



Vaasan yliopisto  
UNIVERSITY OF VAASA

Aaron Nevalainen

# **Hybridi-invertteri pienessä aurinkopaneelijärjestelmässä**

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö  
Kandidaatin tutkinto  
Sähkö- ja energiatekniikka

Vaasa 2025

---

**VAASAN YLIOPISTO****Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

<b>Tekijä:</b>	Aaron Nevalainen		
<b>Tutkielman nimi:</b>	Hybridi-invertteri pienessä aurinkopaneelijärjestelmässä		
<b>Tutkinto:</b>	Tekniikan kandidaatti		
<b>Oppiaine:</b>	Sähkö- ja energiatekniikka		
<b>Työn ohjaaja:</b>	Kimmo Kauhaniemi		
<b>Valmistumisvuosi:</b>	2025	<b>Sivumäärä:</b>	29

---

**TIIVISTELMÄ:**

Kasvava energiantarve ja kuluttajien halu lisätä energiaomavaraisuutta ovat merkittävästi lisänneet aurinkopaneelijärjestelmien suosiota. Aurinkopaneelijärjestelmille on tarjolla monenlaisia ratkaisuja, jotka vaativat erilaista teknologiaa optimaalisen hyödyn saavuttamiseksi käyttökohteen tarpeiden mukaisesti. Perinteiset invertteriratkaisut eivät mahdollista energian varastointia ja sähkön syöttöä sähkökatkon aikana.

Tämän tutkielman tavoitteena on tutkia hybridi-invertterin tuomia mahdollisuuksia pieneen aurinkopaneelijärjestelmään. Tutkielmassa käydään läpi yksivaiheisen invertterin toiminta, jolla luodaan teoriapohja hybridi-invertterille. Lisäksi tarkastellaan, miten invertteri muuntaa tasasähköstä vaihtosähköä. Yksivaiheisesta invertteristä käydään pulssinleveysmodulaatio ja lisäksi kerrotaan mitä ominaispiirteitä liittyy aurinkopaneelijärjestelmässä oleviin inverttereihin.

Tutkielmassa käydään läpi hybridi-invertteri piirikaavion avulla, jotta sitä voidaan verrata perinteiseen invertteriratkaisuun. Lisäksi käsitellään läpi hybridi-inverttereihin liittyvät teknologiat ja hallintamallit, kuten lataussäädin, kriittisten kuormien hallinta, hybridi-invertterien tilat ja akkujen hallinta.

Hybridi-invertterit mahdollistavat akkujen integroinnin aurinkopaneelijärjestelmään, mikä lisää joustavuutta energiankäytössä. Hybridi-invertterit voivat toimia sekä verkkoon kytkettyinä (on-grid) että siitä riippumattomina (off-grid). Ne tukevat myös useita integroitavia teknologioita, kuten lataussäätimiä ja kriittisten kuormien hallintaa, mikä tekee niistä monipuolisia ja tehokkaita ratkaisuja erilaisiin käyttötarkoituksiin.

Tutkielman lopuksi analysoidaan hybridi-invertterin ja perinteisten inverttereiden välisiä etuja ja rajoitteita. Vaikka hybridi-invertterit tarjoavat monipuolisemmat toiminnallisuudet ja mahdollistavat paremman energiaomavaraisuuden, niiden korkea alkuinvestointi ja akuille vaadittava tila voi rajoittaa niiden hankintaa. Tulevaisuudessa hybridi-invertterit voivat kuitenkin olla keskeinen osa rakennusten täydellistä energiaomavaraisuutta.

---

**AVAINSANAT:** Invertteri, Hybridi-invertteri, On-grid, Off-grid, Aurinkopaneelijärjestelmä

## Sisällys

1	Johdanto	5
2	Invertterin toimintaperiaate	6
2.1	H-silta-invertteri	6
2.2	Tasasähköstä vaihtosähköä	7
2.3	Pulssinleveysmodulaatio	9
2.4	PV-invertteri	11
2.5	MPPT-säädin	12
3	Hybridi-invertteri	13
3.1	Hybridi-invertterin tilat	14
3.2	Akkujen hallinta hybridi-invertterillä	15
3.3	Lataussäädin	16
4	Aurinkopaneelijärjestelmä hybridi-invertterillä	18
4.1	On-grid-järjestelmä	18
4.2	Off-grid-järjestelmä	20
5	Vertailua	23
6	Pohdinta	25
7	Johtopäätökset	26
8	Yhteenveto	27
	Lähteet	28

## Kuvat

Kuva 1. Aurinkosähköllä toimiva FB-invertteri. (Teodorescu ja muut, 2011, s.7).	7
Kuva 2. Positiivinen virta (a) ja negatiivinen virta (b) (Teodorescu ja muut, 2011, s.7).	8
Kuva 3. Invertterin muodostama jänniteaalto. (Chiras, 2016, s.257)	9
Kuva 4. Kantasignaali pohjainen PWM. (Rashind, 2024, s.298)	10
Kuva 5. Maksimitehopisteen määrittämisen kuvaaja. (Chiras, 2016, s.270)	12
Kuva 6. Esimerkki akullisen aurinkopaneelijärjestelmän piirikaaviosta. (Afshari, 2022) 14	14
Kuva 7. Akun lataamisen vaiheet lataussäätimellä. (Chiras, 2016, s.348)	17
Kuva 8. Esimerkki akullisesta On-grid-järjestelmästä (Chiras, 2016, s.226)	19
Kuva 9. Esimerkki akullisesta Off-grid-järjestelmästä. (Chiras, 2016, s.234)	21

## Taulukot

Taulukko 1. Hybridi-invertterin ja perinteisen invertterin vertailu.	23
--	----

## Symbolit

$C_{PV}$	Invertterin kondensaattori
$D$	Diodi
$I$	Virta
$L$	Käämi
$Q$	Kytkin diodilla
$S$	Kytkin
$v_{\Delta}$	Kolmioaalto signaali
$v_c$	Modulaatio signaali
$V_g$	Verkon jännite
$V_{PV}$	Aurinkopaneelin lähdejännite

## 1 Johdanto

Kiinnostus kiinteistöjen energiaomavaraisuuteen on kasvanut ja aurinkoenergian hyödyntäminen on noussut keskeiseksi osaksi energian tuotantoa. Ilmastonmuutoksen torjunta ja energiakustannusten nousut ovat johtaneet aurinkopaneelien hyödyntämistä energiansaannin turvaamiseksi. Tämä on johtanut aurinkopaneelijärjestelmien, erityisesti pienten aurinkopaneelijärjestelmien, yleistymiseen.

Vaihtosuuntaajat eli invertterit ovat olennainen osa aurinkopaneelijärjestelmissä, jotta niillä tuotettu energia saadaan hyödynnettyä. Erityisesti hybridi-invertterit ovat nousseet keskeiseksi osaksi pienissä aurinkopaneelijärjestelmissä niiden tuomien monipuolisten mahdollisuuksien ansiosta. Hybridi-invertteri yhdistää aurinkopaneelijärjestelmien tuotetun energian muuntamisen oikeaksi, energian varastoinnin hallinnan ja energian jakelun sähköverkkoon. Lisäksi invertteri mahdollistaa järjestelmän kytkemiseen yleiseen sähköverkkoon tai olla siitä irrotettuna. Tämä lisää niiden soveltuvuutta eri käyttötarpeisiin.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on tutkia hybridi-invertterin osuutta pienessä aurinkopaneelijärjestelmässä ja sen tuomia mahdollisuuksia ja teknologioita tähän järjestelmään, perustuen kirjallisuuskatsaukseen. Tutkielmassa käydään ensin läpi invertterin toimintaperiaate perustuen kirjallisuuteen. Tämän luvun tavoitteena on muodostaa teoriapohja inverttereille. Kolmannessa luvussa käydään läpi mitä teknologioita hybridi-invertteri voi tuoda järjestelmään. Neljännessä luvussa käydään läpi hybridi-invertterillä olevia esimerkkiratkaisuja. Luvun tavoitteena on kertoa mikä on kunkin aurinkopaneelijärjestelmän komponentin rooli, mutta keskittyä invertterin vaikutusta kuhunkin osaan. Viidennessä luvussa verrataan hybridi-invertteriä perinteiseen invertteriratkaisuun, ja näiden tuomia mahdollisuuksia ja teknologioita pieneen aurinkopaneelijärjestelmään. Kuudennessa luvussa käydään läpi tämän tutkielman tulosten pohdintaa, seitsemännessä johtopäätökset ja kahdeksannessa yhteenveto.

## 2 Invertterin toimintaperiaate

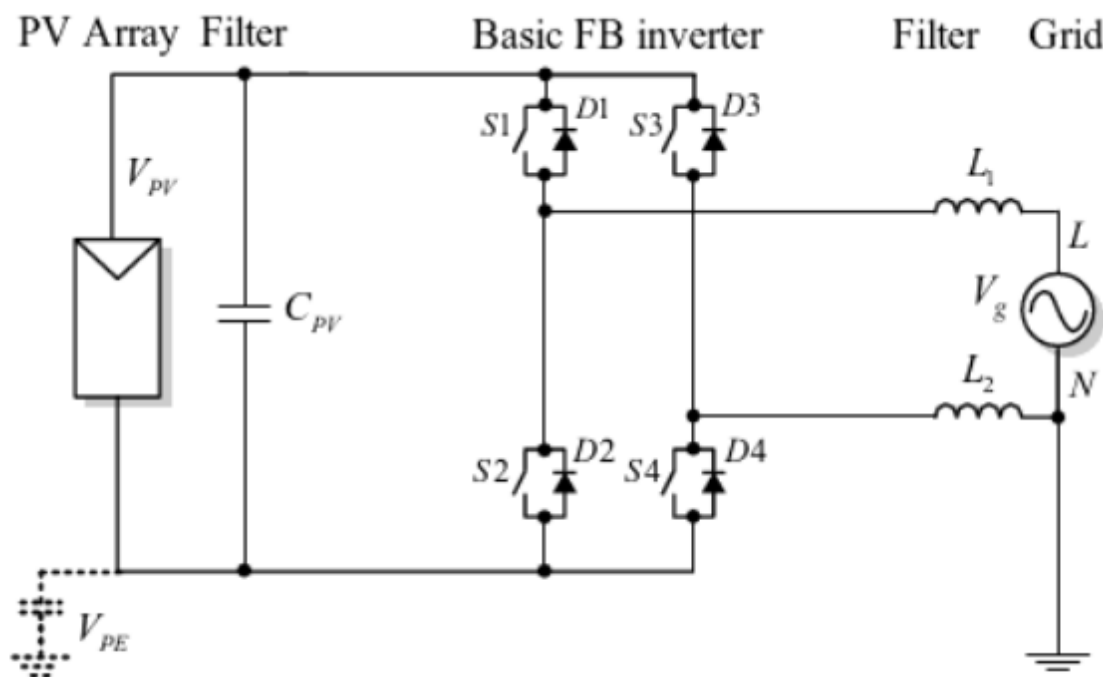
Invertteri eli vaihtosuuntaaja on tehoelektroniikan komponentti, joka muuntaa tasajännitteestä vaihtojännitettä halutulle taajuudelle (Hietalahti, 2011, luku 7). Samalla invertteri muuntaa tasavirran (DC) vaihtovirraksi (AC). Aurinkopaneelit tuottavat tasajännitettä, mutta sähköverkko ja useimmat sähkölaitteet käyttävät vaihtosähköä. Invertteri on komponentti energialähteen ja verkon välillä, joka voidaan kytkeä kolmivaihe- tai yksivaihejärjestelmää. Tässä tutkielmassa tarkastellaan yksivaihejärjestelmää, sillä kyseessä on pieni aurinkopaneelijärjestelmä. Kolmivaihejärjestelmää voidaan käyttää suuremmissa järjestelmissä, kuten aurinkopaneelivoimaloissa.

Rashidin (2024, s.293–295) mukaan aurinkopaneelit tuottavat tasajännitettä, joten tutkielmassa käydään läpi jännitelähde-invertterin eli VSI:n (engl. voltage source inverter) toimintaperiaate. Jännitteen ja virran muuntamisen lisäksi invertterillä voidaan määrittää verkolle magnitudi, taajuus ja aaltovaihe. VSI on laajimmin käytetty invertteri teollisuudessa. Tässä luvussa käsitellään H-silta-invertterin toimintaperiaatetta. Aurinkosähköjärjestelmien inverttereiden toiminta perustuu tähän, mutta on muitakin ratkaisuja.

### 2.1 H-silta-invertteri

Teodorescu ja muut (2011, luku 2) toteavat, H-silta-invertteri eli kokosiltainvertteri FB (engl. full-bridge). FB-invertteri on monipuolinen invertteriratkaisu, jota käytetään aurinkosähkön eli PV:n (engl. photovoltaic) muuntamiseen. Sillä pystytään muuttamaan DC-AC ja DC-DC. Kuvassa 1 on FB-invertteri aurinkosähköjärjestelmässä. Kuvassa 1 PV Array kuvaa aurinkoenergian tuottamaa jännitelähdettä. Kondensaattori  $C_{PV}$  toimii invertterin tasajännitteen suodattimena (Jokinen, 2011, s.31). Hänen mukaansa suodatin auttaa rippelin ja aaltoisuuden pienentämisessä. Rippeli tarkoittaa jännitteessä tai virrassa syntynyttä epäideaalista jännitettä tai virtaa. Aaltoisuus on tasavirrassa tai

tasajännitteessä esiintyvää ei haluttua vaihtelua. Kelat  $L_1$  ja  $L_2$  toimivat invertterin vaihtovirran ja vaihto jännitteen suodattimena. Kuvan 1 Grid on järjestelmän verkko, mihin virta syötetään. Invertterillä on neljä kytkintä, jolla saadaan muutettua tasavirrasta vaihtovirtaa. Kytkimet koostuvat varsinaisesta kytkimestä ja diodista, mikä luo nopeita muutoksia tasaisten muutoksien sijaan (Rashid, 2024, s.293). Diodit auttavat kytkentäpiikkien pois johtamisesta tärkeistä komponenteista, joka auttaa invertteriä toimimaan luotettavasti.

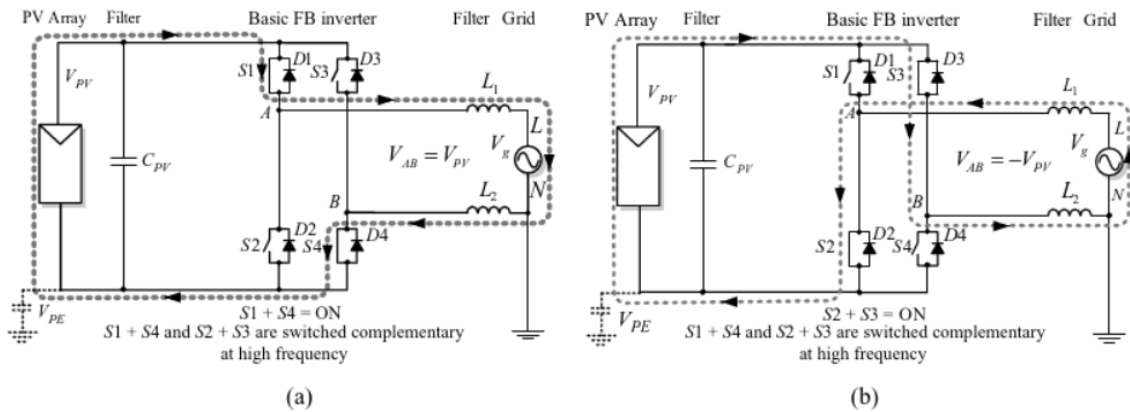


**Kuva 1.** Aurinkosähköllä toimiva FB-invertteri. (Teodorescu ja muut, 2011, s.7).

## 2.2 Tasasähköstä vaihtosähköä

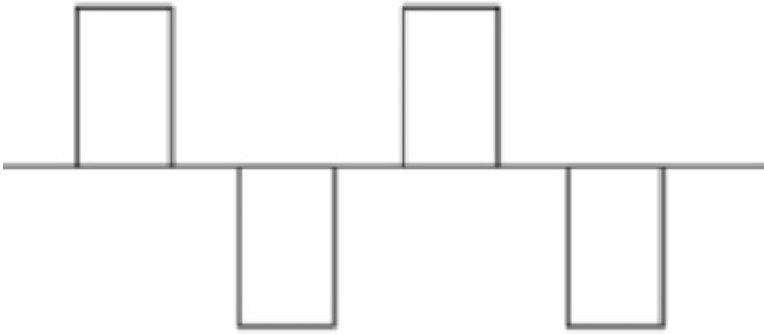
Vaihtovirta tarkoittaa nimensä mukaisesti virran suunnan vaihtelua. Aurinkopaneelit tuottavat tasajännitettä, joka täytyy syöttää sähköverkkoon vaihtojännitteenä. Teodorescun ja muiden (2011, luku 2) mukaan invertterin toimintaperiaate perustuu neljän kytkimen toimintaan. Kuvan 2 kytkimet  $S_1$  ja  $S_4$  toimivat synkronoidusti, ja kytkimet  $S_2$  ja  $S_3$  toimivat synkronoidusti. Kuvan 2 a-kohdassa kytkimet  $S_1$  ja  $S_4$  ovat

kiinni, jolloin virta kulkee positiiviseen suuntaan potentiaalipisteiden A ja B välillä. Tällöin jännitelähteen jännite  $V_{PV}$  on samansuuntainen kuorman jännitteen  $V_{AB}$  kanssa, eli  $V_{AB} = V_{PV}$ . Kuvan 2 b-kohdassa kytkimet S2 ja S3 ovat kiinni, toisin kuin kohdassa a virta kulkee negatiiviseen suuntaan potentiaalipisteiden A ja B välillä. Tällöin jännitelähteen jännite  $V_{PV}$  on vastakkaisuuntainen kuorman jännitteen  $V_{AB}$  kanssa eli  $V_{AB} = -V_{PV}$ .



**Kuva 2.** Positiivinen virta (a) ja negatiivinen virta (b) (Teodorescu ja muut, 2011, s.7).

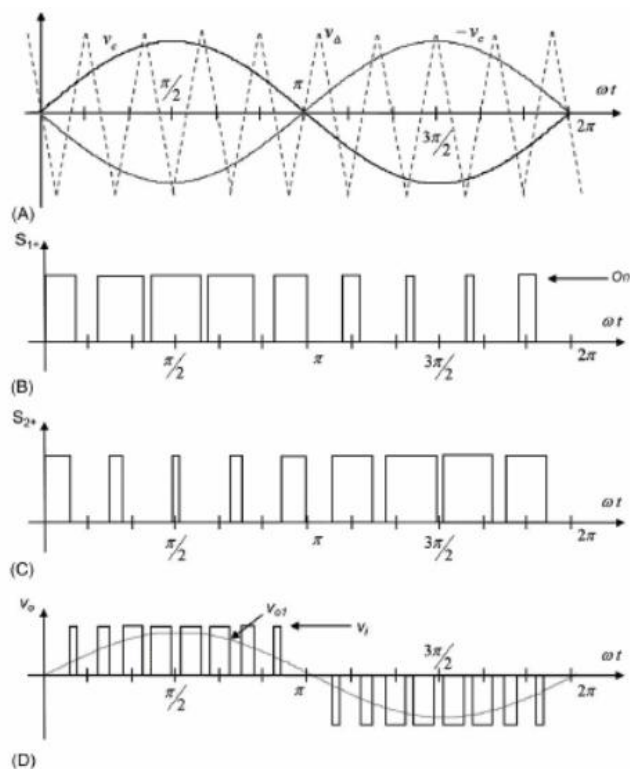
Kuva 3 esittää invertterin muodostamaa jänniteaaltoa. Kuvan 3 positiivinen osa on kuvan 2  $V_{AB}$ . Kuvassa 3 positiivinen osa on kuvan 2 a-kohta, jossa kytkimet S1 ja S4 ovat kytkettynä kiinni. Kun nämä kytkimet ovat kiinni, verkkoon syötetään positiivista virtaa, ja jännite  $V_{AB}$  on positiivinen. Kuvaajan negatiivinen osa on kuvan 2 b-kohta, kun kytkimet S2 ja S3 ovat kiinni ja tällöin verkkoon syötetään negatiivista virtaa, ja jännite on  $-V_{AB}$ . Kun kaikki kytkimet ovat auki niin kuvaajan jännite on nolla ja verkkoon ei kulje virtaa. Näin invertteri muodostaa kanttiaaltoa. Jotta verkkoon saataisiin mahdollisimman hyvä siniaalto, invertterin kytkimille pitää tehdä pulssinleveysmodulaatiota eli PWM (engl. pulse width modulation).



**Kuva 3.** Invertterin muodostama jänniteaalto. (Chiras, 2016, s.257)

### 2.3 Pulssinleveysmodulaatio

PWM tarkoittaa invertterien kytkinten jaksottamista siten, että jännitteestä ja virrasta saadaan mahdollisimman hyvää siniaaltoa. Rashidin (2024, s.297–298) mukaan siniaaltoa muodostetaan, kun invertterin kytkimiä jaksotetaan oikealla tavalla. PWM voidaan tehdä eri tavoin, yleisin menetelmä on kanta-aaltosignaaliin perustuva PWM (engl. carrier-based PWM). Tässä PWM-tyylissä invertterin kytkimet toimivat modulaatiosignaalin  $v_c$  vertaamalla sitä kolmioaaltomuotoon  $v_\Delta$ . Tässä  $v_c$  on haluttu vaihtojännite ja  $v_\Delta$  on kantajasignaali. Näiden signaalien avulla invertteri kytkee kytkimensä päälle ja pois oikeaan aikaan ja oikeaksi ajaksi, mikä muodostaa siniaallon.



**Kuva 4.** Kantasignaali-pohjainen PWM. (Rashind, 2024, s.298)

Kuvassa 4 on havainnollistettu PWM, jossa  $v_i$  on aurinkopaneeleiden tasajännitettä ja  $v_{o1}$  on haluttua siniaalto vaihtojännitettä. Kuvan 4 A-kuvaajassa on kaksi modulaatiosignaalia  $v_c$  ja  $-v_c$ , jotka ovat samansuuruiset ja taajuiset, mutta 180 asteen vaihe-erossa (Namboodiri, A & Wani, H, 2014 s.3). Heidän mukaansa modulaatiosignaali tuottaa kaksi ohjaussignaalia, jotka hallitsevat kytkinten toimintaa. Kuvan 4 B-kuvaaja esittää porttisignaaliilla saatua positiivista jännitettä ja C-kuvaaja negatiivista jännitettä. Kuvan 4 D-kuvaajassa tasajännitteestä on saatu vaihtojännitettä. Positiivinen jännite kuvassa 4 vastaa kuvan 2 a-kohta, jolloin kytkimet  $S_1$  ja  $S_4$  ovat kiinni. Kuvassa 4 nähdään, että kytkimet ovat kiinni ensin lyhyemmän aikaan, ja siniaallon amplitudissa ovat kiinni pisimmän aikaan. Sama toistuu, kun kuvan 2 kytkimet  $S_2$  ja  $S_3$  ovat kiinni, nyt jännite on negatiivinen. Invertterillä voidaan määrittää vaihtosähköpuolen taajuus. Taajuus määritellään, siten että kuinka monta kertaa jakso tapahtuu sekunnissa.

## 2.4 PV-invertteri

PV-invertteri toimii FB-inverttin periaatteella, mutta sillä on muutama erityispiirre, jotka tulee ottaa huomioon. Rashidin (2024, s.296–297) mukaan turvallisuussyistä PV-järjestelmissä aurinkosähkön jännitelähteen ja sähköverkon välillä tulisi olla galvaaninen eristys, joka toteutetaan muuntajalla. Pienissä aurinkopaneelijärjestelmissä käytetään korkeataajuista muuntajaa, joka sijoitetaan tasasähköpuolella. Tämä on halvempi ja pienempi ratkaisu verrattuna matalataajuisille muuntajille, mutta hyötysuhde ei ole yhtä hyvä.

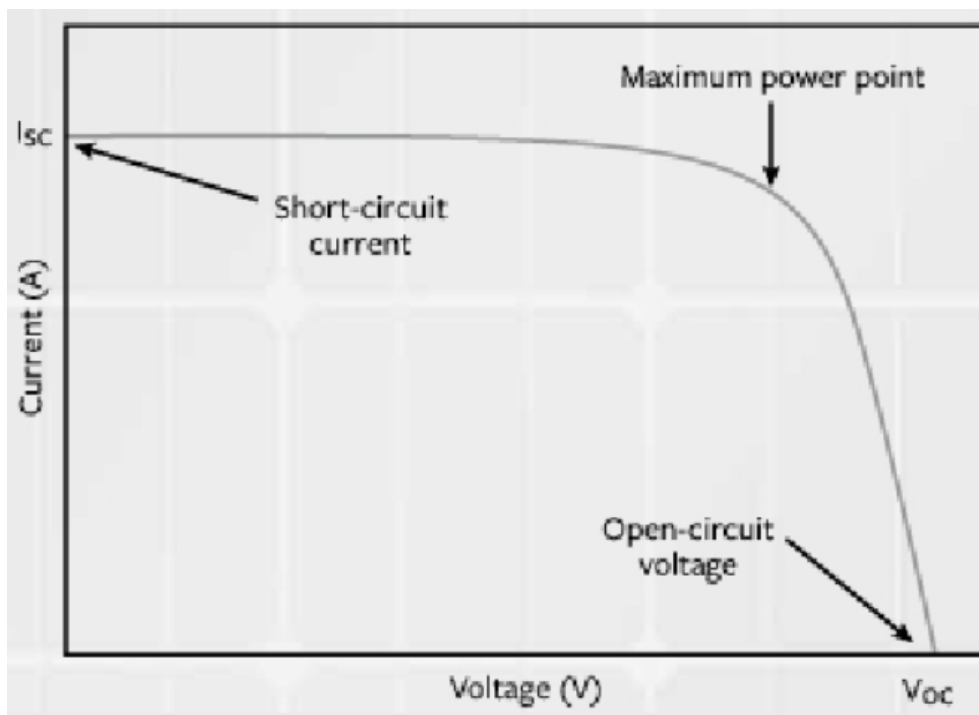
Teudorescun (2011, s.28) mukaan, PV-inverttereiden ominaisuuksia ovat:

- Maksimitehopisteen seuranta eli MPPT (engl. Maximum Power Point Tracking)
- saarekkeisuuden esto
- verkon seuranta
- paneelien seuranta.

MPPT-säätimillä saavutetaan maksimaalinen hyöty kaikissa olosuhteissa. Teudorescun toteaa, että PV-invertterillä on korkea MPPT-hyötysuhde tasaisessa tilassa, joka on yleisesti yli 99 %. MPPT mahdollistaa nopean reagoinnin säteilymuutosten aikana eli mukautuu nopeasti vaihtuviin valaistusolosuhteisiin. Tätä kutsutaan dynaamiseksi MPPT-hyötysuhteeksi. Saarekkeisuuden esto on turvallisuustoiminto, joka verkkoyhteyden katketessa estää järjestelmää jatkamasta energian syöttämistä sähköverkkoon (O'Brien 2024). Aurinkojärjestelmän tuottama sähkö pitää olla oikean taajuista ja jännitteistä. Verkon seuranta varmistaa, että aurinkosähkøjärjestelmän jännite pysyy määritellyissä rajoissa ja että verkon taajuus on oikea (Teudorescu, 2011, s.28). Se myös valvoo, että syötetty energia on synkroniassa verkon kanssa. Verkon seuranta auttaa saareketoiminnan ehkäisyssä. Paneelien seurannalla voidaan havaita paneelien varjostumista, sekä saada tietoa aurinkopaneeliryhmän toiminnasta.

## 2.5 MPPT-säädin

Xiaon (2017, s.249–250) mukaan tasaisessa aurinkosäteilyn ja paneelien lämpötilassa on olemassa jännitteen ja virran yhdistelmä, joka johtaa suurimpaan mahdolliseen tehoon. Tätä kutsutaan maksitehopisteeksi. Kuvassa 5 on esitetty maksimitehopisteen määrittäminen. MPPT-säädin voi olla erillinen komponentti tai integroituna invertteriin. MPPT-säätimen avulla invertteri saa optimoitua paneelien toimintaa, jolloin aurinkopaneelijärjestelmästä saadaan parempi hyötysuhde. MPPT-säädin seuraa jatkuvasti aurinkopaneelien jännitettä ja virtaa varmistaakseen, että saadaan maksimiteho sääolosuhteista riippumatta. Inverttereissä DC-DC muunninta käytetään MPPT:hen (Chiang ja muut 1998). Aurinkopaneelien tuottavuuteen vaikuttavat varjoisuus, säteilyteho ja lämpötila. Rashidin (2024, s.784) mukaan MPPT-säätimillä tulee olla alhainen hinta ja hyvä muuntosuhde. Lisäksi säätimen pitää olla yhteensopiva akun lataustarpeisiin ulostulo rajapinnan kanssa. Vuosittain MPPT voi kasvattaa jopa 15 % aurinkopaneelijärjestelmän vuosittaista tehontuottoa (Chiras, 2016, s.274).



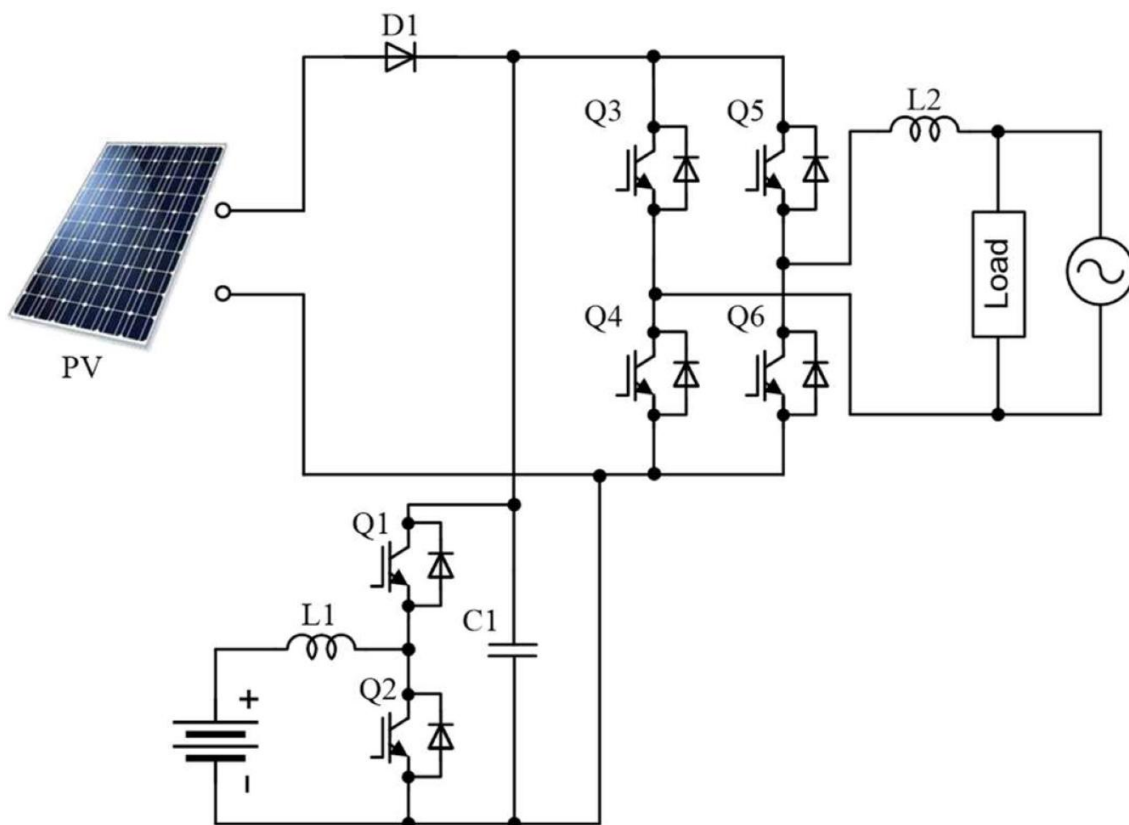
Kuva 5. Maksimitehopisteen määrittämisen kuvaaja. (Chiras, 2016, s.270)

### 3 Hybridi-invertteri

Tässä luvussa käsitellään hybridi-invertteriin liittyviä teknologioita. Hybridi-invertterin invertteriosa toimii samalla periaatteella kuin edellisessä luvussa käsitelty invertteri, mutta siihen on usein integroitu lataussäädin sekä kriittisten kuormien hallintajärjestelmä (Robert, 2023). Milenov ja Zarkov (2023) toteavat, että hybridi-invertteri mahdollistaa useamman energialähteen kytkemisen aurinkopaneelijärjestelmään, kuten akun. Tämä mahdollistaa järjestelmän olemaan sähköverkosta irti eli off-grid, jolloin järjestelmä on täysin omavarainen. Rashidin (2024, s.800) mukaan off-grid-järjestelmät vaativat akun, jotta järjestelmä pystyy toimimaan, kun auringon valoa ei ole. Hybridi-invertteri-järjestelmä voi olla myös yleiseen sähköverkkoon kytketty järjestelmä (on-grid), jolloin järjestelmä hyödyntää aurinkopaneeleita ja yleistä sähköverkkoa.

Mainan (2024) mukaan hybridi-invertteri on älykäs invertteriratkaisu, joka mahdollistaa monipuolisen energianhallinnan. Hän toteaa, että jos perinteiseen aurinkopaneelijärjestelmään kytkettäisiin akku, järjestelmä vaatisi kaksi invertteriä. Toinen invertteri muuntaisi aurinkopaneeleista tuotetun tasasähkön vaihtosähköksi, ja toinen muuntaisi akusta syötetyn tasasähkön vaihtosähköksi. Hybridi-invertteri yhdistää akkuinvertterin ja aurinkopaneeli-invertterin yhdeksi kokonaisuudeksi.

Kuvan 6 aurinkopaneelijärjestelmä muistuttaa kuvan 1 piirikaaviota, mutta siihen on lisätty kytkimet Q1 ja Q2 ja akku. Q1- ja Q2- kytkimet ovat DC-DC muunnin, joka on kytketty akkuun ja hallitsee akun lataamista sekä akussa olevan jännitteen syöttämistä invertterille. Näin DC-DC muunnin toimii tässä ratkaisussa lataussäätimenä. Akku on kytketty invertteriin, joka on kytketty kuormaan ja sähköverkkoon. Gurkaynakin ja muiden (2009) mukaan DC-DC-muunninta käytetään myös aurinkopaneelien MPPT-toimintoon.



**Kuva 6.** Esimerkki akullisen aurinkopaneelijärjestelmän piirikaaviosta. (Afshari, 2022)

### 3.1 Hybridi-invertterin tilat

Milenovin ja Zarkovin (2023) mukaan hybridi-invertteri voidaan ohjelmoida neljään eri tilaan. Ensimmäisessä tilassa se toimii tavallisen invertterin tavoin, jolloin aurinkopaneelit on kytketty yleiseen sähköverkkoon ja rakennuksen sähköverkkoon ilman akkua. Tämä ratkaisu on kalliimpi kuin tavallinen invertteri, mutta mahdollistaa akun lisäämisen myöhemmin. Toisessa tilassa hybridi-invertteri toimii hybriditilassa, jossa päivällä varastoitu energia käytetään käyttökohteen kulutukseen yöllä. Kolmannessa tilassa, valmiustilassa, varastoitu energia käytetään vain sähkökatkosten aikana. Neljännessä tilassa järjestelmä toimii täysin autonomisesti, sillä se on irrotettu yleisestä sähköverkosta.

### 3.2 Akkujen hallinta hybridi-invertterillä

Hybridi-invertterillä hallitaan aurinkopaneelijärjestelmän akkuja. Milenov ja Zarkov (2023) toteavat, että akkujen hallinnalla on merkittävä vaikutus järjestelmän hyötysuhteeseen. Yleensä hybridi-inverttereissä on useita sisäänrakennettuja hallintamalleja ja hyvällä hallintamallilla voidaan parantaa järjestelmän hyötysuhdetta. Milenovin ja Zarkovin mukaan on neljä hyvää tapaa hallita akkuja.

Ensimmäisessä hallintamallissa priorisoidaan akun lataus. On-grid-järjestelmässä akun lataus on ensimmäinen prioriteetti, toisena käyttökohteeseen syöttö ja kolmantena yleiseen sähköverkkoon syöttö. Ensimmäisen hallintatavan off-grid-järjestelmässä on sama priorisointijärjestys kuin on-grid-järjestelmässä, mutta syöttöä yleiseen sähköverkkoon ei ole. Toisessa hallintatavassa priorisoidaan verkkoon syöttäminen akkujen lataamisen sijaan. Tässä hallintatavassa tuotettua energiaa syötetään ensisijaisesti käyttökohteeseen, toisena yleiseen sähköverkkoon ja viimeisenä akkujen lataamiseen. Kolmannessa hallintatavassa priorisoidaan käyttökohteen tarpeet. Tuotettu energia syötetään ensisijaisesti käyttökohteeseen, toisena akkujen lataamiseen ja viimeisenä yleiseen sähköverkkoon. Neljännessä hallintatavassa tuotettu energia syötetään ensin akkuun ja toisena syötetään käyttökohteeseen. Tässä hallintatavassa akkuun varastoitu energia voidaan myydä yleiseen sähköverkkoon. (Milenov ja Zarkov, 2023)

Ensimmäisen hallintatavan etuna on, että sähkökatkon tai sähkön hintapiikkien aikaan saadaan energiaa akusta lähes aina. Tässä hallintatavassa hybridi-invertterin älykäs järjestelmä pystyy optimoimaan sähkön hinnan mukaan akun energiaa. Kolmannessa hallintatavassa aurinkopaneeleista tuotettu energia käytetään ensisijaisesti kulutuksen hyväksi. Tämä on hyvä hallintatapa, jos yleinen sähköverkko on luotettava ja sähkökatot harvinaisia. Ensimmäinen ja kolmas hallintatapa priorisoivat käyttökohteen etuja, kun taas toinen ja neljäs hallintatapa priorisoivat jakeluyhtiötä. Näissä hallintatavoissa on yleensä sopimus jakeluyhtiön kanssa, jolloin aurinkopaneelijärjestelmä on usein

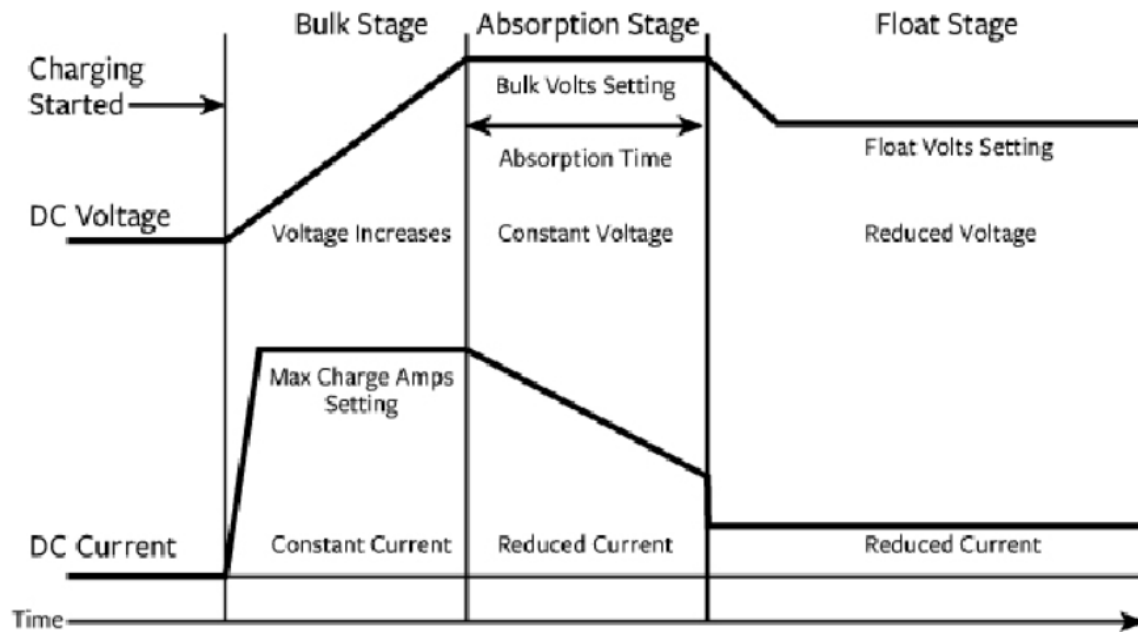
edullisempi. Neljännessä hallintatavassa akku varastoi energiaa myös jakeluyhtiön käyttöön. (Milenov ja Zarkov, 2023)

Kriittisten kuormien hallinta on hybridi-invertteriin integroitu järjestelmä, joka sähkökatkon aikana pitää kriittiset komponentit päällä (Fields, 2023). Hänen mukaansa tämä hallintamenetelmä varmistaa myös, että akkua ei kuluteta loppuun vaan jätetään kriittisille kuormille määrätty määrä energiaa. Hybridi-invertteriin voidaan määrittää kriittisiä kuormia, kuten lääkintälaitteet tai jääkaappi.

### **3.3 Lataussäädin**

Hybridi-invertteriin on usein integroitu lataussäädin ja kriittisten kuormien hallinta. Chirasin (2016, s.347–348) mukaan lataussäädin on yleensä erillinen komponentti, jolla hallitaan akkuja. Lataussäädin estää akkujen ylivarauksen ja vähentää niiden purkautumista. Lisäksi lataussäädin pidentää akkujen käyttöikää ja voidaan ohjelmoida eri akkutyyppejä varten.

Lataussäätimellä on kolme vaihetta: teholataus-, absorptio- ja ylläpitovaihe, jotka ovat esitetty kuvassa 7. Teholatausvaiheessa aurinkopaneelit tai yleinen sähköverkko lataavat korkealla virralla akkua, jolloin latausjännite nostetaan tarpeeksi korkeaksi. Tällöin akku latautuu noin 80–90 % sen maksimikapasiteetista. Absorptiovaiheessa latausjännite pidetään tasaisena ja virta laskee, jolloin akku latautuu täyteen. Ylläpitovaiheessa latausjännitettä pidetään sellaisella tasolla, että se kumoaa akusta itsestään purkautuvan energian.



**Kuva 7.** Akun lataamisen vaiheet lataussäätimellä. (Chiras, 2016, s.348)

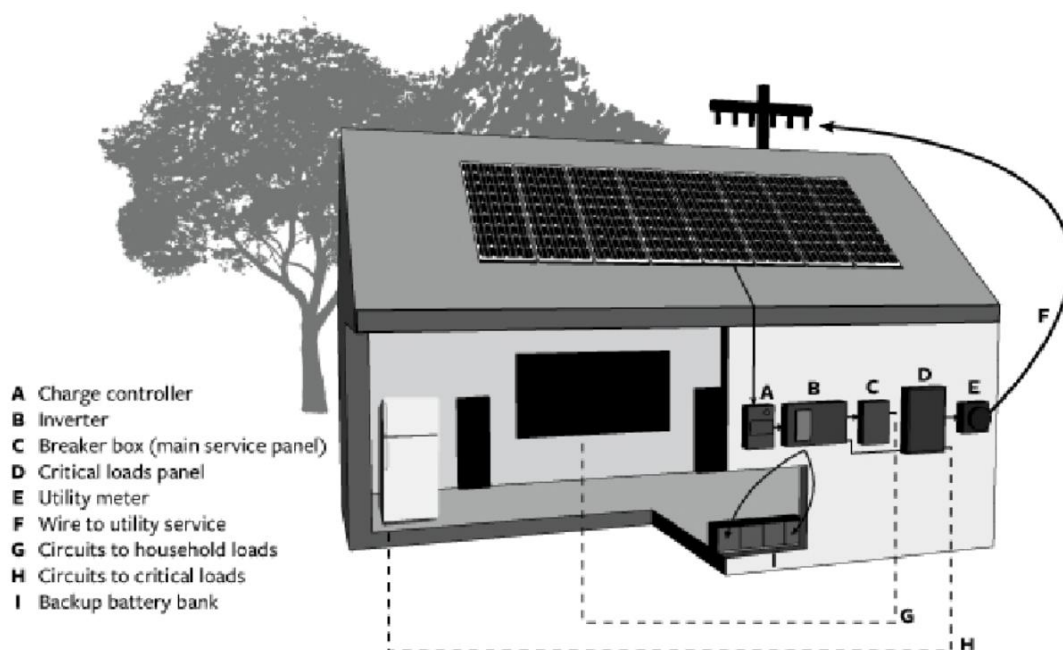
## 4 Aurinkopaneelijärjestelmä hybridi-invertterillä

Tässä luvussa tarkastellaan hybridi-invertterin tuomat mahdollisuudet pieneen aurinkopaneelijärjestelmään. Hybridi-invertteri mahdollistaa akulliset ja akuttomat on-grid- ja off-grid-järjestelmät. Tämän työn kannalta keskitytään akullisiin järjestelmiin, sillä se on hybridi-invertterin keskeisin ominaisuus. On-grid-järjestelmät eli verkkoon kytketyt järjestelmät ovat kytkettynä yleiseen sähköverkkoon. Off-grid-järjestelmä eli verkosta irti olevat järjestelmät eivät ole kytkettynä yleiseen sähköverkkoon ja ovat siten omavaraisia.

### 4.1 On-grid-järjestelmä

Chirasin (2016, s.225–226) mukaan akulliset on-grid-järjestelmät mahdollistavat jatkuvat sähkönsyötön sähkökatkon aikana, sillä tällöin voidaan hyödyntää akkuun varastoitunutta energiaa. On-grid-järjestelmä varmistaa jatkuvan sähkönsyötön yleisestä sähköverkosta, vaikka aurinkopaneelit eivät tuottaisi ja akku olisi tyhjä. Kuvassa 8 on esitetty esimerkki akullisesta on-grid-järjestelmästä.

Kuvan 8 aurinkopaneelijärjestelmässä aurinkopaneelit ovat kytketty lataussäätimen kautta invertteriin. Invertteristä on kytkentä sulaketauluun, akkuun ja kriittisten kuormien sähkökeskukseen. Kriittisten kuormien sähkökeskus on tarkoitettu käyttökohteen tärkeimpien sähkökomponentteja. Tästä järjestelmä on kytketty sähkömittarin kautta yleiseen sähköverkkoon. Kuten alaluvussa 3.3 todettiin, hybridi-invertterin ansiosta lataussäädin ja kriittisten kuormien hallinta ovat usein integroitu hybridi-invertteriin, jolloin se olisi vain yksi kokonaisuus.



**Kuva 8.** Esimerkki akullisesta On-grid-järjestelmästä (Chiras, 2016, s.226)

Chirasin (2016, s.226–227) mukaan akullisen On-grid-järjestelmän akut ovat yleensä joko avoimia lyijyakkuja tai suljettuja lyijyakkuja. Tällaisen järjestelmän akut ovat yleensä huomattavasti pienempiä kuin Off-grid-järjestelmien akut. Akut ovat yleensä suunniteltu syöttämään sähköä kriittisille komponenteille sähkökatkon aikana.

Nykyään on myös yleistynyt, että akkua hyödynnetään myös, kun aurinkopaneelien tuotto ei täytä käyttökohteen vaatimuksia (Milenov ja Zarkov, 2023). Kuten alaluvussa 3.2 todettiin, hybridi-invertteri on mahdollista ohjelmoida käyttökohteen tarpeita varten. Vaikka akkuja hyödynnettäisiin silloin, kun aurinkopaneelit eivät tuota riittävästi sähköä käyttökohteelle, on tärkeää ohjelmoida hybridi-invertteri siten, että akkuun jää energiaa kriittisille komponenteille sähkökatkon varalta.

Chirasin (2016, s.227–229) toteaa, että kun käyttökohteen energian tarve täyttyy ja akkujärjestelmä on ladattu täyteen, ylimääräinen energia syötetään yleiseen sähköverkkoon. Chirasin mukaan on-grid-järjestelmissä akkujärjestelmää ei tarvitse tarkkailla yhtä paljoa kuin off-grid-järjestelmissä. Akullisissa järjestelmissä akkujen

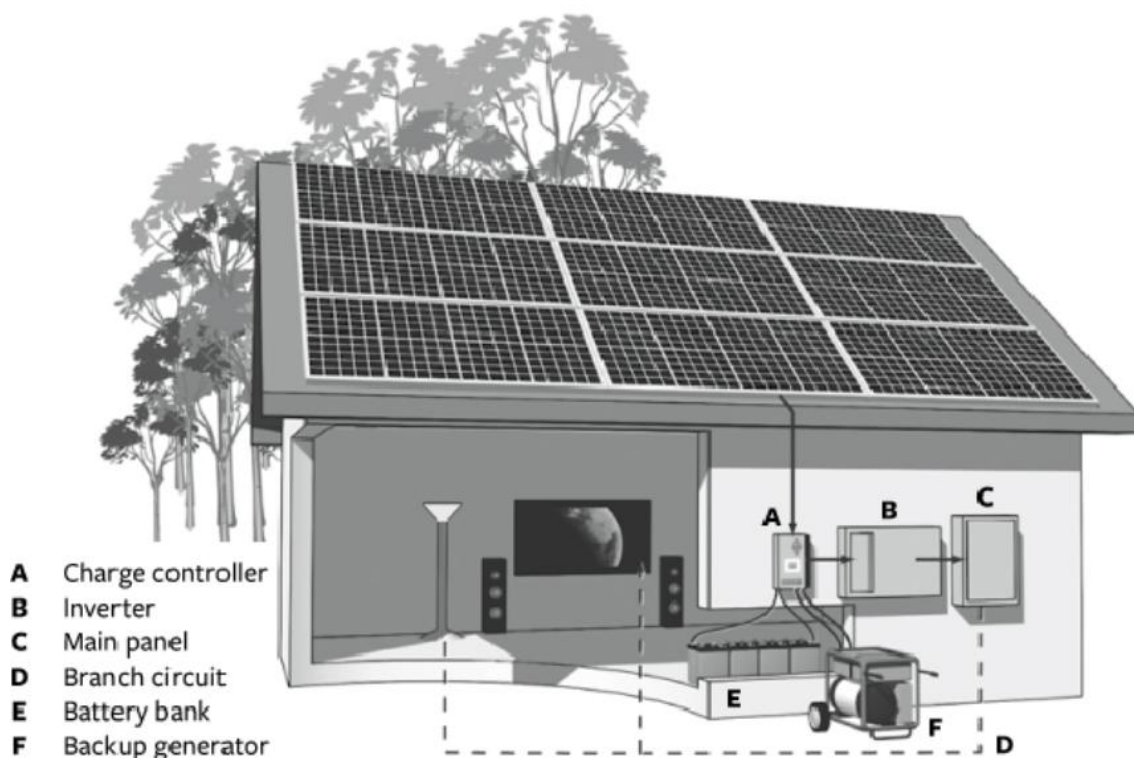
purkautuminen vahingoittaa niiden käyttöikä. Tätä pyritään estämään alijännitesuojalla, joka katkaisee sähkön yötön, kun akun jännite laskee liian alhaiseksi.

Chirasin (2016, s.230–232) mukaan, vaikka akullinen on-grid-järjestelmä on houkutteleva ratkaisu niin järjestelmä on noin 30 % kalliimpi kuin akuton on-grid-järjestelmä. Hintaa nostaa itsessään akku, jonka hinta vaihtelee paljon akun koon mukaan, ja hybridi-invertteri, joka on kalliimpi sen ominaisuuksiensa vuoksi. Akku on kuluva komponentti, joten sitä täytyy huoltaa säännöllisesti ja lopulta uusia 5–10 vuoden välein. Akku on säilytettävä hyvin ilmastoidussa tilassa, joka pysyy lämpimänä talvisin ja viileänä kesäisin. Nämä myös lisäävät hintaa järjestelmälle, jos käyttökohteessa ei ole tällaista tilaa valmiina. Koska akut purkavat jatkuvasti energiaa, vaikka niitä ei aktiivisesti käytettäisi, osa aurinkopaneelien tuottamasta energiasta kuluu akkujen lataamiseen. Jos yleinen sähköverkko on luotettava ja sähkökatkoset eivät ole yleisiä, niin akullisen on-grid-järjestelmän hankkiminen ei ole välttämättä kannattavaa.

## 4.2 Off-grid-järjestelmä

Chirasin (2016, s.230–232) mukaan off-grid-järjestelmät ovat irti yleisestä sähköverkosta ja toimivat joko täysin aurinkoenergialla tai aurinkoenergialla ja erillisellä generaattorilla. Generaattorilla varmistetaan, että käyttökohteeseen saadaan syötettyä sähköä, kun aurinkopaneelit eivät tuota ja akun on tyhjä. Akulliset on-grid-järjestelmät muistuttavat akullista off-grid-järjestelmää, mutta niiden suurin ero on yleisen sähköverkon puuttuminen.

Kuvassa 9 on esimerkki akullisesta on-grid-järjestelmästä. Kuvan 9 järjestelmässä aurinkopaneelit ovat kytketty lataussäätimen kautta invertteriin, akkuun ja generaattoriin. Invertteri on kytketty sulaketauluun. Alaluvussa 3.4 todettiin että hybridi-invertteriin voidaan integroida lataussäädin, jolloin kuvan 9 invertteri ja lataussäädin olisivat yksi komponentti.



**Kuva 9.** Esimerkki akullisesta Off-grid-järjestelmästä. (Chiras, 2016, s.234)

Chirasin (2016, s.233–237) mukaan off-grid-järjestelmät nojautuvat aurinkopaneelien tuottamaan energiaan, enemmän kuin on-grid-järjestelmissä. Tämän vuoksi off-grid-järjestelmä vaatii myös suuremman akun. Järjestelmän generaattori toimii varaenergian lähteenä, jota käytetään tarvittaessa ensisijaisesti kriittisten komponenttien käyttöön. Off-grid-järjestelmät vaativat, että lataussäätimet yhdessä alijännitesuojien avulla suojaavat akkua yllilataukselta. Lataussäätimet estävät, että akun virta ei pääse takaisin aurinkopaneelisiin. On-grid-järjestelmät monimutkaisempi järjestelmä kuin off-grid-järjestelmä ja vaativat tarkempaa suunnittelua ja huoltoa.

Chirasin (2016, s.240–242) toteaa, että off-grid-järjestelmä mahdollistaa käyttökohteen energiaomavaraisuuteen. Nämä järjestelmät kestävät vuosia, eikä sähkökatkot tai energiahinnan nousu eivät enää vaikuta omistajaan. Energiaomavaraisuus on kallis alkuinvestointi, sillä järjestelmä vaatii suuren kapasiteetin akun ja laadukkaan generaattorin. Nämä lisäävät kustannuksia 50–60 % tai jopa enemmän verrattuna

akuttomiin aurinkopaneelijärjestelmiin. Säänkestävän ja ilmastoidun tilan lisäksi suuri akku ja generaattori on eristettävä niiden tuottaman melun takia. Nämä myös vievät enemmän tilaa kuin on-grid-järjestelmän akut. Off-grid-järjestelmä voi olla jopa halvempi, mitä on-grid-järjestelmä, jos kyseinen rakennus on kaukana yleisestä sähköverkosta. Tällöin yleisen sähköverkon rakentaminen kustantaisi liikaa. Joissakin tilanteissa, milloin off-grid-järjestelmä on lähes pakollinen, kuten saarella oleva rakennus. Tällöin on liian kallista järjestelmän liittäminen yleiseen sähköverkkoon. Off-grid-järjestelmä myös rajoittaa suurten energiakuluttajakomponenttien hankintaa, kuten vedenlämmittimen.

## 5 Vertailua

Tässä luvussa verrataan hybridi-invertteriä perinteisiin invertteriratkaisuihin, ja niiden tuomiin teknologioihin. Näitä käydään jo tutkielmassa käsiteltyihin teknologioihin ja mahdollisuuksiin. Perinteisellä invertterillä tarkoitetaan tässä tutkielmassa ketju- tai mikroinvertteriä ilman lataussäädintä. Yagobin ja muiden (2021) mukaan ketju-invertteri on ratkaisu, jossa aurinkopaneelit on kytketty sarjaan. Heidän mukaansa mikroinvertteri tarkoittaa, että jokaisella aurinkopaneelilla tai aurinkopaneeli moduulilla on oma invertterinsä. Hybridi-invertterit ovat yleensä kytkettynä ketjuun.

Kuten luvussa 3 on todettu, hybridi-invertteriin on yhdistetty monia teknologioita. Taulukossa 1 on esitetty, mitä ominaisuuksia hybridi-invertteri ja perinteinen invertteriratkaisut mahdollistavat aurinkopaneelijärjestelmälle. Kuten Maina (2024) oli todennut, että on mahdollista perinteisillä inverttereillä yhdistää akku järjestelmään, mutta tämä vaatisi toisen invertterin ja erillisen lataussäätimen. Usein perinteisellä invertteriratkaisulla saadaan aurinkopaneelien tuottama sähkö käytettyä sitä tarvittaessa ja ylimääräinen sähkö voidaan syöttää yleiseen sähköverkkoon.

**Taulukko 1.** Hybridi-invertterin ja perinteisen invertterin vertailu.

Ominaisuus	Hybridi-invertteri	Perinteinen invertteri
Akullinen järjestelmä	On	Ei ole
Integroitu lataussäädin	On	Ei ole
MPPT-teknologia	On	On
Yleiseen verkkoon syöttö	On	On
Kriittisten kuormien hallinta	On	Ei ole
On-grid	On	On
Off-grid	On	Ei ole
Saareketoiminnan ehkäisy	On	On
Paneelien seuranta	On	On

Taulukko 1 antaa vaikutelman, että hybridi-invertterijärjestelmä on aina parempi ratkaisu kuin perinteinen invertteriratkaisu. Teknologian ja mahdollisuuksien näkökulmasta hybridi-invertteri onkin edistyneempi vaihtoehto, mutta se on myös kalliimpi ratkaisu. Molemmille invertteriratkaisuille käy alaluvussa 2.4 käydyt erityispiirteet. Yagobin ja muiden mukaan (2021) varjoisuus vaikuttaa huomattavasti vähemmän mikroinvertteriin kuin ketjuinvertteriin, jolloin mikroinvertteriratkaisu on parempi joissakin käyttötilanteissa kuin hybridi-invertteri.

Chirasin (2016, s.189) mukaan aurinkopaneelit voidaan kytkeä kolmella eri tapaa, on-grid, on-grid akulla ja off-grid akulla. Perinteinen invertteriratkaisu soveltuu akuttomaan on-grid-järjestelmään. Chirasin (2016, s.220) mukaan, akuton on-grid-järjestelmä on yksinkertaisempi, halvempi, vaatii vähemmän huoltoa, on tehokkaampi ja ympäristöystävällisempi ratkaisu kuin akulliset ratkaisut. Hän toteaa kuitenkin, että sähkökatkon aikaan käyttökohde ei saa sähköä varmasti, ellei järjestelmässä ole generaattoria. Akuton on-grid-järjestelmä myös mahdollistaa ylimääräisen tuotetun sähkön syötettyä yleiseen verkkoon. Chirasin (2016, s.232) mukaan akullinen on-grid-järjestelmä mahdollistaa sähkönsyötön sähkökatkon aikana ja lisää luotettavuutta järjestelmään. Hänen mukaansa off-grid-järjestelmän ainoa järkevä toteutus on akullinen järjestelmä.

## 6 Pohdinta

Tutkielmassa esitettyjen lähteiden perusteella hybridi-invertterit ovat hyvä ratkaisu aurinkopaneelijärjestelmiin. Tutkielma perustui kirjallisuuskatsaukseen, mikä mahdollisti hybridi-inverttereiden teknologioiden ja ominaisuuksien tarkastelun. Tutkielmassa ei ollut käytännön testausta, mikä rajoitti tarkastelun mahdollisuuksia. Hybridi-invertterit mahdollistavat pienten rakennusten energiantuotannon maksimoimisen, mikä auttaa uusiutuvan energian tuotannossa. Tämä tukee esimerkiksi Euroopan Union hiilineutraaliustavoitetta vuoteen 2050 mennessä.

Hybridi-invertterit tuovat monipuolisia ratkaisuja, mutta ne tuovat myös oman haasteensa. Tutkielmassa käsiteltiin hybridi-inverttereitä yleisellä tasolla, eikä tarkasteltu tiettyjä kaupallisia hybridi-inverttereitä, sillä näidenkin välillä on eroja valmistajakohtaisesti. Tämä tutkimus antoi kuitenkin yleiskuvan hybridi-inverttereiden toiminnasta ja mahdollisuuksista.

Vaikka hybridi-invertterit tarjoavat enemmän mahdollisuuksia, on tärkeää huomioida niiden korkeampi hankintahinta ja akkujen vaatima tila. Akkujen vaatimat tilat rajoittavat jo paljon hybridi-inverttereiden hankintaa, kuten esimerkiksi kaupunki olosuhteissa. Vaikka hybridi-inverttereillä on suurempi alkuinvestointi, voi se perinteisen invertteriratkaisun lailla maksaa itsensä takaisin ajan myötä.

Tämän työn perusteella voidaan todeta, että hybridi-inverttereiden käyttö tarjoaa merkittäviä etuja niille, jotka haluavat energiaomavaraisuutta. Jatkotutkimuksessa voitaisiin keskittyä hybridi-inverttereiden välisiin eroihin eri valmistajilla tai voitaisiin tutkia minkälaisia hybridi-invertteriratkaisuja olisi, jos yhdessä energiajärjestelmässä olisi kiinni aurinkopaneeli ja tuuliturbiini.

## 7 Johtopäätökset

Tutkielmassa todettiin, että hybridi-invertterit tarjoavat monipuolisempia ratkaisuja kuin perinteiset invertteriratkaisut. Hybridi-invertteri mahdollistaa useita toimintoja, kuten akkujen latauksen hallinnan, kriittisten kuormien hallinnan ja erilaiset energianhallintamallit. Nämä teknologiat mahdollistavat aurinkoenergian tehokkaan hyödyntämisen eri käyttökohteissa ja parantavat energian saannin varmuutta

Hybridi-invertteri soveltuu on-grid- ja off-grid-järjestelmiin. Off-grid aurinkopaneelijärjestelmät vaativat hybridi-invertterin, jotta useiden lähteiden liittäminen järjestelmään olisi mahdollista, kuten generaattorin. On-grid-järjestelmissä perinteiset invertteriratkaisut ovat edullisempia, helpommin huollettavia, ja jos on-grid-järjestelmissä on luotettava sähköverkko, ei ole välttämättä kannattavaa hankkia hybridi-invertteriä.

Hybridi-inverttereiden tulevaisuus vaikuttaa lupaavalta, sillä kehittyvien aurinkopaneelijärjestelmien ja akkujen myötä rakennusten täydellinen energiaomavaraisuus on mahdollista. Hybridi-invertterit mahdollistavat älykkäiden aurinkopaneelijärjestelmien asentamisen, jolloin energiaa voidaan ohjata esimerkiksi vain sähköauton lataamiseen. Lisäksi älykkäitä järjestelmiä voidaan hallita älylaitteella.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että hybridi-invertterit tarjoavat erinomaisia mahdollisuuksia erityisesti monimutkaisemmissa ja omavaraisuutta vaativissa järjestelmissä. Valinta hybridi-invertterin ja perinteisen invertteriratkaisun välillä riippuu kuitenkin käyttökohteen tarpeista, budjetista sekä sähköverkon luotettavuudesta.

## 8 Yhteenveto

Tässä tutkielmassa tarkasteltiin hybridi-inverttereiden roolia pienissä aurinkopaneelijärjestelmissä. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, mitä teknologioita hybridi-invertteri tuo aurinkopaneelijärjestelmään ja millaisia ratkaisuja hybridi-invertteri mahdollistaa.

Tutkielma perustui kirjallisuuskatsaukseen, jossa esitettiin teoreettinen pohja invertteriteknologialle esimerkkiipiirikaavion avulla. Piirikaaviossa havainnollistettiin tasasähkön muuntaminen vaihtosähköksi sekä PWM:n (pulssinleveysmodulaation) hyödyntäminen tässä prosessissa. Lisäksi tuotiin esille aurinkopaneeli-inverttereille yleisiä ominaisuuksia ja niiden merkitys järjestelmien toiminnalle.

Eryyisesti tarkasteltiin hybridi-invertterin teknologisia etuja, kuten akkujen hallintaa, kriittisten kuormien priorisointia ja energiansyötön turvaamista sähkökatkon aikana. Lisäksi esitettiin, miten invertteri hyödyntää MPPT-teknologiaa (maksimitehopisteen seuranta) aurinkopaneelien tehokkuuden optimoimiseksi. Hybridi-invertteri havainnollistettiin piirikaavion avulla, josta näkyivät sen erot perinteisiin inverttereihin.

Perinteiset invertterit todettiin kustannustehokkaiksi ja yksinkertaisiksi ratkaisuiksi erityisesti akuttomissa on-grid-järjestelmissä. Tutkimuksessa havaittiin, että hybridi-invertterit mahdollistavat joustavammat ja monipuolisemmat järjestelmät. Ne lisäävät järjestelmän luotettavuutta erityisesti off-grid-järjestelmissä, joissa sähkönsyötön varmistaminen on keskeistä. Toisaalta niiden korkeat kustannukset ja asennusvaatimukset rajoittavat niiden käyttöä tietyissä kohteissa. Lisäksi havaittiin, että off-grid-järjestelmissä akulliset ratkaisut ovat lähes välttämättömiä luotettavan sähkönsyötön varmistamiseksi.

## Lähteet

- Afshari, H., Husev, O., Matiushkin, O., & Vinnikov, D. (2022). A Review of Hybrid Converter Topologies. *Energies*, 15(24), 9341. <https://doi.org/10.3390/en15249341>
- Chiang, S., Chang, K., & Yen, C. (1998). Residential Photovoltaic Energy Storage System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 45(3), 385-394. <https://doi.org/10.1109/41.678996>
- Chiras, D (2016). *Power from the Sun: A practical guide to solar electricity*. (2. painos). New Society Publishers. [rajattu pääsy]
- Fields, S. (2023, 20. joulukuuta). *Critical load panels: What you need to know*. Energysage. Noudettu 14.1.2025 osoitteesta <https://www.energysage.com/energy-storage/what-are-critical-load-panels/>
- Gurkaynak, Y., Li, Z., & Khaligh, A. (2009). A Novel Grid-tied, Solar Powered Residential Home with Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) Loads. *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 813-816. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289765>
- Hietalahti, L (2011). *Tehoelektroniikan perusteet*. (1. painos). Tammertekniikka
- Jokinen, K. (n.d). *Tehoelektroniikka*. [luentomoniste]
- Maina, E (2023, 3. hutikuuta). *Mikä on hybridi invertteri*. Roypow. Noudettu 16.12.2024 osoitteesta <https://www.roypow.com/fi/blog/what-is-hybrid-inverter/>
- Milenov, V. & Zarkov, Z. (2023). Application of Hybrid Inverters in Photovoltaic Systems. *2023 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ELMA58392.2023.10202452>
- Namboodiri, A. & Wani, H. (2014). Unipolar and Bipolar PWM Inverter. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 1(7), 237-243.
- O'Biren, C. (2024 17, toukokuuta). *Solar Islanding and Anti-Islanding: What You Need to Know*. Palmetto. Noudettu 20.1.2025 osoitteesta <https://palmetto.com/solar/what-is-solar-islanding-and-anti-islanding>

- Rashid, M (2024). *Power electronics handbook*. (5. painos). Elsevier Science & Technology. [rajattu pääsy]
- Robert (2023 6. heinäkuuta). *Does hybrid inverter need a charge controller?* Ecgsolax. Noudettu 6.1.2025 osoitteesta [https://www.ecgsolax.com/blogs/for-beginners/does-hybrid-inverter-need-a-charge-controller?srsltid=AfmBOooWWJYJe-y1\\_pMo4pcr\\_EvWJzs2iObd0kGUZGLcwEQbpQOIAoAM](https://www.ecgsolax.com/blogs/for-beginners/does-hybrid-inverter-need-a-charge-controller?srsltid=AfmBOooWWJYJe-y1_pMo4pcr_EvWJzs2iObd0kGUZGLcwEQbpQOIAoAM)
- Teodorescu, R., Liserre, M. & Rodriguez, P. (2011). *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. John Wiley & Sons, Incorporated. [rajattu pääsy]
- Xiao, W (2017). *Photovoltaic Power System: Modeling, Design, and Control*. John Wiley & Sons, Incorporated. [rajattu pääsy]
- Yagoub, M., Elserougi, A. & Abdekhamid, T., (2021). Assessment of PV String Optimizer Circuit Versus String and Central Inverters during Partial Shading Conditions. *2021 22nd International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, 14–19. <https://doi.org/10.1109/MEPCON50283.2021.9686290>