

Sami-Alexi Korhonen

AURINKOKENNOVOIMALAN TUOTAN- NON TASAAMINEN ENERGIAVARAS- TON AVULLA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Kari Lappalainen
Huhtikuu 2022

TIIVISTELMÄ

Sami-Alexi Korhonen: Aurinkokennovoimalan tuotannon tasaaminen energiavaraston avulla
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikan kandidaattiohjelma: Sähköenergiatekniikka
Huhtikuu 2022

Aurinkokennovoimaloiden yleistyminen tuo mukanaan sähköverkkoon kohdistuvia haasteita, jotka johtuvat aurinkokennovoimaloiden vaihtelevasta tehosta. Tämän työn tarkoituksena on esitellä tuotannon tasaamista ja siihen liittyvää teoriaa sekä pohjustaa tulosten avulla tasaamiseen sopivan energiavaraston suunnittelua.

Aurinkokennojen tuottama teho riippuu aurinkokennoissa käytettävistä puolijosteista ja niiden vuorovaikutuksesta auringonvalon sisältämien fotonien kanssa. Pilvisenä päivänä auringonvalon fotoneista pienempi osa pääsee osumaan aurinkokennolle, jolloin tehon tuotanto on pienempää kuin aurinkoisena päivänä. Esimerkiksi pilvien liikkuminen taivaalla puolipilvisenä päivänä aiheuttaa vaihtelua tuotettuun tehoon.

Tuotetun tehon vaihtelua voidaan vähentää hyödyntämällä erilaisia menetelmiä, kuten suodattimia, älykkäitä ohjausalgoritmeja tai tehon muutosnopeuden rajoittamista. Tässä työssä hyödynnetään tehon muutosnopeuden rajoittamista, jossa verkkoon syötetyn tehon muutosnopeus rajoitetaan asetettuun raja-arvoon. Tehon muutosnopeuden rajoittaminen toteutetaan vertaamalla asetettua raja-arvoa verkkoon syötetyn tehon muutosnopeuteen. Tehon muutosnopeuden ylittäessä asetetun raja-arvon, energiavarastoa joko ladataan tai puretaan riippuen muutosnopeuden etumerkistä. Nämä toimenpiteet toteutetaan MATLAB-ohjelmiston laskennan avulla. Tehon muutosnopeudelle sallittu raja-arvo vaihtelee erinäisten säädösten, vaatimusten ja suositusten mukaisesti.

Työssä tasattavan tuotannon data on kahdelta eri päivältä. Näiden välillä on huomattava ero tuotetun tehon vaihtelevuudessa. Tätä dataa analysoidaan ja samalla tutkitaan tuotannon tasaamisen tarvetta kumpanakin päivänä. Tämän jälkeen dataa hyödynnetään esitellyn teorian mukaisesti tasaisen tehon saavuttamiseksi.

Sähköverkkoon syötetyn tasatun tehon määrä riippuu energiavarastosta puretusta tai ladatasta tehosta, sekä aurinkokennovoimalan tuottamasta tehosta. Energiavaraston purku- ja lataus-teho riippuu tehonmuutosten suuruudesta. Laskennan tuloksista pystytään analysoimaan, että energiavaraston vähimmäiskoko vaihtelee huomattavasti asetetun raja-arvon perusteella. Samalla huomataan, että energiavaraston tehon vaihtelu eri raja-arvoilla on pienempää.

Sähköverkkoon syötetty teho saadaan käytetyllä tasausmenetelmällä tasattua muutosnopeuden raja-arvon sisään molempina päivinä. Tuotannon tasauksen laskennasta saatavilla tiedoilla pystytään pohjustamaan energiavaraston suunnittelua eri raja-arvoilla. Työn tärkeä jatkotutkimuskohde on juuri kyseisen energiavaraston lopullinen suunnittelu.

Avainsanat: Aurinkokennovoimala, Tuotannon tasaus, Energiavarasto, ESS, ramp-rate

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. AURINKOKENNOVOIMALAN TOIMINTAPERIAATE JA RAKENNE	3
3. AURINKOKENNOVOIMALAN TUOTANNON TASAAMINEN	6
4. TARKASTELTAVAN AURINKOKENNOVOIMALAN SEKÄ MITTAUSDATAN ESITTELY.....	10
5. TUOTETUN TEHON TASAAMINEN ENERGIAVARASTON AVULLA	15
5.1 Tuotetun tehon analysointi ja tasaaminen	15
5.2 Tarvittavan energiavaraston suunnittelu.....	22
6. YHTEENVETO.....	26
LÄHTEET	28

LIITE A: LASKENNASSA KÄYTETTY MATLAB OHJELMISTOKOODI

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Aurinkokennovoimalan tuottama teho 11.6.2021.....</i>	12
Kuva 2.	<i>Aurinkokennovoimalan tuottama teho 15.6.2021.....</i>	12
Kuva 3.	<i>Auringonsäteilyn voimakkuus 11.6.2021</i>	13
Kuva 4.	<i>Auringonsäteilyn voimakkuus 15.6.2021</i>	13
Kuva 5.	<i>Tuotetun tehon muutokselle asetettujen raja-arvojen ylitykset kuvattuna aikana.....</i>	16
Kuva 6.	<i>Vertailukuva aurinkokennovoimalan tuottamasta tehosta sekä sähköverkkoon syötetystä tasatusta tehosta 11.6.2021</i>	18
Kuva 7.	<i>Vertailukuva aurinkokennovoimalan tuottamasta tehosta sekä sähköverkkoon syötetystä tasatusta tehosta 15.6.2021</i>	18
Kuva 8.	<i>Energiavarastoon varastoidun energian määrä ajan funktiona 11.6.2021.....</i>	19
Kuva 9.	<i>Energiavaraston teho ajan funktiona 11.6.2021</i>	20
Kuva 10.	<i>Energiavarastoon varastoidun energian määrä ajan funktiona 15.6.2021.....</i>	21
Kuva 11.	<i>Energiavaraston teho ajan funktiona 15.6.2021</i>	21

LYHENTEET, TERMIT SEKÄ MERKINNÄT

ESS	engl. Energy Storage System, järjestelmä, johon sähköenergiaa varastoidaan
MPC	engl. Model Predictive Control, ohjausalgoritmi, joka hyödyntää mallin ennusteita ohjauspäätöksissä
pu	engl. per-unit, suhteellinen arvo verrattuna perusarvoon
PV	engl. Photovoltaic, fotosähköinen ilmiö ja siihen perustuvat laitteistot
RR	engl. Ramp-Rate, kuvastaa jonkun suureen muutosnopeutta
SOC	engl. State Of Charge, energiavaraston lataustila
STC	engl. Standard Test Conditions, normalisoidut testausolosuhteet, joita käytetään aurinkopaneelien vertailussa
Fingrid	Suomen kantasähköverkosta vastaava yritys
Fotoni	Valohiukkanen, sähkömagneettisen vuorovaikutuksen välittäjähiukkanen
Invertteri	Vaihtosuuntaaja, komponentti, joka muuttaa tasavirran vaihtovirraksi
MATLAB	Laskentaohjelmisto, jonka toimintaa ohjataan ohjelmistokoodin avulla
Puolijohde	Materiaalityyppi, joka johtaa sähköä paremmin kuin eriste, mutta huonommin kuin metalli
λ	Aallonpituus
E	Fotonin energia
f	Taajuus
h	Planckin vakio, yhdistää massan sekä taajuuden, $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
ΔP_{GRID}	Sähköverkkoon syötetyn tehon muutosnopeus
P_{ESS}	Energiavaraston lataus- ja purkuteho
P_{GRID}	Sähköverkkoon syötetty teho
P_{ka}	Keskimääräinen teho
P_{mp}	Mittauspisteen teho
P_{PV}	Aurinkokennovoimalan tuottama teho
RR_{limit}	Laskennassa käytetty raja-arvo tehon muutosnopeudelle
v	Valonnopeus, $v = 299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

1. JOHDANTO

Uusiutuvien energialähteiden ja samalla aurinkokennovoimaloiden jatkuva lisääntyminen on väistämätön kehitysaskel nykyisessä yhteiskunnassa. Uusiutuvien energialähteiden käänttöpuolena on kuitenkin niiden tuottaman tehon vaihtelevuus, joka tuo omat haasteensa uusiutuvia energialähteitä ympäröivälle infrastruktuurille. Uusiutuvien energialähteiden itse tuottaman tehon vaihteluun ei juurikaan pystytä vaikuttamaan, sillä vaihtelu johtuu lähinnä luonnonilmiöistä. Esimerkiksi aurinkokennojen tuottama teho riippuu auringonvalon sisältämästä energiasta ja pilvipeitteiden liike aiheuttaa liikkuvia varjostumia aurinkopaneelien päälle aiheuttaen tuotannon vaihtelua. Tuotetun tehon vaihtelevuuden rajoittamista eri menetelmillä on tutkittu laajasti eri lähteissä, kuten esimerkiksi lähteissä [1] ja [2]. Näissä menetelmissä yhdistävä tekijä on useasti energiavarasto, jonka avulla pystytään syöttämään tarvittava teho tuotannon vaihtelevan tehon rajoittamiseksi.

Uusiutuvien energialähteiden liittäminen sähköverkkoon on edellytys nykyisessä yhteiskunnassa, jossa pyritään irti fossiilisista energialähteistä. Motivaatio tuotannon tasaamiselle tulee erinäisistä standardeista, jotka asettavat erinäisiä rajoja sähköverkkoon yhdistettävälle uusiutuville energialähteille. Toisaalta tuotannon tasaamisen tarkoituksena on vähentää tuotannon vaihtelevuuden aiheuttamia haasteita infrastruktuurille ja ehkäistä aiheutuvia haittavaikutuksia, kuten jännitteen vaihtelua ja valojen välkkymistä.

Työn tavoitteena on esitellä aurinkokennovoimalan tuotannon tasaamista hyödyntäen energiavarastoa eli ESS-järjestelmää (engl. Energy Storage System). Tuotannon tasaamisen esittely toteutetaan käyttämällä aurinkokennovoimalasta saatua dataa tuotetusta tehosta sekä hyödyntämällä työn pohjatiedoiksi esiteltyä teoriaa. Toisaalta työn toisena tavoitteena on saada tietoa ominaisuuksista, joita tuotannon tasaamisen onnistuminen edellyttää ESS-järjestelmältä, sekä pohjustaa kyseisen järjestelmän suunnittelua saatujen tietojen avulla.

Tämän työn alussa luvussa 2 käsitellään aurinkokennovoimalaan liittyvää teoriaa, toimintaperiaatetta sekä aurinkokennovoimalan rakennetta. Tämän jälkeen luvussa 3 käsitellään tuotannon tasaamiseen liittyvää teoriaa ja eri tasausmenetelmiä sekä perehdytään tarkemmin tässä työssä käytettävään tasausmenetelmään. Luvussa 4 esitellään työn toteutuksessa hyödynnettyä aurinkokennovoimalaa sekä sen yhteydessä olevia

mittauslaitteita. Luvussa 4 esitellään myös aurinkokennovoimalasta saatua dataa tuotetusta tehosta sekä mittalaitteiden tuottamaa dataa auringonsäteilyn voimakkuudesta. Lopuksi luvussa 5 analysoidaan saatua dataa lukujen 2–4 teorian avulla. Lisäksi samassa luvussa esitellään aurinkokennovoimalan tuotetun tehon tasaamista hyödyntäen aiemmin esiteltyä tasausmenetelmää sekä pureudutaan energiavaraston suunnitteluun. Lopuksi työn tuloksista esitetään yhteenveto, esitetään työn jatkosuunnittelukohte sekä pohditaan työn onnistumista kokonaisuutena.

2. AURINKOKENNOVOIMALAN TOIMINTAPERIAATE JA RAKENNE

Aurinkokennojen valmistuksessa käytetään nykypäivänä useaa eri teknologiaa ja sen seurauksena aurinkokennoja on saatavilla useita eri tyyppisiä. Yleisin kennotyyppi on kiteisestä piistä valmistettu kenno, joka voidaan vielä jakaa yksi- tai monikiteiseksi kennoiksi. Näiden markkinaosuus kaikista kaupallisista aurinkokennoista on lähteestä riippuen välillä 80 % [3] ja 90 % [4]. Kiteisestä piistä valmistettujen kaupallisesti saatavien kennojen hyötysuhteet liikkuvat yleisesti viidentoista ja kahdenkymmenen prosentin välillä ja joillakin tutkimuskennoilla on päästy jopa 25 %:n hyötysuhteeseen. Muita kennotyyppejä ovat ohutkalvotekniikalla valmistetut kennot ja monikerroskennot. [3][4][5] Näistä ohutkalvotekniikalla valmistettujen kennojen hyötysuhteet liikkuvat noin 10–12 % suuruusluokassa [3]. Kaupallisten monikerroskennojen hyötysuhde on noin 30 % [4]. Tässä luvussa perehdytään kiteisestä piistä valmistettuun kennotyyppiin ja sen toimintaperiaatteeseen sekä aurinkokennovoimalaan yleisesti.

Aurinkokennovoimalan toiminta perustuu pohjimmiltaan auringonvalon fotonien vuorovaikutukseen aurinkokennossa käytetyn puolijohteen kanssa. Tätä kutsutaan fotosähköiseksi ilmiöksi ja kyseiseen ilmiöön pohjautuvia ratkaisuja lyhennetään kirjaimin PV (engl. Photovoltaic). Aurinkokennon perustana käytettyä puolijohdetta on muokattu lisäämällä siihen muita aineita, joiden elektronirakenne on erilainen. Tätä prosessia kutsutaan myös seostukseksi. Seostuksessa lisättyjen aineiden uloimmalla elektronikuorella on joko enemmän tai vähemmän elektroneja, verrattuna aineeseen, johon lisäys tehdään. Nämä seostukset synnyttävät puolijohteeseen vapaita elektroneja sekä vapaita aukkoja. Vapaat aukot ovat positiivisia varauksen kuljettajia, jotka johtuvat siitä, että elektronikuorella on tilaa elektronille. Puolijohdetta, jolla on vapaita elektroneja, kutsutaan n-tyyppin puolijohdeksi, sekä puolijohdetta, jolla on vapaita aukkoja, kutsutaan p-tyyppin puolijohdeksi. Kun nämä seostetut puolijohdetet yhdistetään, syntyy pn-liitos. Liitoskohdan ympärille muodostuu tyhjennysalue, jossa muodostuu potentiaaliero. Potentiaaliero kuvastaa aurinkokennon jännitettä ja tämä potentiaaliero liitoskohdan ympärillä mahdollistaa aurinkokennon toiminnan. [4]

Aurinkokennossa käytetyn puolijohteen elektronit eivät pysty liikkumaan ilman ulkoista vuorovaikutusta energiavyöltä toiselle. Aurinkokennon tapauksessa elektronit pystyvät liikkumaan energiavyöltä toiselle auringonvalon fotonien vuorovaikutuksen seurauksena. Tätä fotonien vuorovaikutusta puolijohteen kanssa kutsutaan absorptioksi. Elektronin siirtyminen vaatii kuitenkin sen, että fotonilla on vähintään yhtä paljon energiaa kuin

kyseisten energiavöiden välillä. Fotonin sisältämä energia vaihtelee fotonin aallonpituuden mukaisesti, kuten voidaan huomata kaavasta

$$\lambda = \frac{v}{f} \Leftrightarrow f = \frac{v}{\lambda}, \quad (1)$$

jossa λ on aallonpituus, v on valonnopeus ja f on taajuus, sekä edelleen hyödyntäen kaavaa

$$E = hf, \quad (2)$$

jossa E on fotonin energia ja h on Planckin vakio [4]. Fotonin sisältämä ylimääräinen energia, jota ei tarvita elektronin siirtämisessä energiavyöltä toiselle, vapautuu lämpönä aurinkokennossa [4]. Lämpötilan kasvu heikentää aurinkokennon toimintaa, sillä korkeassa lämpötilassa elektronien rekombinaatio lisääntyy, joka puolestaan pienentää elektronivöiden välistä energiaa. [5][6]

Elektronin siirtyessä korkeammalle energiavyölle fotonin vuorovaikutuksesta se siis jättää jälkeensä vapaan aukon valenssivyölle ja samalla elektroni siirtyy vapaaksi johtavuusvyölle. Koska aurinkokennon puolijohteeseen syntyy potentiaaliero seostuksen seurauksena, mahdollistaa kyseinen potentiaaliero vapaiden aukkojen ja elektronien liikkeen puolijohteessa. Kun aurinkokenno on yhdistetty ulkoiseen sähköpiiriin, syntyy vapaiden aukkojen ja elektronien liikkeestä piiriin sähkövirta, joka voidaan hyödyntää sähköenergiana. Sähköpiiriin yhdistämistä varten puolijohteen molemmilla puolilla on metallikontaktit, joihin sähköpiirin johtimet yhdistetään. [3][4]

Yksittäinen aurinkokenno koostuu puolijohteesta, jossa on yhdistetty p-tyyppin ja n-tyyppin puolijohteita, metallikontakteista puolijohteen molemmilla puolilla sekä valon heijastusta vähentävästä kerroksesta [3][4]. Aurinkokennoissa käytetään valon heijastusta vähentävää kerrosta kennossa tapahtuvan absorption parantamiseksi [4]. Absorption määrä kennossa vaikuttaa suoraan kennon tuottamaan sähkövirtaan ja hyötysuhteeseen, koska se vaikuttaa kennossa syntyvien vapaiden varauksenkuljettajien määrään. Toisaalta absorption määrään ja hyötysuhteeseen vaikuttaa auringonsäteilyn määrä ja lämpötila. [3] Aurinkokennojen ominaisuuksiin, kuten aurinkokennon jännitteeseen ja toisaalta myös aurinkokennon hyötysuhteeseen, voidaan vaikuttaa vaihtamalla kennossa käytettyä puolijohdetta. Esimerkiksi piistä valmistetun aurinkokennon jännite on luokkaa 0,6 V [4][5].

Aurinkokennovoimala koostuu useista aurinkopaneeleista. Aurinkopaneeli taas koostuu aurinkokennoista, jotka on kytketty toistensa kanssa sarjaan sekä rinnan. [4] Aurinkokennojen sarjoittamisessa niiden välille kytketään määritellyin välein ohitusdiodi, suojaa-

maan yksittäisiä kennoja haittapuolilta, joita esimerkiksi vaihteleva pilvisyys tuottaa [4][5]. Näihin haittapuoliin lukeutuu kennon kuumentuminen, jos yksittäinen kenno joutuu osittain tai kokonaan varjoon kennojen sarjaan kytkennässä. [5] Toisaalta kennon lämpeneminen voi johtua myös kennon viallisuudesta. Aurinkokennojen sarjoittamisella ja rinnan kytkemisellä pyritään saavuttamaan suurempia virtoja ja jännitteitä yksittäisessä aurinkopaneelissa. [4] Kun kytketään sarjaan aurinkopaneeleja, tarvitsee huomioida myös oikosulkusuojaus ja asentaa estodiodeja tarvittaessa suojaamaan aurinkopaneeleja takavirralla. [5]

Aurinkokennovoimalan tuotanto riippuu siis edellä mainitun mukaisesti kennojen lukumäärästä, sillä kennojen lisääminen kasvattaa koko aurinkokennovoimalan pinta-alaa, mutta tuotanto riippuu myös auringonsäteilyn fotonien sisältämän energian vaikutuksesta. Aurinkokennojen kokeman auringonsäteilyn voimakkuus on verrattavissa tähän fotonien sisältämään energiaan, sillä auringonsäteilyn voimakkuus kuvastaa auringosta lähtevän elektromagneettisen säteilyn (fotonit) voimakkuutta pinta-alaa kohden. [4]

Aurinkokennovoimalat tuottavat tasavirtaa, joka tarvitsee vaihtosuunnata vaihtovirraksi invertterillä, eli vaihtosuuntaajalla, ennen kuin sähköä voidaan syöttää sähköverkkoon [4][5][7]. Aurinkokennovoimalan tuottamalla tasavirralla voidaan halutessa ladata suoraan akustoa. Aurinkokennovoimaloiden kanssa yleisesti käytettyjä inverttereitä ovat mikroinvertterit ja perinteiset invertterit. Perinteiseen invertteriin on kytketty useampia aurinkopaneeleja sarjassa, kun taas mikroinvertteri on kytkettynä kerrallaan vain yhteen aurinkopaneeliin. Perinteisen invertterin syöttämä teho riippuu heikoimmin suoriutuvasta aurinkopaneelistä sarjaankytkennässä. Mikroinvertterien tapauksessa muiden aurinkopaneelien muutokset eivät vaikuta invertterin syöttämään tehoon. Invertterien mitoitus on tärkeä osa aurinkokennovoimalaa, sillä invertteri määrittelee aurinkokennovoimalasta käytettävissä olevan tehon. [4]

3. AURINKOKENNOVOIMALAN TUOTANNON TASAAMINEN

Aurinkokennovoimalan tuotanto riippuu päivittäisestä auringonvalon määrästä, joka ei ole vakio vaan vaihtelee pitkin päivää. Vaihtelua auringonvalon määrään tuo sääolosuhteet sekä päivän pituus. Päivän pituus vaihtelee pitkin vuotta, ja samalla myös eri vuodenaikat tuovat omat haasteensa aurinkokennojen tuotantoon, sillä esimerkiksi talvisin tuotantoon ja sen vaihteluun vaikuttaa oleellisesti aurinkopaneelien peittyminen lumeen. Peittynyt aurinkopaneeli ei välttämättä saa ollenkaan auringonvaloa ja vaikka peittyneelle aurinkopaneelille pääsisi auringonvaloa, olisi sen määrä hyvin vähäinen. Päivän pituuden lyhentyminen vaikuttaa aurinkopaneelien tuotantoon suoraan päivittäisen auringonvalon määrän vähentymisen kautta. Oleellisin äkillisiin tehon vaihteluihin vaikuttava tekijä on erilaiset varjostumat. Aurinkopaneelien läheisyydessä oleva puusto ja rakennukset voivat varjostaa aurinkopaneeleja auringon liikkuessa taivaalla päivän mittaan. Liikkuvat pilvipeitteet taivaalla aiheuttavat myös tällaisia varjostumia aurinkopaneelille. Myös aurinkopaneelien varjostuminen liian ja pölyn takia vaikuttavat tuotettuun tehoon. [1][4][7][8][9]

Tämä vaihtelevuus johtaa haastaviin tilanteisiin, joissa vaihteleva tuotanto vaikuttaa negatiivisesti esimerkiksi sähkönlaatuun. Esimerkkejä tuotannon vaihtelevuuden aiheuttamista sähkönlaatuun vaikuttavista ilmiöistä ovat jännitteen vaihtelu, jännitteen nousu, valojen välkyntä sekä taajuuden vaihtelu. [1] Nämä samat ilmiöt esiintyvät myös tuulivoiman yhteydessä, sillä myös tuulivoiman tuotannossa voi olla runsasta vaihtelevuutta [1][9]. Näille ilmiöille on asetettuja rajoja eri standardeissa ja kyseisten ilmiöiden muutosten pitää pysyä näissä annetuissa rajoissa. Näitä on käsitelty esimerkiksi standardissa SFS-EN 50160 [10].

Tuotannon tasaamisessa pitää ottaa huomioon sähköverkkoon syötetyn tehon taajuuden muutokset, jotka ovat seurausta äkillisistä muutoksista tuotannossa. Toisaalta tarvitsee huomioida tuotetun tehon äkilliset muutokset sähköverkkoon syötetyssä tehossa. Nämä ilmiöt voivat laajassa sähköverkossa, jossa on paljon uusiutuvaa tuotantoa, johtaa tilanteeseen, jossa sähköverkko ei pysy sille määritellyissä rajoissa ja sähköverkko joutuu kriittiseen tilaan. [9] Ilmiöiden huomioiminen on sähköverkon toiminnan kannalta siis oleellista ja niiden huomioimista ei voi laiminlyödä [1][9]. Uusiutuvien energialähteiden liittäminen sähköverkkoon pitää tapahtua siis niin, että edellä mainittujen ilmiöiden vaikutukset on otettu huomioon.

Tuotannon tasauksessa käytettävien menetelmien toimintaperiaatteet voidaan jakaa neljään ryhmään. Nämä ryhmät ovat liukuviin keskiarvoihin perustuvat ratkaisut, suodattimia hyödyntävät ratkaisut, älykkäisiin ohjausalgoritmeihin perustuvat ratkaisut sekä ramp-rate-menetelmät eli tehon muutosnopeuden rajoittamiseen perustuvat menetelmät. [1][9] Liukuvaan keskiarvoon perustuvat ratkaisut hyödyntävät tietoa tehon muutoksen keskiarvosta määritellyssä aikaikkunassa. Suodattimia hyödyntävät ratkaisut voivat käyttää esimerkiksi alipäästö-, ylipäästö- tai Kalman-suodattimia [1]. Näissä ratkaisuissa suotimelle annetaan lähtötietona aurinkokennovoimalan tuottama teho, jonka suodin käsittelee toimintaperiaatteensa mukaisesti. Suotimen rinnalle voidaan vielä lisätä funktioita suorittamaan lisätoimintoja. [1] Älykkäiden ohjausalgoritmien avulla voidaan määrittellä hyvinkin tarkasti haluttu toiminta energiavaraston ja aurinkopaneelien tuoton kanssa. Näiden ohjausalgoritmien määrittelyssä voidaan esimerkiksi huomioida SOC (engl. State Of Charge) eli energiavaraston lataustaso. Muita toimintatapoja, joita älykkäät ohjausalgoritmit mahdollistavat, ovat tuotantoa ennustavat ja niiden mukaisesti toimivat ratkaisut. Näitä kutsutaan MPC-algoritmeiksi (engl. Model Predictive Control) [9]. Käyttämällä MPC-algoritmia olisi mahdollista pienentää käytettyä energiavarastoa [11]. Älykkäiden ohjausalgoritmien haittapuolena on kuitenkin niiden korkeampi vaatimus laskentateholle, joten ne ovat hankalampia toteuttaa projektin yhteydessä. [1]

Tuotannon tasaamisessa pyritään siihen, että aurinkokennovoimalalla tuotettu sähköenergia ei pääse heilahtelemaan aiemmin mainittujen tekijöiden takia liikaa. Helpoin tapa tasata tuotantoa on tuoda aurinkokennovoimalan rinnalle energiavarasto, tässä tapauksessa esimerkiksi akusto, johon pystytään varastoimaan suoraan aurinkokennovoimalan tuottamaa sähköenergiaa. Energiavarastoon varastoitua energiaa pystytään sitten purkamaan yhdistettyyn verkkoon, kun aurinkokennovoimalan tuotantoa tarvitsee tasata. Aurinkokennovoimalan tuotannon tasaamista voidaan kuvata kaavalla

$$P_{PV} = P_{ESS} + P_{GRID}, \quad (3)$$

jossa muuttuja P_{PV} kuvastaa aurinkokennovoimalan tuottamaa tehoa, muuttuja P_{ESS} taas energiavaraston lataustehoa ja P_{GRID} verkkoon syötettyä tehoa [1]. Muuttujien P_{PV} ja P_{ESS} muutoksilla pystytään siis vaikuttamaan muuttujaan P_{GRID} , eli siihen miten paljon sähkötehoa verkkoon syötetään.

Seuraavaksi käsitellään hieman tarkemmin ramp-rate-menetelmän käyttämistä tuotannon tasaamisessa. Jotta tuotantoa voidaan tasata tällä menetelmällä, tarvitaan muuttuja sille, kuinka nopeasti P_{GRID} muuttuu. Tämän muuttujan avulla pystytään muokkaamaan energiavaraston purkunopeutta tai latausnopeutta, jotta saadaan sähköverkkoon syö-

tetty sähköteho pysymään mahdollisimman tasaisena. [1][9] Muuttujan P_{GRID} muutosnopeutta kuvataan muuttujalla ΔP_{GRID} . Tuotannon tasaamiseksi tarvitaan myös tapauskohtainen muutosnopeuden raja-arvo RR_{limit} (engl. Ramp-Rate), johon aurinkokennovoimalan verkkoon syötetyn tehon muutosnopeutta ΔP_{GRID} verrataan. Voimme kirjoittaa näiden tietojen avulla kaavat tuotannon tasaamiselle eri tilanteissa. Tuotannon tasaaminen voidaan luokitella kolmeen eri tilanteeseen, joista yhdessä ladataan energiavarastoa, toisessa puretaan energiavarastoa ja kolmannessa kaikki aurinkokennovoimalan tuotama sähköteho syötetään sähköverkkoon. Muodostetaan näille kaavat edellä mainittujen muuttujien avulla. Tilanne, jossa pitää ladata energiavarastoa, voidaan kirjoittaa kaavan

$$\Delta P_{\text{GRID}} > RR_{\text{limit}} \quad (4)$$

avulla, kun taas tilanne, jossa pitää purkaa energiavarastoa, voidaan kirjoittaa kaavan

$$\Delta P_{\text{GRID}} < -RR_{\text{limit}} \quad (5)$$

avulla. Jos energiavarastoa ei tarvitse purkaa, eikä ladata, voidaan tilanne kuvata kaavan

$$RR_{\text{limit}} \geq \Delta P_{\text{GRID}} \geq -RR_{\text{limit}} \quad (6)$$

kautta. Nämä kaavat siis kuvastavat aurinkokennovoimalan tuotannon muutosnopeuden raja-arvoa, joka johtaa tarvittaessa tuotannon tasaamiseen hyödyntäen kaavan (3) mahdollisuuksia. [1][2][12]

Tarvitaan siis raja-arvo, jotta tuotantoa voidaan tasata. Kaavoissa 4–6 käytettävän raja-arvon ΔP_{GRID} yksikkö on $\frac{\text{W}}{\text{s}}$. Lähteissä [9] ja [13] on ilmoitettu aurinkokennovoimalan tehon tuotannolle sallittu vaihteluväli suhteessa asennettuun kokonaistehoon minuutin ajanjaksossa, kun teho syötetään sähköverkkoon. Näillä tiedoilla pystytään laskemaan aurinkokennovoimalalle raja-arvo, jonka yksikkö on $\frac{\text{W}}{\text{s}}$. Kyseisessä taulukossa ei ole mainittu Suomea, mutta taulukossa yleinen raja tehon vaihtelulle on $10 \frac{\%}{\text{min}}$ asennetusta kokonaistehosta. Lähteessä [13] on käsitelty tuotannon tasaamista ramp-rate-menetelmällä, ja käytettyjä raja-arvoja tehon vaihtelulle ovat $1 \frac{\%}{\text{min}}$, $3 \frac{\%}{\text{min}}$, $5 \frac{\%}{\text{min}}$, $10 \frac{\%}{\text{min}}$, $20 \frac{\%}{\text{min}}$ ja $30 \frac{\%}{\text{min}}$. Lähteessä [1] on mainittu Fingridin verkkoon kytkettyjen uusiutuvien sähköenergiajärjestelmien jännitteenvaihtelulle sallittu raja-arvo, joka on 0.9–1.05 pu. Tampereen sähköverkon alueella käytetään Energiateollisuuden julkaisemaa suositusta sähkön pientuotannon teknisistä vaatimuksista, joka on saatavilla Tampereen sähköverkon sivuilla [14]. Kyseinen suositus on kirjoitettu hyödyntäen Fingridin vaatimusdokumentteja

sekä standardeja SFS-EN 50549-1 ja -2. Tärkeää on huomata, että uusiutuvien energialähteiden sähköverkkoon liittämislle asetetut vaatimukset vaihtelevat huomattavasti verkon operaattorista riippuen. Lähteissä [11] ja [15] huomautetaan, että aurinkokennovoimaloiden lisääntynyt määrä on saanut verkkojen operaattorit implementoimaan näitä vaatimuksia haittavaikutusten ehkäisemiseksi. Tämä tarkoittaa sitä, että paikalliset vaatimukset on selvitettävä huolellisesti sekä otettava huomioon valmisteltaessa uusiutuvien energialähteiden liittämistä sähköverkkoon. Lisäksi tarvittaessa tuotannon tasaukseen käytettävä järjestelmä suunnitellaan näiden vaatimusten mukaisesti.

Tuotannon tasaaminen aurinkokennovoimalan tapauksessa rajoittuu sähköenergian varastointiin ja purkamiseen. Työssä käsitellään siis tilannetta, jossa sähköenergiaa varastoidaan tarpeen mukaan ESS:ään ja puretaan sieltä tarvittaessa ulkoiseen sähköverkkoon tuotannon tasaamiseksi.

4. TARKASTELTAVAN AURINKOKENNOVOIMALAN SEKÄ MITTAUSDATAN ESITTELY

Tämän työn analyysissä hyödynnetään Tampereen yliopiston Hervannan kampuksella sijaitsevaa aurinkokennovoimalaa ja sen yhteydessä olevien sensoreiden tuottamaa dataa. Kampuksen aurinkokennovoimala koostuu 69 aurinkopaneelistä, sääasemasta sekä virta–jännite -käyrien mittaamiseen käytetystä laitteistosta. [16] Sääaseman tarkoituksena on kerätä vallitsevien olosuhteiden tiedot halutulla mittaustaaajuudella ja tallentaa saatu data aikaleimojen kanssa myöhempää käyttöä varten tietokantaan. Sähkömittauksilla kootaan tarvittavaa informaatiota jännitteestä sekä virrasta aurinkopaneeleissa ennalta määritetyllä mittaustaaajuudella ja saatu data aikaleimoineen tallennetaan tietokantaan. Virta- ja jännitemittauksien tuloksien avulla pystytään muodostamaan virta–jännite -käyrä. [16]

Kampuksen aurinkokennovoimalan paneelit ovat mallinimeltään NP190GK ja niiden valmistuksessa on käytetty monikiteistä piitä. Yksi paneeli sisältää 54 aurinkokennoa ja yksittäisen paneelin nimellisteho normalisoiduissa STC-olosuhteissa (engl. Standard Test Conditions) on 190 W. Yksittäisen aurinkopaneelin nimellistehon ja aurinkopaneelien lukumäärän kautta voidaan laskea koko aurinkokennovoimalan teho. Kampuksen aurinkokennovoimalan nimellisteho saadaan siis kertomalla aurinkopaneelien lukumäärä nimellisteholla eli aurinkokennovoimalan nimellisteho on noin 13,1 kW. Tämä lukema on myös ilmoitettu lähteissä [13] ja [17].

Aurinkokennovoimalan sääasema on tarkoitettu mittaamaan lämpötilaa, tuulen nopeutta ja suuntaa, ilmankosteutta sekä auringon kokonais- ja hajasäteilyä. Lisäksi aurinkopaneelien yhteydessä on vielä erikseen säteily- ja lämpötilasensoripareja, joilla seurataan yksittäisten aurinkopaneeliryhmien kokemia muutoksia. Seuraamalla yksittäisiä aurinkopaneeliryhmiä saadaan tarkempaa tietoa aurinkopaneelien käyttäytymisestä muuttuvissa olosuhteissa. [13][16][17]

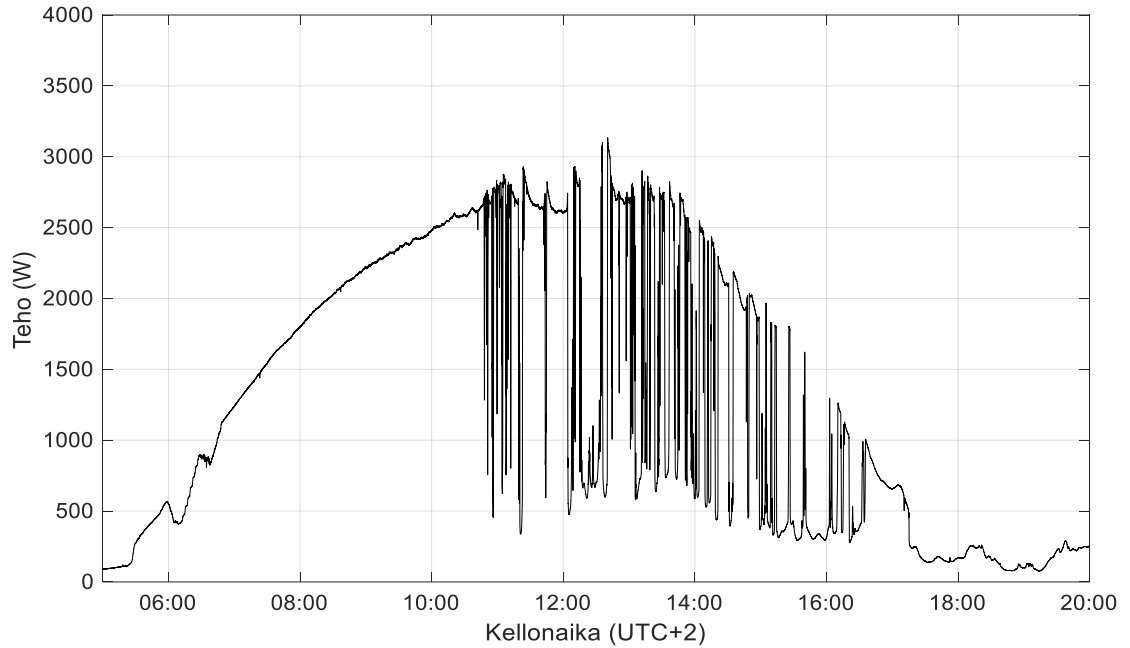
Aurinkokennovoimalasta saatu data on tämän työn tapauksessa 17 aurinkopaneelin sarjaankytkennästä. Paneelit ovat ryhmitelty kolmeen ryhmään, joista yhdessä ryhmässä on 3 aurinkopaneelia ja kahdessa jäljelle jäävässä ryhmässä on kummassakin 7 paneelia, joista saadaan siis yhteensä edellä mainittu 17 paneelin sarjaankytkentä. Voimme myös hyödyntää tietoa yhden aurinkopaneelin nimellistehosta, joka on aikaisemmin mai-

nittu 190 W. Kertomalla paneelien lukumäärä nimellisteholla saadaan datassa käytettyjen aurinkopaneelien teho. Sarjaankytkettyjen aurinkopaneelien nimellisteho on siis 3230 W.

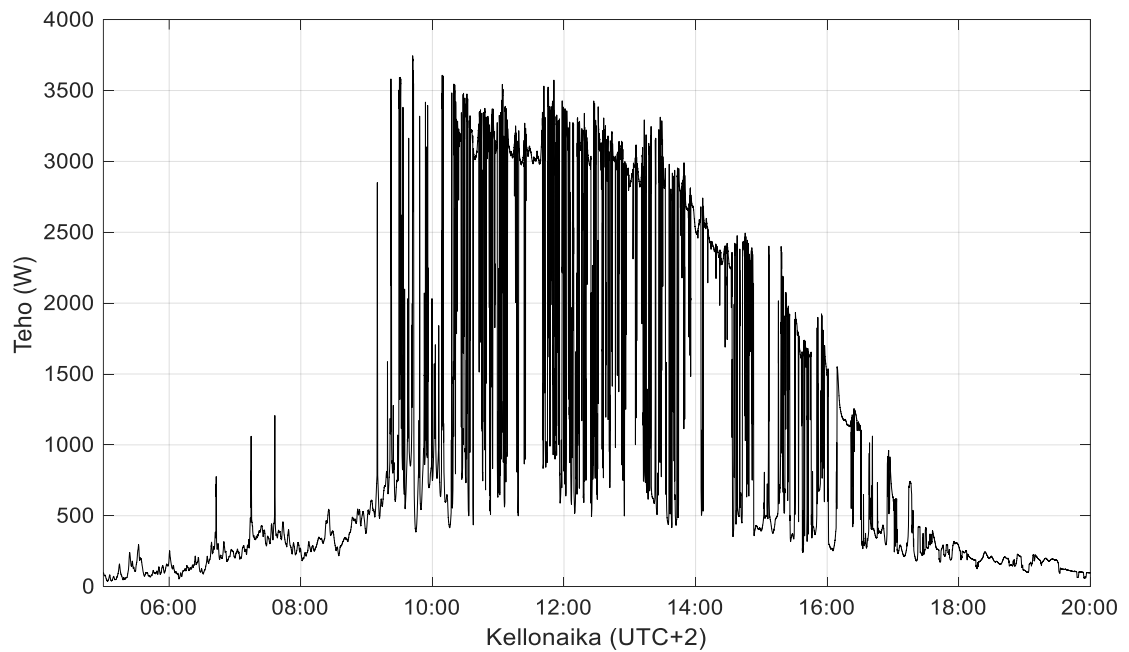
Aurinkopaneelien yhteydessä on kuusi paria säteily- ja lämpötilasensoreita. Nämä ovat sijoitettu aurinkopaneeliryhmien pätyihin, eli kussakin ryhmässä on kaksi paria sensoreita. Lämpötila- ja säteilyensoreiden keräämästä datasta on otettu keskiarvo molemmille sensorityypeille, ja analyysissä käytetään tätä datan keskiarvoa.

Aurinkokennovoimalan tuotannosta kerätty data koostuu siis aurinkopaneelien lämpötilan keskiarvosta, aurinkopaneelien kokeman auringonsäteilyn voimakkuuden keskiarvosta ja tuotetusta tehosta, joka on siis virta-jännite -käyristä saatu voimalan maksimitehopisteen teho. Saadun datan datapisteet on otettu noin 1 Hz:n mittaustaajuudella. Käytettävä data on kerätty kahdelta olosuhteiltaan erilaiselta päivältä, joista ensimmäisenä päivänä on ollut vähemmän auringonsäteilyn voimakkuuteen vaikuttavia olosuhdemuutoksia ja toisena päivänä on ollut enemmän auringonsäteilyn voimakkuuteen vaikuttavia olosuhdemuutoksia pitkin päivää. Datapisteitä on otettu kyseisinä päivinä dataan mukaan aikaväliltä 5.00–20.00 ja yhteensä datapisteitä kertyy tuolta aikaväliltä 1 Hz:n mittaustaajuudella 54 000 kappaletta.

Kuvissa 1 ja 2 on esitetty aurinkokennovoimalan tuottama teho ajan funktiona kahtena eri päivänä. Näistä kuvista on havaittavissa edellä mainittu olosuhteiden muuttuvuus kumpanakin päivänä. Kuvasta 1 nähdään selkeästi, että noin kello 11 asti tuotanto on hyvin tasaista ilman suurempia piikkejä, kun taas kuvassa 2 on havaittavissa selkeitä piikkejä koko päivän ajan, ilman pidempiä tasaisia tuotannon jaksoja.

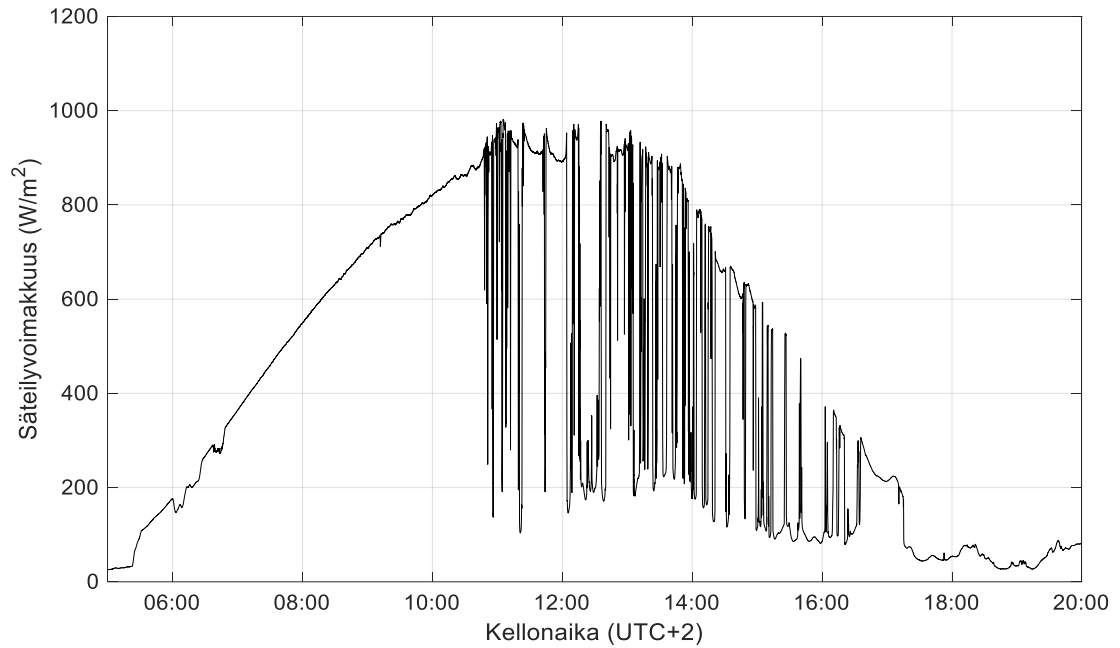


Kuva 1. Aurinkokennovoimalan tuottama teho 11.6.2021.

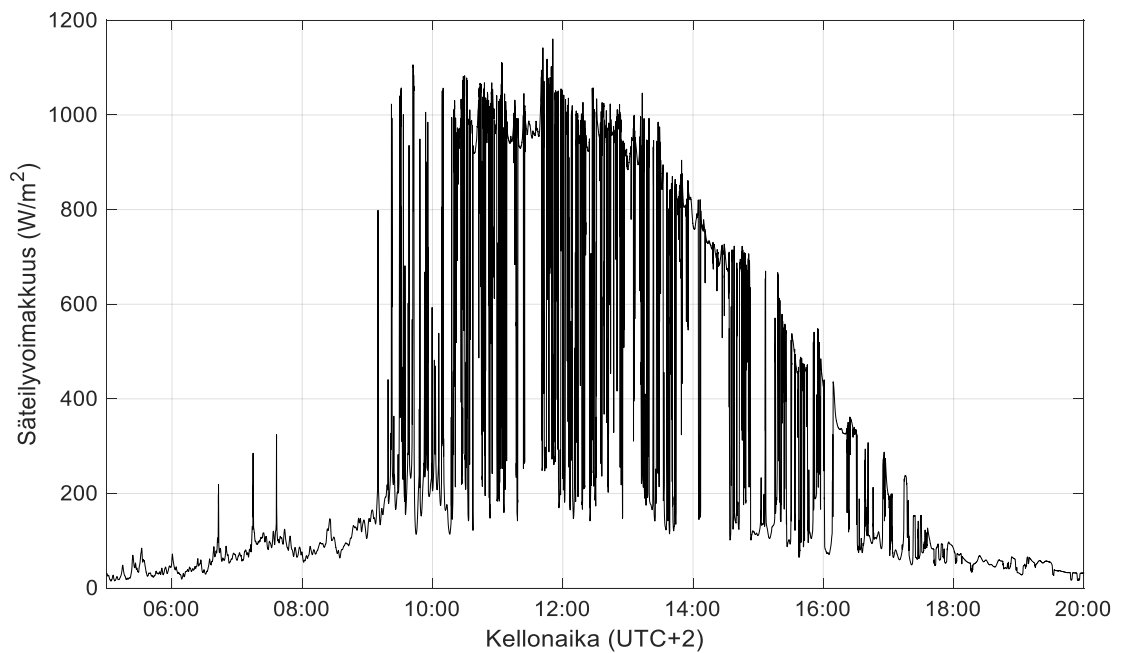


Kuva 2. Aurinkokennovoimalan tuottama teho 15.6.2021.

Kuvat 3 ja 4 taas kuvastavat samalla tapaa kyseisten päivien auringonsäteilyn voimakkuutta, ja näiden kuvaajien perusteella huomataan, että auringonsäteilyn voimakkuus vaikuttaa suoraan tuotettuun tehoon. Kuvat 1 ja 3, sekä 2 ja 4 näyttävät samanlaisilta juuri tämän takia. Tehoon vaikuttaa kuitenkin myös kennojen lämpötila ja pieniä variaatioita voidaan nähdä auringonsäteilyn voimakkuuden ja tehon kuvaajissa tämän seurauksena.



Kuva 3. Auringonsäteilyn voimakkuus 11.6.2021.



Kuva 4. Auringonsäteilyn voimakkuus 15.6.2021.

Kuvasta 1 voidaan havaita, että teho on käynyt lähellä nimellistehoä 3230 W. Toisaalta kun katsotaan kuvaa 2 voidaan huomata, että tuotettu teho on ylittänyt nimellistehon osassa piikeissä. Tämä voidaan perustella STC-olosuhteiden kautta, joiden mukaan au-

ringonsäteilyn voimakkuus on standardiolosuhteissa $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Aurinkopaneelien nimellisteho ilmoitetaan STC-olosuhteissa ja siten nimellisteho pätee $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ auringonsäteilyn voimakkuudella. Kun katsotaan kuvaa 4, huomaamme auringonsäteilyn voimakkuuden arvon osittain ylittävän $1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ ja lähentelevän myös joissain kohdin arvoa $1200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Auringonsäteilyn voimakkuus pilvettömänä päivänä ei nouse Tampereella kuitenkaan näin korkeaksi. Säteilynvoimakkuuden nousu näin korkeaksi voidaan perustella pilvivahvistuksen kautta. Kyseistä ilmiötä on tutkittu samalla aurinkokennovoimalalla lähteessä [18] ja lähteen tarkasteluissa on huomattu, että pilvivahvistuksen takia auringonsäteilyn voimakkuus voi olla jopa 1,5-kertainen pilvettömän päivän auringonsäteilyn voimakkuuden odotusarvoon. Koska tiedämme auringonsäteilyn voimakkuuden vaikuttavan tehoon, ja koska auringonsäteilyn voimakkuus on suurempi kuin STC-olosuhteiden määritetty arvo, on myös tuotettu teho suurempi.

Kyseisten päivien tuotettua tehoa tarkasteltaessa voimme kuitenkin huomata, että vaikka auringonsäteilyn voimakkuus ja hetkellisesti tuotettu teho ovat suurempia 15.6.2021, niin koko päivänä tuotettu keskimääräinen teho on silti pienempi kuin 11.6.2021. Tuloksen voi nähdä kuvaajista ja se voidaan myös perustella datan kautta laskemalla. Tiedämme datan sisältämien datapisteiden lukumäärän, mittausaajuuden ja jokaisen datapisteen tehon, joten voimme laskea keskimääräisen tehon. Keskimääräisen tehon sekä mittausdatan keräysaikavälin avulla voimme vielä laskea tuotetun energian. Keskimääräinen teho voidaan laskea datasta siis kaavalla

$$P_{\text{ka}} = \frac{\sum P_{\text{mp}}}{54\,000}, \quad (7)$$

missä P_{mp} on yhden mittauksen teho ja kyseisten mittausten summa jaetaan 54 000:lla, joka on datapisteiden lukumäärä, mutta toisaalta myös aika sekunneissa. Kaavalla 7 saadaan näin ollen 11.6.2021 keskimääräiseksi tehoksi 1,26 kW ja 15.6.2021 keskimääräiseksi tehoksi 0,99 kW.

Tuotetun energian määrä saadaan kertomalla keskimääräinen teho ajalla, jolta mittaukset on tehty. Koska mittaukset ovat väliltä 05:00–20:00, saadaan mittausajaksi 15 h. Täten kyseisten päivien tuotetut energiamäärät kilowattitunteina ovat 18,95 kWh ja 14,91 kWh.

5. TUOTETUN TEHON TASAAMINEN ENERGIAVARASTON AVULLA

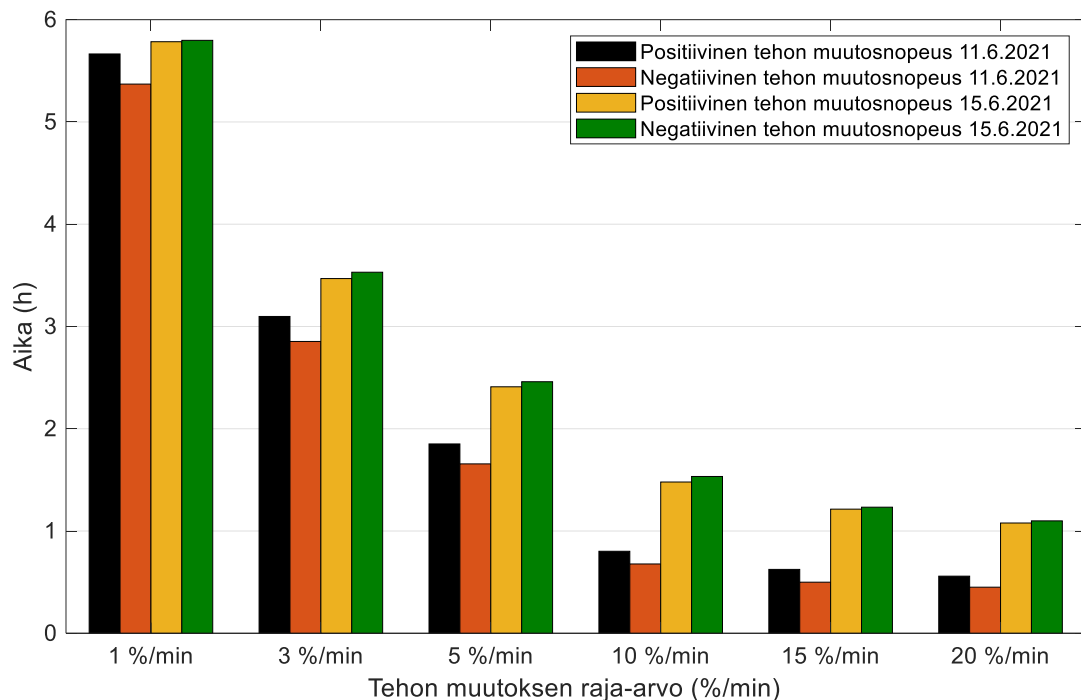
Aurinkokennovoimalan tuotannosta saatu data käsitellään luvussa 3 esitetyllä ramp-rate-menetelmällä, jossa tehon tasaaminen tapahtuu käyttäen hyödyksi verkkoon syötetyn tehon muutosnopeutta ja ennalta asetettuja rajoja tälle muutosnopeudelle. Datan pohjalta pystytään laskemaan verkkoon syötetyn tehon muutosnopeus jokaisen mittauksen välillä ja tätä tietoa hyödyntämällä pystytään laskemaan energiavaraston kapasiteetti sekä tarvittava teho, jolla energiavarastoa pitää purkaa tai ladata tilanteen mukaisesti.

5.1 Tuotetun tehon analysointi ja tasaaminen

Aurinkokennovoimalan tuottama teho 11.6.2021 alkaa varsin tasaisella nousulla noin kello 11 asti, kuten voimme kuvasta 1 huomata, joten tuotannon tasaamista ei juurikaan tarvita. Kuvaajasta on kuitenkin havaittavissa muutama kohta tällä välillä, joissa tuotannon tasaaminen tulee kyseeseen. Näiden piikkien kohdalla energiavarastoa pitää purkaa, sillä tuotanto äkillisesti vähenee, jotta verkkoon syötetyn tehon muutos ei ylitä raja-arvoa. Tämä voidaan perustella luvussa 3 esitellyn kaavan 5 avulla. Kun energian tuotanto äkillisesti pienenee, syntyy negatiivinen muutos verkkoon syötetyn tehon ja aurinkokennovoimalan välille. Tällöin muutosnopeus täyttää kaavan 5 kriteerit, jolloin kyseeseen tulee energiavaraston purkaminen. Koska aurinkokennovoimalan tuotanto on ollut varsin tasaista ja tuotettu teho on päässyt nousemaan lähelle maksimituottoa, energiavarastoa pitää pääasiassa purkaa, jotta pysytään halutuissa verkkoon syötetyn tehon muutosnopeuden rajoissa. Energiavaraston lataaminen tulee kyseeseen, kun aurinkokennovoimalan tuottama teho pysyy matalana pidemmän aikaa ennen nopeaa nousua. Tällainen hetki tulee kuvasta 1 katsottuna kello 12 jälkeen.

Kuvasta 2 voidaan havaita, että aurinkokennovoimalan 15.6.2021 tuottamaa tehoa tarvitsee tasata enemmän kuin 11.6.2021. Kuvasta voidaan myös arvioida, käyttäen luvussa 3 esiteltyä kaavaa 4, että energiavarastoa tullaan ensin lataamaan jonkin verran, jonka jälkeen energiavarastoa tullaan enimmäkseen purkamaan. Kaavan 4 mukaisesti nopeasti noussut aurinkokennovoimalan tehon tuotanto aiheuttaa verkkoon syötettyyn tehoon positiivisen muutosnopeuden, joka taas tarkoittaa sitä, että verkkoon syötettyä tehoa on nostettava hitaasti energiavaraston lataamista hyödyntäen. Ja kuten edellisessä kappaleessa todettiin, energiavaraston purkamiselle syntyy perusteet, kun aurinkokennovoimalan teho laskee nopeasti synnyttäen negatiivisen muutosnopeuden.

Kuvassa 5 on esitetty tuotetun tehon muutosnopeudelle asetettuja raja-arvoja ja aika tunteina, jona raja-arvo on ylittynyt. Huomaamme kuvasta, että tuotetun tehon muutoksen raja-arvon ylittänyt aika kasvaa huomattavasti, kun raja-arvo pienenee. Esimerkiksi 11.6.2021 10–20 $\frac{\%}{\text{min}}$ raja-arvojen ylitysten välillä on noin 15 minuutin ero, kun taas 1–10 $\frac{\%}{\text{min}}$ välillä tasauksen raja-arvon ylittävä aika kasvaa lähes viidellä tunnilla. Kuvan 5 perusteella voidaan siis arvioida, kuinka paljon tuotantoa tarvitsee tasata eri raja-arvoilla. Toisaalta kuvasta 5 voidaan myös huomata, että 15.6.2021 tuotantoa tarvitsee tasata enemmän kaikilla raja-arvoilla kuin 11.6.2021.



Kuva 5. Tuotetun tehon muutokselle asetettujen raja-arvojen ylitykset kuvattuna aikana.

Päättyt voidaan perustella myös laskennan kautta saatavilla tuloksilla. Laskennassa hyödynnetään MATLAB-ohjelmistoa, johon aurinkokennovoimalasta saatu data syötetään ja data käsitellään luvussa 3 esiteltyjen kaavojen mukaisesti. Laskennassa käytetty ohjelmistokoodi on työn lopussa liitteenä. Ohjelmiston avulla lasketaan peräkkäisten mitauspisteiden sähköverkkoon syötetyn tehon ja aurinkokennovoimalan tuottaman tehon erotuksen muutosnopeus. Tehon muutosnopeuden etumerkki määrittelee sen, ladataanko vai puretaanko energiavarastoa. Jos tehon muutosnopeus ylittää ohjelmiston laskentaan merkityn raja-arvon, laskee ohjelmisto sitten energiavaraston purkamiselle tai lataamiselle arvon, jolla verkkoon syötetyn tehon muutosnopeus ei ylitä raja-arvoa. Tilanne voidaan kuvata laskentaa varten kaavoilla

$$P_{\text{ESS}} = \Delta P_{\text{GRID}} \pm RR_{\text{limit}}, \quad (8)$$

$$P_{\text{GRID}} = P_{\text{PV}} - P_{\text{ESS}}, \quad (9)$$

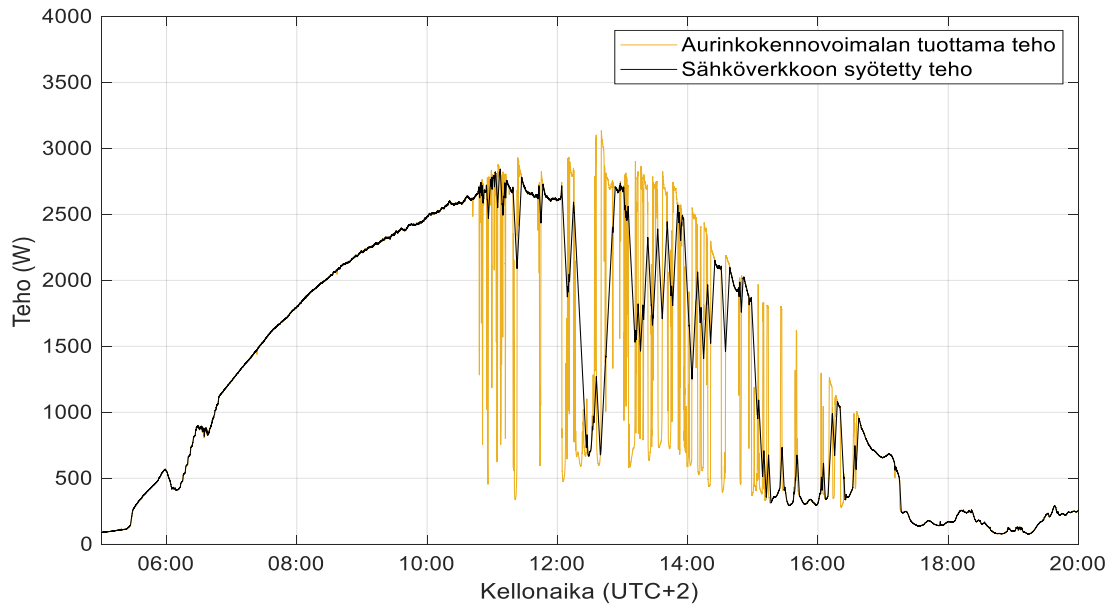
$$P_{\text{GRID}} = P_{\text{PV}}, \quad (10)$$

$$\Delta P_{\text{GRID}} = P_{\text{PV}} - n_{-1}^n P_{\text{GRID}}, \quad (11)$$

jossa muuttuja RR_{limit} kuvastaa raja-arvoa ja sen edessä oleva \pm määräytyy positiiviseksi, kun energiavarastoa puretaan ja negatiiviseksi kun energiavarastoa ladataan. Näiden kaavojen kautta P_{ESS} saa arvon, jolla muutosnopeus RR_{limit} ei ylitä. Kun P_{ESS} saa positiivisen arvon, se tarkoittaa energiavaraston lataamista ja negatiivinen arvo taas tarkoittaa purkamista. Jos muutosnopeus ei ylitä asetettua raja-arvoa, kaava 10 määrää sähköverkkoon syötetyn tehon. Kaavassa 11 lasketaan seuraavalle laskentakierrokselle tieto tehon muutosnopeudesta. Näiden tulosten avulla pystytään rakentamaan kuvaajat energiavaraston tehosta, sähköverkkoon syötetystä tehosta sekä energiavaraston energiasta. [1][2][12]

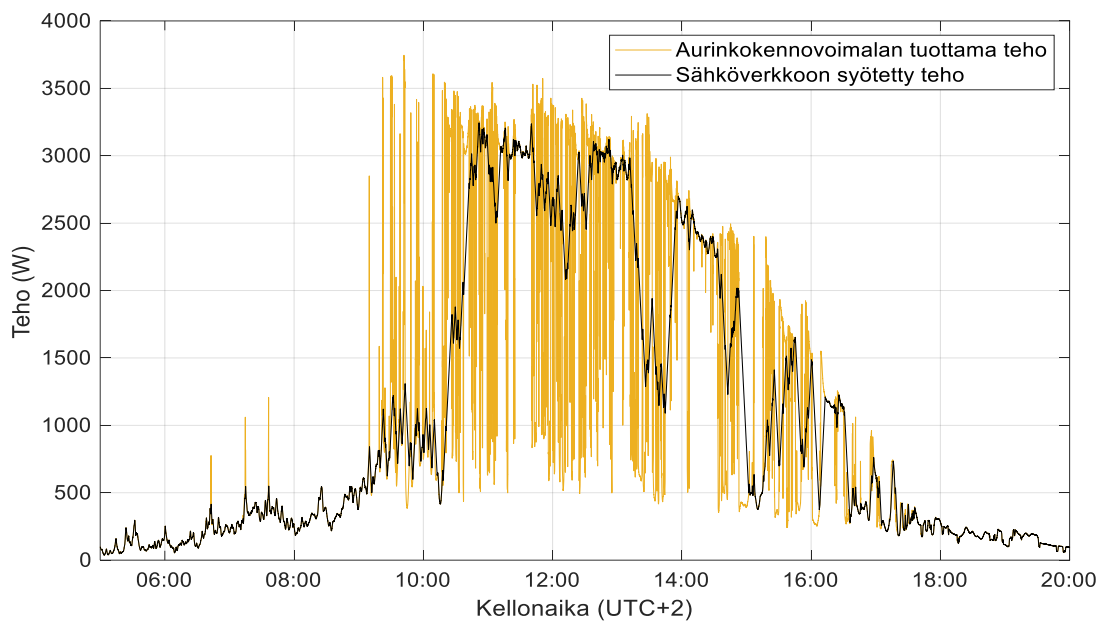
Raja-arvoa RR_{limit} voidaan muuttaa halutun suuruiseksi helposti ohjelmistoon, mikä mahdollistaa eri raja-arvojen vaikutusten vertailun. Nyt suoritettussa laskennassa oletusarvo raja-arvolle on $5 \frac{\%}{\text{min}}$. Valittu raja-arvo on otettu yleisesti käytettyjen RR-raja-arvojen $3 \frac{\%}{\text{min}}$ ja $10 \frac{\%}{\text{min}}$ väliltä. Energiavaraston suunnitteluosiossa vertaillaan myös RR-arvojen $1 \frac{\%}{\text{min}}$, $3 \frac{\%}{\text{min}}$ ja $10 \frac{\%}{\text{min}}$ vaikutuksia energiavaraston suunnitteluun.

Tarkastellaan ensimmäisenä 11.6.2021 tuotetun tehon tasaamisen tuloksia. Kuvassa 6 on esitetty sähköverkkoon syötetty teho ja aurinkokennovoimalan tuottama teho samassa kuvassa eri väreillä. Kuvasta 6 huomaamme, että äkillisiä piikkejä tuotannossa ei ole enää havaittavissa, vaan kaikki äkilliset muutokset on saatu karsittua pois sähköverkkoon syötetystä tehosta. Kuva 6 havainnollistaa myös hyvin eron, joka tehon tasaisella on saavutettu asetetulla $5 \frac{\%}{\text{min}}$ raja-arvolla.



Kuva 6. Vertailukuva aurinkokennovoimalan tuottamasta tehosta sekä sähköverkkoon syötetystä tasatusta tehosta 11.6.2021.

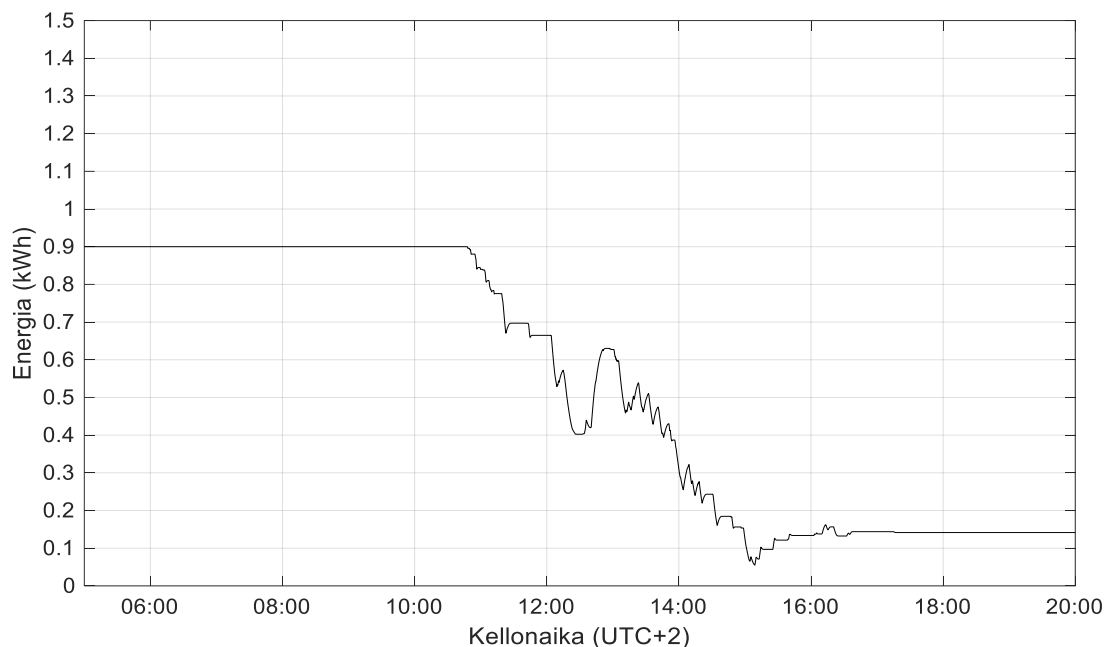
Kuvassa 7 on esitetty 15.6.2021 tuotettu ja tasattu teho eri väreillä. Myös 15.6.2021 aurinkokennovoimalan tuotannon tasaaminen saadaan toteutettua niin, että haluttu tulos saavutetaan, kuten kuvasta 7 huomataan, eli aurinkokennovoimalan tuottamat piikit kaatoavat sähköverkkoon syötetystä tehosta. Kyseisen päivän sähköverkkoon syötettyä tehoa ei kuitenkaan saada yhtä tasaiseksi kuin kuvassa 6 on esitetty.



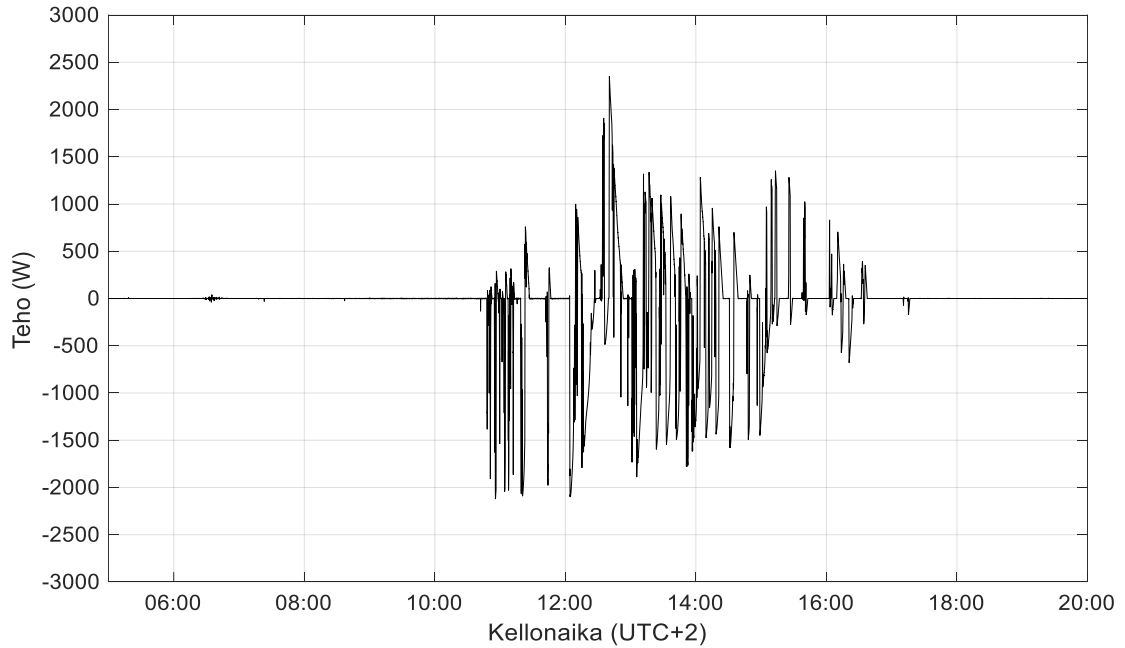
Kuva 7. Vertailukuva aurinkokennovoimalan tuottamasta tehosta sekä sähköverkkoon syötetystä tasatusta tehosta 15.6.2021.

Kuvasta 8 nähdään energiavarastoon varastoitua energiaa 11.6.2021 ja miten se muuttuu päivän mittaan. Kuvaajan muodostamisessa on oletettu, että energiavarastossa on päivän alussa 0,9 kWh energiaa. Tämä lukema on saatu laskemalla kuvaajan minimikohta. Jos oletusta ei tehdä, energiavarastossa olevan energian määrä menee negatiiviseksi, joka ei ole mahdollista. Kuvaajasta havaitaan aikaisemmin analysoitu energiavaraston käyttäytyminen, eli energiavarastoa pääasiassa puretaan koko päivän ajan ja kello 12 jälkeen tulee hetki, jolloin energiavarastoa ladataan. Laskennasta saadaan myös summatut arvot koko päivän aikana puretulle ja ladatulle energialle. Kyseiset summat ovat energiavarastosta puretulle energialle noin 1,7 kWh ja energiavarastoon ladatulle energialle noin 0,9 kWh. Koko päivän aikana energiavarastosta purettiin siis noin 0,8 kWh.

Aikaisempaa analyysiä energiavaraston käyttäytymisestä voidaan verrata myös kuvaan 9, jossa on esitetty energiavaraston teho ajan suhteen 11.6.2021. Kuvaajassa negatiivinen teho kuvastaa energiavaraston purkamista, ja positiivinen teho kuvastaa energiavaraston lataamista. Voimme kuvaajasta huomata, että energiavaraston tehosta enemmistö on negatiivista. Samasta kuvaajasta nähdään myös, ettei tasaamista juurikaan tarvita ennen kello 11, kuten teorian ja tuotetun tehon kuvan 1 perusteella arvioitiin. Kuvasta 9 voidaan myös huomata, että energiavaraston lataamista ei tarvitse toteuttaa kovin suurella teholla muutamaa piikkiä lukuunottamatta, kun taas purkamista tarvitsee toteuttaa keskimääräisesti suuremmalla teholla.



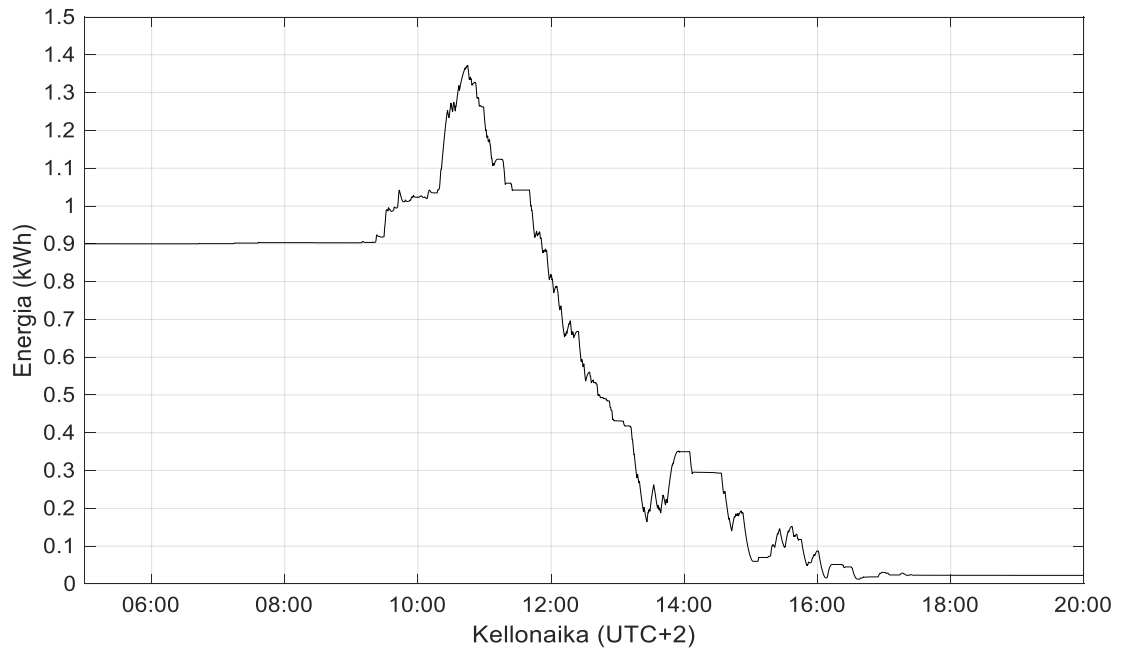
Kuva 8. Energiavarastoon varastoidun energian määrä ajan funktiona 11.6.2021.



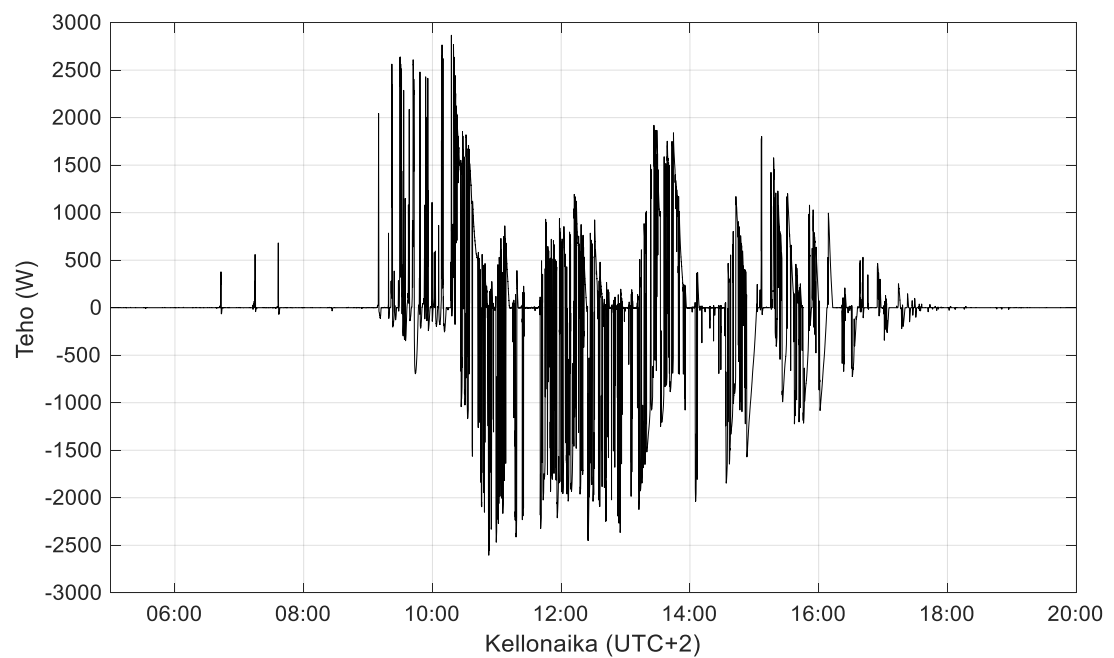
Kuva 9. Energiavaraston teho ajan funktiona 11.6.2021.

Kuvassa 10 esitetään energiavarastoon varastoitu energiamäärä 15.6.2021 ja sen muutokset päivän aikana. Kuvan 10 avulla voidaan huomata analyysin mukainen muutos energiavaraston sisältämässä energiassa. Energiavarastoa ladataan ensin, sillä tuotannossa oli voimakas nousupiikki, ja kuvassa 10 tämä voidaan huomata energiavaraston sisältämän energian kasvuna. Energiavarastoa ruvetaan purkamaan sen jälkeen, kun aurinkokennovoimalan tuottama teho pienenee. Myös kuvaa 10 on muokattu asettamalla päivän aluksi energiavaraston energiaksi 0,9 kWh, jotta kuvaaja ei menisi negatiiviseksi päivän aikana. Tämä energiamäärä saatiin ottamalla kuvaajasta miniarvo. Laskennan kautta saadun datan mukaisesti päivän aikana energiavarastoon on ladattu noin 1,7 kWh ja energiavarastosta on purettu sähköverkkoon noin 2,6 kWh. Kuvaajasta ja arvojen kautta huomataan, että kokonaisuudessa energiavarastosta purettiin päivän aikana noin 0,9 kWh.

Kuvassa 11 on esitetty energiavaraston teho 15.6.2021. Energiavaraston purku- ja lataustehon muutokset ovat kuvassa 11 rajumpia kuin kuvassa 9 ja niitä on myös enemmän. Kuvan mukaisesti päivän aikana energiavarastoa puretaan enemmän kuin ladataan, sillä enemmistö tehosta on negatiivista, ja edellä mainitut laskennasta saadut arvot energialle todistavat saman asian. Toisaalta suuret tehopiikit kuvastavat sitä, että tehon muutokset aurinkokennovoimalan tuotannossa ovat varsin suuria, sillä voimakkaan tehon muutoksen rajoittaminen vaatii myös suuren tehon energiavarastosta, kuten kaavasta 9 nähdään.



Kuva 10. Energiavarastoon varastoidun energian määrä ajan funktiona 15.6.2021.



Kuva 11. Energiavaraston teho ajan funktiona 15.6.2021.

Lopullinen sähköverkkoon syötetty energia koko päivän ajalta on suurempi kuin aurinkokennovoimalan tuotanto, sillä kumpanakin päivänä energiavarastoa purettiin lataamisen sijasta. Aurinkokennovoimala ilman tuotannon tasaamista tuotti 11.6.2021 18,95 kWh ja

15.6.2021 14,91 kWh. Tasattu sähköverkkoon syötetty energia saadaan lisäämällä näihin energiavarastosta purettu energia. Eli 11.6.2021 sähköverkkoon syötetty energia on 19,71 kWh ja 15.6.2021 tämä energia on 15,79 kWh.

5.2 Tarvittavan energiavaraston suunnittelu

Luvussa 5.1 esiteltiin tuotannon tasaamisen laskentaa sekä aurinkokennovoimalan tuotannon tasaamisesta saadut tulokset. Tuotannon tasaamista varten tarvitaan energiavarasto, joka täyttää kriteerit lataus- ja purkutehosta, kapasiteetista sekä reaktionopeudesta. Luvussa 3 kerrottiin, että energianvarastointi rajoittuu ESS-järjestelmään. ESS on valittu energianvarastointiin sen ominaisuuksien perusteella. Aurinkokennovoimalan tuottamat muutokset ovat nopeita, joten niihin pitää pystyä reagoimaan nopeasti, kuten huomaamme kuvista 9 ja 11. Oikein suunniteltu ESS mahdollistaa reaktionopeuden millisekunnista sekunnin aikavälille ja tarjoaa samalla mahdollisuudet sopivalle energiakapasiteetille ja lataus- ja purkuteholle. Näin suunniteltu ESS mahdollistaa lyhyen aikavälin ilmiöihin reagoinnin, joihin aurinkokennovoimalan tuotannon tasaaminen kuuluu. [19][20] Seuraavaksi puretaan luvussa 5.1 käsiteltyä dataa tuotannon tasaamisesta ja minkälaisia vähimmäisominaisuuksia vaaditaan tuotannon tasaamiseen käytettävältä ESS-järjestelmältä.

Luvussa 5.1 esitellyistä kuvista 9 ja 11 voidaan lukea maksimitehot energiavaraston purkamiselle ja lataamiselle annetun datan pohjalta. Toisaalta tiedämme, kuinka paljon aurinkokennovoimalan tuottama maksimiteho on. Energiavaraston purkamis- ja lataamisteho eivät voi ylittää aurinkokennovoimalan tuottamaa tehoa, sillä kaavan 3 mukaisesti aurinkokennovoimalan tuottama teho on yhtä suuri kuin verkkoon syötetyn tehon ja energiavaraston tehon summa. Tilanne, jossa energiavarastoa pitäisi purkaa aurinkokennovoimalan teholla syntyisi siis, jos koko aurinkokennovoimalan tuotanto putoaisi nolnaan. Kuvasta 9 voidaan lukea energiavaraston maksimilataustehoksi noin 2350 W ja maksimipurkutehoksi noin 2150 W, kun taas kuvassa 11 maksimilatausteho on noin 2900 W ja maksimipurkuteho noin 2600 W. Korkein aurinkokennovoimalan tuottama teho on datan mukaan noin 3750 W. Energiavaraston purku- ja latausteho olisi kuitenkin hyvä yllimitoittaa tästä arvosta varmuuden vuoksi. Jos purku- ja lataustehoksi vaadittaisiin energiavarastolta 4000 W, olisi varmuusvaraa datan suurimpaan purku- ja lataustehoon noin 38 % ja noin 7 % aurinkokennovoimalan maksimitehoon. Tämän arvon pitäisi olla riittävä, sillä aurinkokennovoimalan maksimiteho 3750 W on valmiiksi suuri pilvivahvistusilmiön takia. Toisaalta tilanne, jossa aurinkokennovoimalan tuotanto putoaisi äkillisesti nolnaan, ei tapahdu useasti. Tällöin mahdollinen äkillinen tehon muutos verkkoon jäisi yksittäiseksi ja harvinaiseksi ilmiöksi.

Energiavaraston koon suunnittelun apuna voidaan käyttää kuvia 8 ja 10. Kuvaajista nähdään maksimienergiamäärät kilowattitunteina kyseisinä päivinä. Kuvasta 10 saadaan tarvittava vähimmäiskoko energiavarastolle, joka on noin 1,36 kWh, sillä kuvassa 8 suurin tarvittava energiavaraston koko on vain noin 0,84 kWh. Energiavarasto kannattaa kuitenkin myös suunnitella tätä arvoa suuremmaksi. Liian suuri ylityö ei kuitenkaan ole järkevää, sillä energiavaraston kustannukset nousevat ja ylimääräinen kapasiteetti ei välttämättä tule ollenkaan käyttöön kyseisessä käyttötavassa, jolloin pääomaa olisi sidottu turhaan kyseiseen energiavarastoon [13][19]. Jos energiavarasto suunnitellaan 3 kWh kokoiseksi on energiavarasto tarpeeksi suuri korjaamaan datan mukaiset muutokset ja energiavaraston pitäisi pystyä kompensoimaan vieläkin rajumpia heilahteluja yhden päivän ajalla datan perusteella.

Asetetulla raja-arvolla $RR_{\text{limit}} = 5 \frac{\%}{\text{min}} \approx 2,7 \frac{\text{W}}{\text{s}}$ saatuja tuloksia on hyvä myös verrata raja-arvoihin $1 \frac{\%}{\text{min}}$, $3 \frac{\%}{\text{min}}$ ja $10 \frac{\%}{\text{min}}$. Näistä raja-arvoista ei esitetä kuvaajia, vaan laskennasta saatuja arvoja verrataan toisiinsa sekä analysoidaan. Laskennasta saadut tulokset päivältä 11.6.2021 esitetään taulukossa 1 ja päivältä 15.6.2021 saadut tulokset esitetään taulukossa 2. Käyttämällä $10 \frac{\%}{\text{min}}$ raja-arvoa koko päivän aikana energiavarastosta purettu energia putoaisi 11.6.2021 noin 0,4 kWh ja 15.6.2021 purettu energia putoaisi noin 0,3 kWh. Myös tarvittavan energiavaraston koko pienenesi molempina päivinä saman verran. Suurimmat lataus- ja purkutehot putoavat noin 0–100 W. Pienemmällä $3 \frac{\%}{\text{min}}$ raja-arvolla 11.6.2021 purettu energiamäärä kasvaa noin 0,4 kWh ja ladattu energiamäärä pysyy lähes samana. Tällä raja-arvolla 15.6.2021 purettu ja ladattu energiamäärä nousee noin 0,2 kWh. Suurimmat lataus- ja purkutehot pysyvät hyvin lähellä samoja arvoja kuin $5 \frac{\%}{\text{min}}$ raja-arvolla. Tarvitun energiavaraston vähimmäiskoko kuitenkin kasvaa 11.6.2021 noin 0,35 kWh ja 15.6.2021 vähimmäiskoko kasvaa noin 0,25 kWh. Voimme näiden tulosten pohjalta perustella, että energiavaraston vähimmäiskoko kasvaa eksponentiaalisesti, kun raja-arvoa pienennetään. Samankaltaiseen tulokseen on päädytty lähteissä [11], [12] ja [13]. Raja-arvon oikea asettaminen on siis tärkeää.

Taulukoidut mitoitus-suositukset energiavaraston koolle eri raja-arvoilla on mitoitettu samalla suhteella kuin $5 \frac{\%}{\text{min}}$ raja-arvolla saatu mitoitus-suositus 15.6.2021. Mitoitus-suositus on suunniteltu noin 55 % suuremmaksi kuin vähimmäiskoko. Tämän on arvioitu olevan tarpeeksi suuri varmuusvara vähimmäiskokoon ja tällä mitoitus-suosituksella energiavarasto pystyy kompensoimaan annettua dataa rajummat muutokset. Pidemmän aikavälin data mahdollistaisi paremman mitoitus-suosituksen antamisen.

Taulukko 1. Tulokset eri raja-arvoilla sekä mitoitussuosituksset 11.6.2021.

Raja-arvo	1 %/min	3 %/min	5 %/min	10 %/min
Energiavarastosta purettu energia	2,93 kWh	2,08 kWh	1,70 kWh	1,31 kWh
Energiavarastoon ladattu energia	0,67 kWh	0,95 kWh	0,94 kWh	0,91 kWh
Suurin purkuteho	2,28 kW	2,19 kW	2,12 kW	2,07 kW
Suurin latausteho	1,27 kW	2,37 kW	2,35 kW	2,28 kW
Vähimmäiskoko energiavarastolle	2,38 kWh	1,20 kWh	0,84 kWh	0,47 kWh
Mitoitussuositus: Energiavaraston koko / teho	5,25 kWh / 4 kW	2,64 kWh / 4 kW	1,86 kWh / 4 kW	1,04 kWh / 4 kW

Taulukko 2. Tulokset eri raja-arvoilla sekä mitoitussuosituksset 15.6.2021.

Raja-arvo	1 %/min	3 %/min	5 %/min	10 %/min
Energiavarastosta purettu energia	3,13 kWh	2,75 kWh	2,56 kWh	2,13 kWh
Energiavarastoon ladattu energia	2,78 kWh	1,90 kWh	1,68 kWh	1,52 kWh
Suurin purkuteho	2,33 kW	2,45 kW	2,60 kW	2,55 kW
Suurin latausteho	2,85 kW	2,92 kW	2,87 kW	2,78 kW
Vähimmäiskoko energiavarastolle	2,11 kWh	1,62 kWh	1,36 kWh	0,93 kWh
Mitoitussuositus: Energiavaraston koko / teho	4,67 kWh / 4 kW	3,58 kWh / 4 kW	3,00 kWh / 4 kW	2,05 kWh / 4 kW

Tuotannon tasaamisen tuloksia tarkastellessa voidaan huomata, että energiavaraston purkamista on tarvittu enemmän kuin lataamista kummankin päivän aikana. Tämä johtaa tilanteeseen, jossa energiavarastoa tarvitsee erikseen ladata etukäteen, jotta energiavarastossa on tarpeeksi energiaa koko päivän ajalle. Energiavaraston lataaminen etukäteen voitaisiin kuitenkin eliminoida muokkaamalla käytettyä laskentaa, sillä muokkaamalla laskentaa voitaisiin määrittää ehto, joka lataisi energiavarastoa tiettyyn pisteeseen asti hyödyntäen aurinkokennovoimalan omaa tuotantoa. Energiavarastolle tämän ehdon käyttöönotto tarkoittaisi käytännössä ohjausalgoritmin käyttöönottamista, joka vastaisi SOC:n ylläpitämisestä. Tätä ei kuitenkaan ole toteutettu tässä työssä, sillä työn tavoit-

teena oli osoittaa tuotannon tasaamisen teorian toimivuus oikeassa toimintaympäristössä datan pohjalta. SOC:n käyttöön otolla voisi olla muitakin etuja ennakkoon lataamisen eliminoimisen lisäksi, kuten ylikuormituksesta tai liiallisesta purkamisesta aiheutuvan järjestelmän kaatumisen estäminen. [1]

Tuotannon tasaamisessa käytettävän ESS-järjestelmän pitää siis kyetä $5 \frac{\%}{\text{min}}$ raja-arvolla reagoimaan nopeisiin tehon muutoksiin sekunnissa, sitä pitää pystyä sekä purkamaan että lataamaan noin 4 kW teholla, ja sen pitää kyetä varastoimaan noin 3 kWh energiaa. Jos raja-arvoa muutettaisiin, niin teho pysyisi samassa 4 kW arvossa, mutta energiavaraston koko muuttuisi, kuten taulukoista 1 ja 2 voidaan huomata.

Näiden tietojen pohjalta voi lähteä suunnittelemaan tarkemmin käytettävää ESS-järjestelmää ja siinä käytettäviä teknologioita, mutta tämän työn yhteydessä jatkosuunnittelua ei tehdä. Laajemmalla datan käsittelyllä pystyttäisiin arvioimaan tarvittua energiavarastoa paremmin ja esimerkiksi kokonaisen vuoden datan arvioiminen mahdollistaisi tarkemman analyysin. Lähteessä [12] on käsitelty yhden vuoden dataa tilanteessa, jossa energiavaraston lataustila palautetaan joka yö perusarvoon. Saadut tulokset tällä aikavälillä vaihtelevat huomattavasti. Olisi siis perusteltua käyttää ja hyödyntää pidemmän aikavälin dataa energiavaraston suunnittelua varten.

6. YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli käsitellä aurinkokennovoimalan tuotannon tasaamista ramp-rate-menetelmällä kahtena sääolosuhteiltaan erilaisena päivänä. Työn aihetta pohjustettiin ensin selittämällä aurinkokennovoimalan toimintaperiaatetta sekä rakennetta, jonka jälkeen käsiteltiin eri toimintaperiaatteita, miten tuotantoa voidaan tasata. Samalla pohjustettiin syitä, joiden takia tuotantoa tarvitsee tasata. Tämän jälkeen esiteltiin aurinkokennovoimala, jonka tuotantoa tasattiin työssä sekä esiteltiin tasattavan tuotannon data. Työn kannalta olennaista oli hyödyntää työn alussa esiteltyä teoriaa tasausmenetelmistä yhdessä datan kanssa. Yhdistelemällä teoria ja data MATLAB-laskennan kautta päästiin kiinni työn tärkeimpiin tuloksiin, havaintoihin sekä päättelyihin.

Työn päätavoitteena oli rajoittaa sähköverkkoon syötetyn tehon vaihtelua energiavaran avulla. Tuotannon tasaamisessa pyrittiin siis pääsemään tilanteeseen, jossa sähköverkkoon syötettävän tehon muutosnopeus ei ylittänyt asetettua raja-arvoa. Tuotannon tasaaminen toteutettiin käyttämällä luvussa 3 esiteltyä ramp-rate-menetelmää, jossa energiavaraa puretaan tai ladataan tarpeen mukaan. Tällä menetelmällä tuotannon tasaaminen onnistui hyvin ja sähköverkkoon syötetty teho oli huomattavasti tasaisempaa kuin lähtötilanteiden tuotettu teho, joka vaihteli äkillisesti sekä muutokset olivat varsin suuria. Lähtötilanteiden tuotetun tehon vaihtelevuus vaikuttaa myös tasatun tehon kuvaajiin. Rajumpi vaihtelu lähtötilanteen tuotetussa tehossa näkyi myös rajumpana vaihteluna tasatun tehon kuvaajan muodossa. Tärkein huomio verkkoon syötetystä tasatusta tehosta on siis se, että nopeat tehopiikit katoavat. Tuotanto tasattiin asetettuun raja-arvoon $5 \frac{\%}{\text{min}}$, eli tuotetun tehon muutosnopeus ei ylittänyt tätä arvoa päivän aikana. Myös muiden raja-arvojen vaikutusta arvioitiin taulukoimalla niillä saatuja tuloksia. Saavutettu tulos on hyvin havaittavissa kuvista 6 ja 7, sillä näissä lähtötilanne sekä saavutettu tulos on esitetty päällekkäin.

Työn toisena tavoitteena oli perustella, minkälainen energiavara tarvitaan tuotannon tasaamista varten. Energiavaran perustelu toteutettiin hyödyntämällä tuotannon tasaamisen laskennasta saatuja tuloksia, joista ilmeni energiavaraolta tarvittavat purku- ja lataustehot sekä energiavaran energiamäärä, joka käytettiin tasaisen tehon saavuttamiseen. Nämä tehot ja energiamäärät ovat nähtävissä kuvissa 8–11. Energiavaran suunnittelua varten oleelliset luvut on myös taulukoitu taulukkoihin 1–2 ja näissä on myös havainnollistettu erilaisten raja-arvojen vaikutus oleellisiin lukuihin sekä mitoitus-suosituksiin. Energiavaran suurin purkuteho on noin 2600 W, sekä suurin latausteho

on noin 2900 W. Nämä tehot ylimitoitetaan mitoitussuositukseen varmuuden vuoksi arvoon 4000 W. Tuotannon tasaaminen vaatii siis energiavaraston, jonka ominaisuuksiin kuuluu 4 kW purku- ja latausteho asetetusta raja-arvosta riippumatta. Toisaalta energiavarastolta vaaditaan myös kyky reagoida tehossa tapahtuviin muutoksiin alle sekunnissa. Energiavaraston koko riippuu asetetusta raja-arvosta. Esimerkiksi raja-arvolla $10 \frac{\%}{\text{min}}$ energiavaraston kooksi riittää 2,05 kWh, kun taas $1 \frac{\%}{\text{min}}$ raja-arvolla energiavaraston koko pitää olla 5,25 kWh. Työssä keskityttiin raja-arvoon $5 \frac{\%}{\text{min}}$ ja tällä raja-arvolla energiavaraston koko pitää olla 3,00 kWh. Huomataan siis, että raja-arvon asettamisella on iso vaikutus energiavaraston suunnitteluun sekä kokonaiskustannukseen, sillä energiavaraston kokonaiskustannukset määräytyvät pitkälti energiavaraston koon mukaan. Raja-arvon oikea asettaminen on siis tärkeää kustannusten sekä toiminnallisuuden kannalta. Toisaalta käytetty data oli rajoittunut vain kahteen päivään ja parempien mitoitussuositusten antamista varten laajemman datan käyttö olisi hyödyllistä.

Työ jättää avoimeksi energiavaraston lopullisen suunnittelun, jossa huomioitaisiin mitoitussuositukset sekä muut tarpeellisiksi nähdyt ominaisuudet. Energiavaraston lopullinen suunnittelu on tärkeä osa tuotannon tasaamista tämän työn menetelmää hyödynnettäessä, sillä tasaaminen riippuu täysin energiavarastosta. Tässä työssä on kuitenkin pohjustettu suunnittelua ja kerätty tarvittavia tietoja suunnittelua varten, jotta jatkosuunnittelu olisi mahdollisimman helppoa. Kyseisen energiavaraston suunnittelu olisi hyvä kohde jatkosuunnittelulle työn aihepiiristä. Myös energiavaraston tarkempien mitoitussuositusten antaminen laajemman datan pohjalta olisi hyvä tutkimuskohde aihepiiristä.

Työn tavoitteet siis saavutettiin ja tuotanto saatiin tasattua. Energiavaraston suunnittelua varten saatiin tärkeitä pohjatietoja ja todettiin tämä myös työn jatkosuunnittelukohteeksi. Tarkasteltaessa työssä käytettyjen lähteiden [1] ja [13] tuloksia tuotannon tasaamisesta, voidaan todeta tämän työn tulosten noudattavan samaa linjaa. Energiavaraston suunnittelun tulokset taas noudattavat samaa linjaa lähteiden [11], [12] ja [13] kanssa. Työtä voidaan pitää siis onnistuneena kokonaisuutena.

LÄHTEET

- [1] S. Sukumar, M. Marsadek, K. R. Agileswari, H. Mokhlis, Ramp-rate control smoothing methods to control output power fluctuations from solar photovoltaic (PV) sources—A review, *Journal of Energy Storage*, Vol. 20, 2018, pp. 218–229.
- [2] D. S. Kumar, S. Maharjan, A., D. Srinivasan, Ramp-rate limiting strategies to alleviate the impact of PV power ramping on voltage fluctuations using energy storage systems, *Solar Energy*, Vol. 234, 2022, pp. 377–386.
- [3] P. Jayarama Reddy, *Solar power generation: Technology, new concepts & policy*, CRC Press, Boca Raton Florida, USA, 2012, 249 p.
- [4] P. Breeze, *Solar power generation*, Academic Press, Amsterdam, Netherlands, 2016, 101 p.
- [5] A. Gupta, *Solar photovoltaics engineering: A power quality analysis using Matlab simulation case studies*, Anchor Academic Publishing, Hamburg, Germany, 2016, 125 p.
- [6] M. Cardona, T. A. Meyer, M. L. W. Thewalt, Temperature Dependence of the Energy Gap of semiconductors in the Low-Temperature Limit, *Physical Review Letters*, Vol. 92, Iss. 19, 2004
- [7] B. Sørensen, *Solar energy storage*, Academic Press, Amsterdam, Netherlands, 2015, 400 p.
- [8] M. B. Hayat, D. Ali, K. C. Monyake, L. Alagha, N. Ahmed, Solar energy—A look into power generation, challenges, and a solar-powered future, *International journal of energy research*, Vol. 43, No. 3, 2019, pp. 1049–1067.
- [9] Y. Sun, Z. Zhao, M. Yang, D. Jia, W. Pei, B. Xu, Overview of Energy Storage in Renewable Energy Power Fluctuation Mitigation, *CSEE journal of power and energy systems*, Vol. 6, No. 1, 2020, pp. 160–173.
- [10] Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet = Voltage characteristics of electricity networks, Suomen Standardisoimisliitto, SFS-EN 50160:2010+A1:2015 + A2:2019 + A3:2019, Helsinki, 2019
- [11] E. Cirés, J. Marcos, I. de la Parra, M. García, L. Marroyo, The potential of forecasting in reducing the LCOE in PV plants under ramp-rate restrictions, *Energy*, Vol. 188, 2019
- [12] J. Marcos, O. Storkel, L. Marroyo, M. García, E. Lorenzo, Storage requirements for PV power ramp-rate control, *Solar Energy*, Vol. 99, 2014, pp. 28–35.
- [13] J. Schnabel, S. Valkealahti, Energy Storage Requirements for PV Power Ramp Rate Control in Northern Europe, *International Journal of Photoenergy*, Vol. 2016, 2016
- [14] Ohjepankki – Sähköntuotannon liittäminen jakeluverkkoon, Tampereen sähköverkko, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21.3.2022): <https://www.sahko-laitos.fi/tampereen-sahkoverkko/ohjeet-ja-lomakkeet/ohjepankki/>

- [15] I. de la Parra, J. Marcos, M. García, L. Marroyo, Control strategies to use the minimum energy storage requirement for PV power ramp-rate control, *Solar Energy*, Vol. 111, 2015, pp. 332–343.
- [16] Tampere University Photovoltaic Power Plant Weather Data, Tampere University, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 3.3.2022): <https://webpages.tuni.fi/solar/>
- [17] D. Torres Lobera, A. Mäki, J. Huusari, K. Lappalainen, T. Suntio, S. Valkealahti, Operation of TUT Solar PV Power Station Research Plant under Partial Shading Caused by Snow and Buildings, *International Journal of Photoenergy*, Vol. 2013, 2013, 837310.
- [18] M. Järvelä, K. Lappalainen, S. Valkealahti, Characteristics of the cloud enhancement phenomenon and PV power plants, *Solar Energy*, Vol. 196, 2020, pp. 137–145.
- [19] Y. Hou, R. Vidu, P. Stroeve, Solar Energy Storage Methods, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 50, Iss. 15, 2011, pp. 8954–8964.
- [20] K. C. Divya, J. Østergaard, Battery energy storage technology for power systems—An overview, *Electric Power Systems Research*, Vol. 79, Iss. 4, 2009, pp. 511–520.

LIITE A: LASKENNASSA KÄYTETTY MATLAB OHJELMISTOKOODI

```
%Avaa ja nimeä muuttujat
Data1=open("Data_2021-06-11.mat");
P1=Data1.Data.P_PV;
G1=Data1.Data.G_mean;
T1=Data1.Data.T_mean;
%Muuta aika datetime muotoon
time1=datetime(Data1.Data.time);

%Teho ajan funktiona
plot(time1, P1, 'color', 'black')
title('Aurinkokennovoimalan teho')
xlabel('Kellonaika (UTC+2)')
ylabel('Teho (W)')
%Avaa ja nimeä muuttujat
Data2=open("Data_2021-06-15.mat");
P2=Data2.Data.P_PV;
G2=Data2.Data.G_mean;
T2=Data2.Data.T_mean;
%Muuta aika datetime muotoon
time2=datetime(Data2.Data.time);

%Teho ajan funktiona
plot(time2, P2, 'color', 'black')
title('Aurinkokennovoimalan teho')
xlabel('Kellonaika (UTC+2)')
ylabel('Teho (W)')

%Auringonsäteilyn voimakkuus ajan suhteen 11.6.2021
plot(time1, G1, 'color', 'black')
title('Auringonsäteilyn voimakkuus')
xlabel('Kellonaika (UTC+2)')
ylabel('Säteilyvoimakkuus (W/m^2)')
%Auringonsäteilyn voimakkuus ajan suhteen 15.6.2021
plot(time2, G2, 'color', 'black')
title('Auringonsäteilyn voimakkuus')
xlabel('Kellonaika (UTC+2)')
ylabel('Säteilyvoimakkuus (W/m^2)')

%Tuotettu teho
P1_mean=sum(P1,"all","default")/54000;
P2_mean=sum(P2,"all","default")/54000;
%Kilowatteja
P1_kwh=(P1_mean/1000)*15;
P2_kwh=(P2_mean/1000)*15;
```

```

%Datan käsittely
%P_PV=P_ESS+P_GRID
x=(3230*0.05)/60; %raja-arvo noin 2,7 W/s
delta_P1_GRID=zeros(54000,1);
P_ESS=zeros(54000,1);
P_GRID=zeros(54000,1);
P_PV=P1;
P_GRID(1)=P_PV(1);
muutosnopeus1=zeros(54000,1);
%Suoritetaan laskenta joka määrittelee mikä toimenpide
%pitää tehdä, jotta sähköverkkoon syötetty teho pysyy
%rajoissa

for i=2:54000
    delta_P1_GRID(i) = P_PV(i) - P_GRID(i-1);
    %Jos muutosnopeus rajojen sisällä
    % -> koko aurinkokennovoimalan teho siirtyy sähköverkkoon
    if (x > delta_P1_GRID(i)) && (delta_P1_GRID(i) > -x)
        P_GRID(i) = P_PV(i);

        %Jos muutosnopeus positiivinen ja ylittää rajan
        % -> ladataan energiavarastoa
        elseif delta_P1_GRID(i) > x
            P_ESS(i) = delta_P1_GRID(i) - x;
            P_GRID(i) = P_PV(i) - P_ESS(i);

        %Jos muutosnopeus negatiivinen ja ylittää rajan
        % -> puretaan energiavarastoa
        elseif delta_P1_GRID(i) < -x
            P_ESS(i) = delta_P1_GRID(i) + x;
            P_GRID(i) = P_PV(i) - P_ESS(i);

    end
end

P_ESS_purku=0;
P_ESS_lataus=0;
P_ESS_kuvaaja=zeros(54000,1);
% Luku 0.91 kuvastaa kWh määrää, joka pitää olla
% energiavarastossa, jotta energiavarasto ei mene nollan alapuolelle.
P_ESS_kuvaaja(1)=0.9; %kWh
for i=2:54000
    %Energiavarastosta purettavan energian summa
    if P_ESS(i) < 0
        P_ESS_purku=P_ESS_purku+P_ESS(i);
        %Jaettu 3 600 000, niin Joulet->kWh
        P_ESS_kuvaaja(i)=P_ESS_kuvaaja(i-1)+P_ESS(i)/3600000;
    %Energiavarastoon ladattava energian summa
    elseif P_ESS(i) > 0
        P_ESS_lataus=P_ESS_lataus+P_ESS(i);
    end
end

```

```

        %Jaettu 3 600 000, niin Joulet->kWh
        P_ESS_kuvaaja(i)=P_ESS_kuvaaja(i-1)+P_ESS(i)/3600000;
    else
        P_ESS_kuvaaja(i)=P_ESS_kuvaaja(i-1);
    end
end
plot(time1,P_ESS_kuvaaja, 'color', 'black')
title('Energiavaraston energia')
xlabel('Kellonaika (UTC+2)')
ylabel('Energia (kWh)')
P_ESS_kuvaaja_min=min(P_ESS_kuvaaja);

P_ESS_sum=sum(P_ESS); %Energia jouleissa
P_ESS_sum_kWh=P_ESS_sum/3600000;
P_ESS_max=max(P_ESS); %Maksimi teho ladattaessa
P_ESS_min=min(P_ESS); %Maksimi teho purettaessa
%Energiavaraston energia
%P=E/t->E=P*t
P_ESS_purku_mean=(P_ESS_purku/54000);
P_ESS_lataus_mean=(P_ESS_lataus/54000);
E_ESS_purku=(P_ESS_purku_mean/1000)*15; %Purettavan energianmäärä kWh
E_ESS_lataus=(P_ESS_lataus_mean/1000)*15; %Ladattavan energianmäärä kWh

plot(time1,P_ESS, 'color', 'black')
title('Energiavaraston teho')
xlabel('Kellonaika (UTC+2)')
ylabel('Teho (W)')

plot(time1,P1, 'color', '[0.93,0.69,0.13]')
title('Sähköverkkoon syötetty teho')
xlabel('Kellonaika (UTC+2)')
ylabel('Teho (W)')

hold on
plot(time1,P_GRID, 'color', 'black')
hold off

close
P2_PV=P2; %Alustetaan muuttujaan aurinkokennovoimalan teho
delta_P2_GRID=zeros(54000,1);
P2_ESS=zeros(54000,1);
P2_GRID=zeros(54000,1);
P2_GRID(1)=P2_PV(1);

%Suoritetaan laskenta joka määrittelee mikä toimenpide
%pitää tehdä, jotta sähköverkkoon syötetty teho pysyy
%rajoissa
for i=2:54000
    delta_P2_GRID(i) = P2_PV(i) - P2_GRID(i-1);
end

```

```

%Jos muutosnopeus rajojen sisällä
% -> koko aurinkokennovoimalan teho siirtyy sähköverkkoon
if (x >= delta_P2_GRID(i)) && (delta_P2_GRID(i) >= -x)
    P2_GRID(i) = P2_PV(i);

%Jos muutosnopeus positiivinen ja ylittää rajan
% -> ladataan energiavarastoa
elseif delta_P2_GRID(i) > x
    P2_ESS(i) = delta_P2_GRID(i) - x;
    P2_GRID(i) = P2_PV(i) - P2_ESS(i);

%Jos muutosnopeus negatiivinen ja ylittää rajan
% -> puretaan energiavarastoa
elseif delta_P2_GRID(i) < -x
    P2_ESS(i) = delta_P2_GRID(i) + x;
    P2_GRID(i) = P2_PV(i) - P2_ESS(i);

end

end

plot(time2,P2_ESS, 'color', 'black')
title('Energiavaraston teho')
xlabel('Kellonaika (UTC+2)')
ylabel('Teho (W)')

plot(time2,P2, 'color', '[0.93,0.69,0.13]')
title('Sähköverkkoon syötetty teho')
xlabel('Kellonaika (UTC+2)')
ylabel('Teho (W)')

hold on
plot(time2,P2_GRID, 'color', 'black')
hold off

close
P2_ESS_purku=0;
P2_ESS_lataus=0;
P2_ESS_kuvaaja=zeros(54000,1);
% Luku 0.9 kuvastaa kWh määrää, joka olisi vähintään pitänyt
% olla energiavarastossa, jotta energiavarasto ei mene negatiiviseksi.
P2_ESS_kuvaaja(1)=0.9; %kWh

for i=2:54000
    %Energiavarastosta purettava energia jouleina
    if P2_ESS(i) < 0
        P2_ESS_purku=P2_ESS_purku+P2_ESS(i);
        %Jaettu 3 600 000, niin Joulet->kWh
        P2_ESS_kuvaaja(i)=P2_ESS_kuvaaja(i-1)+P2_ESS(i)/3600000;
    end
end

```

```

%Energiavarastoon ladattavan energian summa
elseif P2_ESS(i) > 0
    P2_ESS_lataus=P2_ESS_lataus+P2_ESS(i);
    %Jaettu 3 600 000, niin Joulet->kWh
    P2_ESS_kuvaaja(i)=P2_ESS_kuvaaja(i-1)+P2_ESS(i)/3600000;
else
    P2_ESS_kuvaaja(i)=P2_ESS_kuvaaja(i-1);
end
end
d2=max(P2_ESS_kuvaaja);
%Energiavarastossa oleva energiamäärä
plot(time2,P2_ESS_kuvaaja, 'color', 'black')
title('Energiavaraston energia')
xlabel('Kellonaika (UTC+2)')
ylabel('Energia (kWh)')
P2_ESS_kuvaaja_min=min(P2_ESS_kuvaaja);
P2_ESS_sum=sum(P2_ESS);
P2_ESS_max=max(P2_ESS);
P2_ESS_min=min(P2_ESS);
P2_ESS_sum_kWh=P2_ESS_sum/3600000;

P2_ESS_purku_mean=(P2_ESS_purku/54000);
P2_ESS_lataus_mean=(P2_ESS_lataus/54000);
E2_ESS_purku=(P2_ESS_purku_mean/1000)*15; %Purettavan energiamäärä kWh
E2_ESS_lataus=(P2_ESS_lataus_mean/1000)*15; %Ladattavan energiamäärä kWh

%Alustus
muutos=zeros(54000,1);
muutos_1min=0;
muutos_3min=0;
muutos_5min=0;
muutos_10min=0;
muutos_15min=0;
muutos_20min=0;
muutos_1min_n=0;
muutos_3min_n=0;
muutos_5min_n=0;
muutos_10min_n=0;
muutos_15min_n=0;
muutos_20min_n=0;

%Laskenta positiivisille muutoksille
for i=2:54000
    muutos(i) = (P_PV(i)-P_PV(i-1))*60/3230;
    muutos(i) = (muutos(i)*100);
    if muutos(i) >= 1 && muutos(i) < 3
        muutos_1min=muutos_1min+1;
    elseif muutos(i) >= 3 && muutos(i) < 5
        muutos_3min=muutos_3min+1;
    elseif muutos(i) >= 5 && muutos(i) < 10
        muutos_5min=muutos_5min+1;
    end
end

```

```

elseif muutos(i) >= 10 && muutos(i) < 15
    muutos_10min=muutos_10min+1;
elseif muutos(i) >= 15 && muutos(i) < 20
    muutos_15min=muutos_15min+1;
elseif muutos(i) >= 20
    muutos_20min=muutos_20min+1;
end
end

%Laskenta negatiivisille muutoksille
for i=2:54000
    muutos(i) = (P_PV(i)-P_PV(i-1))*60/3230;
    muutos(i) = (muutos(i)*100);
    if muutos(i) > -3 && muutos(i) <= -1
        muutos_1min_n=muutos_1min_n+1;
    elseif muutos(i) > -5 && muutos(i) <= -3
        muutos_3min_n=muutos_3min_n+1;
    elseif muutos(i) > -10 && muutos(i) <= -5
        muutos_5min_n=muutos_5min_n+1;
    elseif muutos(i) > -15 && muutos(i) <= -10
        muutos_10min_n=muutos_10min_n+1;
    elseif muutos(i) > -20 && muutos(i) <= -15
        muutos_15min_n=muutos_15min_n+1;
    elseif muutos(i) <= -20
        muutos_20min_n=muutos_20min_n+1;
    end
end

%Mutosten lukumäärä (s), jaettuna 3600 -> muutokset tunteina
muutos_1min=(muutos_1min+muutos_3min+muutos_5min+muutos_10min+muutos_15min+muutos_20min)/3600;
muutos_3min=(muutos_3min+muutos_5min+muutos_10min+muutos_15min+muutos_20min)/3600;
muutos_5min=(muutos_5min+muutos_10min+muutos_15min+muutos_20min)/3600;
muutos_10min=(muutos_10min+muutos_15min+muutos_20min)/3600;
muutos_15min=(muutos_15min+muutos_20min)/3600;
muutos_20min=muutos_20min/3600;

%Mutosten lukumäärä (s), jaettuna 3600 -> muutokset tunteina
muutos_1min_n=(muutos_1min_n+muutos_3min_n+muutos_5min_n+muutos_10min_n+muutos_15min_n+muutos_20min_n)/3600;
muutos_3min_n=(muutos_3min_n+muutos_5min_n+muutos_10min_n+muutos_15min_n+muutos_20min_n)/3600;
muutos_5min_n=(muutos_5min_n+muutos_10min_n+muutos_15min_n+muutos_20min_n)/3600;
muutos_10min_n=(muutos_10min_n+muutos_15min_n+muutos_20min_n)/3600;
muutos_15min_n=(muutos_15min_n+muutos_20min_n)/3600;
muutos_20min_n=muutos_20min_n/3600;

```



```

prosentit=categorical({'1 %/min';'3 %/min';'5 %/min';'10 %/min';'15
%/min';'20 %/min'});
prosentit=reordercats(prosentit, {'1 %/min';'3 %/min';'5 %/min';'10
%/min';'15 %/min';'20 %/min'});
%Muutosten kuvaaja, yhdistetty muutokset yhteen muuttujaan
muutos_kuvaaja=[muutos_1min muutos_1min_n;muutos_3min muutos_3min_n;muu-
tos_5min muutos_5min_n;muutos_10min muutos_10min_n;muutos_15min muu-
tos_15min_n;muutos_20min muutos_20min_n];

%Alustus
muutos2=zeros(54000,1);
muutos2_1min=0;
muutos2_3min=0;
muutos2_5min=0;
muutos2_10min=0;
muutos2_15min=0;
muutos2_20min=0;
muutos2_1min_n=0;
muutos2_3min_n=0;
muutos2_5min_n=0;
muutos2_10min_n=0;
muutos2_15min_n=0;
muutos2_20min_n=0;

%Laskenta positiivisille muutoksille
for i=2:54000
    muutos2(i) = (P2_PV(i)-P2_PV(i-1))*60/3230;
    muutos2(i) = (muutos2(i)*100);
    if muutos2(i) >= 1 && muutos2(i) < 3
        muutos2_1min=muutos2_1min+1;
    elseif muutos2(i) >= 3 && muutos2(i) < 5
        muutos2_3min=muutos2_3min+1;
    elseif muutos2(i) >= 5 && muutos2(i) < 10
        muutos2_5min=muutos2_5min+1;
    elseif muutos2(i) >= 10 && muutos2(i) < 15
        muutos2_10min=muutos2_10min+1;
    elseif muutos2(i) >= 15 && muutos2(i) < 20
        muutos2_15min=muutos2_15min+1;
    elseif muutos2(i) >= 20
        muutos2_20min=muutos2_20min+1;
    end
end

%Laskenta negatiivisille muutoksille
for i=2:54000
    muutos2(i) = (P2_PV(i)-P2_PV(i-1))*60/3230;
    muutos2(i) = (muutos2(i)*100);
    if muutos2(i) > -3 && muutos2(i) <= -1
        muutos2_1min_n=muutos2_1min_n+1;
    elseif muutos2(i) > -5 && muutos2(i) <= -3
        muutos2_3min_n=muutos2_3min_n+1;

```

