

Miikka Jussila

AVARUUSVOIMALAT JA ENERGIAN SIIRTO MIKROAALLOILLA MAAHAN

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Seppo Syrjälä
Tammikuu 2022

TIIVISTELMÄ

Miikka Jussila: Avaruusvoimalat ja energian siirto mikroaalloilla Maahan
Space Solar Power Stations and Microwave Transmission of Energy Down to Earth
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka
Tammikuu 2022

Avaruusvoimala on yleisnimi tulevaisuuden potentiaalisille aurinkoenergiaa hyödyntäville voimalaitoksille, joissa energiantuotantoprosessi tapahtuu maan ilmakehän ulkopuolella. Avaruudessa tuotettu aurinkosähköenergia muunnetaan ja siirretään maapallolle käytettäväksi mikroaaltosäteinä ilman varsinaista sähkönsiirtoverkkoa avaruuden ja maan välissä. Avaruusvoimaloiden suurimmat tekniset hyödyt ovat avaruuden selkeästi suurempi säteilyteho verrattuna maapallon olosuhteisiin sekä tasaisen sähköenergian tuotannon riippumattomuus sääilmiöistä tai vuorokauden ajasta. Vaikka kyseisen kaltaisia voimalaitoksia ei ole vielä olemassa, on niiden teoreettista mahdollisuutta tutkittu ja niiden pohjalta on esitetty erilaisia konsepteja voimalaitoksen rakenteelle ja toimintatavoille. Avaruusvoimala ei rakentamisen, laukaisun ja ylläpidon lisäksi aiheuta kasvihuonepäästöjä ja tästä syystä avaruusvoima on mahdollinen tapa korvata uusiutumattomia energiantuotantomuotoja tulevaisuudessa.

Avaruusvoimalan rakenteessa on muun muassa aurinkoenergiaa keskittävät säteilyn konsentraattorit, aurinkopaneelit, jäähdytyspinta, mikroaaltotuotantoon tarkoitetut tyhjiöputket sekä lähettinantennit. Maanpinnalla suunta-antennit vastaanottavat mikroaaltosäteilyn ja ne muunnetaan takaisin sähköenergiaksi diodirakenteella. Avaruusvoimalalla tuotetun sähkönsiirron teoreettista pohjaa voidaan havainnollistaa Friin siirtoyhtälöllä sekä Goubaun kaavalla. Näillä yhtälöillä saadaan yhteys siirrettävän sähkötehon ja antennin väliselle etäisyydelle sekä antennien dimensioille. Itse avaruusvoimaloiden toteuttamisen suurimmat haasteet liittyvät rakennuslogistiikan hankaluuteen maan ilmakehän ulkopuolella sekä voimalan suureen kokoon. Avaruusvoimaloiden toteuttaminen tulevaisuudessa vaatisi pienempiä hintoja materiaalin laukaisemiselle avaruuteen sekä suuren hyötysuhteen lähettin- ja suunta-antenneja energian siirron mahdollistamiseksi.

Avainsanat: Aurinkokennot, avaruusvoimala, mikroaaltoputki, mikroaaltosiirto, lähettinantenni, suunta-antenni, antennihila

ALKUSANAT

Vaikka keväällä 2021 aloittamani kandidaatintyön valmistuminen päätyikin opiskeluista riippumattomien syiden vuoksi lykkääntymään tulevaisuuteen, on se nyt valmis ja olen siitä hyvin onnellinen. Kandidaatintyö oli haastava ja toisaalta myös raskas prosessi. Välillä itsestäni tuntui, että oma kandidaatintyö ja opinnot eivät etene lainkaan tarpeeksi, mutta lopulta kuitenkin haasteista selvittiin.

Päädyin oman kandidaatintyöni aiheen etsimään ja valitsemaan tiedejulkaisuja ja internettiä selaten, mikä osoittautui varsin hyväksi tavaksi. Avaruusvoimala tuntui aiheena erittäin kiinnostavalta, vaikkakin melko haastavalta. Haluankin kiittää kandidaatintyöni ohjaajaa Seppo Syrjälää hyvistä neuvoista ja vinkeistä varsinkin työn aloittamisen aikaan, kun en tiennyt heti mistä etsiä tietoa. Sain häneltä myös tarvittavaa rohkaisua valita aihe, vaikka sen sopivuutta alkuun itse epäröinkin. Lisäksi haluan kiittää kumppaniani sekä muuta perhettäni, jotka tukivat minua myös aikana, jolloin opintoni hieman lykkäytyivätkin.

Tampereella, 6.1.2022

Miikka Jussila

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. AURINKOKENNOSTOT JA MUU TEKNIikka AVARUUDESSA	2
2.1 Avaruusvoimalan aurinkokennostot.....	2
2.2 Avaruusvoimalan jäähdytysjärjestelmät.....	3
3. ENERGIAN SIIRTO MIKROAALLOILLA	6
3.1 Mikroaaltosiirron toiminta ja teho.....	6
3.2 Säteilyn tehokkuuden optimointi.....	8
4. ENERGIAN VASTAANOTTAMINEN.....	9
5. ERILAISET AVARUUSVOIMALAKONSEPTIT	11
5.1 Kaapeloitu avaruusvoimala	11
5.2 Alpha-avaruusvoimala.....	13
5.3 Omega-avaruusvoimala	14
6. AVARUUSVOIMAN KANNATTAVUUS TÄLLÄ HETKELLÄ	16
6.1 Rakentaminen ja laukaisu avaruuteen	16
6.2 Haasteet ja hyödyt	17
7. YHTEENVETO.....	19
LÄHTEET	20

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1. Avaruusvoimalan rakenne kerroksittain. [5].....</i>	<i>3</i>
<i>Kuva 2. Avaruusvoimalan aurinkokennostot termodynaamisena systeeminä. [9].....</i>	<i>4</i>
<i>Kuva 3. Avaruusvoimalan fotonijäähdytyksen esimerkkikuva. [9].....</i>	<i>5</i>
<i>Kuva 4. Esimerkkimalleja suunta-antennien minimietäisyyksille hilassa. [17].....</i>	<i>9</i>
<i>Kuva 5. Kaapeloidun avaruusvoimalan mahdollinen toteutus. [20].....</i>	<i>11</i>
<i>Kuva 6. Kaapeloidun avaruusvoimalan rakennetta havainnollistava kuva. [20].....</i>	<i>12</i>
<i>Kuva 7. Alpha- avaruusvoimalan mahdollinen toteutus. [29]</i>	<i>13</i>
<i>Kuva 8. Alpha- avaruusvoimalan säteilykonsentraattorin toiminta. [22].....</i>	<i>14</i>
<i>Kuva 9. Havainnekuva Omega- avaruusvoimalan toimintaperiaatteesta. [30].....</i>	<i>14</i>
<i>Kuva 10. Omega-avaruusvoimalan säteilykonsentraattorin rakenne. [22].....</i>	<i>15</i>

1. JOHDANTO

Ihmiskunta on koko olemassaolonsa ajan pyrkinyt levittäytymään laajalle maapallolla sekä keksimään tehokkaampia tapoja ylläpitää omaa vaurauttaan ja hyvinvointiaan. Ihmiskunnan jatkuva kasvu luo kuitenkin paineita tulevaisuuden energiateknisille ratkaisuille, koska maapallon energiantarve tulee jatkossakin kasvamaan. Globaalissa energiantuotannossa merkittävässä asemassa olevat fossiiliset polttoaineet eivät riitä loputtomiin, minkä vuoksi korvaavien vaihtoehtojen löytäminen on ensiarvoisen tärkeää. Esimerkiksi perinteinen aurinkovoima maanpinnalla sekä tuulivoima ovat puhtaita ja uusiutuvia energianlähteitä, mutta niiden osuudet maapallon primäärienergiasta eivät lähitulevaisuudessa tule olemaan samassa kokoluokassa fossiilisten polttoaineiden kanssa. [1 s. 342]

Mahdollisina tulevaisuuden energiantuotantokonsepteina voidaan pitää niin kutsuttuja avaruusvoimaloita, joiden sähköntuotanto perustuu perinteiseen aurinkokennotekniikkaan maan ilmakehän ulkopuolella [2]. Kyseistä ideaa hyödynnetään nykyisin jo osittain satelliiteissa sekä avaruusasemilla, mutta vain niiden oman energiantarpeen tyydyttämiseen [3 s. 242–245]. Avaruusvoimalassa tuotettu aurinkoenergia voidaan tulevaisuudessa mahdollisesti siirtää langattomasti mikroaaltoantenneilla maanpinnalle kulutettavaksi [4].

Tämän kandidaatintyön aiheena on tutkia avaruusvoimaloiden teoreettista puolta ja esitellä todennäköisimpiä käytettäviä teknologioita avaruusenergiantuotannon ja tehon langattoman siirron osalta. Tehon siirtoa on aiheena rajattu tässä kandidaatintyössä siten, että siinä keskitytään mikroaaltoihin. Työssä on tarkoitus myös tarkastella toteutuskelpoisia ideoita avaruusvoimalatyypeistä sekä pohtia avaruusvoimaloiden hyötyjä, ongelmia sekä niiden kannattavuutta tällä hetkellä.

Luvussa 2 tarkastellaan aurinkokennostojen rakennetta ja toimintaa sekä niiden suojaamista avaruuden olosuhteilta. Energian siirto ja vastaanottaminen lähetin- ja suuntaantenneilla käsitellään luvuissa 3 ja 4. Luvussa esitetään muutamia prototyyppimalleja avaruusvoimaloiden rakenteesta ja toiminnasta sekä vertaillaan näiden tehokkuutta. Avaruusenergian hyötyjä ja haasteita sekä avaruusvoimaloiden rakentamisen mahdollisuutta tämänhetkisellä teknologialla pohditaan luvussa 6. Viimeisenä luvussa 7 tehdään yhteenveto avaruusvoimaloiden tekniikasta ja mahdollisuuksista.

2. AURINKOKENNOSTOT JA MUU TEKNIikka AVARUUDESSA

Kokonaisuutena yksinkertaistaen avaruusvoimalaa voidaan havainnollistaa kerrosrakenteisen. Rakenteen ulommaisena osana ovat aurinkokennot, keskellä sijaitsee mikroaaltotekniikka, ja toisella laidalla kennoihin nähden on lähetinantenni energian siirtoa varten. Tässä luvussa on tarkoitus tarkastella aurinkovoimalan kennoihin liittyvää tekniikkaa. Myöhemmin luvuissa 3 ja 4 esitellään mikroaaltojen siirtotekniikkaa ja siirto- ja suunta-antenneja.

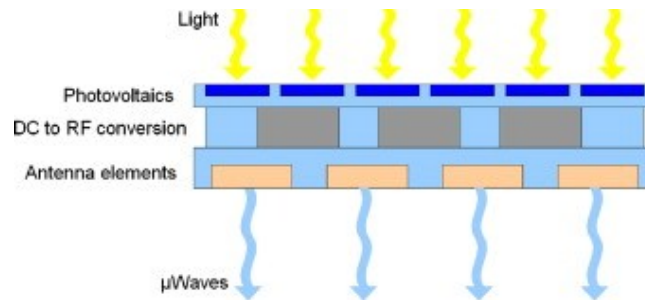
2.1 Avaruusvoimalan aurinkokennostot

Avaruudessa käytettävien ja maanpinnalla käytössä olevien aurinkokennojen käytön teoria perustuu samaan ilmiöön. Kyse on siis puolijohdemateriaalien hyödyntämisestä sekä valosähköisestä ilmiöstä, jonka avulla auringonsäteily saadaan muunnettua tasavirraksi. Avaruusvoimalaa suunniteltaessa on kuitenkin otettava huomioon yleisesti aurinkokennoihin liittyvät seikat sekä myös ympäristön erityisominaisuudet, jotta aurinkokennostot saadaan toimimaan tehokkaasti ja rikkoutumatta avaruudessa. [5, 6 s. 417]

Avaruusvoimalan kerrosrakenteen uloimpana osana on sen tyhjiöstä erottava suojalasi. Syy suojalasin käyttöön on siinä, että avaruuden säteilyspektri poikkeaa merkittävästi maapallon vastaavasta, jossa ilmakehä toimii ikään kuin suojana tietyille säteilytyypeille. Avaruudessa tietyt säteilylajit aiheuttaisivat ongelmia aurinkokennomateriaaleille ilman suojaa. Esimerkiksi ultraviolettisäteily ionisoi materiaaleja sekä synnyttää vapaita elektroneja ja radikaaleja kennorakenteissa. Tällöin kennomateriaalien sähkötekniiset ja optiset ominaisuudet saattaisivat muuttua ja varausten kuljettajien diffuusio puolijohdemateriaaleissa pahimmassa tapauksessa huonontua. Lisäksi kennostoon saattaisi ajautua suurienergisiä partikkeleita aurinkotuulen mukana, mikä osaltaan myös aiheuttaisi ionisaatiota. [6 s. 397–398]

Suojalasin sisällä olevan varsinaisen kennoston materiaaliksi soveltuu hyvin galliumarsenidi (GaAs), koska sen energiarako (engl. bandgap) on avaruuden säteilyn kannalta sopivalla alueella. Se on myös paremmin ionisoivaa säteilyä kestävä kuin esimerkiksi

piipohjaiset kennostot. Suurimmat hyötysuhteet saavutetaan tosin käyttämällä moniliitoskennoja (engl. multijunction solar cells). [7] Tällä hetkellä avaruudessa käytettävistä moniliitoskennoissa GaInP/GaAs/Ge-pohjainen rakenne on varsin yleinen [6 s. 412, 7, 8]. Moniliitoskennot vievät aiemmin käytettyihin piipohjaisiin aurinkokennoihin verrattuna vähemmän tilaa, mutta niiden hyötysuhde on selkeästi parempi kuin yksittäisistä puolijohteista koostuvilla kennoilla [7].



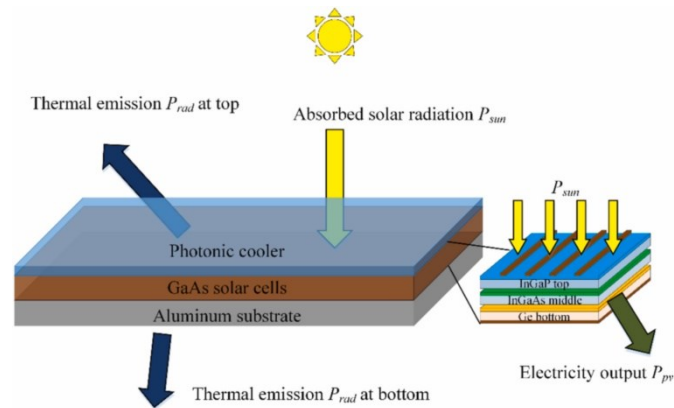
Kuva 1. Avaruusvoimalan rakenne kerroksittain. [5]

Tietyissä avaruusvoimalakonsepteissa rakenteeseen kuuluu myös auringonsäteilyn konsentraattori (engl. solar concentrator), jolla on mahdollista kasvattaa säteilytehoa aurinkokennostossa. Yksinkertaisuudessaan tällä voidaan tarkoittaa peili- tai linssijärjestelmää, jolla auringonsäteet saadaan keskitettyä suurelta pinta-alalta aurinkokennoon, ja näin ollen säteilyä saadaan kerättyä suuremmalta alueelta. Konsentraattorilla varustetut aurinkokennot voisivat siis teoriassa toimia avaruudessa jatkuvasti, vaikka kennot itsessään eivät olisi ihanteellisessa asennossa aurinkoon nähden. Auringonsäteilyn konsentraattorit tosin tekevät avaruusvoimalan rakenteesta osaltaan monimutkaisemman, jonka takia niiden käyttöä ei esitetä kaikkien avaruusvoimalakonseptien yhteydessä. [9] Myöhemmin luvussa 5 käydään läpi joitain esitettyjä konsentraattorimalleja avaruusvoimalakonseptien yhteydessä.

2.2 Avaruusvoimalan jäähdytysjärjestelmät

Avaruudessa auringon säteilyteho on merkittävästi suurempi kuin maan pinnalla, mihin avaruusvoimalan tehokkuus perustuukin. Suuri säteilyteho on kuitenkin otettava huomioon avaruusvoimalan jäähdytysjärjestelmää suunniteltaessa. Toisin kuin maan ilmakehässä, avaruudessa lämpöenergiaa ei siirry konvektiolla vaan ainoastaan säteilemällä. Ilman tehokasta jäähdytysjärjestelmää aurinkokennojen hyötysuhde alkaisi komponenttien suuren lämpenemisen takia heikentyä. [9, 10]

Lämmönsiirtimien ja jäähdyttimien tapauksessa mahdollisimman suurella säteilypinta-alalla saavutettaisiin maksimaalinen jäähdytysteho. Avaruusvoimalassa tehon lisäksi korostuu kuitenkin myös massan merkitys. Voimalan avaruuteen laukaisu ja sen pitäminen kiertoradalla vievät resursseja, joten myöskin jäähdyttimen keveys on tärkeää. Lämmönsiirtimiä suunniteltaessa tulisi siis löytää tasapaino tehokkaan lämmönsiirron ja keveän rakenteen välillä. [2]



Kuva 2. Avaruusvoimalan aurinkokennostot termodynaamisena systeeminä. [9]

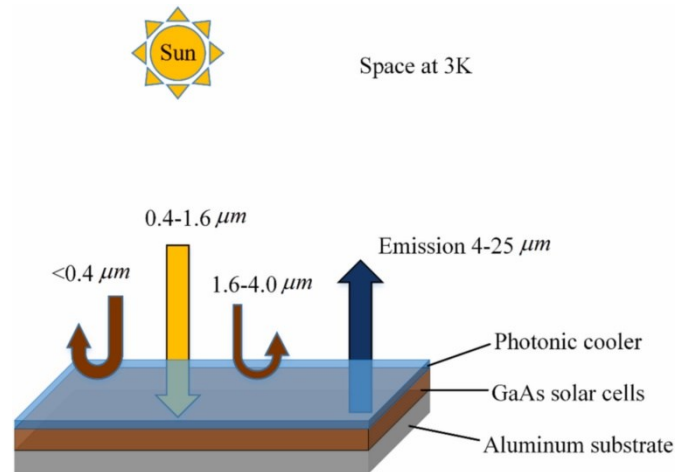
Jäähdytyksen tehoa on mahdollista lisätä avaruuden olosuhteissa fotonijäähdytyksellä (engl. fonic cooling). Kyseisessä jäähdytysmekanismissa tietyt osat säteilyn aallonpituuksista pyritään heijastamaan mahdollisimman tehokkaasti pois voimalasta jo ennen niiden saapumista aurinkokennoihin. Avaruusvoimalan kerrosrakenteessa fotonijäähdytys voidaan sijoittaa suoraan aurinkokennojen päälle. [11] Jos kennoston ja jäähdyttimen muodostamaa järjestelmää tutkitaan termodynaamisena systeeminä kuvan 2 osoittamalla tavalla, voidaan siirtyviä tehoja kuvata yhtälöllä

$$P_{sun} - P_{rad} - P_{PV} = 0, \quad (1)$$

jossa P_{sun} on kennojen absorboima säteilyteho, P_{rad} kennoston emittoima hukkalämpö säteilynä ja P_{PV} aurinkokennostossa muodostuva sähköteho. [11]

Fotonijäähdytyspinnassa on jaksollisesti sijoitettuja eristemateriaaleja erilaisilla taitekertoimilla. Matalan taitekertoimen materiaalit päästävät läpi käytännössä kaiken auringon säteilyenergian. Kuten kuvasta 3 nähdään, korkean taitekertoimen materiaalien optima-

lisella sijoittamisella tietyt säteilyn aallonpituudet heijastuvat lähes kokonaan pois pinnasta. Syy kyseisen tekniikan käyttöön on siinä, että auringonsäteilyn tehotiheys yksikössä W/m^2 on selkeästi suuremmillaan aallonpituusalueella $0,4 - 1,6 \mu m$. [11, 12]



Kuva 3. Avaruusvoimalan fotonijäähdytyksen esimerkkikuva. [9]

Avaruusvoimalakäyttöön hyvin soveltuva galliumarsenidi- aurinkokennosto toimii tehokkaimmillaan aallonpituusalueella $0,4 - 1,6 \mu m$, jolloin esimerkiksi MgF_2 - ZnS - fotonijäähdyttimellä saadaan heijastettua alle $0,4 \mu m$ säteilystä $64,5\%$ ja $1,6 - 4,0 \mu m$ säteilystä jopa $90,3\%$. Samalla fotonijäähdytin toimii myös säteilypintana hukkalämmölle, jonka vuoksi se ei aiheuta yhtä suuria kustannuksia massan takia kuin erillisen säteilypinnan rakentaminen avaruuteen. Periaatteessa fotonijäähdytinpinta toimii myös lisäsuojana esimerkiksi luvussa 2.1 mainitulta ultraviolettisäteilyltä. [11, 12]

3. ENERGIAN SIIRTO MIKROAALLOILLA

Suurin osa kulutussähköstä siirretään käytettäväksi erilaisilla sähköverkoilla ja niiden yhdistelmillä. Avaruudessa sijaitseva aurinkovoimala on kuitenkin ongelmallisempi kuin perinteinen voimalaitos, koska sitä varten ei voida rakentaa varsinaista sähkön siirtoverkkoa. Ehdotusten tasolla toteutuskelpoisimmat avaruussähkön siirtojärjestelmät pohjautuvat lähes yksin omaan energian siirtämiseen sähkömagneettisena säteilynä maan pinnalle antennilla.

3.1 Mikroaaltosiirron toiminta ja teho

Mikroaaltoja pystytään avaruusvoimalan tehon suuruuden huomioiden parhaiten tuottamaan erilaisilla mikroaaltoputkilla. Kyse on melko tavanomaisista elektronien kiihdytysprosesseista magneetti- ja sähkökenttiä hyödyksi käyttäen ja liikkeeseen saatetut elektronit luovuttavat energiansa sähkömagneettisena säteilynä. Avaruusvoimalakäytön kannalta potentiaalisia vaihtoehtoja ovat erilaiset magnetronit, klystronit sekä kulkuaaltoputket. Kyseiset laitteistot eivät kuitenkaan osallistu varsinaiseen mikroaaltosiirtoon, jota varten voimalassa tulee olla lähetin- ja suunta- antennit. [13 s. 62–81]

Itse mikroaaltoenergian siirron tehokkuuden kannalta tärkeässä asemassa on siirron hyötysuhde eli mikroaaltosiirron tapauksessa vastaanottavaan antenniin saapuvan tehon suhde avaruudessa sijaitsevan antennin lähettämään tehoon. Tämänkaltaista siirtoa ja tehon suuruutta voidaan kuvata Friin siirtoyhtälöllä (engl. Friis transmission equation), jonka avulla voidaan laskea vastaanottavan antennin teho P_r :

$$P_r = \frac{\lambda^2 G_r G_t}{(4\pi D)^2} = \frac{A_r A_t}{(\lambda D)^2} P_t, \quad (2)$$

jossa λ on siirtyvän mikroaallon aallonpituus, G_r vastaanottavan antennin antennivahvistus, G_t siirtoantennin antennivahvistus, D siirtoantennin ja vastaanottavan antennin etäisyys, A_r vastaanottavan antennin apertuuri, siirtoantennin apertuuri ja P_t siirtoantennin teho. [14]

Toisaalta siirron säteen keräyksen tehokkuus eli hyötysuhde BCE (engl. beam collection efficiency) voidaan määrittellä vastaanotettavan ja siirrettävän tehon suhteena:

$$BCE = \frac{P_r}{P_t} = \frac{A_r A_t}{(\lambda D)^2}. \quad (3)$$

Yhtälöitä tarkastelemalla voidaan päätellä muutama seikka energiansiirrosta avaruusvoimalan mittakaavassa. [13 s. 21–25]

Ensinnäkin antennien etäisyys on todella suuri voimalan kiertäessä maapalloa geostaattisella radalla eli noin 35 000 km:n korkeudella maanpinnasta [2]. Suunta-antennin tehoon se vaikuttaa merkittävästi, sillä sen teho on yhtälön 2 esittämällä tavalla kääntäen verrannollinen antennien etäisyyden neliöön. Jotta vastaanottavan antennin teho P_r ei olisi epäkäytännöllisen pieni, tulee avaruusvoimaloiden antennien olla apertuureiltaan myös useiden kilometrien luokkaa.

Friin siirtoyhtälön käyttö laskennassa sellaisenaan on kuitenkin mahdollista vain tietyin reunaehdoin ja tärkein niistä on tehon siirtyminen tasoaaltorintamina. Vastaanottavaan antenniin siirtyvä aalto voidaan approksimoida tasoaalloksi, mikäli etäisyys antennien välillä on tarpeeksi suuri. Kyseisessä tilanteessa vastaanottoantenni on avaruudessa sijaitsevaan antenniin nähden niin kutsutulla kaukokenttäalueella (engl. far field region). Lyhyellä välimatkalla aaltoja ei voida approksimoida tasoaaltorintamaksi, vaan tilannetta kuvaa paremmin palloaalto (engl. spherical waves), jotka liikkuvat tällöin lähikenttäalueella (engl. near field region). [13 s. 21–25]

Palloaaltojen tapauksessa siirron tehokkuus pystytään määrittämään hyödyntäen Goubaun kaavaa. Goubaun kaavan mukaan säteen keräyksen tehokkuus on

$$BCE = 1 - e^{-\tau^2}, \quad (4)$$

jossa siirtoparametri τ on muotoa

$$\tau = \frac{\sqrt{A_r A_t}}{\lambda D}. \quad (5)$$

Goubaun kaavassa esiintyy kuitenkin pitkälti samat parametrit kuin Friin siirtoyhtälössä. Myös Friin yhtälön avulla määritetty kaukokenttäalueen säteenkeräyksen tehokkuus voidaan esittää siirtoparametri τ :n avulla [14]

$$BCE = \tau^2. \quad (6)$$

Se kumpaa mallia on loogista käyttää, voidaan määrittää esimerkiksi vertaamalla antennien oikeaa etäisyyttä Fraunhoferin etäisyyteen (engl. Fraunhofer's distance).

$$D_{Fr} = \frac{2R^2}{\lambda}, \quad (7)$$

jossa R on antennin suurin dimensio. Mikäli antennien välinen etäisyys on merkittävästi suurempi kuin Fraunhoferin etäisyys, on kyseessä kaukokenttäalueella tapahtuva tehon

siirto. Lähikenttäalueen mallia taas voidaan käyttää, jos etäisyys on merkittävästi Fraunhoferin etäisyyttä pienempi. [15, 16]

On kuitenkin syytä korostaa, että tasoaalto- sekä palloaaltomallit ovat nimenomaan approksimaatioita mainituissa tilanteissa. Raja lähikenttä- ja kaukokenttäalueen välillä ei ole koskaan tarkka eikä siirtymä kentästä toiseen ole yhtäkkinen. Näiden alueiden välissä on raja-alue, jossa jo mainittujen yhtälöiden käyttö on ongelmallista, koska aaltoja ei voida approksimoida laskentaa helpottaen kumpaankaan malliin. [14] Kyseiset mallit ovat kuitenkin mikroaaltosiirron tehokkuuden osalta havainnollistavia ja pätevät suureen osaan siirtotilanteista.

3.2 Säteilyn tehokkuuden optimointi

Luvussa 3.1 esitellyt Friin siirtoyhtälö ja Goubaun kaava olettavatkin säteilyn voimakkuuden yhteneväiseksi, siten että aaltorintama ja mikroaaltoteho on jokaiseen avaruudelliseen suuntaan identtinen. Käytännön tilanteessa energiantuotannon kannalta mikroaaltojen säteily muualle kuin suunta-antennia kohti on kuitenkin hyvin epäedullista, sillä siitä syntyy hukkatehoa. Antennin haluttuun suuntaan lähettämää säteilyä kutsutaan pääkeilaksi (engl. main lobe) ja muualle siirtyvää säteilyä sivukeiloiksi (engl. side lobe). Parhaimman mahdollisen energiatehokkuuden saavuttamiseksi on siis pyrittävä maksimoimaan pääkeilan teho sekä saamaan sivukeilojen suuruus minimiin. [13 s. 26–30]

Sivukeilojen vaikutus voidaan minimoida käyttämällä amplitudin kavennusputkia (engl. amplitude taper), jolloin mikroaaltosäteiden teho ei ole vakio antennin pinnalla. Avaruusvoimalan antennien tehon yksi esitetty malli on Gaussin jakauman mukainen säätö. Antennin tehon jakaumaa a voidaan kuvata yhtälöllä

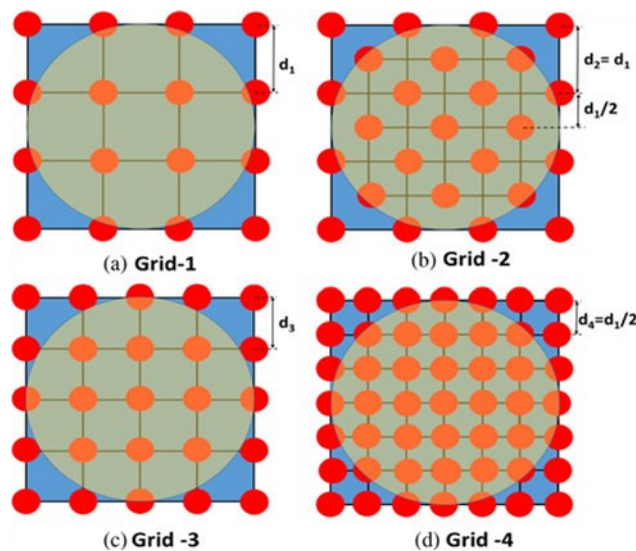
$$a(n) = \exp \left[-(\ln R) \left\{ 2 \frac{n-1}{N-1} - 1 \right\}^2 \right], \quad (8)$$

jossa n on antennielementin indeksi, R antennin keskellä sijaitsevan tehon suhde antennin reunalla sijaitsevaan tehoon ja N on antennielementtien kokonaislukumäärä. Antennin sivukeilojen suuruudet ovat gaussin jakaumassa huomattavasti pienemmät, kuin vakiojakauman tapauksessa. Tällöin mikroaaltosiirron hyötysuhde saa suuremman arvon. [13 s. 26–30]

4. ENERGIAN VASTAANOTTAMINEN

Kuten luvussa 2 todettiin, avaruusvoimalaan kuuluu avaruudessa sijaitsevan osan lisäksi myös maan päälle sijoitettu suunta-antennien yksikkö. Sen tehtävänä on vastaanottaa avaruudesta saapuvat mikroaallot sekä muuntaa ne tarpeeksi tehokkaasti sähköksi. Maanpinnalla sijaitsevassa yksikössä tulee olla myös tarvittavat sähköteknilliset komponentit siirron tehokkuuden varmistamiseksi sekä vaihtosähkömuunnin, mikäli sähkö halutaan siirrettäväksi jo olemassa olevilla siirtoverkoilla. [17]

Suunta-antennissa antenni vastaanottaa lähetetyt mikroaallot ja diodirakenne muuntaa mikroaallot tasasähköksi. Antennin ja diodirakenteen väliin voidaan sijoittaa alipäästösuodatin (engl. low-pass filter), joka estää suurilta osin diodin jälleensäteilyä. Suodatimen ansiosta korkeataajuisia säteilyä ei pääse syntymään juurikaan diodissa ja näin suunta-antennien kokonaishyötysuhde saa korkeamman arvon. Rakenteessa diodin ja kapasitaattorin rinnankytkentä toimii eräänlaisena lähtösuodattimena (engl. output filter), joka tehostaa myös osaltaan sähköntuotantoa. [17]



Kuva 4. Esimerkimmalleja suunta-antennien minimietäisyyksille hilassa. [17]

Yksittäisen suunta-antennin teho ei kuitenkaan ole tarpeeksi suuri avaruusvoimalakäyttöön, minkä takia suunta-antennien erilaiset sarjaan- ja rinnankytkennät ovat välttämättömiä toimivan ja tehokkaan sähköenergian tuottamisen kannalta. Nämä kytkennät muodostavat rakenteen, jota kutsutaan suunta-antennihilaksi (engl. rectenna array). Suunta-

antennihilan dimensiot ovat avaruusvoimalakonsepteissa suuruusluokaltaan useita kilometrejä, mikä toisaalta helpottaa siirtoantennien mikroaaltosäteilyn kohdistamista niihin. [18]

Suunta-antennihilaa suunnitellessa on tärkeää tietää mikroaaltorintaman dimensioista avaruuskulma ja projektiopinta-ala maan päälle. Kuvassa 4 on yksinkertaistettu esimerkimalli antennihilasta. Siinä punaiset ympyrät edustavat yksittäisiä antenniä antennihilassa ja keltainen ympyrä mikroaaltorintaman projektiota.

Dimensiot huomioiden suunta-antennihilan vastaanottama teho on

$$P_{rd} = \frac{A_e}{\theta_H \theta_V R^2} P_t = \frac{A_e}{A_p} P_t, \quad (9)$$

jossa A_e on suunta-antennihilan tehollinen säteilypinta, A_p on aaltorintaman projektiopinta-ala maan päälle, $\theta_H \theta_V$ lähetinantennin avaruuskulma, R lähetinantennin ja suunta-antennin välinen etäisyys ja P_t lähetinantennin teho. Kaavasta 9 voidaan päätellä, että suunta-antennihilan vastaanottama teho P_{rd} lähestyy maksimiaan, kun sen tehollinen säteilypinta A_e lähestyy aaltorintaman projektion pinta-alaa A_p . [17]

Edellä mainitusta havainnosta voisi tehdä päätelmän, että yksittäiset antennit kannattaa sijoittaa hilassa niin lähelle toisiaan kuin mahdollista, jotta hukkathehoa ei pääse syntymään. Tämä kuitenkin aiheuttaa suunta-antennien mikroaaltojen vastaanoton päällekkäin olemista ja näin ollen suunta-antennit eivät pysty vastaanottamaan energiaa maksimaalisella tehokkuudella. Antennihilan rivivälit on siis kustannustehokasta valita siten, että vastaanoton päällekkäisyyksiä ei muodostu. Tällöin antennitekniikkaa ei tarvitse mahduttaa yhtä pieneen tilaan ja myöskin komponentteja tarvitaan lukumäärällisesti vähemmän. Hyvänä arviona suunta-antennien minimietäisyydelle d sekä horisontaalisesti että vertikaalisesti voidaan pitää

$$d \geq d_a, \quad (10)$$

jossa d_a merkitsee suunta-antennin suurinta dimensiota

$$d_a \approx \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{G}{e_a}}, \quad (11)$$

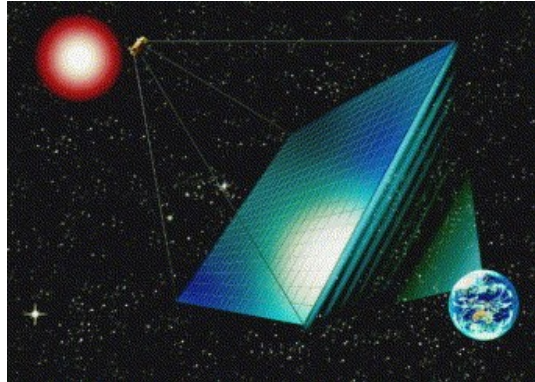
jossa λ on antennin ominaistaajuutta vastaava aallonpituus, G suunta-antennin antennivahvistus ja e_a suunta-antennin hyötysuhde. [13 s. 53–138]

5. ERILAISET AVARUUSVOIMALAKONSEPTIT

Avaruusvoimaloista on vuosien saatossa esitetty lukuisia erilaisia konsepteja. Suurinta osaa yhdistää sama peruseriaate: Auringon säteilyenergian kerääminen aurinkokennoilla ja energian siirtäminen mikroaalloilla maanpäälle. Koska jokaisen erilaisen konseptin esittely ei ole kandidaatintyön laajuuden huomioiden mahdollista, on luvun 5 tarkoituksena esitellä muutama mahdollisesti toteutuskelpoinen avaruusvoimalatyyppejä.

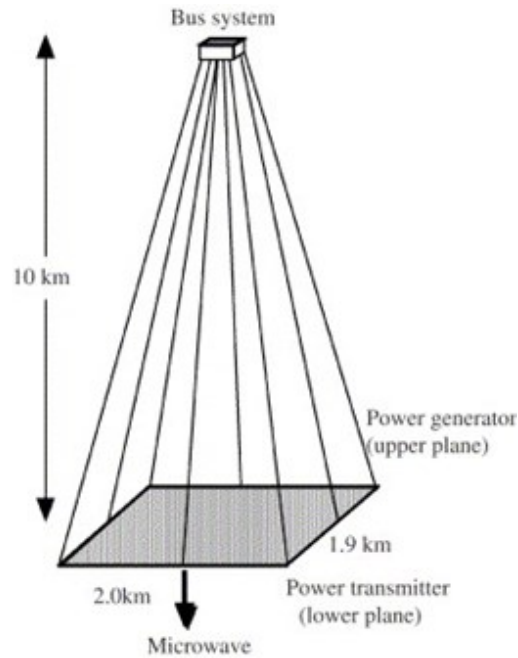
5.1 Kaapeloitu avaruusvoimala

Kaapeloitu avaruusvoimala (engl. Tethered solar power satellite) on yksi esitetyistä avaruusvoimalamalleista. Kyseinen konsepti on saanut nimensä sen rakenteesta, jossa avaruusvoimalan laiteväylä on kiinnitettyä energiantuotantoyksiköihin useiden kilometrien mittaisilla kaapeleilla. Kaapeloitu avaruusvoimala voi olla myös kerrosrakenteinen luvussa 2 esitetyn mallin tapaan. [19]



Kuva 5. *Kaapeloidun avaruusvoimalan mahdollinen toteutus.* [20]

Kaapeloidun avaruusvoimalan toimintaa, huoltoa sekä mikroaaltoantenneja kontrolloidaan langattomasti ja voimalan laitteistot ovat yhteydessä toisiinsa laiteväylän (engl. bus system) kautta kuvien 5 ja 6 osoittamalla tavalla. Tästä johtuen aurinkokennostojen välille ei tarvitse rakentaa erillistä verkostoa ja energiantuotantoyksikköjen rakenne yksinkertaistuu ja voimalan kokonaisuudessa saadaan pienemmäksi. Tällä on suuri merkitys ottaen huomioon miten paljon resursseja vie avaruusvoimalan lopullinen siirtäminen maan kiertoradalle. [20]



Kuva 6. Kaapeloidun avaruusvoimalan rakennetta havainnollistava kuva. [20]

Yksinkertaisesta tekniikasta johtuen kaapeloitu avaruusvoimala voidaan myös ottaa käyttöön porrastetusti. Kerrosrakenteiset energiantuotantoyksiköt eivät ole suorassa yhteydessä toisiinsa, vaikka ovatkin sijoitettuna vierekkäin. Valmistuneet kennostot ja mikroaalloantennit voidaan jo ottaa käyttöön, kun seuraavia vasta rakennetaan. Vaikka koko tuotantopotentiaalia ei saada käyttöön heti, kaapeloitu avaruusvoimala alkaa maksaa itseään takaisin varhaisemmassa vaiheessa kuin tietyt avaruusvoimalatyypit. Tämä saattaa olla kyseisen konseptin valttikortti mahdollisia investointeja ajatellen. [20]

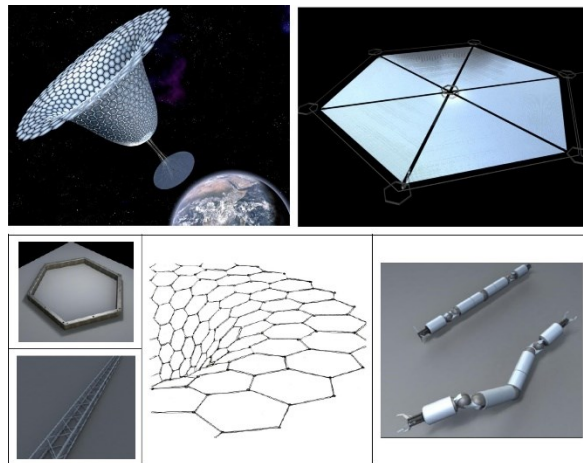
Kaapeloidun avaruusvoimalan konseptissa ei myöskään ole yksinkertaisuudesta johtuen paneelien asennon kääntämiseen vaadittavaa koneistoa, mikä alentaa käyttöönotto- ja kunnossapitokustannuksia. Tähän liittyy kuitenkin konseptin suurin heikkous: Kennostot ovat energiantuotannon maksimoimisen kannalta ihanteellisessa asennossa aurinkoon nähden vain väliaikaisesti vuorokauden aikana. Kaapeloidun avaruusvoimaloiden konseptissa ei ole myöskään säteilyn konsentraattoreita ja näin ollen energiantuotannon kokonaisteho on merkittävästi pienempi kuin muilla avaruusvoimalatyypeillä. Aurinkokennomateriaalit ovat lisäksi kalliita resursseja ja konsentraattoreiden puuttumisen takia kaapeloidussa avaruusvoimalassa kennostoja on erityisen paljon muihin voimalatyyppeihin verrattuna. [20, 21]

Kaapeloitu avaruusvoimala pyrkii tekniikassaan toteutuskelpoisuuteen sekä yksinkertaisuuteen, mutta ei tehokkuuden maksimoimiseen. Sen lopullinen arvioitu tuotantoteho 0.75 GW pystyisi kattamaan suuren määrän energian kulutusta, mutta moderneista ver-

rokkikonsepteista se jää selvästi jälkeen. Esimerkiksi luvussa 5.2 esiteltävän Alpha-avaruusvoimalakonseptin arvioitu tehotuotanto on noin 2 GW eli kaksi kertaa suurempi kuin kaapeloidun avaruusvoimalan. [22]

5.2 Alpha-avaruusvoimala

Alpha-avaruusvoimala (engl. Solar Power Satellite via Arbitrarily Large Phased Array) on toteutukseltaan monimutkaisempi kuin edellä esitelty kaapeloitu avaruusvoimala, mutta kuitenkin tuotantopotentiaailtaan selvästi tehokkaampi malli. Alpha-avaruusvoimala koostuu kerrosrakenteeseen rakennetusta aurinkokennostosta, mikroaaltomuuntimesta sekä lähetinantenneista. Rakenteeseen kuuluu myös säteilyn konsentraattori, jolla energiantuotantoa pystytään merkittävästi tehostamaan. [22]

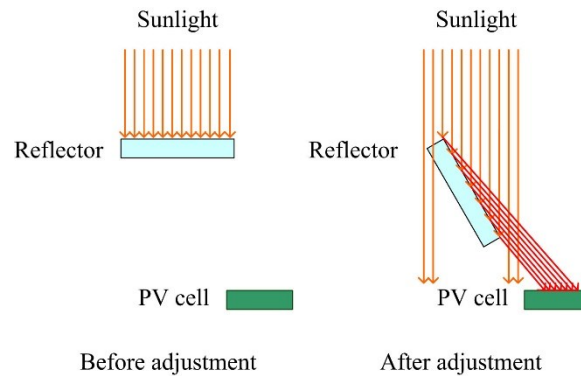


Kuva 7. Alpha- avaruusvoimalan mahdollinen toteutus. [23]

Konsentraattorista ja sen muodosta on esitetty kaksi eri mallia: sigmoid- käyrämalli sekä kartiomalli. Peruseriaatteeltaan ne toimivat kuitenkin samankaltaisesti. Konsentraattorin muoto pyrkii kääntämään auringon säteilyä mahdollisimman suurelta pinta-alalta aurinkokennostoon. Alpha-mallin etuna onkin juuri se, että sen energiantuotanto voidaan keskittää pienempään määrään tehokkaampia aurinkokennostoja. Tällä säästetään aurinkokennomateriaalien hankinnassa olettaen, että konsentraattorimateriaalien kustannukset saadaan pidettyä alhaisina. [24]

Alpha-avaruusvoimalakonseptin konsentraattori koostuu yksittäisistä heijastinmoduuleista, joiden pinnat ovat tosiasiaissa kuitenkin tasaisia. Sopivalla koneistolla ne saadaan käänneltyä aurinkoon nähden ideaalisempaan suuntaan. Moduulien kääntyvyys siis tehostaa aurinkokennoihin saapuvaa säteilytehoa joka ajanhetkellä. Yksittäisten moduu-

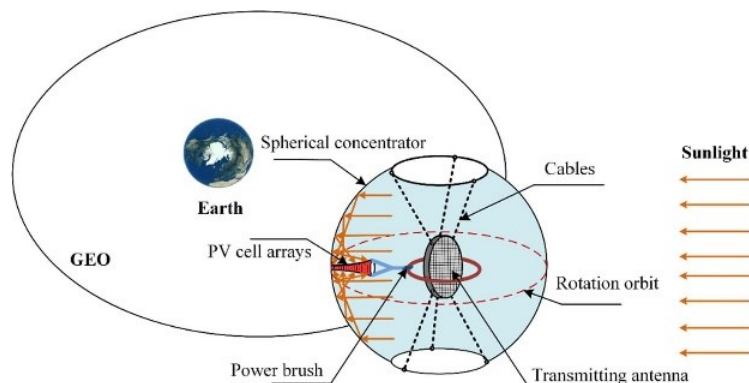
lien tasolla heijastin ei kuitenkaan pysty kääntämään kuin osan kohti saapuvasta säteilystä vastaanottiin. Kuten kuvasta 8 nähdään, heijastinmoduulin pinta-ala pysyy vakiona, mutta sen projektiopinta-ala pienenee moduulin kääntämisen seurauksena. Käytännössä siis Alpha-avaruusvoimalassakin osa säteilytehosta menetetään konsentraattoreiden muodon takia. [23, 24]



Kuva 8. Alpha-avaruusvoimalan säteilykonsentraattorin toiminta. [22]

5.3 Omega-avaruusvoimala

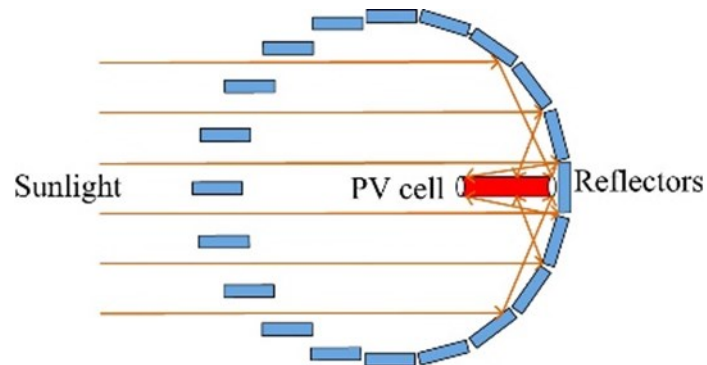
Niin kutsuttu Omega-malli on yksi uusimmista esitetyistä avaruusvoimalakonsepteista ja se muistuttaa toiminnaltaan tietyiltä osin luvussa 5.2 esiteltyä Alpha-avaruusvoimalaa. Omega-avaruusvoimala konseptissa aurinkokennostot ja mikroaaltotekniikka on sijoitettu kerrosrakenteisesti ja kennostoon saapuvaa säteilytehoa myös tehostetaan konsentraattorilla. [24]



Kuva 9. Havainnekuva Omega-avaruusvoimalan toimintaperiaatteesta. [25]

Omega-mallissa säteilyn konsentraattori koostuu pallomaiseen rakenteeseen sijoitelluista heijastavista komponenteista. Toimiessaan keskitin päästää etuosastaan mahdollisimman paljon auringonsäteilyä pallorakenteen sisään. Auringonsäteet saadaan heijastettua pallorakenteen sisällä sijaitseviin aurinkokennoihin nimenomaan pallorakenteen

säteitä keräävän muodon avulla. Säteilyenergiaa saadaan siis kerättyä suuremmalta alueelta ja lisähyötynä Omega-mallin konsentraattori toimii, vaikka sen sijainti aurinkoon nähden muuttuisi. [26]



Kuva 10. Omega-avaruusvoimalan säteilykonsentraattorin rakenne. [22]

Auringonsäteiden läpäisevyys konsentraattorin etuosassa voidaan ratkaista kahdella eri tavalla. Pallonrakenteen tietyt heijastinkomponentit olisi mahdollista automatisoida kääntymään siten, että niiden pinnan normaali olisi 90° kulmassa auringonsäteisiin nähden. Aurinkoon nähden edessä sijaitsevien heijastinkomponenttien kääntyessä, säteily pääsisi pallorakenteen sisään ja lopulta myös aurinkokennoihin. Toinen vaihtoehto olisi rakentaa Omega-mallin keskitin puoliläpäisevästä materiaalista. Heijastinkomponentit päästäisivät ulkokuorellaan säteilyn läpi, mutta sisäpuolella heijastaisivat ne kohti aurinkokennoja. [26]

6. AVARUUSVOIMAN KANNATTAVUUS TÄLLÄ HETKELLÄ

Toteutuessaan avaruusvoimalateknikka mahdollistaisi valtavan energiamäärän jatkuvan tuotannon minimaalisilla kasvihuonekaasupäästöillä. Tätä ideaa pohtiessa on kuitenkin tärkeää tiedostaa sen käyttöönoton mahdollisuus nykyhetkessä tai tulevaisuudessa. Tässä luvussa onkin tarkoitus arvioida avaruusvoimaloiden mahdollisuuksia ja haasteita nykyisellä saatavilla olevalla teknologiolla.

6.1 Rakentaminen ja laukaisu avaruuteen

Avaruusvoiman käyttöönoton suurin yksittäinen este nykytekniikan kannalta on laukaisun korkea hinta. Esimerkiksi SpaceX:n Falcon Heavy, joka on yksi kyseisen yhtiön suurimmista kantoraketeista, pystyy kuljettamaan matalle maan matalalle kiertoradalle (engl. LEO, low earth orbit) 63 800 kg lastin ja arvioidut laukaisukustannukset tälle raketille ovat vähintään 90 miljoonaa Yhdysvaltain dollaria. Arvioidut laukaisukustannukset kyseiselle raketille kilogrammaa kohden ovat näin ollen:

$$\begin{aligned} \text{Laukaisukustannukset} \left[\frac{\$}{\text{kg}} \right] &= \frac{\text{Raketin laukaisukustannukset} [\$]}{m_{\text{lasti}} [\text{kg}]} = \frac{90\,000\,000 \$}{63\,800 \text{ kg}} \\ &= 1410,658307 \frac{\$}{\text{kg}} \end{aligned} \quad (12)$$

Esimerkkinä Omega-avaruusvoimalan arvioitu kokonaisteho on noin 5 GW ja käyttöön saatavan sähköenergian kokonaisteho noin 2 GW ja sen arvioitu kokonaismassa on noin 22 953 megatonia. Näin ollen ominaisteho on:

$$\text{Ominaisteho} \left[\frac{\text{W}}{\text{kg}} \right] = \frac{P_{\text{kok}}}{m_{\text{OMEGA}}} = \frac{2 \times 10^9 \text{ W}}{22\,953 \times 10^9 \text{ kg}} = 87,134579 \times 10^{-9} \frac{\text{kW}}{\text{kg}} \quad (13)$$

Kyseisen esimerkin tilanteessa voimalan tuottaman sähkötehon hinnaksi kilowattia kohden saadaan:

$$\begin{aligned} \text{Tuotetun sähkön hinta} \left[\frac{\$}{\text{kW}} \right] &= \frac{\text{Laukaisukustannukset} \left[\frac{\$}{\text{kg}} \right]}{\text{ominaisteho} \left[\frac{\text{W}}{\text{kg}} \right]} = \frac{1410,658307 \frac{\$}{\text{kg}}}{87,134579 \times 10^{-9} \frac{\text{kW}}{\text{kg}}} \\ &= 16,1894201 \times 10^9 \frac{\$}{\text{kW}}. \quad [25, 22] \end{aligned} \quad (14)$$

Kun edellä saatua arvoa verrataan muiden energiatuotantomuotojen kilowattihintoihin, tulee nykytekniikan rajallisuus ilmi selkeästi. World Energy Outlookin arvion mukaan vuonna 2019 Yhdysvalloissa esimerkiksi ydinvoiman hinta oli arviolta 5000 \$/kW ja vastaavasti hiilen 2100 \$/kW. Näin ollen avaruusrakettien laukaisun kokonaiskustannukset tulisi tekniikan kehittymisen kautta saada merkittävästi pienemmiksi tai vaihtoehtoisesti potentiaaliset kennomateriaalit selkeästi tehokkaammiksi ja kevyemmiksi. Lisäksi kokonaiskustannukset suurentuvat entisestään, jos voimalaitos halutaan sijoittaa matalan maan kiertorataa korkeammalle geostationaariselle kiertoradalle. [1 s. 418, 4, 27]

6.2 Haasteet ja hyödyt

Vuonna 2018 valmistunut Bhadla Solar Park on tällä hetkellä yksi maailman suurimpia toiminnassa olevista aurinkovoimaloista maapallolla ja sen arvioitu sähköteho on noin 2,25 GW. Tämä teholumina on hyvin lähellä avaruusvoimaloiden tehoarvioita, mutta kyseinen vertaus ei ole olennainen kaikilta osin. Kuten aiemmin luvussa 2 on mainittu, avaruusvoimalan olosuhteissa on jatkuvasti auringonsäteilyn kannalta ihanteelliset sääolosuhteet ja vuorokaudenajat, kun taas maan päällä sijaitsevan aurinkovoimalan energiantuotanto saattaa vaihdella radikaalistikin edellä mainittujen seikkojen vuoksi. [5, 28]

Yhdeksi suureksi kysymykseksi nousee myös aurinkosähkön siirto maanpäällä. Energialähteistä esimerkiksi maakaasun kuljettaminen onnistuu pitkien siirtoputkien avulla hyvin kauaskin energianlähteen alkuperäisestä tuotantomaasta, mutta sähkönsiirrossa häviöt ovat lyhyilläkin siirtomatkoilla mittavat. Maailmanlaajuinen avaruusenergian tuotanto ja siirtoverkko olisi yksi ratkaisu myös tähän ongelmaan. Avaruusvoimala olisi jatkuvasti liikkeessä maan kiertoradalla ja näin ollen loppukäyttäjät eivät olisi rajattu vain tietyn alueen tai valtion kansalaisiin. Esimerkiksi suurien luonnonkatastrofien tai energiapulan takia avaruusvoimalasta saatava energia voitaisiin hetkellisesti keskittää tietylle maantieteelliselle alueelle tai kylmemmille seuduille talven koittaessa. [2, 29]

Koska fossiilisten polttoaineiden käyttöä tulisi vähentää ilmastonmuutoksen minimoimiseksi, on lukuisat maapallolla sijaitsevat voimalaitokset ja niiden antama sähköteho korvattava jollakin. Avaruudessa tuotettu aurinkosähkö onkin hyvin puhdasta ja käytössä ollessaan aiheuttaisi vain pieniä ylläpidosta johtuvia kasvihuonekaasuemissioita. Voimalaitoksen rakentamisesta ei myöskään aiheutuisi haittaa luonnon kasvustolle tai eläimille, vaikkakin energian vastaanottoon tarvittavat suunta-antennit vaatisivatkin paljon tilaa maan pinnalla. [5]

Suurimmat haasteet johtuvatkin suurelta osin avaruusvoimalan suuresta koosta sekä sijainnista. Nykyiset avaruusvoimalakonseptit ovat mittaluokaltaan useita kilometriä leveitä ja näin ollen laukaisu kiertoradalle vaatisi hyvin suuren määrän energiaa. [19, 23, 24] Jos taas avaruusvoimala lähettäisiin kiertoradalle osissa taakan helpottamiseksi, kokoaminen tulisi suorittaa avaruudessa haastavissa olosuhteissa. Lisäksi laitteiston ylläpito ja huolto täytyisi hoitaa kokonaan etänä mahdollisesti robotiikkaa hyödyntäen. [28]

7. YHTEENVETO

Maapallon hupenevat fossiilisten energialähteiden varannot, pakottavat ihmiskunnan etsimään ratkaisuja muualta, mahdollisesti jopa avaruudesta. Avaruusvoimat ja niiden aurinkokennot olisivatkin luonnollinen jatkumo puhtaan energian käyttöön ottamiselle suuressa mittakaavassa, siten että suurtenkin alueiden energiantarve voidaan tyydyttää kokonaan lähes päästöttömillä vaihtoehdoilla. Kyse on kuitenkin melko monimutkaisesta sekä kunnianhimoisesta ratkaisusta energiantuotanto-ongelmiin ja tästä syystä avaruusvoimaa ei vielä toistaiseksi ole otettu käyttöön.

On syytä huomioida, että satelliiteissa ja avaruusasemilla on jo käytössä olosuhteisiin sopivia aurinkokennoja ja samaa tekniikkaa hyödyntäen avaruusvoimalla pystyisi keräämään aurinkoenergiaa maapallon energiankulutusta varten. Materiaalivalinnoissa tulee kuitenkin ottaa huomioon, että avaruus on ympäristönä erilainen kuin maan ilmakehä. Aurinkokennojen tulee siis kestää erilaisten avaruudessa kulkevien hiukkasten kuormitusta ja ottaa huomioon myös avaruudessa eri lailla tapahtuva jäähdytys avaruudessa, jossa energiaa ei siirry tavanomaisesti johtumalla. Avaruudesta saatava aurinkoenergia on kuitenkin teholtaan merkittävästi suurempaa kuin maassa ja saatavan säteilyenergian suuruus ei riipu vuorokauden ajasta.

Energian siirron osalta varsinaisen siirtoverkon rakentaminen olisi avaruuden olosuhteisiin nähden hyvin hankalaa ja työlästä. Tästä johtuen merkittävimmät ratkaisut pohjautuvat yksinomaan energian siirtämiseen langattomasti, avaruusvoimalasta maahan ja niemenomaan mikroaaltotekniikalla. Lähetinantenni onkin mahdollista optimoida siten, että mahdollisimman suuri osa energiasta saadaan siirrettyä takaisin maahan. Tästäkin huolimatta siirtoantennit ovat pakostikin kooltaan useiden kilometrien luokkaa, sillä siirtoetäisyys on hyvin suuri avaruusvoimalan ja maan välillä.

Vaikka erilaisia konsepteja avaruusvoimalan mahdollisesta ulkonäöstä ja toiminnasta on esitetty lukuisia, liittyy siihen edelleen varsin samankaltaisia haasteita, mutta myös mahdollisuuksia riippumatta konseptista. Laukaisukustannukset olisivat merkittävän suuret nykytekniikalla ja avaruusvoimalan rakentaminen olisi myös ongelmallista. Avaruusvoimalan käyttöönotto vaatisikin suuria investointeja avaruusrakettitekнологiaan, jotta hinta tuotettua kilowattia kohden saataisiin kilpailukykyisemmäksi muihin energiantuotantomuotoihin verrattuna. Toisaalta kyseisellä tekniikalla voitaisiin vastata energiapulaan ympäri maapallon ilman suuria fyysisiä sähkön siirtoverkkoja.

LÄHTEET

- [1] World Energy Outlook 2020, International Energy Agency, 2020, 464 p.
- [2] Sudhakar K, Solar space power: an overview, International Journal Ambient Energy, Vol. 41, 2020, pp. 600-607
- [3] Maini A.K., Agrawal V. Satellite technology: principles and applications, Wiley, 2014, 985 p.
- [4] Kaganov W. The transfer of energy from the solar-space power station to the Earth, E3S Web of Conferences, Vol. 25, 2017, pp. 1-4
- [5] Jaffe P, Hodkin J, Harrington F, Person C, Nurnberger M, Nguyen B, LaCava S, Scheiman D, Stewart G, Han A, Hettwer E, Rhoades D, Sandwich module prototype progress for space solar power, Acta Astronautica, Vol. 94, 2014, pp. 662-671.
- [6] Bailey S, Raffaele R, Solar Cells and their applications, 2010, 643 p.
- [7] Dey G.K. and Ahmmed K.T. Multi-junction solar cells and microwave power transmission technologies for solar power satellite, International Conference on Informatics, Electronics & Vision, 2014, pp. 1-6
- [8] Imaizumi M, Nakamura T, Takamoto T, Ohshima T, Tajima M, Radiation degradation characteristics of component subcells in inverted metamorphic triple-junction solar cells irradiated with electrons and protons, Progress in Photovoltaics, Vol. 25, 2017, pp. 161-174.
- [9] Fan G, Duan B, Zhang Y, Li X, Ji X, Full-spectrum selective thin film based photonic cooler for solar cells of space solar power station, Acta Astronautica, Vol. 180, 2021, pp. 196-204.
- [10] Skoplaki E, Palyvos J.A., On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations, Solar Energy, Vol. 83, 2009, pp. 614-624.
- [11] Li X, Duan B, Song L, Yang Y, Zhang Y, Wang D, A new concept of space solar power satellite, Acta Astronautica, Vol. 136, 2017, pp. 182-189.
- [12] Zhao B, Hu M, Ao X, Xuan Q, Pei G, Comprehensive photonic approach for diurnal photovoltaic and nocturnal radiative cooling, Solar Energy Mater Solar Cells, Vol. 178, 2018, pp. 266-272.
- [13] Shinohara N, Wireless power transfer via radiowaves, Wiley, 2014, 256 p.

- [14] Chen Q, Chen X, Duan X, Investigation on beam collection efficiency in microwave wireless power transmission, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 32, 2018, pp. 1136-1151.
- [15] Derat B, Hamberger G.F., Michaelsen F, Shortest range length to measure the total radiated power, *Institution of Engineering and Technology Microwaves, Antennas & Propagation*, Vol. 13, 2019, pp. 2584-2589.
- [16] Tran L, Cha H, Park W, RF power harvesting: a review on designing methodologies and applications, *Micro and Nano Systems Letters*, Vol. 5, 2017, pp. 1-16
- [17] Daiya V, Ebenezer J, Jehadeesan R, Rectenna panel design optimization for maximum RF power utilization, *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, Vol. 11, 2019, pp. 1024-1034.
- [18] Nosrati M, Dalili Oskouei H, Khalilpour J, Parallel-series connected rectenna array using frequency selective surface (FSS) for power harvesting applications at 5.8 GHz, *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, Vol. 29, 2019, e21819.
- [19] Li X, Cai Z, Dynamic Modeling and Simulations of a Tethered Space Solar Power Station, *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 31, 2018, 04018026.
- [20] Sasaki S, Tanaka K, Higuchi K, Okuizumi N, Kawasaki S, Shinohara N, Senda K, Ishimura K, A new concept of solar power satellite: Tethered-SPS, *Acta Astronautica*, Vol. 60, 2007, pp. 153-165.
- [21] Zhang T, Li Y, Chen Y, Feng X, Zhu X, Chen Z, Yao J, Zheng Y, Cai J, Song H, Sun S, Review on space energy, *Applied Energy*, Vol. 292, 2021, 116896.
- [22] Yang Y, Zhang Y, Duan B, Wang D, Li X, A novel design project for space solar power station (SSPS-OMEGA), *Acta Astronautica*, Vol. 121, 2016, pp. 51-58.
- [23] Meng X, Liu C, Bai,X, Du K, López C, Felipe A, Mankins J.C., Baig H, Mallick T.K., Optical Study of a Cocktail Structural Space-Based Solar Power Station, *Solar energy*, Vol 194, 2019, pp. 156–166.
- [24] Meng X, Liu C, Du K, Bai X, Comparison of the optical performance of different structural space solar power stations, *Applied Optics*, Vol. 59, 2020, pp. 263-270.
- [25] Fan G, Duan B, Zhang Y, Yang Y, Ji X, Li X, Secondary Concentrator Design of an Updated Space Solar Power Satellite with a Spherical Concentrator, *Solar energy*, Vol 214, 2021, pp. 400–408.

- [26] Yang Y, Zhang Y, Fan G, Li M, Pei M, Construction strategy and performance analysis of large-scale spherical solar concentrator for the space solar power station, *Solar Energy*, Vol. 207, 2020, pp. 133-143.
- [27] Capabilities & Services, SpaceX:n verkkosivut, 2021. Saatavissa: <https://www.spacex.com/vehicles/falcon-heavy/>
- [28] Paliwal, H., Dave, V, Renewable energy sources in rajasthan for sustainable development, *Institute of Physics Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol 785, 2021, 012007.
- [29] Hussein T, Transporting oil and gas: the world's longest pipelines, 2020. Saatavissa: <https://www.offshore-technology.com/analysis/worlds-longest-pipelines/>
- [30] Mankins J.C., New Directions for Space Solar Power, *Acta astronautica*, vol 65, 2009, pp. 146–156