



jamk

Vaihtoehtoinen sähkövoimaratkaisu polttomootorigeneraattoreille

Noa Huhtanen

Opinnäytetyö

Helmikuu 2025

Insinööri (AMK), Energia- ja ympäristötekniikka

Huhtanen, Noa

Vaihtoehtoinen sähkövoimaratkaisu polttomoottorigeneraattoreille

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Helmikuu 2025, 73 sivua

Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Opinnäytetyön toimeksiantajana oli Suomen Puolustusvoimat. Työ perustui toimeksiantajan tarpeeseen vähentää polttomoottorigeneraattorien eli voimakoneiden käyttöä sähköntuotannossa kenttäolosuhteissa. Voimakoneiden käyttöä tahdottiin vähentää polttoaineen kuljettamisen haastavuuden ja logistisen tehottomuuden vuoksi. Voimakoneet tahdottiin korvata laitteella, joka pystyy vastaanottamaan energiaa useista eri lähteistä, varastoimaan sitä ja luovuttamaan sähköenergiaa latauskohteille sopivalla hetkellä. Opinnäytetyön tavoite oli tuottaa taustatietoa ja ideoida voimakoneita korvaavan järjestelmän rakennetta toimeksiantajan tulevaisuuden kehitysprojekteja varten.

Työn alussa kerättiin taustatietoa työn toteuttamista varten. Tietoperusta koottiin verkosta löytyvistä materiaaleista, sekä aiheeseen liittyvästä kirjallisuudesta. Tietoperustassa opinnäytetyön aiheeseen liittyvää teoriaa käsiteltiin laajasti ja pyrittiin pohjustamaan työn suoritusvaihetta kattavasti. Voimakoneita korvaavaa laitetta alettiin kehittämään toteuttamalla kyselytutkimus Puolustusvoimien henkilöstölle. Tutkimuksen avulla selvitettiin laitteen kohderyhmän tarpeita ja laitteen vaatimuksia, jotka tuotiin esille raportin kyselytutkimuksen analysointiosiossa. Kyselyn jälkeen siirryttiin työn suoritusvaiheeseen. Suoritusvaiheessa luotiin kytkentäkaavio, joka sisälsi kehitetyn energiajärjestelmän tärkeimmät komponentit. Energiajärjestelmän suunnittelussa huomioitiin tarkoin kyselytutkimuksessa esiin nousseita vaatimuksia ja kohderyhmän näkemyksiä. Kytkentäkaavion laatimisen jälkeen suoritettiin työn raportointi, jossa kerrottiin järjestelmän komponenttien toiminnasta ja järjestelmän rakenteesta yksityiskohtaisesti.

Lopputulokseksi opinnäytetyössä muodostui kirjallinen selvitys voimakoneiden korvaamisesta kenttäolosuhteiden energiantuotannossa. Selvityksessä pohdittiin uusiutuvien energiamuotojen rajoitteita ja mahdollisuuksia osana sotilasjoukon energiahuoltoa, sekä voimakoneita korvaavan energiajärjestelmän vaatimuksia ja järjestelmän kohderyhmän ajatuksia järjestelmän toiminnasta. Selvityksessä esitettiin ratkaisu komentopaikan energiajärjestelmän rakenteesta ja taistelijoiden energiahuollon toteuttamisesta kenttäolosuhteissa.

Avainsanat (asiasanat)

Energiajärjestelmä, sähkövoimaratkaisu, vaihtoehtoiset energiaratkaisut ja off-grid-energiajärjestelmä

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

-

Huhtanen, Noa

Alternative electric power solution for the combustion engine generators

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, February, 73 pages

Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

Finnish Defense Forces was the employer of the thesis. The client wanted to reduce generator use for electricity production in field conditions. The desire to reduce generator use is due to the logistically inefficient and difficult process of transporting fuel. To replace generators, multiple energy sources should be used and produced energy should be stored in batteries. The client requested background information and ideas how this could be implemented.

At the beginning of the thesis background information was gathered to support its implementation. The theoretical part of the thesis was gathered from materials online and literature related to the subject. The theoretical part extensively covered theories relevant to the thesis topic, aiming to create good ground-work for the execution phase. A device to replace generators was developed by conducting a survey among the personnel of the Finnish Defense Forces. The survey was used to identify the target group's needs and the requirements for the device, which were presented in the reports survey analysis section. After the survey, the project proceeded to execution phase. During execution phase a wiring diagram was created, including the key components of the developed energy system. The design of the energy system carefully considered the requirements and perspectives highlighted in the survey. Following the creation of the wiring diagram, the project was documented, detailing the operation of the system's components and the structure of the system in detail.

The thesis outcome was a written report on replacing generators in energy production at field conditions. The report explored the limitations and possibilities of renewable energy sources as part of the energy maintenance for military units, as well as the requirements for an alternative energy system and the target group's perspectives on its functionality. The report presented a solution for the structure of the energy system at a command center and the implementation of energy maintenance for soldiers in field conditions.

Keywords/tags (subjects)

Energy system, electric power solution, alternative energy solutions and off-grid energy system

Miscellaneous (Confidential information)

-

Sisältö

1	Johdanto	8
1.1	Puolustusvoimat energiamurroksessa	8
1.2	Puolustusvoimat.....	9
2	Sähkötekniikan perusteet	10
2.1	Sähkövirta ja jännite.....	10
2.2	Tasa- ja vaihtovirta	10
2.3	Sähkövaraus	11
2.4	Teho.....	11
3	Energiantuotanto	11
3.1	Aurinkovoima	11
3.1.1	Aurinkopaneelityypit	13
3.2	Tuulivoima	14
3.3	Lämpövoima.....	15
4	Tasa- ja vaihtosuuntaaja	17
4.1	Tasasuuntaaja.....	17
4.2	Vaihtosuuntaaja	17
5	Akut	18
5.1	Lyijyhappoakku.....	18
5.1.1	Lyijyhappoakun lataaminen.....	19
5.2	Litiumakut.....	22
5.2.1	Litiumakkujen lataaminen	23
5.3	Lataussäätimet	25
6	Liitännät	27
6.1	USB-liittimet	27
7	Kyselytutkimus	28
7.1	Millaisia laitteita sähkövoimaratkaisulla tulee pystyä lataamaan tai käyttämään?	29
7.2	Millaisia latausliitäntöjä kyseisissä laitteissa on?.....	30
7.3	Millaista latausjännitettä- ja virtaa kyseiset laitteet vaativat?	31
7.4	Millaisia liittimiä sähkötuotantoon käytettävissä laitteissa on ja millaista jännitettä ja virtaa ne tuottavat?.....	32
7.5	Onko akuston jännitetasolle vaatimuksia?	32
7.6	Onko laitteen painolle ja koolle rajoituksia?.....	33
7.7	Onko laitteelle muita vaatimuksia, jotka on hyvä ottaa työssä huomioon?	34

8	Kyselytutkimuksen pohdintaa	35
8.1	Taistelijoiden käytössä olevat akut	36
8.2	Taistelijoiden akkujen lataaminen	38
9	Tukikohdan energiantuotantojärjestelmän suunnittelu	39
9.1	Aurinkopaneelijärjestelmä	40
9.1.1	Aurinkopaneelijärjestelmän mitoituslaskenta	43
9.1.2	Aurinkopaneelijärjestelmän energiantuotantopotentiaali	45
9.2	Tuuliturbiinit.....	47
9.2.1	Tuulivoimajärjestelmän energiantuotantopotentiaali	49
9.3	Tasavirran jakokeskus	49
9.4	Akusto.....	51
9.5	DC-latausliitännät.....	53
9.6	Vaihtosuuntaajat	54
9.7	Valvontajärjestelmä	56
9.8	Skaalattavuus	57
10	Yhteenveto.....	58
10.1	Lopputulokset.....	58
10.2	Kehitystyön luotettavuus ja pätevyys	61
10.3	Kehitystyö jatkossa.....	62
	Lähteet	63
	Liitteet	68
	Liite 1. Kysymys 1 vastaukset	68
	Liite 2. Kysymys 2 vastaukset	69
	Liite 3. Kysymys 3 vastaukset	69
	Liite 4. Kysymys 4 vastaukset	70
	Liite 5. Kysymys 5 vastaukset	70
	Liite 6. Kysymys 6 vastaukset	71
	Liite 7. Kysymys 7 vastaukset	72
	Liite 8. Energiajärjestelmän kytkentäkaavio	73
	Kuviot	
	Kuvio 1. Aurinkokennon toimintaperiaate (Aurinkosähköteknologiat, 2024.)	12
	Kuvio 2. Pienen vaaka-akselisen tuuliturbiinin rakenne ja kytkentäkaavio (Basic Components of a Wind Farm, n.d.)	14
	Kuvio 3. Termopari (Jouhara ym. 2021, 2.).....	15

Kuvio 4. TEG-elementin rakenne (Dhass, Babu, Pradhan, Murthy & Sreenivasan 2023, 36.)....	16
Kuvio 5. Lyijyhappoakun latausprofiili (Barsukov & Qian 2013, 25.).....	20
Kuvio 6. Lyijyhappoakun latausjännitteet eri lämpötiloissa (Charging at high and low temperatures, 2022.)	21
Kuvio 7. Litiumakun latausprofiili (Charging Lithium-ion, 2021.)	23
Kuvio 8. Litiumakun latausprofiili vaiheittain (Charging Lithium-ion, 2021.)	24
Kuvio 9. Aurinkopaneelin virta-jännite- ja teho-jännitekäyrä (Rao, Matar, Baharudin, & Ismail, 2020.)	25
Kuvio 10. MPPT- ja PWM-lataussäätimen tehoalue (Hopman, 2014.).....	26
Kuvio 11. PWM lataussäätimen toiminta (Bellamine, 2023.).....	27
Kuvio 12. Sähkövoimaratkaisulla ladattavat ja käytettävät laitteet	29
Kuvio 13. Laitteiden latausliitännät	30
Kuvio 14. Tasa- ja vaihtojännitteen jakauma	31
Kuvio 15. Tarvittavan tasajännitteen suuruudet	31
Kuvio 16. Sähköntuotannon laitteiden liitännät.....	32
Kuvio 17. Energijärjestelmän kytkentäkaavio	40
Kuvio 18. Energijärjestelmä tuotantoasennossa	41
Kuvio 19. Energijärjestelmä kuljetusasennossa	42
Kuvio 20. Aurinkopaneeliryhmän kytkentäkaavio	43
Kuvio 21. Lataussäätimen mitoittaminen	44
Kuvio 22. Lataussäätimen mitoittaminen ääriämpötiloissa	45
Kuvio 23. Aurinkopaneelien tuotantopotentiaali Helsingissä (Photovoltaic Geographical Information System, 2022.)	46
Kuvio 24. Aurinkopaneelien tuotantopotentiaali Sodankylässä (Photovoltaic Geographical Information System, 2022.)	47
Kuvio 25. Tuuliturbiinin kytkentäkaavio	48
Kuvio 26. Tasavirran jakokeskus	50
Kuvio 27. Akusto.....	51
Kuvio 28. Battery Balancer	52
Kuvio 29. Tasavirtalatausliitännät.....	53
Kuvio 30. Battery Protect	54
Kuvio 31. Vaihtosuuntaajat.....	55
Kuvio 32. Cerbo GX valvontajärjestelmä.....	56

Taulukot

Taulukko 1. USB-tyyppien maksimitehot,- jännitteet ja -virrat. (Smoot, 2020.)	28
Taulukko 2. Tuuliturbiinien vuotuinen energiantuotanto eri tuulenopeuksilla. (Power Calculator, n.d.)	49

1 Johdanto

1.1 Puolustusvoimat energiamurroksessa

Maailman suurin megatrendi on energiamurros, joka vaikuttaa energiantuotantomuotojen kehitykseen jatkuvasti. Energiamurroksen vaikutukset näkyvät myös Puolustusvoimissa. Energiamurroksen myötä kehittyneet uusiutuvat energiantuotantomuodot ovat potentiaalisia vaihtoehtoja perinteisten uusiutumattomien energiamuotojen rinnalle myös äärimmäisissä sovelluksissa, joissa vaaditaan ensilaatuista suorituskykyä ja toimintavarmuutta.

Puolustusvoimat pyrkii vähentämään joukkojen tarvitsemaa polttoaineen määrää energiantuotannossa. Puolustusvoimien teettämän tutkimuksen mukaan yksi joukoille toimitettu polttoainelitra vaatii kymmenen litraa polttoainetta sen kuljettamista varten. Jokainen kilometri, joka joudutaan ajamaan lisää myös todennäköisyyttä kohdata matkalla vihollisen vastatoimintaa. Vähentämällä joukon tarvitsemaa polttoaineen määrää voidaan merkittävästi vähentää tarvittavaa kuljetuskapasiteettia ja tehostaa huollon toimintaa. Joukkojen riippumattomuus polttoainehuollosta parantaisi joukon suorituskykyä, sekä mahdollistaisi kuljetuskapasiteetin käyttämisen tärkeimpien hyödykkeiden, kuten ammusten kuljettamiseen.

Tällä hetkellä joukkojen tarvitsema sähköenergia tuotetaan kenttäolosuhteissa polttomoottori-generaattoreilla eli voimakoneilla. Voimakoneiden kuluttamaa polttoaineen määrää pystytään vähentämään tukemalla niitä uusiutuvilla energiamuodoilla, joita on saatavilla sen hetkisestä toimintaympäristöstä. Sähköiset laitteet yleistyvät jatkuvasti sotilaskäytössä, jolloin myös joukkojen sähköenergian tarve kasvaa.

Polttoaineen määrän vähentämistä varten toimeksiantaja tarvitsee laitteiston, jolla energiaa voidaan vastaanottaa ja varastoida joustavasti useista eri lähteistä. Laitteella tulisi pystyä tuottamaan energiaa kenttäolosuhteissa toimivalle sotilasjoukolla. Laitteen käyttäjäkuntaan kuuluvat useat erilaiset joukko-osastot, kuten jatkuvasti liikkuvat tiedusteluosastot, sekä vähemmän liikkuvat ja enemmän sähköenergiaa tarvitsevat komentopaikalla toimivat joukot. Tässä opinnäytetyössä selvitettiin,

- Voidaanko voimakoneita korvata tässä käyttökohteessa?

- Millaisia energiamuotoja voidaan hyödyntää?
- Mitkä tekijät rajoittavat voimakoneiden korvaamista tai tukemista muilla energiamuodoilla?
- Millainen akusto laitteistoon tulisi liittää, jotta se soveltuu käyttötarkoitukseen?
- Millainen laitteiston rakenne voisi olla?
- Onko laitteen modulaarinen rakenne mahdollinen?

Kehitystyö aloitettiin alkukartoituksella. Kartoitus suoritettiin kyselytutkimuksena Puolustusvoimien henkilöstölle. Tarkoituksena oli selvittää kehitettävän laitteiston vaatimuksia ja kohderyhmän toiveita laitteen toteutuksessa. Kyselytutkimuksen pohjalta luotiin vaatimukset laitteelle ja edettiin ideoimaan laitteen rakennetta vaatimukset huomioiden. Työn tavoitteena ei ollut kehittää valmista laitekokonaisuutta, vaan ideoita ja tuottaa taustatietoa toimeksiantajan tulevaisuuden kehitysprojekteja varten.

1.2 Puolustusvoimat

Puolustusvoimat on perustettu vuonna 1918 ja se työllistää yli 13 000 ihmistä. (Puolustusvoimat, n.d.) Puolustusvoimat turvaa Suomen alueellista koskemattomuutta, kansan elinmahdollisuuksia, valtionjohdon toimintavapautta ja puolustaa yhteiskuntajärjestystä. Puolustusvoimat vastaa Suomen aseellisesta puolustamisesta, sekä viranomaisten tukemisesta ja aluevalvontatyöhön ja kansainväliseen kriisinhallintaan osallistumisesta. (Tietoa meistä, n.d.)

Puolustusvoimien kaikesta kalustosta ja materiaalista vastaa Puolustusvoimien logistiikkalaitos. Logistiikkalaitos toimii Puolustusvoimien Pääesikunnan alla ja sen tehtävänä on huolehtia kaluston ja materiaalin hankinnoista, ylläpidosta, sekä joukkojen, henkilöstön ja järjestelmien toimintakyvystä. Logistiikkalaitos on perustettu vuonna 2015 ja se työllistää yli 2300 henkilöä 40 eri paikkakunnalla. (Puolustusvoimien logistiikkalaitos, n.d.)

2 Sähkötekniikan perusteet

2.1 Sähkövirta ja jännite

Metalleissa alkuaineatomien vapaat elektronit liikkuvat satunnaisessa lämpöliikkeessä. Lämpöliike voi tapahtua mihin tahansa suuntaan yhtä suurella todennäköisyydellä. Mikäli metallista tehty johdin liitetään jännitelähteeseen, sen sisälle muodostuu sähkökenttä. Sähkökentän suunta on jännitelähteen positiivisesta kohtiosta negatiiviseen kohtioon. Syntynyt sähkökenttä saa metalliatomien elektronit liikkumaan vapaan lämpöliikkeen sijasta saman suuntaisesti sähkökentän positiivista kohtiota eli positiivista napaa kohden. Elektronien yhtenäinen liikkumissuunta ilmentyy sähkövirrana. Sähkövirta siis tarkoittaa varattujen hiukkasten liikettä johtimen poikkipinta-alan läpi tietyssä aikayksikössä. Sähkövirran SI-yksikkö on ampeeri (A). (Lehto, Maalampi, Havukainen & Leskinen, 11.)

Elektronien liikkeen mahdollistamiseksi täytyy jännitelähteen napojen välillä olla potentiaaliero. Tasajännitelähteen esimerkiksi pariston toisella navalla on elektronien ylimäärä, joka aiheuttaa navalle negatiivisen kokonaisvarauksen. Toisella navalla on puolestaan elektronivaje, josta aiheutuu navan positiivinen kokonaisvaraus. Napojen välinen varausten eroavaisuus aiheuttaa niiden välille potentiaalieron, jota kutsutaan tasajännitteeksi. Negatiivisesti varatut elektronit pyrkivät siis liikkumaan kohti positiivisesti varautunutta napaa. Jännitteen tunnus on U ja yksikkö voltti (V). (Lehto, Maalampi, Havukainen & Leskinen 2016, 19.)

Tasajännitelähteitä voivat olla esimerkiksi paristot tai akut. Mikäli paristo liitetään virtapiiriin, johon ei ole kytketty muita komponentteja on jännitelähde kuormittamaton. Kuormittamattoman jännitelähteen jännitettä sanotaan lähdejännitteeksi. Kuormitetun jännitelähteen jännitettä kutsutaan puolestaan napajännitteeksi. Napajännite on lähdejännitettä pienempi. (Lehto, Maalampi, Havukainen & Leskinen 2016, 20.)

2.2 Tasa- ja vaihtovirta

Tasavirta (DC, Direct Current) kulkee johtimessa aina yhteen suuntaan. Elektronit liikkuvat siis jatkuvasti jännitelähteen negatiiviselta navalta positiiviselle navalle. Tasavirran lähteitä voivat olla esimerkiksi akut, aurinkopaneelit tai paristot. (Lehto, Maalampi, Havukainen & Leskinen 2016, 10.)

Vaihtovirta (AC, Alternative Current) vaihtaa liikkeen suuntaa ja suuruutta johtimessa jatkuvasti. Elektronit vaihtavat liikkumissuuntaansa jaksollisin väliajoin. Tätä jaksollista suunnanmuutosta kutsutaan taajuudeksi, jonka tunnus on f ja yksikkö hertsi (Hz). Vaihtovirtaa tuotetaan esimerkiksi vaihtosähkögeneraattoreilla, jotka tuottavat sinimuotoista lähdejännitettä. Sinimuotoisen lähdejännitteen muodostuminen perustuu käämiin liikkeeseen homogeenisessa magneettikentässä. Tällöin magneettikenttä indusoi käämiin lähdejännitteen. (Aura & Tonteri 2005, 146–147.)

2.3 Sähkövaraus

Elektronien siirtämän varauksen suuruutta aikayksikössä kuvataan Coulombilla (C), jonka tunnus on Q. Yksi Coulombi on yhden ampeerin johtimen läpi yhdessä sekunnissa kuljettama sähkövaraus. Sähkövarauksella voidaan esimerkiksi ilmoittaa akun kapasiteetti ampeeritunneissa (Ah). Yksi ampeeritunti vastaa 3 600 coulombia. (Aura & Tonteri 2005, 42–43.)

2.4 Teho

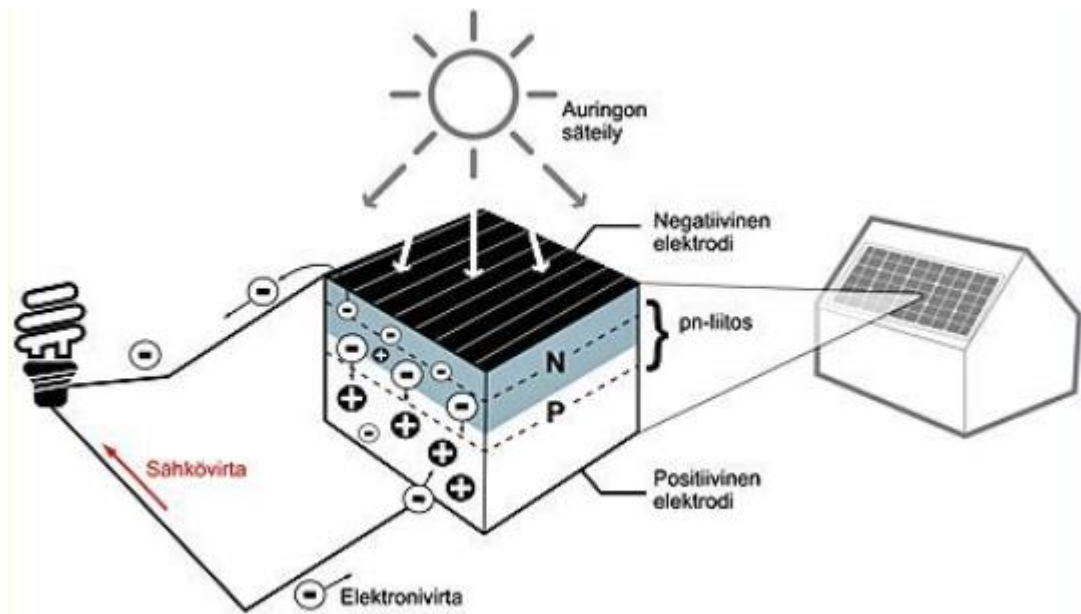
Sähköteho kuvaa käytetyn, tuotetun tai siirretyn sähköenergian suuruutta määrättyssä ajassa. Sähkötehon yksikkö on watti (W) ja sen tunnus on P. Vaihtovirran sähköteho jakautuu aktiivi-, lois- ja näennäistehoon. Aktiiviteho voidaan hyödyntää ja sen yksikkö on watti. Loistehoa ei voida hyödyntää työhön, mutta se on sähköjärjestelmän toiminnan kannalta välttämätöntä. Sen yksikkö on vari (var). Näennäistehon yksikkö on puolestaan voltiampeeri (VA) ja se sisältää aktiivi-, sekä loistehon. Aktiivi-, lois- ja näennäistehon yhteys voidaan esittää tehokolmion avulla, jossa näennäistehon neliö on aktiivi- ja loistehon neliöiden summa. (Aura & Tonteri 2005, 90–95.)

3 Energiantuotanto

3.1 Aurinkovoima

Aurinkovoima perustuu valosähköisen ilmiön hyödyntämiseen aurinkokennojen avulla. Auringon säteilyn fotonit irrottavat aurinkokennon puolijohdemateriaalista elektroneja. Irtoavan elektronin kohdalle syntyy aukko, joka on positiivisesti varautunut. Irronnut elektroni kulkeutuu PN-liitoksen muodostaman sähkökentän voimasta N-tyyppin puolijohteeseen ja aukko puolestaan P-tyyppin puolijohteeseen. N- ja P-tyyppin puolijohteet ovat kytketty toisiinsa virtapiirin välityksellä. Virtapiirin kautta N-tyyppin puolijohteessa olevat vapaat elektronit hakeutuvat P-tyyppin puolijohteessa oleviin

positiivisesti varautuneisiin aukkoihin muodostaen virtapiiriin sähkövirran. (Kalogirou 2014, 483–488.)



Kuvio 1. Aurinkokennon toimintaperiaate (Aurinkosähköteknologiat, 2024.)

N-tyyppin puolijohteina käytetään useimmiten piitä (S), johon on sekoitettu fosforia (P). Piillä on 4 valenssielektronia ja se saavuttaa oktettilakenteen muodostamalla kovalenttisen sidoksen toisten piiatomien kanssa. Fosforin sekoittaminen piihin aikaansaa elektronien ylimäärän puolijohteessa, sillä fosforilla on 5 valenssielektronia. Saavuttaakseen oktettilakenteen fosfori jakaa 4 ulkoelektroniaan, jolloin yksi elektroni jää vapaana puolijohteeseen. Vapaat elektronit aiheuttavat negatiivisen varauksen puolijohteelle. (Kalogirou 2014, 484–486; Evans, 2023.)

Myös P-tyyppin puolijohteet ovat usein piitä, mutta niiden sekaan on sekoitettu booria (B). Boori luo P-tyyppin puolijohteeseen positiivisen varauksen, koska sen uloimmalla elektronikuorella on 3 valenssielektronia. Tällöin puolijohteessa olevat elektronit eivät riitä muodostamaan jokaiselle atomille oktettilakennetta, jolloin puolijohteen rakenteeseen jää vapaita aukkoja. Puolijohde ei kuitenkaan saa positiivista kokonaisvarausta. (Kalogirou 2014, 484; Evans, 2023.)

P- ja N-tyyppipuolijohteiden yhdistyessä toisiinsa syntyy niiden välille PN-liitos. PN-liitokseen syntyy potentiaalivalli, joka aiheuttaa liitokseen sähkökentän ja estää varausten kulun liitoksen lävitse. PN-liitoksen sähkökenttä ohjaa fotonien irrottamat elektronit ja aukot eri puolijohteisiin,

joka mahdollistaa virran siirtymisen puolijohteiden välillä ulkoista virtapiiriä pitkin. (Kalogirou 2014, 486.)

Aurinkopaneelit muodostuvat useista sarjaan kytketyistä aurinkokennoista. Aurinkopaneelin tuottama jännite ja virta määräytyy aurinkokennojen määrän mukaan. Aurinkopaneelien jännite voidaan ilmoittaa avoimen piirin jännitteenä (V_{oc}) tai suurimman tehopisteen jännitteenä (V_{mp}). Avoimen piirin jännite kertoo aurinkopaneelin tuottaman jännitteen suuruuden silloin, kun siihen ei ole kytketty kuormaa. Suurimman tehopisteen jännite puolestaan kuvaa jännitteen suuruutta aurinkopaneelin toimiessa nimellisteholla. Oikosulkuvirta (I_{sc}) kertoo paneelin tuottaman virran suuruuden täydessä valaistuksessa ilman kuormaa. Paneelin toimiessa kuormitettuna ominaisteholla se tuottaa puolestaan ominaisvirran (I_{mp}). (Aurinkopaneelit, n.d.)

3.1.1 Aurinkopaneelityypit

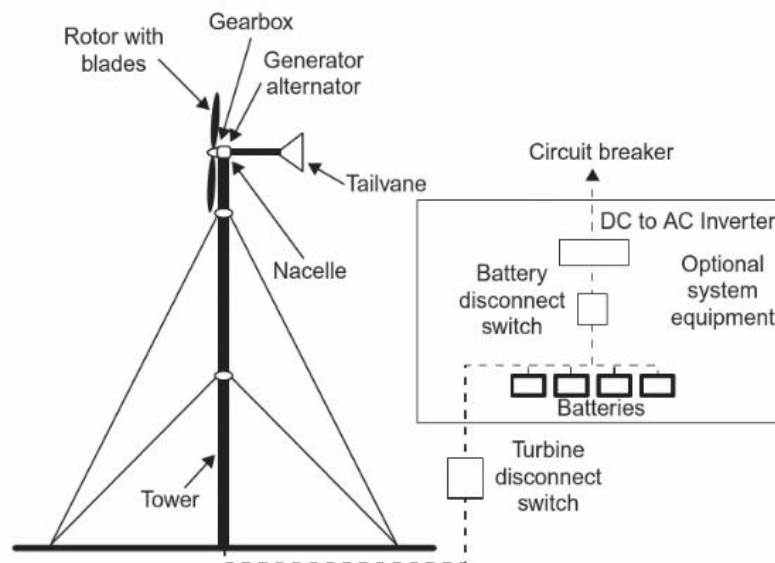
Aurinkopaneelit ovat yksikide-, monikide- tai ohutkalvopaneeleita. Perinteisin paneelityyppi on monikidepaneeli, joka on pinnaltaan tumman sininen ja sen pinnassa on kidekuvioita. Monikidepaneelit sisältävät suuren määrän piikiteitä, joiden rosainen rakenne ja suuri lukumäärä parantavat paneelin hajasäteilyn hyödyntämisominaisuuksia. Niiden hyötysuhde on tyypillisimmin 13–17 prosenttia ja ne ovat huomattavasti edullisempia yksikidepaneeleihin verrattuna. (Kalogirou 2014, 498; Aurinkopaneelit, n.d.)

Yksikidepaneeleiden pinta on tasainen ja väriltään musta. Yksikidepaneelit ovat hyötysuhteeltaan ja eliniältään monikidepaneeleita parempia, mutta ne ovat myös kalliimpia. Parempi hyötysuhde johtuu paneelissa olevan piin valmistustavasta. Useiden yksittäisten piikiteiden sijaan käytetään yhtä suurta piikidettä, jolloin paneelissa ei ole erillisten kiteiden välisiä rajapintoja. (Kalogirou 2014, 498; Evans, 2023.)

Ohutkalvopaneeleita ovat amorfiset piikennot, kadmiumtelluridikennot ja kupari-indiumgalliumseleniidikennot. Ne ovat yksi- ja monikidepaneeleihin verrattuna huomattavasti kevyempi rakenteisia. Ne kestävät hyvin taivuttamista, joten niiden asentamismahdollisuudet ovat huomattavasti muita paneelityyppejä monipuolisemmat. Ohutkalvopaneeleita voidaan valmistaa myös osittain läpinäkyvinä, jolloin niitä voidaan integroida esimerkiksi rakennusten ikkunoihin. (Kalogirou 2014, 498; Ohutkalvoteknologiat, 2023.)

3.2 Tuulivoima

Tuuliturbiinit muuttavat ilmassa kineettisen energian sähköenergiaksi. Tuuliturbiini koostuu perustasta, mastosta, nasellista, vaihdelaatikosta, generaattorista ja roottorista. Lisäksi turbiini voidaan varustella kulmansäätö- (pitch control) ja kääntöohjauksella (yaw control). Kääntöohjaus voidaan toteuttaa pienissä turbiineissa peräsiivekkeen avulla. Turbiineita on olemassa kahta päätyyppiä, jotka ovat vaaka-akseliset ja pystyakseliset turbiinit. (Breeze 2016, 19–23.)



Kuvio 2. Pienen vaaka-akselisen tuuliturbiinin rakenne ja kytkentäkaavio (Basic Components of a Wind Farm, n.d.)

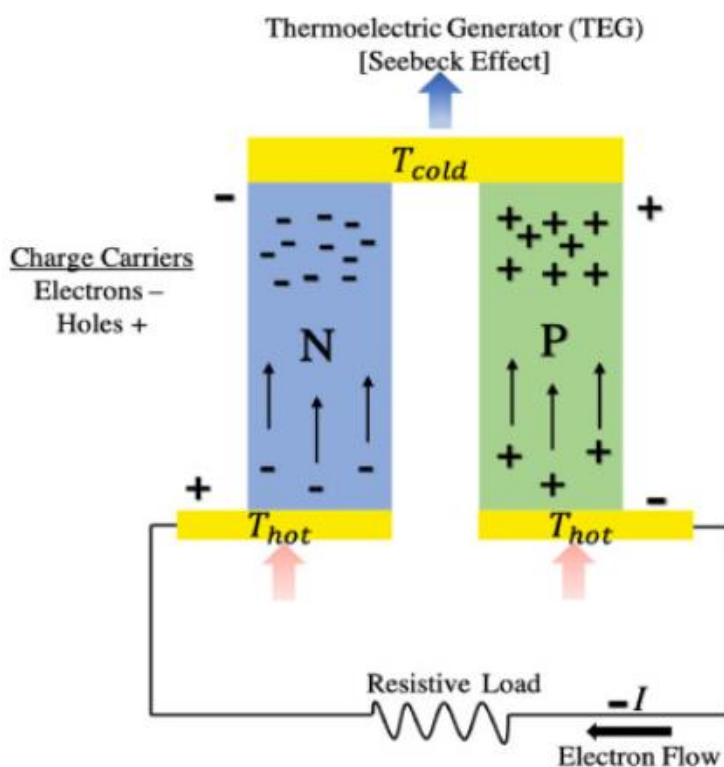
Tuuliturbiinin lavat ovat toiselta puolelta tasaisia ja toiselta kaarevia. Ilmavirran kohdistuessa turbiinin lapaan se kulkee sen ylä-, sekä alapuolelta. Ilmavirta joutuu kulkemaan pitemmän matkan kulkiessaan lavan yläpuolen kaarevaa pintaa pitkin verrattuna lavan alapuolen suoraan pintaan. Ilmavirran nopeusero aiheuttaa siiven yläpuolelle alipaineen ja alapuolelle ylipaineen. Paine-ero vetää lapaan alipaineen suuntaan ja aikaan saa turbiinin roottorin pyörivän liikkeen. (Breeze 2016, 30–32.)

Roottorin pyörivä liike johdetaan akselilla vaihdelaatikkoon, jolla roottorin pyörimisnopeus nostetaan generaattorille sopivalle tasolle. Direct Drive -turbiineissa generaattori on suoraan kytketty roottorin akseliin, jolloin vaihdelaatikkoa ei tarvita. Generaattorilla tuotetaan vaihtovirtaa, joka voidaan muuntaa tasavirraksi tasasuuntaajan avulla. (Breeze 2016, 41–48.)

Turbiinin tehokkuutta voidaan parantaa lapojen kulmasäädön avulla. Lapojen nostovoimaa voidaan kasvattaa tai pienentää eri tuulennopeuksilla kääntämällä roottorin lapoja. Kääntöohjauksella voidaan puolestaan kääntää turbiinin nasellia osoittamaan kohtisuoraan tuulenvirtaussuuntaa vastaan. Tuuliturbiinin tehon tuottoa mallinnetaan tehokäyrällä, jossa tehon tuotto esitetään tuulennopeuden funktiona.

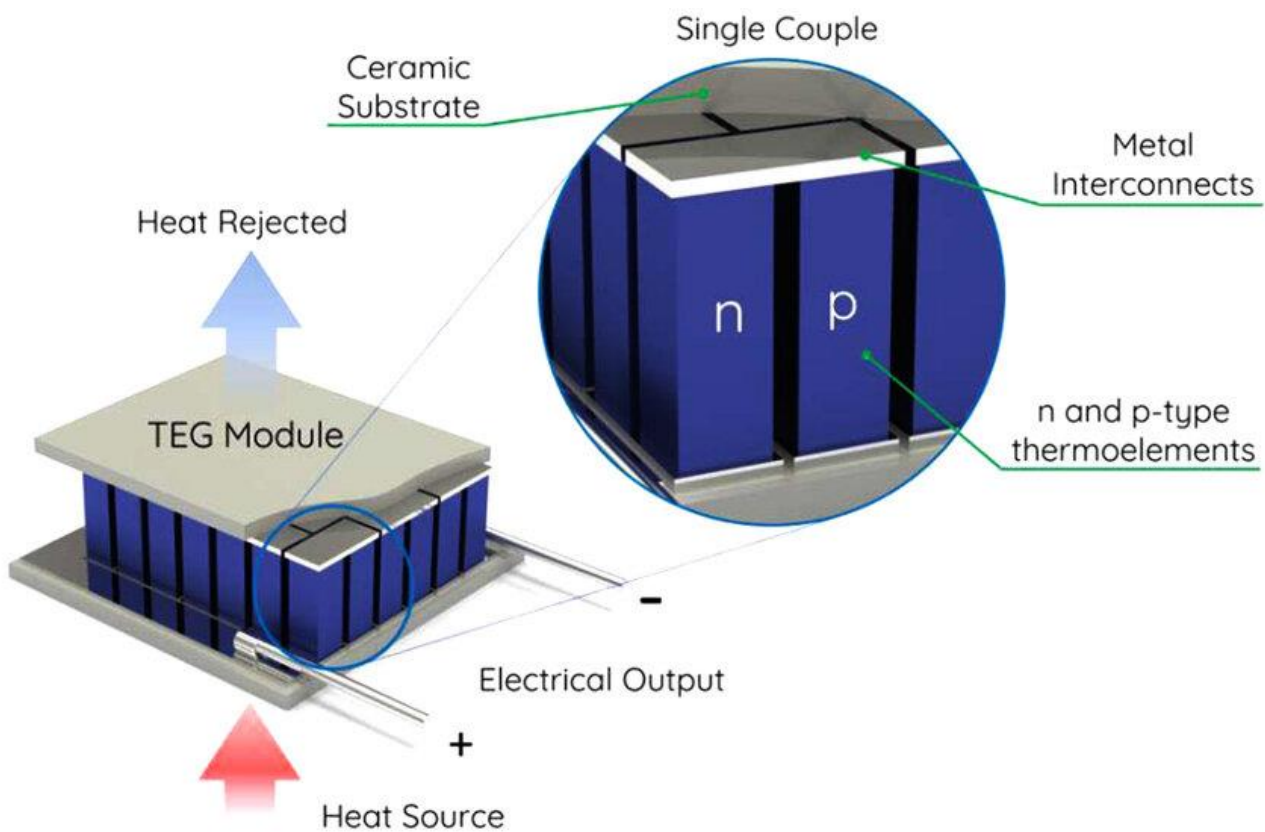
3.3 Lämpövoima

Lämpöenergiaa voidaan muuntaa sähköksi hyödyntämällä lämpösähköistä ilmiötä lämpösähkögeneraattorin avulla. Generaattori koostuu useista termopareista, jotka ovat kytketty termisesti rinnan ja sähköisesti sarjaan. Termoparissa on kaksi erilaista puolijohdetta, joista toinen on paljon vapaita elektroneja sisältävä N-tyyppin puolijohde, ja toinen positiivisesti varautunut aukkoja sisältävä P-tyyppin puolijohde. Termoparilla on kylmä- ja kuuma pinta, jotka luovat lämpötilaeron puolijohdeiden päiden välille kuvion 3 osoittamalla tavalla. Termoparien terminen rinnankytkentä tarkoittaa, että termoparit hyödyntävät samoja lämpöpintoja. (Jouhara, Zabienska-Gora, Khordehgh, Doraghi, Ahmad, Norman, Axcell, Wrobel, & Dai 2021, 2–3.)



Kuvio 3. Termopari (Jouhara ym. 2021, 2.)

Lämpötilaero aiheuttaa lämpösähkögeneraattorin kylmän ja kuuman puolen välille sähköisen jännitteen. Kuumalla puolella olevilla elektroneilla on enemmän kineettistä energiaa ja jännite muodostuu, kun kuuman puolen elektronit siirtyvät kohti kylmää pintaa nopeammin kuin kylmän puolen varauksen kuljettajat siirtyvät kohti kuumaa pintaa. Tällöin kylmäpuoli saa negatiivisen kokonaisvarauksen, kun taas kuumapuoli varautuu positiivisesti. Termoparit kytketään sähköisesti sarjaan kuvion 4 osoittamalla tavalla, jolloin ne muodostavat lämpösähköisgeneraattorin eli TEG-elementin. (Jouhara ym. 2021, 2–3.)



Kuvio 4. TEG-elementin rakenne (Dhass, Babu, Pradhan, Murthy & Sreenivasan 2023, 36.)

TEG-elementin kuumaa pintaa voidaan lämmittää millä tahansa lämpöä luovuttavalla prosessilla. Elementtien lämmönkesto riippuu käytetystä puolijohdemateriaalista. Yleinen materiaali on vismuttiteelluridi (Bi_2Te_3). Sen lämpötila kesto on tyypillisesti 85-230 asteen välillä. Korkeamman lämpötilan sovelluksissa voidaan käyttää esimerkiksi lyijyteelluridia (PbTe) tai pii-germaniumia (SiGe), jotka kestävät 260-480 ja 420-700 asteen lämpötiloja. P- ja N-tyyppin puolijohdeisiin lisätään erilaisia lisäaineita. Esimerkiksi vismutti-telluridielementissä P-tyyppiin sekoitetaan antimonia (Sb) ja N-tyyppiin seleniä (Se). Lämpöä voidaan poistaa moduulin kylmältä puolelta esimerkiksi ilman

tai veden välityksellä. Kylmälle puolelle voidaan asentaa esimerkiksi puhallin, vesijäähdytys tai kiinteä jäähdytys-elementti, joka maksimoi lämmönluovutus-pinta-alan. (Jouhara ym. 2021, 5–6.)

4 Tasa- ja vaihtosuuntaaja

4.1 Tasasuuntaaja

Tasasuuntaajalla muutetaan vaihtovirtaa tasavirraksi. Tasasuuntaajaa tarvitaan esimerkiksi varastoidessa tuotettua vaihtovirtaa akustoon. Tasasuuntaajan toiminnan kannalta keskeinen komponentti on diodi, joka mahdollistaa sähkövirran virtaamiseen vain toiseen suuntaan. Puoliaaltosuuntaajassa diodien avulla saadaan vaihtovirrasta suodatettua pois jännitteen negatiiviset arvot, mutta jännite vaihtelee edelleen positiivisen huippuarvon ja nollan välillä. Jännitevaihtelua voidaan suodattaa lisäämällä virtapiiriin kondensaattori. Kondensaattori tasoittaa jännitevaihtelua latautumalla jännitteen noustessa ja purkautumalla jännitteen laskiessa.

Kokoaaltosuuntaaja on tehokkaampi versio puoliaaltosuuntaajasta, koska sillä pystytään hyödyntämään myös jännitteen negatiiviset arvot ja muuntamaan ne tasavirraksi. Kokoaaltosuuntaaja koostuu neljästä diodista, jotka ovat kytketty esimerkiksi timanttikytkentään. Kuten puoliaaltosuuntaajassa myös kokoaaltosuuntaajassa esiintyy rippeliä, eli jännitteen sykkimistä. Tätä sykkimistä voidaan vähentää esimerkiksi kondensaattorin avulla. (Evans, 2021.)

4.2 Vaihtosuuntaaja

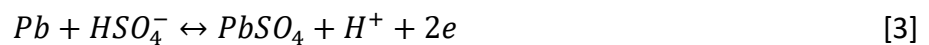
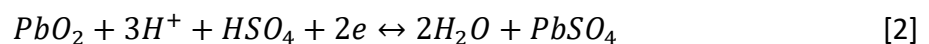
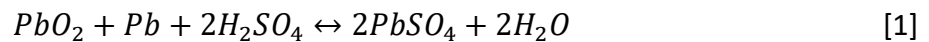
Vaihtosuuntaajalla eli invertterillä muunnetaan tasavirtaa vaihtovirraksi. Vaihtosuuntaaja on tarpeellinen, jos esimerkiksi akulla sähköistetään vaihtovirtaa vaativa kuorma. Vaihtosuuntaajan toiminta perustuu virtapiiriin liitettyihin kytkimiin, jotka voivat olla malliltaan esimerkiksi IGBT-kytkimiä. Kytkimet kykenevät avautumaan ja sulkeutumaan nopeasti ja niitä ohjataan ohjausyksiköllä. Avaamalla ja sulkemalla kytkinpareja sopivin aikaväleihin saadaan tasavirta vaihtamaan kulku-suuntaansa virtapiirissä halutulla taajuudella. Vaihtojännitteen taajuutta voidaan muuttaa hyödyntämällä vaihto- ja tasasuuntaajaa yhdessä. Tähän perustuu taajuusmuuttajan toiminta. Vaihtovirta muutetaan ensin tasasuuntaajan avulla tasavirraksi, jonka jälkeen sen vaihtosuuntaajalla muutetaan halutun taajuiseksi vaihtovirraksi. (Evans, 2017.)

5 Akut

5.1 Lyijyhappoakku

Lyijyhappoakun toiminta perustuu lyijyn ja rikkihapon sähkökemialliseen reaktioon. Akun negatiivisena elektrodina eli anodina toimii lyijymetalli (Pb), positiivisena elektrodina eli katodina lyijyoksidi (PbO₂), ja elektrolyytinä toimii rikkihappo (H₂SO₄). Akun purkautuessa rikkihapon sulfaatti-ionit (SO₄²⁻) reagoivat anodilla lyijyn kanssa ja katodilla lyijyoksidin kanssa. Lyijyoksidi luovuttaa reaktiossa happi-ioninsa (O²⁻) ja nämä hapettavat elektrolyytissä olevia vetyioneja (H⁺) muodostaen vettä (H₂O). Samanaikaisesti lyijyatomit anodilla luovuttavat kaksi ulkoelektroniaan, jotka kulkevat ulkoista johdinta pitkin anodilta katodille muodostaen sähkövirran. Molemmilla elektrodeilla muodostuu lyijysulfaattia (PbSO₄). (Crompton 2000, 210–211.); (Turpeenoja 2017, 64–73.)

Akun latautuessa tapahtuu elektrolyysi, jonka seurauksena purkautumisvaiheen reaktiot tapahtuvat käänteisesti sähkövirran toimesta. Elektrolyysiin johdettu virta aiheuttaa hapettumisreaktion anodilla ja pelkistymisreaktion katodilla. Reaktioiden seurauksena anodille syntyy jälleen lyijyatomia ja katodille lyijyoksidia. Kokonaisreaktio on esitetty kaavassa 1, katodireaktio kaavassa 2 ja anodireaktio kaavassa 3. (Crompton 2000, 210–211.); (Turpeenoja 2017, 77–85.)



Lyijyhappoakku koostuu kennoista, jotka ovat kytketty sarjaan. Jokaisessa kennossa tapahtuu edellä mainitut reaktiot akun latautuessa ja purkautuessa. Yhden kennon ominaisjännite on noin 2 voltia. 12 voltin lyijyakussa on tällöin 6 kennoa. (Crompton 2000, 211.)

Sulfaatio on lyijyakujen ongelma, jota esiintyy akun jännitteen pysyessä pitkään liian matalana. Sulfaatioissa lyijysulfaatti kiteytyy negatiivisille elektrodeille aiheuttaen kristalleja. Muodostuneet kristallit vähentävät akun aktiivista materiaalia ja täten heikentävät akun toimintakykyä. Kristalleja

voidaan poistaa kohdistamalla kennoa kohden korkea 2.5–2.6 voltin jännite, mutta pitkälle edennyt sulfaatio voi olla myös peruuttamatonta. Etenkin uudet lyijyakut pystyvät useimmiten palautumaan sulfaatiosta, vaikka akku olisi ollut matalajännitteinen useita viikkoja. (Sulfation and How to Prevent it, 2024.) Lyijyakuissa voi myös esiintyä positiivisen elektrodin korroosiota. Positiivinen lyijyelektrodi pehmittyy ja hajoaa jatkuvan reagoimisen seurauksena. Korroosiota ei pystytä koskaan täysin poistamaan, mutta sitä voidaan hidastaa välttämällä akun yllilataamista. (Corrosion, Shedding and Internal Short, 2021.) Lyijyakun yllilataaminen aiheuttaa myös kaasujen muodostumisen lisääntymistä akun sisällä. Etenkin vetykaasua ja happea muodostuu akun lämpötilan noustessa, jolloin akun sisäinen paine kasvaa ja akun räjähdysriski nousee. Kaasujen muodostaminen aiheuttaa elektrolyytin vähentymistä, joka heikentää akun suorituskykyä. (Loss of Electrolyte, 2021.)

Lyijyakun perinteisin versio on avoin lyijyakku, jota kutsutaan myös nesteakuksi tai märkäakuksi. Avoimessa akussa rikkihappoelektrolyytti on nestemäisenä peittäen akun sisärakenteet. Avoimen lyijyakun heikkous on kuitenkin sen huoltotarve, sillä siihen täytyy lisätä vettä säännöllisesti. Kehittyneempi ja huoltovapaa versio avoimesta akusta on suljettu akku. Suljetussa akussa syntyvä vety ja happi pystyvät reagoimaan takaisin vedeksi, jolloin veden lisäämisen tarve poistuu. Suljettu akku on varusteltu venttiilein, joiden kautta akun sisäinen paine pääsee purkautumaan noustessa liian korkeaksi. Suljetun lyijyakun kehittyneempiä versioita ovat geeliakut ja AGM-akut. Geeliakuissa rikkihappoelektrolyytin sekaan on lisätty silikaa, joka muuttaa elektrolyytin geelimäiseen muotoon. AGM-akuissa elektrolyytti on puolestaan imeytetty lasikuitumattoon. (How does the Lead Acid Battery Work?, 2021.)

5.1.1 Lyijyhappoakun lataaminen

Lyijyhappoakun lataamisessa yleisimmät lataustavat ovat Barsukovin ja Qian (2013) mukaan vakiovirta (CC), kaksi vaiheinen vakiovirta, vakiojännite (CV), sekä vakiovirta ja -jännite (CC/CV). Näistä lataustavoista nopein ja vähiten akkua vahingoittava tapa on vakiovirta- ja jännitelataus. Kyseinen

lataustapa esitetään hyväksi myös Battery Universityn artikkelissa Charging Lead Acid (2023). Molemmista lähteistä lyijyakun keskimääräiseksi latausajaksi esitetään noin 12 tuntia. Alla esitetyssä kuviossa 5 on Barsukovin ja Qian esitys lyijyakun latausprofiilista.

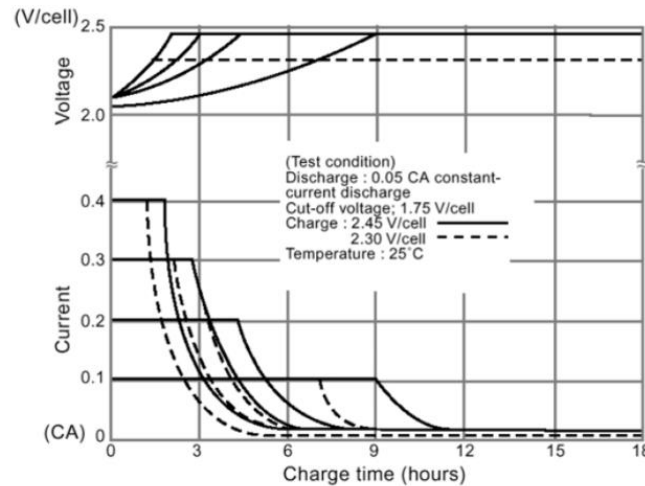


Figure 1.18 Charging profiles of a lead-acid battery using the CC/CV method with various voltage and current thresholds.

Kuvio 5. Lyijyhappoakun latausprofiili (Barsukov & Qian 2013, 25.)

Latausprofiili koostuu kolmesta vaiheesta. Battery Universityn mukaan ensimmäinen vaihe päättyy, kun akun varaustaso saavuttaa 70 prosenttia. Seuraavassa vaiheessa akun jännite pidetään vakioarvossa ja virran suuruus laskee vähitellen. Viimeisessä vaiheessa akun varaustaso pyritään pitämään lähellä maksimitasoa. Etenkin latausjakson toisella vaiheella pystytään merkittävästi vaikuttamaan akun kestävyteen ja elinkaaren pituuteen. Mikäli toinen vaihe jää liian lyhyeksi akun maksimivaraustaso ajan myötä laskee sulfaation vaikutuksesta.

Battery Universityn mukaan sopiva latausjännite kennoa kohden on 2.30 ja 2.45 voltin välillä.

Myös Barsukov ja Qian esittävät sopivaksi maksimijännitteeksi 2.39 voltia 25 asteen lämpötilassa, mutta 2.5 ja 2.6 voltin jännite on myös mahdollinen, sillä esimerkiksi sulfaation poistamisessa tarvitaan normaalia korkeampaa jännitettä sulfaattikristallien hajottamiseen. Matalalla 2.3–2.35 voltin latausjännitteellä päästään parempaan akun elinikään, mutta myös lataukseen vaadittava aika kasvaa ja sulfaation mahdollisuus nousee. Korkeammalla 2.4–2.45 voltin latausjännitteellä sulfaation riski vähenee ja latausaika pienenee, mutta kaasuuntumista esiintyy enemmän ja latauslämpötilan tulee olla matalampi.

Lyijyakun lataamisessa on otettava huomioon akun kennojen lämpötila. Barsukov ja Qian mukaan akun jännite on suoraan verrannollinen kennojen lämpötilaan. Kennon lämpötilan pudotessa asteella kennon jännite tippuu 3.9 millivolttia, jolloin latauslämpötilakerroin on -3.9 mV/C . Battery University puolestaan esittää, että kerroin on lyijyhappoakuille -3 mV/C . Latauslämpötilakerroin tarkoittaa, että latausjännitettä tulee nostaa tai laskea kennon lämpötilan noustessa tai laskiessa suhteessa akun keskimääräiseen käyttölämpötilaan. Lämpötilan laskiessa asteella, tulee latausjännitettä nostaa latauslämpötilakerroimen mukaisesti ja päinvastoin latausjännitettä laskea lämpötilan noustessa. Kuviossa 6 on esitetty lyijyakujen latausjännitteen ja ylläpitojännitteen muutosta lämpötilan muuttuessa.

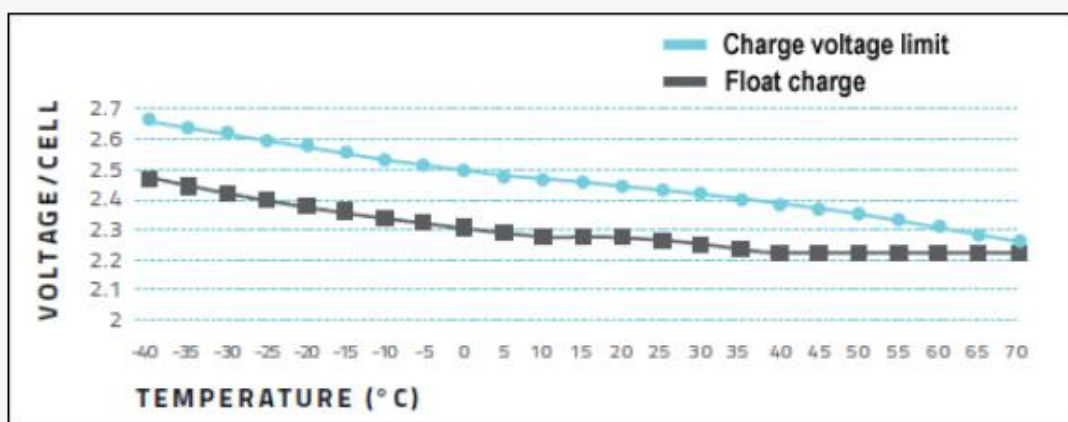


Figure 2: Cell voltages on charge and float at various temperatures ^[1]

Charging at cold and hot temperatures requires adjustment of voltage limit.

Kuvio 6. Lyijyhappoakun latausjännitteet eri lämpötiloissa (Charging at high and low temperatures, 2022.)

Lyijyakkua ei tule säilyttää maksimijännitteessä yli 48 tuntia, sillä kaasuuntumista voi esiintyä korkeilla jännitetasoilla. Pitemmän säilytyksen ajaksi kennojen jännite tulisi pudottaa Battery Universityn mukaan ylläpitojännitteeseen 2.25–2.27 voltin tasolle. Mikäli lämpötila nousee yli 29 asteen tulisi jännitettä pudottaa vielä alemmaksi. Barsukovin ja Qianin, sekä Battery Universityn mukaan lyijyakut tulee aina säilyttää ladattuna, sillä akun kuntoon negatiivisesti vaikuttavat reaktiot, kuten sulfaatio tapahtuu aina kennon ollessa jännitteettömässä tilassa. Battery University

kuitenkin mainitsee, että AGM akut sietävät matalaa jännitettä huomattavasti muita lyijyakkuja paremmin.

5.2 Litiumakut

Litiumakuissa voidaan hyödyntää useita erilaisia aktiivisia materiaaleja. Litiumakkuja ovat esimerkiksi litiumkoolttioksidi-, litiumrautafosfaatti-, litium-nikkeli-mangaani-koolttioksidi-, litium-nikkeli-kooltti-alumiinioksidi- ja litiumtitaaniakut. (Types of Lithium-ion, 2023.) Akkujen keskeisimmät erot liittyvät niiden katodimateriaaleihin, joiden myötä akuilla on erilaisia ominaisuuksia. (Bhatt, Withers & Wang, n.d.)

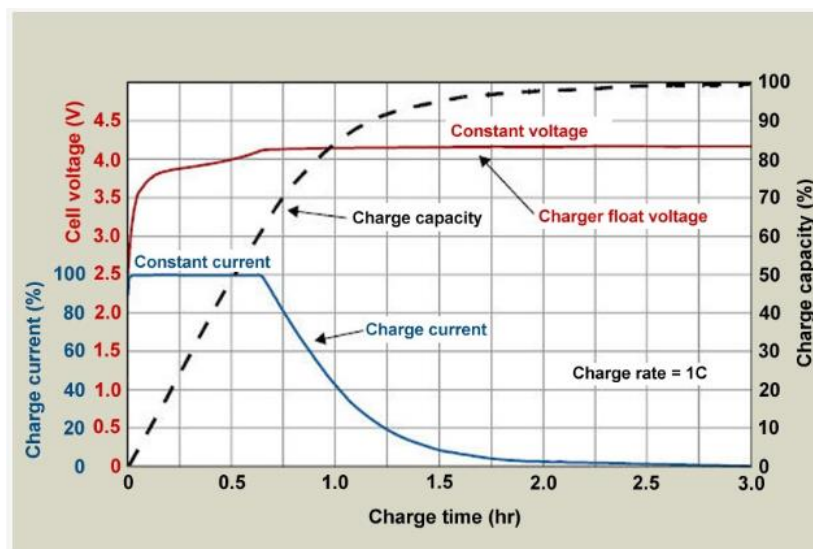
Litiumioniakussa anodimateriaalina käytetään usein grafiittia ja katodimateriaalina voidaan käyttää erilaisia litiumimetallioksideja, kuten litiumkoolttioksidia (LiCoO_2). Akun toiminta perustuu litiumatomien interkalaatioreaktioon ja liikkeeseen anodin ja katodin välillä. (Bhatt ym., n.d.) Interkalaatiossa materiaali tunkeutuu toiseen materiaalin muuttamatta sen rakennetta merkittävästi (Alemán, Chadwick, He, Hess, Horie, Jones, Kratochvíl, Meisel, Mita, Moad, Penczek & Stepto 2007, 1823). Litiumatomit kuuluvat alkalimetalleihin ja alkuaineiden ensimmäiseen pääryhmään, joilla on yksi valenssielektroni. Yksittäinen valenssielektroni tekee alkuaineatomista reaktiivisen ja se pyrkii luovuttamaan ulkoelektroninsa saavuttaakseen oktettirakenteen. (Szelong & Fan, n.d.)

Kaikki akun litiumatomit ovat interkaloituneena anodimateriaaliin akun ollessa täydessä varaustilassa. Liitettäessä kuorma litiumakkuun litiumatomit luovuttavat valenssielektroninsa ja muuttuvat litiumioneiksi. Ionisaation tapahtuessa litiumioni irtoaa anodimateriaalista ja luovutettu elektroni kulkee kuorman lävitse katodille. Litiumionit puolestaan siirtyvät tasapainottamaan sähkövarausta katodille elektrolyytin lävitse, joka on yleensä litiumsuolojen liuosta, kuten dimetyylikarbonaattia tai dietyylikarbonaattia. (Bhatt ym., n.d.) Elektrolyyttiin on upotettu erottaja, jolla anodi ja katodi erotetaan toisistaan. Erottajassa käytetään useita erilaisia materiaaleja, joista yleisimpiä ovat polyeteeni ja polypropeeni. Erottimen keskeisin tehtävä on estää anodin ja katodin kosketus toisiinsa, sekä mahdollistaa ionien liike, mutta estää elektronien liike erottimen lävitse. Katodilla elektroneja vetää puoleensa positiivisesti varautuneet kooltti-ionit, jotka tarvitsevat ulkoelektroneja saavuttaakseen oktettirakenteen. Kooltti-ionit ja vapaat elektronit reagoivat toisensa kanssa ja litiumionit interkaloituvat katodimateriaaliin muodostaen litiumkoolttioksidia. (Bhatt ym., n.d.)

Akun varaustaso laskee nolnaan kaikkien litiumionien interkaloiduttua katodimateriaaliin. Akun lataamisella litiumionit saadaan palautettua takaisin anodille. Johdettaessa virtaa litiumioniakkuun katodilla olevat elektronit pakotetaan siirtymään takaisin anodille. Tällöin interkaloituneet litiumionit irtoavat katodimateriaalista ja siirtyvät elektrolyytin lävitse takaisin anodille reagoiden vapaiden elektronien kanssa ja muuttuen takaisin litiumatomeiksi. Litiumatomit interkaloituvat anodinmateriaaliin ja akun varaustaso kohoaa. (Bhatt ym., n.d.)

5.2.1 Litiumakkujen lataaminen

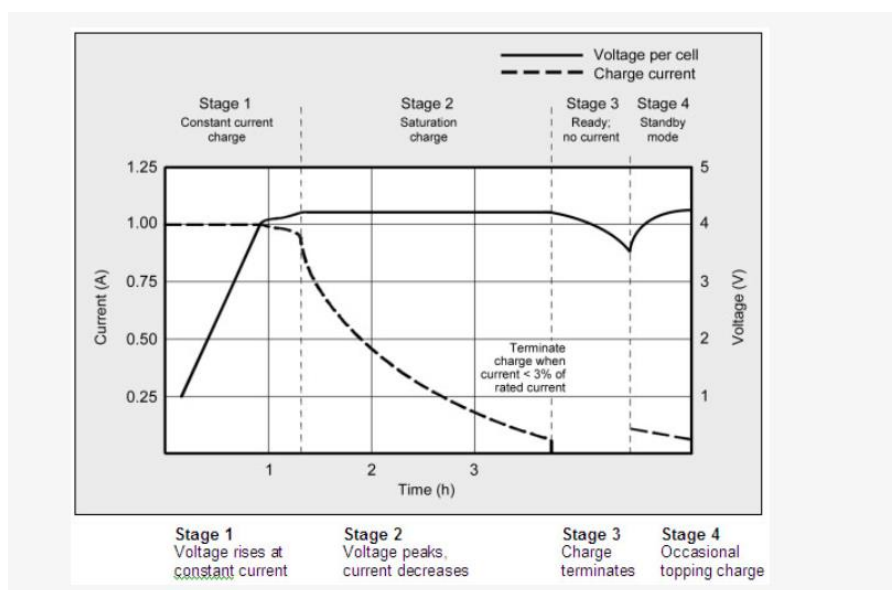
Litiumakkujen lataamisessa käytetään tyypillisesti tasavirta- ja tasajännitelatausta (CC/CV). Latausjännitteen suuruus riippuu käytettävästä akkutyypistä, esimerkiksi rautafosfaattiakuille maksimilatausjännite on 3.6 voltia kennoa kohden, titanaattioksidiaakuilla maksimijännite on 2.7 voltia kennoa kohden ja litiumkobolttioksidiaakuille 4.2 voltia kennoa kohden. Litiumakut eivät kestä ylilataamista ja niiden ylilataaminen aiheuttaa merkittävän turvallisuusriskin. (Barsukov & Qian 2013, 50–52.) Ylilataustilanteessa akun katodimateriaali muuttuu hapettajaksi ja alkaa muodostaa katodilla hiilidioksidia. Hiilidioksidi nostaa akun sisäistä painetta ja saattaa aiheuttaa erottajan hajoamisen. Mikäli anodin ja katodin välissä oleva erottaja hajoaa, on mahdollista, että akku menee oikosulkuun ja syttyy palamaan. Akun sisällä noussut paine voi myös aiheuttaa räjähdysten, joka saattaa levitä ketjureaktiona akun kaikkiin kennoihin. (Charging Lithium-ion, 2021.)



Kuvio 7. Litiumakun latausprofiili (Charging Lithium-ion, 2021.)

Litiumakun lataaminen alkaa tyypillisesti esilatausvaiheella, jonka aikana kennoja ladataan noin kymmenysoosan jännitteellä verrattuna seuraavaan pikalatausvaiheeseen. Esilatausvaiheella pyritään palauttamaan akku toimintakuntoon, etenkin, jos akku on ollut pitkään varauksettomana. Esilatausvaiheen matalalla jännitteellä myös pystytään tunnistamaan turvallisesti, mikäli akku on vaurioitunut sisäisesti. Useimmissa litiumakkujen latureissa on myös ominaisuus, jolla mitataan akun virran vastaanottokykyä esilatausvaiheessa. Mikäli akku ei pysty vastaanottamaan ennalta määritettyä varausta tietyssä ajassa laturi keskeyttää latausprosessin. (Barsukov & Qian 2013, 50–52.)

Esilatausvaihetta seuraa akun pikalatausvaihe, jossa lataustaso nostetaan 0.5-1.0 kertaa akun kapasiteetin suuruiselle tasolle. Suurin rajoittava tekijä pikalatausvaiheessa on akun lämpötilan nouseminen, joka ei saisi nousta latauksen aikana yli 45-50 asteen. Pikalatausvaiheessa akkuun syötetään vakiovirtaa ja jännite kohoaa akkutyypille sallitulle maksimirajalle. Kun akku saavuttaa määritellyn jännitetason pikalatausvaihe päättyy ja latausvirta alkaa laskea. Virran laskiessa akku saavuttaa täyden varaustason ja akun itsepurkautuminen alkaa, mikäli akkuun ei johdeta ylläpitovirtaa. Litiumakut ovat lataustavaltaan poikkeavia verrattuna muihin akkuihin. Täyteen varaustasoon lataaminen kuormittaa akkua ja saattaa lyhentää akun käyttöikää ja rajoittaa akun kapasiteettia. (Barsukov & Qian 2013, 50–52.); (Charging Lithium-ion, 2021.)

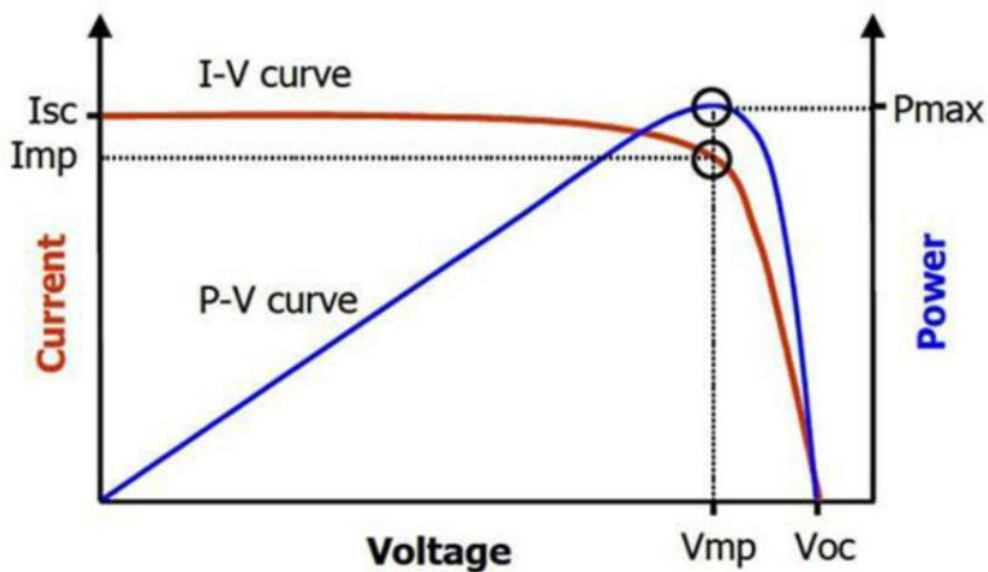


Kuvio 8. Litiumakun latausprofiili vaiheittain (Charging Lithium-ion, 2021.)

5.3 Lataussäätimet

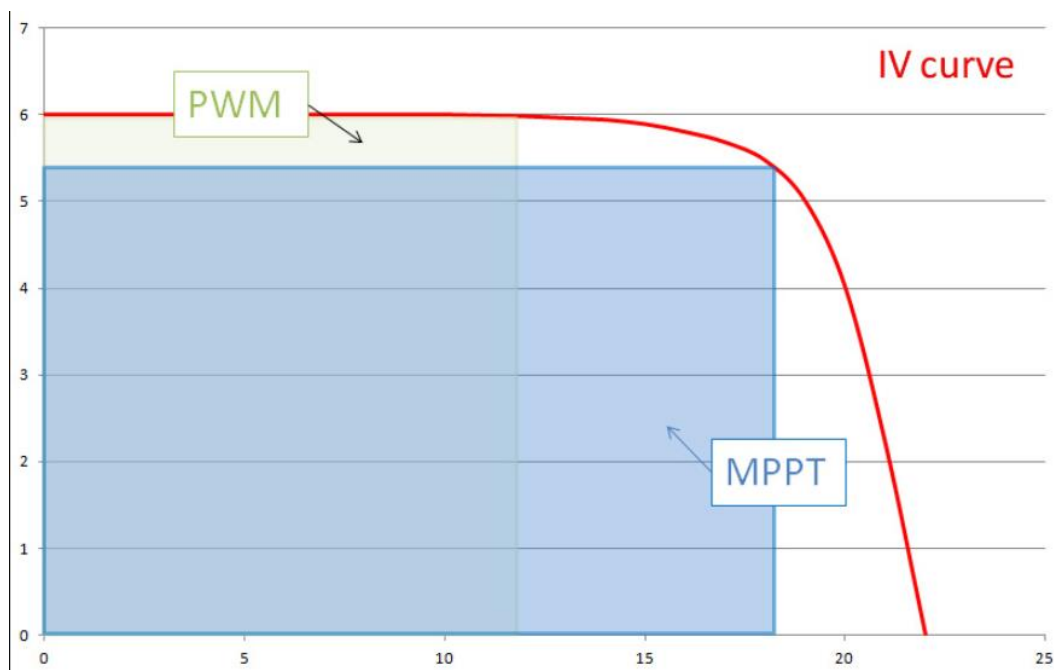
Lataussäätimet toimivat energiantuotantojärjestelmän, kuten aurinkopaneelien tai tuuliturbiinien ja akuston välissä. Säätimen tehtävä on ladata akustoa sille parhaiten soveltuvalla latausprofiililla ja estää akuston yllilatautuminen. Lataussäätimistä yleisimmät ovat MPPT- ja PWM-säätimet. MPPT-lyhenne tulee sanoista Maximum Power Point Tracking ja PWM sanoista Pulse Width Modulation.

MPPT on PWM-säädintä uudempi ja kehittyneempi lataussäädintyyppi. Se ohjaa aurinkopaneelia jatkuvasti toimimaan huipputeholla, jolloin aurinkopaneeleista saadaan maksimaalinen tehontuotto. MPPT-säädin muuttaa sisään tulevan virran ja jännitteen suuruutta jatkuvasti aurinkopaneelien jännite-virtakäyrän, sekä jännite-tehokäyrän mukaisesti. Kuviossa 9 on esitetty erään aurinkopaneelin käyrät.



Kuvio 9. Aurinkopaneelin virta-jännite- ja teho-jännitekäyrä (Rao, Matar, Baharudin, & Ismail, 2020.)

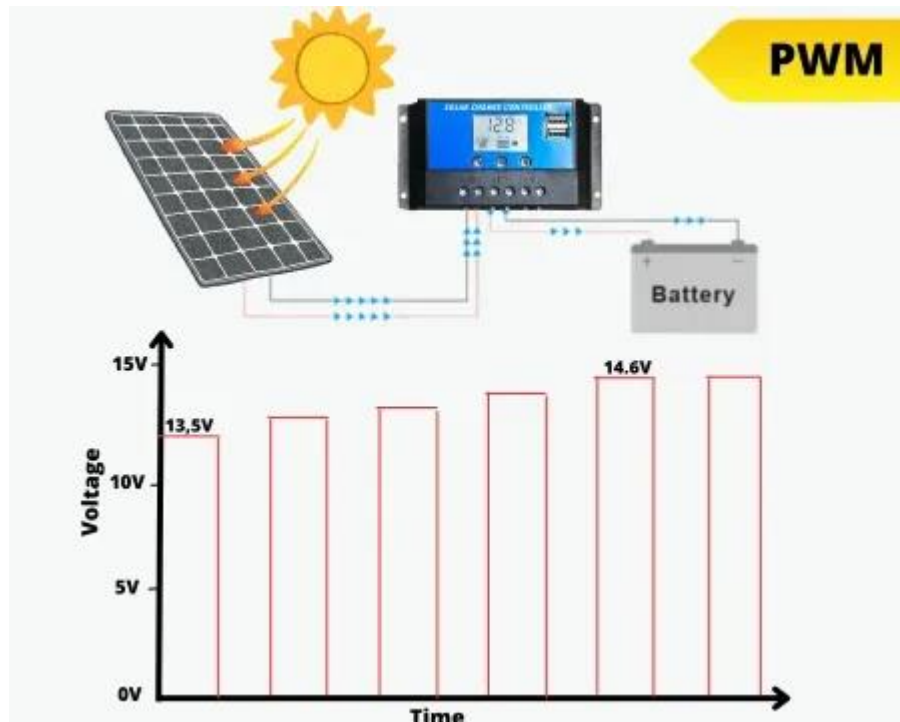
Kuviosta 9 voidaan huomata, että huipputehopiste löytyy jännite-tehokäyrän huippukohdasta. Huipputehopisteen virta saadaan selville, kun katsotaan vastaava piste virta-jännitekäyrältä. MPPT-säädin muuttaa sisääntuloparametrejä niin, että se pysyy jatkuvasti huipputehopisteessä. Erityisen hyvä MPPT-säädin on tilanteissa, joissa aurinkopaneeli on osittain varjossa, likaantunut tai muuten estynyt tuottamaan sähköä ominaistehollaan. MPPT-säädin sopii myös järjestelmiin, joissa aurinkopaneelien jännite on akuston jännitettä suurempi. Säädin pystyy madaltamaan lähtevää jännitettä ja kasvattamaan virran suuruutta, jolloin säätimen hyötysuhde on huomattavasti PWM-säädintä parempi. Kuviossa 10 on esitetty PWM-lataussäätimen ja MPPT-lataussäätimen hyödyntämän tehoalueen suuruuden ero.



Kuvio 10. MPPT- ja PWM-lataussäätimen tehoalue (Hopman, 2014.)

PWM-säädin on toimintaperiaatteeltaan yksinkertaisempi ja täten edullisempi vaihtoehto MPPT-säätimelle. PWM-säätimen toiminta perustuu latauspulssien pituuden säätelyyn. Säädin seuraa akun varaustasoa ja toimii ikään kuin kytkimenä aurinkopaneelien ja akuston välillä. Kytкин aukeaa ja sulkeutuu säädelleen latauspulssin pituutta, kuten kuviossa 11 on esitetty. PWM-säädin sopii järjestelmiin, joissa akuston ja paneelien jännite on sama, sillä se ei pysty muuttamaan paneelien tuottamaa ylimääräistä jännitettä virraksi MPPT-säätimen tapaan. Kuviosta 10 huomataan, että PWM-säätimen hyödyntämä tehoalue on huomattavasti MPPT-säädintä pienempi, sillä se pystyy toimimaan akuston jännitteen rajoissa, kun MPPT-säädin voi ottaa vastaan myös tätä

suurempaa jännitettä. Tämä tarkoittaa, että PWM-säätimellä on huomattavasti heikompi hyötysuhde verrattuna MPPT-säätimeen.



Kuvio 11. PWM lataussäätimen toiminta (Bellamine, 2023.)

6 Liitännät

6.1 USB-liittimet

USB on lyhenne sanoista Universal Serial Bus. USB-liittimet ovat suunniteltu tiedon ja virran siirtämiseen laitteiden välillä. Ensimmäinen USB-liitin julkaistiin vuonna 1996, jolloin tarkoituksena oli yksinkertaistaa, yhtenäistää, sekä nopeuttaa tietokoneiden ja oheislaitteiden välistä tietoliikennettä ja liitännöitä. USB-liittimiä on julkaistu useita erityyppisiä ja niiden keskeisin kehitys on tapahtunut tiedon ja virransiirto ominaisuuksissa. Liittimet jakautuvat tyypeihin A, B ja C. A ja B tyyppin USB-liittimistä on olemassa myös pienemmät versiot, jotka ovat USB mini A, USB mini B, USB mikro A ja USB mikro B.

USB-A liittimiä on julkaistu kolmessa sukupolvessa. USB 1.0 ja 1.1 julkaistiin vuosina 1996 ja 1998, USB 2.0 vuonna 2000, USB 3.0 vuonna 2008, USB 3.1 vuonna 2013 ja USB 3.2 vuonna 2017. 3. sukupolven USB-liittimen nimityksiä on muutettu jälkikäteen, joten USB 3.0 portista voidaan käyttää myös nimitystä USB 3.2 Gen 1 ja USB 3.1 portista nimeä USB 3.2 Gen 2x1. Viimeisin USB 4.0 on julkaistu vuonna 2019. (Smoot, n.d.)

USB-C liitin julkaistiin ensimmäisen kerran vuonna 2012. Sen keskeinen eroavaisuus aiempiin liittämiin on erilainen ja symmetrinen ulkomuoto. Se kykenee siirtämään dataa ja virtaa huomattavasti aikaisempia malleja enemmän. USB-C liittimistä on olemassa myös pelkästään lataamiseen tarkoitettuja malleja, jotka ovat merkitty kirjaimin PD. Erilaisten liittimien maksimivirta, -jännite ja -teho on esitetty taulukossa 1. (Smoot, 2020.)

Taulukko 1. USB-tyyppien maksimitehot, -jännitteet ja -virrat (Smoot, 2020.)

SPESIFIKAATIO	MAKSIMITEHO	MAKSIMIJÄNNITE	MAKSIMIVIRTA
USB 2.0	2,5 W	5 V	500 mA
USB 3.0 ja 3.1	4,5 W	5 V	900mA
USB BC 1.2	7,5 W	5 V	1,5A
USB Type-C 1.2	15 W	5 V	3A
USB PD 3.0	100 W	5/9/15/20 V	5 A
USB PD 3.1	240 W	28/36/48 V	5 A

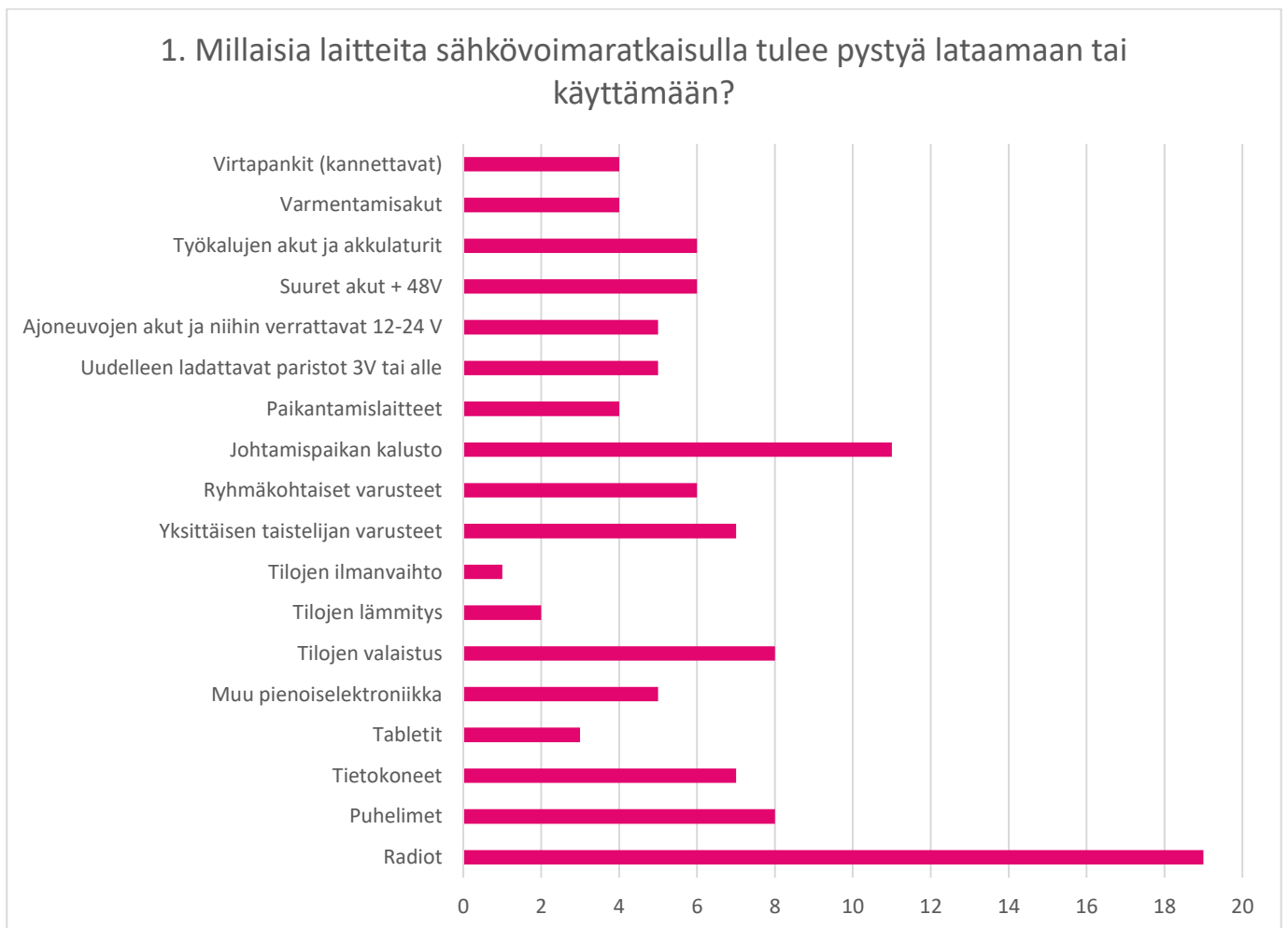
7 Kyselytutkimus

Osana opinnäytetyötä suoritettiin kyselytutkimus. Kysely toteutettiin Puolustusvoimien henkilöstölle anonyyminä tutkimusluvan mukaisesti ja se sisälsi yhteensä kahdeksan kysymystä. Kysymyksistä 7 oli avoimia kysymyksiä, joihin vastaajat saivat vastata vapaamuotoisesti. Vastauksia kertyi yhteensä 25 kappaletta, jotka löytyvät kokonaisuudessaan työn liitteistä. Kysely toteutettiin laadullisena ja vastaajille tahdottiin antaa mahdollisuus vastata kysymyksiin vapaasti, jotta omakohtaisia kokemuksia, tarpeita, ideoita ja käyttäjäkunnan hiljaista tietoa saataisiin mahdollisimman kattavasti selville. Suljetut kysymykset olisivat oleellisesti rajoittaneet vastaajilta saatavaa tietoa.

Laadullisen aineiston analysointiin ei ole olemassa yleispätevää mallia. Tärkeää on jalostaa aineisto helposti käsiteltävään muotoon ja tulkita mistä kaikesta aineisto kertoo. Yleisiä tapoja aineiston jalostamiselle ovat koodaaminen, teemoittelu ja tyypittely. (Günther & Hasanen, n.d.) Koodaamisessa aineiston osia yhdistellään, erotellaan ja ryhmitellään tiettyjen piirteiden tai ominaisuuksien mukaisesti. Vastaukset voidaan jaotella karkeasti yläryhmiin ja yläryhmien sisällä tarkemmin alaryhmiin. (Juhila, n.d.)

7.1 Millaisia laitteita sähkövoimaratkaisulla tulee pystyä lataamaan tai käyttämään?

Ensimmäisellä kysymyksellä selvitettiin lähtökohtia laitteen suunnittelulle. Saadut vastaukset koodattiin ryhmiin, jotta kokonaisuuden hahmottaminen ja visuaalinen havainnollistaminen oli helpompaa. Vastausten yhteenveto on esitetty kuviossa 12.

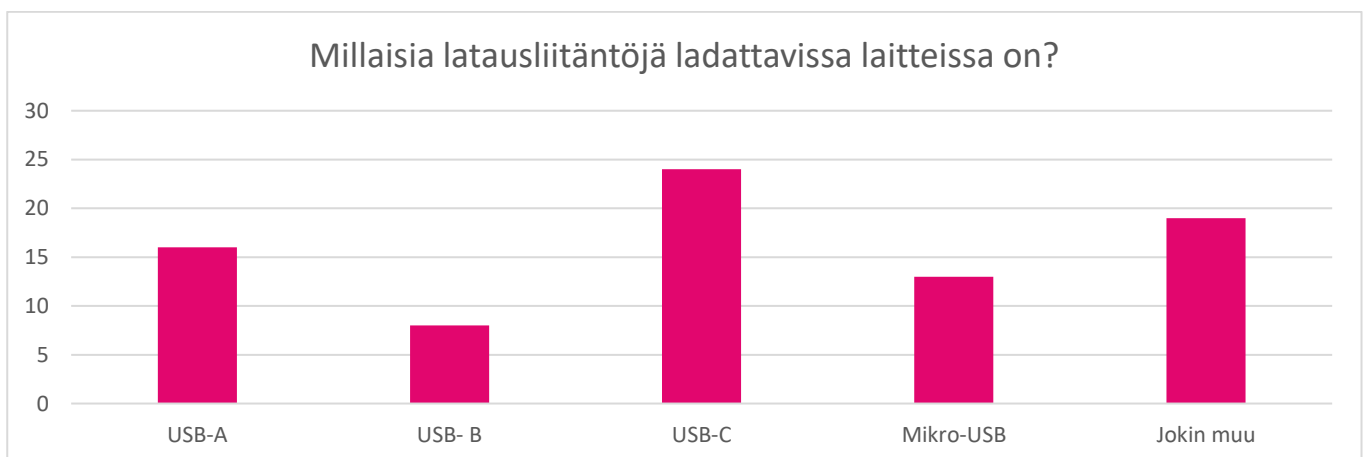


Kuvio 12. Sähkövoimaratkaisulla ladattavat ja käytettävät laitteet

Ensimmäisen kysymyksen vastauksissa esiintyi useita erilaisia lataus- ja käyttökohteita. Useassa tapauksessa virtaa tarvittaisiin pieniin kohteisiin, kuten puhelimiin, tabletteihin tai kannettaviin virtapankkeihin. Vastauksissa nousi esiin myös huomattavasti suurempia kulutuskohteita, kuten tilojen ilmanvaihto, lämmitys, suuret akut ja paikantamislaitteet. Suurimmassa osassa vastauksia latauskohteeksi mainittiin radiot. Radioiden tyypit vaihtelivat kevyistä, puhelimeen verrattavista taskuradioista raskaampiin kenttäradioihin. Myös johtamispaikan kalusto mainittiin useasti, johon voi kuulua lukuisia erilaisia käyttökohteita. Johtamispaikan kaluston osalta voidaan olettaa, että kaikki johtamispaikan laitteet pystyvät hyödyntämään verkkovirtaa ja omaavat laitekohtaisen laturin muuntajineen.

7.2 Millaisia latausliitäntöjä kyseisissä laitteissa on?

Toinen kysymys esitettiin osittain suljettuna kysymyksenä ja vastausvaihtoehdot ovat nähtävissä kuviossa 13. Kysymyksellä pyrittiin kartoittamaan yleisimpiä liitäntätyppejä ja mahdollisuutta lisätä latausportteja kehitettävään laitteeseen.

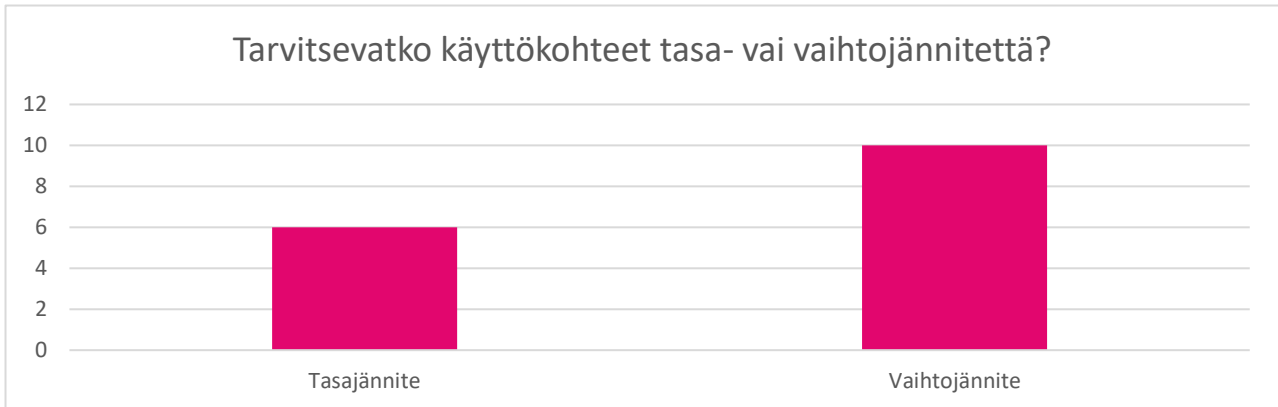


Kuvio 13. Laitteiden latausliitännät

Selvästi yleisimmät latausliitännät ovat USB-C ja USB-A. ”Jokin muu” vastausvaihtoehtoon vastaaja pystyi itse kirjoittamaan avoimen vastauksen. ”Jokin muu” -vaihtoehto valittiin 18 kertaa ja avoimissa vastauksissa mainittiin 11 kertaa, että laitteessa on laitekohtainen liitin ja laturi, joka voidaan liittää verkkovirtaan. 6 kertaa mainittiin myös suorakytkentä akun napoihin ja muita vastauksia olivat esimerkiksi natopistoke, tupakansytytinpistoke ja ruuvi-, sekä jousiliitin.

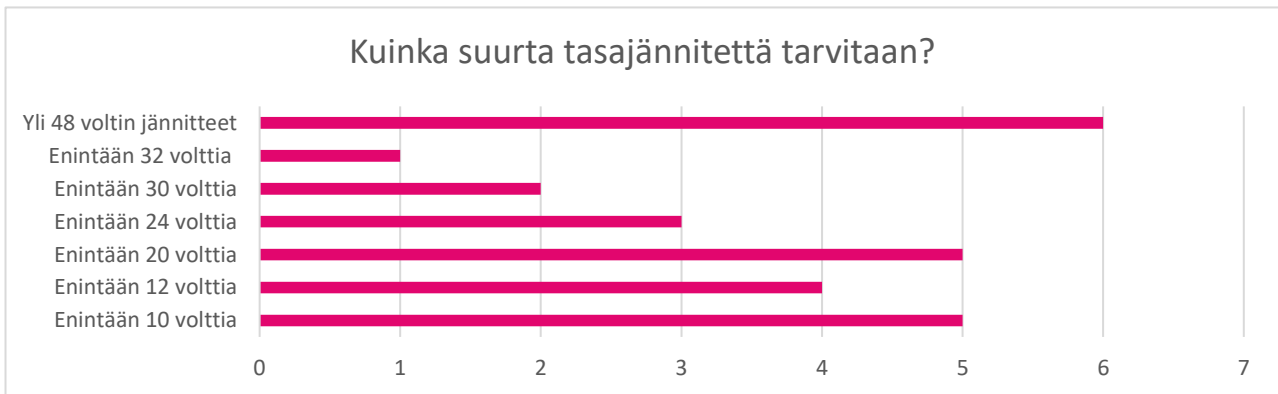
7.3 Millaista latausjännitettä- ja virtaa kyseiset laitteet vaativat?

Kolmannella kysymyksellä pyrittiin tarkentamaan aiempaa kysymystä ja selvittämään kuinka suurta jännitettä ja virtaa laitteella tulee pystyä tarjoamaan. Tasa- ja vaihtojännitteen jakauma esitetty kuviossa 14.



Kuvio 14. Tasa- ja vaihtojännitteen jakauma

Tarvittavan tasajännitteen suuruuksia on esitetty kuviossa 15.



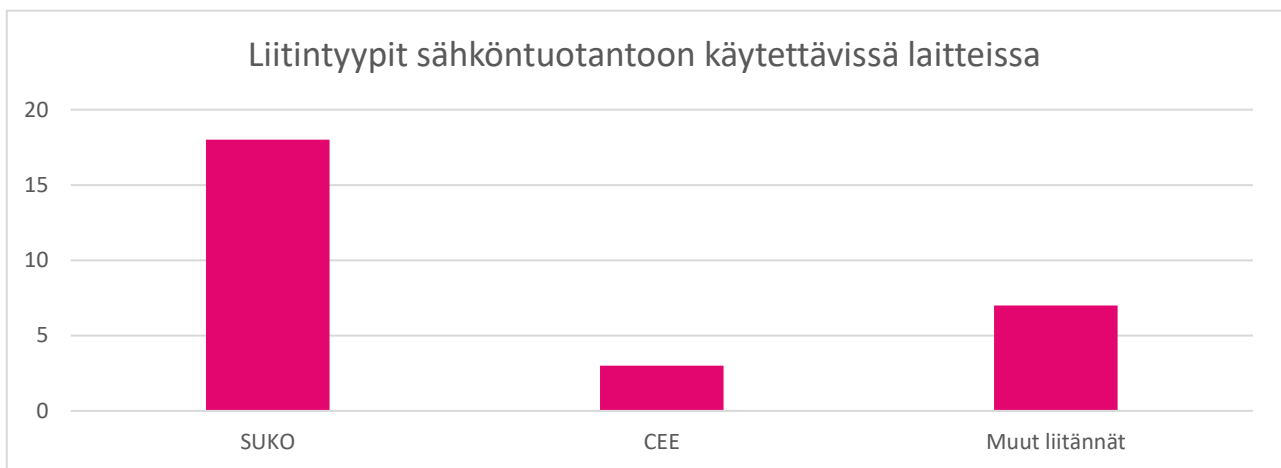
Kuvio 15. Tarvittavan tasajännitteen suuruudet

Tasajännitteen ja vaihtojännitteen jakauma on melko tasainen. Vaihtojännitteen tarve on suurimaksi osaksi 230 volttia, mutta myös 400 voltin vaihtojännitteelle on tarvetta. Tasajännitteelle on tarvetta useilla eri jännitetasoilla uudelleen ladattavien paristojen 1,5 voltista 48 voltin akustoihin. USB PD standardin mukainen USB-liitin pystyy tarjoamaan tasavirtaa tällä jännitealueella, mikäli vastaanottavassa laitteessa on mahdollisuus ottaa vastaan virtaa USB-C kaapelin välityksellä. Irrallisten akkujen lataamiseen, joihin virtaa syötetään suoraan napoihin kiinni tulevilla kaapeleilla voi

olla järkevää ottaa vaihtovirtaa SUKO-liittimestä erillisen akkulaturin välityksellä. Akkulaturissa on itsessään muuntaja, joka muuttaa jännitteen sopivaksi. Laturi sisältää myös latauspiirin, joka säätelee akkuun syötettävää jännitettä ja virtaa, sekä estää akun yllilatautumisen.

7.4 Millaisia liittimiä sähkötuotantoon käytettävissä laitteissa on ja millaista jännitettä ja virtaa ne tuottavat?

Neljännellä kysymyksellä selvitettiin, minkälaisin liitännöin tämänhetkiset sähköntuotantolaitteet ovat varusteltu. Lähtökohtaisesti sähköntuotannossa käytetään voimakoneita, jotka pystyvät tuottamaan 230 voltin vaihejännitettä ja 400 voltin pääjännitettä. Pienemmät voimakoneet tuottavat pelkästään 230 voltin 1 vaihevirtaa ja suuremmat voimakoneet pystyvät tuottamaan 230 voltin jännitettä kolmessa vaiheessa. Voimakoneiden liitännät on esitelty kuviossa 16.



Kuvio 16. Sähköntuotannon laitteiden liitännät

7.5 Onko akuston jännitetasolle vaatimuksia?

Vastauksissa nousi yleisimmin esille 12 ja 24 voltin jännitetasot, myös 48 voltia mainittiin. 12 ja 24 voltin jännitetasoa perusteltiin esimerkiksi sillä, että niitä voitaisiin käyttää suoraan ajoneuvojen käynnistysapuna. 12 voltin akulla virtaa voisi antaa henkilöautoille, mutta 24 voltin akulla apuvirtaa pystyisi antamaan myös raskaammille ajoneuvoille. Eräissä vastauksessa nostettiin esille, että jännitetaso tulisi olla mahdollisimman lähellä käytettävien laitteiden tarvitsemaa jännitettä. Tätä perusteltiin sillä, että hakkurivirtalähteet, esimerkiksi vaihtosuuntaajat, muuntajat ja taajuusmuuttajat ovat potentiaalisia häiriölähteitä, jotka haittaavat radioverkon toimintaa.

Eräessä vastauksessa mietittiin myös laitteen tulevaisuuden käyttötarkoituksia. Miehittämättömien ja miehitettyjen sähköajoneuvojen määrän arveltiin tulevaisuudessa kasvavan ja niiden laustarpeen täten lisääntyvän. Tarvetta olisi siis myös raskaammalle laitteelle, joka kykenisi lataamaan myös sähköisten ajoneuvojen akustoja tehokkaasti.

Akuston huollettavuuden näkökulma nostettiin vastauksissa esille ja ehdotettiin, että jännitetaso olisi hyvä olla alle 120 voltia. Tällöin akun huoltamiseen ei tarvittaisi sähköalan ammattilaista. Tärkeänä ominaisuutena pidettiin akuston ja laitteen yksinkertaisuutta, sekä väärinkäytön mahdollisuuden minimoimista. Laite tulisi suunnitella niin, että akuston virhekytkentä ei ole mahdollista.

7.6 Onko laitteen painolle ja koolle rajoituksia?

Eniten vastauksissa tuotiin esille, että jokaisella joukko-osastolla on erilaiset tarpeet ja toimintaympäristöt, joten laitteen koko ja käyttövaatimukset vaihtelevat tapauskohtaisesti. Yleinen mielipide oli, että yksittäistä jokaiselle joukko-osastolle sopivaa laitetta voi olla hankala toteuttaa. Sen sijaan ehdotettiin, että laitetta voisi olla saatavilla useammassa erilaisessa kokoluokassa. Koot voisivat olla esimerkiksi repussa kannettava, autolla tai peräkärryllä siirrettävä, sekä selvästi raskaampaan käyttöön tarkoitettu merikonttiin rakennettu laitteisto. Tällöin laite soveltuisi paremmin erilaisten joukko-osastojen käyttöön.

Liikkuvien joukkojen osalta painotettiin sitä, että laitteen tulee olla kevyt rakenteinen, joka tarkoittaisi enintään 3–5 kilon painoa. Lisäksi laitteisto olisi suunniteltava siten, että se ei vaikeuta taistelijan toimintaa ja sitä on helppo kantaa useita tunteja yhtä jaksoisesti. Taistelija- tai taistelijapari-kohtaisille laitteille riittää, että niillä pystytään pitämään viestilaitteita päällä noin vuorokausi.

Mikäli laite olisi ryhmä- tai joukkuekohtainen se tulee pystyä jakamaan useampaan osaan niin, että yhden osan maksimipaino on enintään 25 kiloa. Kokonaisuudessaan laite saisi olla enintään yhden kuutiometrin kokoinen.

Monessa vastauksessa mainittiin, että taistelijan tai taistelijaparin tulisi pystyä siirtämään laitteisto ajoneuvon kyydistä käyttöpaikalle noin 100–500 metrin matka. Esimerkki painoksi mainittiin 25–100 kiloa. Esiin nostettiin myös nosto- ja siirtoapuvälineitä, kuten kiinteät kädensijat, kantolaitteet, olkaremmit ja siirtorattaat, joiden avulla laitteen siirtäminen helpottuu ja laitteen maksimipaino voi tällöin olla suurempi. Erään vastaajan mukaan tällä hetkellä kevyin käytössä oleva voimakone

painaa tyhjänä 13 kiloa. Lisäksi mukana täytyy kantaa polttoainetta 10–20 litran jerrykannuissa, jotka painavat 10–20 kiloa kappale. Tehokkaammat voimakoneet painavat puolestaan tyhjänä 50–60 kiloa ja ovat kooltaan 650 millimetriä korkeita, 450 millimetriä leveitä ja 450 millimetriä pak-suja. Tämän koko luokan voimakoneita pystytään siirtämään maastossa 1–2 taistelijan voimin. Merikonttiin tai lavalle rakennettu laitteisto olisi siirrettävissä ajoneuvoin ja se pystyttäisiin laskemaan sopivaan kohtaan maastossa kuljetusajoneuvossa olevan nostimen avustuksella.

7.7 Onko laitteelle muita vaatimuksia, jotka on hyvä ottaa työssä huomioon?

Laitteelle esitettiin useita erilaisia vaatimuksia, joista yksi keskeisimmistä oli ympäröivien olosuh-teiden kestäminen. Etenkin kovat -30 asteen pakkaset, mutta myös kovat helteet nähtiin haasteel-lisina laitteen akustolle. Upottamisenkestoa, roiskesuojausta ja iskunkestävyyttä pidettiin laitteen perusominaisuuksina. Käyttöympäristön kuvailtiin olevan kuluttava, sillä laite tulisi olemaan ulkona sään armoilla ja säännöllisen liikuttelun kohteena.

Huollettavuus, toimintavarmuus, käyttöturvallisuus ja viansietokyky olivat vastausten mukaan tär-keitä ominaisuuksia laitteelle. Esimerkiksi vioittuneet liittimet tulisi pystyä vaihtamaan ryhmä- tai joukkuetasolla ja akuston vioittuessa rikkinäinen osa pitäisi pystyä vaihtamaan tai rajaamaan pois käytöstä. Huollettavuuden kannalta edullisinta olisi mahdollisimman yksinkertainen tekniikka, jonka toiminta on yksinkertaista ymmärtää ja täten helppoa korjata.

Laite ei saisi vaarantaa käyttäjien turvallisuutta vakavissakaan häiriötilanteissa ja sen tulee kestää turvallisesti esimerkiksi tulipaloja, korkeaenergisiä iskuja ja räjähdyksiä. Huomiota on kiinnitettävä siihen, että sähkön tuotto on jatkuvaa. Energiamuotojen välillä siirryttäessä ei saa muodostua kat-koksia sähkön tarjonnassa. Katkottoman sähkön tarjonnan mahdollistamiseksi laitteen olisi sisäl-lettävä riittävän kokoinen akusto. Vastauksissa etenkin litiumioniakut koettiin huonosti kenttä-käyttöön soveltuviksi niiden huonon kylmän keston vuoksi. Akkujen kylmän keston parantamiseksi ehdotettiin esimerkiksi akkua lämmittäviä vastuksia, kalvomaisia lämmityselementtejä ja riittävää lämpöeristystä. Lyijyakut mainitaan vastauksissa varmana perustekniikkana, jotka sietävät kyl-myyttä kohtalaisesti.

Vastauksissa käsitellään myös aurinko- ja tuulivoiman heikkouksia sotilaskäytössä. Aurinkopanee-lit, sekä tuuliturbiinit vaativat toimiakseen tehokkaasti mahdollisimman avoimen maaston, jossa

aurinkopaneeleihin kohdistuu mahdollisimman paljon säteilyä ja tuuliturbiineihin riittävästi tuulta. Avoin maasto on kuitenkin maavoimien joukoille usein epäedullinen, sillä kenttäolosuhteissa joukot pyrkivät maastoutumaan. Aurinkopaneelit ja tuuliturbiinit ovat helposti havaittavia kohteita, joten ne voivat vaarantaa tukikohdan sijainnin, jota pyritään kaikin keinoin pimentämään. Usein tukikohdat perustetaan tiheään metsikköön, jossa puiden oksat merkittävästi rajoittavat auringon valoa ja täten vievät aurinkopaneelilta toimintatehoa. Tuuliturbiinien koko nostetaan vastauksissa myös esille, sillä helposti kuljetettavat tuuliturbiinit ovat tehottomia, eivätkä riitä merkittävään energiantuotantoon.

Kolmessa erillisessä vastauksessa pohditaan, että järjestelmä toimisi niin sanotulla vaihtoperiaatteella. Käytännössä tämä tarkoittaisi, että joukkojen mukana kulkisi pelkästään akkuja, joita ladataan keskitetysti yhteisellä latauspaikalla tukikohdassa. Tukikohdassa oleva järjestelmä voi tällöin olla rakenteeltaan raskaampi, sillä sitä voidaan kuljettaa tukijoukkojen käytössä olevilla ajoneuvoilla. Tukikohdassa tuotettavan sähköenergian tuotantomuodoiksi ehdotettiin voimakoneita, aurinko-, tuuli- ja vesivoimaa, sekä vedyn hyödyntämistä energian varastoinnissa. Joukkojen mukana kulkevien akkujen suuruudeksi esitettiin noin vuorokauden tarpeen kattavaa kapasiteettia. Kyseiset akut voisivat olla hyvin perinteistä ja helposti korvattavaa elektroniikka, kuten laajasti käytössä olevia puhelinten virtapankkeja.

8 Kyselytutkimuksen pohdintaa

Kyselytutkimuksen perusteella voimakoneen korvaaminen osoittautuu monella tapaa haastavaksi. Voimakone on helppokäyttöinen, toimintavarma ja pystyy toimimaan myös kylmissä olosuhteissa. Vaihtoehtoisten energiamuotojen, kuten tuuli- ja aurinkovoiman heikkouksiksi osoittautui niiden huonot maastoutumisominaisuudet, pieni tuotantokapasiteetti ja sääolosuhteista riippuvuus. Uusiutuvat energianmuodot vaativat toimiakseen tehokkaasti akuston, jotta energiaa voidaan varastoida silloin, kun sitä on saatavissa. Energian varastointiin tarvittavan akuston kylmänkesto aiheuttaa myös osaltaan haasteita kenttäkäytössä. Suuret akut ovat painavia ja niiden siirtäminen ilman ajoneuvoa pitkiä matkoja ei ole kannattavaa

Voimakoneen korvaamisen sijaan aurinko- ja tuulivoimalla voitaisiin tukea energiantuotantoa kulutuksen huippuhetkinä. Tuotanto voisi tapahtua tukikohdassa, jossa laitteiden maastouttaminen

ei olisi välttämätöntä. Energiaa voitaisiin tuottaa tehokkaammilla aurinkopaneeleilla ja tuuliturbiineilla, joita voidaan kuljettaa ajoneuvoin. Tuotettua sähköä voitaisiin varastoida akustoihin, joista sitä voidaan tarpeen mukaan ottaa käyttöön tai akusto voitaisiin sellaisenaan siirtää sitä tarvitsevan joukon käyttöön. Tällä tavalla polttoaineen kulutusta pystyttäisiin vähentämään.

Kyselyn vastauksissa painotettiin useasti, että taistelijan mukana liikkuvan energiantuotantolaitteen täytyy olla kompakti. Ratkaisu tähän voisi olla, että taistelijat kantaisivat mukanaan pelkästään akkuja. Tällöin lataaminen tapahtuisi keskitetysti esimerkiksi tukikohdassa. Tukikohdassa energiaa voitaisiin tuottaa itsenäisesti aurinkopaneelein, tuuliturbiinein ja voimakonein.

8.1 Taistelijoiden käytössä olevat akut

Taistelijoiden mukana kulkevien akkujen tulisi olla mahdollisimman yksinkertaista teknologiaa, jotta niiden käyttö onnistuu kaikissa olosuhteissa. Akut kohtaavat käytössä kovaa kulutusta, joten laitteiden korvaamisen tulisi olla helposti toteutettavissa. Tällaiseen käyttöön voisi soveltua laajasti siviilikäytössä olevat mobiililaitteiden lataamiseen tarkoitettut virtapankit. Virtapankkeja on saatavissa laajasti erilaisin ominaisuuksin, kuten Haman valmistama 20 000 milliampeeritunnin virtapankki pystyy antamaan ja ottamaan vastaan virtaa USB-C liitännän välityksellä 5 voltin jännitteellä ja 3 ampeerin virralla, sekä 15 watin maksimilatausteholla. (Hama Supreme 20HD Power Pack, n.d.) Myös tehokkaampia malleja on saatavilla, kuten Sandbergin valmistama 50 000 milliampeeritunnin virtapankki, joka kykenee antamaan virtaa saman aikaisesti viidellä liittimellä, yhteensä 130 watin teholla. Yksittäisen laitteen suurin latausteho on 100 wattia. Haman perinteinen varavirtalähde painaa 460 grammaa ja on ulkomitoiltaan 20 senttimetriä korkea, 9 senttimetriä leveä ja 4 senttimetriä paksu. Sandbergin huomattavasti kehittyneempi, suuremman kapasiteetin ja tehon virtalähde on korkeudeltaan 15 senttiä, leveydeltään 7 senttiä ja paksuudeltaan 5 senttiä. Painoa Sandbergin laitteella on 1024 grammaa. (Powerbank USB-C PD 130V 50000, n.d.)

Sandberg valmistaa myös 96 000 milliampeeritunnin akkuja, joissa on yksi USB-C, kaksi USB-A liittintä, yksi DC-portti, kaksi 12 voltin tupakansytytin liittintä ja yksi langaton latausliitäntä. USB-C portti on USB PD standardin mukainen ja sillä voidaan antaa virtaa enintään 60 watin teholla. Tupakansytytin liittimillä voidaan antaa 180 watin virtaa 12 voltin jännitteellä ja 15 ampeerin virralla. DC-portista pystytään ottamaan puolestaan 24 voltia 4 ampeerin virralla ja 96 watin teholla. Virtalähdettä voidaan ladata käytön aikana samanaikaisesti Agfaphoton kannettavalla 120 watin

aurinkopaneelilla. Aurinkopaneelin korkeus on 20,9 senttiä, leveys 15,7 senttiä ja paksuus 7,2 senttiä. Painoa virtapankilla on 3,3 kiloa ja se sisältää rautafosfaattiakun, jonka käyttölämpötila on -10–60 astetta. (Survivor Powerbank 8in1 96000, n.d.)

Kylmän kestäviä varavirtalähteitä on myös saatavilla. Esimerkiksi Nitecoren valmistama Summit 20000 virtapankki sisältää itsessään lämmitysvastuksen, joka mahdollistaa akun käytön -40 asteen lämpötilassa. Litiumioniakun kapasiteetti on 20 000 milliampeerituntia ja se pystyy antamaan virtaa USB-C portin välityksellä 5 voltia ja 3 ampeeria, 9 voltia ja 2.22 ampeeria tai 12 voltia 1.68 ampeeria. Se sisältää myös USB-A portin ja pystyy antamaan virtaa molemmista porteista saman aikaisesti. Virtapankki on IPX5 suojattu ja sen korkeus on 12,4 senttiä, leveys 6 senttiä ja paksuus 2,2 senttiä. Painoa laitteella on 303 grammaa. (Summit 20000, n.d.)

Litiumioni- ja rautafosfaattiakut soveltuvat heikosti kylmiin olosuhteisiin, sillä niiden virran vastaanotto- ja luovuttamiskyky laskevat lämpötilan laskiessa alle nollan asteen. Toisaalta litiumakut sopivat keveytensä takia hyvin kannettaviin sovelluksiin. Akkujen lämpötilaa voitaisiin yrittää pitää toiminta-alueella erilaisin lämmittimin ja eristein. Virtapankkien kompaktin koon vuoksi niitä voitaisiin säilyttää esimerkiksi rintataskuissa tai kosketuksissa ihoa vasten vaatteiden alla. Tällöin kehon tuottama lämpö saattaisi riittää pitämään akun toimintakykyisenä tarvittavan ajan. Retkeilykäytössä virtapankkeja pidetään talviaikana lämpimänä lämpöpussien avulla. Lämpöpussit voivat olla kertakäyttöisiä tai uudelleen lämmitettäviä. Lämpöpussit kiinnitetään virtapankin kylkeen ja eristetään huolellisesti.

Taistelijakohtaiset virtapankit toisivat energihuollolle varmuutta verrattuna yksittäisiin suuriin ryhmäkohtaisiin akkuihin. On todennäköistä, että akkuja häviää ja vaurioituu käytössä, jolloin kapasiteetin hajauttaminen on edukasta. Hajauttamalla akkukapasiteetti jokaisen taistelijan kesken ryhmän kaikki virta ei ole riippuvainen yhdestä akusta. Tällöin laitteen hajoaminen ei aiheuta kaiken sähköenergian menettämistä.

Virtapankkien yleisyys siviilikäytössä luo myös joukkojen varustamisen kannalta merkittävän edun. Etenkin konfliktin alkuvaiheissa joukot voisivat hyödyntää henkilökohtaisia virtapankkejaan. Tämä

antaisi aikaa hankintaketjulle hankkia lisää akkuja, joita joukoille jaetaan. On myös otettava huomioon, että virtapankkeja ei kannata pitää varastossa valmiina pitkiä aikoja, etteivät akut kuoleudu käyttökelvottomiksi.

8.2 Taistelijoiden akkujen lataaminen

Joukkojen huoltamisen nopeuttamiseksi olisi hyödyllistä, että tyhjät akut voitaisiin vaihtaa täysiin, jolloin akkujen lataamista ei tarvitse jäädä odottamaan. Toisaalta keskitetyllä latauspisteellä latausolosuhteiden, lähinnä lämpötilan, hallitseminen on helpompaa, jolloin akkuja voidaan pikaladata. Hallitut latausolosuhteet myös pidentävät akkujen elinikää ja mahdollistavat varmemman latauksen. Keskitetty lataaminen ei kuitenkaan aina ole mahdollista, jolloin on tärkeää, että ryhmä pystyisi tuottamaan sähköenergiaa selviytymisen ja tehtävän suorittamisen kannalta tärkeille laitteille. Vaihtoehdot sähköntuottamiseen maastossa ovat rajalliset huomioiden energiantuotantolaitteiden kokorajoitukset. Esimerkiksi Agfaphoton valmistama kannettava aurinkopaneelijärjestelmä pystyy tuottamaan sähköenergiaa optimiolosuhteissa 120 W teholla ja 18 tai 36 voltin jännitteellä. Se sisältää itsessään lataussäätimen, josta virtaa voidaan luovuttaa USB-C liitännällä tai hauenleuka liittimin. Laite painaa 4,48 kiloa ja sen korkeus pakattuna on 36 senttiä, leveys 29,5 senttiä ja paksuus 4 senttiä. (Mobile Solar Panel – AgfaPhoto Solar Panel SP120, n.d.)

Yksi vaihtoehto energiantuotannolle maastossa on lämpösähköisen generaattorin hyödyntäminen. Toimiakseen tehokkaasti TEG-elementit vaativat mahdollisimman suuren lämpötilaeron elementin kylmän ja kuumen puolen välille. Kyselytutkimuksen vastauksissa ehdotettiin, että TEG-elementtejä voitaisiin käyttää esimerkiksi teltan ja kamiinan välisen lämpötilaeron hyödyntämiseen. Kamiinan pinta muodostaisi tällöin elementin kuumaan puoleen ja kylmää puolta voitaisiin jäähdyttää esimerkiksi puhaltimin, ympäristöstä saatavan lumen, jään tai veden avulla. TEG-elementtien käyttöä rajoittaa eniten, että kylmän ja kuumen puolen täytyy olla saman elementin vastakkaisilla puolilla.

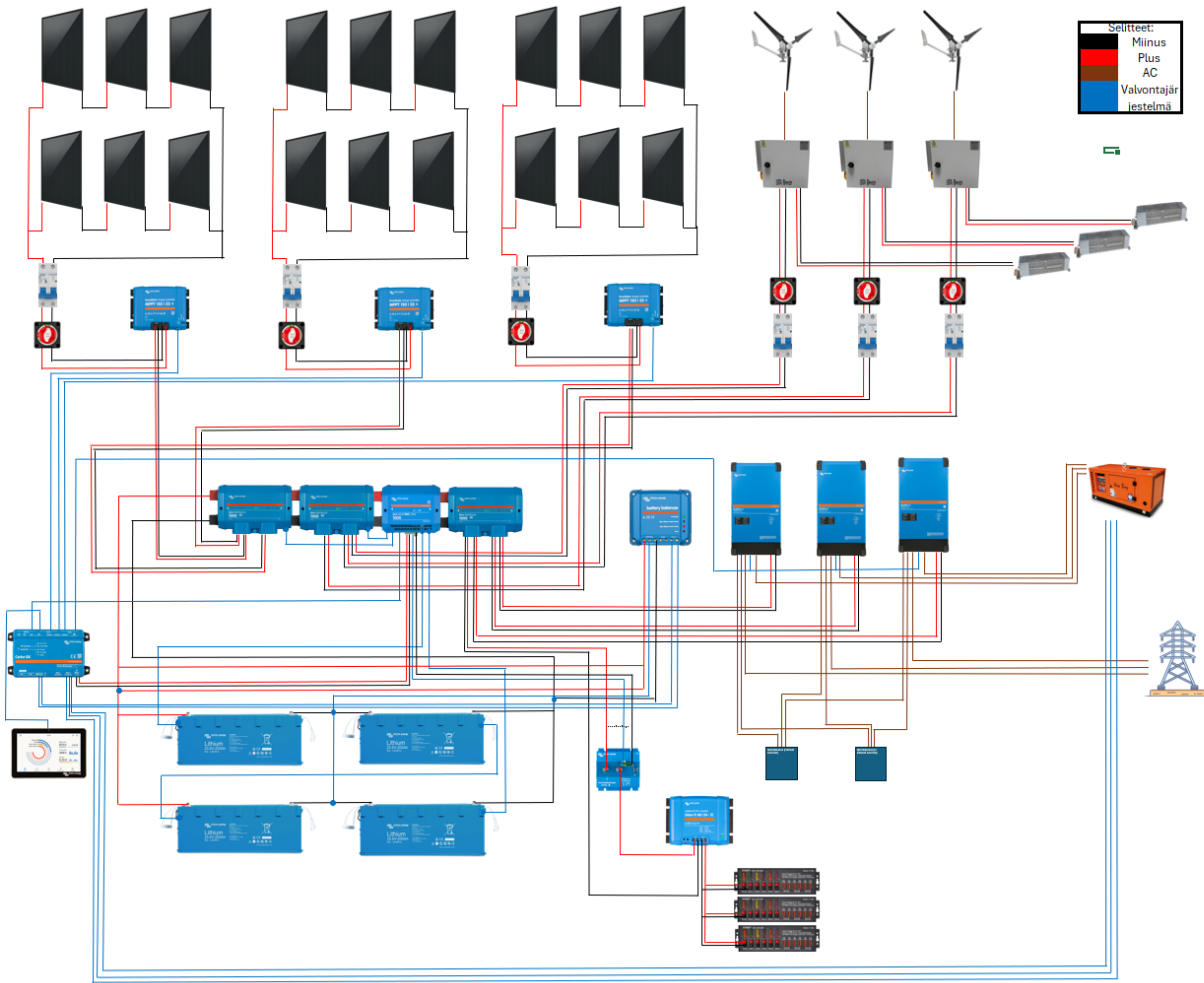
Lämpösähkögeneraattoreita voidaan hyödyntää esimerkiksi retkikeittimen käytön yhteydessä. BioLite Campstove 2+ on retkikeitin, johon on integroitu lämpösähköinen generaattori. Retkikeitin pystyy tuottamaan keittimeen sytytettävästä tulesta lämpöenergiaa ja varastoimaan sitä 3200 mil-

liampeeritunnin akustoon. Sähkövirran luovuttaminen tapahtuu USB-liittimen kautta 3 watin teholla. Sähkön tuottaminen ei vaadi käyttäjältä ylimääräisiä toimenpiteitä, vaan sähköä saadaan ruoanlaitossa tarvittavan lämmön sivuvirtana. (Campstove 2+, n.d.)

9 Tukikohdan energiantuotantojärjestelmän suunnittelu

Tukikohdan energiantuotantojärjestelmän suunnittelun tavoitteena oli luoda siirrettävä, kestävä ja modulaarinen kokonaisuus, joka pystyy tuottamaan sähköenergiaa komentopaikan käyttöön. Järjestelmän runkona päätettiin käyttää 20 jalan merikonttia, jonka ulkokorkeus on 2,591 metriä, pituus 6,051 metriä ja leveys 2,438 metriä. Merikontit ovat standardikokoisia, joten niiden kuljettaminen on helppoa. Kontti tarjoaa järjestelmän laitteistolle suojaa sääolosuhteita vastaan ja mahdollistaa energijärjestelmän kompaktin koon. Merikonttiin integroitu järjestelmä on helppo toimittaa käyttöpaikalle ja sen käyttöön ottaminen on nopeaa. Tukikohtaan sijoitetulla energijärjestelmällä voidaan ladata akustoja tehokkaasti ja ladattuja akustoja voidaan toimittaa joukoille käytettäväksi.

Energiantuotantomuotoina järjestelmässä ovat aurinkopaneelit, tuuliturbiinit ja voimakone. Lisäksi järjestelmään voidaan ottaa virtaa suoraan sähköverkosta. Aurinkopaneelien yhteisteho on 7,2 kilowattipiikkiä, tuuliturbiinien yhteisteho on 6 kilowattia ja voimakoneen jatkuvan tehon tuotto 13 kilovolttiampeeria. Aurinkopaneeleilla ja tuuliturbiineilla tuotettua sähköenergiaa voidaan varastoida 30 kilowattitunnin akustoon tai syöttää suoraan käyttökohteille vaihto- tai tasavirtana. Järjestelmän akustoa voidaan ladata myös voimakoneella tai sähköverkosta saatavalla virralla. Järjestelmä on kokonaisuudessaan esitetty kuviossa 17, sekä suurempana liitteessä 8.

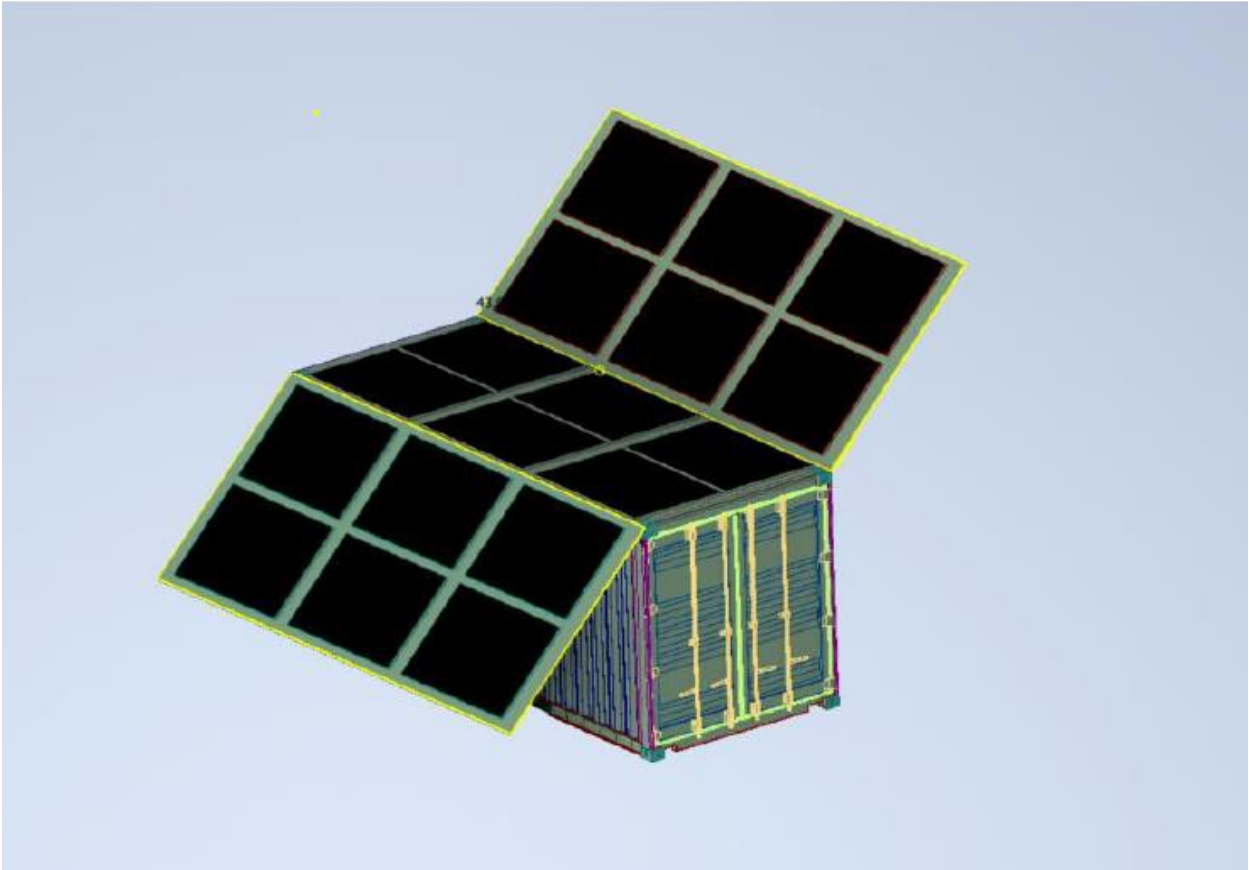


Kuvio 17. Energiajärjestelmän kytkentäkaavio

9.1 Aurinkopaneelijärjestelmä

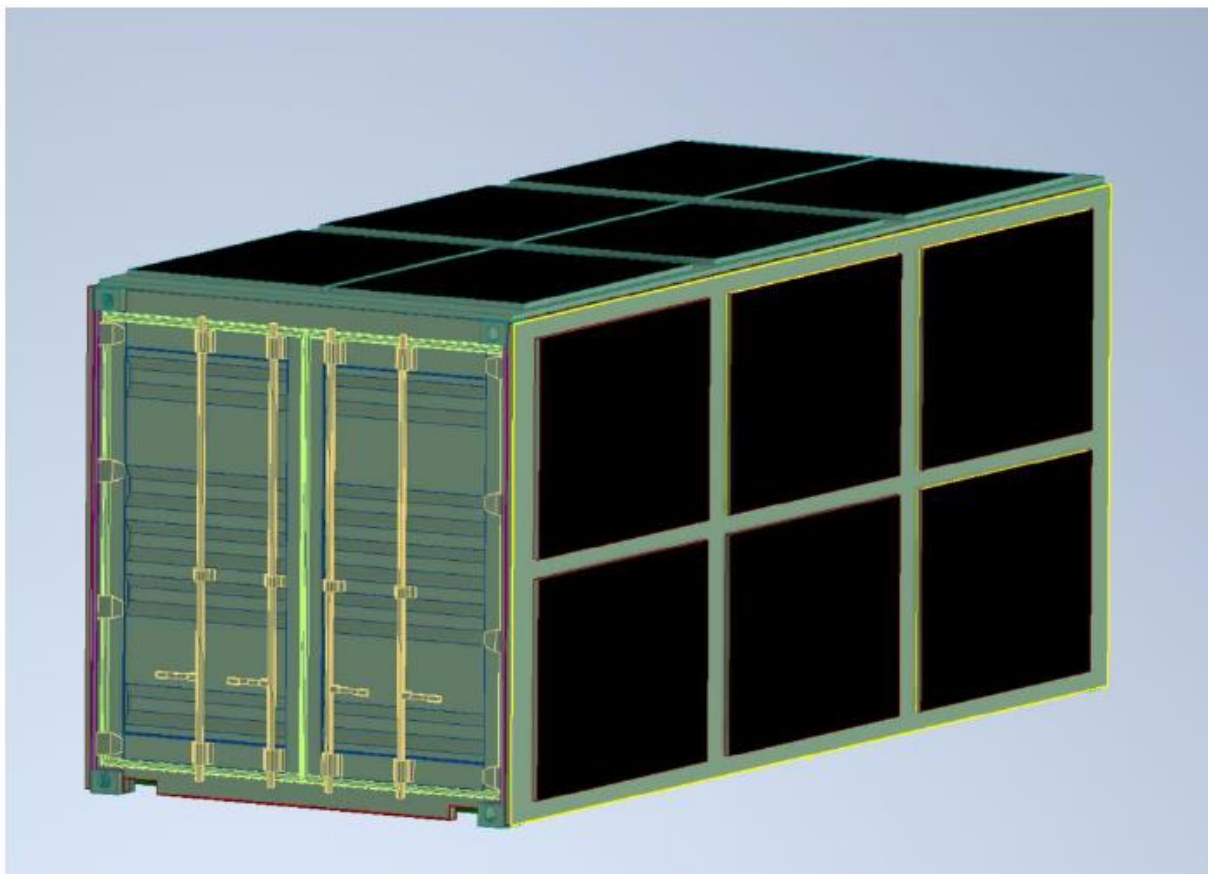
Aurinkopaneelien mitoittaminen suoritettiin niin, että kaikki paneelit ovat integroituna järjestelmän runkoon. Paneelien asentamisessa on huomioitava atsimuutti ja kallistuskulma, jotta tuotanto on mahdollisimman tehokasta. Optimaalinen ilmansuunta paneeleille on etelään, jolloin atsimuutti on 0 astetta. Optimaalinen kallistuskulma on puolestaan 35–45 astetta. Parhaat sijoituspaikat paneeleille ovat merikontin suuret sivut, joita ovat kontin kyljet ja katto. Tällöin ongelmana on, että kontin toinen kylki osoittaa energiantuotannon kannalta epäedullisimpaan suuntaan pohjoiseen. Kylkiin sijoitettujen paneelien kallistuskulma olisi 90 astetta ja katolla olevien 0 astetta. 15 asteen poikkeama optimaalisesta kallistuskulmasta tarkoittaa noin 5 prosentin tuotannon menetystä. (Aurinkopaneelien asentaminen, 2023.)

Paneelit saadaan optimaaliseen suuntaan ja kallistuskulmaan, mikäli niitä voidaan kääntää. Kuviossa 18 on esitetty asennustapa, jolla kaikki paneelit saadaan osoittamaan etelään. Paneelit ovat kuvassa asennettu erilliseen metallirunkoon, joka on saranoitu kontin yläkulmaan. Saranointi mahdollistaa paneelien kääntämiseen optimaaliseen suuntaan ja kallistuskulmaan. Katolla olevat paneelit ovat 0 kulmassa. Niiden kulman kasvattaminen aiheuttaisi varjostusta toisille paneeleille.



Kuvio 18. Energiajärjestelmä tuotantoasennossa

Kuljettamisen mahdollistamiseksi paneelit voidaan laskea takaisin merikontin seinien myötäisesti kuvion 19 osoittamalla tavalla. Tällöin myös järjestelmän varastoiminen, naamiointi ja huoltaminen on helpompaa. Paneelien kääntämiseen voitaisiin hyödyntää esimerkiksi kaasujousia tai vinssejä, jolloin lihasvoiman käyttäminen vähenee.

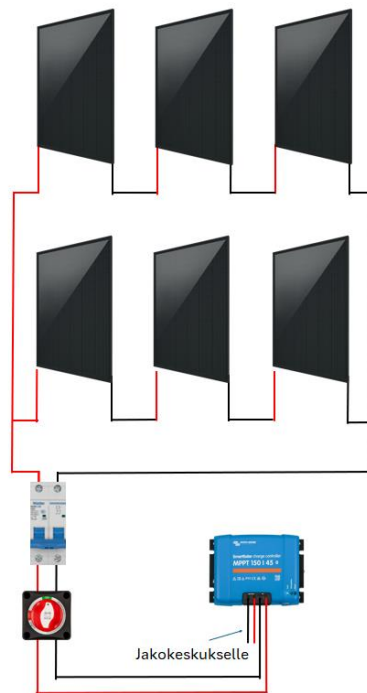


Kuvio 19. Energiajärjestelmä kuljetusasennossa

Aurinkojärjestelmän laskennallinen teho on 7,2 kilowattipiikkiä. Se koostuu 18 kappaleesta paneeleista, joiden ominaisteho on 405 wattipiikkiä. Paneeleiksi valittiin Astroenergyn CHSM54M(BL)-HC halfcut-yksikidepaneelit. Yhden paneelin korkeus on 1722 millimetriä, leveys 1134 millimetriä ja paksuus 30 millimetriä. (Astro 5 s, 2022.) Kontin kylkiin mahtuu molemmille puolille pituussuunnassa 3 paneelia ja asennusvaraa jää jokaisen paneelin väliin 221,5 millimetriä. Korkeussuunnassa paneeleita mahtuu 2 kappaletta ja asennusvaraa jää paneelien väliin 107,6 millimetriä. Katolla leveys suunnassa asennusvaraksi jää yhteensä 170 millimetriä.

Yksikidepaneelit soveltuvat tähän käyttökohteeseen monikidepaneeleita paremmin, sillä niillä on parempi hyötysuhde. Astroenergyn paneelit ovat halfcut-paneeleita, jotka pystyvät tuottamaan energiaa tehokkaammin, vaikka osa paneelin kennoista olisi varjossa tai likaantuneita. (Aurinkopaneelit, 2024.) Asennustilan ollessa rajallinen on yksikidepaneelien tarjoama suurempi tuotantokapasiteetti tärkeämpi ominaisuus verrattuna monikidepaneelien parempaan hajasäteilyn hyödyntämiseen.

Paneelit ovat kytketty kolmeen erilliseen ryhmään, joilla on omat erilliset lataussäätimet. Yhdessä ryhmässä on 6 paneelia, jotka ovat kytketty kahteen 3 paneelin sarjaan ja nämä sarjat ovat kytketty keskenään rinnan. Aurinkopaneelien ja lataussäätimen väliin on asennettu virtakytkin, jolla ryhmä saadaan erotettua muusta järjestelmästä. Yksittäisen ryhmän vikaantuminen ei tällöin estä muun järjestelmän toimintaa. Aurinkopaneelien asentaminen useampaan ryhmään lisää energijärjestelmän toimintavarmuutta ja viansietokykyä. Kytchentäkaavio on esitetty kuviossa 20.



Kuvio 20. Aurinkopaneeliryhmän kytchentäkaavio

9.1.1 Aurinkopaneelijärjestelmän mitoituslaskenta

Aurinkopaneelien lataussäädin tulee mitoittaa paneelien avoimen piirin jännitteen ja suurimman oikosulkuvirran mukaisesti. Avoimen piirin jännite ja oikosulkuvirta kasvavat lämpötilan laskiessa, joka on huomioitava lataussäätimen jännitteen ja virran kestossa. Lisäksi avoimen piirin jännitteeseen ja oikosulkuvirran suuruuteen on tyypillistä lisätä 10–20 prosentin varmuusvara verrattuna lataussäätimen suurimpaan sallittuun arvoon. (Lataussäätimet, n.d.) Aurinkojärjestelmän mitoituslaskenta on esitetty alla olevassa kuviossa 21.

Mitoituslaskenta

Paneeliryhmän tiedot:

Paneelien määrä yhteensä:	6
Sarjassa olevien paneelien määrä:	3
Sarjoja rinnan:	2
Matalin käyttölämpötila:	-40 C
Korkein käyttölämpötila (kennon lämpötila)	80 C

Yhden paneelin ominaisuudet:

Pmp =	405 Wp		
Voc =	37 V		
Vmp =	31,09 V		
Imp =	12,86 A		
Isc =	13,65 A		
Lämpötilakerroin Pmp =	-0,35 %/C	>	0,0035
Lämpötilakerroin Voc =	-0,27 %/C	>	0,0027
Lämpötilakerroin Isc =	0,045 %/C	>	0,00045

Kolmen paneelia sarjassa:

$$P = 3 * 405 \text{ Wp} = 1215 \text{ Wp} = 1,215 \text{ kWp}$$

$$V_{OC} = 3 * 37,20 \text{ V} = 111,60 \text{ V}$$

$$V_{MP} = 3 * 31,26 \text{ V} = 93,78 \text{ V}$$

$$I_{SC} = 13,76 \text{ A}$$

$$I_{MP} = 12,96 \text{ A}$$

Kaksi kolmen paneelin sarjaa kytkettynä rinnan:

$$P = 2 * 1,215 \text{ kWp} = 2,43 \text{ kWp}$$

$$V_{OC} = 111,60 \text{ V}$$

$$V_{MP} = 93,78 \text{ V}$$

$$I_{SC} = 13,76 \text{ A} * 2 = 27,52 \text{ A}$$

$$I_{MP} = 12,86 \text{ A} * 2 = 25,92 \text{ A}$$

Lasketaan varmuusvara Voc:lle ja Isc:lle. Varmuusvaran lisääminen tekee lataussäätimestä hieman ylimitoitettun todelliseen tarpeeseen verrattuna. Tällöin lataussäädin ei toimi kokoajan maksimialueella, jolloin sen käyttöikä on pidempi.

Käytetään varmuusvaran kertoimena 0,2

$$V_{OC} * 1,2 = 111,60 \text{ V} * 1,2 = 133,92 \text{ V}$$

$$I_{SC} = 27,52 \text{ A} * 1,2 = 33,024 \text{ A} = 33,02 \text{ A}$$

Voc:n ja Isc:n perusteella voidaan valita lataussäädin. Lataussäätimen Voc arvon täytyy olla vähintään 133,92 volttia ja Isc:n 33,02 ampeeria.

Kuvio 21. Lataussäätimen mitoittaminen

Laskennan perusteella lataussäätimeksi soveltuisi Victron Energyn Smart Solar Charger MPPT 150/35, jonka suurin jännitteen kesto on 150 volttia ja virran kesto 40 ampeeria. Laitteen käyttöohjeessa mainitaan, että 48 voltin järjestelmässä lataussäätimen aurinkopaneeliteho voi olla enintään 2000 wattia. Tämän takia joudutaan valitsemaan saman tuoteryhmän suuremman kapasiteetin lataussäädin Victron Energy Smart Solar Charger MPPT 150/45, jonka suurin sallittu aurinkopaneeliteho 48 voltin järjestelmässä on 2600 wattia. Alla olevassa kuviossa 22 on tehty tarkistuslaskenta, että valittu lataussäädin kestää avoimen piirin jännitteen ja oikosulkuvirran myös käyttölämpötilan ääripäissä.

Varmistetaan vielä, että valittu lataussäädin kestää myös korkeimmassa ja matalimmassa aurinkopaneelin käyttölämpötilassa:

Lasketaan korkein jännite (V_{oc}), korkein virta (I_{sc}) ja teho (P_{mp}) kylmimmässä käyttölämpötilassa. Oletus, että kennot ovat samassa lämpötilassa ympäristön kanssa.

$$\begin{aligned}\Delta T &= 25\text{ C} - (-40\text{ C}) = 65\text{ C} \\ V_{oc-40\text{ C}} &= (1 + (\Delta T * TC_{Voc})) * V_{oc} = (1 + (65 * 0,0027)) * 37,2 = 43,7286 = 43,7\text{ V} \\ I_{sc-40\text{ C}} &= (1 + (\Delta T * TC_{Isc})) * I_{sc} = (1 + (65 * 0,00045)) * 13,76 = 14,1213 = 14,1\text{ A} \\ P_{MP-40\text{ C}} &= (1 + (\Delta T * TC_{Pmp})) * P_{mp} = (1 + (65 * 0,0035)) * 405 = 497,138 = 497,1\text{ Wp}\end{aligned}$$

Lasketaan matalin jännite (V_{mp}), virta (I_{mp}) ja teho (P_{mp}) korkeimmassa kennojen lämpötilassa. Oletetaan kennojen lämpötilan olevan käytössä enintään 80 C.

$$\begin{aligned}\Delta T &= 80\text{ C} - 25\text{ C} = 65\text{ C} \\ V_{MP+80\text{ C}} &= (1 - (\Delta T * TC_{Voc})) * V_{mp} = (1 - (65 * 0,0027)) * 31,26 = 25,7739 = 25,8\text{ V} \\ I_{MP+80\text{ C}} &= (1 - (\Delta T * TC_{Isc})) * I_{mp} = (1 - (65 * 0,00045)) * 12,96 = 12,5809 = 12,6\text{ A} \\ P_{MP+80\text{ C}} &= (1 - (\Delta T * TC_{Pmp})) * P_{mp} = (1 - (65 * 0,0035)) * 405 = 312,863 = 313\text{ Wp}\end{aligned}$$

Tällöin:

Kolmen paneelin sarjassa:

$$V_{oc-40\text{ C}} = 3 * 43,7\text{ V} * 1,1 = 131,1\text{ V}$$

$$I_{sc-40\text{ C}} = 14,1\text{ A}$$

$$V_{oc+65\text{ C}} = 3 * 25,8\text{ V} = 77,4\text{ V}$$

$$I_{sc+65\text{ C}} = 12,6\text{ A}$$

Kaksi kolmen paneelin sarjan rinnan kytkennässä:

$$V_{oc-40\text{ C}} = 131,1\text{ V}$$

$$I_{sc-40\text{ C}} = 2 * 14,1\text{ A} = 28,2\text{ A}$$

$$V_{MP+65\text{ C}} = 77,4\text{ V}$$

$$I_{MP+65\text{ C}} = 2 * 12,6 = 25,2\text{ A}$$

Varmuusvara:

$$\left(\frac{131,1\text{ V}}{150\text{ V}} - 1\right) * 100 = 14,1\%$$

Varmuusvara:

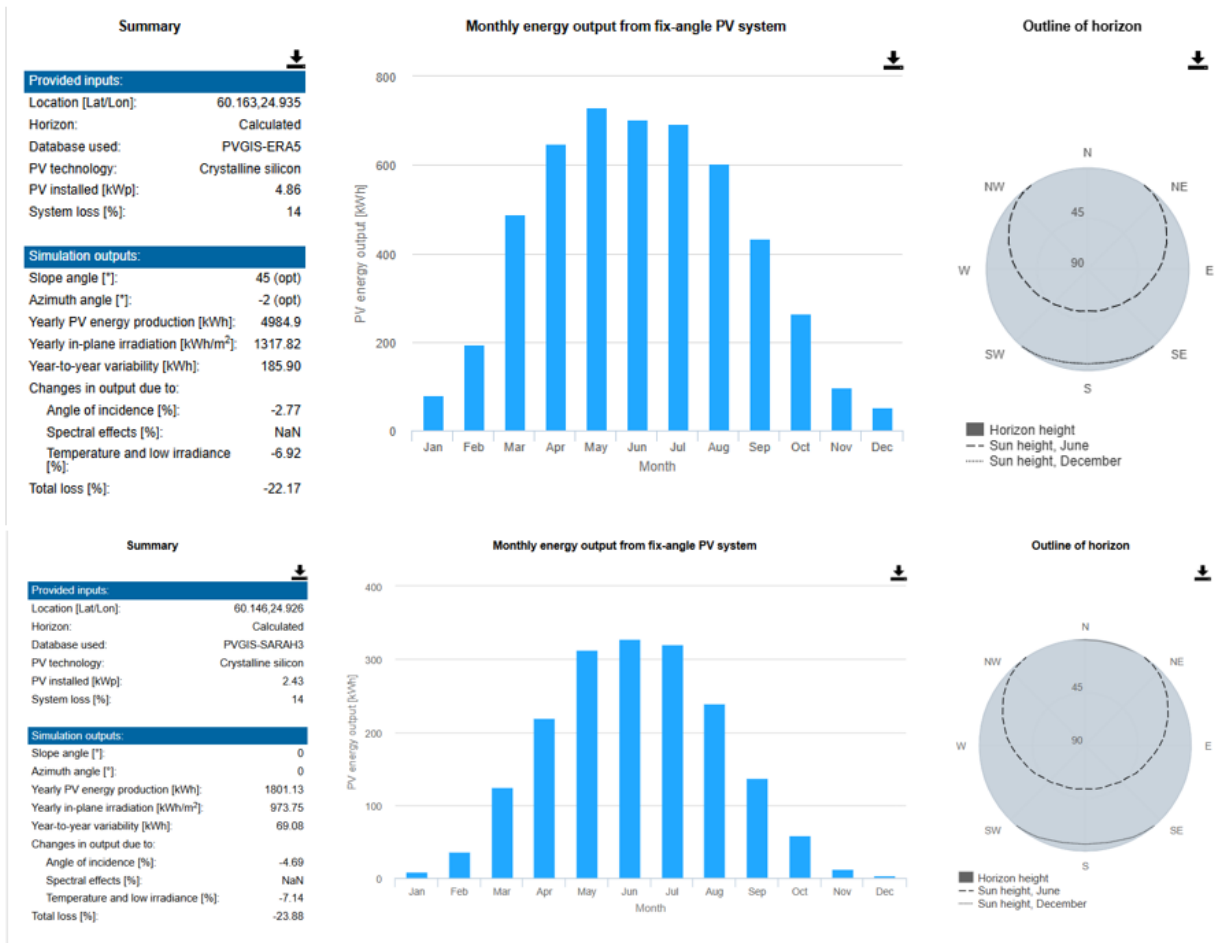
$$\left(\frac{28,2\text{ A}}{45\text{ A}} - 1\right) * 100 = 62,3\%$$

Lataussäädin kestää myös käyttölämpötilan minimin ja maksimin, joten se on soveltuva.

Kuvio 22. Lataussäätimen mitoittaminen ääriämpötiloissa

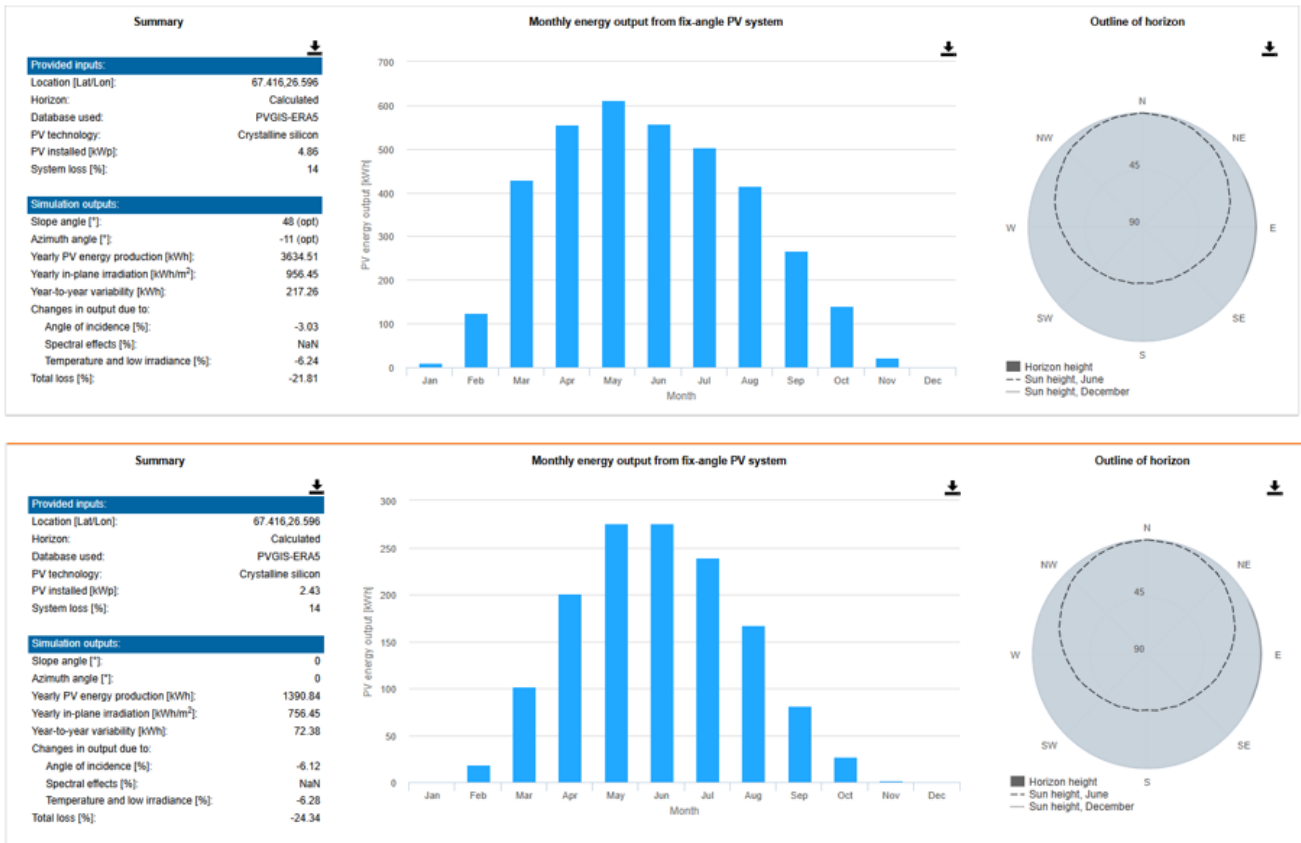
9.1.2 Aurinkopaneelijärjestelmän energiantuotantopotentiaali

Aurinkopaneelijärjestelmässä on 12 paneelia, joiden kallistuskulmaa voidaan säätää ja 6 paneelia, jotka ovat asennettu kiinteästi 0 asteen kulmaan. Kaikki paneelit saadaan osoittamaan suoraan etelään säätämällä kontin kyljissä olevien paneelien suuntauskulmia ja asettamalla kontti pituus-suunnassa osoittamaan idästä länteen. Aurinkopaneelien tuotto riippuu merkittävästi vuoden-ajasta ja maantieteellisestä sijainnista. Aurinkojärjestelmän vuotuista energiantuotantopotentiaalia mallinnettiin Euroopan komission julkaisemalla PVGIS-järjestelmällä (Photovoltaic Geographical Information System). Alla olevassa kuviossa 23 on esitetty energiantuotantojärjestelmän vuotuisen tuotantopotentiaali Helsingin korkeudella.



Kuvio 23. Aurinkopaneleiden tuotantopotentiali Helsingissä (Photovoltaic Geographical Information System, 2022.)

PVGIS-järjestelmän mukaan kontin kyljissä olevat paneelit tuottavat vuodessa yhteensä 4985 kilowattituntia ja kontin katolla olevat paneelit puolestaan 1801 kilowattituntia. Tällöin koko aurinkopaneelijärjestelmän vuotuinen energiantuotanto on 6786 kilowattituntia. Kyljissä olevien paneelien optimaalinen kallistuskulma on 45 astetta ja atsimuutti -2 astetta. Tuotto Sodankylän korkeudella on esitetty kuviossa 24.



Kuvio 24. Aurinkopaneelien tuotantopotentiaali Sodankylässä (Photovoltaic Geographical Information System, 2022.)

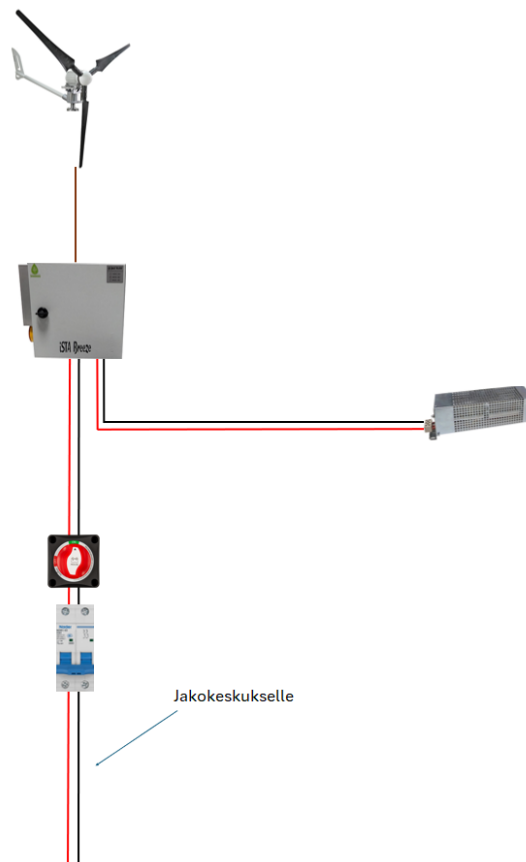
Sodankylässä kylvien paneelien vuosituotto on noin 3634 kWh ja katolla olevien paneelien tuotto noin 756 kWh. Optimaalinen kallistuskulma on 48 astetta ja atsimuutti -11 astetta. Tällöin vuotuinen energiantuotantomäärä on 4390 kilowattituntia.

9.2 Tuuliturbiinit

Tuulivoimajärjestelmän suunnittelun perustana pidettiin, että tuuliturbiinit voidaan kasata ja purkaa kohtuullisella vaivannäöllä, sekä siirtää paikasta toiseen kontin mukana. Käytännössä tämä rajoittaa turbiinien generaattorin painon kymmeneen kiloihin ja maston korkeuden 10–20 metriin.

Järjestelmässä on 3 kappaletta Ista Breezen 2 kilowatin tuuliturbiineita, jolloin tuulivoiman laskennallinen kokonaisteho on 6 kilowattia. Tuuliturbiineita voidaan tarpeen tullen lisätä järjestelmään enemmän ottaen huomioon jakokeskuksen virrankesto ja akuston kapasiteetti. Jokaiselle tuuliturbiinille on oma lataussäätimensä ja hukkuormansa, sillä tuuliturbiinien kytkeminen sarjaan tai rinnan olisi epäkäytännöllistä.

Lataussäädin muuttaa tuuliturbiinin tuottaman kolmivaihevirran järjestelmään sopivaksi tasavirraksi. Säätimeen on kytketty hukkuorma, johon tuuliturbiinin tuottama virta ohjataan silloin, kun sähkön tuotantomäärä on kulutusta ja akuston kapasiteettia suurempi. Lataussäätimeen kuuluu päävirtakytkin, jolla turbiini voidaan erottaa kokonaan lataussäätimestä, lisäksi lataussäätimen ja muun järjestelmän väliin on asennettu erillinen virtakytkin. Kytkimellä voidaan rajata lataussäätin ja turbiini järjestelmästä. (Wind turbine system, 2023.) Yksittäisen turbiinin kytkentäkaavio on esitetty kuviossa 25.



Kuvio 25. Tuuliturbiinin kytkentäkaavio

9.2.1 Tuulivoimajärjestelmän energiantuotantopotentiaali

Tuulivoiman energiantuotantopotentiaalia voidaan mallintaa Sveitsin energiaviraston tuottamalla tuulivoima laskimella (n.d.). Laskimeen syötetään tuuliturbiinin tehokäyrä ja keskimääräinen tuulennopeus. Suomessa tuulen nopeuden keskiarvo vaihtelee suuresti rannikon ja sisämaan välillä. Rannikoilla vuotuinen keskiarvo on Ilmatieteenlaitoksen ylläpitämän Tuuliatlaksen (n.d.) mukaan noin 7,5–8 metriä sekunnissa. Sisämaassa järvien rannoilla ja avoimilla alueilla keskiarvo on noin 4–5 metriä sekunnissa. Taulukossa 2 on esitetty yksittäisen, sekä kolmen Ista Breezen vuotuinen energiantuotantomäärä eri tuulennopeuksilla.

Taulukko 2. Tuuliturbiinien vuotuinen energiantuotanto eri tuulennopeuksilla (Power Calculator, n.d.)

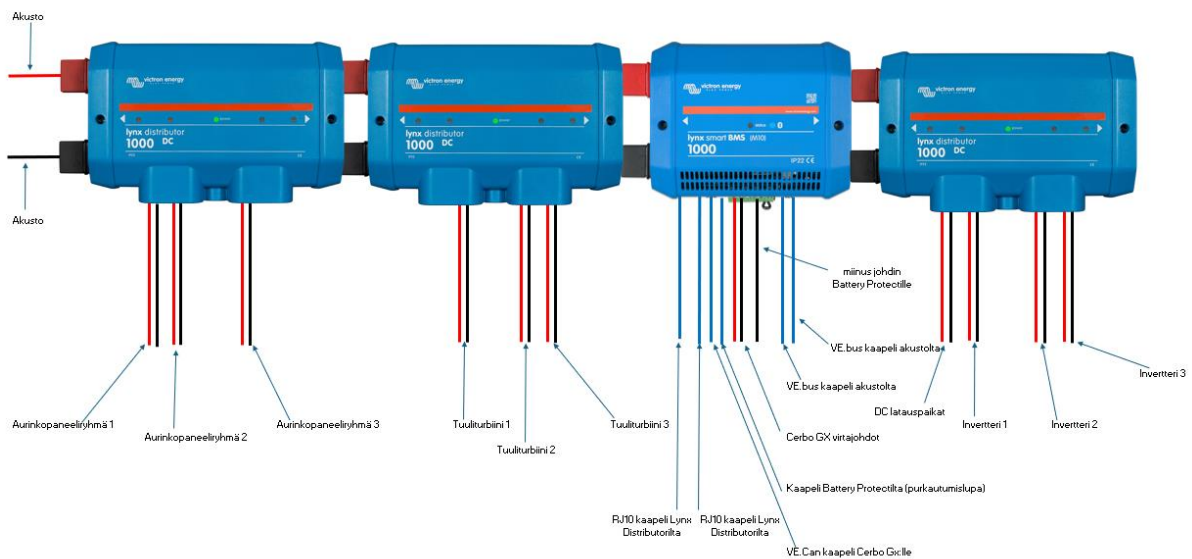
Tuulennopeus	Yhden turbiinin vuotuinen energiantuotanto	Kolmen turbiinin vuotuinen energiantuotanto
3 m/s	611 kWh	1833 kWh
4 m/s	1255 kWh	3765 kWh
5 m/s	2119 kWh	6357 kWh
6 m/s	3125 kWh	9375 kWh
7 m/s	4078 kWh	12 234 kWh
8 m/s	4806 kWh	14 418 kWh
9 m/s	5252 kWh	15 756 kWh
10 m/s	5442 kWh	16 326 kWh
11 m/s	5438 kWh	16 314 kWh
12 m/s	5302 kWh	15 906 kWh
13 m/s	5085 kWh	15 255 kWh
14 m/s	4824 kWh	14 472 kWh
15 m/s	4543 kWh	13 629 kWh

9.3 Tasavirran jakokeskus

Järjestelmässä on tasavirran jakokeskus, johon on yhdistetty järjestelmän jokainen tasavirtatulo ja -lähtö. Jakokeskus toteutettiin hyödyntämällä Victron Energy Lynx Distributor 1000 DC:tä.

Jakokeskuksen kytkentäkaavio on esitetty kuviossa 26. Yksi Lynx Distributor sisältää 4 sulaketta, joiden tilasta se viestii kannessa olevien LED-valojen avulla. Lisää sulakkeita saadaan yhdistämällä

Distributoreita toisiinsa. Niihin voidaan integroida myös akustonhallintajärjestelmä Lynx Smart BMS 1000A. Järjestelmän liitännöiden keskittäminen jakokeskukseen selkeyttää järjestelmän rakennetta ja helpottaa vian paikantamista häiriötilanteissa. Lisäksi johdotukset voidaan tehdä järjestelmällisemmin, joka helpottaa ja nopeuttaa huoltotoimenpiteiden tekemistä. (Lynx Distributor M8 and M10, n.d.)



Kuvio 26. Tasavirran jakokeskus

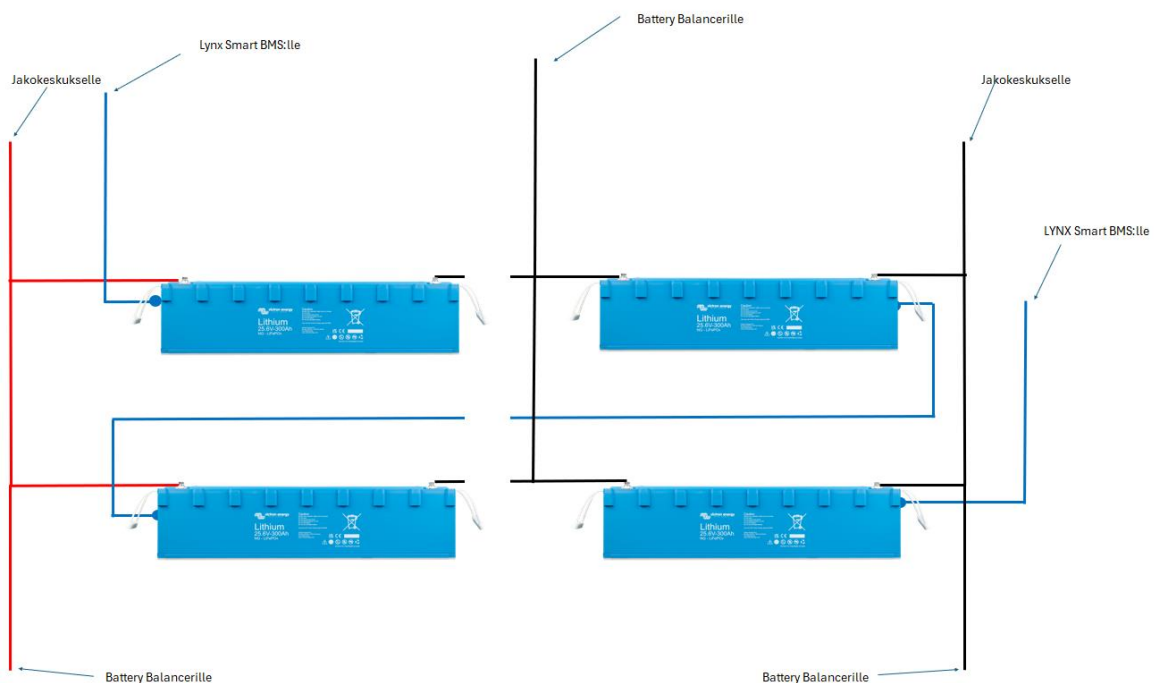
Jakokeskuksen jokainen komponentti, pois lukien sulakkeet, kestää 1000 ampeerin jatkuvan virran. Lynx Distributoreita voidaan kytkeä toisiinsa tarvittaessa lisää, jolloin energiantuotantojärjestelmää voidaan modulaarisesti kasvattaa. Kytkentäkaaviossa vasemmanpuoleiseen Lynx Distributoriin on kytketty aurinkopaneeliryhmät 1–3, seuraavaan tuuliturbiinit ja oikeanpuoleisimpaan on kytketty vaihtosuuntaajat 1–3, sekä tasavirran latausliittimet. Lynx Distributorit ovat liitetty akustonhallintajärjestelmään RJ10 tietoliikennekaapeleilla.

Jakokeskukseen on yhdistetty Lynx Smart BMS 1000A, joka on akustonhallintajärjestelmä. Se on suunniteltu toimimaan Victron Lithium Battery Smart -akkujen ja muiden Victronin tuotteiden

kanssa yhdessä. BMS tarkkailee akuston kennojen jännitettä ja lämpötilaa. Mikäli yksittäisen kennon jännite tai lämpötila nousee liian korkeaksi se pienentää akustolle tulevaa latausvirtaa. Jännitteen tai lämpötilan laskiessa liian matalaksi, se katkaisee virran syötön vaihtosuuntaajille ja DC-latausliittimille. BMS:llä voidaan antaa myös ennakkohälytyksiä ja reaaliaikaista dataa akuston tilasta. BMS on yhdistetty edelleen Cerbo GX monitorointijärjestelmään VE.bus tietoliikennekaapelilla. (Lynx Smart BMS, 2024.)

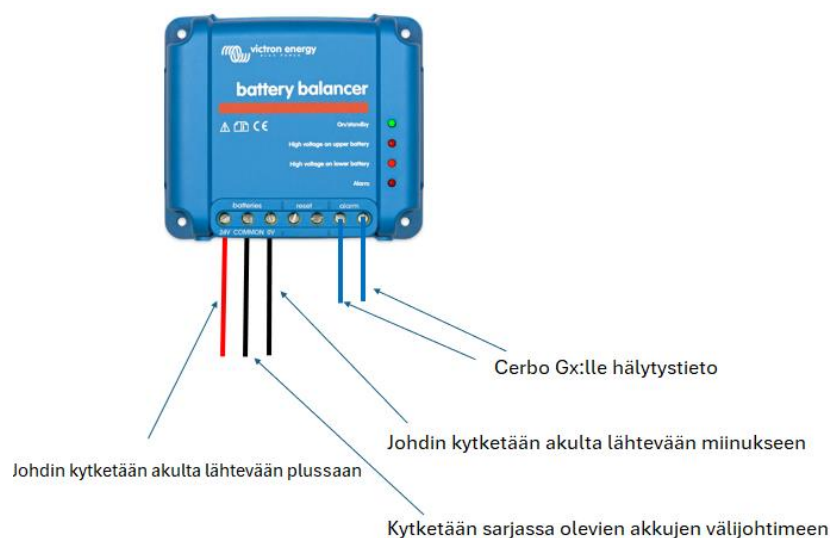
9.4 Akusto

Järjestelmän akustona toimii 30,72 kilowattitunnin, 600 ampeeritunnin ja 51,2 voltin litiumrauta-fosfaattiakusto. (12,8, 25,6 & 51,2 Volt Lithium NG Batteries, n.d.) Akusto koostuu neljästä erillisestä Victron Energy'n Smart LIFEPO₄ 25,6 voltin ja 300 ampeeritunnin akusta, joita on kytketty kaksi sarjaan ja kahden akun sarjat on kytketty keskenään rinnan. 30,72 kilowattitunnin akusto riittää varastoimaan kaiken aurinkopaneelijärjestelmän päivässä tuottaman sähköenergian vuoden parhaana tuotantoaikana kesä-heinäkuussa. Akustoa voidaan tarpeen mukaan laajentaa lisäämällä identtisiä kahden akun sarjoja rinnakkain. Akuston kytkentäkaavio on esitetty kuviossa 27.



Kuvio 27. Akusto

Jokaisessa akussa on kaksi kappaletta BMS-tietoliikennekaapeliliitäntöjä akustonhallintajärjestelmää varten. Lisäksi akuston plus- ja miinusnavoille menevistä johtimista on tehty haaroitukset, jotka menevät akustonhallintajärjestelmälle. Sarjassa olevien akkujen väliseen johtimeen on lisätty haaroitus, joka lähtee Victron Energy Battery Balancerille. Battery Balancer tarkkailee ja tasoittaa kahden sarjaan kytketyn tai rinnan kytkettyjen akkujen välistä jännite-eroa. Se on liitetty Cerbo GX järjestelmään, jonka avulla jännite-ero hälytykset saadaan näkyviin valvontanäytössä. 48 voltin järjestelmään tarvitaan 3 kappaletta Battery Balancereita. (Victron Battery Balancer, n.d.) Yksittäisen Battery Balancerin kytkentäkaavio on esitetty kuviossa 28.



Kuvio 28. Battery Balancer

Litiumrautafosfaattiakuston kylmän kesto on rajallinen. Victronin akut pystyvät luovuttamaan energiaa -20–50 asteen lämpötilassa, mutta akkujen lataamista varten lämpötilan on oltava +5–50 asteen välillä. Akuston lämpötilarajoitteiden takia kontin sisätila tulisi pitää lämmitettynä, joka vaatii erillisen lämmitysjärjestelmän ja seinien eristyksen. Akustoa voidaan kuitenkin säilyttää -45–70 asteen lämpötiloissa ja sillä on IP65 suojaluokitus. (12,8, 25,6 & 51,2 Volt Lithium NG Batteries, n.d.)

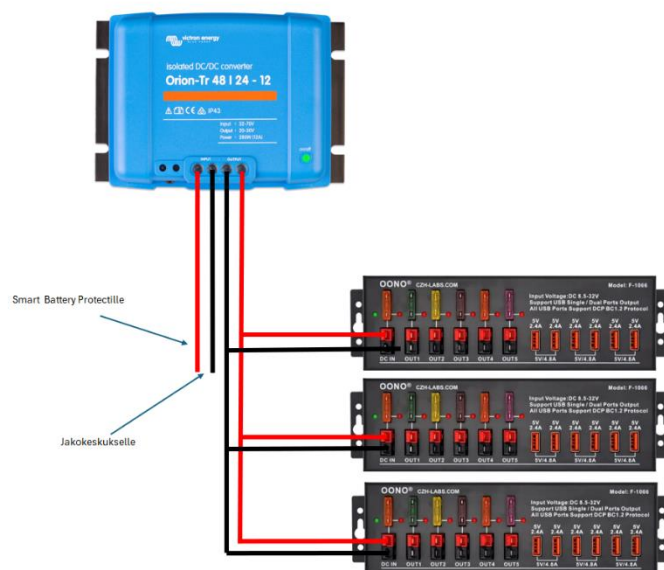
Akuston käyttöikä on suoraan verrannollinen DOD-arvoon (Depth Of Discharge). Mikäli akun DOD-arvoksi asetetaan 50 % akun tekninen käyttöikä on tällöin 5000 latausykliä. 80 % DOD-arvolla

käyttöikä laskee 2500 latausykliin. Akuston latausjännite on 56,8 voltia ja suurin sallittu latausvirta 300 ampeeria. Ylläpitojännite on puolestaan 54 voltia. Akun itsepurkautuvuus arvo on alle 3 prosenttia 25 asteen lämpötilassa. Yksi akku on korkeudeltaan 20,6 senttiä, pituudeltaan 84,1 senttiä ja leveydeltään 20,5 senttiä, sekä painaa 52 kiloa. (12,8, 25,6 & 51,2 Volt Lithium NG Batteries, n.d.)

Litiumrautafosfaattiakkujen sijaan voitaisiin käyttää myös syväpurkauslyijyakkuja, joiden suorituskyky matalissa käyttölämpötiloissa on parempi. Järjestelmästä tulee tällöin muuttaa akustonhallintajärjestelmä lyijyakuille tarkoitettuun versioon, joita Victron Energyltä on myös saatavissa.

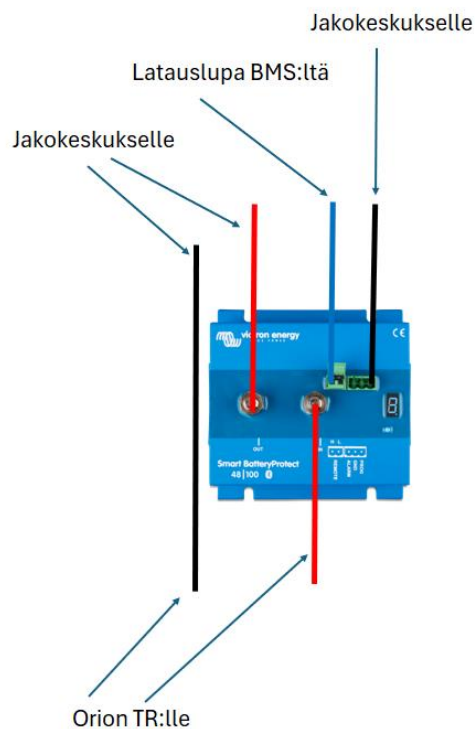
9.5 DC-latausliitännät

Järjestelmästä voidaan ottaa suoraan tasavirtaa laitteiden lataamiseen. DC-latausliitännät on toteutettu liittämällä tasavirran jakokeskukseen Victron Energyn Orion TR 48/24–12 tasavirtamuunnaja. USB-liitännät on toteutettu OONO-tasavirran jakomodulilla, jossa on 5 tasavirtaliitäntää ja 6 USB-A porttia. Orion TR muuntaa jakokeskuksesta tulevan 48 voltin tasavirran jakomoduuleille sopivaksi 24 voltin ja 12 ampeerin tasavirraksi. (40 Amp DC Power Splitter Distribution Module, n.d.; Orion-TR DC-DC converters isolated, n.d.)



Kuvio 29. Tasavirtalatausliitännät

Jakokeskuksen ja Orion TR:n väliin on asennettu Victron Energyn Battery Protect -yksikkö, jonka kytkentäkaavio on esitetty kuviossa 30. Sen tehtävä on estää akun täydellinen tyhjeneminen DC-latauskohteisiin. Battery Protect toimii molempiin suuntiin. Sen läpi on siis mahdollista siirtää sähkövirtaa joko jakokeskuksesta DC-latausliittimille tai latausliittimiltä jakokeskukseen. Myös Orion TR voidaan asentaa samalla tavalla. Tällöin lataamisen lisäksi on myös mahdollista virran syöttäminen ulkoisesta akusta järjestelmään DC-latausliittimien välityksellä. (BatteryProtect 48V 100A, 2023.)

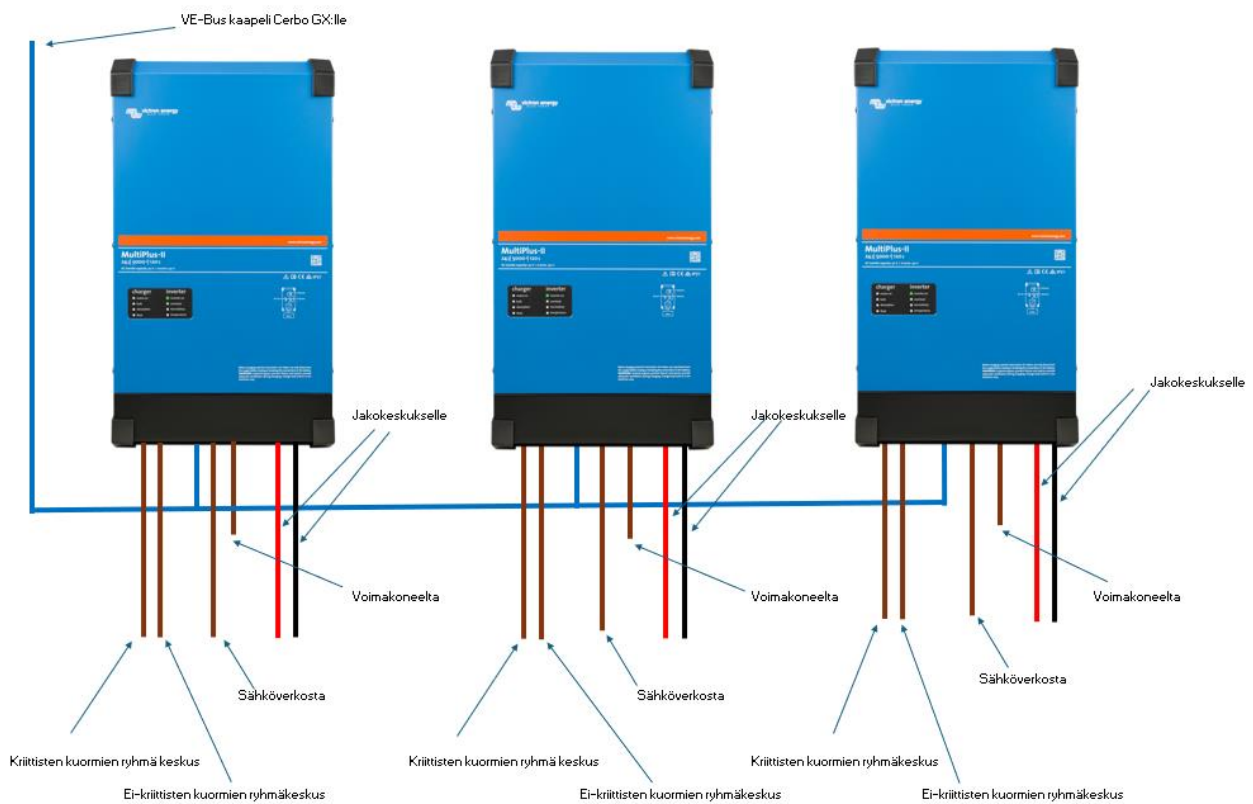


Kuvio 30. Battery Protect

9.6 Vaihtosuuntaajat

Järjestelmässä on kolme kappaletta rinnan kytkettyjä Victron Energy Multiplus 2 48/5000/70–50 vaihtosuuntaajia. Yhden vaihtosuuntaajan teho on 5000 voltiampeeria. Ne ovat mitoitettu tuuli-voiman ja aurinkovoiman maksimiteholle, joka on yhteensä 13,29 kilowattia. Jokaisella invertterillä pystytään tuottamaan 230 voltin ja 50 hertsin vaihtovirtaa ja kolme rinnan kytkettyä invertteriä voidaan konfiguroida tuottamaan 400 voltin kolmivaihe voimavirtaa.

Multiplus 2 toimii vaihtosuuntaajan lisäksi myös laturina, jolloin sillä voidaan ladata järjestelmän akustoa. Laturi soveltuu järjestelmän litiumrautafosfaattiakuille, sillä sen maksimilatausteho on 57,6 voltia ja suurin latausvirta 70 ampeeria. Multiplus 2 sisältää AC-tuloportin, jonka kautta se voi ottaa vaihtovirtaa esimerkiksi voimakoneelta tai sähköverkosta. AC-lähtöportteja on jokaisessa yksikössä kaksi kappaletta. Päälähtö pysyy jatkuvasti aktiivisena, mutta toinen AC-portti toimii vain silloin, kun yksikköön syötetään vaihtovirtaa. Tällöin akuston rajallista kapasiteettia hyödynnetään vain kriittisille laitteille vaihtovirtasyötön katketessa. (Multiplus-II GX, n.d.; Multiplus-II GX Invertteri/Laturi, n.d.)



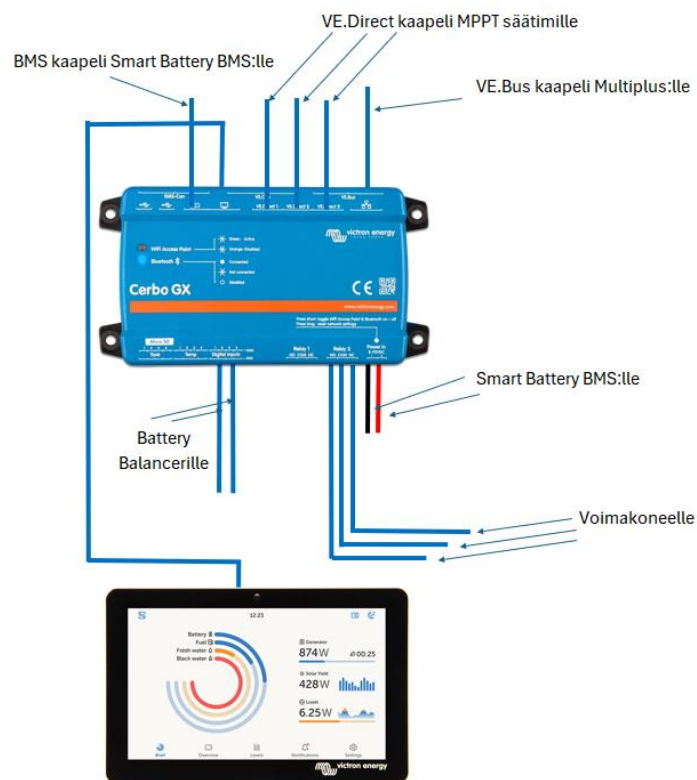
Kuvio 31. Vaihtosuuntaajat

Järjestelmän jokainen vaihtosuuntaaja on kytketty ryhmäkeskukseen, jonka kautta virta siirretään käyttökohteille. Ryhmäkeskuksia on kaksi, toinen kriittisille kuormille ja toinen ei-kriittisille. Yksiköt on kytketty toisiinsa VE.Bus -tietoliikennekaapelilla ja ne on liitetty Cerbo GX -monitorointijärjestelmään.

5000 voltiampeerin Multiplus 2 -invertterilatureita voidaan kytkeä rinnakkain 6 kappaletta, jolloin ne pystyvät tuottamaan 25 kilowatin ja 30 kilovoltiampeerin latauskapasiteetin 420 ampeerin virralla. Mahdollisuus lisätä useampia invertterilatureita rinnan mahdollistaa esimerkiksi järjestelmän aurinkopaneelikapasiteetin kasvattamisen tarvittaessa. Kolme rinnan kytkettyä invertteriä parantaa järjestelmän viansietokykyä, sillä vaihtovirtaa pystytään tuottamaan, vaikka yksittäinen invertteri hajoaisi. (Multiplus-II GX, n.d.; Multiplus-II GX Invertteri/Laturi, n.d.)

9.7 Valvontajärjestelmä

Valvonta- ja monitorointijärjestelmänä toimii Victron Energyn Cerbo GX. Jokainen järjestelmän laite on kytketty valvontajärjestelmään. Sen kautta käyttäjä saa tietoonsa hälytykset ja pystyy seuraamaan järjestelmän tilaa reaaliajassa. Cerbo GX:llä pystytään myös antamaan automaattinen käynnistys- tai sammutuskäsky siihen liitetulle voimakoneelle. Sen kautta voidaan myös muuttaa Victronin valmistamien laitteiden asetuksia. Järjestelmää voidaan ohjata ja valvoa etänä. Myös muiden valmistajien laitteita voidaan lisätä Cerbo GX:ään. (Cerbo GX, Cerbo-S GX and GX Touch, n.d.)



Kuvio 32. Cerbo GX valvontajärjestelmä

9.8 Skaalattavuus

Tukikohdan energiajärjestelmässä käytettyjä komponentteja voidaan hyödyntää myös muun kokoisissa kokoonpanoissa. Mikäli energiajärjestelmästä tahdotaan ulkomitoiltaan pienempi, voidaan järjestelmästä karsia pois integroidut aurinkopaneelit ja tuuliturbiinit. Järjestelmän runkona voidaan käyttää huomattavasti merikonttia pienempää ja kevyempää rakennetta. Kontin sisälle asennettavat komponentit, kuten lataussäätimet, akustonhallintajärjestelmä, tasavirtamuuntaja, vaihtosuuntaajat ja akut ovat mahdollista asentaa tiiviisti. Kaikkia komponentteja on saatavissa eri-kokoisia ja -tehoisia. Järjestelmän tehoa pienentämällä myös komponentit saadaan mahtumaan pienempään tilaan.

Eniten tilaa vaativat järjestelmän akut. Tukikohdan energiajärjestelmässä käytetyt Victron Energy Battery Smart -akut ovat korkeudeltaan 20,6 senttiä, pituudeltaan 84,1 senttiä ja syvyydeltään 20,5 senttiä. Järjestelmän akut painavat 52 kiloa kappale. Akkujen paino on huomioitava kompaktimman järjestelmän suunnittelussa. Mikäli järjestelmästä tahdotaan tehdä pienempi, esimerkiksi lihasvoimin siirrettävä, voi akkukapasiteetista tulla toimintaa rajoittava tekijä. Kevyillä ja pienillä akuilla virtaa ei pystytä tarjoamaan suurille kulutuskohteille. Käyttö rajoittuu pienten laitteiden, kuten puhelinten, radioiden ja kannettavien tietokoneiden lataamiseen. Kevyempien järjestelmien akkukapasiteettia voidaan laajentaa lisäämällä mahdollisuus kytkeä niitä toisiinsa rinnan- tai sarjaan. Tällöin keskeiseksi ongelmaksi muodostuu akunhallintajärjestelmän toiminta.

Victron Energyn komponentit ovat helposti asennettavia ja ulkoisten laitteiden, kuten aurinkopaneelien kytkeminen niihin on helppoa. Useimmat Victron Energyn komponenteista on suunniteltu toimimaan modulaarisesti ja niitä pystytään liittämään toisiinsa, jolloin kapasiteettia voidaan kasvattaa tai pienentää tarpeen mukaisesti.

Karsimalla tukikohdan energiajärjestelmästä pois aurinkopaneelit, tuuliturbiinit ja pienentämällä akkukapasiteettia olisi mahdollista, että järjestelmä saataisiin asennettua noin yhden kuutiometrin kokoiseen tilaan. Korvaamalla integroidut aurinkopaneelit irrallisilla, on niiden tuotannon optimointi vaikeampaa. Kontin kyljissä olevat paneelit saadaan aina suunnattua optimaaliseen kulmaan ja ilmansuuntaan, jolloin niiden tuotantopotentiaali on suurempi. Irralliset paneelit myös merkittävästi vaikeuttavat järjestelmän käyttöä, eikä käyttöönotto ole yhtä nopeaa kuin konttiin integroidussa järjestelmässä. Pienentämällä aurinkopaneelikapasiteettia järjestelmän tehon tuotto

jää pieneksi, jolloin sillä tuotettu energia ei todennäköisesti riitä suuren komentopaikan sähköistämiseen.

Pienemmän kokoluokan energiajärjestelmän rakennetta tulee tutkia tarkemmin. Opinnäytetyön laajuuden nimissä aihe on rajattu käsittelemään syvällisemmin pelkästään yhden kokoluokan energiajärjestelmää. Työssä esitetyt komponentit ovat kuitenkin varmuudella soveltuvia myös muun kokoisiin järjestelmiin, mutta niiden mitoittaminen täytyy suorittaa jokaiseen järjestelmään tapauskohtaisesti. Todennäköisesti pienemmätkin järjestelmät koostuisivat samoista komponenteista kuin työssä esitetty järjestelmä, mutta eri tavalla mitoitettuina. Työssä esitetyt kytkentäkaaviot antavat suuntaa myös erikokoisten järjestelmien rakenteesta ja toimintaperiaatteesta.

10 Yhteenveto

10.1 Lopputulos

Opinnäytetyössä ideoitiin vaihtoehtoisia sähkövoimaratkaisuja voimakoneiden tilalle. Työn lähtökohtana oli toimeksiantajan tahto vähentää polttoaineen käyttöä sähköntuotannossaan. Työn tavoitteena oli kehittää laite, joka pystyy hyödyntämään monipuolisesti erilaisia energialähteitä ja tuottamaan niiden avulla sähköä. Sähkön varastointi akustoon oli laitteelle keskeinen vaatimus. Laitteen tuli soveltua myös kenttäkäyttöön ja sen tuli olla joukkojen mukana liikuteltavissa. Tutkimuskysymyksiä työssä olivat:

1. Voidaanko voimakoneita korvata tässä käyttökohteessa?
2. Millaisia energiamuotoja voidaan hyödyntää?
3. Mitkä tekijät rajoittavat voimakoneiden korvaamista tai tukemista muilla energiamuodoilla?
4. Millainen akusto laitteistoon tulisi liittää, jotta se soveltuu käyttötarkoitukseen?
5. Millainen laitteiston rakenne voisi olla?
6. Onko laitteen modulaarinen rakenne mahdollinen?

Voimakoneiden korvaaminen osoittautui kyselytutkimuksen perusteella haastavaksi. Voimakoneiden helppokäyttöisyys, toimintavarmuus ja olosuhteidenkestävyys nähtiin ensiluokkaisina verrat-

tuna muihin energiatuotantomuotoihin. Lisäksi aurinko- ja tuulienergian jaksottaisuus ja sääriippuvuus tekee niiden hyödyntämisestä haasteellista sotilaskäytössä. Aurinko- ja tuulienergian hyödyntämistä rajoittaa myös laitteen kohderyhmän toimintaympäristö. Sotilaskäytössä tukikohdat ovat usein maastossa, joissa esimerkiksi puusto varjostaa paneeleita ja heikentää niiden tuotantotehoa. Suuret tuuliturbiinit vaativat kiinteän perustan, jonka toteuttaminen kenttäolosuhteissa on haastavaa. Pienemmät turbiinit eivät vaadi kiinteää perustaa, joten niiden pystyttäminen ja siirrettävyys on parempi. Pienempien turbiinien tuotantoteho on pieni ja vuotuinen energiantuotantopotentiaali jää täten matalaksi. Tuuliturbiinit ja aurinkopaneelit ovat myös huomiota herättäviä ja niiden havaitseminen maastossa on helppoa, joka vaikeuttaa joukon maastoutumista.

Polttoaineen käytön minimoimiseksi on hyödynnettävä kaikkia ympäristöstä saatavia energiamuotoja, kuten auringon säteilyä, tuulta ja lämpöä. Suurin tuotantopotentiaali on aurinko- ja tuulivoimalla. Näiden energiamuotojen hyödyntämiseen käytettävä tekniikka on lämpövoimaa kehittyneempää ja mahdollistaa varteen otettavan energiamäärän tuottamisen. Niiden etuja ovat myös omavaraisuus ja voimakoneisiin verrattuna vähäinen huoltotarve. Aurinkopaneelit ja tuuliturbiinit ovat toimintavarmoja ja tekniikka yleisesti tunnettua, joka tekee niiden huoltamisesta ja korjaamisesta helpompaa. Aurinko- ja tuulivoiman jaksottaista energiantuotantoa voidaan tasoittaa akuston avulla. Akusto mahdollistaa energianhyödyntämisen silloin, kun tuotantoa ei ole saatavilla.

Lämpöenergian hyödyntäminen sähköntuotannossa ei ole tehokasta tässä käyttökohteessa. Lämpövoiman hyödyntämiseen vaadittavan kaluston mukana kantaminen ja lämpösähkögeneraattorien matala hyötysuhde ei tee niiden käytöstä kannattavaa. TEG-elementit vaativat toimiakseen suuren lämpötilaeron, jonka saavuttaminen kenttäkäytössä on haastavaa. Etenkin elementin kylmän puolen jäähdyttäminen aiheuttaa huomattavasti vaivaa verrattuna saatuun sähköenergiaan. Elementtien käyttö rajoittuu lähinnä pienten laitteiden lataamiseen hätätilanteissa. Pienimuotoiseen lämpösähköntuotantoon löytyy markkinoilta valmiita ratkaisuja.

Kyselytutkimuksessa vastaajat näkivät haasteellisena kehittää yhtä kaikille joukko-osastoille toimivaa laitekokonaisuutta, sillä jokaisen osaston tarpeet ovat erilaiset. Vastauksissa esitettiin idea laitteen jakamisesta eri koko luokkiin. Jatkuvasti liikkuvilla joukoilla on tarve kevyelle helposti mukana kuljetettavalle laitteelle, jonka energiantuotantokapasiteetin ei tarvitse olla suuri. Vähemmän liikkuvat joukot tarvitsevat puolestaan enemmän sähköenergiaa, mutta laitteen siirtämiseen on käy-

tettävissä ajoneuvoja. Vastauksissa esitettiin myös, että liikkuvan joukon mukana voisi olla pelkäämään virtapankkeja ja lataaminen suoritettaisiin kootusti tukikohdassa. Vastausten perusteella idea yksittäisestä kaiken kattavasta energiantuotantolaitteesta muuttui ja keskittyminen suurempaan tukikohdassa sijaitsevaan energijärjestelmään alkoi.

Tukikohdan energijärjestelmän suunnittelussa lähtökohdaksi valittiin helposti liikuteltava ja standardikokoinen 20 jalan merikontti, jonka seiniin ja kattoon mitoitettiin aurinkopaneelit. Paneeleiksi valittiin 405 watin yksikidepaneelit halfcut-kennoilla. Yksikidepaneelit soveltuvat monikidepaneeleita paremmin käyttökohteisiin, jossa asennustila on rajallinen ja tuotantoteho tahdotaan maksimoida. Yksikidepaneeleilla on myös korkeampi lämpötilakerroin, joten niiden tuotantoteho on parempi korkeissa lämpötiloissa. Halfcut-kennot mahdollistavat sähköntuotannon tehokkaasti, vaikka osa paneelista on varjossa.

Paneeleiden kytkentä kolmeen erilliseen ryhmään lisää järjestelmän viansietokykyä ja modulaarisuutta, joita kyselyn vastaajat pitivät tärkeinä ominaisuuksina. Yksittäinen paneeliryhmä voidaan kytkeä pois järjestelmästä ja tuotantoa jatkaa muilla ryhmillä. Paneelien ryhmittely pienentää aurinkopaneelijärjestelmän virtaa ja jännitettä, joka mahdollistaa ohuempien kaapeleiden käytön ja pienentää kaapeleissa tapahtuvia jännitehäviöitä.

Tuuliturbiinit tuovat järjestelmän energialähteisiin monipuolisuutta. Tuuliturbiinit ovat kooltaan helposti siirrettäviä ja niiden masto ei tarvitse kiinteää perustaa. Turbiinien kiinnittämismahdollisuuksia esimerkiksi konttiin on syytä tutkia vielä tarkemmin. Edullisin vaihtoehto on, mikäli turbiinit voidaan kiinnittää komentopaikalla jo olemassa oleviin rakenteisiin. Järjestelmän modulaarisuutta lisättiin asentamalla jokaiselle turbiinille oma lataussäätimensä, jolloin turbiineita voidaan tarvittaessa asentaa järjestelmään lisää.

Järjestelmän huollettavuutta ja hallittavuutta parantaa tasavirranjakokeskus, johon sulakkeet on keskitetty. Keskitetty rakenne nopeuttaa vianmääritystä ongelmatilanteissa ja selkeyttää järjestelmän rakennetta, jolloin järjestelmän toiminnan ymmärtäminen ja huoltotoimenpiteiden suorittaminen on helpompaa. Jakokeskus vähentää tarvittavan kaapeloinnin määrää ja täten yksinkertaistaa järjestelmän rakennetta. Kyselyn vastauksissa esitettiin toive, että laitteen käyttäjien tulee pystyä suorittamaan huoltotoimenpiteitä laitteelle. Yksinkertainen rakenne tukee tätä toivetta ja huoltotoimenpiteiden tekeminen on mahdollista ohjeiden avulla.

Litiumrautafoosfaattiakusto soveltuu syväpurkaukseen ja kestää tuhansia lataussyklejä, mutta akkujen kylmänkesto on heikko. Lyijyakut soveltuvat paremmin kylmään käyttöympäristöön. Lyijyakkujen elinkaari on huomattavasti litiumakkuja lyhyempi ja DOD-arvo matalampi. Litiumakkujen heikkoa kylmänkestoa voitaisiin kompensoida eristämällä kontti lämpöeristeillä ja pitämällä kontin sisätila nollan asteen yläpuolella. Kontin lämmittäminen vaatii energiaa, joka heikentää järjestelmän hyötysuhdetta. Järjestelmän muiden komponenttien kannalta lämpötilan hallinta ei ole yhtä keskeistä.

Järjestelmän toimintavarmuutta lisättiin monentamalla vaihtovirran tuotantoon käytettävät vaihtosuuntaajat. Yksittäinen vaihtosuuntaaja pystyy tuottamaan 230 voltin yksivaihe virtaa ja kolme suuntaaja voidaan konfiguroida tuottamaan yhdessä kolmivaihevirtaa. Yksittäinen vaihtosuuntaaja voidaan kytkeä pois järjestelmästä vikatilanteissa, mutta järjestelmä on silti kykeneväinen vaihtovirran tuottamiseen muilla vaihtosuuntaajilla. Järjestelmän modulaarisuus on huomioitu vaihtosuuntaajien valinnassa ja niitä voidaan tarvittaessa lisätä järjestelmään. 230 voltin vaihtovirta mahdollistaa kaikkien kyselyssä esiin tulleiden laitteiden lataamisen ja käytön. Lisäksi järjestelmään lisättiin tasavirtalatausliitäntä, jonka kautta on mahdollista ladata laitteita USB-porttien tai tasavirtaliitinten välityksellä.

10.2 Kehitystyön luotettavuus ja pätevyys

Kehitystyössä aineistoina käytettiin useita erityyppisiä kirjallisia- ja sähköisiä lähteitä. Lähteet pyrittiin hakemaan tunnetuista tietokannoista, kuten Janet Finna-, Finna-, ProQuest- ja Knovel-tietokannoista. Tiedonhankinta oli haastavaa, sillä vastaavia opinnäytetöitä- tai diplomitöitä ei ole tehty. Etenkin akkuihin liittyvien ajantasaisten ja luotettavien lähteiden löytäminen oli haasteellista, sillä tekniikka kehittyy alalla jatkuvasti. Lähteitä hankittiin myös muualta kuin edellä mainituista tietokannoista. Näissä tapauksissa lähteen luotettavuutta arvioitiin tapauskohtaisesti tutkimalla kirjoittajan taustoja ja julkaisualustaa. Aineiston sisältöä vertailtiin muuhun saatavilla olevaan tietoon, jolla varmistettiin aineiston paikkansapitävyys. Opinnäytetyön tekemisessä ei käytetty tekoälyä. Sen avulla ei tuotettu työhön lainkaan sisältöä. Työn teksti, tehdyt kuvat ja taulukot ovat itse tuotettuja.

Kehitystyön tulosta ei ole viety käytäntöön ollenkaan. Järjestelmän kehittäminen perustuu yksinomaan verkosta saatavilla olevaan tietoon ja valmistajan käyttöohjeisiin, sekä teknisiin tiedotteisiin. Järjestelmän rakenteessa ja esitetyissä kytkennöissä voi olla virheitä ja sen toiminta tulee tarkistaa ennen käytännön toteuttamista. Kytkenäkaaviot ovat tehty sen tiedon pohjalta, jota käyttöohjeissa on saatavilla.

Opinnäytetyön suorittamisessa noudatettiin eettisen toiminnan periaatteita. Työ suoritettiin toimeliantajalta haetun tutkimusluvan mukaisesti ja työssä syntynyttä luottamuksellista tietoa käsiteltiin tutkimusluvan määräämällä tavalla. Kyselytutkimusta suorittaessa vastaajille kerrottiin selvästi, mitä varten tutkimus suoritettiin ja mihin saatuja vastauksia käytettiin. Kysely suoritettiin tutkimusluvan mukaisesti anonyyminä, eikä vastaajien henkilötietoja ole mahdollista selvittää.

10.3 Kehitystyö jatkossa

Opinnäytetyössä esitettiin kytkentäkaavio komentopaikan energiajärjestelmälle. Järjestelmän mekaanista suunnittelua tai sähköjohtojen, kaapeleiden ja vikavirtasuojusten mitoittamista ei ole suoritettu. Lisäksi järjestelmän toimivuutta tulee tarkastella ennen käytännön toteuttamista esimerkiksi Victron Energyn edustajan kanssa.

Olellaista järjestelmän energiantuotannon ja akkukapasiteetin mitoittamiselle on joukkojen sähkön kulutus erilaisissa toimintaympäristöissä. Optimaalisen mitoittamisen kannalta on tärkeää tulevaisuudessa tutkia, kuinka suuria energiamääriä erilaiset joukko-osastot tarvitsevat erilaisissa olosuhteissa. Joukkojen energiankulutusdatan avulla järjestelmä voidaan optimoida sopivan kokoiseksi kullekin joukolle.

Taistelijakohtaisten akkujen testaaminen kenttäolosuhteissa ja etenkin kylmissä talviolosuhteissa tuottaisi arvokasta tietoa opinnäytetyössä esitetyn energiajärjestelmän toiminnasta. Pienmuotoiseen sähköntuotantoon käytettäviä laitteita, kuten lämpösähkögeneraattoreita ja kannettavia aurinkopaneeleita, joita työssä esiteltiin voisi olla kannattavaa testata käytännössä. Käytännön testauksessa selviäisi laitteiden todellinen käyttöpotentiaali.

Lähteet

12,8, 25,6 & 51,2 Volt Lithium NG Batteries. N.d. Victron Energy:n akkujen tekninen tiedote valmistajan verkkosivuilla. Viitattu 6.1.2025. <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-Lithium-NG-batteries-12,8V-25,6V-51,2V-EN.pdf>

40 Amp DC Power Splitter Distribution Module. N.d. Laitteen tekniset tiedot toimittajan verkkosivuilla. Viitattu 6.1.2025. <https://czh-labs.com/products/40amp-dc-power-splitter-distribution-module-5-powerpole-ports-and-6-usb-ports-output-oono-f-1066?gad>

Absorbent Glass Mat (AGM). 2022. Artikkelin Battery University:n verkkosivuilla. Viitattu 19.10.2024. <https://batteryuniversity.com/article/bu-201a-absorbent-glass-mat-agm>

Alemán, J., Chadwick, A., He, J., Hess, M., Horie, K., Jones, R., Kratochvíl, P., Meisel, I., Mita, I., Moad, G., Penczek, S. and Stepto, R. 2007. Definitions of terms relating to the structure and processing of sols, gels, networks, and inorganic-organic hybrid materials. Julkaisu De Gruyter verkkosivustolla. Viitattu 20.12.2024. <https://doi.org/10.1351/pac200779101801>

Astro 5s. 2022. Aurinkopaneelin tekniset tiedot toimittajan verkkosivuilla. Viitattu 6.1.2025. https://volttikauppa.fi/wp-content/uploads/2022/08/182390405ASTRO-5s_CHSM54MBL-HC_1722x1134x30_EN_20220217-1.pdf

Aura, J. & Tonteri, A. 2005. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. 3–5. p. Helsinki: WSOY.

Aurinkopaneelien asentaminen. 2023. Motivan verkkosivut. Viitattu 6.1.2025. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/hankinta_ja_asennus/aurinkopaneelien_asentaminen

Aurinkopaneelit. 2024. Artikkelin Eroaverkosta.com sivustolla. Viitattu 6.1.2025. <https://eroaverkosta.com/page/13/aurinkopaneelit>

Aurinkosähköteknologiat. 2024. Tietopaketti Motivan verkkosivuilla. Viitattu 6.1.2025. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat

Barsukov, Y. & Qian, J. 2013. Battery Power Management for Portable Devices. Artech House.

Basic Components of a Wind Farm. N.d. <https://janet.finna.fi/>, Research Gate. Viitattu 6.1.2025.

BatteryProtect 48V 100A. 2023. Laitteen käyttöohje valmistajan verkkosivuilla. Viitattu 6.1.2025. https://www.victronenergy.com/upload/documents/BatteryProtect_48V/114439-Smart_BatteryProtect-pdf-en.pdf

Bellamine, M. 2023. Difference between PWM and MPPT solar charge controller and which is better? Artikkele GoSolarPower verkkosivustolla. Viitattu 5.1.2025. <https://www.gosolarpower.com/2023/06/9-differences-between-pwm-and-mppt.html>

Bhatt, A, Withers, R. & Wang, G. N.d. Lithium-ion batteries. Artikkele Australian Academy of Science verkkosivulla. Viitattu 2.11.2024. <https://www.science.org.au/curious/technology-future/lithium-ion-batteries>

Breeze, P. 2016. Wind Power Generation. Elsevier Ltd. Viitattu 28.12.2024. <https://janet.finna.fi/>, ProQuest Ebook Central.

Campstove 2+. N.d. Tuote valmistajan verkkosivuilla. Viitattu 26.11.2024. <https://www.bioliteenergy.com/products/campstove-2-plus>

Cerbo GX, Cerbo-S GX and GX Touch. N.d. Tekninen tiedote valmistajan verkkosivuilla. Viitattu 6.1.2025. <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-Cerbo-GX-GX-Touch-EN.pdf>

Charging Lead Acid. 2023. Artikkele Battery Universityn verkkosivuilla. Viitattu 22.10.2024. <https://batteryuniversity.com/article/bu-403-charging-lead-acid>

Charging Lithium-ion. 2021. Artikkele Battery Universityn verkkosivuilla. Viitattu 4.11.2024. <https://batteryuniversity.com/article/bu-409-charging-lithium-ion>

Charging Nickel-cadmium. 2021. Artikkele Battery Universityn verkkosivuilla. Viitattu 29.10.2024 <https://batteryuniversity.com/article/bu-407-charging-nickel-cadmium>

Corrosion, Shedding and Internal Short. 2021. Artikkele Battery Universityn verkkosivuilla. Viitattu 22.10.2024. <https://batteryuniversity.com/article/bu-804a-corrosion-shedding-and-internal-short>

Crompton, T.R. 2000. Battery Reference Book. 3.p. Reede Educational and Professional Publishing Ltd. Viitattu 3.10.2024

Dhass, A., Babu, G., Pradhan, R., Murthy, G. & Sreenivasan, M. 2023. Energy harvesting through thermoelectric generators. Viitattu 5.1.2025. <https://janet.finna.fi/>, Research Gate.

Evans, P. 2017 How Inverters Work. Julkaisu The Engineering Mindset opetusverkkosivustolla. Viitattu 3.10.2024. <https://theengineeringmindset.com/how-inverters-work/>

Evans, P. 2021. Full Wave Bridge Rectifier, Capacitor Filters, Half Wave Rectifier. Julkaisu The Engineering Mindset opetusverkkosivustolla. Viitattu 3.10.2024. <https://theengineeringmindset.com/full-bridge-rectifier/>

Evans, P. 2023. Solar Panels Explained. Opetusvideo. Viitattu 28.12.2024. <https://theengineeringmindset.com/solar-panels-explained/>

Günther, K., Hasanen, K. & Juhila, K. Analyysi- ja tulkinta. Laadullinen käsikirja Tietoarkiston verkkosivuilla. Viitattu 4.1.2025. <https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvali/analyysitavan-valinta-ja-yleiset-analyysitavat/analyysi-ja-tulkinta/>

Hama Supreme 20HD Power Pack. N.d. Technical Data Sheet valmistajan verkkosivuilta. Viitattu 25.11.2024 https://ro.hama.com/webresources/article-documents/00188/man/00188308man_bg_cs_de_en_es_fr_hu_nl_pl_pt_ro_ru_sk.pdf

Hopman, B. 2014. Matching solar modules to MPPT charge controllers. Artikkelin Victron Energy verkkosivuilla. Viitattu 5.1.2025. <https://www.victronenergy.com/blog/2014/03/28/matching-victron-energy-solar-modules-to-the-new-mppt-charge-regulators/>

How does the Lead Acid Battery Work? 2021. Artikkelin Battery University verkkosivuilla. Viitattu 19.10.2024. <https://batteryuniversity.com/article/bu-201-how-does-the-lead-acid-battery-work>

How to Restore Nickel-based Batteries. 2021. Artikkelin Battery University verkkosivuilla. Viitattu 31.10.2024. <https://batteryuniversity.com/article/bu-807-how-to-restore-nickel-based-batteries>

Jouhara, H., Zabienska-Gora, A., Khordehghah, N., Doraghi, Q., Ahmad, L., Norman, L., Axcell, B., Wrobel, L. & Dai, S. 2021. Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications. Internal Journal of Thermofluids 9/2021. Viitattu 28.12.2024. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266620272100001X?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8fd624c5fef7376c#fig0001

Juhila, K. N.d. Koodaaminen. Laadullinen käsikirja Tietoarkiston verkkosivuilla. Viitattu 4.1.2025. <https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvali/analyysitavan-valinta-ja-yleiset-analyysitavat/koodaaminen/>

Kalogirou, S. 2014. Solar Energy Engineering – Processes and Systems. 2.p. Elsevier Inc. Viitattu 28.12.2024. <https://janet.finna.fi/>, Knovel.

Lataussäätimet. N.d. Artikkelin Eroverkosta.com sivustolla. Viitattu 6.1.2025. <https://eroverkosta.com/page/11/lataussaatimet>

Lehto, H., Maalampi, J., Havukainen, R. & Leskinen, J. 2016. FY3 Sähkö. 10. p. Helsinki: Sanoma Pro.

Loss of Electrolyte. 2021. Artikkelin Battery University verkkosivuilla. Viitattu 22.10.2024. <https://batteryuniversity.com/article/bu-803c-loss-of-electrolyte>

Lynx Distributor M8 and M10. 2024. Käyttöohje valmistajana verkkosivuilla. Viitattu 6.1.2025. https://www.victronenergy.com/upload/documents/Lynx_Distributor/24531-Lynx_Distributor_Manual-pdf-en.pdf

Lynx Smart BMS. 2024. Laitteen käyttöohje valmistajan verkkosivuilla. Viitattu 6.1.2025. https://www.victronenergy.com/upload/documents/Lynx_Smart_BMS/109358-Lynx_Smart_BMS-pdf-en.pdf

Mobile Solar Panel – AgfaPhoto Solar Panel SP120. N.d. Tuote valmistajan verkkosivuilla. Viitattu 26.11.2024. <https://www.agfaphoto-gtc.com/en/batteries/166-mobile-solar-panel-agfaphoto-solar-panel-sp120-4250175858173.html>

Multiplus-II GX Invertteri/Laturi. N.d. Tekninen tiedote jälleenmyyjän verkkosivuilla. Viitattu 6.1.2025. https://www.suomenakut.fi/storage/product_files/4/125784268214-Datasheet-Multi-Plus-II-GX-inverter-charger-FI_f5bc05e4a1c94912cffe4c6276e10fd.pdf

Multiplus-II GX. N.d. Laitteen käyttöohje jälleenmyyjän verkkosivuilla. Viitattu 6.1.2025. https://www.suomenakut.fi/storage/product_files/4/125784268214-MultiPlus-II_GX-en_875ca64d105f6b5bb6947465ce9ec03c.pdf

Ohutkalvoteknologiat. 2023. Raloksen viralliset verkkosivut. Viitattu 28.12.2024. <https://ralos.fi/ohutkalvoteknologiat/>

Orion-TR DC-DC converters isolated. N.d. Tekninen tiedote valmistajan verkkosivuilla. Viitattu 6.1.2025. <https://www.victronenergy.fi/upload/documents/Datasheet-Orion-Tr-DC-DC-converters-isolated-100-250-400W-EN.pdf>

Photovoltaic Geographical Information System. N.d. Euroopan komission ylläpitämä aurinkovoimailan tuotantolaskuri. Viitattu 5.1.2025. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html

Power Calculator. N.d. Sveitsin Energiaviraston teettämä tuulivoimalaskin. Viitattu 5.1.2025. <https://wind-data.ch/tools/powercalc.php?lng=en>

Powerbank USB-C PD 130V 50000. N.d. Tuotteen käyttöohje valmistajan verkkosivuilla. Viitattu 5.1.2025. <https://sandberg.world/en-fi/mt/manual/420-75>

Puolustusvoimat. N.d. Suomen valtion työhakupalvelun verkkosivut. Viitattu 7.10.2024. <https://valtiolle.fi/fi/tyonantajat/puolustusvoimat/>

Puolustusvoimien logistiikkalaitos. N.d. Puolustusvoimien logistiikkalaitoksen viralliset verkkosivut. Viitattu 7.10.2024. <https://logistiikkalaitos.fi/tietoa-meista>

Rao, K. Matar, Y, Baharudin, N & Ismail M. 2020. Design of MPPT charge controller using zeta converter for battery with solar Photovoltaic (PV) system. <https://janet.finna.fi/>, Research Gate.

Smoot, J. 2020. An Overview of USB Type-C in Power-Only Designs. Artikkelit Digikey verkkosivustolla. Viitattu 4.11.2024. <https://www.digikey.fi/fi/articles/an-overview-of-usb-type-c-in-power-only-designs>

Smoot, J. N.d. The History of USB Standards from 1.0 to USB4. Artikkelit Samesky verkkosivulla. Viitattu 4.11.2024. <https://www.sameskydevices.com/blog/the-history-of-usb-standards-from-1-to-usb4>

Sulfation and How to Prevent it. 2024. Artikkel Battery University verkkosivuilla. Viitattu 22.10.2024. <https://batteryuniversity.com/article/bu-804b-sulfation-and-how-to-prevent-it>

Summit 20000. N.d. Tuotteen tekninen tietolehti. Viitattu 26.11.2024. <https://charger.nitcore.com/product/Summit20000>

Suomen Tuuliatlas. N.d. Ilmatieteenlaitoksen ylläpitämä tuulikartta. Viitattu 6.1.2025. <http://tuuliatlas.fmi.fi/fi/>

Survivor Powerbank 8in1 96000. N.d. Tuote Sandbergin verkkokaupassa. Viitattu 25.11.2024. <https://sandberg.world/fi-fi/product/survivor-powerbank-8in1-96000>

Szelong, K. & Fan, K. N.d. Chemistry of Lithium. Julkaisu LibreTexts Chemistry verkkosivustolla. Viitattu 2.11.2024. [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Inorganic_Chemistry/Supplemental_Modules_and_Websites_\(Inorganic_Chemistry\)/Descriptive_Chemistry/Elements_Organized_by_Block/1_s-Block_Elements/Group_1%3A_The_Alkali_Metals/Z003_Chemistry_of_Lithium_\(Z3\)](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Inorganic_Chemistry/Supplemental_Modules_and_Websites_(Inorganic_Chemistry)/Descriptive_Chemistry/Elements_Organized_by_Block/1_s-Block_Elements/Group_1%3A_The_Alkali_Metals/Z003_Chemistry_of_Lithium_(Z3))

Tietoa meistä. N.d. Puolustusvoimien viralliset verkkosivut. Viitattu 7.10.2024. <https://puolustusvoimat.fi/tietoa-meista>

Turpeenoja, L. 2017. Mooli 4 – KE4 materiaalit ja teknologia. 1–3.p Otava.

Types of Lithium-ion. 2023. Artikkel Battery University sivuilla. Viitattu 3.11.2024. <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>

Victron Battery Balancer. N.d. Laitteen käyttöohje valmistajan verkkosivuilla. Viitattu 6.1.2025. <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Manual-Battery-Balancer-EN.pdf>

Wind turbine system. 2023. Tuuliturbiinin käyttöohje valmistajan verkkosivuilla. Viitattu 6.1.2025. <https://www.altinelenerji.net/english-manual-book/1500-2000-wind-turbine-windsafe-manual-book.pdf>

Liitteet

Liite 1. Kysymys 1 vastaukset

1. Millaisia laitteita sähkövoimaratkaisulla tulee pystyä lataamaan tai käyttämään?	
	Mobiilipäätelaitteet, johtamisjärjestelmien päätelaitteet, lennokit, pimeänäkölaitteet, tähtäimet.
	Käyttämään erilaisten koniteihin tai teltoihin perustettujen johtamispaikkojen/vast. sähkölaitteita, kuten akkukäyttöisten laitteiden varaajia, johtamislaitteita, tilojen valaistusta, ilmanvaihtoa ja lämmitystä. Lataamaan suoraan akkukäyttöisiä laitteita, kuten kannettavia tietokoneita, -radioita ja tabletteja, maaliosoituslaitteita ja lämpöpöytäystimiä.
	Virve-puhelin, Drone, pimeänäkölaitteet, viestilaitteet, kannettava tietokone GSM-puheli, GPS-laitteet.
	Laittekirjo on erittäin moninainen alkaen ladattavista CR123 ja AA koon erillisistä akuista päätyen ampperimäärältään merkittäviin viestivälineiden akkuihin ja mm. sähköisten kulkuneuvojen (miehittämättömät laitteet ja mopo/mönkijä tason laitteet). Kirjo on merkittävä. Liittyy kysymykseen numero 2 on merkittävänä haasteena tällä hetkellä. Latausliitäntöjen sekä erilaisille laitteiden akuille valmistettujen laturien määrä on kirjava ja laaja. EU-asetuksen myötä ollaan ottamassa pieniä askeleita standardoinnin osalta USC-C suuntaan. Tämä koskee uusia laitteita.
	Hyvin laajalla skaalalla pienois- ja pienjännitteisiä laitteita. Pääsääntöisesti 230 VAC-liitännällä olevia laitteita. Yhä enenevässä määrin laitteiden liitännät tulee olemaan USB-pohjaisia ratkaisuja.
	Mitä tahansa sähkövirtaa vaativia laitteita. Pääasiassa kuitenkin viesti- ja yhteydenpitovälineitä.
	Akkulatureita [REDACTED]. Kannettavat tietokoneet, tabletit, valaistus. Mahdollisesti lämmitys (johtamiskontit jne). Lataamaan ja käyttämään johtamisjärjestelmien sekä asejärjestelmien laitteita. Esimerkiksi 1-6kpl [REDACTED] (2x [REDACTED]) sekä ko. akkuja 8-paikkaisella laturilla, käyttämään 1-[REDACTED] ja 1-3kpl [REDACTED] sekä [REDACTED] paikkantamislaitetta.
	Lähes kaikkia sotilaan käyttämiä kannettavia laitteita
	1. Kenttäradioiden akkuvaraajat 2. Puhelinten / tablettien virtapankit 3. Valaisimet 4. Kahvinkeitin tai muut vastaavat 5. FM-radio Näihin riittää pienempi kannettava voimakone, riippuen kuinka paljon laitteita olisi käytettävä samaan aikaan. Toisaalta jotkut laitteet vaativat verkkovirran, siis voimakone on oltava lähes taukoamatta päällä mm. viestiyhteyttä silmällä pitäen.
	Kysymys on jokseenkin turha. Edellisellä sivulla on jo määritelty: "Energiasyöttönä voisi toimia myös vaihtovirtaa tuottavat aggregaatit tai virtaa voisi ottaa myös valtakunnan verkosta tai akuista tilanteen niin sallissa. Toimikseen tehokkaasti laitteen tulisi sisältää akusto, joka mahdollistaa energian varastoinnin ja käytön sopivalla hetkellä. Sähkövoimaratkaisun tulisi pystyä tarjoamaan sähköenergiaa kenttäolosuhteissa toimivalle joukolle, jonka koko voi vaihdella 6-30 taistelijan välillä. Laitteen tulisi pystyä antamaan ulos tasavirtaa USB-liittimien välityksellä, joka riittää pienempien latauskohteiden, kuten radioiden ja pimeänäkölaitteiden lataamiseen. Suurempia sähkön käytön kohteita, kuten komentopaikkoja varten laitteen tulisi pystyä antamaan vaihtovirtaa." Tästä ja laitteistohistoriasta seuraa se, että kysymykseen 2. vastauksessa kaikki vaihtoehdot tulee valita. Oleellista on huomioida, että nyt olemme liittokunnan jäseniä ja siten verkkovirran osalta tulee kyetä myös tarvittaessa tarjoamaan US-standardin mukaista verkkovirtaa sekä huomioida myös Applen BYOD-laitteiden latausmahdollisuus (latausmahdollisuus).
	Sotilaselektronikkaa ja kulutuselektronikkaa.
	Radio, kenttäviestijärjestelmän päätelaite, tietokone, työvalo, taistelijan johtamislaitte, aseiden lisälaitteet, akustot, lamput/valot, paikannuslaitte, etäisyysmittari, ajoneuvon akku jne, sähköavusteisen polkupyörän akku
	Hyvin kirjavaa laitekantaa, joista osassa on laitespesifi latausliitin.
	Tyypillisiä radioiden akkuja, D- ja AA -akkuparistoja, 12V ja 24V lyijyakkua sekä erilaisia powerbankkeja. Tämän voimaratkaisun olisi hyvä kyetä suoraan syöttämään radioita, [REDACTED], maastotietokoneita ym. tyypillisimpiä laajassa käytössä
	Käsivalaisimet ja kännykät
	pimeänäkövälineitä
	Eriaiset lipas akut, puhelinten akut arjen ratkaisuihin liittyen, voimakoneiden käynnistys akut, konttien ylläpito akustot, mittalaitteiden akut, työkalujen akustot huoltokonteista esim. akkuperakoneet, valokaapelitutkat, läppärit, autojen käynnistys akut. Drone laitteistojen akut, simulaatio järjestelmien akut. Kiinteiden viesti-asemien akustot. Eli mahdollisimmat laaja skaala viestivälineisiin, huoltoon ja logistiikkaan liittyviin ratkaisuihin. Pakollinen lisävaruste suoja-erotus muuntaja, jolloin pystytään syöttämään myös panssarivaunujen käyttö-akustoja tarvittaessa ulkoseinistä.
	Arjen välineet
	Järjestelmän tulisi pystyä lataamaan kannettavia tietokoneita sekä syöttämään keskusyksiköitä. Isommissa kuvassa pitäisi pystyä varmentamaan koneet tai tukiasema tyypillisiä tiloja tai ajoneuvoja. Sähkölaitteiden osalta peruslaitteet, gsm, virve, radiokalusto, valaisimet jne.
	Suurimmat kulijat määrällisesti 1,5V lithium kertakäyttö-paristot (CR123A). Akku-ratkaisu helpottaisi elämää näiden laitteiden osalta (valonvahvistimet, laserit, lamput). Myös erilaiset PAD:t vaativat virtaa, käytännössä kahden powerbankin lataamista.
	lamput, radiot
	Asepäätelaitteet, Inertiapaikkantamislaitteet, ammunnanhallintalaitteet, radiot, muut viestivälineet, matkapuhelimet, läppärit, tabletit. Mahdollisesti rajoitetusti myös muut asejärjestelmän toimilaitteet eli suuntausmoottorit, latauslaitteet yms.

Liite 2. Kysymys 2 vastaukset

2. Millaisia latausliitäntöjä kyseisissä laitteissa on?

USB-A	USB-B	USB-C	Mikro-USB	Jokin muu?
14	7	23	12	19

2.1 Millaisia MUITA latausliitäntöjä laitteissa on?

Military Style USB Connectors tai jopa schuko liitäntä
3,5mm plugi virvepuhelimessa. Läppäreissä omat liitäntänsä
Perinteiset hauenleuka latausliitännät. Akkujen tilan tarkkailuun yksinkertainen akkutesteri, joilla voi tehdä kuormitus testejä auton akustoon esim. Tai sitten yleismittari tarpeeksi isoilla ja kestävillä sulakkeilla.
Laitekohtaisia liittimiä, jotka on sovitettu juuri kyseiselle laitteelle muuntajineen. Pääosin suunniteltu verkkovirralle ja osittain mahdollista hyödyntää ajoneuvojen 12v - 24v jännitettä.
SUKO-pistoke, tupakansytytin-pistoke, erilaiset monipinniset liittimet
Mahdollisesti 12/24 VDC
Useita erilaisia matalajännitteisiä liitäntöjä, jotka edellyttävät virran saantia 230V normaalilla liittimellä, joka laitteen omalla latauslaitteella muunnetaan tarvittavaksi.
Laitteille sopivat sekä huomioiden myös isommat järjestelmät 3v16A, 3v32A ja 3v63A.
+ ja - navat sellaisilla liittimillä että akkukengällä varustetut (koukkumalli) tai holkitetut, tai jopa holkittamattomat johtimet saadaan napoihin kiinni. Ns. banaani liittimet? Mahdollisuus kytkeä hallitusti suoraan akun napoihin voisi olla tarpeen.
Laitekohtaisia, verkkovirtaliittimiä.
Edellisen kohdan mukaisesti latausmahdollisuus esim. 12 V ja 24 V lyijyakuille.
230VAC
Verkkovirtaliitäntä, "tupakansytytin"
akkuliittimet, nato-pistoke ym kaupallisten laitteiden virtaliittynät
Osissa laitteista on ainoastaan ruuvi- tai jousiliittimen alle menevät johtimet sähkönsyöttöä varten.
Yllämainitut
Kaikki mahdolliset verkkovirtaliitännät (Eurooppa, Yhdysvallat) ja laitevalmistajakohtaiset liitännät, etenkin Apple. Muilla laitteilla lähtökohtaisesti omat verkkovirtalaturit.
 Lisäksi tulee huomioida US-verkkojännite

Liite 3. Kysymys 3 vastaukset

3. Millaista latausjännitettä ja -virtaa kyseiset laitteet vaativat?

Mitä tahansa puhelimista ja käsiavaimista joukkojen ja johtokeskusten akkukäyttöisiin laitteisiin. Kannettavien laitteiden osalta vaatimukset ovat toki vähäisemmät kuin tutkimuksen tarkoituksessa kuvatut johtokeskusten akustot. Kysymys on siten tehtävänasettelun perusteella jo jossain määrin tarpeeton / tehtävänmäärittelyssä vastattu.
Uudemmat pääsääntöisesti USB PD maks. 60w.
 Vanhemmat 10-30VDC
USB:n yleisimmät latausjännitteet ovat 5, 9, 15 ja 20 voltia. Ideaalista olisi, että tehollähde pystyy toimimaan koko 5-20 voltin jännitealueella. Isompia tehoja edellyttävät esim. jopa 5A ja 50 V standardia tukevia USB-C-latureita ja -kaapeleita.
3V-230V
 Virta riippuu käytettävästä jännitteestä. Tarvittava teho on 2W - 2500W. Voi olla enemmänkin käyttötarpeesta riippuen.
Pääsääntöisesti 230 VAC, mutta myös USB:ssa standardin mukaisia jännitteitä.
Tasa- ja vaihtojännitettä. 5v-30v, 230 v, 400v
Perinteistä, 230V
1,5V, 3,0V, 4,7V
11-32V, radiot 24V. 1A-20A haarukassa luulinis virtojen olevan. Radiot voivat ottaa kyllä enemmänkin, varsinkin
5VDC-20VDC
Minun järjestelmäni on tällä hetkellä rakennettu siten, että sen pääjännite on 24VDC. Se antaa ulos Power Distribution -boxista mm. USB-A ja USB-C -liittimillä standardin mukaan sekä suoraa toimilaitteiden omilla liittimillä 24VDC. Suurin osa toimilaitteista käyttää enintään 24VDC käyttöjännitettä, mutta myös 48VDC laitteita on joissain sovellutuksissa. Vaadittavat tehot ovat enintään 60W luokkaa. Oman haasteensa tuo USB-C-PD -standardi, jossa lataustehot menevät jo yli 200W:n.
24Vdc, 48Vdc, 230Vac, 400Vac
Yleisesti 10-13VDC tai 230VAC, 10A
Isommat auton akustot ja myöskin laitesuojien akustot vaativat isompaa virtaa. Suurin osa 12 VDC.
 Pienet akkukennostot vain vähän virtaa esim. mobilipuhelin. 5VDC.
USB-C:n mahdollistamaa maksimi jännitettä ja virtaa.
normi jännite
pienlaitteet - 24 V
Yksittäisen akkukennon 1,2 voltista radion akun 12 volttiin ja toki raskaan kaluston lyijyakuilla 24 V.
Latausjännite 12/24VDC, joissain voi olla myös 32-50VDC. Yleensä vaihtoehtona myös 230VAC.
 Varausvirta vaihtelee, yleisin väli 2-8A.
Kirjo on merkittävä 5v-220v
12

Liite 4. Kysymys 4 vastaukset

4. Millaisia liittimiä sähköntuotantoon käytettävissä laitteissa on ja millaista jännitettä ja virtaa ne tuottavat? (aggregaatit, aurinkopaneelit, tuuliturbiini...)	
Schuko- ja CE-liittimet virrankeston mukaisesti aina 125A saakka	
Aggregaatit suko 230V / 400V 3v (muutamissa salkkumallissa lisäksi USB, mutta yleensä genu pihalla ja laite säältä suojattuna telassa yms.	
Sukopistokeet heikkovirta 220 - kolmivaihe voimavirta	
0,9 kVA:sta aina 50 kVA:n asti voimakoneita, joissa yleiset schuko, CEE, kolmivaihe liittimet.	
aggregaatit, pääasiassa alle 10kva sähkövoimakoneita.	
En osaa sanoa	
aggregaatit, vaihtojännite, 230-400v	
Minä otan järjestelmäni 24VDC suoraan ajoneuvon akustolta varokkeella suojatulla kaapelilla. Lisäksi järjestelmään voidaan syöttää 230VAC Calix-liittimelle sekä "häätäsytönä" ruuviliittimiin 24VDC.	
Pienemmissä aggregaateissa yleensä SUKO-rasiat, esimerkkejä virta- ja jännitetiedoista: - Suurin jatkuva antoteho: 0,9 kW, Mitoitusvirta: 3,9A, Mitoitusjännite: 230V - Suurin jatkuva antoteho: 1,7 kW / 1,5 kVA, Mitoitusvirta: 7,4A, Mitoitusjännite: 230V - Suurin jatkuva antoteho: 1,8 kW, Mitoitusvirta: 7,8A, Mitoitusjännite: 230V - Suurin jatkuva antoteho: 2,3 kW / 2,0 kVA, Mitoitusvirta: 10A, Mitoitusjännite: 230V Aurinkopaneelija ja tuuliturbiineja ei suoranaisessa käytössä	
Nyt: 1v 230 VAC ja 3v 400 VAC 50 Hz NATO ja USA: 1v 120 VAC, 60 Hz ja 3v 200 VAC 60 Hz ja NATO 12 VDC ja NATO 24 VDC	
Kaupalliset ja siviilikäytössä oleviin laitteisiin soveltuvat liittimet 1-vaihe - 2vaihe. Osa voimakoneista on kiinteästi integroituna kontteihin ja erilaisiin järjestelmiin. Aurinko-, tuuli, tai vesivoimaloita ei ole mainittavilta osin käytössä. Eri ratkaisuita on tutkittu ja kokeiltu, mutta niiden käyttö on osoittautunut haastavaksi "kenttäkelpoisuuden" näkökulmasta.	
Sähkövoimakoneista löytyy yleisesti normaali 230VAC 1-vaihe ja osin 3-vaihe.	
Pienemmissä sähkövoimakoneissa on yksivaihesähköliitokset, joko schuko tai kolme pinninen järeämpi. Isoimmassa sähkövoimakoneissa on myös kolmivaihe tai vain kolmivaihe.	
Pienissä sähkövoimakoneissa on yksivaiheulosotto 230 voltille siten, että poikkeuksetta on SUKO -pistorasia ja mahdollisesti myös CEE17 -pistorasia. Isoissa kolmivaihesähkövoimakoneissa em. ulosottojen lisäksi on koneen koosta riippuen 16A, 32A ja 63A 3" pistorasiat tai näiden yhdistelmä.	
230V SUKO 0,9kVA USB A, USB C	
230V schuko eli tavallinen pistorasia, 230V ICC eli sininen 1-vaihelitettä, 16A ja 32A 3-vaihelitännät. 230V sekä 400V 3-vaihejännitettä. 0,9kVa, 4kVa ja 20kVa on yleisimmät oman näkemyksen mukaan.	
ks ed. 5V, 9V, 12V, 24V	
Invertoitua 230VAC Suko, CEE17	
eos	
5A -> 250A saakka. 230Vac sekä 400Vac liittäntöjä.	

Liite 5. Kysymys 5 vastaukset

5. Onko akuston jännitetasolle vaatimuksia?	
12, 24, 48 VDC.	
Ei erityisiä.	
 PVTOK YL006, ohje siirrettävät sähkölaitteistot. Lue tämä, jos et vielä ole lukenut.	
Kenttäakusto 24V	
Ei suoraa vastausta asiaan.	
Laitteen sisäisen akun jännitetaso tulee olla alle 120 voltia, jotta akusto pysyy SELV -jännitteisenä ja näin sen huoltoon ei tarvita sähköalan ammattilaista.	
On. apuvirran anto ajoneuvolle esim. tyai käyttöjännite vaatimus.	
Ei	
Mahdollisimman lähelle käytettävien laitteiden jännitettä, tai siitä korkeampi. Hakurivitalähteet ovat potentiaalisia häiriölähteitä jotka haittaavat radioverkkoja.	
Ei, 24V (27) akustoa voisi suoraan käyttää raskaiden ajoneuvojen "starttiboosterina"	
on	
Riippuen käyttötarkoituksesta, mutta 230v olisi järjevin ryhmätason laitteille. Lähtökohtaisesti kaikilla käytössä olevilla laitteilla on verkkovirtaan soveltuva laturi. Pienikokoinen virtalähde voisi sisältää myös tasajännitelähtöjä, mutta suuremmat laitteet (komentokonttikäyttö) mielestäni on järjevin olla 230-400v.	
Standardien mukaiset tietyin portain, muttei liian laajaa valikoimaa virhekytkentöjen tai sekaannusten välttämiseksi	
12-24	
Puhelintasosta aina kolmivaiheverkkovirtaan. Jatkossatulevaisuudessa lienee syytä huomioida myös erilaisten sähkökäyttöisten kulkuneuvojen niin miehittämättömät kuin miehittetyt maalla, merellä ja ilmassa yleistymisen. Näiden lataamisen mahdollisuudet tullevat korostumaan jatkossa jopa taistelijan viesti- ja valaisulaitteita enemmän.	
Tämä taitaa mennä käytettävien laitteiden ehdoilla. Tarvittava sähkö menee sähkölaitteisiin, jotka käyttävät 230V sähköä.	
Akustot ovat pääsääntöisesti 12/24 VDC. Toki keskitetyissä järjestelmissä akustot voi olla suuremmat, kunhan tarvittavat latausjännitteet saadaan ulos akustosta.	
Laittekirjo on laaja ja riippuu eri aselaista.	

Liite 6. Kysymys 6 vastaukset

6. Onko laitteen painolle ja koolle rajoituksia? Miten laitetta tulisi pystyä liikuttamaan? Kantaen vai ajoneuvolla? Kuinka pitkiä matkoja?	
	Jos kyseessä on "universaali taistelijan powerpack", niin kyllähän se on kyettävä jakamaan useaan osaan; "joukkueason kalusto", joka liikkuu ajoneuvossa, mutta on myös kannettavissa (enintään 25kg, jos yksi mies kantaa). Sitten taistelija/taistelijapari -kohtaiset laitteet, jotka ovat sellaisia, että eivät haittaa yksittäisen miehen taistelusuorituksia, mutta kykenevät pitämään esim. viestilaitteita päällä noin vuorokauden.
	Sotilas kantaa varusteensa ml. sähkövarastot. Joukosta riippuen kantomatkat ja -ajat voivat olla pitkiä
	Riippuu onko laitteet tukijoukkojen vai taistelevan yksikön käytössä.
	On. Joukkueen lataus/lakustojärjestelmiä tulisi voida liikutella ajoneuvolla. Ryhmän materiaali on mukana liikkuvaa ja voi kulkea pitkiäkin matkoja, joten turhan painon kuljettaminen pienentää hyötykuormaa.
	Jos voimakonetta ajatellaan ryhmän tai joukkueen tarpeisiin, tulee sen olla kannettavana kapistuksena maksimissaan noin 100 kg ja ehdottomasti kannettavassa, pakatussa muodossaan aivan maksimissaan yhden kuution kokoinen, mielellään pienempi. Nämä vaatimukset riippuvat pitkälti minkä tyylisestä joukosta on kyse. Liikkuvasta, vai vähemmän liikkuvasta. Mikäli puhutaan isommista laitteista, ne tulee olla peräkärryssä ja ajoneuvoin vedettävissä.
	kantaen tunteja
	Erikokoisia eri käyttötarkoitukseseen. Repussa, lavalla, peräkärryssä tai merikontti.
	Jokaisella joukolla on tehtävänsä liittyen erilainen toimintaympäristö ja tarpeet Yksilöiminen ei ole mahdollista. Joukoilla on erityyppinen toimintaympäristö mutta samoja laitteita käytössä.
	Riippuen joukosta, esim. tiedustelijat tarvitsivat mukana kannettavia laitteita ja monelle muulle joukolle riittäisi ajoneuvon kyydissä kuljetettava laite. Kevyin 0,9 kW aggregaatti painaa tyhjänä n. 13 kg, jota voi pitää eräänlaisena referenssinä kannettavalle laitteelle (toki huomioitava erikseen kannettavat 10-20 l jerrykannut). Isommat voimakoneet (1,7-2,3 kW) painavat tyhjänä n. 50-60 kg, ja ovat mitoiltaan esim. 650 x 450 x 450 mm. Näitä voi pitää eräänlaisena referenssinä ajoneuvolla kuljetettavalle laitteelle, jota pitäisi pystyä siirtämään käsin (vähintään henkilön toimesta) lavalta käyttöpaikalle. Mitat ja paino riippuvat myös paljon siitä minkälaiset käsittelyominaisuudet laitteella on (esim. kunnolliset kantokahvat, ei teräviä muotoja tms.)
	Kantaen tai maastohenkilöautolla vetäen
	Laitteita tulisi olla erikokoisia eri käyttötarkoituksiin. Esim. pieni (taistelija kuljettaa), keskikokoinen (kannettava 230V-jännitettä tarjoava, siniaalto), iso (ajoneuvolla kuljetettava).
	Riippuu järjestelmästä jota sillä tuetaan ja suunnitellusta käyttäjästä. Mielellään kantaen, jos tuettava järjestelmä on pienen ryhmän tai taistelijaparin käytössä. Ajoneuvolla liikuteltava isommalle laitteelle ja joukkueasolla käytettäessä
	Pienikokoinen maksimissaan n. alle 4-5 kg laite on helppo kantaa mukana. Ajoneuvo on varmasti pääasiallinen tapa liikuttaa laitetta pitkiä matkoja ja kantamalla kuljettamisen matkat rajoittuvat ajoneuvolta kohteelle n. vajaa 0,5 km.
	Molemmat versiot tarpeellisia. Pitää olla kestävä, korjattavissa, toimintavarma ja paloturvallinen (ml räjähdyksissä, ja suorammunnassa)
	Yhden henkilön kannettavissa oleva. Korkeintaan satoja metrejä.
	Laitetta tulisi olla hyvä siirtämään kuljetuskaluston mukana. Esimerkiksi kuorma-auton lavetti, johon integroitua hydraulinen nostin. Nostimella pystyy nostamaan latausnopan helposti ja nopeasti lavalta pois sopivalle maastonkohdalle, jossa sitä voisi käyttää maastoutukset ja hajautukset huomioiden. Huolto on maltillisia siirtoja oleva taustatuki kentän tarpeita ajatellen.
	Pisimmät matkat jalan n. 500m. Laitetta ei kannattaisi laittaa suoraan hyökkäävän joukon matkaan, vaan tulisi perässä muiden varusteiden kanssa. Puhutaan max 25kg painosta (mikäli olkahihnat).
	Kenttäakusto maks. kahden henkilön siirrettävä, ajoneuvolla kuljetettava. Yhden henkilön kannettavana maks. 3kg total.
	kantamalla
	Enintään 2 ihmisen kannettava, 1-100m matkoja. Myös pyörät joilla voidaan siirtää sora-alustalla tai mättäisessä metsämaastossa voisi olla eduksi jos paketti on suuri ja painava - tarpeetonta kantamista vältetään. Modulaarisuus tarkoittaa minulle myös sitä että paketti voidaan kantaa majoitteeseen (telta, korsi, kaivanto, jne) sekä kiinnittää puolikiinteästi tai jopa kiinteästi ajoneuvoon. Koko voisi olla karkeasti 600x800x400mm, ja sen tulisi olla asentovapaa.

Liite 7. Kysymys 7 vastaukset.

7. Onko laitteelle muita vaatimuksia, joita edellä ei ole mainittu tai jotain, joka on hyvä ottaa työssä huomioon?	
	Olosuhteiden kesto on pitää kiinnittää huomiota => IP-luokitus huomioitava. Paino otettava huomioon erityisesti muulla tavalla, kuin ajoneuvolla akustoa siirrettäessä.
	Sähkönsyöttö hubin akustolle 230VAC, 12VDC (henkilöauto TUPSYT), 24VDC (raskas kalusto suoraan akulta), USB PD. Laite ei saa aiheuttaa häiriöitä radiotaajuuksille (hakkurin haasteet)
	Sähkön harvostointi esimerkiksi auringosta, tuulesta tai vedestä on epäedullinen vaihtoehto sellaisille sotilasjoukoille, joiden on tarkoitus maastoutua metsään eli lähtökohtaisesti kaikille maavoimien joukoille. Suomen vuodenajat ovat myös epäoptimaalisia em. harvostointimenetelmille, koska joukkojen on kyettävä ympäri vuorokauden ja vuosikautiseen toimintaan kaikissa sääolosuhteissa. Esimerkiksi aurinkopaneelien tuottamaan riittävään tehoon pääsy edellyttäisi paneelien suuntaamista optimaaliseen suuntaan ja kulmaan ilman paneelien edessä olevia merkittäviä katveja (esim. havupuiden oksia). Paneelien käyttö ei saisi kuitenkaan paljastaa joukkojen sijaintia, joten asiassa on selkeä ristiriita. Eivät tiedustelijatkaan voi siirtyä kulkemaan avoimeen maastoon sen takia, että mukana kannettavat aurinkopaneelit saataisiin tuottamaan sähköä halutulle sähkövoimarakaiselle. Tuuliturbiinien tuotto on taas hyvin sidonnainen tuulen määrään ja turbiinien laajuuksien kokoon, minkä takia joukon mukana kuljettavien (ml. ajoneuvoilla kuljettavat) turbiinien koko jäisi niin pieneksi, että laitteiden käyttö ei toisi riittävää lisäarvoa.
	 Voimakoneen haitat (ääni, lämpöasteili, hyötysuhde, polttoainehuolto) ovat toki tarkastelemisen arvoisia asioita, mutta on myös hyvin vaikeaa löytää yhtä kustannustehokasta, kaikissa olosuhteissa käytettävää ja käyttövarmaa (ml. helppo huollettavuus) ratkaisua. Puolustusvoimien ajoneuvokalusto tulee myös säilyttämään varsin raskaan kaluston osalta hyvin pitkään polttomoottorikäyttöisenä, joten sähkön ottoa sähköajoneuvoista ei voi pitää kovinkaan suositeltavana ratkaisuna.
	Tehon tuotto ja kyky varautua kylmässä (-30c). Sovelluttava käyttöön sateessa ja pakkasessa.
	-TEG-elementit kamiinan kylkeen, Lämpötila -35 asteessa teltan ulkoseinän ja kamiinan kyljen välillä huomattava, muutenkin tarvitsee lämpöä tuottaa, niin varaisi samalla akkupankkeja. -Kylmänkestävyys. Aggregaatti toimii vielä jotenkin -35 asteen alapuolella, mikäli öljyt ovat hyvät. Lithiumin varauskyky kylmässä säässä putoaa murto-osaan, ja jossain kohtaa virranluovutuskyky 0. Samoin kuljetus ajoneuvolla ei monessakaan tapauksessa tarkoita lämmintä tilaa, vaan lavaa, takatilaa, perävaunua tai kattoa. -Roiskeidenpudottamisen kesto. Enemmän kuin todennäköistä kastella/pudottaa laite. -Huollettavuus kennosto. Hölmöä hylätä laite, kun yksi kennoista huonona. Eli jonkin tasoinen huollettavuus kennostolle. -Pakkosyöttötila; eli jos menee jokin oikosulku tila päälle tai sulkee virran syötön, saisi väkisin 12V virtaa
	Tempest- ja SHS-suojaus mahdollisesti operoitaessa häiriösuojatuissa tiloissa. Lisäksi ATEX-suojaus kannattaa huomioida. Myös sääolosuhteet kannattaa huomioida.
	Sen on oltava turvallinen ja käyttövarmat taistelutentillä (räjähdyksissä, tulipaloissa, sulkutiloissa sulun aikana (suojatila/raiväestönsuoja, ammuksen korkeatehoisissa ja suurenergisissä iskuissa/osumissa)) Nykypäivän akut, (esim. LiFePo4) ovat energiatihedeltään paljon edellä ljiijyjakkuja mutta ne eivät lataudu kylmässä. Sen vuoksi joko akut tulisi kytetä pitämään lämpimänä (tähän on kalvomaisia lämmityselementtejä olemassa) tai pitäytyä ljiijyjakkuissa. Laitteet vaativat katkotonta virransyöttöä, eli eri energialähteiden välillä vaihtamisen tai minkään muunkaan ei pitäisi vaikuttaa virransyöttöön ja sähkön laatuun edes millisekunti-luokissa. -Laitteen tulee kestää kolhuja, pudotusta, mitä tahansa suomalaisia sääoloja. Laitteen tulisi olla mahdollisimman huoltovapaa, ja sen ylläpito tulisi myös pitkäaikaisessa varastoinnissa olla sellaista ettei se sido henkilöstöä merkittävästi tai kuluta aikaa - jos se voidaan pitää kytkettynä ylläpitotilaukseen joka huolehtii akun/vast kunnosta automaattisesti niin parempi sillä tavalla. Jos laitteesta menee esim. liittimiä rikki käytön aikana, vaikka ne toki tulee olla suojattu potkulta jne, ne tulisi olla mahdollista vaihtaa esim komppania- tai jopa joukkue/ryhmätasolla. Myös rikkoutuneita osia-alueita voisi rajata pois ja tehdä virrattomaksi, ettei yksi vaurio poista koko laitetta käytöstä. -Laitteet tulisi voida suojata hyvin istuvin ja massana valmistettavien sirpalesuojapaneelien. Mitä enemmän laitteessa käytetään yleisesti saatavia komponentteja, se tuonee kustannuksia alas ja ennen kaikkea lisää huoltovarmuutta. Mahdollisimman vähän mitään sotilas-spesiifisiä tuotteita pl. ns. kenttäkelppoisuus. -Laitteeseen kytkettävillä kaapeleilla tulee olla kunnolliset vedonpoistomahdollisuudet, jotta sähkönsyöttö ei katkea eikä liittimet vaurioidu vedosta tai väntymisestä.
	säänkestävä, lämpötilojen vaihtelu sietävä, jatkuvaa siirtämistä ja kuormaamista kestävä, helppokäyttöinen
	PVTDK YL006, ohje siirrettävät sähkölaitteistot, edelleen.
	Lataus mahdollisuus ajoneuvosta 12V
	Sähkön saannin tulee olla varmaa. Koneen käytön ja käyttöjhuollon tulee olla yksinkertaista. Laite tulee olemaan sään armoilla, sen pitää kestää erilaista säätä ja kovia pakkasiakin. Kaikkia sähkölaitteita ei voi käyttää akulla tai paristoilla, voimakoneen on palveltava käytettäviä laitteita. Tästä syystä suuria huoltotaukoja ei saisi olla. Tästä esimerkkinä toimii bensatoiminen sähkövoimakone, sen käynnistyminen on varmaa kaikissa olosuhteissa ja sen tavanomaisin huolto vie koulutelta henkilöstöltä 15 - 30 minuuttia. Se tuottaa sähköä mikäli polttoainetta riittää, päivästä toiseen.
	 Se mikä puuttuu on keino varastoida sähköä kätevästi isommin. Yksittäisille laitteille on akkupankkeja, mutta pystyisikö tätä laajentamaan? Minkäkokoinen olisi esimerkiksi 100 000 Ah akkupankki ja kuin kauan se pystyisi sähköistämään yhden tietokoneen ja pari valoa sekä FM-radion?
	Akusto tulisi olla pitkäkestoinen ja turvallinen, esim LFP. Litiumioniakusto ei sovellu hyvin. Akuston kylmänkestävyys tulisi huomioida, lähtökohtaisesti sen tulisi olla käytettävissä myös pakkasella.
	Ehkä liiallisen koventamisen ja lujittamisen sijaan on syytä kiinnittää huomiota siihen, että kotelo liittimeen on riittävän luja, mutta kevyehkö ja edullinen. Tällaisella laitteella näkisin tärkeänä ominaisuutena sen, että se on soveltuva peruselektronikkaa ja näin mahdollisimman edullinen ilman turhaa mil std -lisiä. Vrt. powerbankit, joita varusmiehilläkin on laajasti käytössä maastossa, ajavat asiansa ja hajotessaan on edullista korvata uudella.
	Olemme itse tarkastelleet näkökulmaa keskitetyistä virtapankista, joita joukko saisi ladattuna käyttöönsä ja se soveltuisi laajan liitinmäärän osalta moniin eri laitteisiin virtalähteeksi tai pienien laitteiden käyttöön.
	 Huomioon kannattaa ottaa olosuhteet ja niiden vaikutus sähköntuotantoon, lataustoiminnan pitää sujua olosuhteissa kuin olosuhteissa.
	 Liikaa ei voi korostaa myöskään havaitsemaasi joukon kykyä siirtää ja kuljettaa eri järjestelmiä. On valittavaa, että pienikokoisilla vesi-, tuuli ja sähkövoimaloilla on tuotantokyky erittäin rajallinen, joka ei mahdollista joukon käytössä olevien virtalähteiden ja välineiden lataamista riittävän tehokkaasti.
	Paloturvallinen vaikka saisi iskuja tai kolhuja, eikä syttymisherkkä sirpaleistakaan (kuten LHÖN)
	Akustojärjestelmässä mielestäni vaihtoperiaate voisi olla toimiva, eli lataus keskitetyksi jossain, jonka jälkeen akkupaketti ryhmälle. Tämän akkupaketin on sisällettävä riittävästi virtaa vähintään vuorokauden tarpeisiin, mieluummin kahdenkin. Kommentoipaikkajärjestelmän on oltava latautuva (tuulivoima, aggregaatti, aurinkovoima,
	Yleiset sähköturvallisuusohjeet, litium akkujen käsittelyohjeet. Kierrätykseen liittyvät määräykset. Työturvallisuusmääräykset maastoharjoitteluun liittyen.
	Toimintalämpötila- ja kosteusvaatimukset arktisista oloista (Lappi talvella) kriiharkv-ops (aavikkorvidakko) -40C - +55 C ja 100% RH sekä nestemäisen veden sietokyky. Sekä latauslaitteiden että akustojen tulee kestää kenttäkäyttöä (jatkuvaa tärinää useita yksittäisiä kovia kolahduksia särkyttä ja liittostenliitettävyyden kärsimättä.

Liite 8. Energiajärjestelmän kytkentäkaavio

