PWM	engl. pulse width modulation, pulssinleveysmodulaatio
SCC	engl. short circuit control, säätö oikosulkuvirran avulla
SG	engl. specific gravity, elektrolyytin ominaispaino
Si	pii
SMD	engl. surface mount device, pintaliitoskomponentti
SOC	engl. state of charge, varaustila
STC	engl. standard test conditions, standardoidut testiolosuhteet
Telecom	engl. telecommunication, televiestintä
λ	aallonpituus
η_{\max}	maksimihyötysuhde
A	pinta-ala
c	valonnopeus
D_{on}	engl. duty cycle, pulssisuhde
e	elektronin varaus
E	elektronin energia
E_{λ}	fotonin energia
E_{F}	fermienergia
E_{g}	engl. band gap energy, energia-aukon energia
G_{t}	säteilytysvoimakkuus
h	Planckin vakio
I	sähkövirta
I_{D}	diodin läpäisemä sähkövirta
I_{MPP}	sähkövirta maksimitehopisteessä
I_{o}	estosuuntainen saturaatiovirta
I_{ph}	valosäköisen ilmiön tuottama sähkövirta
I_{SC}	oikosulkuvirta
k	Boltzmannin vakio
P	teho
P_{in}	aurinkokennolle saapuva säteilyteho
P_{MPP}	teho maksimitehopisteessä
r	atomien välinen etäisyys kiteessä
T_{C}	aurinkokennon lämpötila
U	jännite
U_{dl}	engl. load-shedding voltage, kuorman irrotusjännite
U_{fc}	engl. end-of-charge voltage, latauksen lopetusjännite
U_{in}	sisäänmenon jännite
U_{out}	ulostulon jännite
U_{rl}	load reconnect voltage, kuorman uudelleenkytkentäjännite
U_{MPP}	jännite maksimitehopisteessä
U_{OC}	avoimen virtapiirin jännite
U_{rc}	engl. recharge voltage, latauksen uudelleenkytkentäjännite

1. JOHDANTO

Maapallolla asuu yli 7,5 miljardia ihmistä, joiden energiantarpeeseen on vastattu pääosin fossiilisilla polttoaineilla, eli hiilellä, öljyllä ja kaasulla. [1, s. 10] Fossiilisia polttoaineita poltettaessa saadaan lämpöenergiaa, joka voidaan hyödyntää sellaisenaan tai sen avulla voidaan tehdä sähköä. Palamisen reaktiotuotteena syntyy energian lisäksi myös vettä ja hiilidioksidia, jota päätyy ilmakehään. Ilmakehässä hiilidioksidi on yksi kasvihuoneilmiötä aiheuttavista kasvihuonekaasuista, joiden ansiosta osa Auringon säteilemästä energiasta jää lämmittämään Maata. Sopivissa määrin kasvihuoneilmiö mahdollistaa elämän maapallolla, mutta tutkimusten mukaan ilmakehän hiilidioksidipitoisuus on kasvanut ennennäkemättömästi edellisen 300 vuoden aikana ja on nyt keskimäärin 405 ppm. [2, s. 2] [3]

Ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden huiman kasvun uskotaan olevan ihmisten aiheuttamaa, sillä kasvu alkoi samaan aikaan teollistumisen kanssa. Suurin osa tutkijoista yhdistää kasvihuonekaasujen lisääntymisen käynnissä olevaan maailmanlaajuiseen ilmastomuutokseen. Ilmastomuutoksen haitallisia seurauksia ovat muun muassa ilmaston lämpeneminen, merenpinnan nousu, entistä rajummat myrskyt ja muutokset sateissa. [2, s. 2] Olisi siis ensisijaisen tärkeää, että huomattava osa energiasta tuotettaisiin jatkossa päästöttömästi, etenkin, kun ihmiskunnan väkiluvun ja energiankulutuksen ennustetaan jatkuvan kasvuaan [2, s. 2] [4]. Lisäksi fossiiliset polttoaineet ovat uusiutumattomia ja niiden saatavuus on rajallinen [2, s. 2]. Tällä menolla öljyn ennustetaan loppuvan noin 49 vuodessa, kaasun 51 vuodessa ja kivihiilen 133 vuodessa [1, ss. 12, 26, 36].

On siis kysyntää uusiutuville energiamuodoille, joilla voitaisiin vastata kasvavaan energiantarpeeseen ympäristöystävällisesti. Uusiutuvista energiamuodoista suurin potentiaali on aurinkoenergialla, sillä Auringosta Maahan saapuva energia vastaa noin 10 000 kertaisesti ihmiskunnan energiankulutusta. [2, s. 2] Aurinkokennojen ja valosähköisen ilmiön avulla Auringon säteilyenergiaa voidaan muuttaa sähköksi. Yhden laskelman mukaan vuonna 2011 vain 0,4% Maan maapinta-alasta olisi riittänyt kattamaan ihmiskunnan kaiken energiantarpeen, jos kyseisen pinta-alan täyttävien aurinkokennojen hyötysuhde olisi 10%. Nykyään aurinkokennojen hyötysuhde on kaksinkertaistunut, mutta myös ihmiskunnan energiantarve on kasvanut. Karkeasti arvioituna 0,2-0,3% maapinta-alasta riittäisi nykyään vastaamaan energiantarpeeseen. [2, ss. 3-4] [5]

Aurinkoenergian heikkoutena on kuitenkin energiantuotannon epäsäännöllisyys ja riippuvuus vuorokauden- ja vuodenajasta, sekä säästä ja sijainnista. Yksi ratkaisu on aurinkosähköjärjestelmiin lisättävä energiavarasto sellaisia hetkiä varten, jolloin Auringosta ei

saada riittävästi energiaa. Akusto on etenkin sähköverkosta riippumattomissa aurinkosähköjärjestelmissä yleisesti käytetty energiavarasto, joka mahdollistaa sähköenergian varastoinnin kemialliseksi energiaksi ja takaisin. Akut ovat kuitenkin kalliita ja etenkin väärinkäytettynä lyhytikäisiä, joten niiden suojelemiseksi aurinkosähköjärjestelmään lisätään yleensä elektroninen lataus- ja kuormasäädin. Nimensä mukaisesti lataus- ja kuormasäädin säättää akkujen latautumista ja purkautumista, mutta voi tehdä lisäksi paljon muutakin.

Tämän diplomityön tavoitteita ovat sähköverkosta riippumattomien aurinkosähköjärjestelmien lataus- ja kuormasäätimiin perehtyminen, sekä yhden säätimen elektroniikan päivitysmahdollisuuksien selvitys ja korvaavan säätimen valinta. Selvityksen kohteena oleva *Naps Solar Systemsin MMini Pro* -säädin on käytössä hyväksi todettu ja sen käyttöä halutaan jatkaa. Ongelmana on se, että *MMini Pro* on suunniteltu 1990-luvun lopulla eikä sen sisältämän elektroniikan saatavuudesta ei ole varmuutta. Lisäksi *MMini Pron* suunnittelija ei enää ole yrityksen palveluksessa ja säädin on loppuunmyyty.

Lataus- ja kuormasäätimen elektroniikan päivitysmahdollisuuksien selvitys aloitetaan tutustumalla yleisesti akkuihin ja niitä suojaaviin säätimiin, sekä perehtymällä tutkimuksen kohteena olevan säätimen rakenteeseen. Seuraavaksi selvitetään tarvittavien komponenttien saatavuutta ja arvioidaan sen perusteella tarpeellisia muutoksia, sekä mahdollisia parannuksia. Lopuksi toteutetaan selvityksen perusteella vaadittavat toimenpiteet.

Diplomityö aloitetaan teoriaosuudella, jossa tutustutaan työn taustalla olevaan aurinkosähköön, akkuihin sekä lataus- ja kuormasäätimiin. Aurinkosähkön ymmärtämiseksi tutustutaan Auringon säteilyyn ja puolijohteisiin, sekä niiden mahdollistamaan valosähköiseen ilmiöön aurinkokennossa ja aurinkosähköjärjestelmässä. Seuraavaksi perehdytään energian varastointiin akkujen tapauksessa. Työssä keskitytään pääosin aurinkosähköjärjestelmissä yleisesti käytettyihin lyijyakkuihin, mutta esitellään myös muita käytössä olevia ja potentiaalisia akkukemioita. Työn aiheen kannalta erityisen kiinnostavaa on akkujen toiminta ja elinikä osana aurinkosähköjärjestelmää.

Pohjatietojen ja motivoinnin jälkeen perehdytään työn fokuksessa oleviin lataus- ja kuormasäätimiin. Työssä tutustutaan säädinten rakenteeseen, toimintaan, tehtäviin ja ominaisuuksiin osana aurinkosähköjärjestelmää, sekä erilaisiin säädintyypppeihin ja säätötekniikoihin. Lopuksi käydään läpi *MMini Pron* elektroniikan päivitysmahdollisuuksien selvitys ja siitä seuraavat toimenpiteet. Työn alkuperäinen tavoite oli *MMini Pron* elektroniikan päivitys, mutta päivitysmahdollisuuksien selvityksen tuloksena päädyttiin valitsemaan korvaava säädin. Korvaavan säätimen valinta tehtiin selvittämällä tärkeät ominaisuudet, vertailemalla ominaisuuksiltaan sopivia säätimiä ja valitsemalla niistä sopivin.

2. AURINKOSÄHKÖ

Tässä luvussa tarkastellaan aurinkosähköä, eli sitä kuinka auringon säteilyenergiaa saadaan muutettua sähköenergiaksi. Aloitetaan perehtymällä Auringosta lähtevään ja maapallolle saapuvaan säteilyenergiaan luvussa 2.1. Seuraavaksi tutustutaan aurinkokennojen toiminnan perustana oleviin puolijohteisiin luvussa 2.2 ja valosähköiseen ilmiöön luvussa 2.3. Lopuksi käydään vielä läpi aurinkokennon rakenne ja toimintaperiaate luvussa 2.4 sekä esitellään aurinkosähköpaneelit luvussa 2.5 ja aurinkosähköjärjestelmät luvussa 2.6.

2.1 Auringon säteilyenergia

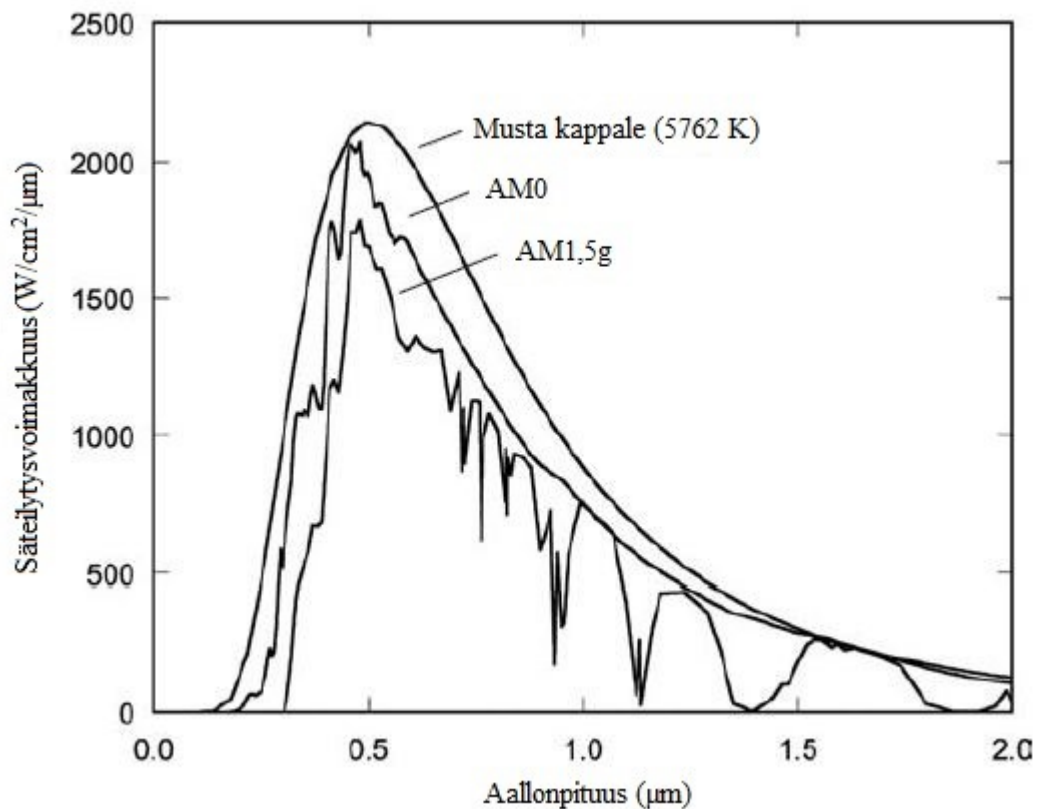
Aurinko on vain yksi universumin lukemattomista tähdistä, mutta kuitenkin elintärkeä maapallolla eläville organismeille. [6, s. 37] [7, s. 2]. Aurinko on maapallon kannalta erityisessä asemassa siksi, että se on 300000 kertaa lähempänä kuin seuraavaksi läheisin tähti [6, s. 37]. Lähes kaikki maapallolle saapuva energia onkin peräisin Auringosta [6, s. 37] [2, s. 83]. Auringon energia syntyy sen ytimessä käynnissä olevasta fuusioreaktiosta, jossa yksinkertaistettuna neljä vetyatomia sulautuu yhdeksi heliumatomiksi, jonka massa on pienempi kuin neljän vetyatomin yhteenlaskettu massa [8, s. 1471]. Auringon massa siis pienenee fuusioreaktiossa, ja Einsteinin suhteellisuusteorian mukaan massan pieneminen tuottaa noin 400 triljoonaa joulea energiaa sekunnissa [6, s. 37].

Fuusioreaktion tuottama energia vapautuu auringon pinnalta avaruuteen pääosin sähkömagneettisena säteilynä, jonka aallonpituusjakauma (spektri) riippuu kappaleen lämpötilasta [9, s. 27] [7, s. 2]. Musta kappale on malli ideaalisesta säteilijästä, jonka säteilytysvoimakkuus aallonpituuden funktiona riippuu kappaleen pintalämpötilasta Planckin säteilylain mukaan [8, s. 570] [7, s. 2]. Auringon säteilyspektrin on havaittu muistuttavan mustan kappaleen säteilyspektriä, minkä perusteella Auringon pinnan lämpötilaksi on arvioitu noin 5800 K [10] [2, s. 83]. Maa on kuitenkin noin 150 miljoonan kilometrin päässä Auringosta, joka säteilee isotrooppisesti, eli tasaisesti joka suuntaan. Suuresta etäisyydestä ja säteilyn isotrooppisesta luonteesta johtuen vain noin 0,000000045% Auringon säteilystä päätyy maapallolle. Siitä huolimatta Auringosta saapuu maapallolle tunnissa enemmän energiaa kuin koko ihmiskunta kuluttaa vuodessa. [11, s. 37]

Auringon säteily siirtyy avaruudessa lähes häviöttömästi maapallon ilmakehän ylärajalle asti, missä säteilyn intensiteetti on keskimäärin 1366 W/m^2 [8, s. 1050] [11, s. 37]. Edellä mainittua lukua kutsutaan aurinkovakioksi, mutta todellisuudessa sen arvo vaihtelee hieinan auringon aktiivisuuden vaihtelun ja maapallon kiertoradan elliptisyyden vuoksi [11, s. 37] [6, s. 28]. Maan pinnalle suoraan saapuvan säteilyn intensiteetti sen sijaan on keskimäärin 1 kW/m^2 edellyttäen selkeää keskipäivää ja tiettyä mittaustaikaa [11, s. 37].

Ilmakehällä on siis merkittävä vaikutus läpäisemäänsä sähkömagneettiseen säteilyyn [7, s. 5].

Ilmakehä koostuu pääosin typestä ja hapesta, mutta sisältää myös hiilidioksidia, vesihöyryä, argonia, otsonia, pölyä ja pilviä [6, s. 28]. Ilmakehän sisällön ansiosta osa sen läpi kulkevasta säteilystä siroaa molekyyleistä, aerosoleista ja pölystä sekä absorboituu ilmakehän kaasuihin [7, s. 5]. Tyypillinen auringon säteilyspektri maan pinnalla (AM1,5g) ja ilmakehän ylärajalla (AM0) on esitetty mustan kappaleen säteilyspektrin kanssa kuvassa 2.1.



Kuva 2.1. Auringon säteilyspektri maan pinnalla (AM1,5g) ja ilmakehän ylärajalla (AM0) sekä mustan kappaleen (5762 K) säteilyspektri. Kuva muokattu alkuperäisestä. [2, s. 84]

Edellä mainitut AM1,5g ja AM0 ovat arvoja ilmassalle, joka kuvastaa säteilyn ilmakehässä kulkeman matkan pituutta tai läpäistyn ilman massaa. Ilmakehä vaimentaa säteilyä sitä enemmän, mitä pidemmän matkan säteily siinä kulkee. [12, s. 336] Säteilyintensiiteetin maksimi saavutetaan siis silloin, kun aurinko paistaa suoraan yläpuolelta (AM1,0), ja suurin vaimennus silloin, kun aurinko paistaa horisontista [12, ss. 336-337]. Kuvassa 2.1 esitetty AM0 kuvastaa siis tilannetta, jossa ilmassa on nolla, koska säteily ei kulje ilmakehän läpi. Aurinkokennojen ja -paneelien suorituskyvyn vertailua varten on standardoidut testiolosuhteet (STC). STC on keinotekoinen mittausjärjestely, jossa tavoii-

tellaan 1 kW/m^2 säteilyintensiteettiä, jonka spektri vastaa auringon säteilyä, joka on kulkenut ilmakehän läpi $48,2^\circ$ kulmassa pystysuunnasta mitattuna (AM1,5) [2, s. 84]. Aurinkokennojen lämpötila STC:ssä on 25° [2, s. 301].

Kuvassa 2.1 esitetty ilmamassan arvo AM1,5g (*global*) ottaa huomioon myös heijastuksista ja sironnasta muodostuvan diffuusin säteilyn, joka voi olla jopa 20% kennolle saapuvasta säteilystä. Sitä vastoin ilmamassan arvo AM1,5d (*direct*) huomioi vain auringosta suoraan saapuvan säteilyn. [2, s. 83]

Sähkömagneettisella säteilyllä on aaltoluonteen lisäksi myös hiukkasluonne, joka on esillä absorptiossa ja emissiossa. Sähkömagneettisen säteilyn energia on kvantittunut ja se absorboituu sekä emittoituu määrätyn kokoisina energiapaketteina, joita kutsutaan fotideiksi. [8, s. 1254] Fotonien sisältämä energia on kääntäen verrannollinen säteilyn aallonpituuteen ja sen määrä saadaan yhtälöstä

$$E_\lambda = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1)$$

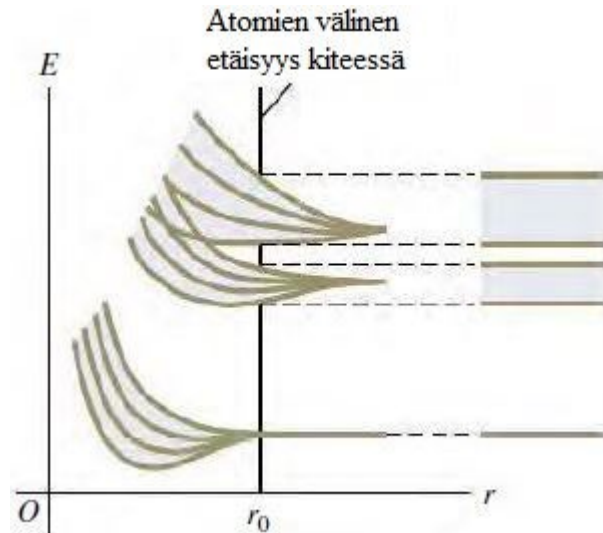
missä h on Plankin vakio, c on valonnopeus ja λ on aallonpituus [2, s. 82]. Aurinkokennolle saapuvien yksittäisten fotonien energia STC:ssä voidaan nyt laskea karkeasti yhtälön (1) avulla. STC:ssä aurinkokennolle saapuvien fotonien aallonpituudet vaihtelevat likimain välillä $0,3\text{-}2,5 \mu\text{m}$ [12, s. 337], jolloin yhtälön (1) mukaan aallonpituuksia vastavien fotonien energia vaihtelee likimain välillä $4,1\text{-}0,5 \text{ eV}$.

2.2 Puolijohteet

Kiinteän olomuodon materiaalit voidaan jakaa sähkönjohtavuuden perusteella eristeisiin, puolijohteisiin ja johteisiin [12, s. 15]. Eristeiden sähkönjohtavuus on huono eivätkä ne tavallisesti johda sähköä [13, s. 483] [12, s. 15]. Johteiden sähkönjohtavuus sen sijaan on nimensä mukaisesti hyvä, ja puolijohteiden sähkönjohtavuus on eristeiden ja johteiden väliltä. Puolijohteiden sähkönjohtavuus on mielenkiintoista siksi, että sitä voidaan muokata lämpötilan, valon, magneettikentän ja epäpuhtauksien avulla. Tästä syystä puolijohteet ovat yksi elektroniikan tärkeimmistä materiaaleista ja mahdollistavat myös aurinkokennojen toiminnan. [12, s. 16]

Sähkövirta on varausten liikettä kahden alueen välillä, ja materiaalin sähkönjohtavuus ilmaisee kuinka hyvin varaukset pääsevät kahden alueen välillä liikkumaan [8, s. 816] [8, s. 821]. Johtaakseen sähköä materiaalissa tulee olla vapaasti liikkuvia varauksenkuljettajia, esimerkiksi elektroneja [8, ss. 817, 1419]. Elektronien vapaa liikkuvuus puolestaan riippuu materiaalin atomien rakenteesta [8, ss. 1418-1419]. Tietyn materiaalin yksittäisen atomin elektronit voivat sijaita vain tietyillä energiatasoilla, joita kutsutaan myös elektronikuoriksi [12, s. 23]. Kahden identtisen atomin energiatasot jakautuvat, kun atomit tuodaan toistensa läheisyyteen. Jakautuminen johtuu siitä, että Paulin kieltoäännön mukaan korkeintaan kaksi systeemin elektronia voivat sijaita samalla energiatasolla. [12, s. 24]

Kiinteän olomuodon materiaalit koostuvat useista toistensa lähellä olevista atomeista, joiden energiatasot jakautuvat siis moneen lähekkäiseen energiatasoon. Tarpeeksi suuri määrä lähekkäisiä energiatasoja muodostaa lähes jatkuvia energiavyöitä. Systemin atomien elektronit kuuluvat nyt yksittäisten atomien sijaan niistä muodostuvalle kiderakenteelle. [12, s. 24] Energiavyöiden muodostumista havainnollistetaan kuvassa 2.2.



Kuva 2.2. Elektroneille sallittujen energiatasojen haarautuminen atomien välisen etäisyyden funktiona. Pystyviiva r_0 merkitsee kiteen atomien etäisyyttä toisistaan ja kuvaajan oikealla puolella on etäisyydellä r_0 energiatasojen haarautumisessa muodostuneet energiavyöt. Kuva muokattu alkuperäisestä. [8, s. 1418]

Elektroniikassa käytetyt puolijohteet ovat yleensä rakenteeltaan kiteisiä, eli niissä atomit muodostavat säännöllisenä toistuvan kolmiulotteisen rakenteen [2, s. 85] [12, s. 17]. Aurinkokenno voidaan valmistaa yksikiteisen puolijohteen lisäksi myös monikiteisestä ja amorfisesta puolijohdesta [2, s. 84]. Tutustutaan seuraavaksi piin (Si) kiderakenteeseen, sillä pii on yleisin aurinkokennoissa käytetty puolijohdemateriaali [2, s. 84].

Piiatomilla on 4 valenssielektronia, jotka voivat osallistua sidoksiin ympäröivien atomien kanssa. Kiteisen piin rakenne on samanlainen kuin timantilla, eli jokainen piiatomi muodostaa 4 kovalenttista sidosta ympäröivien piiatomien kanssa siten, että vierekkäisten sidosten välinen kulma on $109,5^\circ$. [2, s. 85] Matalassa lämpötilassa kaikki elektronit osallistuvat siis sidoksiin eikä vapaita varauksenkuljettajia ole [12, s. 22].

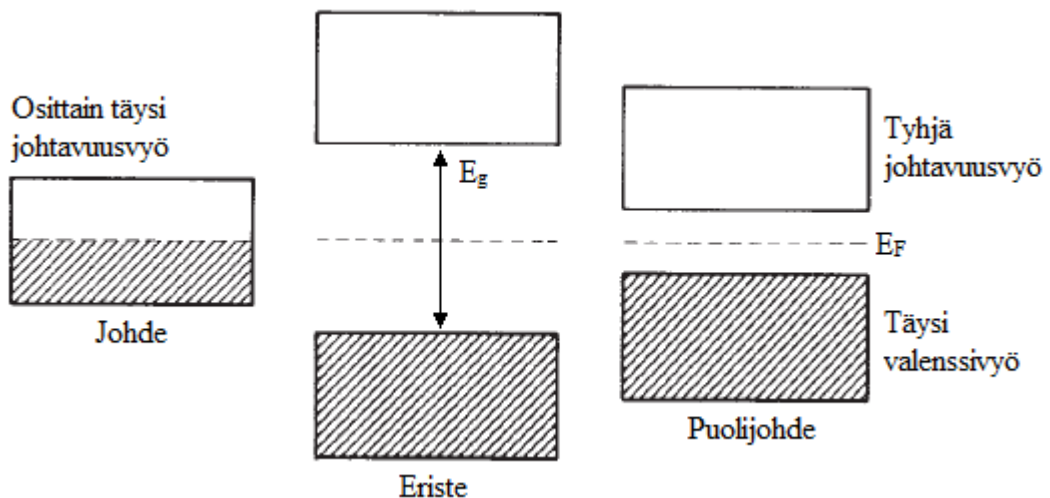
Absoluuttisen nollapisteen lämpötilassa (0 K) systeemin kaikki elektronit sijaitsevat matalimmilla Paulin kielto säännön sallimilla energiatasoilla [8, s. 1421]. Tässä tilanteessa systeemin elektronin korkeinta energiatilaa kutsutaan fermienergiaksi (E_F) [7, s. 18]. Absoluuttisen nollapisteen lämpötilassa materiaalin ylintä täynnä olevaa energiavyötä kutsutaan valenssivyöksi, jonka yläpuolella olevaa energiavyötä kutsutaan johtavuusvyöksi [8, ss. 1418-1419]. Valenssivyön ylärajan ja johtavuusvyön alarajan välissä on elektroneilta kielletty vyöhyke, jota kutsutaan energia-aukoksi (E_g) [8, s. 1418]. Materiaalien

sähkönjohtavuus voidaan nyt selittää energiavöiden, energia-aukon energian ja fermienergian avulla [7, s. 18].

Johtaakseen sähköä elektronien on kyettävä liikkumaan. Tästä syystä sähkövirta ei voi muodostua energiavyön ollessa tyhjä tai täysi [7, ss. 18, 20]. Sähkövirran mahdollistava elektronien liike vaatii siis vapaita energiatiloja, joihin elektronit voivat siirtyä. [7, s. 20] Johteen hyvä sähkönjohtavuus perustuu siihen, että niillä fermienergia sijaitsee energiavyön sisällä, jolloin vain osittain täysi johtavuusvyö mahdollistaa elektronien liikkeen [7, s. 18]. Vaihtoehtoisesti valenssivyö ja johtavuusvyö voivat olla limittäin, jolloin niiden välillä ei ole energia-aukkoa ja valenssivyön elektronit pääsevät liikkumaan johtavuusvyöllä [12, s. 29].

Sen sijaan eristeellä ja puolijohteella on absoluuttisen nolapisteen lämpötilassa täysi valenssivyö ja tyhjä johtavuusvyö, joten fermienergia sijaitsee energia-aukossa niiden välillä. Kumpikaan ei siis johda sähköä matalassa lämpötilassa. [12, s. 29] Merkittäviä eroja eristeen ja puolijohteen välillä ovat kuitenkin se, että puolijohteilla energia-aukko on merkittävästi pienempi kuin eristeillä ja se, että puolijohteen sähköiset ominaisuudet ovat hyvin herkkiä erittäin pienille määrille epäpuhtauksia [12, s. 29] [8, s. 1424].

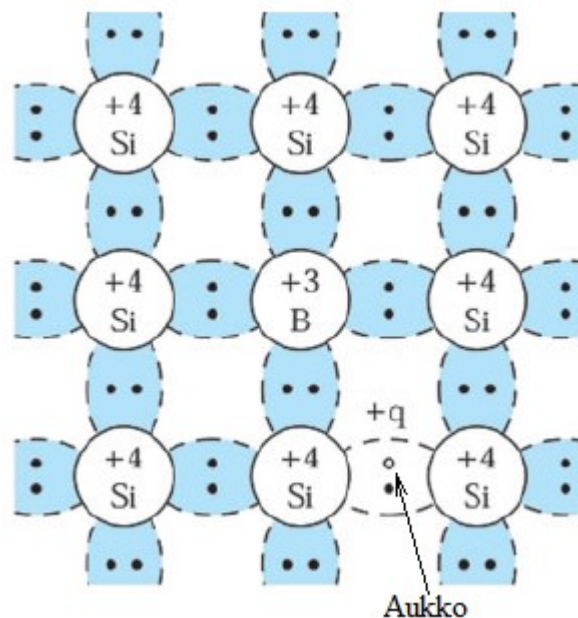
Puolijohteen energia-aukon kapeuden ansiosta elektronit voivat lämpöliikkeen avulla virittyä energia-aukon yli [8, s. 1418]. Elektronien virittyminen mahdollistaa varauksenkuljettajien liikkeen valenssi- ja johtavuusvyöllä, jolloin sähkönjohtavuus kasvaa [7, s. 20]. Jo lähes huoneenlämmössä virittymisiä voi tapahtua merkittävä määrä ja johtavuus-elektronien määrä kaksinkertaistuu lämpötilan noustessa 10 °C:lla, kun energia-aukon suuruus on 1 eV [8, ss. 1419, 1424]. Riittävän suurella energialla myös eristeet saadaan johtamaan, mutta lämpöliike ei yleensä riitä niiden yli 5 eV energia-aukon ylittämiseen [8, s. 1418]. Johteen, eristeen ja puolijohteen energiavöitä on havainnollistettu kuvassa 2.3.



Kuva 2.3. Johteen, eristeen ja puolijohteen energiavyöt absoluuttisen nolapisteen lämpötilassa. Kuva muokattu alkuperäisestä. [7, s. 19]

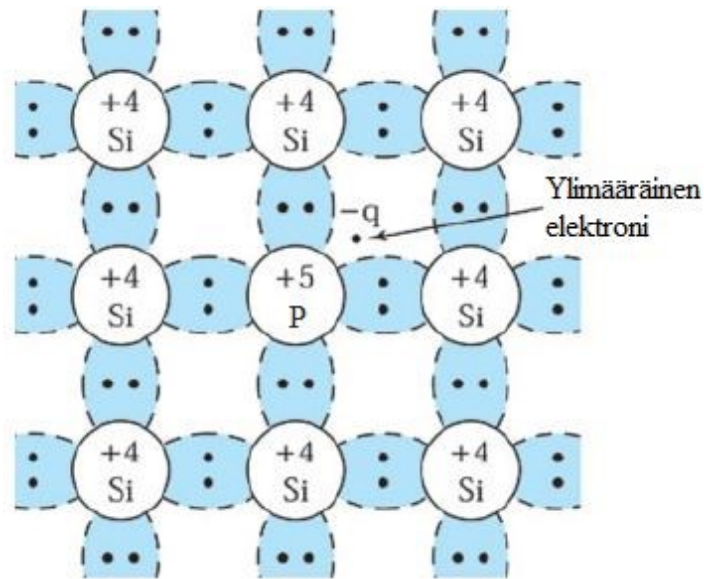
2.2.1 p- ja n-tyyppin puolijohteet

Puolijohteiden sähkönjohtavuutta voidaan parantaa seostamalla, eli lisäämällä niihin epäpuhtauksia. Tarkastellaan seuraavaksi seostamista esimerkiksi piin tapauksessa. Piillä on neljä valenssielektronia, eli se kuuluu jaksollisessa järjestelmässä ryhmään IV [2, s. 85]. Piin joukkoon voidaan lisätä ryhmän III puolijohdetta, esimerkiksi booria (B), jolla on 3 valenssielektronia [2, s. 85] [12, s. 34]. Seostuksessa booriatomit korvaavat piin kiderakenteesta satunnaisia piiatomeja, mutta booriatomin kolme valenssielektronia riittävät vain kolmeen kovalenttiseen sidokseen. Vajaaksi jäänyt sidos voi nyt vastaanottaa elektronin valenssivyöltä jättäen sinne positiivisesti varautuneen aukon. Elektroneja vastaanottavilla atomeilla seostettua materiaalia kutsutaan p-tyyppin puolijohteeksi. [12, s. 34] Kuvassa on 2.4 on havainnollistettu p-tyyppin puolijohteen sidoksia boorilla seostetun piin tapauksessa.



Kuva 2.4. Havainnekuva p-tyyppin puolijohteen sidoksista boorilla seostetun piin tapauksessa. Kuva muokattu alkuperäisestä. [12, s. 34]

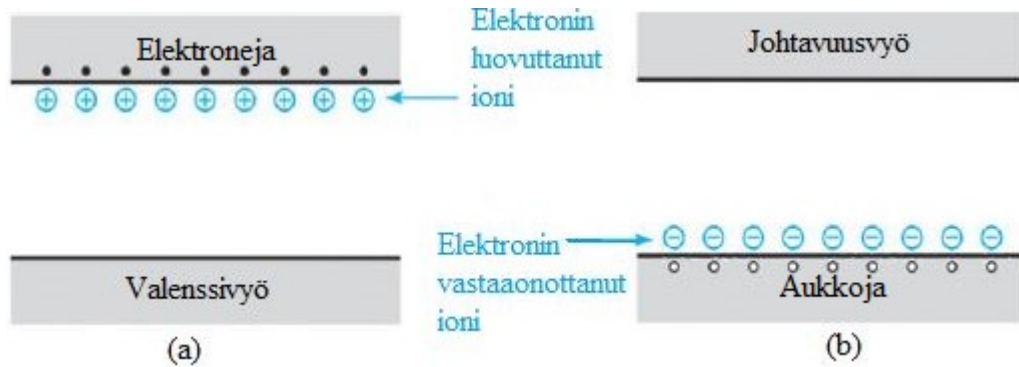
Vastaavasti piin joukkoon voidaan lisätä ryhmän V puolijohdetta, esimerkiksi fosforia (P), jolla on 5 valenssielektronia [2, s. 89] [12, s. 34]. Fosforiatomit korvaavat piin kiderakenteesta satunnaisia piiatomeja, jolloin fosforin valenssielektroneista neljä osallistuu kovalenttisiin sidoksiin ja yksi elektroni jää ylimääräiseksi. Ylimääräiset elektronit ovat vain heikosti kiinni fosforiatomeissa ja voivat helposti virittyä johtavuuselektroneiksi. Elektroneja luovuttavilla atomeilla seostettua materiaalia kutsutaan n-tyyppin puolijohteeksi. [12, s. 34] Kuvassa 2.5 on havainnollistettu n-tyyppin puolijohteen sidoksia fosforilla seostetun piin tapauksessa.



Kuva 2.5. Havainnekuva n-tyyppin puolijohteen sidoksista fosforilla seostetun piin tapauksessa. Kuva muokattu alkuperäisestä. [12, s. 34]

Seostamalla lisätyt epäpuhtaudet häiritsevät kiderakenteen täydellistä jaksollisuutta, mikä vaikuttaa myös elektroneille sallittuihin energiatasoihin [12, s. 34]. Epäpuhtausatomien ansiosta energia-aukkoon voi muodostua uusia energiatioita, jotka olivat aiemmin elektroneilta kiellettyjä [12, s. 34] [2, s. 89]. Esimerkiksi p-tyyppin puolijohteessa uusia energiatioita voi muodostua hieman valenssivyön yläpuolelle. Tällöin lämpöenergia riittää virittämään elektroneja valenssivyöltä energia-aukkoon muodostuneisiin uusiin energiatioihin, jotka saavat siten negatiivisen varauksen. Virittynyt elektroni jättää valenssivyölle positiivisesti varautuneen aukon, joka voi nyt vastaanottaa viereisen elektronin, jolloin aukko siirtyy. Samalla puolijohteen sähkönjohtavuus paranee, sillä elektroneilla on nyt tilaa liikkua. p-tyyppin puolijohteissa aukkoja pidetään pääasiallisina varauksenkuljettajina, vaikka käytännössä kyse on elektronien liikkeestä. [2, s. 89]

Vastaavasti n-tyyppin puolijohteissa epäpuhtaudet voivat aiheuttaa energia-aukkoon uusia energiatioita hieman johtavuusvyön alapuolelle. Tällöin lämpöenergia riittää virittämään elektroneja energia-aukkoon muodostuneista uusista energiatioista johtavuusvyölle, jolloin elektroneja luovuttaneille atomeille jää positiivinen varaus. Edelleen puolijohteen sähkönjohtavuus paranee, sillä johtavuusvyöllä on nyt enemmän elektroneja. Tästä syystä n-tyyppin puolijohteessa elektroneja pidetään pääasiallisina varauksenkuljettajina. [2, s. 89] Kuvassa 2.6 on havainnollistettu n- ja p-tyyppin puolijohteiden energiavyömalleja, joissa elektronit ovat virittyneet n-tyyppin puolijohteessa johtavuusvyölle ja p-tyyppin puolijohteessa energia-aukon uusiin energiatioihin.



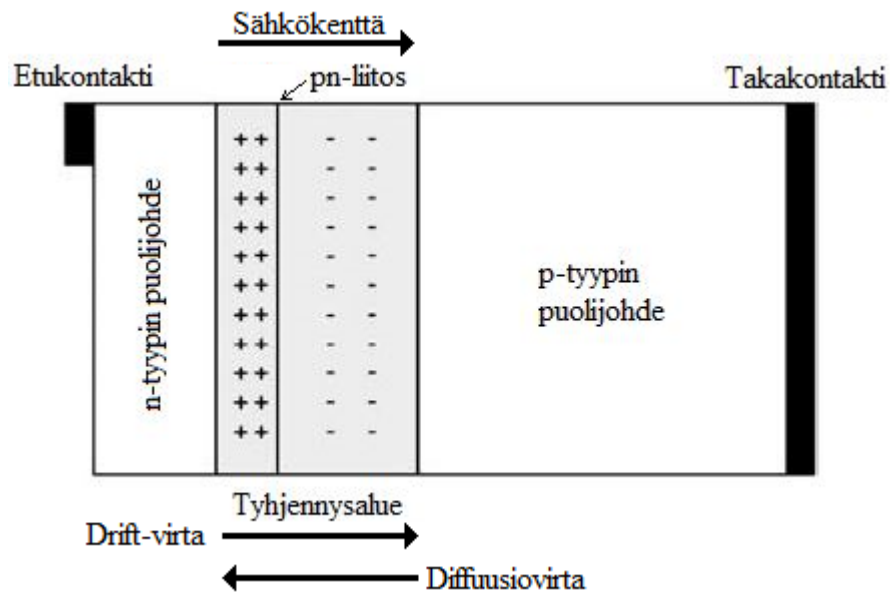
Kuva 2.6. (a) *n*-tyypin puolijohteen energiavyömalli tilanteessa, jossa ylimääräiset elektronit ovat virittyneet johtavuusvyölle. (b) *p*-tyypin puolijohteen energiavyömalli tilanteessa, jossa uudet energiatilat ovat vastaanottaneet valenssivyöltä elektroneja.

Kuva muokattu alkuperäisestä. [12, s. 35]

2.2.2 pn-liitos

Aurinkokennon toiminnan kannalta oleellinen pn-liitos syntyy *p*- ja *n*-tyypin puolijohteen liitoksesta. *p*-tyypin puolijohteen ylimääräiset aukot ja *n*-tyypin puolijohteen ylimääräiset elektronit aiheuttavat konsentraatioeron puolijohteen välille. Konsentraatioero synnyttää diffuusiovirran, joka kuljettaa pn-liitoksen läheisyydessä *n*-tyypin puolijohteen elektroneja *p*-tyypin puolijohteen aukkoihin. [2, s. 103] Erillään *p*- ja *n*-tyypin puolijohdet ovat varaukseltaan neutraaleja, mutta yhdistettynä diffuusiovirta synnyttää pn-liitoksen läheisyyteen *p*-puolelle negatiivisesti ja *n*-puolelle positiivisesti varautuneet alueet [7, ss. 30-31] [12, s. 84]. Varaukserojen välille syntyy sähkökenttä, jonka aiheuttamaa virtaa kutsutaan *drift*-virraksi. *Drift*- ja diffuusiovirtojen suunnat ovat toisiinsa nähden vastakkaiset. [12, s. 84].

Konsentraatioerojen tasoittuminen voimistaa siis diffuusiovirran aiheuttamaa sähkökenttää ja sen synnyttämää diffuusiovirralla vastakkaisuuntaista *drift*-virtaa. Lopulta päädytään tilanteeseen, jossa vastakkaisuuntaiset virrat ovat yhtä suuret ja nettovirta pn-liitoksen yli on nolla. pn-liitoksen ympärille on nyt muodostunut alue, jossa konsentraatioerot ovat tasoittuneet ja alue on tyhjentynyt varauksenkuljettajista. Aluetta kutsutaankin yleensä tyhjennysalueeksi. Kuvassa 2.7 on havainnollistettu pn-liitokseen syntyneitä tyhjennysaluetta tilanteessa, jossa *n*-puoli on vahvemmin seostettu. [2, s. 103]



Kuva 2.7. *pn-liitos ja siihen muodostunut tyhjennysalue tilanteessa, jossa n-tyyppin puolijohde on vahvemmin seostettu. Kuva muokattu alkuperäisestä. [2, s. 104]*

2.3 Valosähköinen ilmiö

Valosähköinen ilmiö kuvaa tilannetta, jossa valo virittää elektroneja kohtaamassaan materiaalissa [8, s. 1254]. Puolijohteeseen saapuva foton voi joko heijastua, absorboitua tai mennä läpi [13, s. 486]. Fotonin absorboituminen voi johtaa valosähköisen ilmiön seurauksena elektronin virittymiseen, kunhan fotonin luovuttama energia on riittävän suuri [8, s. 1254].

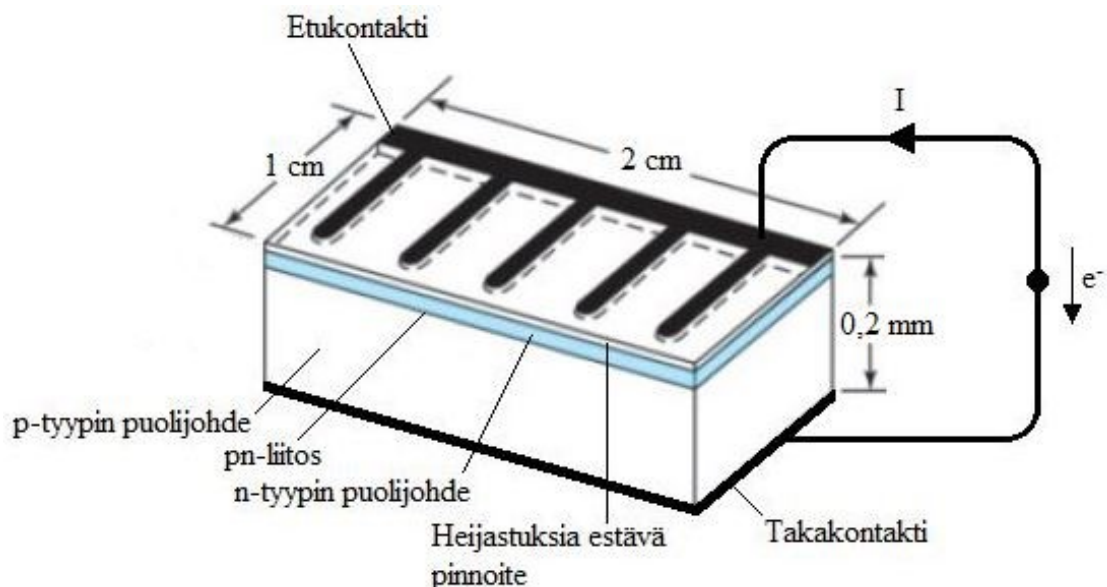
Absorboituessaan foton luovuttaa energiansa elektronille, joka voi riittävästi energiaa saadessaan virittyä valenssivyöltä johtavuusvyölle. Fotonin luovuttaman energian tulee siis olla vähintään valenssi- ja johtavuusvyön välisen energia-aukon ylittämiseen tarvittavan energian suuruinen. Sitä pienemmän energian luovuttava foton ei riitä virittämään elektronia, vaan muuttuu sen lämpöliikkeeksi. [13, s. 486] Lämpöliikkeeksi muuttuu myös kaikki virittymiseen tarvittavasta energiasta yli menevä energia [12, s. 337]. Esimerkiksi piin energia-aukon ylittämiseen tarvittava energia huoneen lämpötilassa on 1,11 eV, joten kaavan 1 mukaan valosähköinen ilmiö voi tapahtua fotoneilla, joiden aallonpituus on enintään 1,12 μm [13, s. 487].

Huomionarvoista on myös se, että yksi foton voi virittää vain yhden elektronin, vaikka fotonin energia olisikin energia-aukon ylittämiseen vaadittavan energian monikerta [13, s. 486]. Esimerkiksi piin tapauksessa alle 1,11 eV fotonit eivät riitä virittämään elektroneja ja yli 1,11 eV fotonit voivat virittää elektroneja, mutta kaikki ylimääräinen energia muuttuu lämmöksi. Tästä johtuen valosähköistä ilmiötä hyödyntävien aurinkokennojen hyötysuhde on matala [13, s. 486].

2.4 Aurinkokennon rakenne ja toimintaperiaate

Aurinkokennot voidaan luokitella ensimmäiseen, toiseen ja kolmanteen sukupolveen. Tässä luvussa tutustutaan ensimmäisen sukupolven kiteiseen piikiekkoon perustuvien perinteisten aurinkokennojen toimintaperiaatteeseen. [2] Aurinkokenno voidaan valmistaa useasta eri puolijohteesta, jonka valinta riippuu yleensä valmistuskustannuksista ja materiaalin kyvystä absorboida auringon säteilyä [2, s. 84]. Pii on suosituin aurinkokennomateriaali, sillä se on merkittävästi muita halvempi, sen valmistusteknologia on kehittynyt ja se kykenee absorboimaan auringon säteilyä melko hyvin [2, ss. 84-85] [12, s. 16].

Perinteinen piiaurinkokenno on periaatteessa suuri diodi, joka koostuu luvussa 2.2.2 esitellystä pn-liitoksesta, etu- ja takakontakteista sekä heijastuksia estävästä pinnoitteesta [11, s. 43] [12, s. 337]. Ensimmäisen sukupolven piiaurinkokennon rakennetta havainnollistetaan kuvassa 2.8. pn-liitos sijaitsee piikiekosta leikatussa levyssä siten, että ohut n-tyyppin puolijohde on auringon puolella ja paksumpi p-tyyppin puolijohde aurinkokennon takapuolella [12, s. 337] [13, s. 488]. Aurinkokennon paksuus vaihtelee, mutta on nykyään keskimäärin 200 μm [13, s. 487] [14]. Aurinkokennoissa etukontakti koostuu aurinkokennon pinnalla olevista kapeista johtimista ja kennon takapuoli on täysin takakontaktin peitossa. Heijastuksia estävä pinnoite ei ole aurinkokennon toiminnan kannalta oleellinen, mutta ilman sitä noin 31% kennolle saapuvasta säteilystä heijastuu pois. [12, s. 337]



Kuva 2.8. Osa perinteisen piiaurinkokennon rakenteesta. Kuva muokattu alkuperäisestä. [12, s. 338]

Aurinkokennon toiminta perustuu luvuissa 2.2 ja 2.3 esiteltyihin puolijohdeiden fysikaalisiin ominaisuuksiin ja valosähköiseen ilmiöön [11, s. 43]. Pimeässä aurinkokenno käyt-

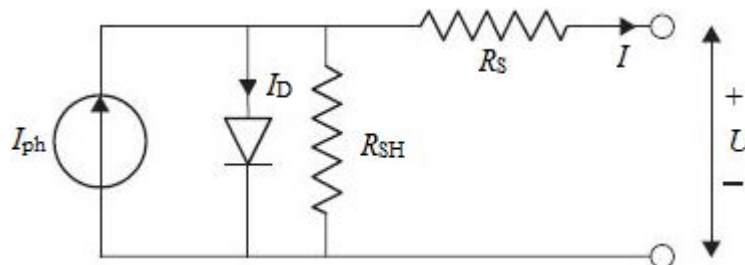
täytyy kuin diodi eikä tuota energiaa [13, s. 488]. Riittävän suurienergiselle valolle altistettuna aurinkokenno muuttaa valon sähkömagneettista energiaa sähköenergiaksi kahden oleellisen vaiheen kautta [12, s. 337] [15, s. 3]. Ensimmäisessä vaiheessa aurinkokennoon absorboituva valo virittää elektroneja muodostaen elektroni-aukko -pareja [15, s. 3]. Toisessa vaiheessa pn-liitoksen sähkökenttä erottelee valosähköisessä ilmiössä muodostuneet elektroni-aukko -parit. Sähkökenttä kuljettaa elektronit negatiiviselle kontaktille ja aukot positiiviselle kontaktille, jolloin kontaktien välille kytkettyyn ulkoiseen johtimeen muodostuu sähkövirta. Käytännössä aurinkokennolle saapuva valo siis luo sähkövirran aurinkokennon kontaktien välille kytkettyyn ulkoiseen virtapiiriin. [12, s. 337] [15, s. 3]

Aurinkokenno tuottaa sähköä vain, jos siihen saapuvan valon energia riittää virittämään elektroneja. Luvussa 2.3 kävi ilmi, että elektroni virittyy vain, jos fotonin luovuttama energia on suurempi kuin energia-aukon ylittämiseen tarvittava energia. Puolijohteen materiaalille ominaisen energia-aukon kasvattaminen vähentää siis tuotettua sähköä aurinkon rajallisen säteilyspektrin vuoksi. [12, s. 337] Aurinkon säteilyspektri rajaa aurinkokennoihin soveltuvat puolijohdemateriaalit sellaisiin, joiden energia-aukon energia on noin 1-2 eV [12, s. 338].

Aurinkokennon sähköistä käyttäytymistä voidaan kuvata yksinkertaisesti kuvassa 2.9 esitetyllä yksidiodimallilla [13, s. 488]. Yksidiodimalli koostuu virtalähteestä, diodista sekä sarja- ja shunttivastuksista. Virtalähde kuvaa valosähköistä ilmiötä, diodi kuvaa aurinkokennon toimintaa pimeässä ja vastukset kuvaavat kennon sisäistä resistanssia sekä diodin shunttiresistanssia. [13, s. 488] Shunttiresistanssi on yleensä aurinkokennoon kytketyn kuorman resistanssia merkittävästi suurempi ja sarjaresistanssi puolestaan paljon pienempi. Yksinkertaistetussa mallissa vastukset voidaan jättää huomiotta, jolloin aurinkokennon kuormalle syöttämä virta I saadaan yhtälöstä

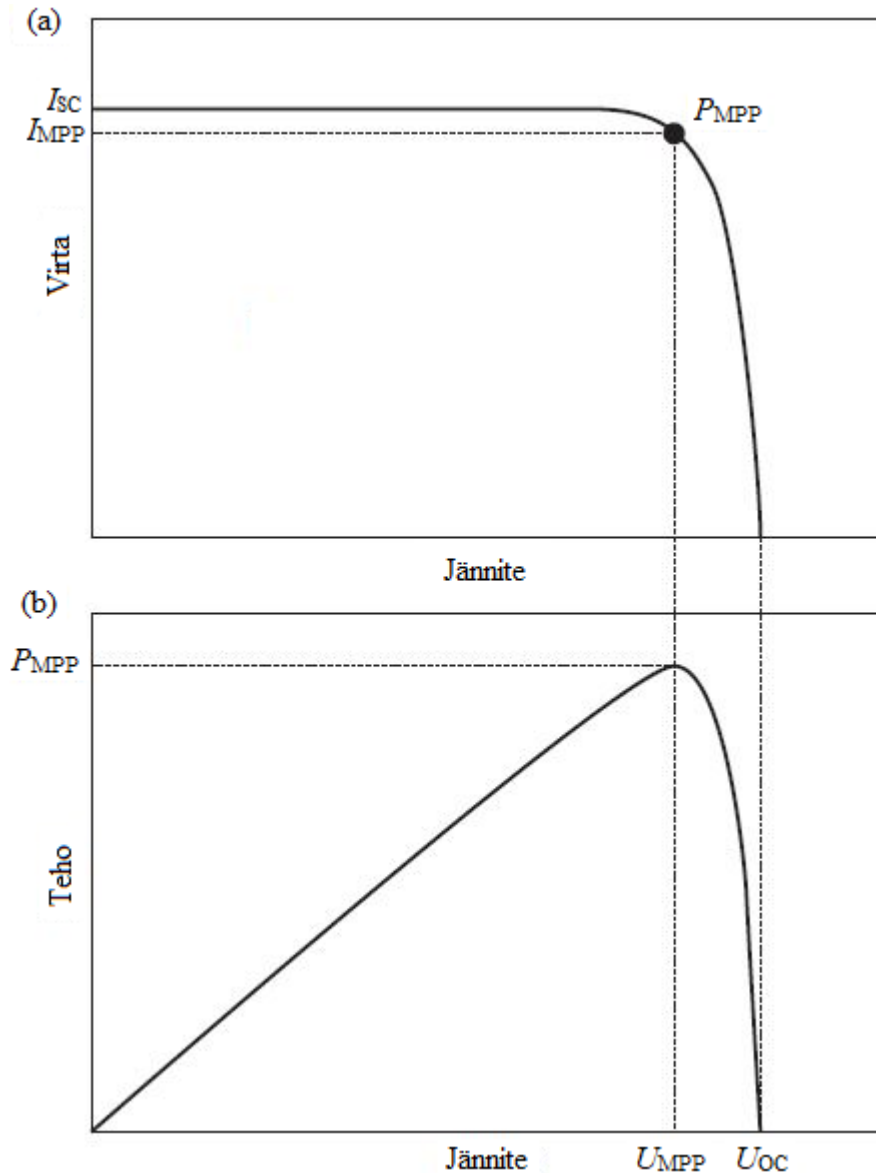
$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_o \left[\exp\left(\frac{eU}{kT_C}\right) - 1 \right], \quad (2)$$

missä I_{ph} on valosähköisen ilmiön tuottama sähkövirta, I_D on diodin virta, I_o on estosuuntainen saturaatiovirta, e on elektronin varaus, U on aurinkokennon jännite, k on Boltzmannin vakio ja T_C on aurinkokennon lämpötila. [13, s. 489]



Kuva 2.9. Aurinkokennon sähköistä käyttäytymistä kuvaava yksidiodimalli. Kuva muokattu alkuperäisestä. [13, s. 489]

Yhtälön (2) mukaan aurinkokennon virran kuvaaja jännitteen funktiona (IU -kuvaaja) on siis ylösalaisin oleva diodin ominaiskäyrä, jota on siirretty I_{ph} :n verran virta-akselilla [16, s. 784]. Aurinkokennon IU -kuvaajaa on havainnollistettu kuvassa 2.10 kohdassa (a). Aurinkokenno voi toimia missä tahansa IU -kuvaajan pisteessä, mutta kiinnostavimpia toimintapisteitä ovat IU -kuvaajan ääripäät avoimen virtapiirin ja oikosulun tapauksessa sekä maksimitehopiste (MPP) [16, s. 785].

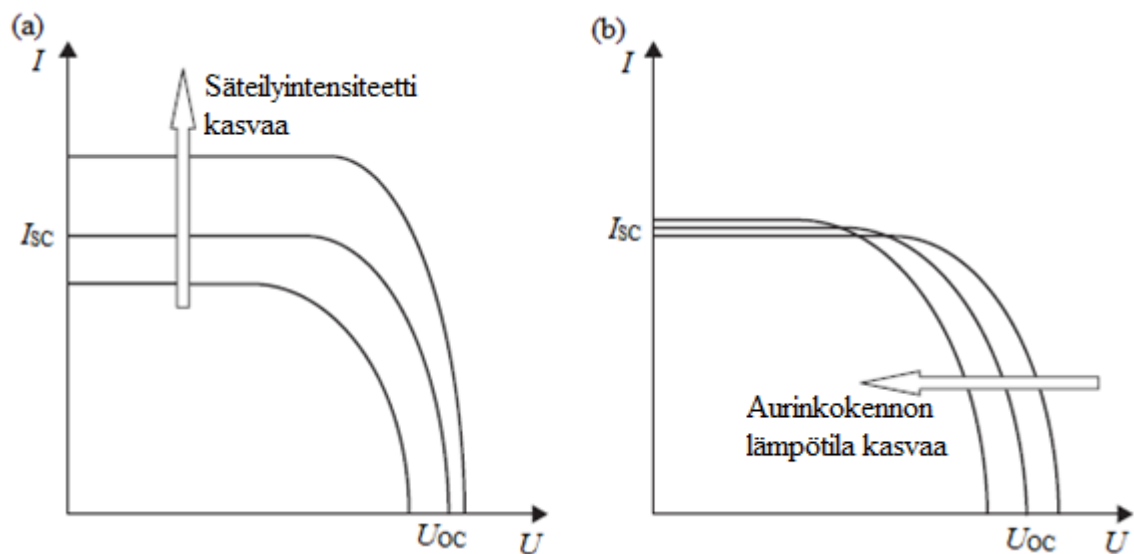


Kuva 2.10. Aurinkokennon virta (a) ja teho (b) jännitteen funktiona. Kuva muokattu alkuperäisestä. [15, s. 8]

Avoimen virtapiirin tapauksessa aurinkokennon jännite on suurimmillaan ja virta on nolla. Vastaavasti oikosulun tapauksessa aurinkokennon virta on suurimmillaan ja jännite on nolla. STC:ssä avoimen virtapiirin jännite (U_{oc}) on tyypillisesti 0,6-0,7 V ja oikosuluvirta (I_{sc}) on tyypillisesti 20-40 mA, kun tarkastellaan neliösenttimetrin aluetta pii-aurinkokennosta. [16, s. 785] Kokonaisen aurinkokennon tuottoa tarkasteltaessa jännite

pysyy samana kennon koosta riippumatta, mutta sähkövirta vaihtelee koosta ja hyötysuh- teesta riippuen [11, s. 47]. Nykyään piiaurinkokennojen koko on yleensä noin 156 x 156 mm ja hyötysuhde noin 20%, jolloin oikosulkuvirta on keskimäärin noin 9 A. Yksikitei- sestä piistä valmistetulla aurinkokennolla hyötysuhde ja oikosulkuvirta ovat yleensä kor- keampia kuin monikiteisestä piistä valmistetulla aurinkokennolla. [14]

Kuvassa 2.10 esitetty aurinkokennon IU -kuvaaja pätee vain tietyissä olosuhteissa ja vaih- telee säteilyintensiteetistä sekä kennon lämpötilasta riippuen kuvassa 2.11 esitetyllä ta- valla. Säteilyintensiteetin kasvu nostaa U_{OC} :tä logaritmisesti ja I_{SC} :tä lineaarisesti. Sen sijaan kennon lämpötilan kasvu laskee U_{OC} :ttä lineaarisesti nostaten samalla hieman I_{SC} :tä. [13, s. 494]



Kuva 2.11. Säteilyintensiteetin (a) ja aurinkokennon lämpötilan (b) vaikutukset aurin- kokennon IU -kuvaajaan. Kuva muokattu alkuperäisestä. [13, s. 494]

Aurinkokennon tuottama teho on sen jännitteen ja virran tulo

$$P = UI, \quad (3)$$

joka on siis nolla avoimen virtapiirin tai oikosulun tapauksessa, koska joko virta tai jän- nite on nolla. Näiden ääripäiden välillä aurinkokenno tuottaa tehoa, joka on suurimmil- laan, kun aurinkokenno toimii MPP:ssä. [16, s. 785] MPP sijaitsee aurinkokennon IU - kuvaajan 'polvessa', jossa virta (I_{MPP}) ja jännite (U_{MPP}) ovat karkeasti 80% I_{SC} :stä ja U_{OC} :stä [16, s. 785] [12, s. 339]. MPP:n sijaintia aurinkokennon IU -kuvaajassa on ha- vainnollistettu kuvassa 2.10, jossa on myös aurinkokennon tuottaman tehon kuvaaja jän- nitteen funktiona.

Aurinkokennon maksimihyötysuhde saadaan laskettua jakamalla kennon tuottama maksimiteho kennolle saapuvan säteilyn teholla

$$\eta_{\max} = \frac{P_{\text{MPP}}}{P_{\text{in}}} = \frac{I_{\text{MPP}}U_{\text{MPP}}}{AG_t}, \quad (4)$$

missä P_{MPP} on aurinkokennon tuottama teho MPP:ssä, P_{in} on aurinkokennolle saapuvan säteilyn teho, I_{MPP} aurinkokennon virta MPP:ssä, U_{MPP} on aurinkokennon jännite MPP:ssä, A on aurinkokennon pinta-ala ja G_t on aurinkokennolle saapuvan säteilyn säteilyvoimakkuus [13, ss. 492, 494]. Kesäkuussa 2018 julkaistun aurinkokennojen hyötysuhde-ennätyksiä listaavan taulukon mukaan yksikerroksisen piiaurinkokennon suurin varmistettu hyötysuhde on $26,7\% \pm 0,5\%$ [17, s. 428].

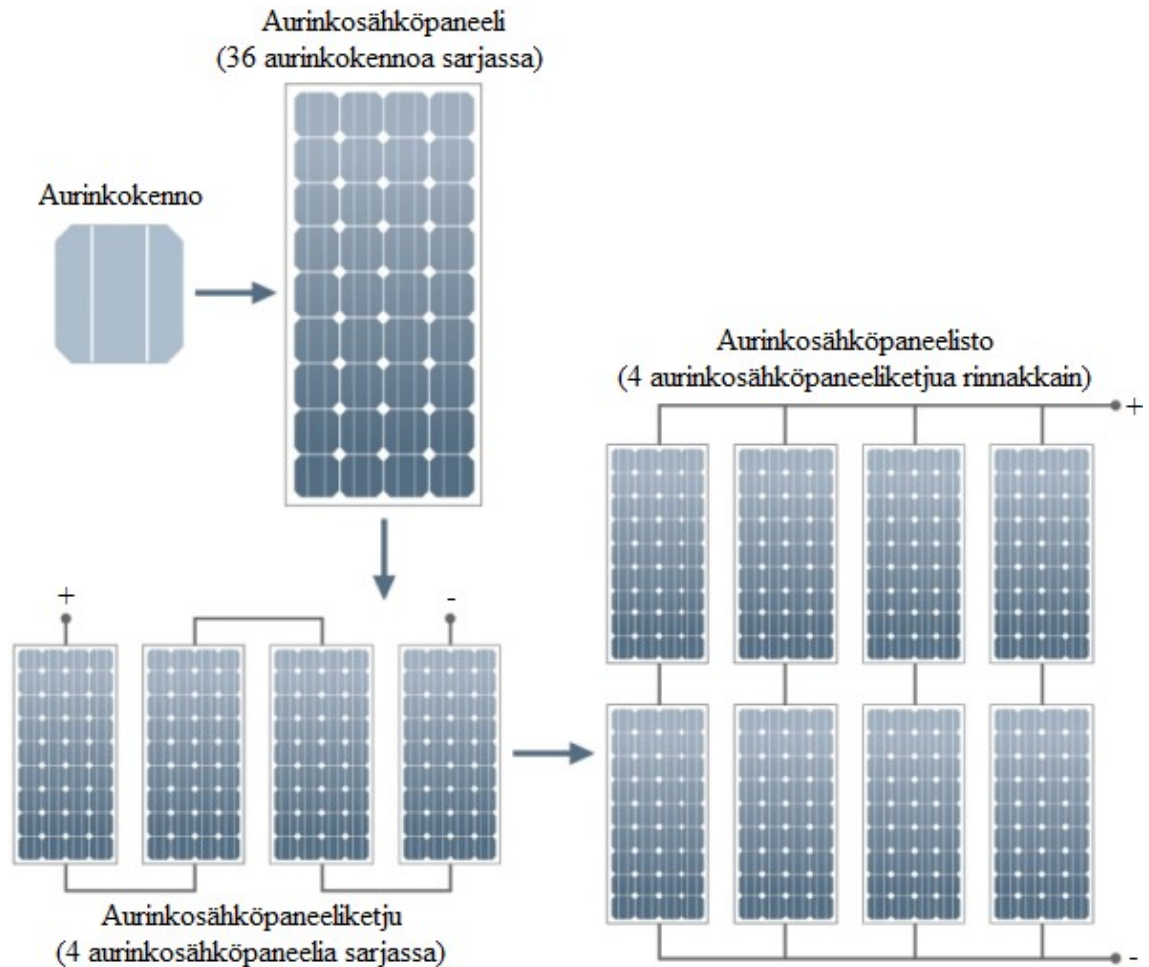
2.5 Aurinkosähköpaneelit

Yksittäisen aurinkokennon tuottama teho ei riitä vastaamaan kaupallisten laitteiden vaatimuksiin. Tehoa voidaan lisätä kytkemällä aurinkokennoja sarjaan jännitteen nostamiseksi, tai rinnan sähkövirran kasvattamiseksi. [11, s. 47] Aurinkokennoista, liitännöistä ja suojaavista sekä tukevista rakenteista muodostuvaa kokonaisuutta kutsutaan aurinkosähköpaneeliksi. [13, s. 488].

Aurinkosähköpaneelin tulee kestää mekaanista kuormitusta ja sen sisältämien aurinkokennojen tulee olla suojassa sääolosuhteilta sekä sähköisesti eristetty [2, s. 297]. Aurinkokennon suojakotelointi koostuu yleensä etupuolella hyvin valoa läpäisevästä karkaisusta lasista ja takapuolella komposiittimuovista, joiden väliin aurinkokennot on laminoitu kellumaan etyylivinyyliaasettiin (EVA). Suojakotelointi on sinetöity anodisoituun alumiinikehykseen, joka on sähköisesti eristetty aurinkokennoista. [2, ss. 298-300] Aurinkosähköpaneelin takaa löytyy vielä kytkentärasia tai johtimet kytkentöjä varten [11, s. 48].

Aurinkokennojen määrä aurinkosähköpaneelissa voidaan valita siten, että se sopii 12 V akun lataamiseen, mikä voi vaatia yli 15 V latausjännitteen. Lisäksi tulee ottaa huomioon aurinkokennojen jännitteen lasku esimerkiksi luvussa 2.4 käsiteltyjen lämpötilan kasvun ja säteilyintensiteetin heikkenemisen seurauksena. Esimerkiksi 18 V_p aurinkosähköpaneeliin tarvitaan 30 sarjaan kytkettyä aurinkokennoa, joiden avoimen virtapiirin jännite on 0,6 V. Vastaavasti kahden edellä mainitun aurinkosähköpaneelin sarjaankytkennällä saadaan ladattua 24 V akkua ja samalla logiikalla 36 V tai 48 V akkuja. [11, s. 47]

Sarjaan kytkettyjen aurinkosähköpaneelien muodostama kokonaisuutta kutsutaan aurinkosähköpaneeliketjuksi. Aurinkosähköjärjestelmän tehoa voidaan yhä lisätä kytkemällä aurinkosähköpaneeliketjuja rinnakkain, jolloin niistä muodostuvaa kokonaisuutta kutsutaan aurinkosähköpaneelistoksi. [18, s. 21] [19, s. 7] Suurissa aurinkosähköjärjestelmissä aurinkosähköpaneelisto voi koostua vielä useammasta osapaneelistosta [11, s. 50] [19, s. 7]. Kuvassa 2.12 on havainnollistettu aurinkosähköpaneelistöä.



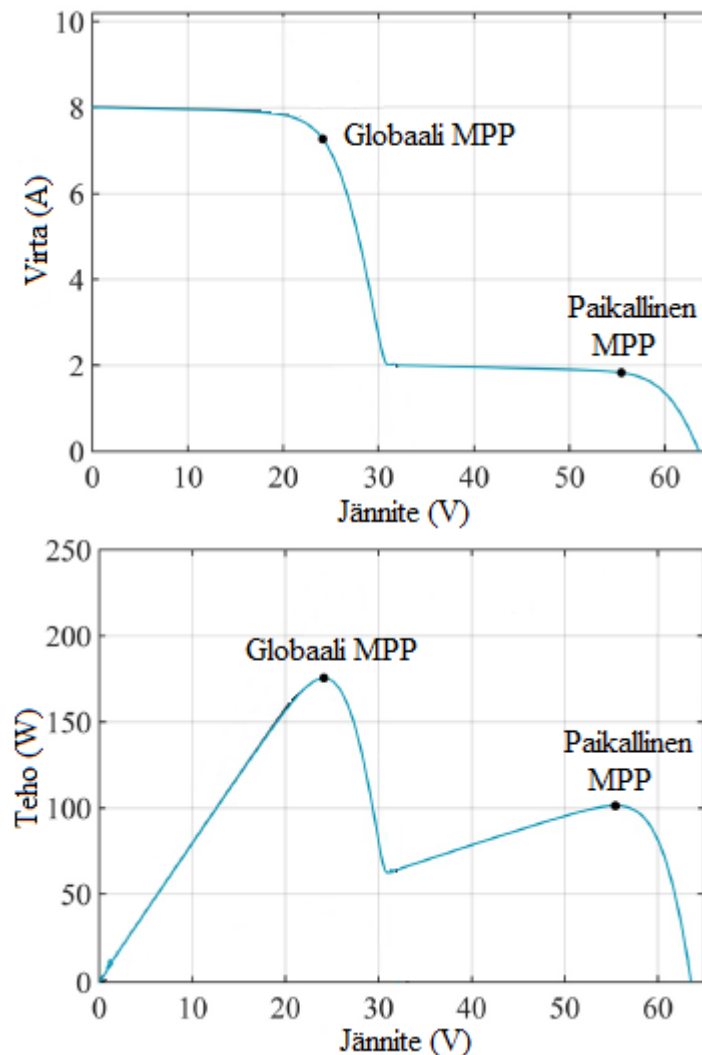
Kuva 2.12. Havainnekuva aurinkosähköpaneelistosta ja sen osista. Kuva muokattu alkuperäisestä. [20, s. 377]

Aurinkosähköpaneelin teho on pienempi kuin sen muodostamien aurinkokennojen tehojen summa. Sama pätee aurinkosähköpaneelistöön ja sen muodostamiin aurinkosähköpaneelisiin. Tämän johtuu yhteensopimattomuushäviöistä, joita syntyy, kun yhdistetään aurinkokennoja, joiden IU -kuvaajat eroavat toisistaan. Yhteensopimattomuushäviöitä esiintyy aina aurinkokennojen valmistuksessa syntyvien erojen vuoksi, mutta merkittävimmät häviöt johtuvat epätasaisista toimintaolosuhteista aurinkokennojen välillä. Kuvassa 2.11 nähtiin kuinka säteilyintensiteetin ja lämpötilan vaihtelu muuttaa aurinkokennon IU -kuvaajaa. Toimintaolosuhteiden vaihtelu aurinkokennojen välillä voi johtua esimerkiksi paneelien osittaisesta varjostuksesta. Tällöin aurinkokennoille saapuvan säteilyn intensiteetti ja aurinkokennojen lämpötila ei ole yhtenäinen. [2, s. 303]

Epätasaisissa toimintaolosuhteissa yhden tai useamman aurinkokennon oikosulkuvirta voi olla huomattavasti pienempi muihin sarjaan kytkettyihin aurinkokennoihin verrattuna. Sarjaankytkennässä pienin virta rajoittaa kaikkien muiden virtaa, ja luvussa 2.3 kävi ilmi, että aurinkokenno on periaatteessa diodi. Kirchhoffin jännitelain mukaan virtaa rajoittava aurinkokenno kokee nyt muiden sarjassa olevien aurinkokennojen jännitteen

summan estosuuntaisena, jolloin se biasoituu estosuuntaisesti. Riittävän suurella jännitteellä tapahtuu läpilyönti ja aurinkokennon läpi kulkeva virta kasvaa nopeasti tuottaen paljon lämpöä. Tällöin voi syntyä kuuma piste (*hot spot*), joka voi aiheuttaa vaurioita aurinkosähköpaneeliin ja pahimmillaan tulipalon. [9, s. 75]

Kuumia pisteitä vastaan on helppo suojautua aurinkokennojen rinnalle kytketyillä ohitusdiodeilla (*bypass diode*), joilla on aurinkokennoihin verrattuna vastakkainen polariteetti [2, s. 304]. Ohitusdioidien kautta sähkövirta pääsee ohittamaan varjostetut aurinkokennot ehkäisten kuumien pisteiden syntymistä. Ohitusdioidit sijoitetaan tavallisesti aurinkosähköpaneelin kytkentärasiaan. [9, s. 76] Ohitusdioidien vuoksi aurinkosähköpaneelin *IU*-kuvaajassa voi olla epätasaisissa toimintaolosuhteissa monta paikallista MPP:tä (LMPP), mutta korkeintaan ohitusdioidien määrä. Suurimman tehon tuottavaa LMPP:tä kutsutaan globaaliksi MPP:ksi (GMPP). Kuvassa 2.13 esitellään kahden aurinkosähköpaneelin sarjaankytkennän virran ja tehon kuvaajat jännitteen funktiona, sekä järjestelmän LMPP ja GMPP epätasaisissa toimintaolosuhteissa.



Kuva 2.13. Aurinkosähköjärjestelmän *IU*- ja *PU*-kuvaajat sekä LMPP ja GMPP epätasaisissa toimintaolosuhteissa. Kuva muokattu alkuperäisestä. [21, s. 20]

2.6 Aurinkosähköjärjestelmät

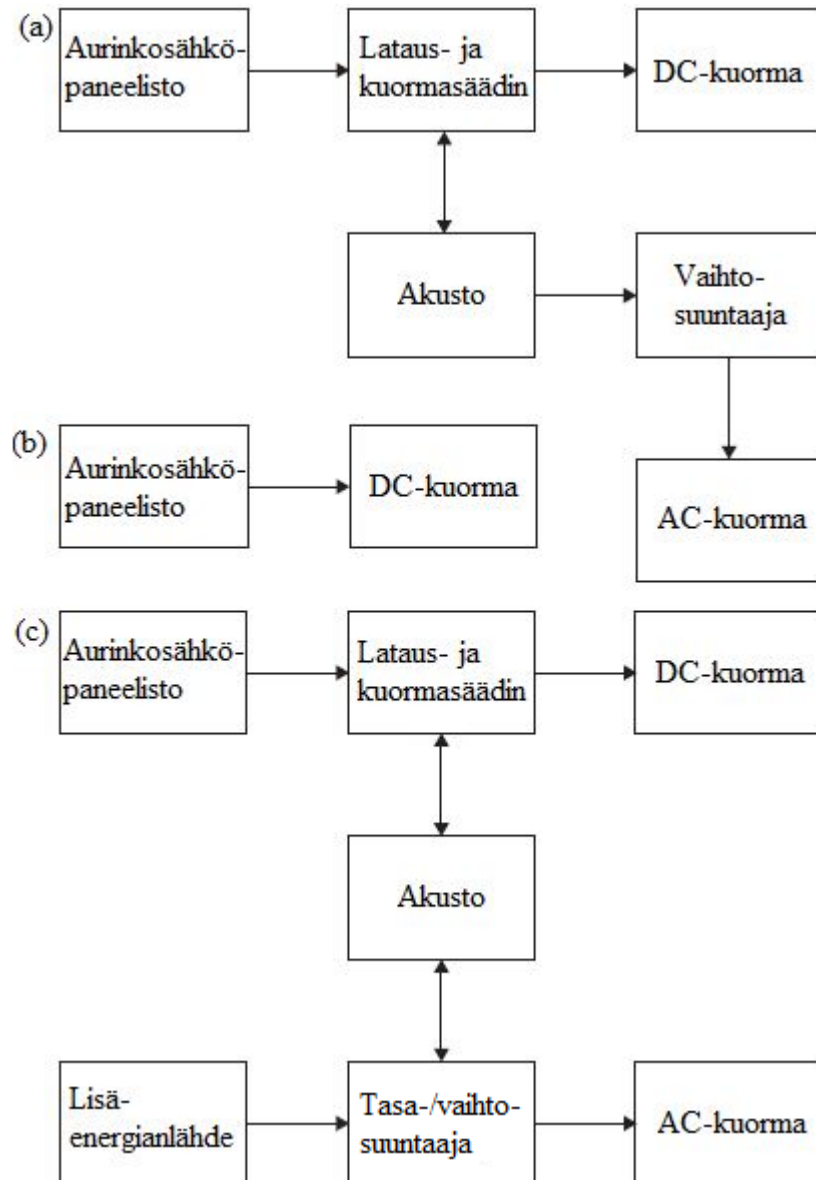
Tässä luvussa esitellään erilaisia aurinkosähköjärjestelmiä, niiden tyypillisiä komponentteja ja sovelluskohteita. Aluksi käydään läpi aurinkosähköjärjestelmiä yleisesti ja luvuissa 2.6.1-2 esitellään sähköverkosta riippumattomia sekä sähköverkkoon liitettyjä aurinkosähköjärjestelmiä.

Kaikkiin aurinkosähköjärjestelmiin sisältyy ainakin yksi aurinkokenno, jonka rakentamiseen ja toimintaan tutustuttiin luvussa 2.4. Yleensä käytetään kuitenkin aurinkokennoista muodostettuja aurinkosähköpaneeleita, joita esiteltiin luvussa 2.5. Niiden lisäksi aurinkosähköjärjestelmissä on yleensä asennustelineet aurinkosähköpaneelille, aurinkosähköä kuluttava kuorma, kytkimiä, sulakkeita ja kaapelit virtapiiriin luomiseksi. [13, s. 505] Aurinkokennot tuottavat tasavirtaa, mutta jotkin kuormat toimivat vaihtovirralla (AC). Tällöin aurinkosähköjärjestelmään voidaan lisätä vaihtosuuntaaja, joka muuntaa tasavirtaa vaihtovirraksi. [2, s. 855]

Aurinkosähköpaneelien asennuspaikka riippuu kohteesta, mutta yleisiä asennuspaikkoja ovat rakennusten katot ja maajalustat. Edellisten lisäksi mahdollisia asennuspaikkoja ovat esimerkiksi seinät, tolpat, ajoneuvojen katot ja veneiden kannet. Asennuspaikkaa valitessa tulee huomioida auringon säteilyn mahdollisimman esteetön pääsy aurinkosähköpaneelille, aurinkosähköpaneelin kallistuskulma ja akkukaapeleiden pituus. Ideaalisesti aurinkosähköpaneelit tulisi asentaa siten, että ne ovat keskipäivällä kohtisuorassa auringon säteilyyn nähden. Jyrkempi kallistuskulma parantaa muuten heikkoa tuotantoa talvella ja loivempi mahdollistaa yleensä edullisempien asennustelineiden käytön. Asennustelineiden tulee kestää korroosiota ja tuulen aiheuttamaa kuormitusta. [18, s. 24]

2.6.1 Sähköverkosta riippumattomat aurinkosähköjärjestelmät

Sähköverkosta riippumaton aurinkosähköjärjestelmä koostuu yksinkertaisimmillaan aurinkosähköpaneelistä, tasavirta (DC) -kuormasta, kaapeleista, kytkimestä ja sulakkeesta. Edellä mainittua aurinkosähköjärjestelmää mitoitettaessa on erittäin tärkeää, että kuorman impedanssi sovitetaan siten, että aurinkosähköpaneelisto toimii MPP:ssä, mistä lisää tietoa luvuissa 2.5 ja 4.3.5. [11, s. 32] Tällaiseen aurinkosähköjärjestelmään kytketty kuorma toimii vain auringon paistaessa, joten soveltuvat käyttökohteet ovat rajalliset. Tyypillinen käyttökohde on esimerkiksi veden pumppaukseen tehty järjestelmä, jossa voidaan varastoida vettä aurinkosähkön sijaan. [13, s. 506] Yksinkertaisen aurinkosähköjärjestelmän lohkokaaavio on esitetty kuvan 2.14 kohdassa (b).



Kuva 2.14. Sähköverkosta riippumattomien aurinkosähköjärjestelmien lohkokaaaviot (a) akulla varustetun, (b) yksinkertaisen ja (b) hybridiaurinkosähköjärjestelmän tapauksissa. Kuva muokattu alkuperäisistä. [11, ss. 32-34]

Edellisessä kappaleessa esitellyn yksinkertaisen aurinkosähköjärjestelmän suurin heikkous on sen toiminnan rajoittuminen vain hetkiin, jolloin aurinko paistaa. Yöllistä ja pilvisen sään energiantarvetta varten on akustolla varustettu aurinkosähköjärjestelmä, joka sisältää aiemmin mainittujen komponenttien lisäksi akuston sekä lataus- ja kuormasäätimen. Auringon paistaessa akustolla varustettu aurinkosähköjärjestelmä lataa akkuihin sähköenergiaa, joka voidaan hyödyntää silloin, kun aurinko ei paista. Lataus- ja kuormasäädin puolestaan suojelee akkuja niiden latausta ja purkamista säännöstelemällä. [11, s. 32] Luvussa 3 tutustutaan tarkemmin akkuihin ja luvussa 4 lataus- ja kuormasäätimiin. Akulla varustetun aurinkosähköjärjestelmän lohkokaaavio on esillä kuvan 2.14 kohdassa (a).

Aurinkosähköpaneelien lisäksi aurinkosähköjärjestelmässä voi olla muitakin energianlähteitä, jolloin kyseessä on hybridiaurinkosähköjärjestelmä. Dieselgeneraattori on yleisin lisäenergianlähde hybridiaurinkosähköjärjestelmissä, mutta sen sijaan voidaan myös käyttää esimerkiksi tuuliturbiinia, polttokennoa tai sähköverkkoa. [11, s. 33] Hybridiaurinkosähköjärjestelmä voi siis olla myös seuraavassa luvussa esiteltävä sähköverkkoon liitetty aurinkosähköjärjestelmä. Vaihtovirtaa tuottavan lisäenergianlähteen tapauksessa aurinkosähköjärjestelmään on lisättävä tasasuuntaaja, mikäli lisäenergianlähteellä halutaan ladata akkua. Tasasuuntaaja muuttaa vaihtovirran akulle sopivaksi tasavirraksi. [22, s. 70] Joissain tapauksissa tasa- ja vaihtosuuntaus voi löytyä myös samasta laitteesta [23]. Hybridiaurinkosähköjärjestelmän lohkokaavio on esillä kuvan 2.14 kohdassa (c).

2.6.2 Sähköverkkoon liitetyt aurinkosähköjärjestelmät

Sähköverkkoon liitetyt aurinkosähköjärjestelmät ovat nimensä mukaisesti liitettynä sähköverkkoon, mikä mahdollistaa aurinkosähkön syötön sähköverkkoon ja toisaalta sähköverkon hyödyntämisen, kun aurinkosähkö ei riitä. Verkkoon liittyminen aiheuttaa kuitenkin myös turvallisuuteen ja verkkoon syötettävän aurinkosähkön laatuun liittyviä vaatimuksia. [15, s. 782]

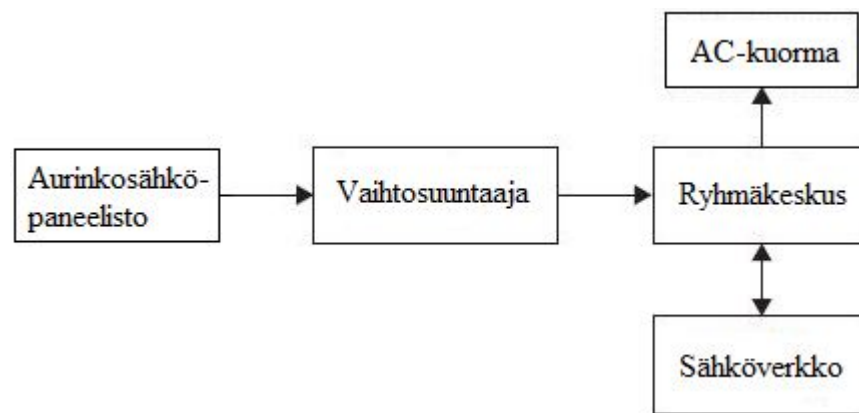
Sähköverkkoon liitetyissä aurinkosähköjärjestelmissä voidaan käyttää pääosin samoja komponentteja kuin edellisessä luvussa esitellyissä sähköverkosta riippumattomissa aurinkosähköjärjestelmissä [2, ss. 843-844]. Sähköverkkoon liittäminen aiheuttaa kuitenkin tarpeen myös lisäkomponenteille, sillä aurinkokennot tuottavat tasavirtaa ja sähköverkkoon tulisi syöttää vaihtovirtaa. Sähköverkkoon liitetyissä aurinkosähköjärjestelmissä täytyy siis olla vaihtosuuntaaja. [2, s. 844]

Sähköverkkoon ei voi myöskään syöttää mitä tahansa vaihtovirtaa, vaan sen jännitteen ja taajuuden tulee olla tarkasti synkronoitua sähköverkon kanssa. Sama ehto pätee kaikkiin sähköverkkoon liitettyihin voimalaitoksiin. Tämä johtuu siitä, että kaikki sähköverkkoon liitetyt tehollähteet syöttävät yhdessä kaikkia verkkoon liitettyjä kuormia. [2, s. 845] Huono synkronointi voi johtaa sähköverkon epätasapainoon, siihen liitettyjen laitteiden vahingoittumiseen ja sähkökatkoksiin [24].

Sähköverkkoon liitetty aurinkosähköjärjestelmä voi olla esimerkiksi suuren kokoluokan sähköverkkoa syöttävä järjestelmä, tai pienempi järjestelmä, jossa aurinkosähköä käytetään paikallisesti ja vain ylimääräinen sähkö syötetään sähköverkkoon [16, s. 795]. Esimerkkejä jälkimmäisestä ovat toimiston, tehtaan tai kotitalouden kulutukseen vastaavat aurinkosähköjärjestelmät. Aamu- ja iltapäivän välinen aika on aurinkosähkön tuotannon kannalta parasta aikaa, joten arkipäivisin aurinkosähköllä voidaan vastata liiketoiminnallisten rakennusten sähkönkulutukseen melko hyvin. Sen sijaan kotitalouksissa sähkönkulutus yleensä suurimmillaan aamulla ja illalla, jolloin aurinkosähkön tuotanto on heikompaa. [13, s. 506] Tällöin päivällä tuotettu aurinkosähkö voidaan myydä sähköverkkoon,

ja ostaa sieltä aamulla ja illalla tarvittava sähkö, jolloin sähköverkko toimii tavallaan energiavarastona [13, ss. 506-507].

Energiavarastoksi voidaan hankkia myös esimerkiksi akusto, jolloin kyseessä olisi edellisessä luvussa esitelty hybridaurinkosähköjärjestelmä. Akuston, lataus- ja kuormasäätimen sekä tasasuuntaajan lisääminen nostaa kuitenkin huomattavasti aurinkosähköjärjestelmän hintaa. [16, s. 795] Verkkoon syötetty aurinkosähkö on vielä sen verran vähäistä verkon kapasiteettiin verrattuna, ettei se häiritse verkon toimintaa. Energiavarasto tulee kuitenkin tarpeelliseksi myös verkkoon liitetyissä aurinkosähköjärjestelmissä, mikäli niiden käyttö lisääntyy merkittävästi ja ylimääräistä sähköä pitää varastoida muualla kuin sähköverkossa. [15, s. 792] Kuvassa 2.15 on lohko-kaavio sähköverkkoon liitetystä aurinkosähköjärjestelmästä.



Kuva 2.15. Yksinkertaisen sähköverkkoon liitetyn aurinkosähköjärjestelmän lohko-kaavio. Kuva muokattu alkuperäisestä. [13, s. 507]

Aurinkosähkön liittäminen sähköverkkoon voi aiheuttaa myös turvallisuusriskin sähkökatkon aikana, jos aurinkosähkön syöttö verkkoon jatkuu. Sähköverkkoon voi tällöin syntyä saareke (*islanding*), jossa säilyy sähkövirta katkosta huolimatta. [16, s. 795] Saarekekäyttö voi olla vaaraksi verkon parissa työskenteleville henkilöille, jotka luulevat sähkön olevan katki [15, s. 782]. Ongelmia voi muodostua myös, jos sähköverkon uudelleenkytkentä tapahtuu saarekekäytön aikana. Tällöin vaihtosuuntaaja voi altistua ylivirrälle, joka voi vahingoittaa suojaavia komponentteja. Sähköverkon vikatilanteet tulee siis havaita ja huolehtia, että aurinkosähköjärjestelmä irrotetaan silloin verkosta. Aurinkosähkön syöttöä paikalliselle kuormalle voidaan kuitenkin jatkaa sähköverkosta erillään. [16, s. 795]

3. ENERGIAN VARASTOINTI AKKUIHIN

Tässä luvussa tutustutaan akkuihin ensin yleisesti luvussa 3.1 ja sitten osana aurinkosähköjärjestelmiä luvussa 3.2. Yleisen katsauksen jälkeen tutustutaan paremmin aurinkosähköjärjestelmissä jo käytössä oleviin lyijy- ja nikkeliakkuihin luvuissa 3.3-4 sekä käsitellään litiumioniakkujen potentiaalia aurinkosähkökäytössä luvussa 3.5. Seuraavaksi tutustutaan aurinkosähköjärjestelmissä käytettävien akkujen elinikään ja siihen vaikuttaviin tekijöihin luvussa 3.6. Lopuksi luvussa 3.7 kerrataan vielä keskeisin sisältö ja vertaillaan esiteltyjä akkuja keskenään. Luvun 3 sisältö koskee pääosin lyijyakkuja, sillä ne ovat yleisin akkutyyppi aurinkosähköjärjestelmissä [25, s. 375].

3.1 Akuista yleisesti

Akku on sähkökemiallinen laite, johon voidaan varastoida sähköä kemialliseksi energiaksi ja muuttaa se tarvittaessa käänteisellä reaktiolla takaisin sähköksi. [26, ss. 1746-1747] Akku koostuu kotelosta, jonka sisällä on elektrolyyttiin upotettuna positiivinen ja negatiivinen elektrodi separaattorilla toisistaan erotettuina. Lisäksi kotelon ulkopuolella on positiivinen ja negatiivinen liitäntä ulkoista virtapiiriä varten. Akkulevyyksikin kutsutut elektrodit koostuvat sähköä johtavasta materiaalista, joka toimii samalla tukena sitä ympäröivälle aktiiviselle materiaalille. [15, ss. 805-806] Elektrolyytti mahdollistaa ionien liikkeen, ja ulkoinen virtapiiri elektronien liikkeen, elektrodien välillä [27, s. 131]. Separattori läpäisee ioneja, mutta suojaa akkua elektrodien väliseltä oikosululta [15, s. 805] [27, s. 131].

Akun varaaminen ja purkaminen ovat sähkökemiallisia prosesseja, joissa elektrodit hapettuvat ja pelkistyvät. Hapettuessaan elektrodin aktiivinen materiaali luovuttaa elektroneja ja pelkistyessään vastaanottaa niitä. Akun varaaminen tapahtuu elektrolyysillä, jossa sähköenergian avulla positiiviseksi pakotettu elektrodi hapettuu ja negatiivinen elektrodi pelkistyy. Akun purkautuminen on sähköenergiaa tuottava spontaani reaktio, jossa hapettuminen tapahtuu negatiiviseksi muuttuvalla elektrodilla ja pelkistyminen positiivisella elektrodilla. [15, s. 805]

Akun jännite syntyy elektrodien aktiivisten materiaalien ja elektrolyytin kemiallisesta potentiaalista ja on sitä suurempi, mitä reaktiivisempia materiaalit ovat. Materiaalien reaktiivisuuden tulisi kuitenkin rajoittua vain tilanteisiin, jossa akun virtapiiri on suljettu, ja olla muissa tilanteissa reagoimatta akun sisällön kanssa. Tarpeeton reaktiivisuus johtaa akun itsepurkautumiseen, eli varauksen hyödyntämättömään menetykseen. Erilaisten akkukemioiden määrää rajoittaa sopivan materiaalikombinaation lisäksi materiaaleille ja reaktioille asetetut erikoisvaatimukset: aktiivisten materiaalien tulee olla palautettavissa al-

kuperäiseen muotoonsa sähköenergian avulla, aktiivista materiaalia ei saa hävitä elektrodeilta ja reaktioiden synnyttämät materiaalit eivät saa rajoittaa kontaktia aktiivisen materiaalin, elektrolyytin sekä elektrodien johdinten välillä. [15, s. 806]

3.2 Akut aurinkosähköjärjestelmissä

Aurinkosähköjärjestelmässä akku mahdollistaa tasaisen sähkönsyötön kuormalle auringon säteilystä riippumatta. Aurinkokennoilta saatava teho kullakin hetkellä riippuu kennoille saapuvan säteilyn määrästä, joka vaihtelee päivän aikana lähinnä auringon aseman ja varjostusten mukaan. Kuorma kuitenkin vaatii yleensä tasaista tehoa, jolloin akku toimii puskurivarastona kennojen ja kuorman välillä varastoiden tai täydentäen tuotetun ja kulutetun tehon erotuksen. Aurinkokennon toimintapisteen jännite voi kuormasta riippuen vaihdella avoimen virtapiirin ja oikosulun välillä, joten akku suojaa kuormaa myös mahdollisesti haitalliselta jännitteen vaihtelulta. Lisäksi akku mahdollistaa aurinkosähköjärjestelmän autonomian varastoimalla energiaa reserviin pilvisen sään tai hätätilan varalle. [15, s. 791]

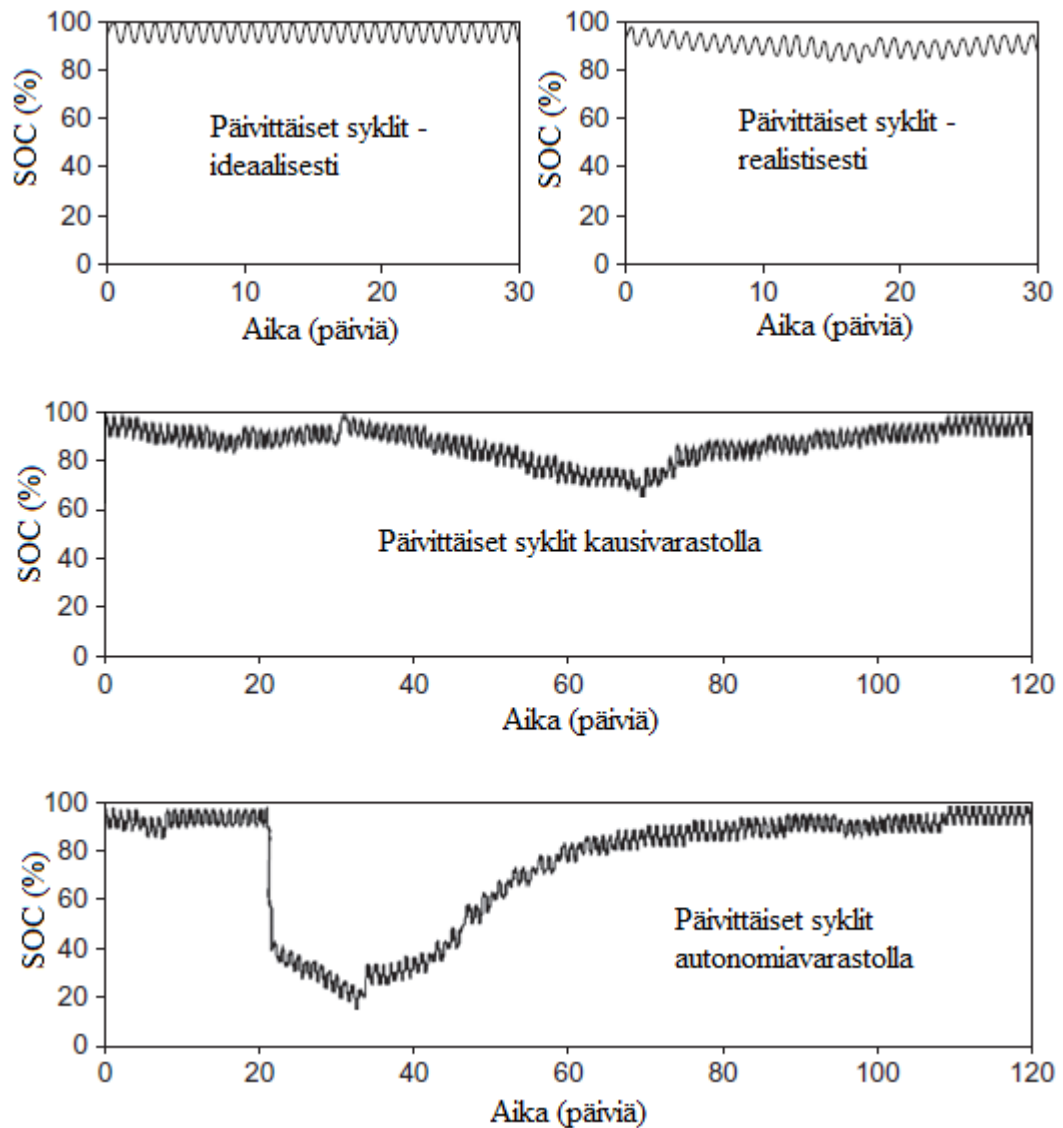
Akku on oleellinen osa sähköverkosta riippumatonta aurinkosähköjärjestelmää ja onkin käytössä niistä suurimmassa osassa. [15, ss. 786, 789] Sen sijaan akku on harvoin käytössä sähköverkkoon liitetyissä ja vesipumppuja tai suorakäyttömootoreita syöttävissä aurinkosähköjärjestelmissä. Luvussa 2.6.2 kävi ilmi, että sähköverkkoon liitetyt aurinkosähköjärjestelmät tuottavat vaihtovirtaa, joka käytetään yleensä välittömästi tai syötetään ylimääräisenä sähköverkkoon. Vesipumppujen tapauksessa sopivasti mitoitettun sähköpumpun nopeus vaihtelee saatavilla olevan aurinkosähkön mukaan, ja ylimääräinen vesi voidaan varastoida kysyntää ja tarjontaa tasaavaan säiliöön. Suorakäyttömootorien, esimerkiksi tuulettimen, nopeus vaihtelee saatavilla olevan tehon mukaan samoin kuin vesipumpuilla. [15, s. 792]

Aurinkosähköjärjestelmissä akkujen toiminnalle asetetut vaatimukset eroavat muista akkujen käyttökohteista, joissa lataus- ja purkausvirrat ovat yleensä suurempia ja akut ladataan täyteen purkauksen jälkeen [15, ss. 792-793] [15, s. 813]. Aurinkosähköjärjestelmien tapauksessa päivittäisestä täydestä latauksesta ei ole takuita, sillä saatavilla oleva latausenergia on rajoitettua ja vaihtelevaa. Aurinkosähköjärjestelmä mitoitetaan yleensä niin, että päivittäiset syklit pysyvät matalina ja purkausten syvyydet (*depth of discharge*, DOD) ovat noin 2-30% luokkaa. [15, s. 793] Yksi akun sykli koostuu yhdestä purkauksesta ja yhdestä latauksesta [15, s. 799].

Sähköverkosta riippumattomat järjestelmät mitoitetaan yleensä myös niin, että ne voivat toimia autonomisesti tietyn aikaa, esimerkiksi 3-20 päivää, jonka jälkeen varausta olisi hyvä olla jäljellä vielä noin 20%. Poikkeuksena ovat luvussa 2.6.1 esitellyt hybridiaurinkosähköjärjestelmät, joissa päivittäiset syklit voivat olla syviä, koska autonomia voidaan

turvata esimerkiksi generaattorilla. [15, s. 793] Autonomian aiheuttamasta syvästä purkautumisesta palautuminen täyteen varaukseen aurinkoenergian avulla voi kestää useita viikkoja [15, s. 794].

Autonomian lisäksi akulta voidaan vaatia kausivarastoa, esimerkiksi talven tai sadekauden ajaksi. Päivittäisten syklien lisäksi vähäaurinkoinen kausi aiheuttaa pidemmän ja syvemmän syklin, jonka vuoksi akulla voi olla useita viikkoja tavallista matalampi varaus-tila (*state of charge, SOC*). [15, s. 793] Kuvassa 3.1 annetaan esimerkkejä akun toiminnasta eri käyttökohteissa.



Kuva 3.1. Esimerkkejä akun SOC:stä ajan funktiona eri aurinkosähköjärjestelmissä. Kuva muokattu alkuperäisestä. [15, s. 794]

Aurinkosähköjärjestelmissä käytettävien akkujen itsepurkautumisnopeus on yleensä pieni, noin 1-4% kuukaudessa 20-25 °C:n lämpötilassa. Lämpötila liittyy oleellisesti itsepurkautumisnopeuteen, joka kaksinkertaistuu lämpötilan kasvaessa 10 °C:lla. Aurinkosähköjärjestelmissä itsepurkautumisen aiheuttama lataustarve voidaan yleensä jättää

huomiotta, sillä se on häviävän pieni verrattuna kuorman tai lataussäätimen kulutukseen. [15, s. 799]

Suurissa sähköverkosta riippumattomissa aurinkosähköjärjestelmissä yleisin akkutyyppejä ovat lyijyakku ja pienissä kannettavissa järjestelmissä yleisimpiä akkutyyppejä ovat nikkeli- tai litiumioniakku (Li-ion) [11, ss. 55-56]. Lyijyakut ovat suosittuja, koska ne ovat verrattain halpoja, niiden tehotehoisuus on suhteellisen hyvä ja kierrätys on hallinnassa [15, s. 776] [25, s. 375]. Toisaalta lyijyakut ovat myös aurinkosähköjärjestelmän heikoin lenkki, etenkin niiden verrattain lyhyen eliniän vuoksi. [25, s. 375]

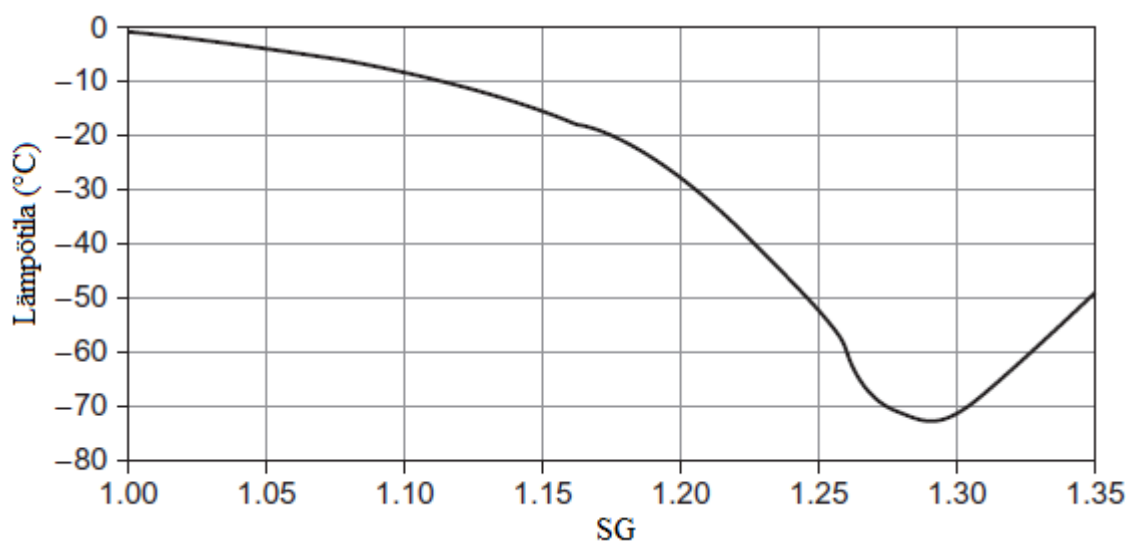
Nikkeliakut ovat myrkyllisiä ja kalliita, joten niiden käyttö suurissa järjestelmissä rajoittuu yleensä vain kohteisiin, joissa vaaditaan äärimmäisiä käyttölämpötiloja. Li-ion -akut ovat suuren tehotehoisuutensa vuoksi suosittuja kannettavissa järjestelmissä ja sähköautojen ansiosta niitä saa myös suurempina akkupaketteina. Aurinkosähköjärjestelmissä suuri tehotehoisuus on harvoin korkean hinnan arvoinen etu. Li-ion -akut vaativat myös monimutkaisesta turvapiiristä, jonka toimintaa on ilman häviöitä vaikea mukauttaa aurinkosähkön vaihtelevaan luonteeseen. Lisäksi akkukennojen tasolla vaadittavan turvapiiristä ansiosta Li-ion -akkuja myydään valmiina akkupaketteina, joiden käyttö ei ole yhtä joustavaa yksittäisiin kennoihin verrattuna. [15, ss. 807-808] Seuraavissa luvuissa tutustutaan hieman tarkemmin edellä mainittuihin akkutyyppeihin.

3.3 Lyijyakut

Ladatussa lyijyakussa elektrodien aktiiviset materiaalit ovat positiivisella puolella lyijydioksidi (PbO_2) ja negatiivisella puolella huokoinen lyijy (Pb). Elektrolyytinä toimii rikkihapon (H_2SO_4) ja veden (H_2O) liuos, jonka happokonsentraatio vaihtelee akun varauksen mukaan. Lyijyakun varausta purettaessa kummankin elektrodin aktiiviset materiaalit muuttuvat lyijysulfaatiksi ja rikkihapon konsentraatio elektrolyytissä pienenee. Vastavasti akkua ladattaessa elektrolyytin konsentraatio kasvaa ja elektrodit muuttuvat takaisin lyijydioksidiksi ja lyijyksi. [15, s. 809]

Aurinkosähköjärjestelmissä käytettävien lyijyakkujen elektrodit voivat olla muodoltaan massa- tai putkilevyjä. Massalevy koostuu aktiivisesta materiaalista ja sen tukena olevasta litteästä sähköä johtavasta levystä tai ristikosta. Putkilevyissä positiivisen elektrodin aktiivinen materiaali on putkimaisten punosten sisällä. [15, s. 810] Tällöin johtimena toimiva ydin on paremmin suojassa korroosiolta, joka muuttaa akkulevyn lyijyä lyijyoksidiksi [15, ss. 810, 826]. Putkilevyakuilla voidaan saavuttaa pidempi sykli-ikä (*cycle life*), mutta ne ovat myös kalliimpia kuin yleisemmät massalevyakut. [15, s. 810] Akun sykli-ikä ilmoittaa montako sykliä akku voi suorittaa, ennen kuin saatavilla oleva kapasiteetti laskee tiettyyn osaan, yleensä 80%:iin, alkuperäisestä. [15, s. 799] Etenkin positiivisen elektrodin paksuudella voidaan vaikuttaa akun elinikään ja virtaominaisuuksiin. Paksuuden kasvattaminen lisää akun elinikää, mutta pienentää akusta saatavaa virtaa ja nostaa hintaa. [15, s. 811] [28, s. 36].

Elektrolyytin ominaispaino (*specific gravity*, SG) kuvaa hapon tiheyden suhdetta veden tiheyteen 20 °C:n lämpötilassa. Akussa käytettävän elektrolyytin SG on hyvä valita käyttökohteen lämpötilan mukaan. [15, s. 816] Kylmässä korkeamman SG:n elektrolyytin käyttö suojaa akkua jäätymiseltä, sillä elektrolyytin laimentuminen akkua purettaessa johtaa jäätympisteeseen nousuun [15, ss. 819-820]. Leudossa ilmastossa käytettäville akuille valitaan yleensä 1,24 SG:n elektrolyyttiä, mutta kylmässä enemmän happoa sisältävää 1,26-1,28 SG:n elektrolyyttiä. [15, s. 816] Kuumassa elektrolyytin SG voi puolestaan olla hieman 1,24 SG:tä pienempikin. Tyhjän akun elektrolyytin SG on noin 1,05-1,15 [15, s. 816]. Kuvassa 3.2 on kuvattu rikkihappoelektrolyytin jäätympisteeseen lämpötila SG:n funktiona.



Kuva 3.2. Rikkihappoelektrolyytin jäätympisteeseen lämpötila SG:n funktiona. Kuva muokattu alkuperäisestä. [15, s. 820]

Lyijyakkujen hapon kerrostuminen (*stratification*) on myös huomionarvoinen ilmiö. Aurinkosähköjärjestelmissä akut eivät välttämättä saa täyttä latausta päivittäin ja syklit ovat yleensä matalia. Sykliä aikana tiheämmällä hapolla on taipumus päätyä akkukotelon alaosaan, jolloin elektrolyyttiin muodostuu kerroksia, joiden tiheys kasvaa pohjaa kohti. Kerrostuminen on ongelmallista, sillä se voi nopeuttaa korroosiota eikä hapon tiheyttä saa mitattua luotettavasti. Avoimilla akuilla kerrostumista voidaan ehkäistä antamalla välillä normaalia enemmän yllilatausta, jonka synnyttämä kaasu sekoittaa elektrolyyttiä. Suljetuilla akuilla kerrostuminen ei ole yhtä suuri ongelma, mutta toisaalta sitä ei voida myöskään ehkäistä yllilatauksella. [15, s. 817]

Lyijyakit voidaan siis luokitella avoimiksi tai suljetuiksi. Avoimissa akuissa elektrodit ovat täysin upotettuina nestemäiseen elektrolyyttiliuokseen. [11, s. 56] Yllilatauksen synnyttämä vety- ja happikaasu pääsee poistumaan avoimista akuista, joten akkuvettä on välillä lisättävä [15, ss. 811-812]. Vesihäviöt aiheuttavat tarpeen säännölliselle kunnossapidolle, minkä vuoksi avoimet akut soveltuvat huonosti syrjäisiin kohteisiin [11, s. 57].

Kaasupäästöjen vuoksi myös tuuleuksesta on huolehdittava, sillä yli 4%:n vetykonsentraatio ilmassa aiheuttaa räjähdysvaaran [15, s. 838]. Seuraavaksi tutustutaan tarkemmin suljettuihin akkuihin.

3.3.1 Suljetut lyijyakut

Suljetut akut suunniteltiin huoltovapaiksi kaasuhäviöitä rajoittamalla [11, s. 57]. Latauksen aikana syntyy edelleen kaasua, mutta suljettujen akkujen elektrodit eivät ole täysin elektrolyytin peitossa, jolloin kaasu pääsee rekombinoitumaan elektrodeilla takaisin vedeksi. Kaasua poistuu akusta turvaventtiilin kautta vain, jos latausvirta on liian suuri ja kaasua muodostuu nopeammin kuin se ehtii rekombinoitua. [15, s. 812] Suljettujen akkujen liiallinen ylilataaminen on erityisen haitallista, sillä akkuveden lisääminen ei ole mahdollista ja vesihäviöt johtavat lopulta akkujen kuivumiseen [11, s. 57].

Myös suljettujen akkujen tuuleuksesta on huolehdittava, vaikka kaasupäästöt ovatkin vähäiset avoimiin akkuihin verrattuna. Tuuleuksen pääasiallinen tavoite on jäähdyttää suljettuja akkuja, joissa ylilataus tuottaa lämpöä yli tuplasti avoimiin akkuihin verrattuna. [15, s. 838] Suljettujen akkujen etuna on myös vapaampi käyttöasento, sillä ne ovat tiiviitä ja elektrolyytti on liikkumattomassa muodossa [11, s. 57]. Siitä huolimatta suljettuja akkujakin suositellaan käytettäväksi pystyasennossa eikä käyttöä ylösalaisin suositella [29] [30, s. 2]. Huoltovapaa toiminta mahdollistaa käytön myös syrjäisissä kohteissa. Suljettuja akkuja on kahta tyyppiä: imeytetty lasikuitumatto (*absorbent glass mat*, AGM) ja geeli. [11, s. 57]

AGM-akuissa nestemäinen elektrolyytti on imeytetty huokoiseen lasikuituseparaattoriin, joka on ohkaisina mattoina tiiviisti akkulevyjen välissä. Lasikuidun huokosia ei täytetä kokonaan elektrolyytillä, jolloin ylilatauksessa syntyvät kaasut pääsevät rekombinoitumaan tyhjien ja vajaiden huokosten kautta. Elektrolyytin vähyydestä johtuen AGM-akut ovat erittäin herkkiä ylilatauksen aiheuttamille vesihäviöille, etenkin kuumissa olosuhteissa. [15, s. 812] Tästä syystä elektrolyytin kerrostumista ei voida ehkäistä ylilataamalla, ja AGM-akkuja voidaan käyttää vaakatasossa kerrostumisen minimoimiseksi. [15, s. 817]

Toisaalta vähäisen elektrolyyttimäärän vuoksi AGM-akkujen lasikuidussa on tilaa veden laajenemiselle, minkä ansiosta AGM-akuilla on hyvä kestävyys jäätymistä vastaan. [15, s. 812] Lisäksi jäätymispiste on alhaisempi, sillä elektrolyytin SG on muita lyijyakkuja korkeampi [15, s. 833]. AGM-akut suunniteltiin toimimaan hyvin etenkin suurilla sähkövirroilla ja niitä voidaan ladata viisi kertaa avoimia akkuja nopeammin [15, s. 812] [11, s. 57]. Niiden elinkaari on myös pidempi, mutta toisaalta ne ovat kalliimpia ja ympäristölle haitallisempia. [11, ss. 57-58].

Geeliakuissa elektrolyytti on sekoitettu hienojakoiseen piioksidiin, joka muodostaa liikkumattoman geelin. Lämpimänä seos on nestemäinen, jolloin se voidaan kaataa akkuun,

jossa se muuttuu jäähtyessään liikkumattomaksi geeliksi. [11, s. 57] Kuivuessaan geeliin muodostuu mikroskooppisia halkeamia, joiden ansiosta latauksessa syntyvät kaasut pääsevät rekombinoitumaan elektrodeilla. Halkeamat voivat muodostua myös vasta akun käyttöönoton jälkeen, minkä vuoksi geeliakut voivat elinkaarensa alussa vapauttaa kaasua turvaventtiilin kautta. Mahdolliset kaasupäästöt tulee huomioida etenkin ilmanvaihdossa. [15, s. 812]

Geeliakuissa positiivinen elektrodi voi olla rakenteeltaan levyn lisäksi myös putki, toisin kuin AGM-akuissa. Geelin liikkumattoman luonteen ansiosta elektrolyytin kerrostuminen ei ole merkittävä ongelma [15, s. 817]. Geeli johtaa myös lasikuitua paremmin lämpöä, joten elektrodeilla syntyvä lämpö hukataan tehokkaammin. [15, s. 812] Korkeissa lämpötiloissa vesihäviöitä kuitenkin tapahtuu, mutta vaikutus akun elinikään ei ole niin merkittävä suuremman elektrolyyttimäärän ansiosta. Siitä huolimatta jatkuvat vesihäviöt johtavat lopulta geelin kuivumiseen ja kutistumiseen, jolloin sen kontakti elektrodeihin heikkenee ja akun kapasiteetti vähenee. [15, s. 813] Geeliakut eivät myöskään kestä jatkuvia suuria sähkövirtoja yhtä hyvin kuin AGM-akut, mutta aurinkosähköjärjestelmissä se ei yleensä tuota ongelmia. [15, s. 813] Geeliakut ovat tässä luvussa käsitellyistä lyijyakuista kalleimpia. [11, s. 58]

3.3.2 Lyijyakkujen kapasiteetti

Tietyn akun kapasiteetti ei ole vakio, vaan riippuu monista käyttöön ja olosuhteisiin liittyvistä tekijöistä. Ensinnäkin akun kapasiteetti on sitä suurempi mitä matalampaan jännitteeseen se puretaan. [15, s. 815] Lisäksi purkamisnopeus, eli akusta otettavan sähkövirran suuruus, voi vaikuttaa akun kapasiteettiin siten, että akun kapasiteetti kasvaa purkausnopeuden ja sähkövirran laskiessa. Tämä johtuu siitä, että elektrolyytin ja elektrodien välisiä reaktioita voi tapahtua rajoitettu määrä tietyssä ajassa, joten suurilla purkamisnopeuksilla reaktionopeus voi olla rajoittava tekijä. Purkamisnopeuden vaikutus kapasiteettiin riippuu siis akun rakenteesta ja on erityisen merkittävä avoimilla massalevyakuilla, joilla on paljon ylimääräistä elektrolyyttiä ja paksut elektrodit. Sen sijaan AGM-akuilla ylimääräistä elektrolyyttiä on huomattavasti vähemmän ja purkamisnopeuden vaikutus kapasiteettiin on siten pienempi. [15, s. 814] [28, s. 15]

Kaikkien lyijyakkujen kapasiteetti riippuu myös lämpötilasta siten, että tiettyyn jännitteeseen purettaessa akun kapasiteetti laskee lämpötilan laskiessa. Kapasiteetin alenema johtuu siitä, että akun resistanssi kasvaa ja diffuusionopeus elektrolyytissä pienenee lämpötilan laskiessa. Tässäkin tapauksessa vaikutus on suurin akuilla, joilla on paljon elektrolyyttiä. [15, s. 814] Valmistajien ilmoittamat kapasiteetit on tavallisesti mitattu 20 °C lämpötilassa [15, s. 815].

Lyijyakuilla kapasiteettia voidaan menettää myös pysyvästi, jos akkua pidetään pitkään lataamatta matalassa SOC:ssa, jolloin sulfatoitumista pääsee tapahtumaan. Sulfatoitumiseksi kutsutaan sitä, kun akkua purettaessa syntynyt lyijysulfaatti pääsee kiteytymään

suuriksi kiteiksi, joita on vaikea hyödyntää akkua ladattaessa. Pahimmassa tapauksessa negatiiviselle elektrodille muodostuvat piikikkäät kiteet voivat aiheuttaa oikosulun elektrodien välillä. Tyhjäksi puretussa akussa sähköä johtamaton lyijysulfaatti voi myös muodostaa eristävän kerroksen elektrodin johdinmateriaalin pinnalle. Suurimpien vahinkojen välttämiseksi akkuja ei yleensä pureta alle 80% DOD aurinkosähköjärjestelmissä. [15, s. 821]

3.4 Nikkeliakut

Ladatussa nikkelikadmiumakussa (NiCd) elektrodien aktiiviset materiaalit ovat positiivisella puolella nikkelioksidihydroksidi (NiOOH) ja negatiivisella puolella hienojakoinen kadmium (Cd) [15, s. 821]. Elektrodien välillä on nailonseparaattori ja elektrolyytinä käytetään kaliumhydroksidin (KOH) ja veden liuosta [11, s. 58] [15, s. 822]. Elektrolyytin konsentraatio ei vaihtelee varauksen mukaan, toisin kuin lyijyakuissa, koska KOH ei osallistunut lataus- ja purkausreaktioihin [15, s. 822]. Samasta syystä purkausnopeudella ei ole vaikutusta kapasiteettiin toisin kuin lyijyakuilla [15, s. 814]. Nikkeliakun varausta purettaessa elektrodien aktiiviset materiaalit muuttuvat positiivisella puolella nikkelihydroksidiksi (Ni(OH)₂) ja negatiivisella puolella kadmiumhydroksidiksi (Cd(OH)₂). [15, s. 822] Aurinkosähköjärjestelmissä käytettävät NiCd-akut ovat yleensä pienille sähkövirroille ja *standby*-käyttöön suunniteltuja avoimia teollisuusakkuja. [11, s. 823]

Yksittäinen NiCd-akkukenno ei periaatteessa vahingoitu, vaikka sen purkaa täysin tyhjäksi, mutta käytännössä NiCd-akuille suositellaan korkeintaan 90% DOD. Tämä johtuu siitä, että akussa kennojen varaukset eroavat väistämättä hieman toisistaan, jolloin liian syvä purkaus voi kääntää pienimmän kapasiteetin kennojen polariteetin, mikä puolestaan voi lyhentää niiden elinikää. [15, s. 822] Haitallisia voivat olla myös jatkuvasti liian matalat syklit, joiden aikana akku ei pääse kunnolla tyhjentymään, mikä voi johtaa muisti-ilmiöön (*memory effect*). Muisti-ilmiö kuvaa tilannetta, jossa liian pitkään akun sykleissä käyttämättömäksi jääneen kapasiteetin saa purettua tavallista matalammalla jännitteellä. Muisti-ilmiötä ei kuitenkaan esiinny aurinkosähköjärjestelmissä käytettävissä suurissa taskulevyakuissa (*pocket-plate*). [15, s. 823]

NiCd-akuilla on lyijyakkuja pidempi elinikä ja parempi lämpötilakestävyys, mutta toisaalta ne ovat kalliimpia, niiden hyötysuhde on matalampi, itsepurkautumisnopeus korkeampi ja akuissa oleva kadmium on myrkyllistä. [11, s. 58] [25, s. 377] Kadmiumin myrkyllisyyden vuoksi kuluttajatyypin pienet suljetut NiCd-akut onkin kielletty EU:ssa [31]. Suurempien aurinkosähköjärjestelmissäkin käytettävien NiCd-akkujen käyttökieltoa hidastaa se, että niille ei ole vielä löytynyt korvaavaa akkukemiaa vastaavilla ominaisuuksilla [15, s. 823]. Edellä mainituista sysistä johtuen NiCd-akkuja käytetään aurinkosähköjärjestelmissä lyijyakkujen sijaan vain olosuhteiden vaatiessa, eli lämpötilan ollessa alle -10°C tai yli 40°C [15, s. 808]. Tällöin on huolehdittava akkujen oikeaoppisesta kierrättämisestä. [15, s. 823]

Nikkelimetallihybridiaikut (NiMH) ovat vähemmän myrkyllinen vaihtoehto NiCd-akuille. [11, s. 59] NiMH-akuissa anodin myrkyllinen kadmium on korvattu vetyä absorboivalla metalliseoksella. [11, s. 58] Ympäristölle ystävällisempien materiaalien lisäksi NiMH-akuilla on korkeampi ominaisenergia ja huipputeho. Sen sijaan niiden itsepurkautumisnopeus on korkeampi, hyötysuhde on matalampi ja ne ovat kalliimpia. NiMH-akkuja on saatavilla ladattavina kuluttajatyypin AA- ja AAA-paristoina. [11, s. 59]

3.5 Litiumioniakut

Li-ion -akut ovat verrattain uusi akkuteknologia 1980 luvulta, ja Sony kaupallisti sen suuressa mittakaavassa vasta vuonna 1991 [32, s. 32]. Kaupalliset Li-ion -akut vaihtelevat valmistajasta riippuen etenkin koostumukseltaan yleensä salaisen elektrolyytin osalta [32, s. 452]. Pääosa nykyisistä kaupallisista elektrolyyteistä perustuu kuitenkin orgaanisiin liuottimiin, esimerkiksi etyleenikarbonaattiin ($C_3H_4O_3$), ja siihen liotettuun litiumheksafluorofosfaattiin ($LiPF_6$). [32, ss. 431, 452] Positiivisen elektrodin materiaalille on monia vaihtoehtoja, mutta negatiivinen elektrodi on yleensä grafiittia [32, s. 324]. Tästä syystä Li-ion -akkuperheet onkin nimetty positiivisen elektrodin materiaalin mukaan [32, s. 60]. Esimerkiksi vuonna 2016 tuotannossa oli yli 80 erilaista Li-ion -akkukemiaa [33, s. 15].

Sonyn vuonna 1991 kaupallistama Li-ion -akku oli litiumkobolttioksidiakku ($LiCoO_2$), joten edellisen kappaleen perusteella sen elektrodit ovat varaamattomina positiivisella puolella $LiCoO_2$ ja negatiivisella puolella grafiitti (C) [32, ss. 49, 323] [11, s. 59]. Elektrolyytinä on grafiitille optimoitu, hyvin ioneja johtava, alkyylikarbonaattiliuosten ja $LiPF_6$:n seos, joka toimii samalla sähköisenä eristeenä [32, ss. 49-50] [11, s. 59]. Ladattaessa positiiviselta elektrodilta vapautuvat Li^+ -ionit kulkeutuvat elektrolyytin läpi negatiiviselle elektrodille, ja elektronit virtaavat ulkoista johdinta pitkin. Latausprosessin aikana positiivinen elektrodi hapettuu ja negatiivinen elektrodi pelkistyy. Akkua purettaessa reaktiot ovat päinvastaiset. [32, s. 49]

Li-ion -akkujen etu muihin akkuihin verrattuna on niiden suuri tehotehous, mikä mahdollistaa jopa 150 Wh energian varastoinnin yhden kilogramman akkuun. Vertailun vuoksi lyijyakkun tehotehous on vain 25 Wh/kg, eli Li-ion -akkuun voi varastoida 6 kertaa enemmän energiaa kuin saman massaiseen lyijyakkuun. [11, s. 60]. Li-ion -akkukennon jännite on myös suurempi, joten sarjaan kytkettyjä akkukennoja tarvitaan vähemmän saman jännitteen tuottamiseksi kuin nikkeli- tai lyijyakuilla [11, s. 60]. Muita etuja ovat verrattain pitkä sykli-ikä, huoltovapaus ja purkausjännitteen pysyminen lähes vakiona varaustasosta riippumatta [25, ss. 376-377].

Li-ion -akkujen etuja erityisesti nikkeliakkuihin verrattuna ovat muisti-ilmiön puuttuminen ja alhaisempi itsepurkautumisnopeus [11, s. 60] [25, s. 376]. Vastaavasti lyijyakkuihin verrattuna huomattavia etuja ovat syvempien DOD:n kestokyky, pidempi sykli-ikä etenkin kuumassa ja syvillä DOD:illa sekä vähäisempi myrkyllisyys [25, ss. 378-379] [11, s. 60]. Li-ion -akut toimivat myös useimmilla lyijyakkujen käyttöjännitteillä, joten

ne ovat siltä osin yhteensopivia monien säätimien ja vaihtosuuntaajien kanssa. Yhä useammasta säätimestä ja vaihtosuuntaajasta löytyykin nykyään valinta kummallekin akkukemialle. [25, s. 379]

Li-ion -akut ovat nykyään ensisijainen valinta viestinnässä ja kulkuneuvoissa, älypuhelimista sähköautoihin. Viime aikoina niitä on käytetty myös taajuutta säätävinä varavirtayksikköinä, kun hajautettua tuotantoa on liitetty älykkääseen sähköverkkoon. [32, s. 323] Li-ion -akku voidaan mitoittaa suuritehoiseksi tai -energiseksi kennon kokoa, elektrodien paksuutta ja materiaalien suhdetta muuttamalla [25, s. 377].

Suuritehoisissa sovelluskohteissa yleistymisen esteenä on kuitenkin ollut Li-ion -akkuihin liittyvät turvallisuusriskit. Kaikissa Li-ion -akuissa on akunvalvontajärjestelmä (*battery management system*, BMS), jonka ansiosta akut ovat normaalissa käytössä yleensä turvallisia [32, s. 549]. Ongelmana onkin akun virheelliseen toimintaan liittyvät vaarat, joita voi syntyä sisäisistä oikosuluista, mekaanisista vaurioista, ylikuumentumisesta, yllä latauksesta ja SOC:n hallinnasta [32, ss. 549, 578] [11, s. 60].

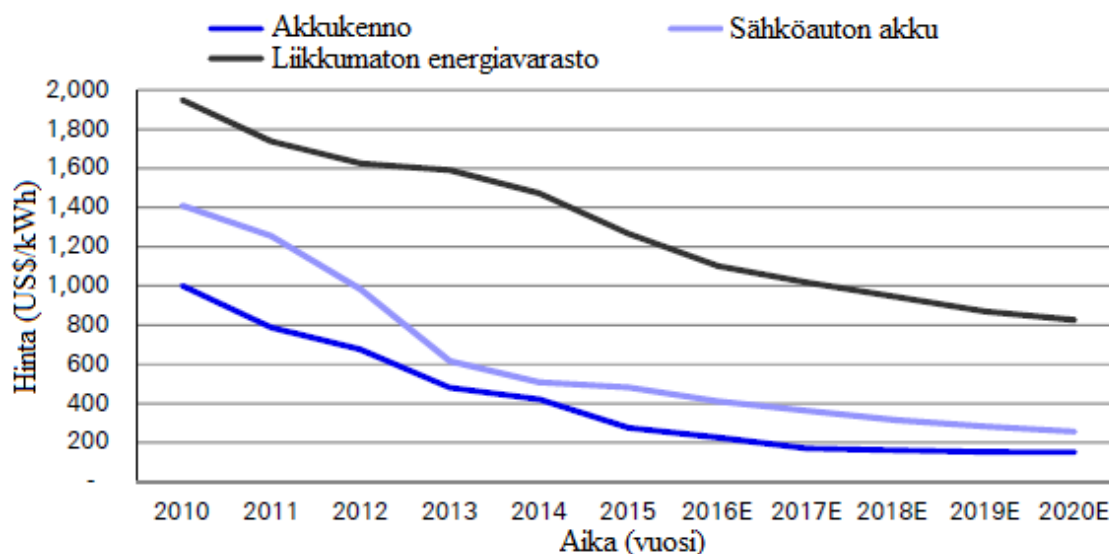
Akun virheellisen toiminnan seurauksena voi olla päästöjä happikaasun ja syövyttävän elektrolyytin muodossa, tulipalo tai pahimmassa tapauksessa räjähdys [32, s. 578]. Yksi turvallisuutta heikentävä elementti on korkean höyrynpaineen omaava elektrolyytti, jossa olisi vielä paljon parannettavaa ja uusia vaihtoehtoja etsitään jatkuvasti [32, s. 431]. Lisäksi Li-ion -akut ovat tässä työssä käsitellyistä akuista kalleimpia [11, s. 60].

Li-ion -akuilla olisi ominaisuuksiensa puolesta potentiaalia mullistaa sähköverkosta riippumaton aurinkosähköteollisuus parantamalla sen tehokkuutta, elinkaarta ja luotettavuutta, kunhan akkujen hinnat laskevat ja turvallisuus paranee. [25, ss. 375, 376, 378] Li-ion -akkuteknologia on kehittynyt merkittävästi markkinoille tulonsa jälkeen, mutta on yhä verrattain uutta, joten kustannusten laskemiseksi on mahdollisesti vielä monia keinoja. [32, s. 323] [25, s. 377] Joissain käyttökohteissa hintakaan ei ole esteenä, mikäli Li-ion -akkujen tarjoamia ominaisuuksia pidetään korkeampaa alkuinvestointia arvokkaampina [25, s. 378].

Akkujen hinta riippuu merkittävästi tuotannon määrästä, joten massatuotannon oletetaan laskevan Li-ion -akkujen hintaa [25, s. 377]. Nykyiset aurinkosähkömarkkinat eivät ole vielä akkuvalmistajien näkökulmasta tarpeeksi tuottoisia aurinkosähkömarkkinoille suunnatun akkuteknologian kehittämiseen tai massatuotantoon [25, ss. 375-376]. Merkittävänä rajoitteena akkujen massatuotannolle ja hintojen laskulle on ollut uusiutuvia energiamuotoja tukevien kehittyneiden maiden keskittyminen lähinnä sähköverkkoon liitettäviin aurinkosähköjärjestelmiin, joissa ei yleensä käytetä akkuja. Sähköverkosta riippumattomia järjestelmiä ja niihin kuuluvia akkuja tarvitaan pääosin kehittyvissä maissa, missä markkinat ovat pienemmät väestön alhaisempien tulojen vuoksi. [25, s. 376]

Sähköautomarkkinoita pidetään tällä hetkellä suurimpana Li-ion -akkuja kehittävänä voimana. Sähköautojen menestys vaikuttaa siis väistämättä myös uusiutuvien energiamuotojen tulevaisuuteen. Sähköautoille suunnattu akkuteknologia on vielä verrattain uutta, ja ennusteen mukaan kasvattaa jatkossakin Li-ion -akkujen kysyntää ja laskee niiden hintaa. [25, s. 376] Li-ion -akkujen hinta on laskenut jo huomattavasti vuosien 2010-2016 aikana 900 \$/kWh:sta 225 \$/kWh:iin [33, s. 36]. Vuonna 2016 rakenteilla olevien akkutehtaiden perusteella tehtyjen ennusteiden mukaan Li-ion -akkujen kustannukset voisi laskea vielä 100-200 \$/kWh:iin, kun mahdollista teknologian kehitystä ei oteta huomioon [33, s. 18].

Energiavarastoiksi suunnatut akut ovat kuitenkin vielä huomattavasti sähköautojen akkuja kalliimpia, sillä akkupaketin kotelosta ja elektroniikasta on maksettava enemmän. Esimerkiksi vuonna 2016 akkupaketti sähköautoon maksoi noin 410 \$/kWh ja energiavarastoon yli 1000 \$/kWh. [33, s. 36] Kuvassa 3.3 on esitetty Li-ion -akkujen hintakehitys vuosina 2010-2015 ja ennuste vuoteen 2020 asti. Hintojen laskun myötä Li-ion -akkujen uskotaan kuitenkin kattavan jopa 97% energiavarastoina käytettävistä akkuteknologioista vuoteen 2025 mennessä [33, s. 6]. Esimerkiksi litiumrautafosfaattiakkuja (LiFePO₄) on tutkittu paljon ja niitä pidetään yhtenä lupaavana vaihtoehtona aurinkosähköjärjestelmäsäkin käytettäviksi suuren kapasiteetin energiavarastoiksi [25, s. 379] [32, ss. 53, 550].



Kuva 3.3. Li-ion -akkujen toteutunut hintakehitys vuosina 2010-2015 ja hintakehityksen ennuste vuosille 2015-2020. Kuva muokattu alkuperäisestä. [34, s. 36]

3.6 Akkujen elinikä aurinkosähköjärjestelmässä

Akku on usein aurinkosähköjärjestelmän haavoittuvaisin ja vähiten ymmärretty osa, ja akun enneaikainen heikkeneminen tai hajoaminen johtuukin yleensä mitoitus- tai käyttövirheistä. [15, s. 789] Suunnitteluvaiheessa voidaan esimerkiksi alimitoittaa aurinkosähköpaneelisto tai akusto, jolloin akut eivät välttämättä lataudu koskaan täyteen tai

tyhjenevät liian nopeasti [15, s. 789]. Lisäksi suunnitteluvaiheessa voidaan valita olosuhteisiin sopimaton akkutyyppi tai väärä lataussäädin. Käyttövirheitä ovat esimerkiksi huono asennuspaikka, väärin tehty asennus, suunniteltua suurempi kuormitus tai kunnossapidon laiminlyönti. [15, s. 789]

Sopivan akun valinnan ja mitoituksen sekä asianmukaisen lataussäädön jälkeen akkujen elinikää rajoittaa yleensä olosuhteista riippuen joko sykli-ikä tai elektrodien korroosio [15, s. 824]. Sykli-ian rajallisuus johtuu siitä, että toistuvien lataus- ja purkaussykliin seurauksena akun kapasiteetti vähenee elektrodien aktiivisen materiaalin häviöiden ja sisäisen resistanssin lisääntymisen vuoksi [35]. Akkuvalmistajien ilmoittama sykli-ikä ei yleensä ole suoraan käyttökelpoinen aurinkosähköjärjestelmissä käytettävien akkujen tapauksessa [15, s. 825]. Valmistajien ilmoittama sykli-ikä on testattu tilanteessa, jossa akut ladataan syklien aikana täyteen, mikä ei aurinkosähköllä välttämättä aina onnistu [15, s. 800]. Lisäksi aurinkosähkökäytössä syklien DOD on yleensä valmistajien ilmoittamaa syvempi [15, s. 825].

Aurinkosähköllä ladattavien akkujen sykli-ikää voidaan kuitenkin arvioida valmistajan ilmoittaman luvun avulla, lisäämällä siihen yleisesti käytetty kerroin 0,80. [15, s. 800]. Ilmoitettua sykli-ikää voidaan lisäksi hyödyntää skaalaamalla sen perusteella arvioita sykli-ikästä matalammille DOD:n arvoille taulukon 3.1 tapaan. Arvioidut sykli- ja eliniät ovat kuitenkin uskottavia vain tiettyyn rajaan asti. Hyvin matalilla DOD:n arvoilla saadut arviot eivät ole realistisia, koska akkujen elinikää rajoittavat silloin muut tekijät, joita ei taulukossa 3.1 oteta huomioon. [15, s. 825]

Taulukko 3.1. Akun sykli-ian skaalaus valmistajan ilmoittamaa matalammille DOD:n arvoille. [15, s. 825]

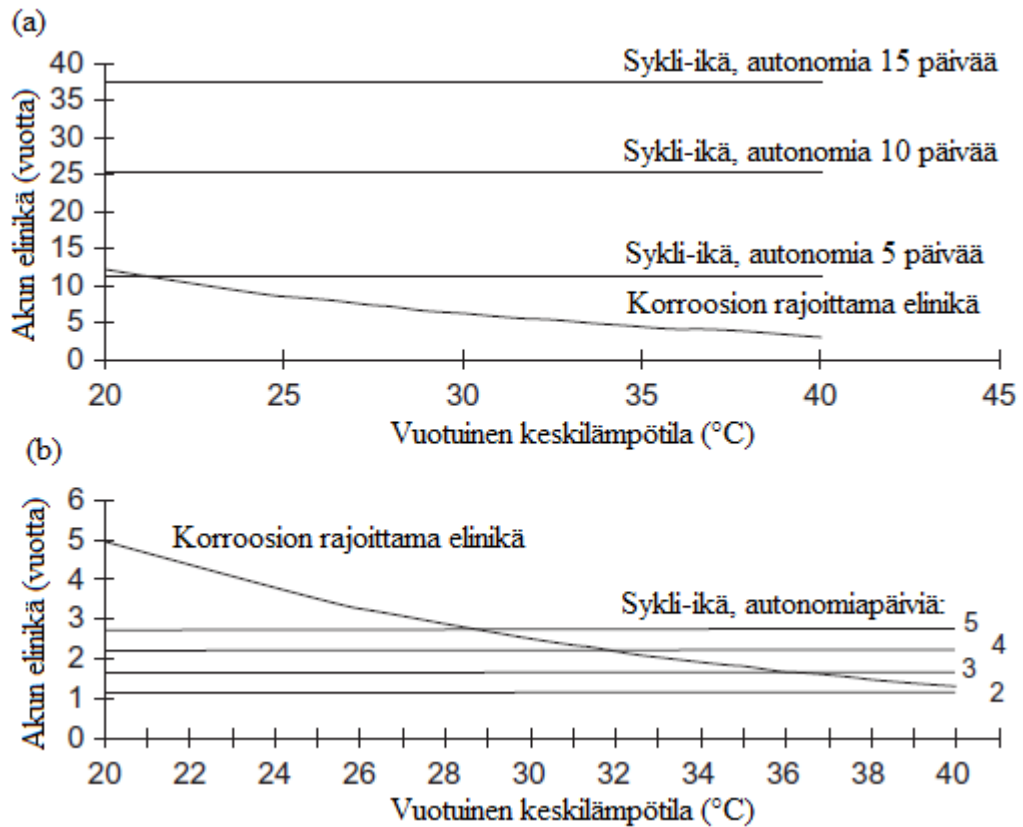
Päivittäinen DOD (%)	Syklien määrä	Akun elinikä (vuosia)
80	1000	2,7
40	2000	5,5
20	4000	11
10	8000	22
5	16000	44
2	40000	110
1	80000	219

Äärimmäinen esimerkki matalan DOD-syklin akkukäytöstä ovat varavirtalähteenä toimivat *standby*-akut, joita pidetään jatkuvasti täyteen ladattuina ja puretaan vain päävirtalähteen häiriötilanteissa. Tällöin lyijyakkujen elinikää ei rajoita sykli-ikä, vaan positiivisella elektrodilla tapahtuva lämpötilariippuvainen korroosio. Lämpötilan nousu 10°C:lla johtaa korroosionopeuden kaksinkertaistumiseen ja akun elinikä puolittumiseen. [15, s. 825] Aurinkosähköjärjestelmissä akut eivät saa jatkuvaa latausta, mutta *standby*-akkujen elinikää voidaan pitää ylärajana samassa lämpötilassa käytettäville matalan DOD-syklin akuille [15, s. 825].

Akkujen elinikään vaikuttaa myös luvussa 3.3.2 käsitelty kapasiteettia vähentävä sulfatoituminen. Suljettujen akkujen elinikää rajoittavia tekijöitä voi kuitenkin olla sykli-ian, korroosion ja sulfatoitumisen lisäksi muitakin. Etenkin korkeissa toimintalämpötiloissa yleisiä ongelmia ovat elektrolyyttihäviöt sekä kapasiteetin häviöt negatiivisella elektrodilla. Elektrolyyttihäviöitä tapahtuu pääosin kaasujen epätäydellisen rekombinaation, positiivisen elektrodin korroosion ja haihtumisen seurauksena. Geeliakuissa happoa on yhtä paljon kuin avoimissa akuissa, joten elektrolyyttihäviöt eivät ole niille yhtä suuri ongelma kuin AGM-akuille. [15, s. 826] Elektrolyytin lisääminen ei kuitenkaan ole mahdollista, joten jatkuvat elektrolyyttihäviöt johtavat lopulta myös geeliakun kuivumiseen [11, s. 57].

Vähemmän elektrolyyttiä sisältävissä AGM-akuissa pienetkin elektrolyyttihäviöt vaikuttavat akun kapasiteettiin ja mahdollisesti myös elinikään. Tästä johtuen geeliakut ovat AGM-akkuja suositumpia kuumissa olosuhteissa. [15, s. 826] Elektrolyyttihäviöiden vaikutusta AGM-akkujen elinikään ei osata vielä helposti arvioida, mutta avoimilla ja geeliakuilla elektrolyyttihäviöiden vaikutus akun elinikään ei ole merkittävä sykli-ian ja korroosion vaikutuksiin verrattuna. [15, ss. 826-827] Kapasiteetin häviöt negatiivisella elektrodilla johtuvat kemiallisesta itsepurkautumisesta. Itsepurkautuminen on kuitenkin hyvin hidasta, ellei akussa ole haitallisia epäpuhtauksia. [15, s. 826]

Tietyissä aurinkosähköjärjestelmässä käytettävien akkujen eliniän arvioimiseksi on siis tiedettävä keskimääräinen päivittäisten syklien DOD, keskimääräinen käyttölämpötila sekä akkujen sykli-ikä ja korroosion rajoittama elinikä varavirtakäytössä [15, ss. 831-832]. Päivittäisten syklien DOD voi vaihdella merkittävästi aurinkosähköjärjestelmän käyttötarkoituksesta riippuen. Esimerkiksi televiestintäjärjestelmiin on yleensä mitoitettu pitkä autonomia ja syklien DOD on matala. Sen sijaan valaistusta varten mitoitetuissa aurinkosähköjärjestelmissä on yleensä lyhyempi autonomia ja syvempi päivittäisten syklien DOD. [15, s. 827] Kuvassa 3.4 on esitetty akkujen eliniän ennusteita eri aurinkosähköjärjestelmissä. Suljettujen akkujen, ja etenkin AGM-akkujen, tapauksessa elinikää on joskus vaikeaa arvioida akkujen kuivumisen ja negatiivisella elektrodilla tapahtuvien kapasiteetin häviöiden vuoksi [15, s. 831].



Kuva 3.4. Akkujen korroosion tai sykli-ian rajoittama elinikä vuotuisen keskilämpötilan funktiona aurinkosähköjärjestelmissä: (a) jatkuva kuorma ja putkilevyakut 5, 10 ja 15 päivän autonomialla sekä (b) valaistuskäyttö ja massalevyakut 2, 3, 4 ja 5 päivän autonomialla. [15, s. 828]

3.7 Yhteenveto akuista

Akut ovat tärkeä osa sähköverkosta riippumattomia, ja tulevaisuudessa mahdollisesti myös sähköverkkoon liitettviä, aurinkosähköjärjestelmiä. Akku on usein aurinkosähköjärjestelmän herkin ja vähiten ymmärretty osa, minkä lisäksi aurinkosähköjärjestelmä on akulle vaativa käyttökohde. Akun ennaikainen hajoaminen johtuukin usein mitoitus- tai käyttövirheistä. Oikein käytettynä akkujen elinikää rajoittaa yleensä olosuhteista ja akkutyypistä riippuen joko sykli-ikä tai korroosio.

Lyijyakut ovat yleisin akkutyypin sähköverkosta riippumattomissa aurinkosähköjärjestelmissä, sillä ne ovat verrattain halpoja, niiden tehotehoisuus on suhteellisen hyvä ja kierrätys toimii. Lyijyaku voi olla avoin tai suljettu. Avoimet akut vaativat ilmanvaihtoa ja säännöllistä huoltoa, eivätkä siksi sovellu syrjäisiin kohteisiin. Toisaalta avoimien akkujen elektrolyyttiä voidaan sekoittaa ylilatauksella ja ehkäistä siten elektrolyytin kerrostumista ja akkulevyjen korroosiota. Suljetut akut ovat huoltovapaita ja niiden käyttöasento on vapaampi, mutta ylilatauksen aiheuttamat vauriot ovat pysyviä.

Lyijyakkujen kapasiteetti riippuu purkauksen loppujännitteestä, purkamisnopeudesta ja lämpötilasta. Lisäksi kapasiteettia voidaan menettää pysyvästi sulfatoitumisen seurauksena, jos akun SOC on pitkään matala. Sulfatoitumisesta ja aurinkosähkön tuotannon epäsuunnollisuudesta johtuen akkua ei yleensä pureta alle 80% DOD aurinkosähköjärjestelmissä.

Nikkeliakut sen sijaan voi vahingoittamatta purkaa tyhjäksi. Lisäksi ne toimivat laajalla lämpötila-alueella, niillä on lyijyakkua pidempi elinikä ja niiden kapasiteetti ei riipu purkamisnopeudesta. Toisaalta ne ovat lyijyakkua kalliimpia, niillä on huonompi hyötysuhde, korkeampi itsepurkautumisnopeus ja NiCd-akkujen sisältämä kadmium on myrkyllistä. Vähemmän myrkyllinen NiMH puolestaan on kalliimpi ja niillä on huonompi hyötysuhde. NiCd-akkuja käytetäänkin aurinkosähköjärjestelmissä yleensä vain äärimmäisten lämpötilojen vaatiessa.

Li-ion-akuilla olisi potentiaalia parantaa aurinkosähköjärjestelmien tehokkuutta, elinikää ja luotettavuutta. Ne ovat vielä kalliita ja harvinaisia aurinkosähköjärjestelmissä, mutta niiden ennustetaan yleistyvän tulevaisuudessa hintojen lasiessa ja turvallisuuden parantuessa. Tällä hetkellä suuret Li-ion -akut kehittyvät autoteollisuuden ansiosta ja massa-tuotannon odotetaan laskevan hintoja. Taulukkoon 3.2 on listattu akkujen ominaisuuksia vertailua varten, mutta vain suuntaa antavasti, sillä niiden ajankohtaisuudesta ole varmuutta.

Taulukko 3.2. Akkujen ominaisuuksia. [25, s. 377] [36, s. 4] [37]

	Lyijyaku	NiCd	NiMH	Li-ion (LiCoO ₂)	Li-ion (LiFePO ₄)
Kennojännite (U)	2	1,2-1,25	1,2-1,25	3,6-3,7	3,2-3,3
Energiatiheys (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	150-190	90-120
Sykli-ikä (sykliä)	200-2000	1500	300-500	500-1000	1000-2000
Itsepurkautumisnopeus (%/kk)	5	20	30	<10	<10
Myrkyllisyys	Erittäin myrkyllinen	Erittäin myrkyllinen	Vähäinen	Vähäinen	Vähäinen
Huoltotarve	3-6 kk välein täysi lataus	1-2 kk välein purettava kokonaan	2-3 kk välein purettava kokonaan	Ei tarvetta	Ei tarvetta
Latauslämpötila (°C)	-20 - +50	0 - +45	0 - +45	0 - +45	0 - +45
Purkauslämpötila (°C)	-20 - +50	-20 - +65	-20 - +65	-20 - +60	-20 - +60
Kaupallistui	1970 (suljettu)	1950	1990	1991	2006
Hinta	Matala	Kohtalainen	Kohtalainen	Korkea	Korkea

4. LATAUS- JA KUORMASÄÄTIMET

Tässä luvussa tutustutaan lataus- ja kuormasäätimiin. Aluksi luvussa 4.1 esitellään mitä lataus- ja kuormasäätimet ovat ja perustellaan miksi ne ovat oleellinen osa sähköverkosta riippumattomia aurinkosähköjärjestelmiä. Luvussa 4.2 tutustutaan tarkemmin lataus- ja kuormasäädinten tehtäviin ja ominaisuuksiin. Luvussa 4.3 esitellään erilaisia lataus- ja kuormasäädintyypppejä sekä säätötekniikoita. Lopuksi luvussa 4.4 kerrataan vielä keskeinen sisältö ja vertaillaan esiteltyjä lataus- ja kuormasäätimiä keskenään. Luvussa 4 keskitytään pääosin lyijyakkujen säätöön ja niille suunnattuihin säätimiin, sillä ne ovat yhä suosituin akkutyyppi aurinkosähköjärjestelmissä. [25, s. 375]

4.1 Lataus- ja kuormasäätimet aurinkosähköjärjestelmissä

Aurinkosähköpaneeliston ja akuston välille kytkettävä elektroninen lataus- ja kuormasäädin on yksi sähköverkosta riippumattoman aurinkosähköjärjestelmän tärkeimmistä komponenteista. [11, s. 51] Periaatteessa yksinkertainen ja oikein mitoitettu aurinkosähköjärjestelmä lataa akkuja myös ilman lataussäädintä. Tällöin akulle syötettävää virtaa rajoittaa kuitenkin vain akuston ja aurinkokennojen jännitteet. Mikään ei myöskään rajoita akun purkautumista. Lisäksi ei ole mitään keinoa varmistaa, että aurinkosähköjärjestelmä toimii optimaalisesti ja suurimmalla mahdollisella teholla olosuhteiden vaihdellessa. [15, s. 765]

Kuten luvussa 3 todettiin, lyijyakut ovat yleisin akkutyyppi sähköverkosta riippumattomissa aurinkosähköjärjestelmissä. Lyijyakkujen huono puoli on kuitenkin se, että niiden elinikä jää hyvin lyhyeksi ilman latauksen ja purkamisen säätöä. [15, s. 776] Lataus- ja kuormasäätimen käyttö on siis erityisen tärkeää lyijyakkuja käytettäessä. Akkujen eliniän maksimointi lataus- ja kuormasäätimen avulla on järkevää etenkin siksi, että akut ovat yleensä sähköverkosta riippumattoman aurinkosähköjärjestelmän kallein osa. Lataus- ja kuormasäädin sen sijaan on yleensä alle 5% kokonaiskustannuksista. [15, s. 776] [9, s. 192]

Ilman säätöä aurinkokennot syöttävät virtaa akkuihin, kunhan kennoille saapuu riittävästi säteilyä ja aurinkokennojen tuottama jännite on akuston jännitettä suurempi [11, s. 51] [38]. Tällöin akku voi päästä haitallisesti ylilatautumaan, jos aurinkokennojen tuottama sähkö pääsee virtaamaan jo täynnä olevaan akkuun [11, s. 51]. Akkujen ylilatautumista tapahtuu ilman säädintä, vaikka järjestelmä mitoitettaisiinkin akuston mukaan oikein. Tämä johtuu siitä, että aurinkosähköpaneelisto mitoitetaan selvästi akuston jännitettä suuremmaksi, jotta akuston lataaminen onnistuisi huonommissakin olosuhteissa. [38]

Ylilataaminen voi nostaa akun jännitteen liian korkeaksi, mikä johtaa akun kuumenemiseen, elektrolyytin häviöihin ja rajuun kaasuuntumiseen sekä akkulevyjen korroosioon.

Ylilataaminen on siis turvallisuusriski ja haitallista akun eliniän kannalta. Vastaavasti akku voi myös päästä purkautumaan liian tyhjäksi, mikäli säädin ei säännöstele akusta kuormalle syötettyä virtaa. [11, s. 51] Akun liiallinen purkautuminen pääsee tapahtumaan, jos aurinkokennoilta akulle syötetty virta on liian pitkään kuormalle syötettyä virtaa pienempi. [11, s. 51] Akun purkautuminen liian tyhjäksi on haitallista, koska silloin kemialliset reaktiot elektrodeilla tapahtuvat lähellä tukijohtimia heikentäen liitosta niiden ja aktiivisen materiaalin välillä. Liitoksen heikentyminen puolestaan voi johtaa aktiivisen materiaalin häviöihin. Akun pitäminen matalassa varauksessa voi myös johtaa haitalliseen sulfatoitumiseen, jota käsiteltiin luvussa 3.3.2. Toistuvat liian syvät purkaustilat vähentävät akun kapasiteettia ja elinikää. [11, ss. 51-52]

Lataus- ja kuormasäädinten ensisijainen tehtävä aurinkosähköjärjestelmässä on siis suojella akkuja liialliselta ylilataukselta ja kuormitukselta, jolloin sillä on suora vaikutus akkujen elinikään [9, s. 192]. Sen lisäksi säädin voi ilmoittaa akkujen SOC:n ja muita toimintaparametreja sekä valvoa järjestelmän turvallisuutta [9, ss. 192-193]. Säätimen avulla voidaan tarvittaessa aktivoida lataus myös vaihtoehtoisista energialähteistä, esimerkiksi aggregaatista, vesi- tai tuulivoimalasta. Joillakin lataus- ja kuormasäätimillä voidaan myös sovittaa tehontuotanto ja kuorma optimaalisesti, jotta suurin mahdollinen teho saadaan hyödynnettyä. Kalliiden akkujen eliniän lisääminen ja latauksen optimointi vaikuttavat oleellisesti myös järjestelmällä tuotetun energian lopulliseen hintaan. [9, s. 192]

4.2 Lataus- ja kuormasäädinten tehtävät ja ominaisuudet

Tässä luvussa tutustutaan lataus- ja kuormasäädinten tehtäviin ja ominaisuuksiin. Aluksi luvuissa 4.2.1 ja 4.2.2 käydään läpi lataussäätöä sekä sen viritystä. Seuraavaksi luvuissa 4.2.3 ja 4.2.4 tutustutaan kuormasäätöön sekä sen viritykseen. Lopuksi luvussa 4.2.5 esitellään vielä muita lataus- ja kuormasäätimiin mahdollisesti lisättyjä ominaisuuksia.

4.2.1 Lataussäätö

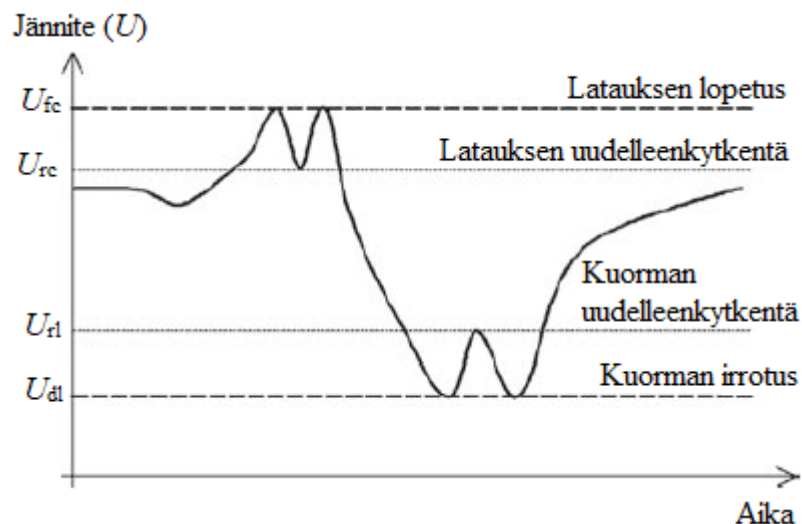
Lataussäädön tärkein tehtävä on estää akkujen liiallinen ylilatautuminen. Tasaisella virralla ladattaessa akun jännite kasvaa lähes lineaarisesti, kunnes akku on melkein täynnä, jolloin jännitteen kasvu kiihtyy. Kasvun kiihtyminen johtuu siitä, että elektrodien aktiiviset materiaalit ovat jo lähes täysin muuttuneet täyttä latausta vastaaviksi reaktiotuotteiksi, jolloin elektrolyysi alkaa niiden sijaan muuttaa elektrolyytin vettä vety- ja happikaasuiksi. Kaasuuntumisen alkaessa akku ei siis ole vielä täysin latautunut ja kevyt kaasuuntuminen onkin välttämätöntä täyden latauksen saavuttamiseksi. Sen sijaan liian pitkään jatkuva lataus johtaa akun ylilatautumiseen, jonka haittoja esiteltiin luvussa 4.1. [9, s. 193]

Avoimilla akuilla hallittu kaasuuntuminen on suositeltavaa, sillä kaasukuplat sekoittavat elektrolyyttiä estäen siten sen haitallista kerrostumista ja siitä seuraavaa korroosiota ja sulfatoitumista [9, ss. 193-194]. Kerrostumista, korroosiota ja sulfatoitumista käsiteltiin

tarkemmin luvussa 3. Huomionarvoista on se, että edellä mainittu kaasuuntuminen on suositeltavaa vain nestemäistä elektrolyyttiä sisältäville avoimille akuille, eikä vastaavaa latausta suositella suljetuille AGM- tai geeliakuille. Suljetuissa akuissa elektrolyytti on liikkumattomassa muodossa eikä siten pääse sekoittumaan. [9, s. 194] Ylilataus onkin haitallisempaa suljetuille akuille ja etenkin AGM-akuille, kuten luvussa 3.3.1 kävi ilmi.

Latauksen säätöön on monia tekniikoita, mutta yksinkertaisimmillaan lataussäädin mittaa akun jännitettä, katkaisee latausvirran, kun jännite saavuttaa tietyn arvon ja jatkaa latausta, kun jännite on laskenut tiettyyn arvoon. Lataussäädössä käytettäviä säätöjännitteitä kutsutaan latauksen lopetusjännitteeksi (*end-of-charge voltage*, U_{fc}) ja latauksen uudelleenkytkentäjännitteeksi (*recharge voltage*, U_{rc}). [9, s. 194]. Lataussäätö voidaan toteuttaa myös virtaa mittaamalla, mutta jännitteen mittaaminen on helpompaa ja siksi yleisempi tapa [9, s. 193].

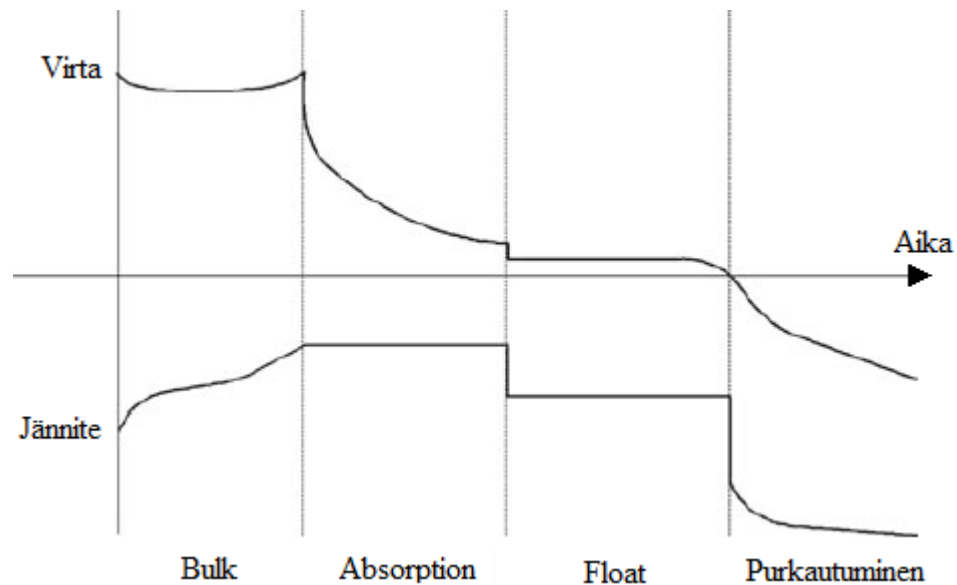
Yksinkertainen lataussäädin on siis kuin *on/off*-kytkin, joka pyrkii pitämään akun jännitteen arvojen U_{fc} ja U_{rc} välillä kuvassa 4.1 esitetyllä tavalla. Latausvirran katkaisuun ja uudelleenkytkentään voidaan käyttää esimerkiksi relettä, bipolaaritransistoria (BJT) tai eristehilatransistoria (MOSFET). Yksinkertainen lataussäätö toimii kohtuullisen hyvin, kun latausvirta on pienempi kuin 1/20 osa akun kapasiteetista. Suuremmilla virroilla ladataessa ongelmana on latausjännitteen kasvu akun sisäisen resistanssin vuoksi. Tällöin ennalta määritellyt U_{fc} katkaisee latauksen liian aikaisin, eikä akku pääse latautumaan täyteen. [9, s. 194] Akun eliniän kannalta olisi kuitenkin oleellista saavuttaa 100% lataus, mikä tässä tapauksessa vaatisi U_{fc} :n nostoa ja johtaisi voimakkaampaan kaasuuntumiseen [9, ss. 193-194].



Kuva 4.1. Akun jännite ajan funktiona yksinkertaisella lataus- ja kuormasäädöllä. Lataussäädön toiminta on nähtävissä kuvassa vasemmalla ja kuormasäädön oikealla. Kuormasäätöä käsitellään luvussa 4.2.3. Kuva muokattu alkuperäisestä. [9, s. 194]

Järjestelmillä, joiden latausvirta on suurempi kuin 1/20 osa akun kapasiteetista, on parempi käyttää monivaiheista lataussäätöä [9, s. 194]. Latauksen ensimmäisessä vaiheessa

(*bulk*) aurinkokennoilta saatavaa latausvirtaa ei rajoiteta, jolloin akun jännite ja SOC kasvavat, kunnes akun SOC on noin 80-90% [11, s. 52] [9, s. 194]. Latauksen toisessa vaiheessa (*absorption*) pidetään ensimmäisessä vaiheessa saavutettu jännitetaso vakiona virtaa pienentämällä, kunnes akku on täysin latautunut. Kolmannessa vaiheessa (*float*) akun jännite lasketaan matalammalle tasolle ylläpitämään akun varausta. Tällöin akun SOC pidetään lähellä 100% antamalla sille vain vähän ylläpitovirtaa. Ylläpitovirta ei saa olla itsepurkautumisvirtaa suurempi, tai akku pääsee ylilatautumaan. [11, s. 52] Kuvassa 4.2 havainnollistetaan kolmivaiheisessa lataussäädössä akulle syötetty virta ja akun jännite ajan funktiona latauksen eri vaiheissa.



Kuva 4.2. Kolmivaiheisessa lataussäädössä akulle syötetty virta ja akun jännite ajan funktiona. Kuva muokattu alkuperäisestä. [9, s. 195]

4.2.2 Lataussäädön viritys

Hyvän lataussäädön saavuttamiseksi jännitteiden säätötasot on valittava huolellisesti käyttökohteen ja akkutyypin mukaan, mutta myös jännitemittauksen luotettavuudesta on huolehdittava [9, s. 196]. Säätöjännitteiden U_{fc} ja U_{rc} välisen jännite-eron sopiva mitoitus on oleellista, sillä liian suuri jännite-ero voi johtaa tilanteeseen, jossa akku ei pääse latautumaan riittävästi. Vastaavasti liian pieni jännite-ero voi johtaa lataustilan nopeaan vaihteluun, mikä voi vähentää vanhojen relesäätimien elinikää. [9, s. 197] Se ei kuitenkaan ole enää kovin ajankohtainen ongelma, sillä releitä hyödyntävät vanhat lataussäätimet ovat nykyään jo harvinaisia [38].

Säätöjännitteiden valinta riippuu myös käyttökohteesta. Akkujen täyden latautumisen varmistamiseksi säätöjännitteet voidaan asettaa korkeammaksi suuremman kaasuntumisen kustannuksella. Tällöin aurinkosähköjärjestelmän olisi hyvä olla helposti saavutettavissa, sillä akkuvettä pitää lisätä säännöllisesti. [9, s. 197] Korkeammat säätöjännitteet ovat elektrolyytin kerrostumisen ehkäisemiseksi suositeltavia myös järjestelmissä, joissa

akun syklit ovat toistuvia ja autonomia on alle kaksi viikkoa [9, ss. 197-198]. Esimerkki korkeampien säätöjännitteiden käyttökohteesta voisi olla asumuksen energiatarpeeseen suunniteltu aurinkosähköjärjestelmä [9, s. 197].

Matalammat säätöjännitteet sen sijaan soveltuvat käyttökohteisiin, joissa akuston säännöllinen ylläpito ei onnistu, esimerkiksi vaikeasta tavoitettavuudesta johtuen. Matalampia säätöjännitteitä suositellaan myös järjestelmiin, joissa akut latautuvat yleensä täyteen tai jos järjestelmän autonomia on yli 2 viikkoa. [9, s. 197] Sama pätee myös hybridijärjestelmiin, joissa akun täysi lataus voidaan tarvittaessa varmistaa vaihtoehtoisella energianlähteellä [9, s. 197]. Esimerkkejä matalampien säätöjännitteiden kohteista voisi olla televiestinnän energiatarpeeseen suunniteltu tai dieselgeneraattorilla varustettu aurinkosähköjärjestelmä. [9, s. 197]

Jännitemittausten on myös annettava luotettavia ja tarkkoja tuloksia. Suurilla latausvirroilla on varmistettava, ettei johtimien resistanssi aiheuta merkittävää jännitteen laskua säätimen ja akun välillä. Edellisessä luvussa kävi ilmi, että johtimissa tapahtuvat jännitehäviöt ovat erityisen haitallisia yksinkertaisilla *on/off*-säätimillä, jotka eivät välttämättä saa ladattua akkuja täyteen, jos jännitehäviöt vääristävät mittaustuloksia. Ongelma voidaan välttää latausvirralle sopivien johtimien valinnalla, tai käyttämällä jännitemittaukseen erillisiä johtimia. [9, s. 196] Akun jännite ja säätöjännitteet vaihtelevat myös lämpötilan funktiona, minkä huomiointia lataussäädössä käsitellään luvussa 4.2.5.

4.2.3 Kuormasäätö

Kuormasäädön tavoitteena on estää akun liian syvä purkautuminen, mikä voi vaurioittaa akkulevyjä pysyvästi, kuten luvussa 4.1 kävi ilmi. Luvussa 4.2.1 esitellyn yksinkertaisen lataussäädön tapaan kuormasäätö voidaan toteuttaa katkaisemalla virransyöttö kuormalle, kun akun jännite laskee tietylle tasolle ja jatkaa virransyöttöä, kun akun jännite on noussut tietylle tasolle. [9, s. 198] Kuormasäädössä käytettäviä säätöjännitteitä kutsutaan kuorman irrotusjännitteeksi (*load-shedding voltage*, U_{dl}) ja kuorman uudelleenkytkentäjännitteeksi (*reconnect voltage*, U_{rl}) [9, ss. 200-201]. Kuvassa 4.1 oikealla puolella on havainnollistettu kuormasäätöä säätöjännitteiden U_{dl} ja U_{rl} välillä.

Kuormasäätöä varten tarvittavat jännitteet voidaan mitata akun navoilta joko tunnetulla kuormalla tai ilman kuormaa. Jännitteen mittaaminen voi kuitenkin antaa virheellisen tuloksen akun SOC:stä, sillä jännite riippuu monista tekijöistä. Akun jännitteeseen vaikuttavat esimerkiksi lämpötila sekä akun viimeaikainen lataus- ja purkaushistoria. Akun SOC:n mittaamiseen on kuitenkin jännitteen lisäksi muitakin keinoja. [15, s. 778]

Avoimen akun SOC voidaan arvioida myös nestemäisen elektrolyytin SG:n avulla, mutta tulos voi olla epäluotettava elektrolyytin kerrostumisen ja elektrolyyttihäviöiden vuoksi. Lisäksi elektrolyytin SG:n mittaaminen elektronisesti on hankalaa [15, ss. 778-779]. Luo-

tettavampi tulos voidaan saada laskemalla ampeeritunteja akkua ladattaessa ja purettaessa, jolloin SOC voidaan päätellä, mikäli täyden akun kapasiteetti tiedetään. Vanhetessaan akku menettää kapasiteettiaan, mutta ampeeritunteja laskemalla saadun SOC:n arvon luotettavuutta voidaan ylläpitää uudelleenkalibroinnilla silloin, kun akun täydestä varauksesta voidaan olla varmoja. [15, s. 779]

4.2.4 Kuormasäädön viritys

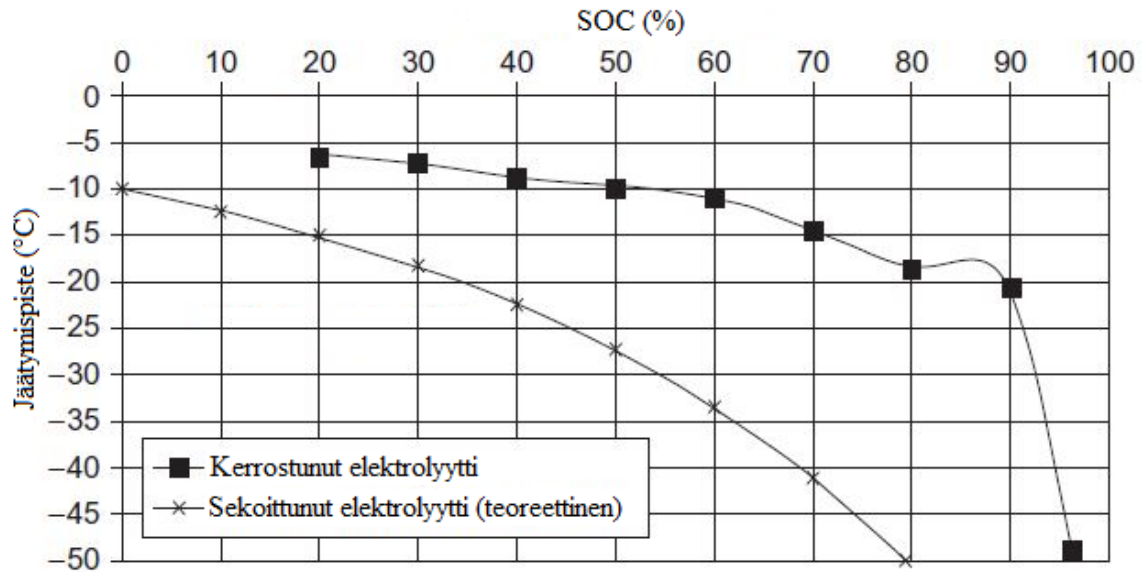
Hyvin toimivan kuormasäädön edellytyksenä on säätöjännitteiden asianmukainen valinta, mikä riippuu akkujen iästä ja niille tavoitellusta eliniästä, ympäristön lämpötilasta, akkutyypistä, sekä purkausvirran suhteesta akun kapasiteettiin [9, ss. 198-200]. Säätöjännitteiden valinta riippuu siis monista tekijöistä ja voi siksi olla haastavaa. [9, s. 200]

Akkujen elinikää voidaan pidentää valitsemalla tarpeeksi korkea U_{dl} ja asettamalla U_{lr} täyttä akkua vastaavalle jännitteelle [9, ss. 198, 200]. Tällöin akuston käytettävissä oleva kapasiteetti on kuitenkin pieni, ja tietyn energiavaraston toteuttaminen vaatii enemmän akkuja kuin matalammalla U_{dl} :llä [9, s. 198]. Vastaavasti täyden akun jännitteelle valittu U_{lr} johtaa tilanteeseen, jossa kuorma ei saa akuilta virtaa ennen kuin akut on täysin latautuneet [9, s. 200]. Toisaalta liian matalaksi valittu U_{lr} voi johtaa akun varaustason oskilointiin matalalla SOC:llä, mikä voi nopeuttaa akuille haitallista sulfatoitumista [9, ss. 200-201].

Leudossa lämpötilassa U_{dl} :n, eli syklien DOD:n, valinta määräytyy yleensä akkujen vaihtoon liittyvien kustannusten perusteella. Sen sijaan kuumissa olosuhteissa akkujen elinikää rajoittaa yleensä lämpötilariippuvainen korrosio. Tällöin syklien DOD kannattaa valita korroosion perusteella arvioidun eliniän rajoissa mahdollisimman syväksi, jotta akuista saataisiin mahdollisimman paljon hyötyä elinaikanaan. [9, s. 199]

Kuormasäädön jänniterajojen valinta riippuu myös akkujen iästä, sillä akkujen maksimijännite ja kapasiteetti laskevat akun ikääntyessä [9, s. 198]. Jännitteen lasku johtuu akkujen ikääntymisen seurauksena kasvavasta sisäisestä resistanssista. Säätimen tulisi ottaa jännitteen lasku huomioon, sillä etenkin korkean U_{dl} :n tapauksessa käytettävissä oleva kapasiteetti vähenee merkittävästi, ellei säätöjännitteen tasoa lasketa akun ikääntyessä. [9, ss. 198, 200]

Kylmissä käyttökohteissa tärkein huomioon otettava säätöjännitteisiin vaikuttava tekijä on ympäristön lämpötila ja siitä johtuva elektrolyytin jäätymisriski [9, s. 199]. Elektrolyytin jäätympiste riippuu akun SOC:stä kuvan 4.3 mukaisesti ja elektrolyytin SG:stä luvussa 3.3 esitetyllä tavalla. Kuvasta 4.3 nähdään, että elektrolyytin jäätymisriski on sitä suurempi, mitä matalampi akun SOC on.



Kuva 4.3. Sekoittuneen ja kerrostuneen elektrolyytin jäätymispisteet massalevyakun SOC:n funktiona, kun akkua puretaan $C/100$ virralla (virta, jolla täyden kapasiteetin purkaminen kestään yli 100 tuntia) ja täysin ladatun akun elektrolyytin SG on 1,28. Kuva muokattu alkuperäisestä. [15, s. 820]

Säätöjännitteiden valinta riippuu myös akkutyypistä. Ensinnäkään valmistajan suosittelemaa alinta jännitetasoa ei tulisi alittaa. Valmistajan ilmoittama jännitetaso on yleensä kyseiselle akulle ominainen ja lyijyakkujen tapauksessa riippuu käytetyistä lyijyseoksista, elektrolyytin lisäaineista sekä siitä onko akku avoin vai suljettu. [9, s. 199] Samoja jänniterajoja ei siis voi yleistää kaikkien valmistajien lyijyakuille.

Kuormasäädön jännitteiden valintaan vaikuttaa myös purkausvirran ja akkujen kapasiteetin suhde. Akkua purettaessa sähkövirtaan vaikuttaa akun sisäinen resistanssi, jonka aiheuttama jännitehäviö laskee akun ulostulon jännitettä. Tietyllä kapasiteetilla jännitehäviö on sitä suurempi, mitä suurempi virta on. Sisäisestä resistanssista johtuvat jännitehäviöt voidaan kuitenkin jättää huomiotta, jos purkausvirta on pienempi kuin $C/30$. [9, s. 200] Tällöin tarkoitetaan purkausvirtaa, jolla kapasiteetin purkaminen kokonaan kestää yli 30 tuntia [9, s. 179]. Edellinen pätee yleensä aurinkosähköjärjestelmille, joilla on suuri akusto ja pitkä autonomia. [9, s. 200]

Kuormasäädössä on otettava huomioon myös järjestelmään kytkettyjen kuormien tyyppi. Esimerkiksi moottorin aiheuttama kuorma on induktiivinen, joten sen ottama virta kasvaa merkittävästi käynnistyksen aikana. Käynnistyksessä syntyvät virtapiikit on huomioitava kuormasäädössä, jotta säädin ei irrota kuormaa aina moottorin käynnistyessä. Ratkaisu ongelmaan on viivästetty kuormasäätö siten, että kuorma irrotetaan vasta, kun jännite on ollut useamman sekunnin säätöjännitteen U_{dl} alapuolella. [9, s. 200]

4.2.5 Muita ominaisuuksia

Lataus- ja kuormasäädön lisäksi säätimet voivat sisältää muitakin ominaisuuksia. Esimerkkejä lisäominaisuuksista ovat jo luvussa 4.2.2 esitelty akkujännitteen erillinen mitaus sekä luvussa 4.2.4 esitelty viivästetty kuormasäätö. Tutustutaan seuraavaksi vielä *boost*-lataukseen, tasauslataukseen, lämpötilakompensatioon, akun olotilan ilmaisuun, kuormien hallintaan, akun eliniän optimointiin, toimintatietojen tallennukseen ja säätimen etäohjaukseen.

Boost-lataus on avoimille akuille suunniteltu lataussäädön ominaisuus, jolla voidaan parantaa akkujen elinikää entisestään. Optimaalisen säätöjännitteen U_{fc} määrittely on hankalaa ja väärin mitoitettuna vähentää akkujen elinikää. Ratkaisuksi ongelmaan kehitettiin *boost*-lataus, joka nostaa säännöllisesti akkujen jännitteen latauksen lopussa hetkellisesti tavallista korkeammaksi. Säännölliset lataukset korkeammalla jännitteellä takaavat elektrolyytin sekoittumisen ja mahdollistavat muuten matalamman säätöjännitteen U_{fc} käytön. Elektrolyytin sekoittuminen ehkäisee elektrolyytin kerrostumista, ja matalamman säätöjännitteen käyttö puolestaan vähentää elektrolyyttihäviöitä sekä korroosiota. [9, s. 195]

Boost-latausten toteutustiheys riippuu valmistajasta, mutta kirjallisuudesta löytyy suuntaa antavia suosituksia. Syvän DOD-syklin akuille suositellaan *boost*-latausta kahdesta kolmeen viikon välein, kun taas *standby*-akuille riittää *boost*-lataus kerran kuukaudessa. Akun täyden latautumisen varmistamiseksi *boost*-latausta suositellaan myös aina kuormasäädön jälkeen. [9, s. 195]

Boost-latauksen lisäksi avoimille akuille voidaan tehdä myös tasauslataus (*equalizing charge*), jonka tavoitteena on varmistaa akun kaikkien kennojen täysi latautuminen. Akuissa yksittäisten kennojen kapasiteetit, itsepurkautumisnopeudet ja lämpötilat vaihtelevat ajan mittaan. Kennojen väliset erot voivat lopulta johtaa tilanteeseen, jossa SOC vaihtelee saman akun eri kennojen välillä [9, ss. 195-196]. Ilmiö on sitä merkittävämpi mitä enemmän akussa on kennoja, ja sitä esiintyy etenkin syvän DOD-syklin akuilla. [9, ss. 195-196]

Tasauslatausta voisi siis luonnehtia pienellä virralla toteutetuksi pidemmäksi *boost*-lataukseksi, jonka ansiosta akun kaikki kennot pääsevät latautumaan täyteen. Pitkä lataus korkealla jännitteellä johtaa kuitenkin rajumpaan kaasuuntumiseen, eikä sitä elektrolyyttihäviöiden takia suositella suljetuille akuille. Siitä huolimatta suljetuille akuillekin voidaan tehdä tasauslataus 100-150 syklin välein. [9, s. 196] Yhden akkuvalmistajan mukaan tasauslataus olisi hyvä tehdä myös 12-24 kuukauden varastoinnin jälkeen [39, s. 2].

Akun toiminta riippuu lämpötilasta, joten lataus- ja kuormasäätimiin on yleensä lisätty lämpötilakompensatio, joka ottaa huomioon lämpötilan vaikutukset. Akkujen sähkökemiallinen aktiivisuus riippuu voimakkaasti lämpötilasta siten, että lämpötilan kasvaessa akku latautuu nopeammin, mutta myös kaasuuntuminen alkaa alhaisemmalla jännitteellä.

Lämpötilan huomiointi on tärkeää, sillä säätimen käyttö kuumissa olosuhteissa kylmemmän lämpötilan asetuksilla johtaa tilanteeseen, jossa säätöjännite U_{fc} on liian korkea, mikä johtaa ylilatautumiseen. Ilmiö on erityisen tärkeä suurilla sähkövirroilla, jotka lämmittävät akkuja entisestään ohmisten häviöiden aiheuttamana. Lämpötilakompensaatio on erityisen tärkeää, kun suljettuja akkuja käytetään kuumissa olosuhteissa, jotta haitallisilta elektrolyyttihäviöiltä välttyttäisiin. [9, s. 196]

Vastaavasti on huomioitava, ettei säädintä käytetä kylmissä olosuhteissa korkeamman lämpötilan asetuksilla. Tällöin säätöjännite U_{fc} on liian matala, eikä akku pääse latautumaan täyteen. Lämpötilakompensaation tyypillinen arvo on $-5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, eli akun yksittäisen kennon säätöjännite U_{fc} laskee 5 mV jokaista lämpötila-asteen nousua kohti. Lämpötilakompensaation optimaalinen toiminta vaatii kuitenkin luotettavan lämpötilamittauksen. Luotettavien mittaustulosten saamiseksi lämpötila-anturin kiinnityspaikkaa valittaessa on esimerkiksi huomioitava mahdolliset mittaustulosta vääristävät lämmönlähteet. [9, s. 196] Edellä käsiteltiin lämpötilakompensaatiota lataussäädön yhteydessä, mutta se on yhtä lailla hyödyllistä myös kuormasäädön yhteydessä [9, s. 201].

Lataus- ja kuormasäädinten tärkeimpien ominaisuuksien lisäksi valmistajat voivat tarjota erilaisia lisäominaisuuksia. Yksi yleinen lisäominaisuus on akun olotilan ilmaisin, mikä on yleensä toteutettu erivärisillä LED-valoilla (*light-emitting diode*) tai LCD-näytöllä (*liquid-crystal display*). Ilmoitettavia tietoja voi olla esimerkiksi akun SOC, kuorman irrotus kuormasäädön seurauksena (LVD), lataustila sekä sisäänmenon ja ulostulon virrat sekä jännitteet. [9, s. 205]

Joissain tilanteissa myös kuormien hallinta on hyödyllinen ominaisuus, joka mahdollistaa priorisoinnin eri kuormien välillä. Kuormia voidaan kytkeä päälle tai pois, joko niiden tärkeyden tai akun varaustilan perusteella. Esimerkiksi lääkintäpalvelun energiatarpeeseen suunniteltu järjestelmä voisi tarvittaessa turvata rokotejääkaapin toimintaa valojen sammutuksella. [9, s. 206]

Osassa Studerin laitteista kuormasäätöön on lisätty toiminto akun eliniän optimointiin (*Battery Lifetime Optimization*, BLO). BLO suojelee akkuja haitalliselta oskilloinnilta matalassa SOC:ssä säätämällä LVD-tasoa siten, että akku pääsee latautumaan täyteen ja varmistamalla, että keskimääräiset lataukset ovat riittäviä akun eliniän kannalta. [40, s. 9] Käytännössä B.L.O. rajoittaa akun käyttöä nostamalla LVD-tasoa asteittain, kunnes akku saavuttaa täyden latauksen [40, s. 10]. BLO:n avulla pyritään välttymään muun muassa sulfatoitumiselta, jota käsiteltiin luvussa 3.3.2 ja elektrodien aktiivisen materiaalin häviöiltä, jota käsiteltiin luvussa 4.1 [41, s. 1].

Muita joissain tilanteissa hyödyllisiä ominaisuuksia ovat esimerkiksi toimintatietojen tallentaminen ja säätimen etäohjaus. Järjestelmän toimintatietojen tallentaminen mahdollistaa järjestelmän toiminnan graafisen kuvaamisen, mikä voi olla hyödyksi esimerkiksi

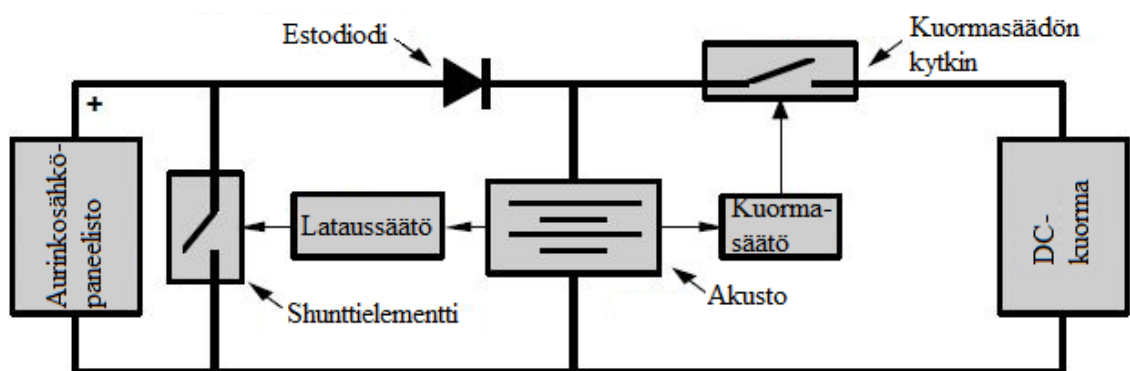
mahdollisten vikatilanteiden selvityksessä. Etäyhteys säätimeen voi puolestaan olla hyödyllinen esimerkiksi suurien tai vaikeasti tavoitettavien järjestelmien säädössä. [9, s. 206]

4.3 Säädintyypit ja säätötekniikat

Tässä luvussa tutustutaan erilaisiin lataus- ja kuormasäädön toteutustapoihin. Lataus- ja kuormasäätö muodostuvat säätimen rakenteesta ja sen toimintaa ohjaavasta logiikasta. Aluksi luvussa 4.3.1 tutustutaan monen lataussäätimen toiminnan taustalla olevaan shuntti- ja sarjasäätöön. Shuntti- ja sarjasäätö voidaan toteuttaa yhdessä tai useammassa vaiheessa, joihin tutustutaan luvussa 4.3.2. Seuraavaksi luvussa 4.3.3 esitellään, kuinka aiemmin esitelty monivaiheinen lataussäätö voidaan toteuttaa pulssinleveysmodulaation avulla. Luvussa 4.3.4 tutustutaan DC/DC-muuntimiin, jotka ovat oleellinen osa luvussa 4.3.5 esiteltävää maksimitehopistettä seuraavaa lataussäätöä.

4.3.1 Shuntti- ja sarjasäätö

Shunttisäädin rajoittaa tarvittaessa akkujen latausvirtaa oikosulkemalla aurinkosähköpaneeliston [11, s. 52]. Sähkölaitteissa useimmiten haitallinen oikosulku on aurinkokennojen tapauksessa yleensä turvallista, koska niissä sähkövirran suuruus on luonnostaan rajoitettu [42, s. 48] [11, s. 47]. Aurinkosähköjärjestelmässä shunttisäädin kytketään kuvan 4.4 mukaisesti rinnan akuston ja aurinkosähköpaneeliston välille. Oleellinen osa shunttisäädintä on myös kuvaan 4.4 merkitty shunttielementti ja akuston välille sarjaan kytketty estodiodeja, joka estää akuston vaarallisen oikosulkeutumisen shunttielementin kautta. [9, s. 201] Jännitehäviöiden vähentämiseksi säätimissä voidaan käyttää myös Schottky-diodeja, joiden kynnyksjännite on vain noin puolet perinteisen piidiodin kynnyksjännitteestä. [9, ss. 201-202]



Kuva 4.4. Shunttisäädin aurinkosähköjärjestelmän virtapiirissä. Kuva muokattu alkuperäisestä. [42, s. 48]

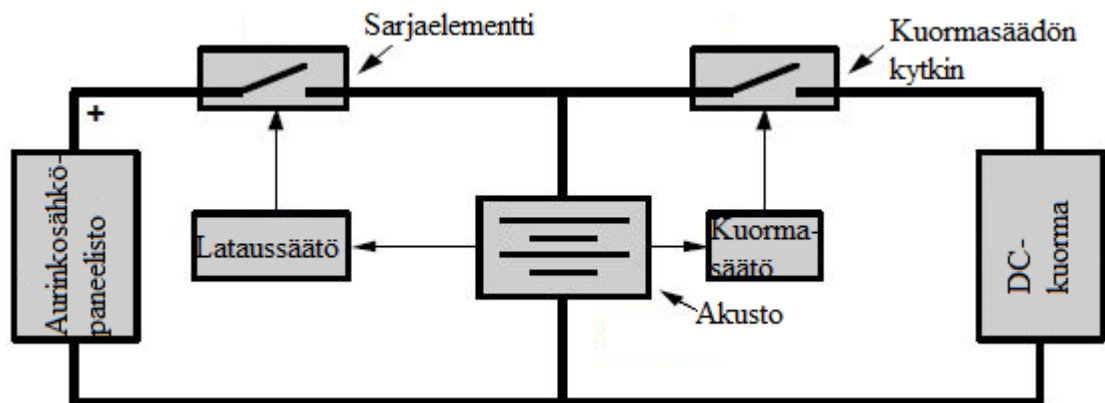
Yksinkertaisessa shunttisäädössä aurinkokennojen tuottama sähkö lataa akkuja normaalisti, kunnes tietty säätöjännite U_{fc} saavutetaan ja lataus lopetetaan ohjaamalla aurinkokennojen tuottama virta shunttielementtiin. [9, s. 201] Shunttielementin kautta aurinkosähköpaneelisto oikosulkeutuu, jolloin aurinkokennojen toimintapiste IU -kuvaajalla

siirtyä lähelle oikosulkua. Tällöin aurinkokennojen jännite ja teho laskevat, kuten luvussa 2.4 kävi ilmi. [15, s. 777] [11, s. 52]

Aurinkosähköpaneeliston täydellinen oikosulku ei kuitenkaan ole mahdollista, sillä shunttielementissä sekä paneelien ja lataussäätimen välisissä johtimissa tapahtuu jännitehäviöitä [42, s. 49]. Shunttielementissä tapahtuvien jännitehäviöiden generoimasta lämmöstä johtuen niissä käytetään jäähdytyslementtejä ja riittävästä tuuletuksesta on huolehdittava [18, s. 34]. Samasta syystä shunttisäätimet on suunniteltu käytettäväksi vain pienissä aurinkosähköjärjestelmissä, joissa sähkövirta on alle 20 A [16, s. 788].

Shunttielementissä lämmöksi muuttuva ylimääräinen latausteho voidaan myös hyödyntää. Aurinkosähköpaneeliston oikosulkemisen sijaan latausvirta voidaan ohjata toissijaiseen kuormaan, esimerkiksi veden lämmittämiseen. Tällöin kaikki aurinkokennojen tuottama teho saadaan hyödynnettyä ja järjestelmän hyötysuhde paranee. [15, s. 784]

Shunttisäädinten lisäksi on olemassa sarjasäätimiä, joita voidaan käyttää myös 20 A suuremmilla sähkövirroilla. Sarjasäädin rajoittaa tarvittaessa akkujen latausvirtaa avaamalla virtapiirin aurinkosähköpaneeliston ja akuston väliltä [11, s. 52]. Sarjasäädin kytketään aurinkosähköjärjestelmässä sarjaan aurinkosähköpaneeliston ja akuston välille kuvan 4.5 mukaisesti [9, s. 202].



Kuva 4.5. Sarjasäädin aurinkosähköjärjestelmän virtapiirissä. Kuva muokattu alkuperäisestä. [42, s. 50]

Yksinkertaisessa sarjasäädössä aurinkokennojen tuottama sähkö lataa akkuja, kunnes tietty säätöjännite U_{fc} saavutetaan ja lataus lopetetaan. Akku irrotetaan aurinkosähköpaneelistosta avaamalla virtapiiri niiden väliltä sarjaelementin avulla. Virtapiirin avaaminen siirtää aurinkokennojen toimintapisteen IU -kuvaajalla avoimen virtapiiriin tilanteeseen, jolloin niiden niiden teho on nolla luvun 2.4 mukaan. [11, s. 52] Toisin kuin shunttisäädössä, avoimen virtapiiriin tapauksessa sähkövirran suuruus ei ole rajoitteena, minkä mahdollistaa sarjasäädinten käytön myös suuremmassa aurinkosähköjärjestelmissä [42, s. 49].

Yleensä shuntti- ja sarjaelementit on toteutettu vain yhteen suuntaan johtavilla transistorilla, joita voidaan käyttää joko säätövastuksina tai kytkiminä. Säätövastuksena käytettäessä transistori joutuu kuitenkin muuttamaan enemmän tehoa lämmöksi ja transistorin käyttö kytkimenä onkin siksi suositumpaa. [15, s. 777] Kytkimenä käytettävän transistorin tapauksessa ylimääräinen teho poistuu lämpönä aurinkokennojen kautta [15, s. 778].

Sarjasäätimet ovat perinteisistä säädintyypeistä suosituimpia ja ovatkin pääosin korvanneet shunttisäätimet [9, s. 202]. Sarjasäädinten huono puoli shunttisäätimiin verrattuna on transistorissa tapahtuvat tehohäviöt, jotka vähentävät akkujen lataukseen käytettävissä olevaa tehoa. Tehohäviöt johtuvat siitä, että akkujen latausvirran on kuljettava häviöllisesti sarjaan kytketyn sarjasäätimen transistorin läpi. Sen sijaan shunttisäätimissä sähkövirta kulkee shunttielementin läpi vasta akun ollessa täysi, jolloin transistorissa tapahtuvilla häviöillä ei ole vaikutusta akun latautumiseen. [16, s. 787]

Luvun alussa mainittiin, että aurinkosähköpaneeliston oikosulkeminen on yleensä turvallista. Periaatteessa oikosulkuun voi kuitenkin liittyä riskejä, jos olosuhteet eivät ole optimaaliset ja riskeihin ei ole varauduttu. Vaaratilanne voi syntyä, jos shunttisäätimen aiheuttaman oikosulun aikana osa aurinkokennoista on varjossa. Luvun 2.5 lopussa tutustuttiin aurinkokennojen toimintaan epätasaisissa toimintaolosuhteissa. Jännitteeltään vähintään 24 V aurinkosähköpaneelien tapauksessa varjostetun aurinkokennon yli oleva estosuuntainen jännite voi kasvaa niin suureksi, että se riittää läpilyöntiin ja kuumen pisteen syntymiseen. [9, s. 75] Käytännössä riski on kuitenkin pieni, koska kaupallisissa aurinkosähköpaneelissa kuumilta pisteiltä on suojauduttu ohitusdiodeilla, joihin tutustuttiin luvussa 2.5 [9, s. 76]. Vaaratilanne on kuitenkin mahdollinen, jos ohitusdiodi on päässyt vahingoittumaan esimerkiksi salamaniskun seurauksena.

4.3.2 Lataussäätö yhdessä tai useammassa vaiheessa

Edellisessä luvussa kävi ilmi, että sarja- ja shunttisäätimissä transistori voi toimia joko kytkimenä tai säätövastuksena. Kytkimenä toimiva transistori säätää latausta yksinkertaisesti joko virtapiirin avauksella sarjasäädössä tai aurinkosähköpaneeliston oikosululla shunttisäädössä. Tällainen *on/off*-säätö johtaa luvun 4.2.1 perusteella akun täytyessä tapahtuvaan jännitteen voimakkaaseen kasvuun ja kaasuuntumiseen, mikäli akku halutaan ladata täyteen. Siksi yksinkertainen *on/off*-säätö soveltuu vain kaasuuntumista sietäville avoimille akuille [42, ss. 49-50].

Suljetuille akuille suositellaan kuvassa 4.2 esitettyä monivaiheista lataussäätöä. Lataussäätö voidaan siis toteuttaa useammassa eri vaiheessa ja edellisessä kappaleessa mainittu *on/off*-säätö on esimerkki yksivaiheisesta lataussäädöstä [42, s. 50]. Yksivaiheinen lataussäädin toteuttaa siis kuvan 4.2 ensimmäistä latausvaihetta (*bulk*), kunnes akun jännite saavuttaa ennalta määrätyn säätöjännitteen U_{fc} ja lataussäädin lopettaa latauksen [18, s.

34]. Kaksivaiheinen lataussäädin sen sijaan toteuttaa kuvan 4.2 ensimmäistä (*bulk*) ja kolmatta (*float*) latausvaihetta, eli toimii säätöjännitteen saavuttamiseen asti kuten yksivaiheinen lataussäädin ja ylläpitää sen jälkeen varausta matalammalla jännitteellä [11, s. 53].

Yksi- ja kaksivaiheiset lataussäätimet ovat halpoja ja luotettavia, mutta niiden tarjoama lataussäätö on karkeaa ja harvoin aurinkosähköjärjestelmiin sopivaa [16, s. 788]. Useimmat modernit lataussäätimet ovatkin kolmivaiheisia ja toteuttavat kaikkia kuvan 4.2 latausvaiheita. Niissä siis lisätään edellisessä kappaleessa esitellyn kaksivaiheisen lataussäätimen toimintaan vielä kolmas latausvaihe (*absorption*), joka ylläpitää akun ensimmäisessä latausvaiheessa saavutettua säätöjännitettä, kunnes akku on täysin latautunut. [11, s. 52] Myynnissä on myös nelivaiheisia lataussäätimiä, jotka ovat käytännössä kolmivaiheisia, mutta tasauslataus on laskettu yhdeksi lisävaiheeksi.

Kaksi- ja kolmivaiheisessa lataussäädössä esiintyy siis latausvaiheita, joissa jännite pidetään vakiona. Vakiojännite voidaan toteuttaa yksinkertaisesti säätövastuksena käytettävällä transistorilla siten, että latausvirtaa säädellään transistorin vastusta muuttamalla [42, ss. 49, 51]. Luvussa 4.3.1 kävi kuitenkin ilmi, että ylimääräinen teho muuttuu säätövastuksena toimivassa transistorissa lämmöksi ja transistorin käyttö kytkimenä on suositumpaa.

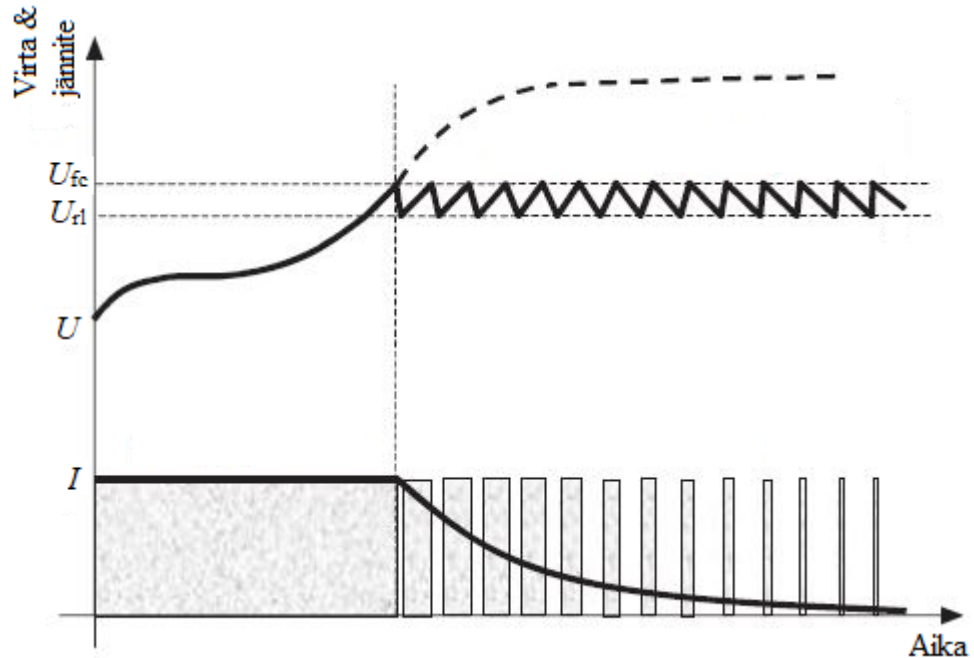
Mikroprosessorien yleistyminen on johtanut monipuolisempiin säätötekniikoihin, mahdollistaen monivaiheisen lataussäädön myös kytkimenä toimivilla transistoreilla [9, s. 201]. Mikroprosessorin avulla kytkimen avautumista ja sulkeutumista voidaan säädellä siten, että transistorin läpäisevän virran keskiarvo saadaan halutulle tasolle. Transistorin läpi kulkevan virran keskiarvo riippuu siitä kuinka suuren osan tietyistä ajasta transistori johtaa. Transistorin toimintaa voidaan säätää esimerkiksi seuraavassa luvussa käsiteltävällä pulssinleveysmodulaatiolla (PWM). Akun jännite reagoi latausvirran muutoksiin suhteellisen hitaasti ja pysyy muutosten aikana lähes vakiona, kunhan kytkimen toiminta on tarpeeksi nopeaa. Kytkimen toiminta-aikoja muuttamalla akun jännite voidaan siis säätää halutulle tasolle. [15, s. 778]

Monivaiheiset lataussäätimet ovat yksinkertaisia *on/off* -säätimiä monimutkaisempia ja siten myös kalliimpia [9, s. 195]. Etenkin yksi- ja kaksivaiheiset lataussäätimet ovat kuitenkin toimintoiltaan rajoitettuja verrattuna pulssinleveysmodulaatiota ja maksimitehopisteen seurantaan (MPPT) hyödyntäviin säätimiin, joihin tutustutaan luvuissa 4.3.3 ja 4.3.5. [11, s. 53].

4.3.3 Pulssinleveysmodulaatio lataussäädössä

PWM on yleisin kaupallisissa lataussäätimissä käytettävä säätötapa [15, s. 783] [11, s. 53]. PWM-säätimessä kytkimenä toimiva transistori pätkii akuille syötettävää latausvirtaa modulaatiopulssien ohjaamana [11, s. 53] [9, s. 203]. Vakiotaaajuudella modulaatiopulssien pulssisuhdetta (D_{on}) muuttamalla akkujen latausvirran keskiarvoa voidaan

säätää siten, että akkujen jännite saadaan pidettyä halutulla tasolla [11, s. 53] [15, s. 783]. Edellä mainittu pulssisuhde ilmaisee, kuinka suuren osan jaksostaan signaali on aktiivisena [43, s. 118]. PWM-säätöä havainnollistetaan kuvassa 4.6, jossa akun jännite pyritään pitämään tietyllä tasolla pienentämällä pulssisuhdetta ja latausvirran keskiarvoa.



Kuva 4.6. Akun jännitteen ja virran keskiarvon kuvaajat ajan funktiona PWM-säädössä. Ilman säätöä jännitteen kuvaaja jatkuisi katkoviivalla merkitysti. Kuva muokattu alkuperäisestä. [2, s. 961]

Säätöjännitteen saavuttamisen jälkeen PWM-säädinten säätöalgoritmi alkaa siis vähentää latausvirtaa hiljalleen pulssisuhdetta pienentämällä. Pulssin ollessa aktiivisena aurinkokennot lataavat akkuja rajoittamatta, mutta etenkin ylläpitolatauksen aikana aktiivinen aika on vain hyvin pieni osa pulssista. [11, s. 53] Tällaiset latauspulssit ovat hyväksi avoimille lyijyakuille, sillä latauspulssit sekoittavat elektrolyyttiä [11, s. 54]. Sopiva latausalgoritmi ja säätöjännitteet vaihtelevat akkutyypistä ja -kemiasta riippuen, mistä johtuen monissa PWM-säätimissä onkin valinta eri akuille [15, ss. 783-784] [9, s. 199].

PWM-säädössä kytkimenä käytettävissä transistoreissa syntyy lämpöä vain kytkentähäviöiden ja transistorin sisäisen resistanssin seurauksena [9, s. 204]. Kytkimenä voidaan kuitenkin käyttää kanavatransistoria (FET), jonka sisäinen resistanssi johtavassa tilassa on vain muutamia milliohmeja. Tällöin luvussa 4.3.1 mainitut häviöt sarjasäädintä käytettäessä ovat yleensä hyvin pieniä [15, s. 784]. PWM-säädin voidaan siis toteuttaa tehokkaasti sekä sarja- että shunttisäädöllä, mutta useimmat valmistajat suosivat sarjasäätöä [15, s. 784] [9, s. 204].

PWM-säädinten yksi huono puoli on se, että aurinkosähköpaneeliston, akuston ja säätimen jännitteet on mitoittettava yhteensopiviksi. Akuston lataukseen vaadittavaa jännitettä suuremman aurinkosähköpaneeliston ylimääräistä jännitettä ei siis voida hyödyntää. [11,

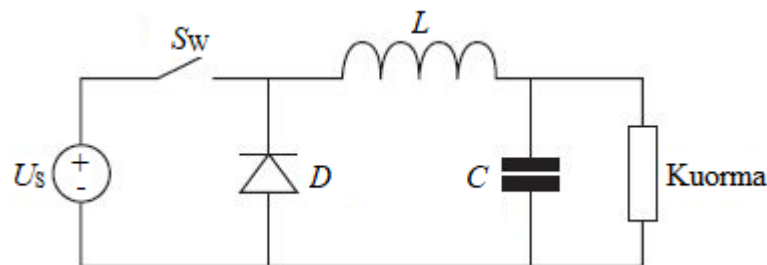
s. 54]. Toinen huono puoli on se, että tiettyihin olosuhteisiin optimoidun aurinkosähköjärjestelmän aurinkosähköpaneelisto ei toimi MPP:ssä olosuhteiden vaihdelta. Tähän tutustuttiin jo hieman kuvassa 2.11 ja paremmin luvussa 4.3.5, mutta tiivistettynä MPP:n paikka muuttuu säteilyintensiteetin ja lämpötilan vaihdelta. [15, s. 779] PWM:n käytöstä johtuva jännitteen ja virran nopea vaihtelu voi myös aiheuttaa sähkömagneettista häiriötä, mikä tulee huomioida aurinkosähköjärjestelmän suunnittelussa [15, s. 787].

PWM-säätimet ovat kuitenkin hyvä valinta pieniin aurinkosähköjärjestelmiin varsinkin, kun aurinkokennojen lämpötila on korkea. PWM-säädinten käyttö rajoittuukin normaalisti alle 60 A virtoihin. Lisäksi PWM-säätimet ovat verrattain halpoja, niitä on ollut markkinoilla jo monia vuosia ja valikoima on monipuolinen. [11, s. 54] Osa PWM-säädinten huonoista puolista voidaan ratkaista MPPT-säätimiä käyttämällä, mutta tutustutaan sitä ennen vielä DC/DC -muuntimiin, jotka ovat oleellinen osa MPPT-säädinten toimintaa.

4.3.4 DC/DC -muuntimet: *buck*, *boost* ja *buck-boost*

DC/DC -muunnin on virtapiiri, jonka avulla muuntimelle syötettyä jännitettä ja virtaa voidaan muuttaa kohtuullisin tehohäviöin [11, s. 54] [44, ss. 6120, 6122]. Aurinkosähköjärjestelmien tapauksessa DC/DC -muuntimella voidaan siis sovittaa aurinkosähköpaneeliston jännite akuille sopivaksi [16, s. 788] [11, s. 54]. Yksinkertainen DC/DC -muunnin koostuu elektronisesti ohjatusta kytkimestä, käämistä, diodista ja kondensaattorista [16, s. 788] [9, s. 210]. DC/DC -muuntimesta on useita eri versioita, joista tässä luvussa tutustutaan *buck*-, *boost*- ja *buck-boost* -muuntimiin [16, s. 788].

Buck-muunnin laskee siihen syötettyä jännitettä ja kasvattaa virtaa [44, s. 6120]. Sisäänmenon jännitteen tulee tällöin olla tavoiteltua ulostulon jännitettä suurempi [15, s. 766]. *Buck*-muuntimia käytetäänkin yleensä järjestelmissä, joissa akuston jännite on 48 V tai pienempi [11, s. 55]. *Buck*-muuntimen virtapiiriä osana aurinkosähköjärjestelmää havainnollistetaan yksinkertaistettuna kuvassa 4.7.



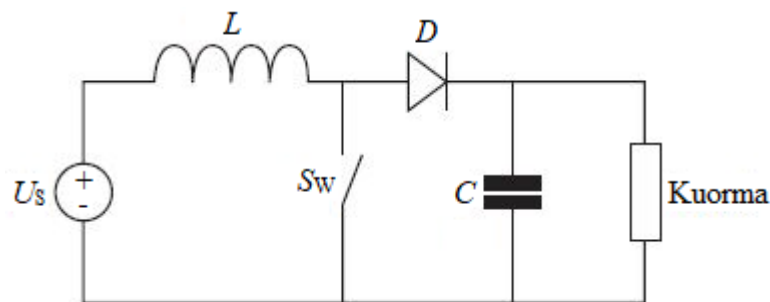
Kuva 4.7. *Buck*-muuntimen virtapiiri osana aurinkosähköjärjestelmää. Kuva muokattu alkuperäisestä. [15, s. 766]

Buck-muuntimella on kaksi toimintatilaa, joita vaihdellaan kytkimen S_w avulla. Oletetaan lähtötilanne, jossa kytkin on auki eikä virtapiirissä kulje virtaa. Kytkimen sulkeminen

johtaa tilanteeseen, jossa virtapiiri muodostuu käämin L ja kuorman läpi. [15, s. 766] Tällöin Faradayn induktiolain mukaan käämiin indusoituu virran muutosta vastustava jännite. Käämiin muodostunut jännite on aurinkokennojen jännitteeseen verrattuna vastakkaismerkkinen, joten se laskee kuormalle syötettävää ja kondensaattoriin C varastoituvaa jännitettä. Käämin vastustuksesta huolimatta virta sen läpi kasvaa vähitellen ja samalla sen magneettikenttään varastoituu energiaa. [45, s. 81]

Kytkimen avautuessa virta aurinkokennoilta katkeaa, jolloin virtapiiri muodostuu diodin D läpi. Käämiin indusoituvaa virran muutosta vastustava jännite vaihtaa nyt polariteettia ja pyrkii ylläpitämään kuormalle syötettävää virtaa magneettikenttään varastoidun energian avulla. Jälleen käämin vastustuksesta huolimatta virta sen läpi laskee vähitellen. [15, s. 767] Aurinkokennoilta otettava virta ei siis ole jatkuvaa ja aurinkosähköpaneeliston sekä *buck*-muuntimen välille tarvitaankin virtaa tasoittava suodatin [15, ss. 768-769].

Boost-muunnin sen sijaan nostaa siihen syötettyä jännitettä ja pienentää virtaa [44, s. 6122]. *Boost*-muuntimia käytetään yleensä järjestelmissä, joissa akuston jännite on yli 48 V [11, ss. 54-55]. *Boost*-muuntimen virtapiiriä osana aurinkosähköjärjestelmää havainnollistetaan yksinkertaistettuna kuvassa 4.8.



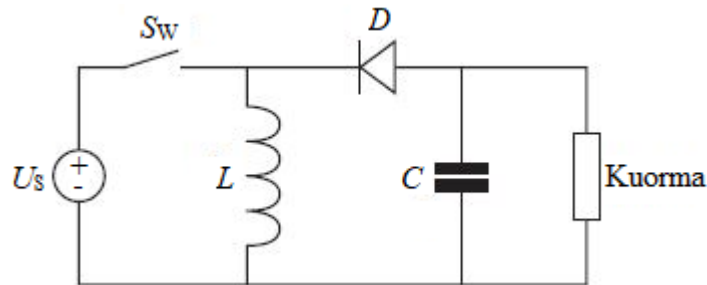
Kuva 4.8. *Boost*-muuntimen virtapiiri osana aurinkosähköjärjestelmää. Kuva muokattu alkuperäisestä. [15, s. 769]

Myös *boost*-muuntimella on kaksi toimintatilaa, joita vaihdellaan kytkimen Sw avulla. Oletetaan lähtötilanne, jossa kytkin Sw on suljettuna, jolloin virta käämin L läpi kasvaa vähitellen käämin vastustuksesta huolimatta ja energiaa varastoituu käämin magneettikenttään [15, s. 769] [9, s. 209]. Kytkimen avautuessa virtapiiri muodostuu diodin D ja kuorman läpi, jolloin aurinkokennoilta tulevan sähkövirran kokema vastus on suurempi ja virta pienenee [45, s. 83]. Käämin induktanssi pyrkii jälleen vastustamaan virran muutosta vaihtamalla polariteettiaan ja muuttamalla magneettikenttään varastoitunutta energiaa sähkövirraksi [15, s. 769]. Nyt käämin jännite on aurinkokennojen jännitteen kanssa samanmerkkinen, joten kuorma kokee niiden summan, joka varastoituu myös kuorman rinnalla olevaan kondensaattoriin C [9, s. 209].

Kytkimen sulkeutuessa aurinkokennoilta tulevan sähkövirran kokema vastus on taas pienempi, jolloin virta kasvaa [45, s. 83]. Käämin induktanssi pyrkii jälleen vastustamaan

virran muutosta, joten sen polariteetti muuttuu ja samalla sen magneettikenttään varastoituu energiaa [45, s. 81] [9, s. 209]. Kuorma ei nyt saa virtaa aurinkokennoilta, mutta kondensaattoriin varastoitunut varaus pääsee purkautumaan kuorman läpi tasoittaen kuorman kokemia virran ja jännitteen muutoksia [9, s. 210]. Diodi D estää varauksen purkautumisen kytkimen kautta [9, ss. 209-210]. Boost-muuntimen tapauksessa aurinkokennoilta otetaan jatkuvaa virtaa, joten suodatuksen ja energian varastoinnin tarve vähenee [15, s. 779].

Buck-boost -muunnin on nimensä mukaisesti *buck*- ja *boost*-muunninten yhdistelmä. *Buck-boost* -muunnin pystyy nostamaan ja laskemaan sisään tulevaa jännitettä, mutta kääntää samalla jännitteen vastakkaismerkkiseksi. [15, s. 769] *Buck-boost* -muuntimen virtapiiriä osana aurinkosähköjärjestelmää havainnollistetaan yksinkertaistettuna kuvassa 4.9.



Kuva 4.9. *Buck-boost* -muuntimen virtapiiri osana aurinkosähköjärjestelmää. Kuva muokattu alkuperäisestä. [15, s. 770]

Myös *buck-boost* -muuntimella on kaksi toimintatilaa, joita vaihdellaan kytkimen Sw avulla. Oletetaan alkutilanne, jossa kytkin Sw on suljettuna, jolloin virtapiiri muodostuu käämin L läpi eikä kuorma saa sähkövirtaa. Sähkövirran ansiosta käämin magneettikenttään on varastoitunut energiaa. [15, s. 770] Kytkimen auetessa sähkövirta aurinkokennoilta käämille katkeaa, jolloin käämiin indusoituu virran muutosta vastustava jännite ja virtapiiri muodostuu kuorman ja diodin D läpi [45, s. 81]. Käämin ja kuorman yli oleva, kondensaattoriin C varastoituva, jännite on nyt vastakkaismerkkinen aurinkokennojen jännitteeseen verrattuna [15, s. 770].

Kytkimen sulkeutuessa jälleen käämi vaihtaa polariteettia vastustaakseen kasvavaa sähkövirtaa ja käämin magneettikenttään varastoituu energiaa [45, s. 81]. Samalla kondensaattorin varaus purkautuu kuorman läpi ja sen jännite on edelleen vastakkaismerkkinen aurinkokennojen jännitteeseen verrattuna. [15, s. 770] Diodi D estää kondensaattorin purkautumisen käämin läpi [9, ss. 209-210]. *Buck-boost* -muuntimen tapauksessa sähkövirta ei ole jatkuva sisäänmenossa eikä ulostulossa [15, s. 770].

Muunninten toimintaa säädellään elektronisen tehokytkimen avulla [9, s. 210]. Tehokytkimen tyyppi riippuu muunnettavasta tehosta ja on alle muutaman kilowatin järjestelmissä yleensä MOSFET ja suuremmissa eristehilabipolaaritransistori (IGBT) [15, s. 766].

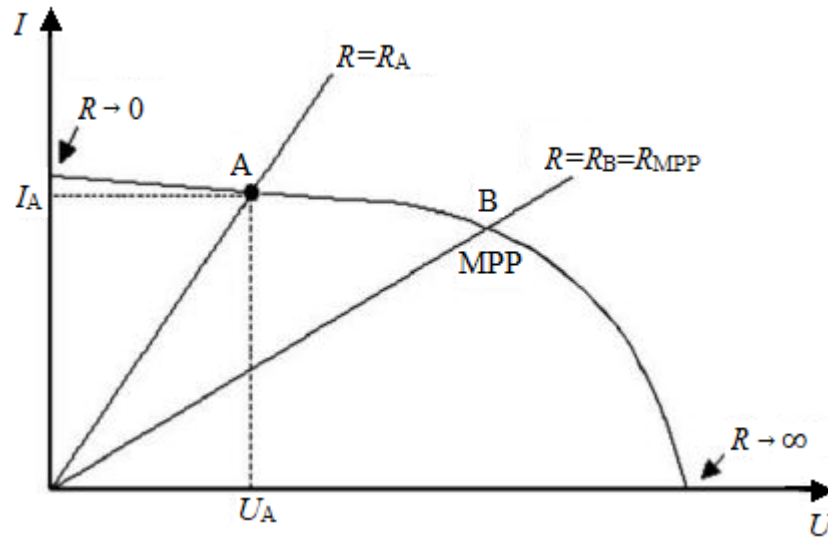
Kytkimen ohjaamiseksi muunnin mittaa jatkuvasti ulostulon jännitettä ja virtaa tehden mittaustulosten perusteella muutoksia transistorin toimintataajuuteen tai pulssisuhteeseen [9, s. 210]. Yleensä taajuus pidetään vakiona ja pulssisuhdetta vaihdellaan, jolloin kyseessä on luvussa 4.3.3 esitelty PWM. Myös taajuuden vaihtelu vakiopulssisuhteella onnistuu, jolloin kyseessä on pulssintaajuusmodulaatio (PFM). Käytettävä taajuus riippuu transistorin tyypistä ja nopeudesta. MOSFET:iä käytettäessä taajuus voi olla yli 100 kHz, mutta hitaammilla IGBT:illä vain noin 25 kHz. [15, s. 768]

Transistorin avautuessa ja sulkeutuessa muunninten käämit ja kondensaattorit varastoivat ja purkavat energiaa. Mikäli transistorin toimintataajuus on tarpeeksi nopeaa, varastoitunut energia ei ehdi täysin purkautua ennen kuin alkaa taas varastoitua. [15, s. 767] Tällöin muunnin toimii jatkuvan virran tilassa ja ulostulon jännite riippuu transistorin pulssisuhteesta, joka on aina välillä $0 < D_{on} < 1$ [15, s. 767] [45, s. 85]. *Buck-boost* -muuntimen tapauksessa pulssisuhde määrittelee myös sen, laskeeko ($0 < D_{on} < 1$) vai nostaako ($0 < D_{on} < 1$) muunnin jännitettä [15, s. 770].

Muunnoksen hyötysuhde on huonoin *buck*-muuntimella, mutta silloinkin yli 90%. Muunnoksen aikana tehohäviöitä syntyy kytkimen johtaessa ja vaihtaessa tilaa. Häviöt transistorin johtaessa ovat yleensä vähäiset ja kytkimen tilan vaihtumiseen liittyvät häviöt ovatkin merkittävämpiä etenkin suurilla jännitteillä. Häviöitä voidaan vähentää varmistamalla, että kytkimen tilan vaihtuminen tapahtuu mahdollisimman nopeasti. [15, s. 768]

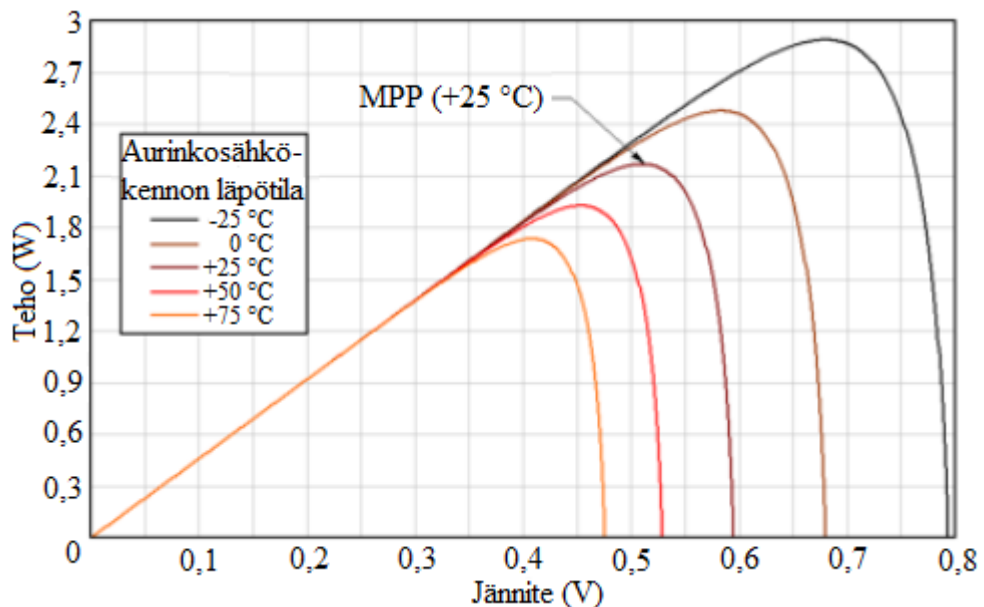
4.3.5 Maksimitehopisteen seuranta lataussäädössä

Aurinkokennojen ja akkujen jännitteet vaihtelevat merkittävästi käytön aikana toimintaolosuhteista, ja akkujen tapauksessa myös SOC:stä, riippuen [2, s. 961]. Jännitteen lisäksi aurinkokennojen toiminta riippuu *IU*-kuvaajan mukaan myös sähkövirrasta kuvassa 2.10 esitetyllä tavalla. Kullakin hetkellä aurinkokennon virrasta ja jännitteestä saadaan Ohmin lain mukaisesti resistanssi, joka on samalla myös virtapiiriin kytketyn kuorman resistanssin käänteisluku [13, s. 504]. Aurinkokennon toimintapiste löytyy nyt aurinkokennon ja kuorman *IU*-kuvaajien leikkauspisteestä. Aurinkokennon toimintapistettä kahdella eri kuormalla on havainnollistettu kuvassa 4.10.

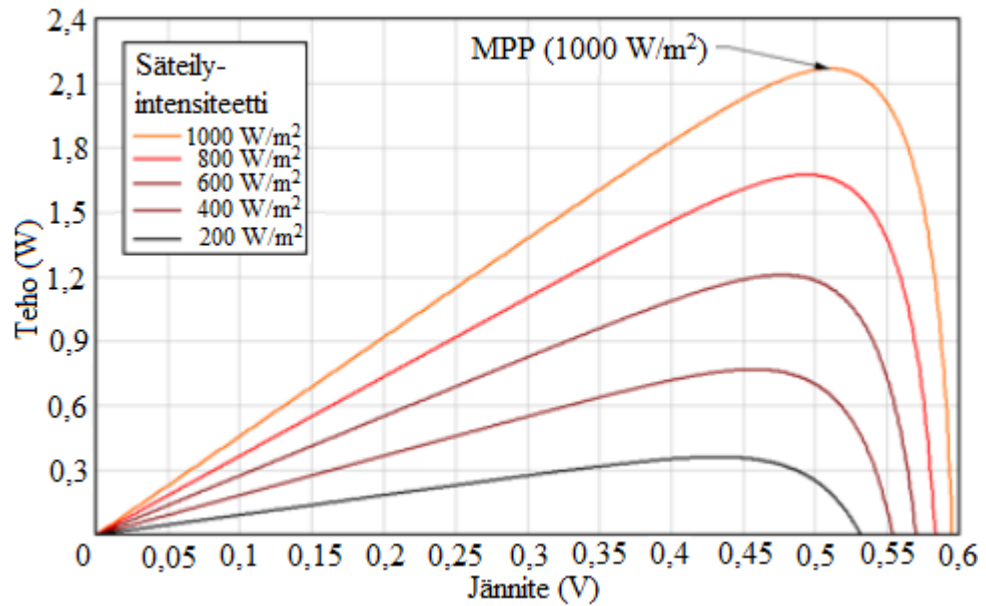


Kuva 4.10. Aurinkokennon ja kahden kuorman IU -kuvaajat, joiden leikkauspisteet A ja B ovat aurinkokennon toimintapisteet kyseisten kuormien tapauksessa. Kuva muokattu alkuperäisestä. [44, s. 6120]

Kuvan 4.10 tapauksessa kuorman R_B kuvaaja leikkaa aurinkokennon IU -kuvaajan MPP:ssä, jossa aurinkokennot syöttävät kuormaan suurimman mahdollisen tehon. MPP:hen tutustuttiin luvussa 2.4. [11, s. 54] MPP:n jännite riippuu vahvasti aurinkokennojen lämpötilasta ja hieman myös aurinkokennoille saapuvasta säteilyintensiteetistä. [15, s. 779] MPP:n riippuvuutta lämpötilasta ja säteilyintensiteetistä on havainnollistettu kuvissa 4.11 ja 4.12.



Kuva 4.11. Aurinkokennon tehon kuvaajia jännitteen funktiona eri lämpötilan arvoilla. Kuva muokattu alkuperäisestä. [46]



Kuva 4.12. Aurinkokennon tehon kuvaajia jännitteen funktiona eri säteilyintensiteetin arvoilla. Kuva muokattu alkuperäisestä. [46]

MPP:n vaihtelun vuoksi aurinkokennojen ja kuorman suora yhdistäminen johtaa käytännössä aina toimintaan MPP:n ulkopuolella ja tehon menetykseen [2, s. 961]. Jo pelkästään aurinkosähköjärjestelmien korkean hinnan vuoksi MPP:ssä toimiminen olisi houkuttelevaa [16, s. 788]. MPP:n seuraaminen on kuitenkin kannattavaa vain, jos sen tuottama lisäteho on suurempi kuin prosessin kuluttama teho. Toimintaa suurimmalla mahdollisella teholla voidaan tavoitella maksimitehopistettä seuraavilla MPPT-säätimillä [11, s. 54].

Nimensä mukaisesti MPPT-säädin ohjaa aurinkosähköjärjestelmän toimintaa siten, että se toimii mahdollisimman suuren osan ajasta maksimitehopisteessä [11, s. 54]. Käytännössä MPPT-säädin sisältää DC/DC -muuntimen jännitteiden sovitukseen ja algoritmin MPP:n seurantaan [13, s. 504] [15, s. 779]. Aurinkosähköpaneeliston ja akuston jännitteistä riippuen DC/DC -muuntimena voidaan käyttää kaikkia luvussa 4.3.4 esiteltyjä muuntimia. *Boost*-muuntimen etuna on kuitenkin vähäisempi suodatuksen ja energian varastoinnin tarve [15, s. 779].

MPPT-säädin sovittaa siis aurinkosähköpaneeliston jännitteen kullakin hetkellä akustolle optimaaliseksi. Esimerkiksi paneeliston liian suuri jännite voidaan pienentää akustolle sopivaksi siten, että ylimääräinen jännite muunnetaan suuremmaksi latausvirraksi, jolloin lataustehoa ei mene hukkaan. Tällöin latauksen hyötysuhde kasvaa verrattaessa PWM-säätimiin, joilla ylimääräisen jännitteen hyödyntäminen ei onnistu. [11, s. 54]

Jatkuvasti optimaalisella jännitteellä toimiakseen muunnin tarvitsee takaisinkytkennän, keinon MPP:tä vastaavan jännitteen selvittämiseksi sekä säätöalgoritmin, joka pitää toimintapisteen mahdollisimman lähellä MPP:tä [15, s. 779]. Optimaalisen toimintapisteen

arviointiin ja siihen pyrkimiseen on useita keinoja, jotka voidaan karkeasti jakaa analogisiin ja digitaalisiin, suoriin ja epäsuoriin tai tavanomaisiin ja älykkäisiin [15, s. 779] [16, s. 788] [47, s. 638]. Keinot vaihtelevat monimutkaisuuden, hinnan, nopeuden, tehokkuuden ja tarvittavien komponenttien osalta [48, s. 1]. Epäsuorat menetelmät vaativat aiempaa tietoa aurinkosähköpaneeliston ominaisuuksista ja niiden toiminta perustuu matemaattisiin suhteisiin, jotka eivät vastaa kaikkia toimintaolosuhteita. Sen sijaan suorat menetelmät toimivat toimintaolosuhteista riippumatta. Perinteiset menetelmät ovat yleensä yksinkertaisia ja halpoja, mutta vähemmän tehokkaita kuin älykkäät menetelmät, jotka ovat monimutkaisempia, mutta tehokkaampia ja nopeampia. [47, s. 638]

Epäsuoria säätötapoja ovat esimerkiksi säätö avoimen virtapiirin jännitteen avulla (OCV) ja oikosulkuvirran avulla (SCC) [47, s. 638]. OCV on yksinkertainen ja yleisesti käytetty säätötapa, joka perustuu siihen, että MPP:n ja avoimen virtapiirin jännitteiden suhde on lähes vakio

$$\frac{U_{MPP}}{U_{OC}} \approx k_1, \quad (5)$$

missä U_{MPP} on maksimitehopisteen jännite, U_{OC} on avoimen virtapiirin jännite ja k_1 on jännitteiden suhde. [16, s. 789] Suhdeluku k_1 vaihtelee hieman säteilystä riippuen ja sen arvoksi on suositeltu lähteestä riippuen 0,7-0,8 [49, s. 5]. U_{OC} voidaan mitata, jolloin sen ja valitun suhdeluvun k_1 avulla saadaan selville kohtalaisella tarkkuudella MPP:n jännite kyseisellä hetkellä [16, s. 789].

Vastaavasti SCC perustuu MPP:n ja suljetun virtapiirin virran suhteeseen, joka on myös lähes vakio

$$\frac{I_{MPP}}{I_{SC}} \approx k_2, \quad (6)$$

missä I_{MPP} on maksimitehopisteen virta, I_{SC} on oikosulkuvirta ja k_2 on virtojen suhde [49, ss. 5-6]. Myös suhdeluvulle k_2 suositeltu arvo vaihtelee lähteestä riippuen ja on välillä 0,78-0,92 [49, s. 6]. Tässäkin tapauksessa I_{SC} voidaan mitata, jolloin sen ja valitun suhdeluvun k_2 avulla saadaan selville sähkövirta MPP:ssä kyseisellä hetkellä kohtalaisella tarkkuudella. I_{SC} :n mittaaminen on kuitenkin ongelmallista ja vaatii yleensä ylimääräisen kytkimen oikosulun muodostamiseen, mikä lisää komponenttien määrää ja nostaa säätimen hintaa. *Boost*-muuntimella oikosulku voidaan kuitenkin toteuttaa myös ilman ylimääräistä kytkintä. [50, s. 442] SCC ja OCV voidaan toteuttaa analogisella ja digitaalisella virtapiirillä [47, s. 638].

Suoria säätötapoja ovat esimerkiksi säätö häirinnän ja tarkkailun (*perturb & observe*, P&O), inkrementaalisen johtavuuden (*incremental conductance*, IncCond) ja sumean logiikan (*fuzzy logic*, FLC) avulla [47, s. 638]. P&O-algoritmi on yksinkertainen ja yleisesti käytetty säätötapa, joka perustuu säännölliseen toimintapisteen muuttamiseen ja sen seu-

rauksena muuttuvan tehon tarkkailuun. Mikäli toimintapisteen muutos johtaa tehon kasvuun, seuraava muutos tehdään samaan suuntaan. Vastaavasti mikäli toimintapisteen muutos johtaa tehon laskuun, seuraava muutos tehdään vastakkaiseen suuntaan. [16, s. 789] Lopulta toimintapiste päätty värehtelemään MPP:n ympärille, mikäli olosuhteet ovat hetken muuttumatta [48, s. 2]. P&O:n etuna on yksinkertainen toteutus, mutta heikkouksia ovat hitaus ja siitä johtuva MPP:n seurannan vaikeus nopeasti muuttuvissa olosuhteissa. P&O voidaan toteuttaa analogisella ja digitaalisella virtapiirillä [48, s. 2].

P&O:ta edistyneempi säätötapa on IncCond, joka löytää MPP:n vaihtelevissa olosuhteissa tehokkaammin ja keskeyttää toimintapisteen muuttamisen, kun MPP on saavutettu. [51, s. 2722] IncCond-menetelmä perustuu siihen, että MPP:ssä tehon muutosnopeus jännitteen funktiona on nolla, MPP:n vasemmalla puolella positiivinen ja oikealla puolella negatiivinen [48, s. 2] [51, s. 2722]. IncCond voidaan toteuttaa vain digitaalisella virtapiirillä ja se vaatii säätimeltä nopeaa laskentaa sekä näytteenottoa, mistä johtuen sen toteuttaminen on vaikeampaa ja kalliimpaa [48, s. 3].

P&O- ja IncCond-säätötavoissa suuret toimintapisteele tehdyt muutokset nopeuttavat MPP:n löytymistä, mutta etenkin P&O:n kohdalla johtavat myös suurempaan värehtelyyn MPP:n ympärillä. Pienet toimintapisteele tehdyt muutokset puolestaan vähentävät värehtelyä MPP:n ympärillä, mutta MPP:n saavuttaminen on hitaampaa. [52, s. 414] FLC mahdollistaa optimaalisemman säädön, jossa kaukana MPP:stä toimintapistettä muutetaan paljon ja lähellä vähemmän. [52, s. 414] [50, s. 440] FLC käy läpi kolme vaihetta, joiden aikana sisään tuleva signaali muutetaan kielelliseksi muuttujaksi jäsenyysfunktion avulla, luotujen sääntöjen avulla selvitetään muuttujaa vastaava haluttu toimenpide, joka lopulta muutetaan jäsenyysfunktion avulla säädön toteuttavaksi ulostulosignaalksi. [50, s. 442] [52, s. 414] Tämä mahdollistaa epälinearisuuksien käsittelyn sekä toiminnan epätarkkoilla arvoilla [52, ss. 415-416]. Digitaalisella virtapiirillä toteutettava FLC soveltuu siis epälinearisesti käyttäytyvien aurinkosähköjärjestelmien MPP:n seurantaan [52, s. 416].

Luvussa 2.5 kävi ilmi, että epätasaisissa toimintaolosuhteissa aurinkosähköpaneelilla voi olla useita LMPP:itä, jolloin maksimitehopisteen seuranta vaikeutuu [21, s. 19]. Esimerkiksi OCV:n ja SCC:n suhdeluvut k_1 ja k_2 eivät enää pidä paikkaansa useamman LMPP:n tapauksessa. Perinteisen P&O:n ja IncCond:n tapauksessa toimintapiste voi aloituspaikasta riippuen päättyä GMPP:n sijaan LMPP:hen [53, s. 58] [54, s. 5385]. GMPP:n seurantaan epätasaisissa toimintaolosuhteissa on ehdotettu monia algoritmeja, jotka vaihtelevat toimivuuden, nopeuden, monimutkaisuuden, tehokkuuden ja hinnan osalta [55, s. 1132]. Yksi ehdotus perustuu IncCond-säädön pohjalta muokattu algoritmi, joka löytää GMPP:n epätasaisissa toimintaolosuhteissa seuraavia havaintoja hyödyntämällä [54, s. 5391]. Monen LMPP:n tapauksessa on havaittu, että vierekkäisten LMPP:iden välinen ero on vähintään 80% aurinkosähköpaneelin U_{OC} :stä [56, s. 1690]. On myös havaittu, että LMPP:iden teho kasvaa GMPP:n saavuttamiseen asti ja laskee sen jälkeen. Näiden tietojen ansiosta koko PU -kuvaajaa ei tarvitse skannata GMPP:n etsinnässä, mikä nopeuttaa prosessia. [56, s. 1697]

MPPT-säätimet vaativat tarkkaa suunnittelua ja ovatkin huomattavasti PWM-säätimiä kalliimpia [15, s. 784]. Toisaalta MPPT-säätimet mahdollistavat suuremman aurinkosähköpaneeliston ja tehon hyödyntämisen, jolloin koko aurinkosähköjärjestelmän hyötysuhde yleensä kasvaa [11, s. 55]. Riittävän suurella aurinkosähköjärjestelmällä MPPT:n tuottama lisäteho kompensoi säätimen korkeamman hinnan [9, s. 205]. Moderneilla MPPT-säätimillä jännitteen muunnoksen hyötysuhde on 93-97% luokkaa ja tuotettu lisäteho on tyypillisesti talvella 20-45% ja kesällä 10-15%. MPPT:stä saatu hyöty on suurimmillaan matalassa lämpötilassa ja heikossa valossa, esimerkiksi pilvisinä tai sumuisina talvipäivinä. [11, s. 55]

MPPT-säädin voidaan kytkeä joko yksittäiseen aurinkosähköpaneeliin tai aurinkosähköjärjestelmän osapaneeliston. Osapaneeliston kytketty MPPT-säädin säätää kaikkien siihen kuuluvien paneelien läpi kulkevaa virtaa. Kytkentätavan heikkous on se, että osapaneeliston kuuluvien paneelien *I_U*-kuvaajat eroavat toisistaan ja pienimmän virran tuottava paneeli rajoittaa muiden sarjaan kytkettyjen paneelien virtaa. Asiaa käsiteltiin tarkemmin luvussa 2.5, mutta paneelien välisiä eroja syntyy epätasaisissa toimintaolosuhteissa esimerkiksi osittaisen varjostumisen seurauksena. Tällöin paneelien MPP:t eroavat toisistaan eikä yhteinen MPPT-säädin kykene säätämään paneeleita toimimaan omassa MPP:issään. Ongelman ratkaisuksi on ehdotettu paneelikohtaisia MPPT-säätimiä. [13, s. 504]

MPPT-säädinten kytkeminen yksittäisille paneeleille mahdollistaa sen, että jokainen paneeli voi toimia maksimitehopisteessään. Laitevalmistajien mukaan järjestelmän tuottama kokonaisteho voi tällöin kasvaa 5-20% yhteiseen säätimeen verrattuna. [13, s. 505] Kokonaistehon merkittävän kasvun vaatimuksena lienee kuitenkin säteilyintensiteetin epätasainen jakautuminen aurinkosähköpaneelille. Ainakin Kari Lappalaisen väitöskirjan (2017) mukaan yhteensopimattomuushäviöt ovat merkityksettömiä muuttumattomissa säteilyolosuhteissa. [21, ss. 100-101] Suurin hyöty paneelikohtaisista säätimistä saadaankin aurinkosähköjärjestelmissä, joiden varjostuminen on epätasaista, puhdistus epäsäännöllistä tai jos tuotettu energia on erityisen arvokasta [13, s. 505].

Paneelikohtaisten säädinten käyttö mahdollistaa vikaantuneiden paneelien helpomman tunnistuksen, mutta lisää samalla järjestelmässä mahdollisesti vikaantuvien osien määrää. [13, s. 504] Aurinkosähköjärjestelmien paloturvallisuus on myös herättänyt keskustelua ja tulipalovaaraa lisääviä tekijöitä ovat muun muassa DC-liitokset ja vialliset komponentit [57, ss. 10, 11, 13]. Paloturvallisuuden näkökulmasta suurempi määrä säätimiä ja liittoksia olisi siis yhteistä säädintä huonompi ratkaisu. Suurempi määrä säätimiä on luonnollisesti myös yhteistä säädintä kalliimpi ratkaisu. Lisäksi yhtä säädintä on helpompi huoltaa. Kytkentätapaa valitessa on siis arvioitava, onko tuotettu lisäteho suuremman investoinnin arvoista. [13, s. 504]

4.4 Yhteenveto säätimistä

Lataus- ja kuormasäädin on tärkeä osa akulla varustettua aurinkosähköjärjestelmää, sillä akkujen elinikä jää yleensä lyhyeksi ilman säätöä. Säätimen tärkeimpiä ominaisuuksia ovat lataus- ja kuormasäätö, joita ilman akusto pääsee ylilatautumaan ja purkautumaan liian tyhjäksi. Säätimellä voidaan myös maksimoida aurinkosähköjärjestelmän tuottamaa tehoa.

Lataussäätö voi perustua shuntti- tai sarjasäätöön, joista sarjasäätö on yleisempi. Shunttisäädössä latausvirtaa rajoitetaan oikosulkemalla aurinkosähköpaneelista sen ja akuston välille rinnan kytketyn shunttielementin kautta. Sarjasäädössä latausvirtaa rajoitetaan avaamalla virtapiiri aurinkosähköpaneeliston ja akuston välistä, sinne sarjaan kytkety sarjaelementin avulla. Shuntti- ja sarjaelementti voidaan toteuttaa kytkimenä tai säätövastuksena toimivalla transistorilla, mutta transistorin käyttö kytkimenä on yleisempää.

Avoimille akuille soveltuvassa yksinkertaisessa lataussäädössä virta akulle katkaistaan, kun sen jännite saavuttaa tietyn arvon. Suljetuille akuille suositellaan monivaiheista lataussäätöä, missä akkua ladataan ensin rajoittamatta, kunnes akku on lähes täynnä, minkä jälkeen jännite pidetään vakiona, kunnes akku on täynnä ja lopulta ylläpidetään varausta matalammassa jännitteessä. Monivaiheinen lataussäätö voidaan toteuttaa shuntti- tai sarjasäädöllä ja säätövastuksena tai kytkimenä toimivalla transistorilla, mistä jälkimmäiset ovat suositumpia.

Monivaiheinen lataussäätö kytkimenä toimivalla transistorilla onnistuu mikroprosessorin avulla. Yleisin säätömenetelmä on PWM-säätö, jossa latausvirtaa pätkitään modulatiopulssien ohjaamana, jolloin jännitettä ja latausvirran keskiarvoa voidaan säätää pulssisuhdetta muuttamalla. PWM-säädinten suurin heikkous on se, että latausjännitteen yli menevää jännitettä ei hyödynnetä ja se, että aurinkokennot eivät toimi MPP:ssä olosuhteiden vaihdellessa.

PWM-säädinten suurimmat heikkoudet on korjattu MPPT-säätimissä. MPPT-säätimet sovittavat aurinkosähköpaneeliston jännitteen akustolle sopivaksi niiden koko tehon hyödyntäen sekä selvittävät MPP:tä vastaavan jännitteen ja pyrkivät siirtämään toimintapisteen siihen. Jännitteen sovitus tehdään DC/DC-muuntimella ja MPP:n seurantaan on useita algoritmeja. MPPT-säätimet ovat kalliimpia, mutta tuotettu lisäteho kompensoi yleensä korkeampaa hintaa. Taulukossa 4.1 on listattu luvussa 4 esiteltyjen säädintyyppien ja -tekniikoiden hyviä ja huonoja puolia.

Taulukko 4.1. Säädintyyppien vertailua. [9, s. 203]

Säädintyyppi	Säätötapa	Hyvää	Huonoa
Shunttisäätö (transistori kytkimenä)	<i>On/off</i>	Pieni vastus akkua ladataessa	Transistorin kuumentuminen oikosulun aikana, korkea <i>hot spot</i> -jännite, estodiodi pakollinen
Shunttisäätö (transistori säätövastuksena)	Vakiojännite	Pieni vastus akkua ladataessa, optimaalinen latauksen lopetusjännite	Transistorin kuumentuminen, korkea <i>hot spot</i> -jännite, estodiodi pakollinen
Sarjasäätö (transistori kytkimenä)	<i>On/off</i>	Yksinkertainen ja luotettava	Akun täysi lataus ongelmallista
Sarjasäätö (transistori säätövastuksena)	Vakiojännite	Optimaalinen latauksen lopetusjännite	Transistorin kuumentuminen, korkea jännite sarjaelementin yli
PWM (sarjasäätö)	Vakiojännite	Optimaalinen latauksen lopetusjännite, kuumenee vähemmän	Korkea jännite sarjaelementin yli, monimutkaisempi elektronikka, voi aiheuttaa häiriötä herkkiin laitteisiin
MPPT	Vakiojännite	Hyvä hyötysuhde olosuhteista riippumatta	Kallein, voi aiheuttaa häiriötä herkkiin laitteisiin

5. *MMINI PRO* LATAUS- JA KUORMASÄÄTIMEN UUSIMINEN

Diplomityön alkuperäisenä tavoitteena oli tutustua sähköverkosta riippumattomien aurinkosähköjärjestelmien lataus- ja kuormasäätimiin sekä päivittää *Naps Solar Systemsin* vanhan, mutta hyväksi todetun *MMini Pro* -säätimen elektroniikka nykyaikaiseksi. Päivityksen tavoitteena oli mahdollistaa säätimen käytön jatkaminen. Ongelmana oli se, että *MMini Pro* on suunnittelu 90-luvun lopulla, eikä sen suunnittelija ole enää yrityksen palveluksessa. Lisäksi *MMini Prosta* on ollut monta eri versiota ja viimeiset säätimet myytiin varastosta jo työn alkuvaiheessa.

Aluksi selvitettiin *MMini Pron* komponenttien saatavuutta ja tarpeellisia muutoksia. Selvityksessä saatiin apua *Naps Solar Systemsin* nykyisiltä ja entisiltä työntekijöiltä sekä laitteen suunnittelijalta ja sopimusvalmistajalta. Selvitysten perusteella todettiin, että säätimen elektroniikan järkevä päivitys, tai pikemminkin uudelleensuunnittelu, muodostuisi diplomityön puitteissa liian suuritöiseksi tehtäväksi. Diplomityön uudeksi tavoitteeksi sovittiin korvaavan säätimen valinta markkinoilta. Käytännössä diplomityö koostui siis pohjatietojen hankinnasta, *MMini Pron* elektroniikan päivitysmahdollisuuksien ja niiden kannattavuuden selvityksestä sekä korvaavan säätimen valinnasta.

5.1 Säätimen elektroniikan päivitysmahdollisuuksien selvitys

MMini Pron elektroniikan päivitysmahdollisuuksien selvitys aloitettiin tutustumalla sen tuoterakenteeseen ja selvittämällä tarvittavien komponenttien saatavuutta. Alustavan selvityksen perusteella ainakin yhden komponentin valmistus on lopetettu. Varmuuden vuoksi *MMini Pron* sopimusvalmistajaan otettiin vielä yhteyttä ja kysyttiin myös heidän näkemystään komponenttien saatavuudesta. Kävi ilmi, että komponenttien maailmanmarkkinatilanne on todella huono ja minkä tahansa komponentin saatavuus voi muodostua ongelmalliseksi [58]. Joidenkin komponenttitehtaiden kapasiteetti on myyty jopa muutamaksi vuodeksi ennakoon, eikä osa tehtaista ota edes tilauksia vastaan. Esimerkiksi *MMini Pron* sopimusvalmistaja on saanut komponenttivalmistajalta jopa 143 viikon toimitusajan tilaukselle. Komponenttien saatavuuden arviointi on siis hankalaa ja selviää usein vasta tilauksen yhteydessä.

MMini Pron sopimusvalmistaja suositteli kuitenkin *Electronic Components Industry Associationin* (ECIA) hakukonetta [59], jonka avulla komponenttien saatavuuden selvitystä jatkettiin. Tarkemman selvityksen jälkeen säätimessä käytettävien teho-MOSFETtien valmistus on lopetettu ja mikrokontrollerin (MCU-A) saatavuus on huono. Lisäksi *MMini Prossa* käytettyjä viittä vastusta ja neljää kondensaattoria ei löytynyt, mutta niille löytyi

korvaavat komponentit vastaavilla ominaisuuksilla. Komponenttien saatavuuden selvityksessä käytettiin lähteinä kymmentä elektroniikan komponentteja myyvää sivustoa: *RS Components* [60], *Digi-Key Electronics* [61], *Mouser Electronics* [62], *Farnell element14* [63], *Rochester Electronics* [64], *Octopart* [65], *Avnet* [66], *Reichelt electronic* [67], *RMS Components* [68] ja *Electrokit* [69].

Seuraavaksi oltiin yhteydessä *MMini Pron* suunnittelijaan, jonka mukaan teho-MOSFET:ien vaihto ei olisi ongelma, mutta mikrokontrollerin vaihto sen sijaan voi olla [70]. Mikrokontrollerin vaihtaminen säätimen päivityksen yhteydessä olisi kuitenkin ajankoh- taista MCU-A:n rajallisen saatavuuden vuoksi. *MMini Pron* suunnittelija ehdotti MCU-A:n vaihtoa saman tuoteperheen uudempaan versioon, johon *MMini Pron* ohjelman siirto voisi onnistua [70].

Selvityksen perusteella saman tuoteperheen uudemman version (MCU-B:n) saatavuus on MCU-A:ta parempi, mutta myös MCU-B on jo vanha, eikä sen saatavuudesta jatkossa ole varmuutta. Vaihtoehtoisesti voisi käyttää jotain nykyaikaista mikrokontrolleria, mutta silloin pitäisi siirtyä läpiladottavista komponenteista pintaliitoskomponentteihin (SMD). Tällöin piirilevy pitäisi suunnitella uudelleen ja kaikki muutkin komponentit tulisi vaihtaa. Lisäksi ohjelmointi pitäisi todennäköisesti tehdä uudelleen. Lähdettiin siis selvittämään onnistuisiko MCU-A:n ohjelman siirto MCU-B:hen.

Säätimen ohjelmointiin liittyen oltiin yhteydessä myös toiseen *Naps Solar Systemsin* entiseen työntekijään ja kävi ilmi, että ohjelmointi MCU-A:han tehtiin sen valmistajan sub-ventoimalla ohjelmistolla, jota ei ole enää saatavilla [71]. Uudempi ohjelmistoversio oli saatavilla ja siinä oli tuki MCU:n versioille A ja B. Ohjelmiston ilmaisversio ladattiin MCU-A:n ohjelman MCU-B:lle kääntämisen testaamiseksi, mutta ilmaisversio oli toiminnoiltaan liian rajoitettu. Seuraava vaihe olisi ollut ohjelmiston maksullisen version hankinta, mutta kävi ilmi, että MCU-A:n ohjelmoinnissa oli hyödynnetty sen rautaan liit- tyviä ominaisuuksia eikä ohjelman toiminnasta MCU-B:ssä ole takuita.

Tähän asti saatujen tietojen perusteella päädyttiin muuttamaan diplomityön aihetta. *MMini Pron* elektroniikan päivityksestä luovuttiin pääosin mikrokontrollerin päivityk- seen liittyvien ongelmien ja epävarmuuksien takia. Vaihto saman tuoteperheen uudem- paan, mutta kuitenkin jo vanhaan, mikrokontrolleriin olisi mahdollisesti vain lyhytaikai- nen ratkaisu. Lisäksi ohjelman toiminnasta uudessa mikrokontrollerissa ei ole varmuutta, jolloin ohjelmointi olisi tehtävä uudelleen. Säädin olisi järkevämpää päivittää kerralla ny- kyaikaiseksi, mutta siirtyminen SMD-teknologiaan johtaisi käytännössä lähes koko sää- timen uudelleensuunnitteluun. Tällöin projekti olisi diplomityöksi liian laaja.

5.2 Korvaavan säätimen valinta

Diplomityön uudeksi tavoitteeksi sovittiin *MMini Pron* korvaajaksi soveltuvan säätimenvalinta markkinoilta. Korvaavan säätimen tulisi ensisijaisesti soveltua samanlaiseen käyttöön kuin *MMini Pro* ja olla ominaisuuksiltaan mielellään vähintään yhtä hyvä. Korvaavan säätimen tärkeimpiä ominaisuuksia ovat luotettavuus, toiminta laajalla lämpötila-alueella, pieni itsekulutus ja olosuhteiden vaatima suojaus.

Säätimen luotettavuus on oleellista, sillä säädin voi esimerkiksi olla vaikeasti saavutettavassa paikassa toisella puolella maapalloa. Tällöin vikaantuneen säätimen huoltaminen tai vaihtaminen voi tulla kalliiksi, vaikka säädin itsessään olisikin halpa. Toiminta laajalla lämpötila-alueella on tärkeää, koska toimintaolosuhteet vaihtelevat merkittävästi käyttökohteen sijainnista riippuen. Pieni itsekulutus puolestaan on toivottavaa, jotta mahdollisimman suuri osa tuotetusta tehosta saadaan hyödynnettyä ja aurinkosähköjärjestelmän koko pysyy kohtuullisena. Sähköinen suojaus sekä suojaus ympäristön olosuhteita vastaan ovat myös oleellisia ja lisäävät säätimen luotettavuutta.

Korvaajaksi soveltuvaa säädintä valittaessa tutustuttiin tarjontaan kahdeksalta säädinvalmistajalta: *Steca Elektronik, Morningstar, Victron Energy, Phocos, Studer Innotec, Renogy, MidNite Solar* ja *Outback Power*. Valikoimassa oli sekä uusia, että pitkään markkinoilla olleita säätimiä. Osa valmistajista karsiutui suoraan pois väärän säädintekniikan tai selvästi riittämättömien ominaisuuksien takia. Jäljelle jääneiden valmistajien tarjonasta valittiin tarkempaan vertailuun 28 säädintä, jotka voisivat ominaisuuksiltaan sopia *MMini Pron* korvaajaksi.

Lopulta säädinten joukosta valikoitui kolme lupaavinta vaihtoehtoa, jotka ovat *Morningstarin SunSaver* sekä *Phocosin CXNup* ja *ECO-N-T*. Edellä mainittujen säädinten teknisiä tietoja on listattu taulukossa 5.1. Kyseiset säätimet valikoitiin ensisijaisesti, koska ne soveltuvat valmistajansa mukaan suunniteltuun käyttöön, toimivat laajalla lämpötila-alueella ja kaikille luvataan viiden vuoden takuu.

Taulukko 5.1. Valikoitujen säädinten tekniset tiedot. [Liitteet A-D] [72] [73] [74]

Valmistaja		Naps Solar Systems	Morningstar	Phocos	
Säädin		MMini Pro	SunSaver (SS-10/20L-12/24V)	ECO-N-T (ECO-N-10/20-T)	CXNup (CXNup10/20)
Sähköiset	Järjestelmän jännite (V)	12/24	12/24 (erilliset säätimet)	12/24	12/24
	Maksimivirta osapaneelilta (A)	10	10/20	10/20	10/20
	Maksimivirta kuormalle (A)	7 (2x)	10/20	10/20	10/20
	Osapaneeliston maksimijännite (V)	25/47	30/60	30/50	30/50
	Itsekulutus (mA)	<4 (<6 LVD LED:n palassa)	<8	4	<4
Mekaaniset	Liitäntä kaapeleille (mm ²)	6	5	10	16
	Mitat (mm)	150x80x30	152x55x34	100x61x20	101x103x32
Ympäristö	Ympäristön lämpötila (°C)	-40...+45	-40...+60	-40...+60	-40...+50
	Suojaus	Piirilevy lakattu	Kapselointi, korroosiosuojatut liittimet, anodisoitu kotelo	Kapselointi, korroosiosuojatut liittimet	Korroosiosuojatut liittimet
	IP-luokitus		10	Kotelo 68, liittimet 21	22
Lataus	Säätötapa (PWM)	3-vaiheinen shunttisäätö	4-vaiheinen sarjasäätö	3-vaiheinen sarjasäätö	4-vaiheinen sarjasäätö
	Akkutyypit	Lyijyakut	Lyijyakut, NiCd	Lyijyakut	Lyijyakut, LiFePO ₄
Sähköinen suojaus	Osapaneelisto	Virta väärään suuntaan	Virta väärään suuntaan, ylivirta, oikosulku, akun ylijännite	Virta väärään suuntaan	Virta väärään suuntaan
	Kuorma	Ylivirta	Ylivirta, ylijännite, akun oikosulku	Ylivirta, alijännite	Ylivirta, alijännite

	Kaikki	Salaman-isku, ylijännite	Käänteinen napaisuus, salamanisku, jännitepiikki, ylikuumeneminen	Käänteinen napaisuus, oikosulku, ylijännite, ylikuumeneminen	Käänteinen napaisuus, oikosulku, ylijännite, ylikuumeneminen,
Muuta	Takuu (vuotta)	2	5	5	5
	Erytystä	Liitintä kahdelle kuormalle	Televiestintätila, luotettavuus		Toimintatietojen tallennus, etäyhteys
	Hinta noin (€) [75]		10 A: 55/61 20 A: 78/82	10 A: 44 20 A: 56	10 A: 68 20 A: 88

Noin 20 vuoden kokemuksen perusteella *MMini Pro* on osoittanut soveltuvansa sille suunniteltuun käyttöön erinomaisesti. Korvaavaksi säätimeksi pyrittiin siis etsimään ominaisuuksiltaan verrannollista tai parempaa säädintä. Valittujen säädinten ominaisuuksissa on eroja, mutta teknisesti niitä pitäisi pystyä käyttämään samoissa sovelluksissa kuin *MMini Prota*. Kaikki valitut säätimet toimivat esimerkiksi laajalla lämpötila-alueella ja riittävän suurilla virroilla, kestävät tarpeeksi suuria jännitteitä osapaneelistolta ja niillä on kehittynyt lataussäätö. *MMini Pro* perustuu luvussa 4.3.1 käsitellyyn shunttisäätöön, kun taas valitut säätimet perustuvat nykyään yleisempään sarjasäätöön. Shuntti- ja sarjasäätö toimivat kumpikin hyvin alle 20 A virroilla, mutta shunttisäädin kuumenee enemmän. Lisäksi *SunSaverissa* ja *CXNup:ssa* on enemmän latausvaiheita optimoimassa latausta.

Suurimmat erot valittujen säädinten välillä on niiden itsekulutuksessa, liitinten koossa ja suojauksen laajuudessa. *SunSaverin* itsekulutus on kaksinkertainen muihin verrattuna, mutta kuitenkin vielä kohtuullinen. Liitinten koolla on myös jonkin verran merkitystä, sillä kaapelin poikkipinta-ala vaikuttaa jännitehäviöihin ja säädön tarkkuuteen luvun 4.2.2 mukaan. Esimerkiksi *Phocos* suosittelee vähintään 4 mm² kaapeleita 10 A virroille ja 6 mm² kaapeleita 20 A virroille [74, s. 24]. *SunSaverin* sallima 5 mm² kaapeli jää siis hieman *Phocosin* suositusta pienemmäksi 20 A virran tapauksessa. Toisaalta *MMini Pro* toimii korkeintaan 10 A virroilla, joten käyttö 20 A virroilla ei siinä mielessä ole ongelma. Lisäksi kaapeleissa tapahtuvia jännitehäviöitä voidaan vähentää niiden pituuden minimoinnilla.

Suurimat suojaukseen liittyvät erot ovat suojauksessa ympäristön olosuhteita vastaan, mutta myös sähköisessä suojauksessa on eroja. *SunSaver* erottuu edukseen kattavimmalla sähköisellä suojauksella sekä ollen ainoa, jonka kohdalla mainitaan *MMini Pron* lisäksi suojauksesta salamaniskuja vastaan. Paras suojaus muita ympäristön olosuhteita vastaan on *SunSaverissa* ja *ECO-N-T:ssä*, joista kumpikin on kapseloitu ja liitännät korroosiosuojattu. *ECO-N-T:n* kotelon vesitiiviys ei ole tässä tapauksessa oleellista, sillä säätimet sijoitetaan sateelta suojaan. Sen sijaan kondensoituvalta vedeltä suojaava kapselointi on

hyödyllinen ominaisuus. *CXNup* puolestaan on suojattu vain pystysuoraan tai korkeintaan 15 asteen kulmassa tippuvalta vedeltä.

SunSaverilla ja *CXNup*:lla on myös huomionarvoisia erityisomaisuuksia. *SunSaverin* erityisiä ominaisuuksia ovat luotettavuus, televiestintätila (*telecom mode*) ja aiemmin käsitelty suojaus salamaniskuja vastaan. Luotettavuus perustuu siihen, että *SunSaver* on ollut tuotannossa vuodesta 1996 lähtien, niitä on asennettu yli miljoona kappaletta yli 73 maahan ja alle 0,1% toimitetuista säätimistä on viallisia. *SunSaverissa* on myös mahdollista valita televiestintätila herkille kuormille, jolloin säätimen aiheuttamaa kohinaa ja interferenssiä vähennetään kytkentätaajuutta rajoittamalla. Huomionarvoista on myös se, että *SunSaver* on valituista säätimistä ainoa, jossa on erillinen laite 12 V (SS-10/20L-12V) ja 24 V (SS-10/20L-24V) järjestelmille.

CXNup:n erityisominaisuus on toimintatietojen tallennus kahden vuoden ajalta. Toimintatiedot sisältävät esimerkiksi akkuun ja kuormaan syötetyt ampeeritunnit sekä akun SOC:n aamulla. *CXNup*:n saa liitettyä PC:hen, jolloin toimintatietojen siirto ja tarkkailu onnistuu myös sitä kautta. Kaikki valitut säätimet soveltuvat sekä avoimien, että suljettujen lyijyakkujen latauksen säätöön, mutta *CXNup* soveltuu lisäksi LiFePO₄-akkujen ja *SunSaver* NiCd-akkujen lataussäätöön.

Valittujen säädinten kuluttajahintoja selvitettiin aurinkosähköjärjestelmien komponentteja myyvällä verkkosivustolla *Webo Solar* [75], jonka valikoimasta löytyivät kaikki valitut säätimet. Selvityksen perusteella kaikki säätimet ovat hinnaltaan välillä 44-88€. *ECO-N-T* on valituista säätimistä halvin, *CXNup* kallein ja *SunSaver* likimain niiden välillä. Tietyn säädinmallin eri versioiden hinta kasvaa sallitun virran kasvaessa, ja *SunSaverin* kohdalla lisäksi järjestelmän jännitteen kasvaessa.

Vertailun perusteella *MMini Pron* korvaajaksi ehdotetaan *Morningstarin SunSaver* säätimiä SS-10L-12V ja SS-10L-24V järjestelmän jännitteestä riippuen. Valinta perustuu pääosin *SunSaverin* luotettavuuteen, kattavaan suojaukseen, kehittyneeseen lataussäätöön ja kohtuulliseen hintaan. Lisäksi *SunSaver* mahdollistaa myös NiCd-akkujen käytön äärimmäisten lämpötilojen vaatiessa ja toiminnan herkkien kuormien kanssa. *Phocosin* säätimet hylättiin vähäisemmän suojauksen, alkeellisemmän lataussäädön ja korkeamman hinnan takia. *CXNup*:stä puuttuu suojaus kondensoituvaa vettä vastaan ja se on valituista säätimistä kallein. *ECO-N-T*:n lataussäätö puolestaan on 3-vaiheinen ja siten yksinkertaisempi kuin *SunSaverin* ja *CXNup*:n 4-vaiheinen lataussäätö.

6. YHTEENVETO

Diplomityön alkuperäisenä tavoitteena oli sähköverkosta riippumattomien aurinkosähköjärjestelmien lataus- ja kuormasäätimiin tutustuminen sekä *Naps Solar Systemsin* vanhan, mutta hyväksi todetun *MMini Pro* -säätimen elektronikan päivitys nykyaikaiseksi. *MMini Pron* elektronikan päivitysmahdollisuuksien selvityksen perusteella päädyttiin kuitenkin vaihtamaan työn uudeksi tavoitteeksi korvaavan säätimen valinta markkinoilta.

Työ aloitettiin tutustumalla akkuihin osana aurinkosähköjärjestelmiä, jotta ymmärrettäisiin, miksi niitä suojaavia lataus- ja kuormasäätimiä tarvitaan. Kävi ilmi, että säätimet ovat oleellinen osa sähköverkosta riippumattomia aurinkosähköjärjestelmiä pääosin siksi, että ilman latauksen ja purkautumisen säätöä kalliiden akkujen elinikä jää lyhyeksi. Sopivan lataus- ja kuormasäätimen valinta riippuu muun muassa aurinkosähköjärjestelmän jännitteestä, käyttökohteesta, akkutyypistä, olosuhteista ja kuormasta. Säädintyypit ja säätötekniikat vaihtelevat, mutta useimmat ovat yksinkertaisia *on/off* -säätimiä, monivaiheista lataussäätöä toteuttavia PWM-säätimiä tai lataustehoa maksimoivia MPPT-säätimiä.

MMini Pro -säätimen elektronikan päivitysmahdollisuuksien selvitys koostui säätimen rakenteeseen tutustumisesta, komponenttien saatavuuden selvittämisestä ja *MMini Pron* kanssa tekemisissä olleiden ihmisten haastattelusta. Selvityksen perusteella joidenkin *MMini Prossa* käytettyjen komponenttien saatavuus oli rajallinen tai valmistus lopetettu. Lisäksi elektronikan komponenttien maailmanmarkkinatilanne oli selvityksen hetkellä yleisesti huono ja minkä tahansa komponentin saatavuus voisi osoittautua ongelmalliseksi. Osa *MMini Pron* komponenteista olisi helppo korvata, mutta ongelmaksi muodostui mikrokontrollerin vaihto ja sen sisältämän ohjelman siirto.

Selvityksen perusteella *MMini Pron* elektronikan päivitys voisi tapahtua kahdella tavalla. Ensimmäinen vaihtoehto olisi mikrokontrollerin vaihto uudempaan samasta tuoteperheestä, jolloin ohjelman siirto voisi onnistua. Saman tuoteperheen uudemman mikrokontrollerin saatavuus osoittautui paremmaksi, mutta kuitenkin rajalliseksi, eikä vanhan ohjelman toiminnasta siinä ole varmuutta. Toinen vaihtoehto olisi täysin uuden mikrokontrollerin valinta, mutta se johtaisi SMD-teknologiaan siirtymiseen ja lähes koko säätimen uudelleensuunnitteluun, jolloin projekti olisi diplomityöksi liian laaja. Selvityksen tulosten perusteella *MMini Pron* elektronikan päivitys ei ole kannattavaa ainakaan diplomityön puitteissa ja järkevämpää olisi valita sen tilalle korvaava säädin.

Diplomityön uudeksi tavoitteeksi sovittiin siis *MMini Pron* korvaajaksi soveltuvan säätimen valinta markkinoilta. Korvaavan säätimen etsintä alkoi sille asetettujen vaatimusten selvityksellä. *MMini Pro* on osoittautunut soveltuvan sille suunniteltuun käyttöön erin-

omaisesti, joten tavoitteeksi asetettiin vastaavaan käyttöön soveltuva ja tärkeimmiltä ominaisuuksiltaan vähintään yhtä hyvän säätimen valinta. Korvaavaa säädintä etsittäessä tutustuttiin kahdeksan säädinvalmistajan tarjontaan ja vertailtiin niiden ominaisuuksia. Vertailun perusteella *MMini Pron* korvaavaksi säätimeksi ehdotetaan *Morningstarin SunSaver*-säätimiä. Valinta perustuu *SunSaverin* luotettavuuteen, kattavaan suojaukseen, edistyneeseen lataussäätöön ja kohtuulliseen hintaan.

Morningstarin tarjoamien tietojen perusteella *SunSaverin* pitäisi soveltua tarkoitettuun käyttöön, mutta lopullinen varmuus saadaan vasta testaamalla sitä käytännössä. Mikäli *SunSaver* päädytään valitsemaan *MMini Pron* korvaajaksi, suositellaan säätimien vertailua jatkossakin. Aurinkosähkön yleistymisen laajentanee myös säädintarjontaa, ja säädinten ominaisuudet luultavasti kehittyvät kilpailun myötä.

MMini Pron elektroniikan päivitystä voisi myös jatkaa. Vähätöisempi, mutta luultavasti lyhytaikaisempi ratkaisu olisi mikrokontrollerin valinta samasta tuoteperheestä. Tällöin seuraava askel olisi tarvittavan ohjelmiston maksullisen version hankinta *MMini Pron* ohjelman siirron testaamiseen ja mahdollisten parannusten tekoon. Huomattavasti työläämpi, mutta todennäköisesti pidempiaikainen ratkaisu olisi modernin mikrokontrollerin valinta, mikä kuitenkin johtaisi lähes koko säätimen uudelleensuunnitteluun.

Diplomityö onnistui siinä mielessä hyvin, että sitä tehdessä opittiin paljon lataus- ja kuormasäätimistä sekä niihin liittyvistä akuista ja sähköverkosta riippumattomista aurinkosähköjärjestelmistä. Valitettavasti työn alkuperäisenä tavoitteena ollut *MMini Pron* elektroniikan päivityksen toteuttaminen ei tämän työn puitteissa onnistunut, mutta päivityksen vaatimuksista ja kannattavuudesta saatiin tietoa. Työn uudeksi tavoitteeksi valittu korvaavan säätimen valinta onnistui kuitenkin hyvin, ja tuloksena on ainakin teoriassa vähintään yhtä hyvä säädin.

LÄHTEET

- [1] ”BP Statistical Review of World Energy 2018,” BP, 2018.
- [2] A. Luque ja S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering (2nd Edition), John Wiley & Sons, 2011.
- [3] ”National Oceanic and Atmospheric Administration Earth System Research Laboratory Global Monitoring Division,” 6 joulukuu 2018. [Online]. Available: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>. [Haettu 20 joulukuu 2018].
- [4] L. Doman, ”Energy Information Administration,” U.S. Energy Information Administration, 14 syyskuu 2017. [Online]. Available: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=32912>. [Haettu 20 joulukuu 2018].
- [5] ”U.S. Energy Information Administration,” 21 joulukuu 2018. [Online]. Available: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=12251>. [Haettu 13 heinäkuu 2013].
- [6] K. N. Liou, An Introduction to Atmospheric Radiation (2nd Edition), Volume 84, Elsevier, 2002.
- [7] M. A. Green, Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications, Prentice-Hall , 1982.
- [8] H. D. Young ja R. A. Freedman, University Physics With Modern Physics (14th Edition), Pearson, 2015.
- [9] A. Labouret ja M. Villoz, Solar Photovoltaic Energy, The Institution of Engineering and Technology, 2010.
- [10] L. Shekhtman ja J. Thompson, ”NASA Science: Solar System Exploration,” NASA, 1 marraskuu 2018. [Online]. Available: <https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/sun/in-depth/>. [Haettu 9 marraskuu 2018].

- [11] S. Qazi, Standalone Photovoltaic (PV) Systems for Disaster Relief and Remote Areas (1st Edition), Elsevier, 2016.
- [12] S. M. Sze ja M. K. Lee, Semiconductor Devices: Physics and Technology (3rd Edition), John Wiley & Sons, 2012.
- [13] S. A. Kalogirou, Solar Energy Engineering: Processes and Systems (2nd Edition), Academic Press, 2013.
- [14] ”Solar Cell Dictionary,” ENF, 2019. [Online]. Available: <https://www.ensolar.com/pv/cell>. [Haettu 14 tammikuu 2019].
- [15] S. A. Kalogirou, McEvoy's Handbook of Photovoltaics (3rd Edition), Elsevier, 2017.
- [16] M. H. Rashid, Power Electronics Handbook (4th Edition), Elsevier, 2018.
- [17] M. A. Green, Y. Hishikawa, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger ja A. W. Ho-Baillie, ”Solar cell efficiency tables (version 52),” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, osa/vuosik. 26, nro 7, ss. 427-436, 2018.
- [18] P. Mohanty, T. Muneer ja M. Kolhe, Solar Photovoltaic System Applications: A Guidebook for Off-Grid Electrification, Springer, 2016.
- [19] ”Pienjännitesähköasennukset. Osa 7-712: erikoistilojen ja -asennusten vaatimukset. Aurinkosähköjärjestelmät,” tekijä: *SFS-Käsikirja 600-1-2:2017 Pienjännitesähköasennukset. Osa 1-2*, Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2017.
- [20] G. Milne, S. Neill, C. Reardon, C. Riedy ja G. Stapleton, ”Photovoltaic systems,” YourHome: Australia's guide to environmentally sustainable homes, 2013. [Online]. Available: <http://www.yourhome.gov.au/sites/prod.yourhome.gov.au/files/pdf/YOURHOME-Energy-PhotovoltaicSystems.pdf>. [Haettu 3 helmikuu 2019].
- [21] K. Lappalainen, ”Output Power Variation and Mismatch Losses of Photovoltaic Power Generators Caused by Moving Clouds,” Tampere University of Technology, Publication 1506, Tampere, 2017.
- [22] S. Sumathi, L. A. Kumar ja P. Surekha, Solar PV and Wind Energy Conversion Systems, Springer, 2015.
- [23] ”AC power on-board with inverter/charger Xtender,” Studer Innotec, [Online]. Available: <https://www.studer-innotec.com/en/applications/mobile-energy->

applications/maritime-applications/ac-power-on-board-with-inverter-charger-xtender-5428. [Haettu 23 tammikuu 2019].

- [24] S. Evanczuk, "Synchronizing Small-Scale PV Systems with the Grid," Digi-Key Electronics, 24 syyskuu 2015. [Online]. Available: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2015/sep/synchronizing-small-scale-pv-systems-with-the-grid>. [Haettu 18 tammikuu 2019].
- [25] B. Diouf ja R. Pode, "Potential of lithium-ion batteries in renewable energy," *Renewable Energy*, nro 76, ss. 375-380, 2015.
- [26] P. Ribeiro, B. Johnson, M. Crow, A. Arsoy ja L. Y., "Energy storage systems for advanced power applications," *Proceedings of the IEEE*, nro 89, ss. 1744-1756, 2002.
- [27] A. Ter-Gazarian, *Energy Storage for Power Systems*, Peter Peregrinus Ltd., 1994.
- [28] D. Spiers ja J. Royer, *Guidelines for the use of batteries in photovoltaic systems*, Canadian Energy Diversification Research laboratory of CANMET ja Neste Advanced Power Systems, 1998.
- [29] "Comparing deep-cycle flooded batteries to VRLA batteries," EneRa, [Online]. Available: <http://www.enera.eu/en/products/batteries/comparing-deep-cycle-flooded-batteries-to-vrla-batteries/>. [Haettu 10 tammikuu 2019].
- [30] "Valve-Regulated Lead-Acid (VRLA): Gelled Electrolyte (Gel) and Absorbed Glass Mat (AGM) Batteries," Workmanship, EAST PENN Expertise and American, 2015. [Online]. Available: <http://www.eastpenmanufacturing.com/wp-content/uploads/Guide-to-VRLA-Batteries-1927.pdf>. [Haettu 10 tammikuu 2019].
- [31] E. Parliament ja C. o. t. E. Union, "Directive 2006/66/EC of the European Parliament and of the Council of 6 September 2006 on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators and repealing Directive 91/157/EEC," 26 syyskuu 2006. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32006L0066>. [Haettu 16 elokuu 2018].
- [32] C. Julien, A. Mauger, A. Vijn ja K. Zaghid, *Lithium Batteries Science and Technology*, Springer, 2016.
- [33] M. Hocking, J. Kan, P. Young, C. Terry ja D. Begleiter, "Welcome to the Lithium-ion Age," Deutsche Bank, 2016.

- [34] M. Hocking, J. Kan, P. Young, C. Terry ja D. Begleiter, "Welcome to the Lithium-ion Age," Deutsche Bank, 2016.
- [35] B. Lawson, "The Electropedia Battery and Energy Technologies," Woodbank Communications Ltd, [Online]. Available: <https://www.mpoweruk.com/performance.htm#life>. [Haettu 2 tammikuu 2019].
- [36] E. M. G. Rodrigues, R. Godina, G. J. Osória, J. M. Lujano-Rojas ja J. P. S. Catalão, "Comparison of Battery Models for Energy Storage Applications on Insular Grids," tekijä: *2015 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Wollongong, 2015.
- [37] I. Buckhmann, "BatterySpace," AA Portable Power Corp., [Online]. Available: <https://www.batteryspace.com/batteryknowledge.aspx>. [Haettu 7 joulukuu 2018].
- [38] "Solar Charge Controller Basics," Northern Arizona Wind & Sun, 2018. [Online]. Available: <https://www.solar-electric.com/learning-center/batteries-and-charging/solar-charge-controller-basics.html>. [Haettu 14 syyskuu 2018].
- [39] "Sonnenschein A 500 Operating Instruction Stationary valve regulated lead acid batteries," GNB Industrial Power, [Online]. Available: <https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/1270/0900766b81270ea4.pdf>. [Haettu 23 lokakuu 2018].
- [40] "AJ Sine Wave Inverter," Innotec, Studer, 2018. [Online]. Available: http://www.studer-innotec.com/media/document/0/manuel-aj-v3.3_en_de_fr_es.pdf. [Haettu 22 tammikuu 2019].
- [41] "B.L.O. Battery Lifetime Optimizer," Innotec, Studer, [Online]. Available: <http://www.studer-innotec.com/media/document/0/flyer-b.l.o.-en.pdf>. [Haettu 22 tammikuu 2019].
- [42] J. P. Dunlop, "Batteries and Charge Control in Stand-Alone Photovoltaic Systems. Fundamentals and Applications," Florida Solar Energy Center, 1997.
- [43] A. Santini, *Automotive Electricity and Electronics (2nd Edition)*, Cengage Learning, Inc., 2013.
- [44] V. C. Kotak ja P. Tyagi, "DC To DC Converter in Maximum Power Point Tracker," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, osa/vuosik. 12, nro 2, ss. 6115-6125, 2013.
- [45] D. W. Gao, *Energy Storage for Sustainable Microgrids*, Elsevier, 2015.

- [46] D. Lenardic, "Solar Cells," pvresources, 23 joulukuu 2015. [Online]. Available: <http://www.pvresources.com/en/solarcells/solarcells.php>. [Haettu 9 lokakuu 2018].
- [47] B. Bendib, H. Belmili ja F. Krim, "A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nro 45, ss. 637-648, 2015.
- [48] M. Hlaili ja H. Mechergui, "Comparison of Different MPPT Algorithms with a Proposed One Using a Power Estimator for Grid Connected PV Systems," *International Journal of Photoenergy*, 2016.
- [49] R. B. A. Koad ja A. F. Zobaa, "Comparative study of five maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems," *International Journal on Energy Conversion IRECON*, osa/vuosik. 2, nro 1, 2014.
- [50] T. Eswam ja P. L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracing Techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, osa/vuosik. 22, nro 2, ss. 439-449, 2007.
- [51] S. R. Chafle ja U. B. Vaidya, "Incremental Conductance MPPT Technique For PV System," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, osa/vuosik. 2, nro 6, ss. 2719-2726, 2013.
- [52] Y. S. Joel, H. V. Saikumar ja S. S. R. Patange, "Design & Performance Analysis of Fuzzy Based MPPT Control Using Two-Switch Non Inverting Buck-Boost Converter," tekijä: *International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES)*, Phopal, 2016.
- [53] C. S. Chin, P. Prabhakaran, S. S. Yang, B. L. Chuan ja K. T. K. Teo, *Effect of Partially Shaded Conditions on Photovoltaic Array's Maximum Power Point Tracking*, Kota Kinabalu, 2008.
- [54] K. S. Tey ja S. Mekhilef, "Modified Incremental Conductance Algorithm for Photovoltaic System Under Partial Shading Conditions and Load Variation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, osa/vuosik. 61, nro 10, ss. 5384-5392, 2014.
- [55] Z. Erdem, "A Review of MPPT Algorithms for Partial Shading Conditions," *Acta Physica Polonica Series A*, nro 132, ss. 1128-1133, 2017.

- [56] H. Patel ja V. Agarwal, "Maximum Power Point Tracking Scheme for PV Systems Operating Under Partially Shaded Conditions," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, osa/vuosik. 55, nro 4, ss. 1689-1698, 2008.
- [57] S. Pester ja S. Woodman, "Fire and Solar PV Systems - Literature Review," Building Research Establishment: National Solar Center, St Blazey, 2017.
- [58] G. Scott, "Understanding the Current Component Shortages (and How to Survive Them)," Jabil, [Online]. Available: <https://www.jabil.com/insights/blog-main/understanding-component-supply-shortages>. [Haettu 20 marraskuu 2018].
- [59] "ECIAauthorized," Electronic Components Industry Association, 2018. [Online]. Available: <https://www.eciaauthorized.com/en>. [Haettu 20 marraskuu 2018].
- [60] "RS Components," Electrocomponents PLC, [Online]. Available: http://www.rs-components.com/index.html?utm_source=eciaauthorized&utm_medium=aggregator&utm_campaign=sponsor-logo&utm_content=fi_en-gb_eur. [Haettu 20 marraskuu 2018].
- [61] "Digi-Key Electronics," [Online]. Available: <https://www.digikey.fi/>. [Haettu 21 marraskuu 2018].
- [62] "Mouser Electronics," [Online]. Available: <https://www.mouser.fi/>. [Haettu 21 marraskuu 2018].
- [63] "Farnell element14," [Online]. Available: <https://fi.farnell.com/>. [Haettu 21 marraskuu 2018].
- [64] "Rochester Electronics," [Online]. Available: <https://www.rocelec.com/>. [Haettu 21 marraskuu 2018].
- [65] "Octopart," [Online]. Available: <https://octopart.com/>. [Haettu 21 marraskuu 2018].
- [66] "Avnet," [Online]. Available: <https://www.avnet.com/wps/portal/emea/>. [Haettu 21 marraskuu 2018].
- [67] "Reichelt electronic," [Online]. Available: <https://www.reichelt.com/fi/en/?r=1>. [Haettu 21 marraskuu 2018].
- [68] "RMS Components," [Online]. Available: <https://rmscomponents.com.au/>. [Haettu 21 marraskuu 2018].

- [69] ”Electrokit,” [Online]. Available: <https://www.electrokit.com/en/>. [Haettu 21 marraskuu 2018].
- [70] A. Rasinkoski, Interviewee, *diplomi-insinööri*. [Haastattelu]. 6 ja 17 heinäkuu 2018.
- [71] A. Kakkonen, Interviewee, *Naps Solar Systemsin entinen työntekijä*. [Haastattelu]. 12, 17, 18 heinäkuu 2018.
- [72] ”SunSaver Installation and Operation Manual,” Morningstar, 2018. [Online]. Available: https://2n1s7w3qw84d2ysnx3ia2bct-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2014/02/SS3.IOM_Operators_Manual.01.EN_.pdf. [Haettu 23 marraskuu 2018].
- [73] ”ECO-N-T User Manual,” Phocos, 2015. [Online]. Available: <https://www.phocos.com/na/wp-content/uploads/sites/6/2015/11/Final-ECO-N-T-User-Manual-190-125.pdf>. [Haettu 23 marraskuu 2018].
- [74] ”Phocos CXNup Solar charge controller user manual,” Phocos, 2018. [Online]. Available: <https://www.phocos.com/wp-content/uploads/2018/10/CXNup-final-manual-V3.pdf>. [Haettu 23 marraskuu 2018].
- [75] ”PWM Controllers,” Webo Solar, [Online]. Available: <https://webosolar.com/store/en/87-pwm-controllers>. [Haettu 24 tammikuu 2019].
- [76] A. Trivedi, A. Gupta ja R. K. Pachauri, ”Comparison of Perturb & Observe and Ripple correlation control MPPT algorithms for PV array,” tekijä: *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, Delhi, 2016.
- [77] R. Seppänen, M. Kervinen, I. Parkkila, L. Karkela ja P. Meriläinen, *Maol Taulukot*, Otava, 2005.

LIITE A: *MMINI PRO* LATAUS- JA KUORMASÄÄTIMEN DATA-LEHTI

NAPS*



Naps MMini Pro Charge Controller for Small Industrial Solar Electric Systems

Naps MMini Pro is a microprocessor-based solid state shunt controller with temperature compensation. It is designed for use in small professional solar electric systems. Naps MMini Pro incorporates a 10 Amp charge circuit and two 7 Amp load circuits.

A new and unique feature of the Naps MMini Pro is the possibility to configure one of the load circuits for night-time lighting, active only when there is no daylight detected by the solar electric array.

Low voltage load disconnect (LVD), overvoltage protection and battery type selection are all provided. Front panel indication is by LEDs which indicate solar electricity charging and LVD status.

Reverse night-time current flow is prevented by an integral, low loss blocking diode.

Naps MMini Pro's solid state charging circuitry provides fast and accurate charging and keeps batteries fully charged whenever possible. Naps MMini Pro gives vented lead-acid batteries an additional boost charge for improved recovery from deep discharges, thus enhancing battery life.

Easily accessible screw terminal blocks for cable sizes up to 6 mm² are provided for the module, battery and two load circuits.

The high reliability design gives a calculated MTBF in excess of 2 million hours and a design lifetime of more than 16 years. Naps MMini Pro has a warranty period of two (2) years from the date of purchase.

For special systems projects, a variety of options are available for Naps MMini Pro.

Naps MMini Pro Features

Solid state charging

Once the battery voltage limit is reached, the charging current is pulsed to maintain the battery at this voltage for the rest of the day.

Temperature compensation

Naps MMini Pro adjusts the charging voltage for ambient temperature changes. This results in full charging during the winter without fear of overcharging during the summer.

Automatic boost charging

If the battery has received a deep discharge (over 60 %), Naps MMini Pro will ensure that it is first charged to a higher voltage than normal. Once this voltage has been reached, charging reverts to the normal mode. This feature operates for open (vented) batteries only.

Selection of battery type and system voltage

The factory settings are for a 12 V system with a sealed (VRLA) battery, but can be easily changed to 24 V and/or open (flooded) batteries.

Reverse current protection

An integral Schottky blocking diode prevents the battery discharging through the photovoltaic array at night.

Load Circuits

The controller has two load circuits, each capable of handling 7 A continuous load current and each with independent overload protection.

Lighting control

Load 1 circuit can be used in "dusk till dawn" lighting control mode. The controller uses the solar electric module as light sensor and switches Load 1 on when it gets dark and off when the module is illuminated. Load 2 circuit operates as a normal, continuously on, load circuit. The lighting control mode is easily selected using a jumper.

Battery deep discharge protection

Fully discharging the battery may damage it and may cause it to freeze. Naps MMini Pro has a battery deep discharge protection which disconnects the loads from the battery if there is a deep discharge. A built-in delay prevents nuisance tripping.

Overvoltage protection

Fast-acting semiconductor transient overvoltage suppressors protect all terminals. Additionally, the loads are disconnected automatically if the battery voltage is abnormally high, and automatically reconnected after a short delay if normal battery voltage is restored.

EMC

Naps MMini Pro fully complies with the EU EMC directive and proposed IEC solar electric systems standards.

Reliability

Fully solid state design using industrial grade components with

ample design margins ensures high reliability and a design lifetime of more than 16 years.

Solar electricity charge indicator

A yellow LED is continuously lit when the solar electric array is charging and it will start to flash when the battery approaches full charge.

Battery status warning and LVD indicator

A red LED will start to flash if the battery has less than approximately 40 % capacity left. If the LVD has operated the indicator will be continuously on until the battery voltage has risen sufficiently to reset the LVD circuit.

Specifications

Product code	41605	
Nominal system voltage	12 / 24 V	
Maximum array current	10 A	
	12 V	24 V
Maximum array voltage	25 V	47 V
End-of-charge voltage +25°C	14.2 V	28.4 V
Maximum charge voltage -25°	15.6 V	31.2 V
Temperature compensation	-30 mV/* (approx)	-60 mV/* (approx)
Load circuits	2 x 7 A	2 x 7 A
Low voltage disconnect (LVD)	11.3 V	22.6 V
LVD delay	1 minute	1 minute
LVD reconnect	12.9 V	25.8 V
Load overvoltage disconnect	15.7 V	31.4 V
Load overvoltage reconnect	12.9 V	25.8 V
Load 1 night-only operation	jumper selectable	
Current consumption (typical)	4 mA	4 mA
Display LEDs	1 solar current 2 LVD status	
PCB protection	lacquered	
Ambient temperature range	-40 °C ... +45 °C	
Dimensions	150 x 80 x 30 mm	
Weight	0.19 kg	
Tolerance for electrical values typically	< +/- 1.5 %	
Jumper-selectable options		
Nominal Voltage	12 V* or 24 V	
Battery type	VRLA* or open	
Load 1 operation	24 h* or night only	
* indicates factory setting		

GB-SE-PI128-3-12/07

All rights to the product belong exclusively to Naps Solar Systems Oy. Naps Solar Systems Oy reserves the right to make changes without prior notice to the specifications of new versions of the product. To meet customers' needs we continuously develop our products. Therefore the specifications of the latest version of the product should be checked before purchase.

LIITE B: SUNSAVER LATAUS- JA KUORMASÄÄTIMEN DATALEHTI



SUNSAVER™ SOLAR CONTROLLER

Morningstar is pleased to introduce our third generation **SunSaver**. Since its first market introduction in 1996, over 1 million SunSaver controllers have been installed in over 73 countries for numerous solar power systems including oil/gas, telecom and instrumentation, marine and boating, and remote homes. We have retained much of our legacy design including the same ratings, footprint and simple user interface, and have added several new and advanced high value features:

- Full electronic protections
- 4 stage battery charging
- Self-diagnostics to detect critical faults
- Multi-color status LED
- 3 LED's for battery state of charge
- Dead battery recovery
- Telecom mode for sensitive loads
- Maximum charge limiting for sensitive loads
- Cover to protect wire terminals
- Additional certifications



Key Features and Benefits

■ Extremely High Reliability

- Failure rate of less than 1 per 1,000 shipped (<0.1%)
- 100% solid state. Power MOSFET design
- Manufactured in an ISO 9000 factory
- 100% pre-shipment functional testing

■ Longer Battery Life

- Advanced PWM charging
- Series design (not shunt) for cool operation
- 4-stage charging: bulk, absorption, float, equalize
- Optimized sealed or flooded battery set points
- Temperature compensated charging
- Low voltage load disconnect on several versions

■ Designed for Harsh Environments

- Temperature rating of -40°C to +60°C
- Epoxy encapsulation for protection against humidity and dust ingress
- Corrosion protection: marine rated terminals and anodized aluminum case
- Certified for use in hazardous locations

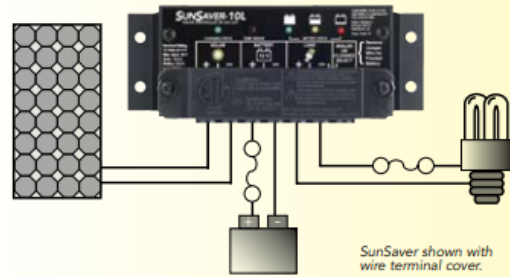
■ Easy to Install and Use

- Factory pre-sets result in no required install settings
- Electronic protections prevent damage from wiring mistakes
- Fully automatic operation and fault recovery
- LED's display extensive information about status, faults and battery condition

SUNSAVER™ SOLAR CONTROLLER

SunSaver Versions

	Solar Current	Load Current	System Voltage	LVD
• SS-6-12V	6A	6A	12V	No
• SS-6L-12V	6A	6A	12V	Yes
• SS-10-12V	10A	10A	12V	No
• SS-10L-12V	10A	10A	12V	Yes
• SS-10L-24V	10A	10A	24V	Yes
• SS-20L-12V	20A	20A	12V	Yes
• SS-20L-24V	20A	20A	24V	Yes



TECHNICAL SPECIFICATIONS

Electrical

- **Max. PV and load ratings** Per above
- **System voltage** 12 or 24 volts
- **Min. battery voltage** 1 volt
- **Regulation voltage**

	12 volt	24 volt
Sealed battery	14.1 V	28.2 V
Flooded battery	14.4 V	28.8 V
- **Load disconnect** 11.5 V 23.0 V
- **LVD reconnect** 12.6 V 25.2 V
- **Max. solar voltage**

	30 volts
12V battery	30 volts
24V battery	60 volts
- **Load in-rush capability**

	45 amps
SunSaver-6	45 amps
SunSaver-10	65 amps
SunSaver-20	140 amps
- **Self-consumption** < 8 mA
- **Voltage accuracy**

	12V: +/- 25 mV (typical)
24V: +/- 48 mV (typical)	
- **Transient surge protection** 1500W per connection

Mechanical

- **Wire size** 5 mm² / #10 AWG
- **Weight (unpacked)** 0.23kg / 8 oz.
- **Dimensions** 15.2 x 5.5 x 3.4 cm
6.0 x 2.2 x 1.3 inch

Environmental

- **Ambient temperature** -40°C to +60°C
- **Storage temperature** -55°C to +80°C
- **Humidity** 100% non-condensing
- **Tropicalization** Epoxy encapsulation
Marine rated terminals
Anodized aluminum case

Electronic Protections

- **Solar:** Overload, short-circuit, high voltage
- **Load:** Overload, short-circuit, high voltage
- **Battery:** High voltage
- **All:** Reverse polarity, high temperature, lightning and transient surges
- **Reverse current at night**

Battery Charging

- **Charging method** 4 stage series PWM
- **Charging stages** Bulk, absorption, float, equalize
- **Temperature compensation**

	12V: -30mV/°C
Coefficient	24V: -60mV/°C
Range	-30°C to +60°C
Set points	Absorption, float, equalize

LED Indications

- **Status LED (1)** Charging or not charging
Solar error conditions
- **Battery LED's (3)** Battery level
Charging stage

Certifications

- **ETL Listed to UL 1741 and CSA C22.2 No. 107.1-01**
- **Hazardous Locations** Class 1, Division 2, Groups A,B,C,D
CSA C22.2#213
- **EMC Directives** Immunity, emissions, safety
- **FCC** Class B Part 15
- **CE**
- **RoHS**
- **ISO 9000**

WARRANTY: Five year warranty period. Contact Morningstar or your authorized distributor for complete terms.

AUTHORIZED MORNINGSTAR DISTRIBUTOR:



8 Pheasant Run
Newtown, PA 18940 USA
Tel: +1 215-321-4457 Fax: +1 215-321-4458
E-mail: info@morningstarcorp.com
Website: www.morningstarcorp.com



LIITE C: ECO-N-T LATAUS- JA KUORMASÄÄTIMEN DATALEHTI

ECO-N-T Series (10-20 A)

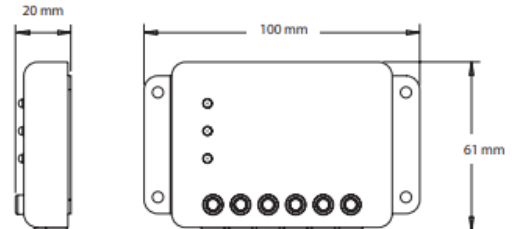
Solar Charge Controller



phocos



Technical Drawing



Product Introduction

Phocos' ECO-N-T is a cost effective solution for many challenging solar applications. Its compact size allows it to fit well in small spaces. The industrial grade ECO-N-T is fully encapsulated, which protects the circuit board from corrosion. This unit also features UL and other certifications, proving it is a robust charge controller that will perform well in a variety of harsh environments.

The ECO-N-T is versatile and offers the flexibility of operating with 12 or 24 V systems. This reliable charge controller is simple to use, as it requires no user programming and has easy to interpret LEDs. The ECO-N-T will protect your batteries from overcharging and over discharging, making for a strong return on investment.

Product Features

- Ideal for almost any off-grid PV application
- Same model can be used in 12 or 24 V systems (fewer components to stock)
- Fully potted PCB
- Rugged housing with corrosion-resistant screw terminals
- Simple 3-LED system status interface
- Install only requires a flathead screwdriver
- UL1741/Class I Div. 2 certified

Technical Data

Type	ECO-N-10-T	ECO-N-20-T
System Voltage	12/24 V auto recognition	
Max. Charge/Load Current	10 A	20 A
Float Charge	13.8/27.6 V (25 °C)	
Main Charge	14.4/28.8 V (25 °C), 0.5 h daily	
Boost Charge	14.4/28.8 V (25 °C), 2 h activation: < 12.3/24.6 V	
Deep-Discharge Protection	11.0/22.0 V	
Overvoltage Protection	15.5/31.0 V	
Undervoltage Protection	10.5/21.0 V	
Max. PV Panel Voltage	30/50 V	
Temperature Compensation	-25 mV/K (12 V); -50 mV/K (24 V)	
Idle Self-Consumption	4 mA	
Grounding	Negative grounded	
Ambient Temperature	-40 to +60 °C	
Max. Altitude	4,000 m above sea level	
Battery Type	Lead acid (gel, AGM)	
Screw Terminal Max. Wire Cross Section	10 mm ² (AWG 8)	
Dimensions (WxHxD)	100 x 61 x 20 mm / 4 x 2.4 x 0.80 in	
Weight	0.16 kg / 0.35 lbs	
Ingress Protection	IP68 (case), IP21 (terminals)	
Certificates	CE compliant, RoHS compliant, UL1741, ANSI/ISA 12.12.01-2012 Class I Div. 2 Locations (Groups A-D)	
Warranty	5 years	

The ECO-N-T is NRTL certified

Hazardous Locations (HazLoc) tested according to: ANSI/ISA 12.12.01-2012, Class I Division 2 (Groups A-D).

Ordinary Locations (OrdLoc) tested according to: UL1741-2005 CAN/CSA C22.2 No. 107.1-01



LIITE D: CXNUP LATAUS- JA KUORMASÄÄTIMEN DATALEHTI

☀️ CXNup Series (10-40 A)

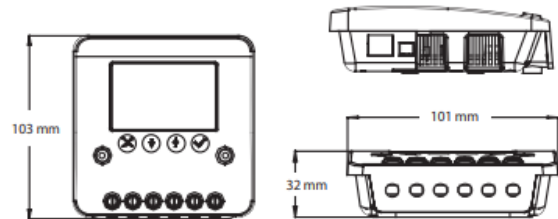
Solar Charge Controller w/ Datalogging and LCD



phocos



Technical Drawing



Product Introduction

The CXNup series is a highly intelligent charge controller family for a wide range of applications. It features an intuitive user interface and stores up to two (2) years of valuable system performance data, which is accessible via the LCD and PhocosLink software.

Real-time battery voltage, SOC %, charge and load current, and system status are clearly displayed on the large, backlit LCD. Optional acoustic battery alarms and programmable street light settings are also standard.

Product Features

- USB charging port
- Data logger information can be exported
- Load status indication
- Touch keys ensure long lasting operation and eliminates mechanical button failures
- Prepared for 12 or 24 V battery charging
- Suitable for charging systems up to 1.4 kW
- 2 year datalogging
- User friendly LCD shows extensive system information
- Four-stage PWM charging algorithm with integrated temperature compensation
- Full electronic protection
- Programmable load function suitable for street lights
- Corrosion-resistant screw terminals
- Programmable battery type

Optional Accessories



MXI and MXI-232

- Interface for CXNup controller communication with computer via USB or RS232 interface

Technical Data

Type	CXNup10	CXNup20	CXNup2B*	CXNup40
System Voltage	12/24 V auto recognition			
Max. Charge Current	10 A	20 A	20 A / 20 A	40 A
Max Load Current	10 A	20 A	N/A	40 A
Float Charge	13.8/27.6 V (25 °C)			
Main Charge	14.4/28.8 V (25 °C), 0.5 h daily			
Boost Charge	14.4/28.8 V (25 °C), 2 h activation: battery voltage < 12.3/24.6 V			
Equalization Charge	14.8/29.6 V (25°C), 2 h Activation: battery voltage < 12.1/24.2 V (at least every 30 days)			
Deep-Discharge Protection	11.5-12.0/23.0-24.0 V (by SOC) 11.0-11.5/22.0-23.0 V (by voltage)			
Reconnect Level	12.8/25.6 V			
Overvoltage Protection	15.5/31.0 V			
Undervoltage Protection	10.5/21.0 V			
Max. Panel Voltage	30 V/50 V			
Temperature Compensation	-25 mV/K (12 V); -50 mV/K (24 V)			
Idle Self-Consumption	<4 mA (backlight off); <12 mA (backlight on)			
Grounding	Negative grounded			
Ambient Temperature	-40 to +60 °C			
Max. Altitude	4,000 m above sea level			
Battery Type	Lead acid (gel, AGM, flooded), LiFePO4			
Datalogger	2 years			
USB Charging Port	5.0 V; 1.5 A			
Wire Cross Section	16 mm ² (AWG 6)			
Dimensions (WxHxD)	101 x 103 x 32 mm / 4 x 4.1 x 1.3 in			
Weight	0.18 kg / 0.39 lbs			
Ingress Protection	IP22			
Certificates	CE compliant, RoHS compliant			
Warranty	5 years			

*CXNup2B features dual battery bank charging. Battery voltages must be the same.