

Juha Bilund

Hybridi-virranjakelujärjestelmä

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Insinöörityö
15.5.2011

Tekijä(t) Otsikko	Juha Bilund Hybridi-virranjakelujärjestelmä
Sivumäärä Aika	101 sivua + 2 liitettä 15.5.2011
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaaja(t)	System Development Manager Tero Toikka Lehtori Heikki Saarelainen
<p>Tässä insinöörityössä käydään läpi uusiutuvia energianlähteitä hyödyntävän hybridi-virranjakelujärjestelmän mitoitus, rajapinnat ja PLC-laitteen toiminta. Insinöörityö tehtiin Delta Energy Systemsille, joka tuottaa tehonlähteitä erilaisille laitteille. Uusiutuvan energian saralla Delta Energy Systemsin hybridi-virranjakelujärjestelmät ovat nopeasti kasvava tuote ja sen avulla voidaan toteuttaa ympäristöystävällinen ja kustannuksiltaan kilpailukykyinen järjestelmä.</p> <p>Teoriaosuudessa käydään läpi yksitellen erilaiset energianlähteet sekä niiden mitoitukseen tarvittavat kaavat Tutkimusosuudessa on keskitytty uusiutuvia energianlähteitä hyödyntävään hybridi-virranjakelujärjestelmään. Järjestelmää ohjaavalle järjestelmänvalvojalle suunniteltiin toiminnot ja mittaukset järjestelmän ohjaamiseksi. Toiminnot luotiin pääosin olemassa olevien toimintojen pohjalta ja tutustuttiin aikaisemman järjestelmänvalvojan käyttömahdollisuuksiin hybridijärjestelmässä.</p> <p>Suurimmaksi ongelmaksi uusiutuvien energianlähteiden käytössä muodostuu energiantuoton epäsäännöllisyys ja vuodenaikaisvaihtelut. Tätä varten täytyy etenkin järjestelmissä, joissa ei ole sähköverkkoa kytkettynä yhdeksi energianlähteeksi, järjestää suuri akkukapasiteetti energiavarastoksi tai vastaavasti generaattori. Oikein toteutettuna hybridi-virranjakelujärjestelmä pystyy kuitenkin toimimaan luotettavasti ja pidemmässä juoksussa myös edullisesti.</p>	
Avainsanat	Uusiutuva energia, PLC-laitteen toiminnot

Author(s) Title	Juha Bilund Hybrid power system
Number of Pages Date	101 pages + 2 appendices 15 May 2011
Degree	Bachelor in Engineer
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructor(s)	Tero Toikka, System Development Manager Heikki Saarelainen, Lecturer
<p>The main object of the thesis was study PLC-device's functions and dimensioning and interfaces of the renewable hybrid power system. Thesis was made for Delta Energy Systems that manufacturers power sources for different kind of devices. Renewable energy using power sources are environmentally friendly, economically competitive and because of that also rapidly growing business.</p> <p>Different energy sources and their equations are shown in own chapters but the main focus is renewable hybrid power system that is controlled by an admin. Admin's functions and measurement which the system uses to work were designed. The functions are mainly designed by using the old functions and studied the possibility to use old admin in hybrid power systems.</p> <p>The biggest problem of the renewable energy is the irregularity and seasonal variation in energy production. Because of that, especially in power systems which are not connected to a grid, the energy has to be restored into the large battery capacity or there has to be a generator. Well designed hybrid power system can still run reliably and in long run economically.</p>	
Keywords	Renewable energy, PLC-device's functions

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Hybridijärjestelmä	2
2.1	Hybridijärjestelmien luokittelu	3
2.1.1	Verkollinen hybridivirransyöttöjärjestelmä	3
2.1.2	Verkoton hybridi-virranjakelujärjestelmä	4
2.2	Hybridijärjestelmän huolto	6
2.3	Hybridijärjestelmän toiminta	7
2.3.1	Hybridijärjestelmän rakenne	8
2.3.2	Akkujen syklinen ja sykkitön käyttö	10
3	Akusto	11
3.1	Akkujen rakenne	11
3.2	Akun lataus ja purku	13
3.2.1	Akuston purkaminen	13
3.2.2	Akun varaaminen	13
3.3	Akuston tehtävä hybridi-virranjakelujärjestelmissä	17
3.4	Akuston kapasiteetin mitoitus ja laskeminen	18
4	Aurinkoenergia	26
4.1	Aurinkoenergian käyttö	26
4.2	Aurinkokennot	27
4.3	Auringonsäteilyllä sähköä	29
4.4	Aurinkokennon hyötysuhde	30
4.5	Auringonsäteily	31
4.6	Auringon säteilyn kerääminen paneeleilla.	39
4.7	Aurinkopaneelien kytkeytyminen järjestelmään	48
5	Tuulienergia	48
5.1	Tuulienergian käyttö	49

5.2	Modernit tuuliturbiinit	50
5.3	Tuulienergialla sähköä	51
5.4	Tuuliturbiinin kytkeytyminen järjestelmään	58
6	Generaattori	58
6.1	Generaattorin käyttö	59
6.2	Generaattorin mitoitus	60
6.3	Generaattorin kytkeytyminen järjestelmään	62
7	Hybridijärjestelmän mitoitus	62
7.1	Hybridijärjestelmän mitoittamiseen tarvittavat yhtälöt	62
7.2	Komponenttien mitoitus	74
7.2.1	AC-energianlähteet	74
7.2.2	Uusiutuvat energianlähteet	75
7.2.3	Järjestelmän kisko	76
7.2.4	Akkujohtimet	76
8	PLC-laitteet järjestelmänvalvojana	77
8.1	PLC-laitteen rakenne	77
8.2	Järjestelmänvalvojan käyttö hybridijärjestelmässä	78
8.3	Järjestelmänvalvojan funktiot ja mittaukset	79
8.4	Järjestelmänvalvojan alueet	80
8.4.1	Uusiutuvat energianlähteet	80
8.4.2	AC-tehonlähteet, ATS ja tasasuuntaajat	85
8.4.3	Tasasähköjakelu	92
8.4.4	Akusto	94
9	Yhteenveto	98
	Lähteet	101

Liitteet

Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.

Liite1. Keskimääräisiä ilmakehän ulkopuolella sijaitsevalle horisontaaliselle tasolle päivän aikana tulevan säteilyn määriä H'

Liite 2. Leveysaste ja vuodenaika –kertoimia, Suositeltu Julianin luku keskimääräisille kuukauden päville.

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä perehdytään hybridi-virranjakelujärjestelmän toimintaan. Energi-
anlähteinä toimii sähköverkko, generaattori, aurinkopaneelit ja tuulivoima. Lisäksi jär-
jestelmään kuuluu akusto, joka takaa katkeamattoman energiansyötön kuormalle.
Työssä esitellään erikseen jokaisen energianlähteen ja akuston mitoittaminen sekä jär-
jestelmänvalvojan eli PLC-laitteen toiminnot ja mittaukset.

Työ tehdään Delta Energy Systemsille, joka on yksi suurimpia virranjakelujärjestelmien
tuottajia maailman laajuisesti. Virranjakelujärjestelmät on tuettu akuin, jotka takaavat
kuormalle katkeamattoman energiansaannin. Tyypillisesti Delta Energy Systemsin jär-
jestelmiä käytetään syöttämään energiaa kriittisille kuormille, joiden ei ole sallittua kat-
keta. Esimerkiksi teleoperaattorit ja heidän *telecom* järjestelmät kuuluvat suurimpiin
asiakaskuntiin.

Uusiutuvien energianlähteiden hyödyntäminen energiantuotannossa on yleistynyt no-
peasti ja on nykypäivänä yksi nopeiten kehittyviä energiantuotantomenetelmiä. Uusi-
tuvien energianlähteiden käytön avulla voidaan saavuttaa pitkällä aikavälillä huomatta-
viakin säästöjä sekä päästä hyviin luotettavuuksiin virranjakelujärjestelmissä.

Etenkin aurinkoenergian käyttö maailmalla on lisääntynyt huomattavasti, jota pohjus-
taa parantuneet hyötysuhteet aurinkopaneelien saralla sekä kehittyneemmät keskitys-
järjestelmät. Tulevaisuudessa tekniikan kehittyessä ja tehokkaampien valmistusmetodi-
en ansiosta aurinkoenergialla tuotetusta energiasta tulee todella kilpailukykyinen mui-
den perinteisten energiantuotantomenetelmien kanssa.

Hybridi-virranjakelujärjestelmät ovat kaikkein parhaimmillaan sijainneissa, joihin sähkö-
verkon saaminen järjestelmään on mahdotonta tai todella kallista. Tällöin hybridijärjes-
telmän käyttö ja sen alkukustannukset ovat edullisia verrattuna pelkkään generaattori
käyttöön tai sähköverkon asentamista järjestelmään pitkillä kaapeleilla.

Suurimpana ongelmana uusiutuvien energianlähteiden käytössä on niiden energiantuo-
tannon epäsäännöllisyys ja vuodenaikaisvaihtelut. Järjestelmässä, jossa energiantuo-

tanto halutaan suorittaa kokonaan uusiutuvalla energialla, täytyy ylittää huipputehon tuotto kuorman tehontarpeeseen nähden ja käyttää suurta akustoa energianvarastointiin. Tällöin järjestelmän alkuinvestoinnit kasvavat ja osa energiasta voi jäädä käyttämättä edullisilla sääolosuhteilla.

2 Hybridijärjestelmä

Hybridi-virranjakelujärjestelmällä tarkoitetaan järjestelmää, joka pystyy syöttämään eri energianlähteistä kuormaa joko samanaikaisesti tai eri aikaan. Sanakirja.org määrittelee sanan *hybridi* yhden tai useamman asian risteymäksi. [1.]

Hybridijärjestelmän etuina voidaan pitää sen riippumattomuutta yhteen energianlähteeseen, jolloin voidaan saavuttaa todella korkeita luotettavuuksia. Tämä tarkoittaa, ettei yhden energianlähteen poistuminen käytöstä vaikuta koko järjestelmän toimintaan samalla tavalla kuin järjestelmässä, jossa syöttö tapahtuu vain yhdestä energianlähteestä. Mikäli järjestelmässä on useita energianlähteitä, on todennäköisyys pienempi, että kaikki energianlähteet ovat poissa käytöstä samanaikaisesti.

Mikäli hybridi-virranjakelujärjestelmässä käytetään uusiutuvia energianlähteitä hyväksi, voidaan pitkällä aikavälillä saavuttaa huomattaviakin säästöjä. Säästöjen syy on uusiutuvien energianlähteiden käytön ilmaisuus alkuinvestointien jälkeen. Nykyään uusiutuvien energianlähteiden alkuinvestoinnit ovat vielä suhteellisen kalliita. Tästä syystä uusiutuvan energian käyttämisessä on vielä kynnys etenkin, koska muulla tavalla tuotetun sähkön ostaminen yleisestä sähköverkosta on niin edullista.

Tulevaisuudessa todennäköisesti, kun uusiutuvan energian valjastamiseen käytettävät laitteet paranevat ja niiden valmistamisesta tulee parempien valmistusmetodien ansiosta halvempaa, on niiden käyttökynnys huomattavasti matalampi. Toisaalta, kun niiden käyttökynnys madaltuu, voidaan olettaa, että myös käyttäjien määrä nousee, ja valmistajia tulee enemmän. Tällöin saadaan alalle nykyistä suurempi kilpailu ja tätä kautta myös tuotteiden hinnat matalammaksi. Kun tuotteiden hinnat madaltuvat, tulee myös arvioidusta takaisinmaksuajasta lyhyempi, jolloin myös säästöjä ruvetaan saavuttamaan aikaisemmin. Uusiutuvien energianlähteiden alkuinvestointien laskiessa verrattu-

na muulla tavoin tuotetun energian hintatasoon nähden pienemmäksi, tulee uusiutuvien energianlähteiden käyttämisestä entistä houkuttelevampaa.

Yhtenä suurena syynä käyttää rahallisten hyötyjen lisäksi uusiutuvia energian lähteitä on niiden päästöttömyys. Valmistus-, kuljetus- ja asennusvaiheiden jälkeen uusiutuvat energianlähteet eivät tuota yhtään päästöjä. Todellisuudessa pieniä päästöjä ja kuluja syntyy kuitenkin myös uusiutuvien energianlähteiden valjastamiseen käytettyjen laitteiden huolto ja kunnossapito sekä akuston mahdolliset vaihdot.

Erilaisten päästösopimuksien myötä pyritään hillitsemään kasvihuonepäästöjä, jolloin uusiutuvilla energianlähteillä voidaan saavuttaa hyviä tuloksia energiataloudellisuuden parantamisen ja tuotannon vähentämisen ohella.

Maailman kokonaisenergian kulutus kasvaa vuosi vuodelta. Vielä nykyäänkin fossiilisten polttoaineiden avulla tuotettu energia pitää vahvaa asemaa maailman energianhuollossa. Jatkuva energiankulutuksen kasvu, sekä fossiilisten polttoaineiden käyttö ei voi pitkällä aikavälillä olla kestävä ratkaisu. Maapallon kyky kantaa tätä on rajallinen. Näihin ongelmiin täytyy keksiä ratkaisu, jotta modernin kaltainen maailma pystyy toimimaan. Nykymaailma tarvitsee energian saantia pitääkseen hyvinvointia yllä. Tähän tarkoitukseen uusiutuvat energianlähteet ovat hyviä ja tervetulleita, päästöttömiä ja niin kauan kuin aurinko tarjoaa säteilyä maapallolle, myös loppumattomia energiavaroja. [2, s. 10 - 11.]

2.1 Hybridijärjestelmien luokittelu

Hybridijärjestelmät on jaettu tässä työssä kahteen pääryhmään: verkollisiin ja verkottomiin järjestelmiin. Verkollinen järjestelmä tarkoittaa sellaista hybridijärjestelmää, jossa yhtenä energianlähteenä toimii yleinen sähköverkko. Verkoton järjestelmä puolestaan tarkoittaa sellaista hybridijärjestelmää, jossa verkkosyöttöä ei ole. Osa syynä tässä jaossa on verkon käyttövarmuuden ja tehonsaannin helppous.

2.1.1 Verkollinen hybridivirransyöttöjärjestelmä

Verkollisissa järjestelmissä voidaan verkkosyöttöä pitää jatkuvasti rinnan muiden energianlähteiden kanssa, jolloin muiden energianlähteiden tehontuotto voi katketa periaatteessa lopullisesti, eikä se vaikuta järjestelmän toimivuuteen tai toimintaan mitenkään

olettaen, ettei verkkosyötölle tule katkos. Esimerkiksi Suomessa sähköverkon katkosten aiemmin toteutunut määrä, ja sitä kautta oletettu sähkökatkosten määrä tulevaisuudessa, on todella pieni.

Verkollisissa järjestelmissä voidaan kuormansyöttö suorittaa pääasiassa verkolla, jonka lisäksi uusiutuva energianlähde syöttää rinnan osan tehosta, kun sääolosuhteet sen sallii. Tämänkaltaisissa järjestelmissä uusiutuva energianlähde voidaan mitoittaa periaatteessa kuinka pieneksi tahansa, sillä sen ei tarvitse kyetä syöttämään kuormaa yksinään.

Toisena toteutusvaihtoehtona verkollisissa järjestelmissä on käyttää uusiutuvia energianlähteitä pääasiallisena energianlähteenä, jota sähköverkko tukee ainoastaan tilanteissa, missä uusiutuva energianlähde ei pysty syöttämään kuormaa. Tämä edellyttää kuitenkin uusiutuvien energianlähteiden koon mitoituksen suuremmaksi kuorman tehontarpeen mukaan siten, että se pystyy oikeissa sääolosuhteissa syöttämään kuorman myös yksinään.

Verkollisissa järjestelmissä akuston rooli ja kokonaiskapasiteetti jää monissa tapauksissa hyvin pieneksi ja akuston käyttö syklittömäksi. Akuston sykliä käyttäen tarkoitetaan hybridijärjestelmissä sitä, että akusto pidetään koko ajan täyteen kapasiteettiin varattuna ja puretaan ainoastaan niissä tapauksissa, kun mikään energianlähde ei kykene syöttämään kuormaa. Hybridijärjestelmän ohjaus PLC-laitteella eli järjestelmänvalvojalalla on tässä työssä suunniteltu toimimaan monelta osin akuston mittauksien avulla, jolloin myös ohjauksen tarve jää verkottomia järjestelmiä pienemmäksi.

2.1.2 Verkoton hybridi-virranjakelujärjestelmä

Verkottomissa hybridijärjestelmissä on kaksi erityylistä toteutusvaihtoehtoa. Joko pyritään tuottamaan kuorman tarvitsema energia kokonaisuudessaan uusiutuvalla energialla tai vaihtoehtoisesti voidaan kokoajan käyttää generaattoria tai polttokennoa uusiutuvan energianlähteen kanssa rinnan.

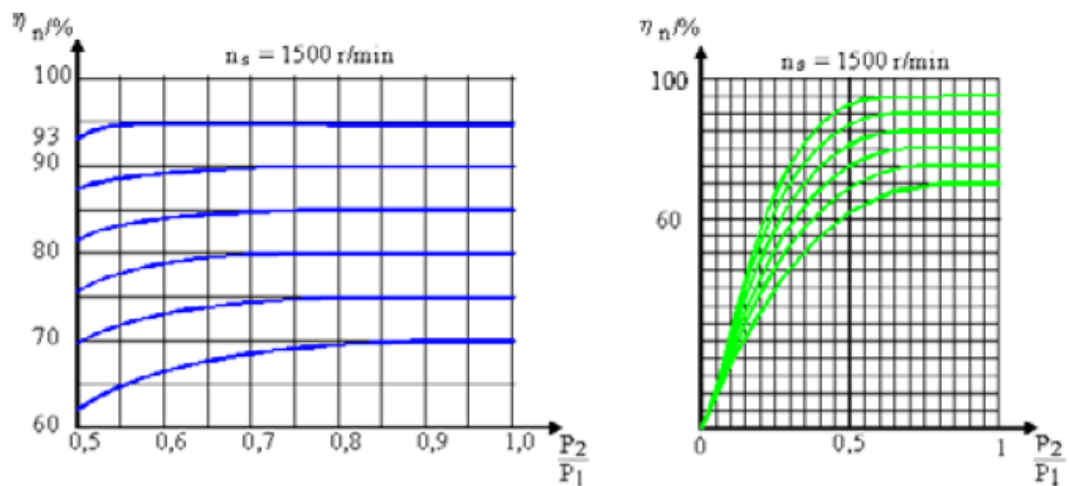
Mikäli uusiutuvalla energianlähteellä halutaan syöttää mahdollisimman suuri osuus koko kuorman tarvitsemasta energiasta, täytyy uusiutuva energianlähde mitoittaa huo-

mattavan suureksi ja akuston kokonaiskapasiteettia kasvattaa. Tarpeeksi suurilla mitoituksilla voidaan saavuttaa koko kuorman tarvitsema energia pelkillä uusiutuvilla energianlähteillä.

Pelkillä uusiutuvilla energianlähteillä kuorman syötön hoitavan hybridijärjestelmän mitoitus kannattaa mitoittaa siten, että se pystyy syöttämään kuorman tarvitseman tehon keskimääräisillä tuulenopeuksilla ja auringon säteilytunneilla sekä varavoiman eli generaattorin ja polttokennon polttoaineiden hintojen mukaan mahdollisesti jopa vähän suuremmaksikin. Mitä kalliimpaa varavoimalla tuotettu energia on, sitä enemmän keskiarvoisista arvoista kannattaa mitoittaa hybridijärjestelmä suuremmaksi. Todella äärimmäisiin ylimitoituksiin ei kannata kuitenkaan lähteä, sillä se tulee maksamaan todella paljon, ja ylimitoitusta tarvitaan vain äärimmäisen harvoin. Äärimmäisistä tilanteista esimerkkinä voisi olla tulivuorenpurkaus, jonka vuoksi pölypilvi estää auringonsäteilyn maahan monen kuukauden ajaksi lähes kokonaan tai meteoriittin osuminen maahan.

Vaihtoehtoisesti verkottomissa hybridijärjestelmissä voidaan uusiutuva energianlähde mitoittaa pienemmäksikin, mutta tämä edellyttää generaattorin tai polttokennon käyttöä jatkuvasti. Jos esimerkiksi generaattoria käytetään jatkuvasti rinnan uusiutuvien energianlähteiden kanssa osakuormalla, menee osa polttoaineen sisältämästä energiasta hukkaan, koska generaattorien hyötysuhteet tippuvat mentäessä nimelliskuormituksesta pienemmille osakuormituksille. Etenkin tilanteissa, joissa generaattorilla tarvitsee syöttää vain minimaalinen osuus kuorman tarvitsemasta tehonmäärästä, tippuu generaattorin hyötysuhde lähes nolnaan ja mekaaniset häviöt, sekä magnetointihäviöt suhteessa kuormalle syötettävään tehoon kasvavat. Kuvassa 1 (ks. seuraava sivu) on esimerkki hyötysuhteen muutoksesta kuormituksen funktiona.

Polttokennoissa tehon tuotto tapahtuu vakiona kennon kannalta katsoen. Yksi polttokennon kenno tuottaa polttoaineen riittäessä aina vakiomäärän tehoa. Mikäli kokonais-tehoa halutaan nostaa, täytyy syöttävien kennojen määrää nostaa. Vastaavasti kuormituksen tippuessa täytyy osa kennoista ottaa pois käytöstä ja katkaista polttoaineen syöttö niille, jottei polttoainetta menisi hukkaan.



Kuva 1. Generaattorien hyötysuhde erilaisilla kuormituksilla [3.]

2.2 Hybridijärjestelmän huolto

Myös hybridijärjestelmä, kuten kaikki muutkin järjestelmät vaativat huoltotoimenpiteitä. Aurinkokennoja täytyy puhdistaa pölystä, raivata kasvit niiden edestä, huoltaa tuuliturbiinit, täyttää generaattorin ja polttokennon polttoainevarastot, sekä akustoa täytyy vaihtaa riittävin väliajoin. Taloudellisesti etenkin uusiutuvia energianlähteitä kannattaa pitää hyvässä kunnossa, jotta ne pystyvät tuottamaan mahdollisimman paljon käytävästä tehosta, jolloin niiden korkeat alkuinvestoinnit saadaan katettua.

Mikäli järjestelmä sijaitsee paikassa, jonne on erittäin hankala ja/tai kallista päästä, kannattaa generaattorin ja polttokennon polttoainevarastot olla riittävän suuret, jotta järjestelmä pystyy toimimaan itsenäisesti mahdollisimman pitkiä aikoja. Mikäli järjestelmä pystyy toimimaan itsenäisesti, voidaan saavuttaa mahdollisesti huomattaviakin säästöjä. Säästöjä syntyy, kun hybridijärjestelmän luokse ei tarvitse lähettää ihmistä huoltamaan järjestelmää, jolloin matkakuluihin ja huoltajan rahalliseen korvaukseen ei kulu rahaa. Polttoainesäiliön kokoon vaikuttaa myös järjestelmän sähköverkon käytettävyys tai käyttämättömyys. Järjestelmissä, joissa sähköverkkoa ei ole saatavilla on todennäköisempää, että generaattoria tai polttokennoa tarvitaan enemmän, verrattuna järjestelmiin, joissa sähköverkko on kytketty järjestelmään.

Usein juuri hankalakulkuisiin paikkoihin, johon verkkosyötön saanti on joko todella kallista tai jopa mahdotonta, on uusiutuvia energianlähteitä hyödyntävä hybridijärjestelmä

kaikkein parhaimmillaan ja potentiaalisin vaihtoehto järjestelmistä. Tämänkaltaisissa järjestelmissä suurenkin uusiutuvia energianlähteitä hyödyntävän hybridijärjestelmän investoinnit voivat olla verrattain edullisia.

2.3 Hybridijärjestelmän toiminta

Kuorman kannalta hybridi-virranjakelujärjestelmä ei poikkea mitenkään muista virranjakelujärjestelmistä. Kuormalle täytyy saada jostain riittävä määrä energiaa. Hybridijärjestelmän kannalta energiansyötön ohjaus, niiden vaihtelut ja muu toiminta on sen sijaan hieman normaalia monimutkaisempaa.

Tässä työssä perehdytään hybridijärjestelmään, jossa energianlähteinä toimii sähköverkko, generaattori, tuulivoima, aurinkokennot ja akusto. Näistä ainoana poikkeaa akusto, joka ei varsinaisesti tuota missään vaiheessa energiaa vaan toimii väliaikaisena energiavarastona, joka pystyy purkamaan kuormalle jo kertaalleen tuotettua energiaa kapasiteetistaan. Järjestelmänä on tasasähköjärjestelmä, jota voidaan muuttaa tarvittaessa pienillä säädöillä 24 Vdc-, 48 Vdc- ja 60 Vdc- järjestelmiksi.

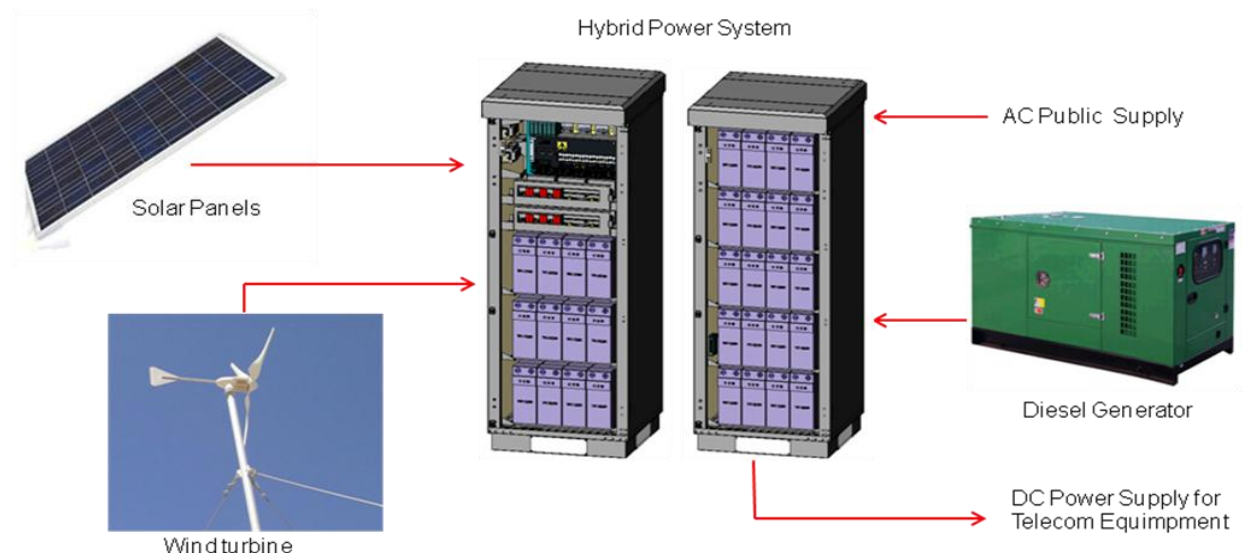
Järjestelmän jännitealueet muodostuvat akkukennojen määrästä ja kuorman vaatimasta jännitetasosta. Akkukennoja voidaan kytkeä sarjaan, jolloin niiden jännite summautuu. Esimerkiksi 48 V:n järjestelmässä käytetään 24 sarjaan kytkettyä 2 V:n nimellijännitteistä kennoa. Akun kennojen jännitetasot vaihtelevat varaustason mukaan, sekä akun lataus suoritetaan korkeammilla jännitteillä, kun akun kelluntajännite on täydessä varauksessa. Näistä syistä 48 V:n nimellijännitteisen järjestelmän jännitetaso voi vaihdella 40 - 60 V:n. Kuormalta vaaditaan tällöin myös kykyä pystyä toimimaan tällä jännitevälillä.

Yleisempänä järjestelmänä Delta Energy Systemsin tekemissä virransyöttöjärjestelmissä on 48 V:n tasasähköjärjestelmä, joka on plusmaadoitettu, eli potentiaali on tällöin -48 Vdc. Järjestelmissä voidaan tarvittaessa myös muuttaa tasasähköä invertterien avulla vaihtosähköksi, mikäli on tarvetta. Jos vaihtosähkö otetaan järjestelmän kautta, eikä suoraan verkosta, saadaan myös vaihtosähkösyötölle varmistus. Tällöin järjestelmä toimii UPS järjestelmänä vaihtosähkölaitteelle. UPS tulee sanoista *uninterruptible power*

supply, joka tarkoittaa katkeamatonta tehonsyöttöä, eli käytännössä esimerkiksi akustoja.

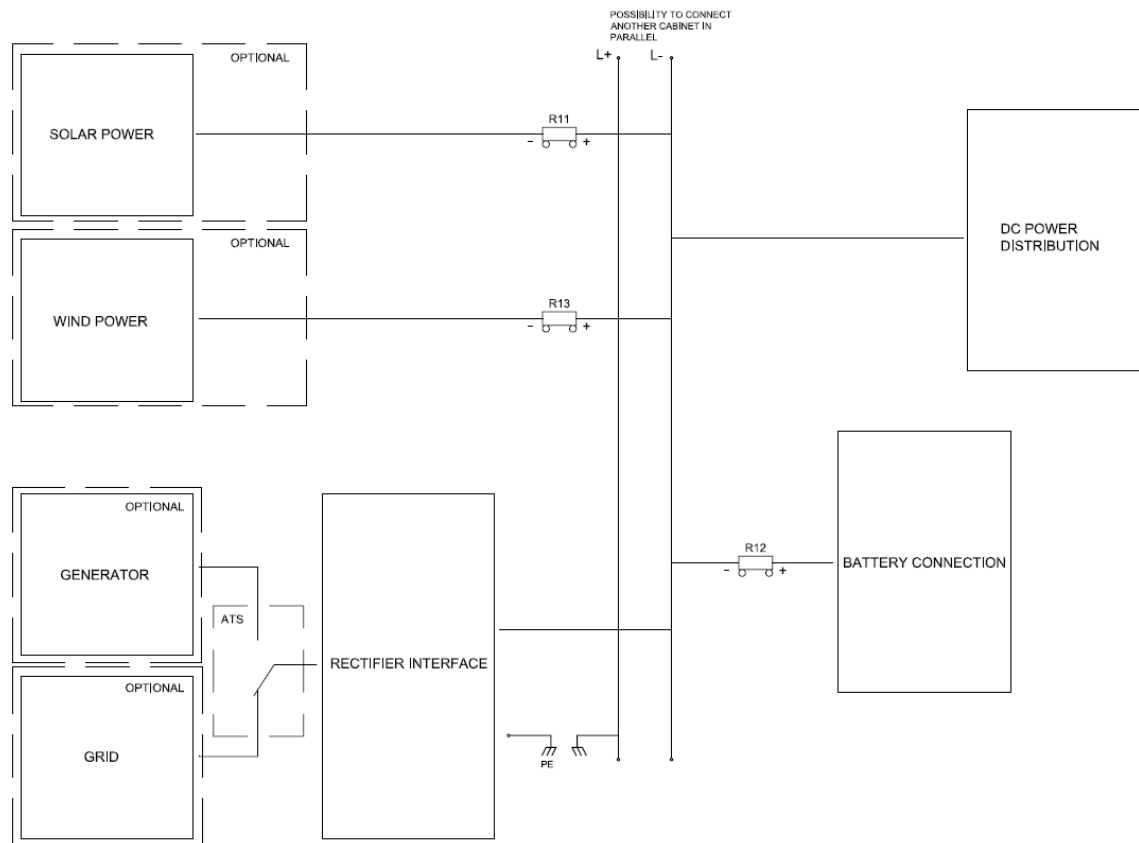
2.3.1 Hybridijärjestelmän rakenne

Hybridijärjestelmään voi kuulua edellä mainituista energianlähteistä kaikki tai vain osa niistä. Hybridijärjestelmän sijainti vaikuttaa siihen, mitä energianlähteitä kannattaa käyttää. Keskiarvallisesti kovatuulisissa paikoissa kannattaa käyttää tuulienergiaa sekä paikoissa, joissa aurinko paistaa ympäri vuoden tehokkaasti useita tunteja vuorokaudessa, kannattaa puolestaan käyttää aurinkoenergiaa. Vaihtoehdot eivät sulje pois toisiaan, vaan tietyissä paikoissa voi olla täysin perusteltua käyttää molempia uusiutuvia energianlähteitä.



Kuva 2. Hybridijärjestelmän rakenne [4.]

Tehon tuotto voidaan suorittaa fyysisesti eri paikassa, josta se johdetaan hybridijärjestelmälle. Pitkillä siirtomatkoilla tehoa kuluu johtimien häviöihin. Myös suuria määriä tehoa siirrettäessä joudutaan käyttämään paksuja johtimia, jolloin niistä tulee lisähintaa järjestelmään. Etuna puolestaan voi olla asutuksen lähellä sijaitsevan hybridijärjestelmän tehon tuottaminen kauempana, jotta säästytään tuulivoiman meluhaitoista, sekä esteettisyys säilyy.



Kuva 3. Hybridijärjestelmän pääpiirikaavio [4.]

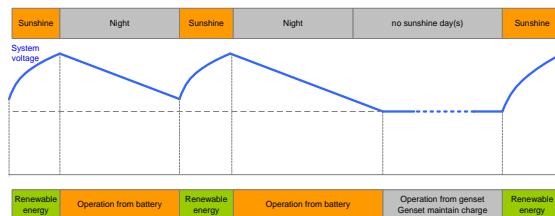
Aurinkopaneeleita käytettäessä joudutaan yön aikana käyttämään varavoimalähdettä tai akustoa, koska voidaan olettaa, ettei yön aikana aurinkopaneeleilla saada tuotettua energiaa. Tällöin tulee joko todella suuri akkukapasiteetti tai pitkiä polttoaineen poltto-aikoja. Suuri akkukapasiteetti puolestaan johtaa siihen, että myös uusiutuva lähde täytyy mitoittaa niin suureksi, että se pystyy päivän aikana lataamaan akuston.

Tuulienergian käyttö sen sijaan ei rajoitu pelkästään valoisiin aikoihin, vaan teoriassa tehontuotto voi olla katkeamatonta hyvinkin pitkiä aikoja. Tuulienergian käytössä tuulen nopeus täytyy olla korkea, jotta saataisiin huomattavia tehomääriä tuotettua. Käytännössä tämä tarkoittaa korkeita torneja ja pitkiä esteettömiä alueita. Korkeammalla tuulen nopeudet saavuttavat korkeampia nopeuksia, koska maanpinnan erilaiset esteet eivät pääse estämään ilmapinnan liikettä. Tästä syystä myös merenrannoilla tuuli pääsee keräämään nopeutta ja siellä tuulee keskimääräisesti hyvin paljon. Tasasähköjärjestelmässä tuulivoiman hyötysuhdetta laskee konvertterin käyttö jolla vaihtosähkö saadaan muutettua tasasähköksi.

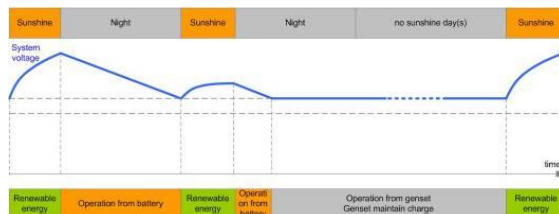
Uusiutuvia energianlähteitä käyttävän hybridijärjestelmän laitteita ja mitoitusta arvioitaessa, voidaan käyttää erilaisia auringonsäteily- ja tuulennopeus -logeja. Näistä otetut arvot vastaavat todennäköisesti ainakin suurin piirtein myös tulevia olosuhteita. Esimerkiksi NASA ja suomalainen Ilmatieteen laitos ovat keränneet jo vuosia tietoa sääolosuhteista. Aikaisemmin olleet sääolosuhteet eivät poikkea luultavasti tulevista olosuhteista paljoa, jolloin voidaan laskea tietyssä ajassa todennäköisesti saatava tehon määrä. [5.]

2.3.2 Akkujen syklinen ja sykliön käyttö

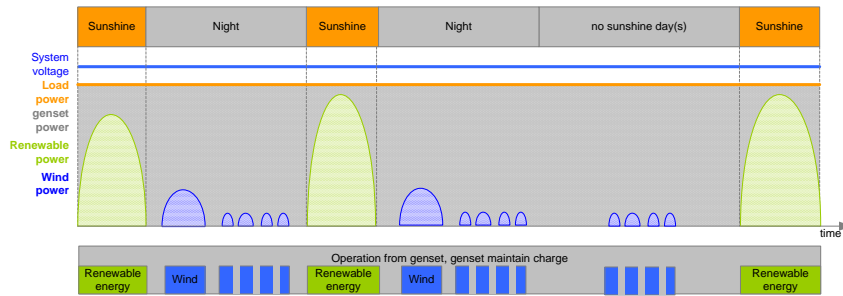
Akkujen syklinen käyttö aurinkoenergiaa käytettäessä havainnollistetaan kuvissa 4 ja 5. Päivällä aurinkoenergialla tuotetaan kuorman energiantarve, sekä ladataan akustoa. Yön aikana akustosta puretaan päivällä varastoitua energiaa, ja mikäli akuston varastointikapasiteetti ei riitä yön ajaksi tai tulee pilvinen päivä, käytetään generaattoria. Generaattorilla ei suoriteta akuston latausta ollenkaan, vaan akusto pidetään purettuna seuraavaan aurinkoiseen päivään asti, jolloin aurinkopaneelien avulla tuotettu energia saadaan paremmin käytettyä varastoimalla kuorman energiantarpeen yli tuotettu energia akustoon.



Kuva 4. Syklinen käyttö 1 [4.]



Kuva 5. Syklinen käyttö 2 [4.]



Kuva 6. Syklitön käyttö [4.]

Kuvassa 6 on esitetty syklitön käyttö, jolloin uusiutuvan lähteen kanssa toimii jatkuvasti generaattori, eikä akkujen käyttö ole syklistä. Mikäli järjestelmä olisi verkollinen, voitaisiin generaattori korvata verkkosyötöllä, joka on usein generaattorilla tuotettua tehoa halvempaa. Syklittömän käytön etuna on akkujen kapasiteetin pienuus. Koska akkuja ei tarvita syöttämään pitkiä aikoja, voi niiden kokonaiskapasiteetti olla huomattavasti pienempi, eikä akkujen ominaisuuksiin tarvitse välttämättä kuulua useiden purkukertojen kestävyyttä. Tällöin alkuinvestoinnit tulevat halvemmaksi. Tämänkaltaisissa järjestelmissä akkujen rooli on syöttää kuorma vain tilanteissa, joissa generaattorin syöttö syystä tai toisesta katkeaa.

3 Akusto

Akku on laite, johon voidaan varastoida energiaa. Akkuja on kahta päätyyppiä: sekundäärisiä- ja primäärisiä sähköpareja. Sekundääriset sähköparit voivat sitoa ja luovuttaa elektroneja riippuen jännitteen suunnasta. Primääriset sähköparit puolestaan toimivat ainoastaan toiseen suuntaan, eikä niitä voi uudelleen varata. Näitä kutsutaan paristoiksi. [6, s. 1.]

Akkuja voidaan kytkeä sarjaan, jolloin kennojen yhteisjännite kasvaa. Liittämällä akkuja sarjaan voidaan niiden jännitetaso nostaa halutulle tasolle, järjestelmään sopivaksi. Akkujen rinnankytkentä puolestaan nostaa niiden luomaa kokonaiskapasiteettia Q [Ah].

3.1 Akkujen rakenne

Akut koostuvat positiivisesta ja negatiivisesta elektrodista sekä niiden välissä olevasta elektrolyytistä. Monesti akuissa käytetään vielä elektrodien välissä erotinta, joka estää näiden kahden elektrodin koskettamisen. Jos elektrodit koskettavat toisiaan, ovat ne oikosulussa.

Negatiivisella elektrodilla käytetään usein metallia, joka omaa hyvän sähkönjohtamis-
kyvyn ja positiivisella elektrodilla käytetään metallioksidia, jolla on hyvä kemiallinen
pysyvyys, ja jonka sähkökemiallinen potentiaali on mahdollisimman korkea.

Elektrolyytti on usein akussa nestemäisessä olomuodossa, suolan, hapon tai emäksen
liuos. Nykyaikaisissa akuissa ionijohde on voitu myös imeytyttää geelimäiseksi tai elekt-
rodien väliin laitettavaan kiinteään aineeseen. Elektrolyytillä tulee olla hyvä ioninen
sähkönjohtavuus ja lisäksi sen ominaisuudet tulisi pysyä mahdollisimman vakiona eri-
laisissa lämpötiloissa.

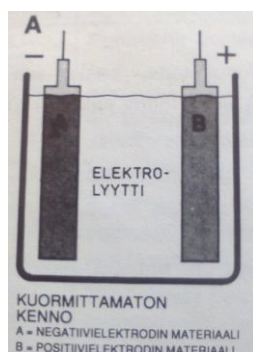
Yksittäinen akku voi koostua monesta sarjaan kytketystä yksittäisestä kennosta. Ken-
not kytketään sarjaan, jolloin kennojen jännitteet voidaan summata yhteen. Sarjaan
kytkentä nostaa kokonaisjännitettä, siten että esimerkiksi 6 kappaletta 2 V:n kennoa
kytkettynä sarjaan, muodostaa yhden 12 V:n akun. Akun jännite voidaan laskea yhtä-
löllä 1 kennojen lukumäärän ja yhden kennon jännitteen avulla. [6, s. 2 - 7; 7 ; 8, s.
1.3 - 1.6.]

$$U_{\text{Batt.}} = U_{\text{cell}} * n_{\text{cell}} \quad (1)$$

$U_{\text{Batt.}}$ on akun jännite [V]

U_{cell} on Yksittäisen kennon jännite [V]

n_{cell} on Sarjaan kytkettyjen kennojen lukumäärä



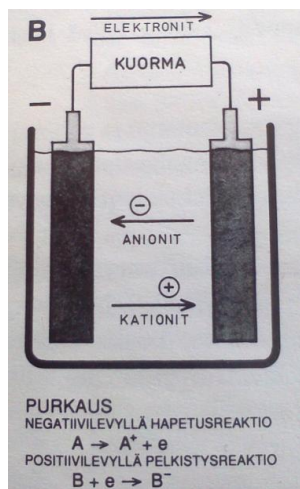
Kuva 8. Akun rakenne [6, s. 3.]

3.2 Akun lataus ja purku

3.2.1 Akuston purkaminen

Akun purkautuessa negatiivinen elektrodi luovuttaa elektroneja ulkoiseen piiriin ja hapettuu. Positiivinen elektrodi puolestaan vastaanottaa elektroneja kuorman jälkeen ulkoisesta piiristä ja pelkistyy. Sähkö kulkee kennon sisällä elektrolyytin ionien välityksellä. Purettaessa akkua negatiiviset ionit, anionit, kulkevat negatiivilevylle ja positiiviset ionit, eli kationit kulkevat positiivilevylle.

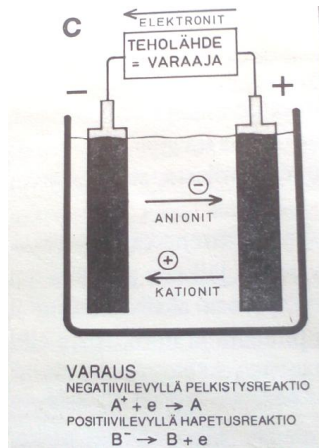
Akkua purettaessa elektrodien välinen potentiaaliero eli jännite laskee. Jännitteen laskun suuruus ja nopeus riippuvat purkuvirran suuruudesta, lämpötilasta, elektrodien rakenteesta ja asemasta kennossa. [6, s. 3.]



Kuva (9.) Akun purkaminen [6, s. 3.]

3.2.2 Akun varaaminen

Akkua varatessa siihen syötetään ulkoisesta piiristä virtaa. Positiivisessa elektrodissa tapahtuu hapetusreaktio, ja elektrodi luovuttaa elektroneja ulkoiseen virtapiiriin. Negatiivisella elektrodilla tapahtuu pelkistymisreaktio, ja elektrodi ottaa vastaan elektroneja. [6, s. 4.]



Kuva (10.) Akun varaaminen [6, s. 3.]

Etenkin verkottomissa hybridijärjestelmissä täytyy akuston uudelleenvaraus olla mahdollisimman nopea. Jos akusto saadaan varattua nopeasti, se on suuremman osan kokonaisuudesta käyttövalmiina. Jotta varaus saataisiin tehtyä mahdollisimman nopeasti, käytetään niin kutsuttua *boost charge* -jännitetasoa. Käytännössä tämä tarkoittaa normaalia korkeampaa latausjännitettä, jolloin myös akustolle kulkevan virran määrä on suurempi.

Nopeamman latauksen lisäksi korkeammalla latausjännitteellä saadaan akusto varattua tasaisemmin. Järjestelmissä, joissa akkuja laitetaan sarjaan, saadaan jokaiselle akulle samansuuruinen varaus paremmin toteutettua kun latausjännite on korkea. Sarjaan kytketyt akut tiputtavat loppupään jännitettä vähäisiä määriä, akun sisäisen vastuksen takia. [6, s. 4; 7.]

Jännite-eron vaikutus virran suuruuteen voidaan laskea yhtälöllä 2, jossa esitellään Ohmin laki:

$$U = R \cdot I \quad (2)$$

U on jännite [V]

R on vastus [Ω]

I on virta [A]

Yhtälö voidaan kirjoittaa muotoon:

$$I = \frac{U}{R} \quad (2)$$

johon jännitteen paikalle voidaan laittaa järjestelmän ja akkukennojen välinen jännite. Vastuksen R arvoksi laitetaan järjestelmän ja akuston välillä oleva resistanssi ja akuston sisäinen vastus summattuna.

Järjestelmässä käytettävän *boost charge* -jännitetaso voidaan valita akun tyyppin ja valmistajan antamien ohjeiden mukaisesti. Esimerkiksi, mikäli järjestelmään valitaan Energys 12 OPzV 1200 -geeliakkuja, voidaan taulukosta 1 lukea suositellut *boost charge* -jännitetasot erilaisilla lämpötiloilla. [7.]

Taulukko 1. Lämpötilan vaikutus latausjännitteeseen [7.]

Temperature (Celsius)	Recharge voltage per cell (V)
0	2,45
10	2,43
20	2,4
30	2,37
35	2,35

Nyt voidaan laskea kyseiselle akulle suositettu *boost charge* -jännitetaso yhtälön 3 avulla, esimerkiksi 48 V:n hybridijärjestelmässä:

$$U_{\text{batt.recharge}} = U_{\text{cell.recharge}} * n_{\text{cell}} \quad (3)$$

$U_{\text{batt.recharge}}$ on Akun latausjännite [V]

$U_{\text{cell.recharge}}$ on yhdelle kennolle suositeltu latausjännitetaso [V]

n_{cell} on sarjaankytkettyjen kennojen lukumäärä

Mikäli lämpötila on 20 °C, voidaan taulukosta 1 (ks. edellinen sivu) lukea, että kyseiselle akulle suositetaan 2,4 V/kenno latausjännitettä. Tällöin järjestelmän jännitetasoksi tulee:

$$U_{\text{batt.recharge}} = 2,4 \text{ V} * 24 = 57,6 \text{ V} \quad (3)$$

Boost charge -jännitetasoa ei suositeta pitämään liian pitkiä aikoja yllä, sillä se heikentää akuston elinikää. Myös suositetut latausajat voidaan akun tyypistä ja valmistajasta riippuen mitoittaa. Esimerkki 12 OPzV 1200 -akuilla kyseinen aika on 24 tuntia, minkä jälkeen jännitetasoa tulisi laskea tai vastaavasti irrottaa akusto järjestelmästä. Akustoa tarvitaan hybridijärjestelmässä estämään kuorman energiansaannin katkeaminen, jolloin akustoa ei voida irrottaa, vaan ainoaksi vaihtoehdoiksi jää laskea jännitettä. [7.]

Akuston nopeassa lataamisessa tulee ottaa huomioon myös järjestelmässä käytetyn akun virtakestoisuus. Virtakestoisuus voi vaihdella erityyppisten akkujen ja akun valmistajien mukaan huomattaviakin määriä. Tätä varten täytyy kussakin tapauksessa lukea valmistajan antamat latausvirtasuositukset ja rajoittaa latausvirtaa niiden mukaisesti. Akun lataamiseen voidaan käyttää erillistä akunlataajaa, joka valitaan käytettävän akun mukaan sopivaksi tai vastaavasti, mikäli lataajaan voidaan antaa maksimi ulosantovirta, voidaan valmistajan ohjeiden mukaisesti asetella suurin sallittu latausvirta lataajalle.

Tässä järjestelmässä akulle ei käytetä erillistä lataajaa, vaan järjestelmä itsessään toimii lataajana järjestelmänvalvojan avulla. Järjestelmänvalvojalla saadaan latausvirta mitattua järjestelmäkiskon ja akuston väliin laitettavan mittausvastuksen yli, josta järjestelmänvalvojalle saadaan järjestelmän ja akuston välinen jännite. Lisäksi jännitetiedon lisäksi järjestelmänvalvojalle tarvitaan vielä mittausvastuksen suuruus. Mittausvastuksen valinnassa tulee ottaa huomioon, että vastuksen arvo ei muutu lämpötilojen vaihdellessa, vaan on lämpötilariippumaton. Kun järjestelmän valvojalle saadaan nämä kaksi tietoa, voidaan yhtälön 2 avulla laskea vastuksen läpi kulkeva virta. Virran suuruutta pystytään kontrolloimaan jännitettä muutettaessa. Mitä suurempi potentiaaliero järjestelmän ja akuston välillä on, sitä suurempi virta kulkee.

Nyt järjestelmän valvojalle voidaan antaa sallitun maksimilatausvirran suuruus, jota voidaan rajoittaa nostamalla järjestelmän jännitettä lähemmäksi akuston jännitetasoa. Akuston jännite nousee varaustason kasvaessa joka tarkoittaa, että järjestelmänvalvojan täytyy nostaa järjestelmän jännitettä pikkuhiljaa ylöspäin akuston latautuessa. Mitä suuremman jännitteen suunnasta saadaan tieto puretaanko vai ladataanko akustoa. Jos akustossa on korkeampi jännite kuin järjestelmässä, akkuja puretaan ja vastaavasti jos järjestelmässä on korkeampi jännite, akkuja ladataan. [7.]

3.3 Akuston tehtävä hybridi-virranjakelujärjestelmissä

Akuston tehtäviin kuuluu hybridi-virranjakelujärjestelmässä toimia väliaikaisena energianlähteenä kuormalle. Akuston avulla voidaan taata kuormalle katkeamaton virransyöttö energianlähdettä vaihdettaessa tai verkottomissa järjestelmissä mahdollisesti koko yön yli. Akuston avulla voidaan pienikestoiset tehopiikit ja jännitteen alenemat korjata. Akkujen toiminta tapahtuu viiveettömästi. Esimerkiksi vaihtosähkölähteiden ja järjestelmän välissä olevat tasasuuntaajat reagoivat kuorman muutoksiin pienellä viiveellä, jonka aikana akuston pystyy pitämään kuorman kokonaan syötettynä.

Verkottomissa hybridijärjestelmissä akustoa käytetään todennäköisesti verkollisia järjestelmiä huomattavasti enemmän. Koska niiden rooli järjestelmän toiminnassa kasvaa, täytyy akuston valintaan kiinnittää erityistä huomiota.

Akuston täytyy verkottomissa järjestelmissä kestää useita purku- ja latauskertoja vahingoittumatta ja menettämättä paljoa kykyä varautua uudelleen. Lisäksi akustolta vaaditaan pitkäikäisyyttä, vähäistä itsepurkautumista, alhaisen purkutason sietävyyttä, korkeaa varaushyötysuhdetta ja vähäistä huollontarvetta.

Hybridijärjestelmissä akun elinikään vaikuttavia seikkoja, joita täytyy ottaa huomioon ovat seuraavat:

- Korkean latausjännitteen latauksessa aiheuttaa veden haihtumista ja korroosiota.
- Matala jännite purkaessa aiheuttaa korroosiota.

- Syväpurkaus aiheuttaa sulfatoitumista (rikki-happoyhdisteen) muodostumista akkukennoihin ja akkulevyihin.
- Pitkäaika ilman täyttä latausta aiheuttaa sulfatoitumista.
- Korkea lämpötila nopeuttaa akun vanhenemista.
- Stratifikaatio eli elektrolyytin kerrostuminen, joka aiheuttaa akun sisäisiä vuoto-
virtoja ja akun vanhenemista.

Liian pienet latausvirrat aiheuttavat stratifikaatiota ja sulfaatin muodostumista akkulevyihin. [9.]

Hybridijärjestelmissä voidaan käyttää perinteisten avonaisrakenteisten akkujen tilalla suljettuja akkuja. Suljetuissa akuissa rakenne on suljettu, eikä akkunestettä pääse haihtumaan samalla tavalla akun sisältä kuin vapaissa akuissa. Ainoa tilanne, jossa akusta poistuu nestettä on, kun liian suurilla latausjännitteillä akun sisäinen paine kasvaa liian suureksi ja akun ylipaineventtiilistä puretaan painetta eli vapautetaan kaasua. Suljetuissa akuissa elektrolyyttinä voi toimia elektrodien väliin laitettava hienokuituinen lasivillamatto, johon rikkihappo imeytetään tai vastaavasti geeli, jossa rikkihappo on imeytetty piioksidin. [6, s. 27 - 28.]

Suljettujen akkujen edut hybridijärjestelmässä verrattuna avonaisiin akkuihin ovat seuraavat:

- Akkuihin ei tarvitse lisätä vettä.
- Akuista ei valu happoa.
- Akut voidaan sijoittaa pystyyn ja kyljelleen. [6, s. 29.]

3.4 Akuston kapasiteetin mitoitus ja laskeminen

Akuston kokonaiskapasiteetin laskeminen tapahtuu halutun akuston avulla ylläpidettävän ajan perusteella ja kuorman tehontarpeella.

Akuista purettavan energian määrä kuorman syöttöön lasketaan kuorman tehontarpeen ja akkujen syöttöajan mukaan yhtälön 4 mukaisesti:

$$W_{\text{batt.tot.}} = P_{\text{load}} * t_{\text{backup}} \quad (4)$$

$W_{\text{batt.tot.}}$ on akuista kulutettu energia [Wh]

P_{load} on kuorman tarvitsema teho [W]

t_{backup} on akkujen purkuaika [h]

Nyt tiedetään akuille vaadittava $W_{\text{batt.tot.}}$ [Wh], josta voidaan laskea akkujen kapasiteetti $Q_{\text{batt.}}$ [Ah] yhtälöllä 6. Akkujen kapasiteetti voidaan laskea jakamalla $W_{\text{batt.tot.}}$ akkujen jännitteellä, koska P_{load} lasketaan tehon yhtälön 5 mukaisesti:

$$P_{\text{load}} = I_{\text{load}} * U_{\text{load}} \quad (5)$$

P_{load} on kuorman tarvitsema teho [W]

I_{load} on kuormalle menevä virta [A]

U_{load} on kuorman jännite [V]

jolloin jakamalla $W_{\text{batt.tot.}}$ akkujen jännitteellä saadaan, koska akkujen jännite on sama kuin kuorman jännite:

$$Q_{\text{batt.}} = \frac{W_{\text{batt.tot.}}}{U_{\text{batt.}}} = I_{\text{load}} * t_{\text{backup}} \quad (6)$$

$Q_{\text{batt.}}$ on akuille vaadittava kapasiteetti [Ah]

$W_{\text{batt.tot.}}$ on akuista kuormalle purettava energia [Wh]

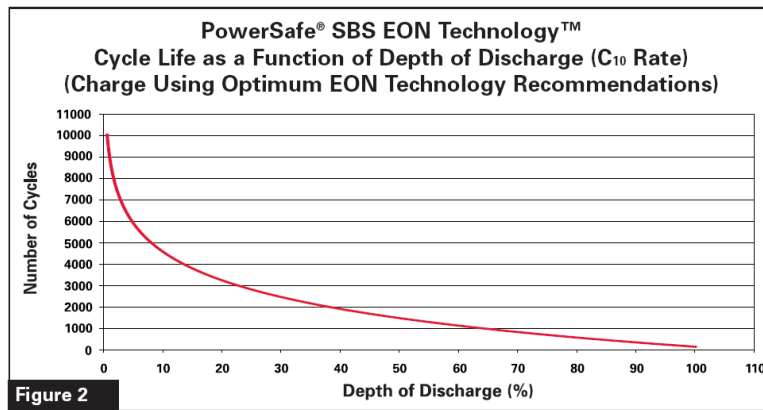
$U_{\text{batt.}}$ on akkujen jännite purettaessa [V]

$U_{\text{batt.}}$ jännitetaso laskee purettaessa akkuja. Tästä syystä saadakseen saman tehon määrän akuista kuormalle jännitteen tippuessa täytyy virran määrän olla suurempi. Näin ollen akkuja puretaan nopeammin akun tyhjentyessä ja jännitetason laskiessa. Riippuen akun jännitetason ja purkutason luomasta purkautumiskäyrästä valitaan keskiarvolinen jännitteen arvo, jolloin akuston kokonaiskapasiteetista tulee realistisempi. Mitä pienempi jännitteenarvo yhtälöön 6 laitetaan, sitä suurempi vaadittavasta kokonaiska-

pasiteetista tulee. Jos halutaan, että akuston kapasiteetti riittää varmasti, voi U_{batt} jännitteeksi valita jopa täysin puretun akun jännitetaso.

Koska akku menettää kykyään varastoida energiaa ajan kuluessa, pieni ylimitoitus akuston kapasiteetissa ei haittaa vaan siitä saavutetaan hyötyä ja varmuutta järjestelmään, koska ajan kuluessa kapasiteetin arvo lähestyy tarvittavan kapasiteetin määrää. Lisäksi akun oletettu elinikä pysyy korkeampana mitä vähemmän sitä syväpuretaan. [7; 6, s. 32.]

Kuvassa 11. (ks. s. 20) esitellään esimerkkinä yhden akun oletettu elinikä syväpurkauksen syvyyden funktiona.



Kuva 11. Akkujen syväpurkauksen syvyyden vaikutus oletettuun elinikään [7.]

Akuston syväpurkauksen välttämiseksi voidaan järjestelmä mitoittaa siten, että akuston kapasiteetista puretaan vain osa. Tällöin kokonaiskapasiteetti kasvaa ja järjestelmän alkukustannukset kasvavat, mutta pitkällä aikavälillä kapasiteetin kasvattaminen tulee halvemmaksi, kuin vaihtaa pienemmän kokonaiskapasiteetin omaavaan järjestelmään akkuja tiheämpään tahtiin.

Nyt U_{batt} arvoksi voidaan valita valitun purkutason ja täyden akuston jännitetason purkukäyrän avulla sopiva jännitetaso, jolloin kapasiteetin mitoituksesta saadaan oikea tai vastaavasti valitun purkaustason jännitetaso.

Akuston purkautumistason ja keskimäärin saavutettavan lataustason avulla voidaan laskea akustolle tarvittavien rinnankytkettyjen akkujen määrä $n_{\text{batt.quantity}}$ yhtälöllä 7:

$$n_{\text{batt.quantity}} = \frac{Q_{\text{batt.}}}{Q_{\text{per.batt.}} * \eta_{\text{batt.discharge}} * (q_{\text{recharge.ave}} - q_{\text{discharge.depth}})} \quad (7)$$

$n_{\text{batt.quantity}}$ on akkujen lukumäärä rinnan

$Q_{\text{batt.}}$ on akuille vaadittu kapasiteetti [Ah]

$q_{\text{recharge.ave.}}$ on keskimäärin saavutettu lataustaso [%]

$q_{\text{discharge.depth}}$ on akuille sallittu purkauksen syvyys [%]

$Q_{\text{per.batt.}}$ on yhden akun tai sarjaankytkettyjen akkujen kapasiteetti [Ah]

$\eta_{\text{batt.discharge}}$ on akkujen hyötysuhde puretaessa [%]

Esimerkiksi järjestelmä, jossa energiantuotto kuormalle toteutetaan auringon säteilyn avulla, halutaan yön ajaksi mitoittaa akusto. Kuorman tarvitsema teho P_{load} on 5kW ja epäedullisempänä aikana auringon avulla tuotettuun tehoon, auringonsäteily kykenee syöttämään kuorman 5 h vuorokaudesta. Tällöin akkujen täytyy kyetä syöttämään kuormaa:

$$24 \text{ h} - 5 \text{ h} = 19 \text{ h}$$

Kuorma tarvitsee siis akuilta energiaa 19 tunnin ajan 5 kW, jolloin akuista purettu energia on:

$$W_{\text{batt.tot.}} = 19 \text{ h} * 5 \text{ kW} = 95 \text{ kWh}$$

Valitaan jälleen 12 OPzV 1200 -akkujen mukaan purkauksen syvyydeksi 50 % kokonaiskapasiteetista, jolloin akkujen jännite tällä purkusyvyydellä on taulukosta 2 luettuna 2.06 V/kenno (ks. s. 22).

Taulukko 2. Jännitetasot varaustason mukaan [7.]

State of charge	Voltage
100%	2.13V/cell
70%	2.09V/cell
50%	2.06V/cell
20%	2.02 V/cell

Järjestelmä on 48 Vdc:n järjestelmä, jolloin akuston kokonaisjännitetaso on alimmillaan:

$$U_{\text{batt.}} = 2.06 \text{ V} * 24 \text{ kennoa} = 49,44 \text{ V}$$

Nyt akustolle vaaditaan kokonaiskapasiteetiksi:

$$Q_{\text{batt.}} = \frac{95 \text{ kWh}}{49,44 \text{ V}} = 1\,921,52 \text{ Ah}$$

Vastaavasti akkukapasiteetti voidaan mitoittaa myös täysin puretun ja ladatun akuston jännite tasojen keskimääräisellä arvolla. Mikäli jännitekäyrää purettaessa ei tiedetä, arvioidusta kapasiteetin arvosta voi tulla liian pieni laskettaessa suoraan jännitteiden keskiarvo, sillä jännitetasot eivät mene aina lineaarisesti.

Lasketaan vertailun vuoksi keskiarvo jännitteellä akuston kapasiteetti:

$$Q_{\text{batt.}} = \frac{2 * 95 \text{ kWh}}{((2,13 * 24) + 49,44) \text{ V}} = 1\,889,42 \text{ Ah}$$

Akkuja puretaan vain puoleen väliin kokonaiskapasiteetista, minkä vuoksi akuston kokonaiskapasiteettia täytyy kasvattaa. Yksi 12 OPzV 1200 -akku sisältää 6 sarjaan kytkettyä kennoa. Kuusi sarjaan kytkettyä kennoa muodostaa nimellisen 12 V. Tästä syystä akkuja täytyy kytkeä sarjaan 4 kappaletta, jotta saadaan nimelliseksi jännitteeksi 48 V. Nyt voidaan laskea yhtälön avulla tarvittavien rinnankytkentöjen määrä, kun yksi 12 OPzV 1200 -akun kapasiteetti on 1 200 Ah ja oletetaan, että keskimääräinen saavutettu lataustaso aurinkoenergialla jää 85 %:iin täydestä varauksesta. Akkujen hyö-

tysuhde purettaessa häviöiden jälkeen on tässä esimerkissä 94 %. Valitaan suurempi akuston kapasiteetti mallilaskuun:

$$n_{\text{batt.quantity}} = \frac{1921,52 \text{ Ah}}{1200 \text{ Ah} * 0,94 * (0,85 - 0,5)} = 4,867 \text{ kpl.}$$

Akkujen kappalemäärä pitää luonnollisesti olla kokonaisluku, jolloin 12 OPzV 1200 -akkuja tarvittaisiin esimerkin mukaiseen järjestelmään viisi, neljän sarjaankytketyn akun ryhmää eli yhteensä:

$$4 * 5 \text{ akku} = 20 \text{ akku}.$$

Akkujen lataamiseen menee saman verran sähköenergiaa, kuin siitä on purettukin. Lisäksi lataamiseen kulutettuun energiaan täytyy lisätä lataamisessa syntyneet häviöt. Häviöt määräytyvät käytettyjen akkujen, johtimien ja komponenttien mukaan. Yleisarvona latausenergialle voidaan pitää 1,1 - 1,2 kertaa purettu energia. [6, s. 58.]

$$W_{\text{batt.recharge}} = 1,1 - 1,2 * W_{\text{batt}} \quad (8)$$

Esimerkin mukaisessa järjestelmässä tällöin lataukseen kulunut energia $W_{\text{batt.recharge}}$ on:

$$W_{\text{batt.recharge}} = 95 \text{ kWh} * 1,2 = 114 \text{ kWh.}$$

Jos aurinko paistaa vain 5 h vuorokaudessa, täytyy aurinkokennojen pystyä tuottamaan laskettu 114 kWh energiaa viiden tunnin aikana. Lisäksi aurinkokennojen täytyy syöttää myös tänä aikana kuorma, joka kasvattaa tarvittavan sähköenergian määrää. Akuston latausvirta tulee rajoittaa akun valmistajien antamien arvojen mukaisesti, mikä vuoksi päivän huipputehon aikana täytyy vielä laskea akustolle jäävän virran määrä.

Esimerkkiakuilla sallittu latausvirta on:

$$0,4 * 1\,200 \text{ A} = 480 \text{ A}$$

joka jakautuu jokaiselle rinnankytketylle akkusarjalle tasaisesti olettaen, että akut ovat identtisiä. Koska kaikki akut ovat kytkettynä järjestelmään, voidaan olettaa, että niiden varaustaso on sama, jolloin latausvirrat ovat myös yhtä suuret. Akkuja on esimerkkijärjestelmässä viisi, neljän kappaleen sarjaankytkentöjä rinnan, jolloin akustolle sallittu kokonaislatausvirta $I_{\text{batt.tot.recharge}}$ voidaan laskea yhtälön 9 avulla:

$$I_{\text{batt.tot.recharge}} = n_{\text{batt.quantity}} * I_{\text{per.batt.recharge}} \quad (9)$$

$I_{\text{batt.tot.recharge}}$ on akustolle menevä kokonaisvirta [A]

$I_{\text{per.batt.recharge}}$ on yhden tai sarjaan kytkettyjen akkujen sallittu latausvirta [A]

$n_{\text{batt.quantity}}$ on rinnan kytkettyjen akkujen määrä

Eli esimerkin akuilla akustolle sallitun virran kokonaismäärä on:

$$I_{\text{batt.tot.recharge}} = 5 * 480 \text{ A} = 2\,400 \text{ A}$$

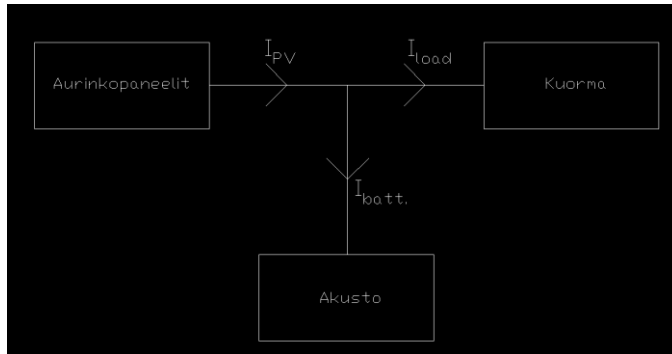
Kuorman virran jälkeen akustolle jäävä latausvirta ei saisi ylittää edellä laskettua kokonaislatausvirtaa. Kuorman ottaman virran I_{load} määrä voidaan laskea yhtälön 10 avulla:

$$I_{\text{load}} = \frac{P_{\text{load}}}{U_{\text{batt.recharge}}} \quad (10)$$

Aurinkokennojen päivän huipputehon tuoton aikana tuotettavan I_{PV} virran määrä voidaan laskea yhtälön 11 avulla:

$$I_{\text{PV}} = \frac{P_{\text{peak.pv.}}}{U_{\text{batt.recharge}}} \quad (11)$$

Kirchoffin virtalain mukaan aurinkokennoilla tuotetun virran suuruus on yhtä suuri kuin akustolle ja kuormalle menevän virtojen summa. Kuvassa 12 (ks. s. 25) esitellään aurinkokennojen tuottaman virran ja sen jakautuminen järjestelmässä.



Kuva 12. Virran jakautuminen

Kuvan 12 mukaisilla virroilla Kirchoffin virtalaki menee yhtälön 12 mukaan:

$$I_{PV} = I_{load} + I_{batt.} \quad (12)$$

Näin ollen yhtälön 12 avulla voidaan laskea akustolle menevän virran $I_{batt.}$ suuruus:

$$I_{batt.} = I_{PV} - I_{load} \quad (12)$$

Laskettu virta $I_{batt.}$ ei saa ylittää aikaisemmin laskettua $I_{batt.tot.recharge}$ arvoa, jolloin voidaan kirjoittaa:

$$I_{batt.} \leq I_{batt.tot.recharge}$$

Jos laskettu akustolle menevän virran suuruus ylittää sallitun latausvirran, täytyy järjestelmään valita isompia latausvirtoja kestävät akut tai lisätä rinnan olevien akkujen määrää. Jos latausvirtaa joudutaan rajoittamaan, vähenee ladatun energian määrä ja tällöin kokonaisenergianmäärä ei ole enää tarpeeksi suuri. Energiaa ei synny tyhjästä ja tällöin järjestelmä ei enää toimi.

Edellä laskettu akukapasiteetti toimii nyt vain siinä tilanteessa, että aurinko paistaa täydet 5 tuntia ja pystyy lataamaan akuston. Mikäli järjestelmä halutaan luotettavammaksi, täytyy akuston kokonaiskapasiteettia kasvattaa vielä edellä lasketusta tuloksesta, sekä aurinkopaneelien huipputehoja kasvattaa, jotta järjestelmä pystyy toimimaan myös heikommassa olosuhteissa eli esimerkiksi osittain pilvisinä päivinä. Virransyöttöjärjestelmän kuormana toimii tyypillisesti kriittinen kuorma, jolloin kuorman syötön katkeamisia ei sallita. Tällöin järjestelmän suunnitteluvaiheessa täytyy ottaa huomioon

muuttuvat tekijät ja kasvattaa akuston kapasiteettia minimimäärästä suuremmaksi, että järjestelmä toimisi myös heikommilla olosuhteilla.

Täytyy kuitenkin ottaa huomioon, että nyt järjestelmä on mitoitettu epäedullisimman tilanteen mukaan aurinkopaneelien tehon tuottoon nähden, joten jos ylimitoitetaan huonoimmassa tilanteessa järjestelmä, tulee hybridijärjestelmälle edullisempina päivinä ylimitoitus todella suureksi. Parhaimpina päivinä aurinkopaneelit tuottavat ylimääräistä tehoa suuria määriä, jota ei pystytä varastoimaan mihinkään.

4 Aurinkoenergia

Aurinko on maapalloa lähimpänä sijaitseva tähti. Sen ulkokuoren muodostaa vety (75 %) ja helium (23 %). Spektrianalyysin perusteella loput auringon kuoresta muodostavat mm. natrium, rauta, kalsium, magnesium, nikkeli, barium, kupari, typpi ja hiili. Spektrianalyysin avulla ollaan saatu selville, että auringossa on maapallolle tuntemattomia kemiallisia yhdisteitä.

Auringossa tapahtuu fuusioreaktio, jossa kaksi vetyatomia ydintä, kaksi protonia ja kaksi neutronia yhtyy heliumatomiksi, jolloin vapautuu suuri määrä energiaa. Tämä reaktio onnistuu vain n. 10 miljoonan asteen lämpötilassa.

Fuusion massamuutoksesta vapautuva energia antaa auringolle $3,8 \cdot 10^{23}$ kWh:n kokonaistehon. Tästä energian määrästä maapallolle tulee $1,7 \cdot 10^{14}$ kWh, mikä vastaa n. 20 000 kertaa koko maapallon teollisuuteen ja lämmitykseen käytettyä tehoa. Maapallon ilmakehään tulevan kohtisuoran säteilyn teho on $1,35 - 1,39$ kW/m². Koska maapallon kiertorata ei ole ympyrä vaan ellipsin muotoinen, vaihtelee maapallon etäisyys auringosta ja tällöin myös säteilyn teho ei ole vakio. Ilmakehä heikentää säteilyn tehoa, josta maanpinnalle pääsee vain n. $0,8 - 1,0$ kW/m², eli n. 60 %. [9, s. 10 - 11.]

4.1 Aurinkoenergian käyttö

Auringon energiaa pystytään käyttämään passiivisesti ja aktiivisesti lämmittämiseen. Passiivisella lämmittämällä tarkoitetaan esimerkiksi tekemällä rakennuksiin suuret ikkunat ja suuntaamalla ne etelään, jolloin auringonpaistetta saadaan sisälle lämmittä-

mään maksimaalisesti. Tällöin taloista kannattaa muuten tehdä hyvin tiiviitä, ettei lämpö pääse karkaamaan talon ulkopuolelle. Aktiivisella lämmittämisellä voidaan tarkoittaa esimerkiksi erilaisia aurinkokerääjiä, joilla lämmitetään vettä, joilla saadaan lämmin vesi kierrätettyä putkistoilla suoraan kohteeseen, tai suureen vesisäiliöön. Lämmittämisen lisäksi auringonsäteilyllä pystytään tekemään sähköenergiaa erilaisten aurinkokennojen avulla, sekä kuumentamalla nestettä, jolla voidaan pyörittää turbiineja.

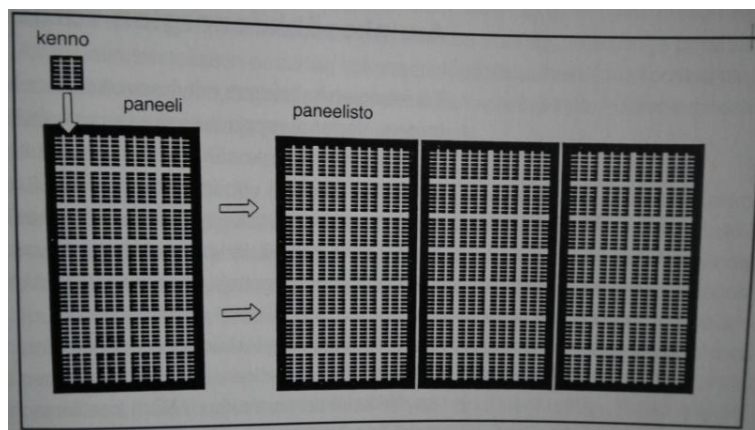
Aurinkoenergian käytön edut verrattuna perinteisiin voimantuotantomenetelmiin ovat seuraavat:

- ei polttoaineen kulutusta
- järjestelmän modulaarisuus = järjestelmään voidaan tarvittaessa helposti laajentaa
- vähäinen huollontarve
- pitkäikäisyys
- ympäristöystävällisyys

Negatiivisina puolina ovat seuraavat:

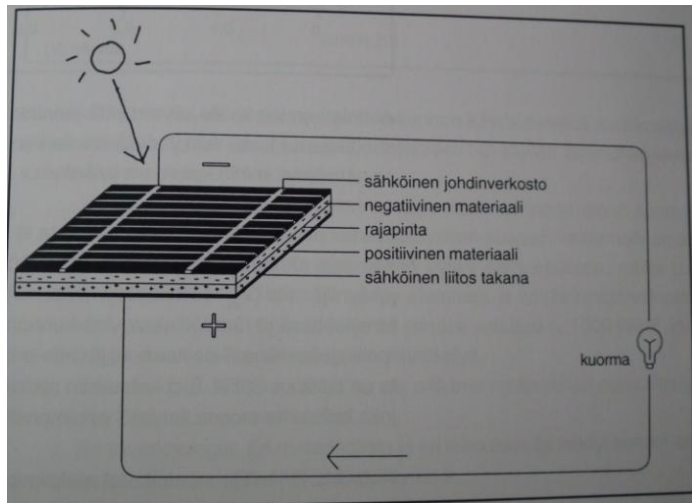
- korkeat investointikustannukset
- tehontuoton epäsäännöllisyys ja vaihtelut vuodenajanmukaan, josta seuraa varastointiongelman [9, s. 52 - 62, 72 - 77, 118.]

4.2 Aurinkokennot



Kuva 13. Aurinkokenno ja -paneeli -termit [9, s. 127.]

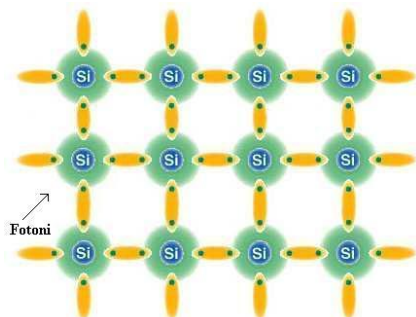
Aurinkopaneelit koostuvat yksittäisistä aurinkokennoista. Kennoja kytkemällä sarjaan ja rinnan saadaan kokonaistehoa kasvatettua. Kuten akuissa, sarjaan kytketyt kennot nostavat jännitettä ja rinnankytketyt kennot puolestaan nostavat virtaa.



Kuva 14. Aurinkopaneelin koostuminen ja kuorman kytkeytyminen [9, s. 121.]

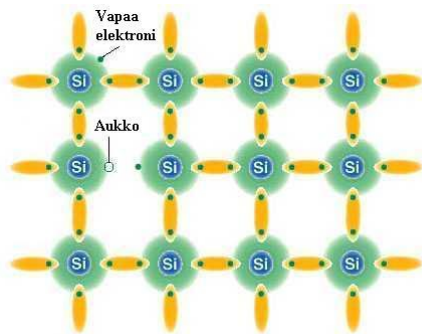
Yksittäinen aurinkokenno koostuu kahdesta puolijohteesta; N tyypin ja P tyypin johteista, joita erottaa rajapinta. Kun fotoni törmää kennon pintaan, se aiheuttaa aukkoparin. Kennon sisäisen sähkökentän vaikutuksesta elektroni ja aukkopari saadaan siirtymään eripuolille pintoja. Kun näin tapahtuu, puolten välille syntyy potentiaaliero eli jännite. Nyt kuorma voidaan kytkeä negatiivisen puolen ja positiivisen puolen väliin, jota kautta potentiaaliero pyrkii tasoittumaan. [9.]

Fotonin luoman aukkoparin syntyminen esitetään kuvissa 15 ja 16 (ks. myös sivu 29) havainnollisemmin.



Kuva 15. Aukkoparin muodostuminen fotonin vaikutuksesta 1. [10.]

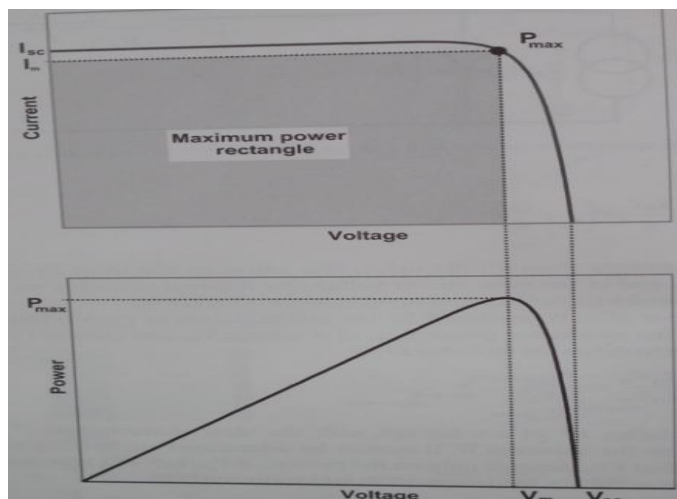
Kuvassa 15 on esitelty fotonin törmääminen aurinkokennon piiatomiin. Tästä seuraa kuvan 16 mukainen aukkopari.



Kuva 16. Aukkoparin muodostuminen fotonin vaikutuksesta 2. [10.]

4.3 Auringonsäteilyllä sähköä

Aurinkokenno tuottaa tasasähköä. Tasaisessa valonmäärässä aurinkokennon jännite voi muuttua, vaikka virta pysyykin samana tiettyyn pisteeseen saakka. Eri jännitteiden ja virtojen arvoilla voidaan piirtää kuvan 17 mukaiset aurinkokennon ominaiskäyrät. [11, s. 75.]



Kuva 17. Aurinkokennon ominaiskäyrät [11, s. 76.]

Kenno tuottaa vain tietyllä virran ja jännitteen arvoilla maksimitehon P_{max} . Teho lasketaan yhtälön 5 mukaisesti virran I ja jännitteen U tulona, jolloin kennon maksimijännite saavutetaan virran arvolla I_m ja jännitteen arvolla U_m yhtälön 13 avulla laskettuna:

$$P_{max} = I_m * U_m \quad (13)$$

P_{\max} on huipputeho [W]

I_m on virta huipputeholla [A]

U_m on jännite huipputeholla [V]

Kuvassa 17 (ks. edellinen sivu) olevat virran maksimiarvo I_{sc} tarkoittaa lyhyenpiiri virtaa eli oikosulkuvirtaa ja jännitteen maksimiarvo U_{oc} tarkoittaa avoimen piirin jännitettä. [11, s. 75 - 76.]

4.4 Aurinkokennon hyötysuhde

Aurinkokennon hyötysuhde tarkoittaa sitä osuutta auringon säteilytehosta, joka saadaan muutettua sähkötehoksi. Nykyisin kaupallisten kennojen hyötysuhteet ovat n. 10 - 14 %. Avaruusteknologian saralla ja keskitetyissä järjestelmissä ollaan saavutettu korkeampia hyötysuhteita. Muun muassa Tekniikkatalous-lehdessä on raportoitu saksalaisessa Fraunhoferin Instituutissa saavutetusta 41,1 %:n hyötysuhteesta (Julkaisupäivä 21.1.2009). Kyseinen aurinkokenno on valmistettu galuim-indium-fosfidista. [9, s. 125; 12.]

Aurinkokennon hyötysuhde mitataan laboratorio-oloissa, joissa säteilyn voimakkuus on 1 000 W/m² ja lämpötila +25°. Paneelin hyötysuhde voidaan laskea yhtälön 14 mukaan. Hyötysuhteet mitataan +25° lämpötilassa, sillä jännite ja myös teho tippuu n. 0,5 %/aste korkeammilla lämpötiloilla ja vastaavasti nousee alemmilla lämpötiloilla. [9, s. 123 - 127.]

$$\eta_{\text{paneeli}} = \frac{\text{ulostuloteho}}{\text{sisääntuloteho}} * 100 \% = \frac{I_m * U_m}{I * A} * 100 \% \quad (14)$$

η_{paneeli} on aurinkokennon hyötysuhde [%]

I_m on kennon maksimitehon virta [A]

U_m on kennon maksimitehon jännite [V]

I on säteilyn intensiteetti [W/m²]

A on aurinkokennon pinta-ala [m²]

Eli esimerkiksi, jos kennon tuottama virta on 15 A ja jännite 0,5 V, kun kenno on 0,05m² pinta-alaltaan, on hyötysuhde:

$$\eta_{\text{paneeli}} = \frac{15 \text{ A} * 0,5 \text{ V}}{1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 0,05 \text{ m}^2} * 100 \% = 15 \%$$

4.5 Auringonsäteily

Maapallon kiertorata auringon ympäri on ellipsin muotoinen, jonka vuoksi säteilyn voimakkuus vaihtelee vuodenajan mukaan. Tammikuussa aurinko on lähimmillään maapalloa ja kesäkuussa kauemmillaan. Maapallon etäisyys auringosta R voidaan laskea yhtälöllä 15:

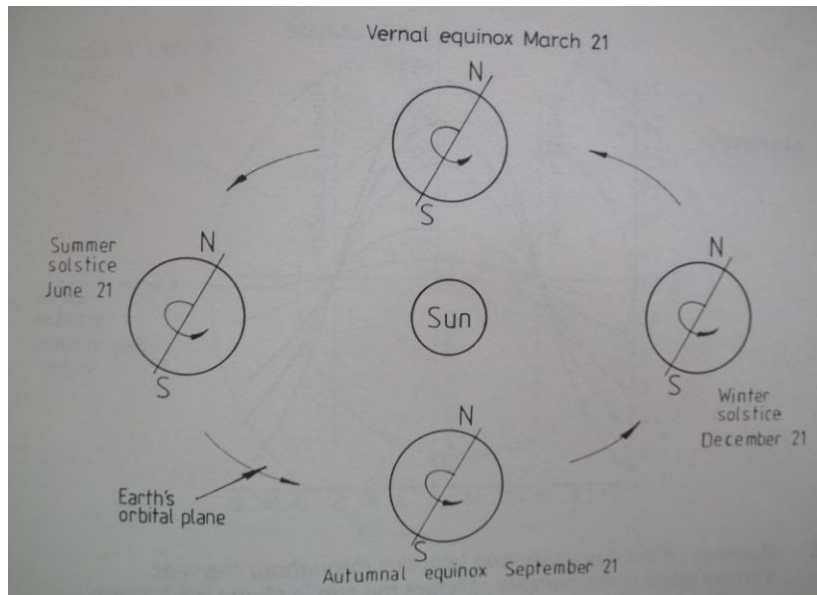
$$R = a(1 \pm e) \tag{15}$$

R on maapallon etäisyys auringosta [km]

a on 149,5985*10⁶ [km]

e on 0,01673

Yhtälön 15 avulla voidaan laskea seuraavat: kauimpana maapallo on auringosta 152,1 * 10⁶ km:n etäisyydellä, ja lähimmillään maapallo on aurinkoa 147,1 * 10⁶ km. Näiden pisteiden ero verrattuna toisiinsa on vain n. 3,3 % eli maapallon kiertorataa auringon ympäri voidaan pitää lähes pyöreänä. Maapallon etäisyyden lisäksi maapallolle tulevan säteilyn voimakkuuteen vaikuttaa auringon aktiivisuus. Auringon tuottaman säteilyn teho ei ole vakio. [13, s. 52.]

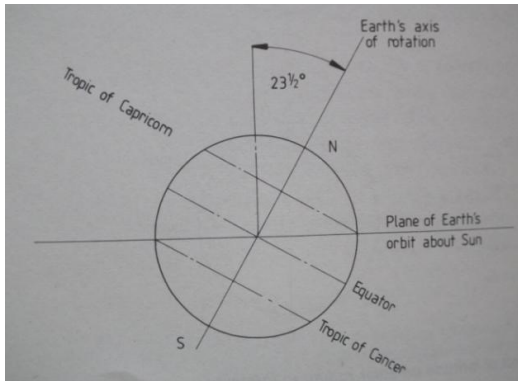


Kuva 18. Maapallonkierto auringon ympäri [14, s. 31.]

Maapallo pyörii kaltevassa kulmassa aurinkoon nähden, minkä vuoksi syntyy vuodenaikojen vaihtelut. Maapallon pyörimisakseli on n. $23,45^\circ$:n kulmassa aurinkoon nähden, jonka takia eriaikoina kierrosta eri leveysasteille tulee eri määrä aurinkotunteja, eli eri tuntimääriä auringon paistetta.

Auringon keskipisteestä lähtevän kohtisuoran valon piste muuttuu maapallon kaltevuuskulman takia $23,45^\circ$ etelään ja pohjoiseen päiväntasaajalta. Tätä auringon suorapaisteen kulmaa kutsutaan deklinaatiokulmaksi. Deklinaatiokulma vaihtelee $\pm 23,45^\circ$ välillä vuodenaikojen riippuen siten, että positiiviset deklinaatiokulman arvot ovat päiväntasaajalta pohjoiselle leveyspiirille päin ja vastaavasti negatiiviset deklinaatiokulman arvot ovat eteläisille leveysasteille päin. Leveysastetta merkitään tässä työssä symbolilla L .

Kun deklinaatiokulma on 0° , aurinko paistaa 90° kulmassa päiväntasaajan horisonttiin nähden eli suoraan yläpuolelta. Kun pohjoisella pallonpuoliskolla on keskikesä, on deklinaatiokulma $+23,45^\circ$, jolloin leveysasteelle $23,45^\circ N$ auringonsäteily tulee keskipäivällä suorassa kulmassa ja vastaavasti keskitalvella $-23,45^\circ$, jolloin $23,45^\circ S$ leveysasteelle tulee kohtisuoraa säteilyä. Maaliskuun 21 päivä ja syyskuun 21 päivä deklinaatiokulma on 0° . Tällöin on kevätpäivän tasaus ja syyspäiväntasaus. Näiden välissä kesäkuun ja joulukuun 21 päivä deklinaatiokulma saavuttaa ääripäänsä eli $+23,45^\circ$ ja $-23,45^\circ$. [13, s. 52 - 55; 11, s. 49.]



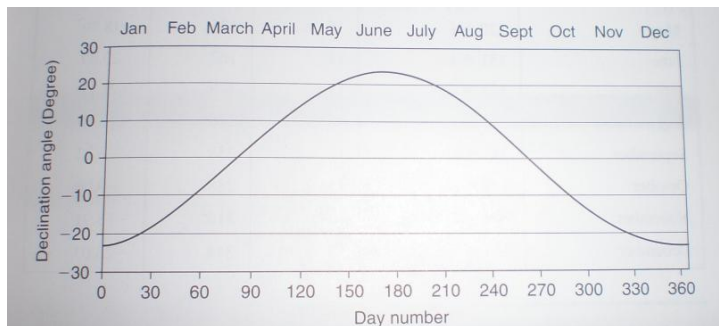
Kuva 19. Maapallon pyörimisakselin kaltevuus auringonsuhteen [14, s. 30.]

Deklinaatiokulma δ voidaan laskea yhtälöllä 16 hyväksi käyttäen Julianin lukua. Julianin luku tarkoittaa ympäri vuoden juoksevaa lukua eli tammikuun ensimmäinen päivä on numero 1 ja joulukuun viimeinen päivä on 365.

$$\delta = 23,45 * \sin\left[\frac{360}{365} * (284 + J)\right] \quad (16)$$

δ on deklinaationkulma [°]

J on Julianin luku



Kuva 20. Deklinaatiokulma vuodenajan funktiona [13, s. 55.]

Maapallo pyörii kerran auringon ympäri 365,25 päivässä. Tällöin maapallon pyörimisnopeus auringon ympäri voidaan laskea yhtälöllä 17:

$$\omega_{\text{maa}} = \frac{2\pi}{365,24} = 0,0172 \text{ rad/päivä} \quad (17)$$

tai asteina

$$\omega_{\text{maa}} = \frac{360 \text{ asteta}}{365,24 \text{ päivää}} = 0,9856^\circ/\text{päivä}$$

Maapallo pyörii oman akselinsa ympäri kerran 24 tunnissa. Maapallon kulmanopeus akselinsa ympäri voidaan laskea yhtälöllä 18: [11, s. 49; 1, s. 55 - 56.]

$$\omega = \frac{\text{asteluku}}{\text{aika}} \quad (18)$$

johon sijoittamalla asteluvun paikalle täyden pyörähdysten asteluku eli 360° ja pyörähdysajaksi vuorokauden aika eli 24 h, saadaan laskettua:

$$\omega = \frac{360}{24 \text{ h}} = 15^\circ/\text{h}$$

Suoraan tulevan auringonsäteilyn voimakkuus riippuu sen tulokulmasta horisontaaliselle tasolle. Maksimi arvon auringonsäteily saa, kun se paistaa 90° kulmassa maan kammaralle eli suoraan yläpuolelta. Tällöin ilmassa, joka heikentää auringon säteilyn voimakkuutta on pienimmillään. Kulma α tarkoittaa horisontaalisen tason ja auringon paistekulman välistä kulmaa. Kulman α ja horisontaalisen tason tangentin väliin jää kulma Φ . Tästä seuraa yhtälön 19 mukainen yhtälö.

$$\Phi + \alpha = 90^\circ \quad (19)$$

Auringon korkeus taivaalla α vuorokauden ajan mukaan voidaan laskea yhtälöllä 20, käyttäen hyväksi tuntikulmaa h . Tuntikulman h laskeminen esitetään yhtälössä 21.

$$\sin \alpha = \cos(\Phi) = \sin(L) * \sin(\delta) + \cos(L) * \cos(\delta) * \cos(h) \quad (20)$$

α on auringonsäteilyn tulokulma horisontaaliseen tasoon nähden [°]

Φ on auringonsäteilyn tulokulma horisontaalisen tason normaaliin nähden [°]

L on mittauspisteen leveysaste [°]

h on vuorokauden ajasta riippuva tuntikulma [°]

δ on deklinaatiokulma [°]

$$h = \pm 0,25 * (t_n) \quad (21)$$

t_n on minuutti määrä aurinkokeskipäivästä eli pisteestä, jolloin aurinko on korkeimmillaan. Positiiviset luvut iltapäivän puolella ja negatiiviset luvut ennen aurinkokeskipäivää. [13, s. 56 - 58; 9, s. 49.]

Auringon paistokulma etelän suunnasta Z voidaan laskea yhtälöllä 22: [13, s. 58.]

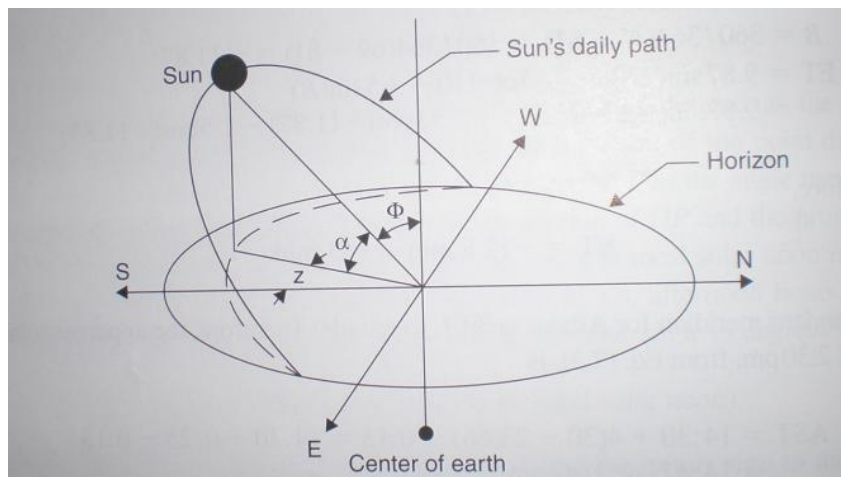
$$\sin(Z) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(h)}{\cos(\alpha)} \quad (22)$$

Z on auringonsäteilyn kulma etelän suuntaan nähden [$^\circ$]

δ on deklinaatiokulma [$^\circ$]

h on vuorokauden ajasta riippuva tuntikulma [$^\circ$]

α on auringonsäteilyn tulokulma horisontaaliseen tasoon nähden [$^\circ$]



Kuva 21. Auringonsäteilyn kulmia [13, s. 58.]

Esimerkiksi lasketaan 20°N leveysasteella sijaitsevan mittauspisteen auringon korkeus horisonttiin nähden kaksi tuntia aurinkokeskipäivän jälkeen, kun vuodenväli on 15.5. Lisäksi lasketaan auringon poikkeama etelän suunnasta.

Lasketaan ensin vuodenaikasta riippuva deklinaatiokulma:

$$\delta = 23,45^\circ * \sin\left[\frac{360}{365} (284 + 135)\right] = 18,79^\circ$$

Seuraavaksi lasketaan tuntikulma h :

$$h = 0,25 * (120) = 30^\circ$$

Nyt voidaan laskea auringon korkeus asteina horisonttiin nähden:

$$\alpha = \sin^{-1} [\sin(20) * \sin(18,79) + \cos(20) * \cos(18,79) * \cos(-30)] = 61,71^\circ$$

Lasketaan vielä auringon poikkeama etelän suunnasta asteina:

$$Z = \sin^{-1} \left[\frac{\cos(18,79) * \sin(30)}{\cos(61,71)} \right] = 87,16^\circ$$

Auringon maksimi ja minimi paistokorkeus α_n aurinkokeskipäivän aikaan tietyllä leveysasteella voidaan laskea yhtälöllä 23. [13, s. 58 - 59.]

$$\alpha_n = 90^\circ - L + \delta \quad (23)$$

L on leveysaste

δ on laskettu deklinaatiokulma

Esimerkiksi 45° leveysasteella maksimi ja minimipaistokorkeus on aurinkokeskipäivän aikaan:

$$\alpha_{\max.} = 90^\circ - 45^\circ + 23,5^\circ = 68,5^\circ$$

$$\alpha_{\min.} = 90^\circ - 45^\circ + (-23,5^\circ) = 21,5^\circ$$

Aurinkotuntien määrä mittauspisteen leveysasteella voidaan laskea yhtälön 20 avulla sijoittamalla siihen auringon paistokulman horisonttiin nähden arvoksi 0° , eli $\alpha = 0^\circ$.

$$\sin \alpha = \sin(L) * \sin(\delta) + \cos(L) * \cos(\delta) * \cos(h_{ss}) \quad (20)$$

α on auringon paistokorkeus horisonttiin nähden [$^\circ$]

δ on deklinaatiokulma [$^\circ$]

L on mittauspisteen leveysaste [$^\circ$]

h_{ss} on auringonlaskutuntikulma [°]

Nyt yhtälö saadaan muotoon:

$$0 = \sin(L) * \sin(\delta) + \cos(L) * \cos(\delta) * \cos(h_{ss}) \quad (20)$$

jota muokkaamalla saadaan:

$$-\sin(L) * \sin(\delta) = \cos(L) * \cos(\delta) * \cos(h_{ss}) \quad (20)$$

$$\rightarrow \cos(h_{ss}) = \frac{-\sin L * \sin \delta}{\cos L * \cos \delta}$$

Joka voidaan vielä sieventää muotoon:

$$\cos(h_{ss}) = -\tan(L) * \tan(\delta) \quad (20)$$

$$\rightarrow h_{ss} = \cos^{-1}(-\tan(L) * \tan(\delta)) \quad (20)$$

Maapallo pyörii edellä lasketun 15° tunnissa, joten kyseisen mittauspaikan maksimipaistokorkeudesta horisontin taakse kestää:

$$H_{ss} = \frac{1}{15} * \cos^{-1}(-\tan(L) * \tan(\delta)) \quad (20)$$

Aurinko nousee päivän huippuarvoon yhtä kauan kuin laskeekin. Mittauspaikan aurinkotunnit voidaan laskea kertomalla laskuaika kahdella. Tästä seuraa yhtälön 24. [13, s. 59.]

$$\text{Päivän pituus} = \frac{2}{15} * \cos^{-1}(-\tan(L) * \tan(\delta)) \quad (24)$$

Suoran auringonsäteilyn voimakkuus ilmakehän ulkoreunassa sijaitsevalle tasolle voidaan laskea yhtälöllä 25. Säteilyn voimakkuus vaihtelee maapallon ellipsisen kiertoradan takia.

$$G_{on} = G_{sc} [1 + 0,0033 * \cos(\frac{360*J}{365})] \quad (25)$$

G_{sc} on 1366,1 [W/m²] (Mitattu vuonna 2000, American Societyn toimesta)

J on Julianin luku

Ilmakehän ulkoreunassa olevalle horisontaaliselle tasolle tulevan suoran säteilyn määrä voidaan laskea yhtälöllä 26:

$$G_{oH} = G_{on} * \cos(\Phi) \quad (26)$$

jossa

Φ = edellä laskettu auringon säteilyn ja horisontin normaalin välinen kulma

Päivän aikana saatu kokonaissäteilyn määrä ilmakehän ulkoreunassa sijaitsevalle horisontaaliselle pinnalle voidaan laskea integroimalla yhtälö 26, jolloin se saadaan muotoon yhtälö 27:

$$H_0 = \frac{24*3600*G_{sc}}{\pi} * \left[1 + 0,033 * \cos\left(\frac{360*J}{365}\right) \right] * [\cos(L) \cos(\delta) \sin(h_{ss}) + \left[\frac{\pi*h_{ss}}{180}\right] \sin(L) \sin(\delta)] \quad (27)$$

H_0 on päivän aikana horisontaaliselle pisteelle tullut säteilyn määrä [J/m²]

h_{ss} on auringon tuntikulma sen laskiessa horisontin taakse asteina [°]

G_{sc} on 1366,1 [W/m²]

yhtälöä 27 voidaan muokata vielä siten, että saatu energiamäärä saadaan suoraan Wattitunneiksi. Nyt yhtälö 27 saadaan yhtälön 28 näköiseksi. [13, s. 88 - 90.]

$$H_0 = \frac{24*G_{sc}}{\pi} * \left[1 + 0,033 * \cos\left(\frac{360*J}{365}\right) \right] * [\cos(L) \cos(\delta) \sin(h_{ss}) + \left[\frac{\pi*h_{ss}}{180}\right] \sin(L) \sin(\delta)] \quad (28)$$

Esimerkiksi, jos halutaan laskea Maaliskuun 10 päivä saatu säteilyteho leveysasteella 35° pohjoista leveysastetta horisontaalisessa pisteessä ilmakehän ulkoreunassa.

Aloitetaan laskemalla vuodenvälistä johtuva deklinaatiokulma yhtälöllä 16. 10. maaliskuuta on 69 päivä vuodesta (31 pv + 28 pv + 10 pv):

$$\delta = 23,45^\circ * \sin\left[\frac{360}{365}(284 + 69)\right] = -4,81^\circ$$

Auringonlaskun tuntikulma voidaan laskea yhtälön 20 avulla:

$$h_{ss} = \cos^{-1}(-\tan(35) * \tan(-4,81)) = 86,6^\circ$$

Vuoden päivästä johtuvan suoran auringonsäteilyn määrä ilmakehään voidaan laskea yhtälön 25 avulla:

$$G_{on} = 1\,366,1 * \left[1 + 0,033 * \cos\left(\frac{360 * 69}{365}\right)\right] = 1\,382,948 \text{ W/m}^2$$

Nyt voidaan laskea päivän aikana saatu säteilyn määrä:

$$\begin{aligned} H_0 &= \frac{24 * 1\,366,1}{\pi} * \left[1 + 0,033 * \cos\left(\frac{360 * 69}{365}\right)\right] * [\cos(35) \cos(-4,81) \sin(86,6) \\ &\quad + \left[\frac{\pi * 86,6}{180}\right] \sin(35) \sin(-4,81)] = 7\,840,628 \text{ Wh/m}^2 \\ &\approx 7,84 \text{ kWh/m}^2 \end{aligned}$$

tai

$$\begin{aligned} H_0 &= \frac{24h * 1\,382,948}{\pi} * [\cos(35) \cos(-4,81) \sin(86,6) \\ &\quad + \left[\frac{\pi * 86,6}{180}\right] \sin(35) \sin(-4,81)] \text{ Wh} = 7\,840,630 \text{ Wh/m}^2 \approx 7,84 \text{ kWh/m}^2 \end{aligned}$$

Ero kahden laskun tuloksessa selittyy G_{on} :n arvon pyöristämisestä.

4.6 Auringon säteilyn kerääminen paneeleilla.

Edellä laskettuihin auringon säteilyn laskuihin täytyy vielä lisätä aurinkopaneelien vaikutus. Monissa tilanteissa aurinkopaneelit ei ole asennettu horisontaaliseen tasoon,

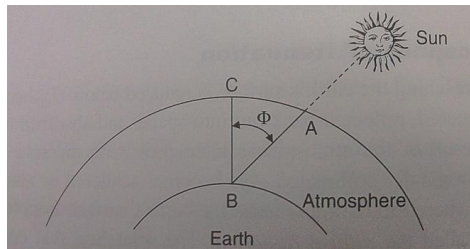
vaan niiden kulman vaikutus auringonpaistekulmaan täytyy huomioida. Lisäksi järjestelmää mitoitettaessa auringonsäteilyn laskujen mukaan täytyy ottaa huomioon, että edellä lasketut päivän säteilyn määrä horisontaaliselle pisteelle heikentyvät ilmakehän vuoksi ja säteilyn määrä toteutuu vain silloin, kun säteily tulee esteettömästi koko vuorokauden ajan. Tätä varten täytyy edellä laskettuihin säteilyn määriin ottaa huomioon pilvien vaikutus keskimääräisten säteilyn määrien avulla.

Ilmakehän heikentävä vaikutus auringon säteilyyn riippuu seuraavista seikoista:

- Ilmakehän paksuus
- Kuinka pitkän matkan säteily joutuu kulkemaan ilmakehässä
- Ilmakehän vesihöyryn, pölyn ym. Määrästä ilmakehän ja paneelin välissä
- Pilvimassojen määrästä, paksuudesta ja koostumuksesta

Ilmamassan paksuus eri säteilyn tulokulmilla voidaan laskea yhtälöllä 29, mikäli oletetaan, että ilmakehä on yhtä paksu joka kohdasta. [13, s. 91 - 92.]

$$m = \frac{1}{\cos \phi} \quad (29)$$



Kuva 17. Ilmamassan paksuus [13, s. 92.]

Oletetaan, että pilvettömältä taivaalta suoraan yläpuolelta tulevasta säteilystä vain 70 % pääsee maan pinnalle eli suora säteily G_n on $987,83 \text{ W/m}^2$, silloin kun maapallo on lähimpänä aurinkoa, ilmassa ei ole pölyä eikä vesihöyryä normaalia enemmän. Säteilyn tehon suuruus muuttuu maapallon etäisyyden funktiona auringosta, jonka vuoksi yhtälön 25 avulla ilmakehän läpäisevän säteilyn suuruus voidaan laskea muuttamalla G_{sc} :n paikalle heikennetty säteilyn arvo. Näin ollen saadaan yhtälö 25 muutettua yhtälön 30 näköiseksi:

$$G_n = G_m * [1 + 0,033 * \cos(\frac{360 * J}{365})] \quad (30)$$

G_m on $956,27 \text{ [W/m}^2\text{]}$ (Huom. Ei ole vakio vaan muuttuu ilmassan koostumuksen vaikutuksesta)

J on Julianin luku

Yhtälöstä seuraa, että kun aurinko on lähimmillään maapalloa, \cos saa arvon 1, jolloin saadaan laskettua, että:

$$G_n = 956,27 * 1,033 = 987,83 \text{ W/m}^2.$$

Puolestaan pienin arvo G_n syntyy, kun \cos :n arvo on -1. Tällöin säteilyn määrä on:

$$G_n = 956,27 * 0,967 = 924,71 \text{ W/m}^2.$$

Päivän aikana saatu suoransäteilyn määrä horisontaaliselle pinnalle ilman muita heikentäviä vaikutuksia (ilman pölyisyys, vesihöyry, pilvet jne.) maanpinnalla saadaan yhtälön 27 mukaan laskettua vaihtamalla G_{on} :n paikalle G_n , yhtälön 31 mukaiseksi:

$$H = \frac{24 * G_m}{\pi} * \left[1 + 0,033 * \cos\left(\frac{360 * J}{365}\right) \right] * [\cos(L) \cos(\delta) \sin(hss) + \left[\frac{\pi * hss}{180}\right] \sin(L) \sin(\delta)] \quad (31)$$

Nyt pystytään laskemaan maanpinnalle ilmakehän heikennyksen jälkeen pääsevän suoransäteilyn määrä horisontaaliselle pinnalle ilman pilviä. Tämän lisäksi täytyy vielä ottaa huomioon aurinkopaneelin kallistuskulma horisonttiin nähden, sekä pidempiaikaisten järjestelmien mitoittamisessa täytyy ottaa huomioon pilvisuus/pilvettömyys korjaukset.

Aurinkopaneeliin tulevan auringonsäteilyn kulma Θ voidaan laskea yhtälöllä 32: [13, s. 60.]

$$\begin{aligned} \cos \Theta = & \sin(L) * \sin(\delta) * \cos(\beta) - \cos(L) * \sin(\delta) * \sin(\beta) * \cos(Z_s) \\ & + \cos(L) * \cos(\delta) * \cos(h) * \cos(\beta) + \sin(L) * \cos(\delta) * \cos(h) * \sin(\beta) * \cos(Z_s) + \\ & \cos(\delta) * \sin(h) * \sin(\beta) * \sin(Z_s) \end{aligned} \quad (32)$$

Θ on auringonsäteilyn tulokulma kaltevalle tasolle [°]

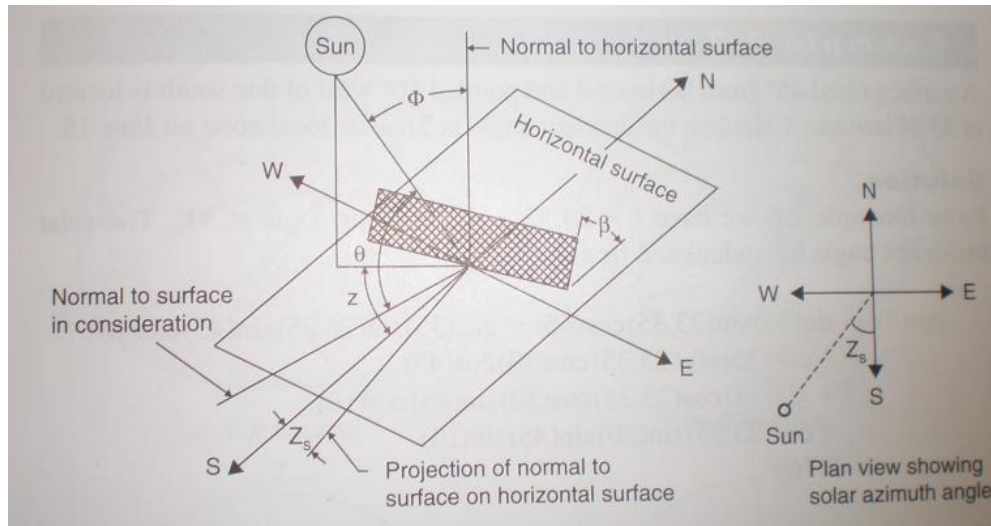
β on horisontin ja paneelin välinen kulma [°]

Z_s on aurinkopaneelin horisontaalisentason normaalin ja etelän välinen kulma [°]

L on pisteen leveysaste [°]

δ on deklinaatiokulma [°]

h on tuntikulma [°]



Kuva 18. Auringonsäteilyn kulmia aurinkopaneelia käytettäessä. [13 s. 61.]

Esimerkiksi, jos halutaan määrittää auringon paistokulma suhteessa aurinkopaneeliin, joka on sijoitettu 35°N leveysastetta, 45° asteen kulmaan horisontaalisesta tasosta, etelästä 15° länteen päin, kello on 2 tuntia yli keskipäivän ja vuodenväli on 15 kesäkuuta, eli $J = 167$.

Aloitetaan laskemalla deklinaatiokulma seuraavasti:

$$\delta = 23,45 * \sin\left[\frac{360}{365}(284 + 167)\right] = 23,35^\circ$$

Seuraavaksi lasketaan tuntikulma:

$$h = +0,25*(60*2) = 30^\circ$$

Seuraavaksi lasketaan auringonsäteilyn tulokulma paneelille:

$$\begin{aligned} \cos \Theta &= \sin(35) * \sin(23,35) * \cos(45) - \cos(35) * \sin(23,35) * \sin(45) * \cos(15) \\ &+ \cos(35) * \cos(23,35) * \cos(30) * \cos(45) + \sin(35) * \cos(23,35) * \cos(30) \\ &* \sin(45) * \cos(15) + \cos(23,35) * \sin(30) * \sin(45) * \sin(15) = 0,795 \end{aligned}$$

$$\rightarrow \theta = \cos^{-1}(0,795) = 37,345^\circ$$

Aurinkopaneeleille tuleva kokonaissäteily koostuu suoran säteilyn lisäksi hajasäteilystä ja maanpinnasta heijastuvasta säteilystä.

Tällöin kokonaissäteilyksi paneelille tulee yhtälön 33 mukainen kokonaissäteily:

$$G_{\text{tot.}} = G_{\text{Bt}} + G_{\text{Dt}} + G_{\text{Gt}} \quad (33)$$

$G_{\text{tot.}}$ on Kokonaissäteilyn [W/m^2]

G_{Bt} on suorasäteily [W/m^2]

G_{Dt} on epäsuorasäteily [W/m^2]

G_{Gt} on maasta heijastunut säteily [W/m^2]

G_{Bt} saadaan laskettua yhtälöllä 34, horisontaaliselle tasolle tuleva säteily G_{B} yhtälöllä 35, joiden avulla voidaan määrittellä kaltevan tason säteilyn laskemiseen kerroin R_{B} yhtälöllä 36.

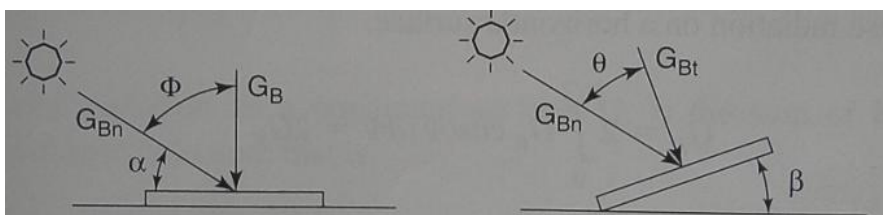
$$G_{\text{Bt}} = G_{\text{Bn}} * \cos(\theta) \quad (34)$$

$$G_{\text{B}} = G_{\text{Bn}} * \cos(\Phi) \quad (35)$$

$$R_{\text{B}} = \frac{G_{\text{Bt}}}{G_{\text{B}}} = \frac{\cos \theta}{\cos \Phi} \quad (36)$$

Nyt voidaan kirjoittaa kaltevalle tasolle tulevan suoran säteilyn määrä yhtälön 37 mukaisesti:

$$G_{\text{Bt}} = G_{\text{B}} * R_{\text{B}} \quad (37)$$



Kuva 19. Auringonsäteilyn tulokulmia kaltevalle tasolle [13, s. 97.]

Yhtälöä 36 voidaan muokata sijoittamalla $\cos(\Theta)$:n paikalle yhtälö 32 ja $\cos(\Phi)$:n paikalle yhtälö 20. Nyt se voidaan kirjoittaa muotoon yhtälö 38:

$$R_B = \frac{\sin(L - \beta) \cdot \sin(\delta) + \cos(L - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h)}{\sin(L) \cdot \sin(\delta) + \cos(L) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h)} \quad (38)$$

Kokonaissäteilyn laskemista varten tarvitaan vielä epäsuoransäteilyn määrä ja maasta heijastunut säteily.

Epäsuora säteily voidaan laskea yhtälöllä 40, jossa G_D :n arvo voidaan laskea yhtälöllä 39:

$$G_D = 2 \int_0^{\pi/2} G_r \cdot \cos(\Phi) \, d\Phi = 2 \cdot G_R \quad (39)$$

G_R on hajautuneen säteilyn määrä [W/m^2]

Φ on horisontin normaalin ja auringonsäteilyn välinen kulma [rad]

$$G_{Dt} = G_D \cdot \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] \quad (40)$$

β on paneelin kallistuskulma horisontiin nähden [$^\circ$]

Maasta heijastunut säteily koostuu suorasta ja epäsuorasta säteilystä. Lisäksi heijastumisen suuruus riippuu maan heijastuskertoimesta. Näin ollen maasta kallistetulle paneelille heijastuva säteily voidaan laskea yhtälöllä 41:

$$G_{Gt} = \rho_G \cdot (G_B + G_D) \cdot \left[\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] \quad (41)$$

ρ_G on maan heijastuskerroin

Nyt kokonaissäteilyn määrä kaltevaan tasoon asennettuun aurinkopaneeliin voidaan laskea sijoittamalla yhtälöön 33, yhtälöt 37, 40 ja 41. Tuloksena saadaan yhtälö 42: [13, s. 97 - 99.]

$$G_{tot.} = R_B \cdot G_B + G_D \cdot \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] + \rho_G \cdot (G_B + G_D) \cdot \left[\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] \quad (42)$$

Erialaisten maanpintojen heijastuskertoimia voidaan katsoa taulukosta 3.

Taulukko 3. Pintojen heijastuskertoimia [11, s. 60.]

Surface type	Albedo
Grass (July, August, UK)	0.25
Lawns	0.18–0.23
Dry grass	0.28–0.32
Uncultivated fields	0.26
Bare soil	0.17
Macadam	0.18
Asphalt	0.15
Concrete new before weathering	0.55
Concrete weathered industrial city	0.20
Fresh snow	0.80–0.90
Old snow	0.45–0.70
Water surfaces for different values of solar altitude	
$\gamma_s > 45^\circ$	0.05
$\gamma_s = 30^\circ$	0.08
$\gamma_s = 20^\circ$	0.12
$\gamma_s = 10^\circ$	0.22

Paneelille keskimäärin päivän aikana saatu kokonaissäteilyn H_{tot} määrä voidaan laskea käyttämällä kerrointa \underline{R} siten, että:

$$H_{\text{tot}} = \underline{R} * H \quad (43)$$

Kerroin \underline{R} ottaa huomioon keskimääräiset säteilymäärät huomioon ja se koostuu yhtälön 44 mukaisista tekijöistä:

$$\underline{R} = \left[1 - \frac{H_d}{H}\right] * \underline{R}_B + \frac{H_d}{H} * \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2}\right] + \rho_G * \left[\frac{1 - \cos(\beta)}{2}\right] \quad (44)$$

H_d/H on pilvisyysskorjaus (saadaan laskettua yhtälöllä 45)

\underline{R}_B on kuukauden säteilyn horisontaaliselle pinnalle –kerroin (ks. yhtälö 46)

$$H_d/H = c_0 + c_1 * \underline{K}_T + c_2 * \underline{K}_T^2 + c_3 * \underline{K}_T^3 \quad (45)$$

c_{0-3} on leveysaste ja vuodenaika -kertoimia (ks. liite 2, taulukko 2)

\underline{K}_T on kuukauden pilvettömyys-indeksi (ks. yhtälö 47 ja liite 2, taulukko 2) [13, s. 102.]

$$\underline{R_B} = \frac{\cos(L-\beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(h_{ss}') + \left(\frac{\pi}{180}\right) \cdot h_{ss}' \cdot \sin(L-\beta) \cdot \sin(\delta)}{\cos(L) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(h_{ss}) + \left(\frac{\pi}{180}\right) \cdot h_{ss} \cdot \sin(L) \cdot \sin(\delta)} \quad (46)$$

h_{ss}' on auringon laskutuntikulma, jossa paneelin kallistuskulma otettu huomioon [°] (ks. yhtälö 48)

$$\underline{K_T} = \frac{H}{H'} \quad (47)$$

H on kuukauden keskiarvollisen päivän suorasäteily horisontaaliselle tasolle [W/m²] (yhtälö 31 tai auringonsäteily-loki)

H' on kuukauden keskiarvollisen päivän aikana ilmakehän ulkopuolelle tulevan säteilyn määrä horisontaaliselle tasolle [W/m²] (ks. liite 2, taulukko 3, liite 1, taulukko 1 ja yhtälö 27). [13, s. 95 - 103.].

$$h_{ss}' = \min\{h_{ss}, \cos^{-1}[-\tan(L-\beta) \cdot \tan(\delta)]\} \quad (48)$$

Esimerkiksi, jos halutaan laskea arvioitu säteilyn määrä päivän aikana paneelille, joka on 45° kulmassa horisontaalisesta tasosta, suunnattu etelään, sijaitsee 35°N leveysasteella, vuoden aika on heinäkuu ja maan on nurmikko.

Lasketaan ensin deklinaatiokulma heinäkuun keskimääräisenä päivänä:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin\left[\frac{360}{365}(284 + 198)\right] = 21,18^\circ$$

Seuraavaksi lasketaan auringon laskutuntikulma h_{ss}' paneelin vaikutuksesta ja laskukulma horisontaaliselle tasolle h_{ss} :

$$h_{ss}' = \cos^{-1}[-\tan(35-45) \cdot \tan(21,18)] = 86,1^\circ$$

$$h_{ss} = \cos^{-1}[-\tan(35) \cdot \tan(21,18)] = 105,7^\circ$$

Lasketaan arvioitu suoran säteilyn määrä horisontaaliselle pisteelle yhtälön 31 avulla. Vastaavasti, mikäli saatavilla on auringonsäteilyloki voidaan käyttää sen arvoja, jolloin on mahdollista, että saadusta kokonaissäteilyn arvosta tulee tarkempi.

$$H = \left\{ \frac{24 \cdot 3600 \cdot 956,3}{\pi} * \left[1 + 0,033 * \cos\left(\frac{360 \cdot 198}{365}\right) \right] * \left[\cos(35) \cos(21) \sin(106) + \left[\frac{\pi \cdot 106}{180} \right] \sin(35) \sin(21) \right] \right\} = 28\,401\,358 \text{ J/m}^2 = 28,4 \text{ MJ/m}^2 = 7\,889,3 \text{ Wh/m}^2$$

Katsotaan liitteestä 1 H' :n arvo pilvisyys indeksin laskemista varten ja lasketaan käyttäen H :n arvoa:

$$\underline{K}_T = \frac{28,4 \text{ MJ/m}^2}{40,6 \text{ MJ/m}^2} = 0,699$$

Nyt voidaan laskea pilvisyyskorjaus H_D/H käyttäen liitteen 2, taulukon 2 kertoimia:

$$H_D/H = 0,998 - 0,583 * 0,699 - 1,392 * 0,699^2 + 0,993 * 0,699^3 = 0,249$$

Seuraavaksi lasketaan \underline{R}_B :

$$\underline{R}_B = \frac{\cos(35-45) * \cos(21) * \sin(86) + \left(\frac{\pi}{180}\right) * 86 * \sin(35-45) * \sin(21)}{\cos(35) * \cos(21) * \sin(106) + \left(\frac{\pi}{180}\right) * 106 * \sin(35) * \sin(21)} = 0,7385$$

Tämän jälkeen lasketaan \underline{R} arvo:

$$\underline{R} = [1 - 0,249] * 0,7385 + 0,249 * \left[\frac{1 + \cos(45)}{2} \right] + 0,3 * \left[\frac{1 - \cos(45)}{2} \right] = 0,811$$

Viimein saadaan laskettua arvioitu keskimäärin heinäkuussa saatu säteilyn määrä kaltevalle tasolle:

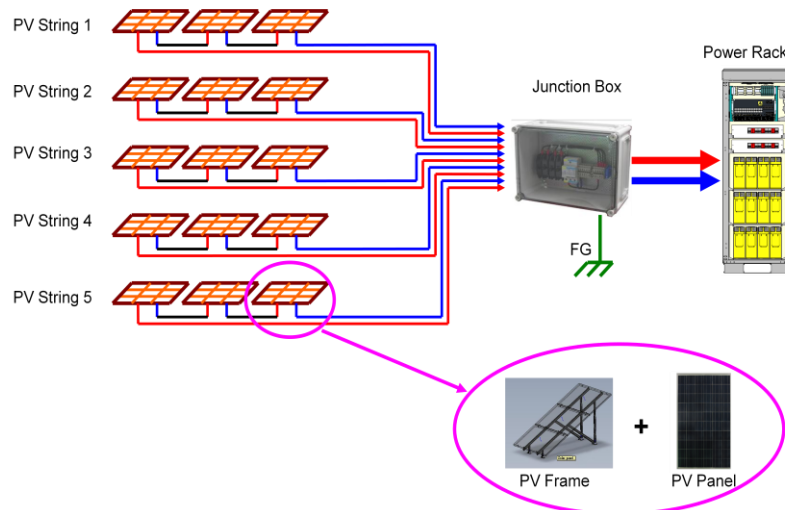
$$H_{\text{tot.}} = \underline{R} * H = 0,811 * 7\,889,3 \text{ Wh/m}^2 = 6399 \text{ Wh/m}^2$$

Järjestelmässä käytetyt aurinkopaneelit pudottavat vielä paneeleille tulleen säteilyn määrästä hyötykäyttöön saadun säteilyn määrää. Nyt voidaan kirjoittaa yhtälö 49, joka

on tietyssä kuukaudessa keskimäärin päivän aikana saatu energian määrä A pintaalallisella paneelistolla.

$$W_{PV,tot.ave.per.day} = A * H_{tot.} * \eta_{PV} \quad (49)$$

4.7 Aurinkopaneelien kytkeytyminen järjestelmään



Kuva 20. Aurinkopaneelien kytkeminen järjestelmään [4.]

Aurinkokennojen kytkeminen tapahtuu saman tyylisesti kuin akkujenkin. Niitä voidaan kytkeä sarjaan, jolloin jännitettä saadaan suuremmaksi ja rinnankytkennällä saadaan virtaa kasvatettua. Paneelisto kytketään liitântälaatikon tyypillisesti eli *Junction boxiin*. Liitântälaatikon jälkeen jännite täytyy saada järjestelmään sopivaksi. Tätä varten ennen järjestelmäkiskoon liittämistä aurinkokennojen tuottama energia käytetään aurinkolataajan kautta. Aurinkolataajan avulla saadaan säädettyä haluttu ulostulojännite ja maksimivirta järjestelmän vaatimusten mukaisesti.

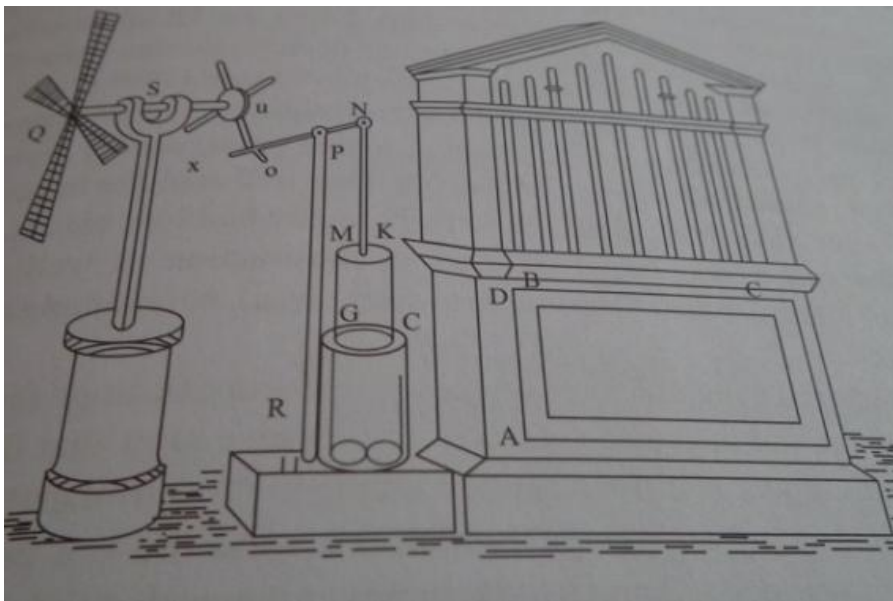
5 Tuulienergia

Tuulivoimassa käytetään hyväksi tuulen kineettistä energiaa. Tuuli syntyy ilmanpaineerojen seurauksena. Paine-erot pyrkivät tasoittumaan, jolloin korkeammasta paineesta lähtee siirtymään ilmaa matalampaan paineeseen. Ilmanpaine-erot syntyvät puolestaan pääosin auringonpaisteen lämmittäessä epätasaisesti ilmaa eri puolilla maapalloa. Lämmin ilma on kylmää ilmaa harvempaa, jolloin se lähtee nousemaan ylöspäin ja laskeutuu toiselle alueelle viilennyttyään. Alueelle, mistä ilma on lämmön takia noussut ja

siirtynyt muualle, jää matalapaine. Puolestaan sinne minne jäähtynyt ilma laskeutuu, syntyy korkeapaine.

5.1 Tuulienergian käyttö

Historian ensimmäinen tiedossa oleva tuulienergiaan perustuva järjestelmä on kreikkalaisen Hero of Alexandrian tekemä tuulimylly, kuvassa 25. Heron uskotaan eläneen välillä vuosisata ennen Kristusta tai vuosisata Kristuksen jälkeen. [15, s. 11.]



Kuva 21. Hero of Alexandrian tuulimylly [15, s. 11.]

Nykypäivänä tuulienergialla voidaan tehdä sähköä erilaisten tuuliturbiinien avulla. Tuuliturbiinit toimivat samalla periaatteella kuin ensimmäiset tuulimyllytkin. Tuulen avulla pyöritetään vain roottoria. [15, s. 2 - 5.]

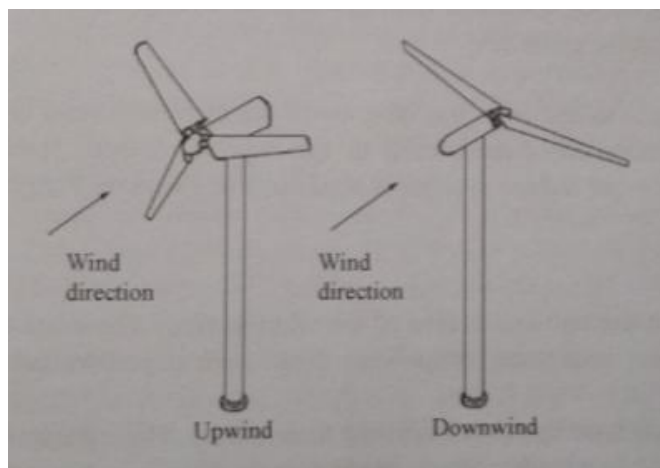
Tuulienergiaa käytettäessä on samoja hyötyjä ja haittoja, kuin aurinkoenergiaakin käytettäessä. Hyvänä puolena on saasteettomuus tuuliturbiinien valmistus, kuljetus ja asennusvaiheen jälkeen, mutta heikkona puolena on sen tehontuoton epäsäännöllisyys. Koska tehoa tulee eri aikoina eri määriä, joudutaan tuulesta saatua sähköä varastoi-
maan.

Koska tuulivoimaa käytettäessä käytetään ilman kineettistä energiaa hyödyksi, on tuuliturbiinissa liikkuvia osia. Liikkuvien osien myötä todennäköinen huoltamistarve kasvaa

verrattuna kiinteisiin osiin. Lisäksi suurilla tuulenopeuksilla tuuliturbiinit tuottavat ääntä, joka saattaa vaikuttaa tietyillä sijainneilla ongelmia jos esimerkiksi lähellä on paljon asutusta.

5.2 Modernit tuuliturbiinit

Modernit tuuliturbiinit ovat pääsääntöisesti kaksi- tai kolmilapaisia. Tuuliturbiinit on jaettu ylätuuli- ja alatuuliturbiineihin. Kuvassa 22 esitellään näiden kahdet erilaisen turbiinin ero.

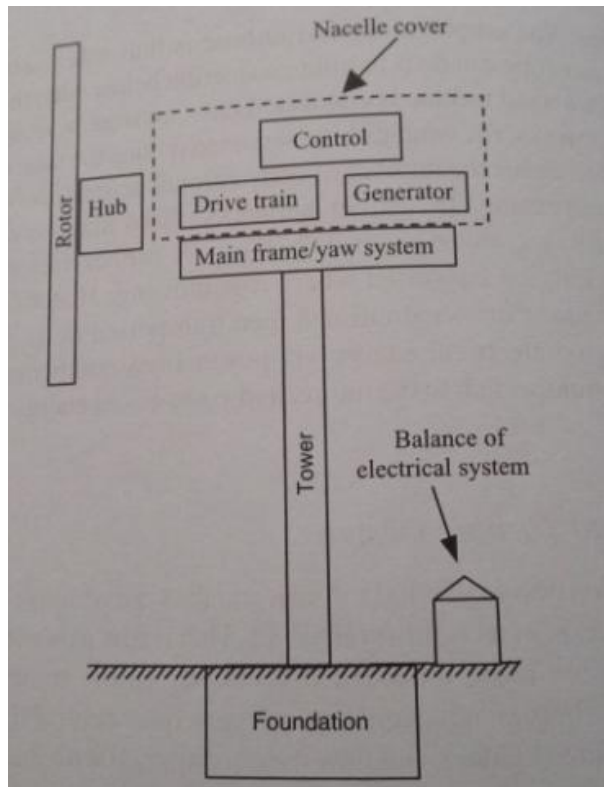


Kuva 22. Ylä- ja alatuuliturbiinit [15, s. 3.]

Kuvassa 22 vasemmanpuolinen tuuliturbiini on ylätuuliturbiini ja oikeanpuoleinen puolestaan alatuuliturbiini.

Tuuliturbiini koostuu:

- roottorista, siivistä
- pyörimisakselista, vaihdelaatikosta, mekaanisesta jarrusta ja generaattorista
- staattorista
- tornista
- ohjausyksiköstä
- johdotuksesta ja muuntajasta.



Kuva 23. Tuuliturbiinin rakenne [15, s. 4.]

5.3 Tuulienergialla sähköä

Tuuliturbiinit tuottavat sähköä roottorin ja staattorin avulla samalla tavalla kuin generaattoritkin. Erona generaattoriin on pyörimisliikkeen saaminen tuulen kineettisestä energiasta, kun generaattorissa pyörimisliike saadaan aikaiseksi polttamalla polttoainetta.

Tuuli pyörittää siipien avulla roottoria jossa on magneetteja. Magneetit pyörivät staattorin sisällä, jossa on keloja. Magneettikentän muutoksen seurauksena keloihin indusoituu jännite, joka voidaan johtimilla johtaa kuormalle.

Tuulen avulla saatu sähköteho on suurimmaksi osaksi riippuvainen tuulen nopeudesta. Suuria tehoja ruvetaan saavuttamaan vasta suurilla tuulen nopeuksilla, jonka takia tuuliturbiinit tulee sijoittaa paikkoihin, jossa tuulella on esteetön kulku ja se pääsee keräämään suuria nopeuksia. Käytännössä tämä tarkoittaa meren rantoja, korkeita paikkoja ja tasaisia puuttomia alueita. [15 s. 2 - 6.]

Tuulen potentiaalinen teho laskea seuraavan yhtälön 50 avulla:

$$P_{\text{tuuli}} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} * v^2 \quad (50)$$

$\frac{dm}{dt}$ on $\rho_{\text{ilma}} * A_{\text{turbiini}} * v$

Nyt yhtälö voidaan kirjoittaa muotoon:

$$P_{\text{tuuli}} = \frac{1}{2} * \rho_{\text{ilma}} * A_{\text{turbiini}} * v^3$$

ρ_{ilma} on ilman tiheys [kg/m^3]

A_{turbiini} on siipien pyyhkeisemä pinta-ala [m^2]

v on tuulen nopeus [m/s]

Potentiaalisesta tuulen tehosta saadaan maksimissaan käyttöön vain 59,26 %. Tämä rajoitus tulee Betzin lain mukaan, joka esitellään yhtälönä 51. Moderneilla tuuliturbiineilla saadaan n. 45 %:n hyötysuhteita parhaimmillaan. [15 s. 32 - 33, s. 92 - 95.]

Turbiinilla saatu sähköteho voidaan laskea yhtälöllä 52. Täytyy ottaa huomioon, ettei hyötysuhde pysy vakiona eri tuulenopeuksilla. Järjestelmässä käytettävien tuuliturbiinien hyötysuhteet erilaisilla tuulenopeuksilla täytyy tarkastaa ennen lopullista mitoitusta. Kuvassa 24 (ks. seuraava sivu) on tyypillinen ulostulotehonkäyrä, jossa on erikseen annettu myös tuulen teho.

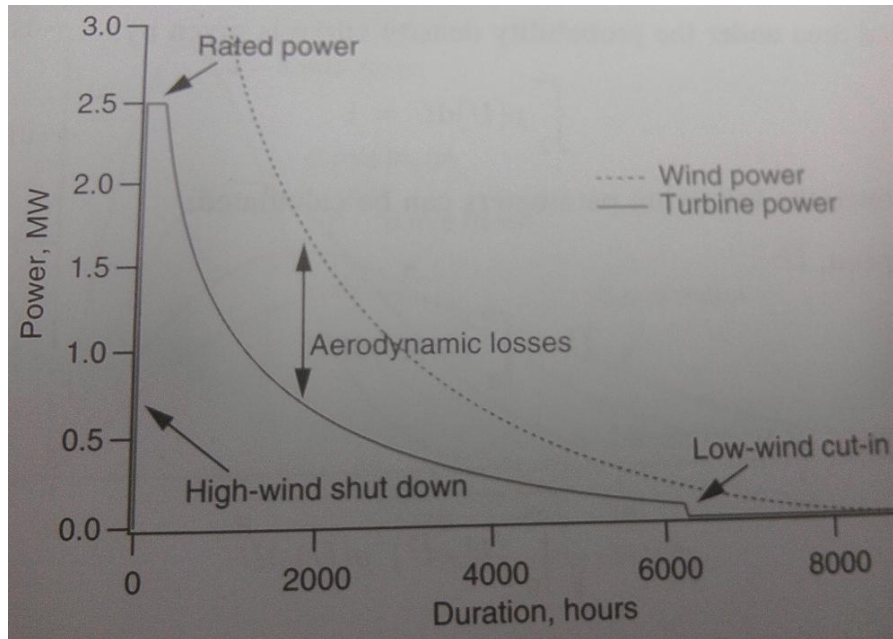
$$C_{p,\text{max}} = \frac{16}{27} = 0,5926 \quad (51)$$

$$P_{\text{turbiini}} = \frac{1}{2} * \rho_{\text{ilma}} * A_{\text{turbiini}} * v^3 * \eta_{\text{turbiini}} \quad (52)$$

Vielä ennen kuin sähköteho saadaan kuormalle, tiputtaa hyötysuhdetta johtimien sisäinen resistanssi, DC järjestelmissä konvertterin käyttö ja liitäntäterminaalien resistanssi. Kaikki järjestelmän hyötysuhteeseen vaikuttavat tekijät voidaan merkitä η_{tot} .

Tällöin kuoman saama kokonaisteho tuuliturbiinista voidaan laskea yhtälöllä 53:

$$P_{\text{turbiini.tot.}} = \frac{1}{2} * \rho_{\text{ilma}} * A_{\text{turbiini}} * v^3 * \eta_{\text{tot.}} \quad (53)$$



Kuva 24. Tyypillinen ulostulotehokäyrä ajan funktiona.

Tuuliturbiinin tuottama energia saadaan laskettua integroimalla hetkellisiä tehonarvoja ajan funktiona yhtälön 54 mukaan:

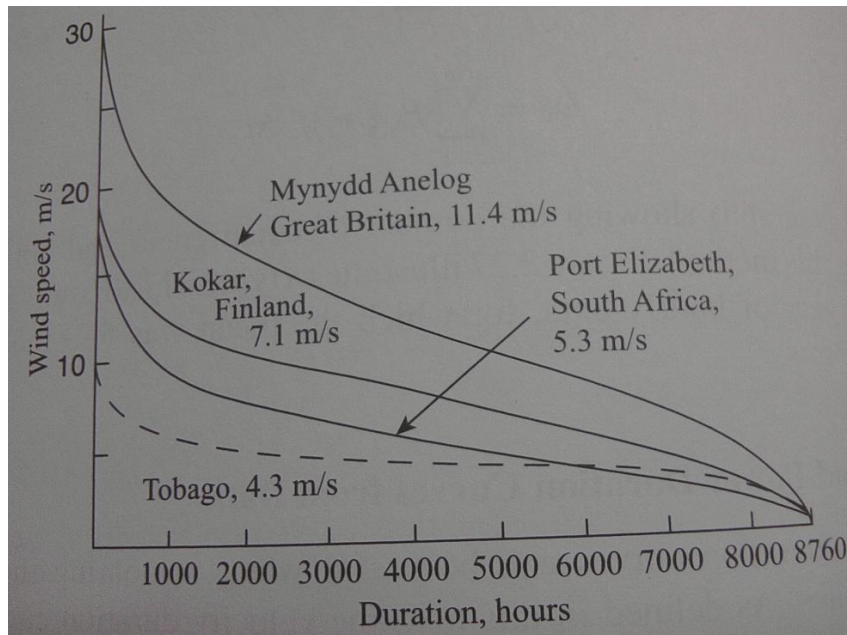
$$W_{\text{turbiini}} = P_{\text{turbiini.tot.}} * t \quad (54)$$

$P_{\text{turbiini.tot.}}$ on turbiinin avulla saatu teho [W]

t on aika [h]

Tällöin kokonaisenergia voidaan laskea summaamalla hetkellisiä arvoja yhteen:

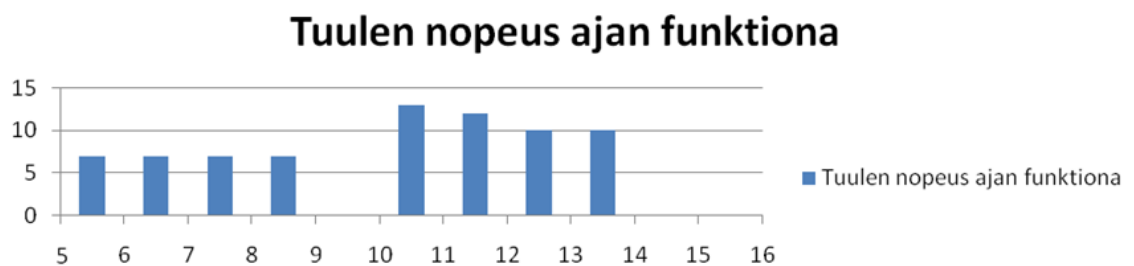
$$W_{\text{turbiini}} = P_1 * t_1 + P_2 * t_2 + \dots + P_n * t_n \quad [15.]$$



Kuva 25. Tyypillisiä tuulennopeuden arvoja vuoden aikana eri sijainneissa.

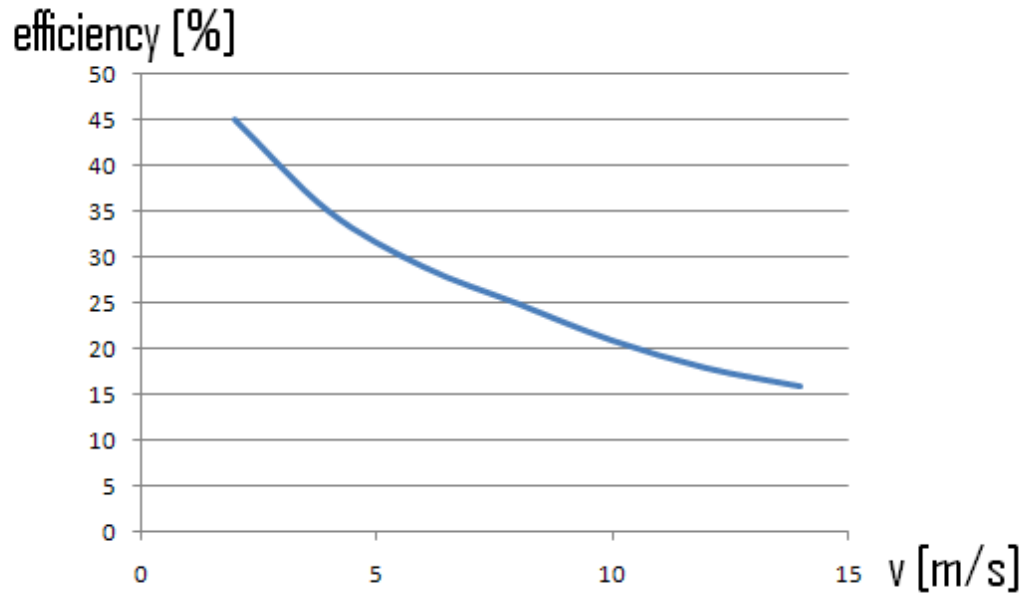
Tuulennopeuden arvoja voidaan etsiä erilaista lokerista, joita on kerätty vuosien aikana. Kuvassa 25 on esitelty tyypillisiä tuulennopeuksia eri paikoissa vuoden aikana. Kuten kuvasta voidaan nähdä, on suuret tuulennopeudet epätodennäköisempiä kuin pienemmät.

Esimerkiksi, jos käytetään kuvan 26 mukaisia tuulennopeusarvoja järjestelmässä, jossa lapojen pyyhkäisemän ympyrän halkaisija on 6 metriä, mittaushetkellä ilmantiheys $\rho_{\text{ilma}} = 1,225 \text{ kg/m}^3$ ja järjestelmän kokonaishyötysuhde menee kuvan 27 mukaisesti



Kuva 26. Tuulennopeus ajan funktiona

Kuvassa 26 y-akseli on tuulen nopeus v [m/s], ja x-akseli on kellonaika.



Kuva 27. Tuuliturbiinin hyötysuhde tuulennopeuden funktiona.

Tuuliturbiinin siipien pyyhkäisemän ympyrän halkaisijan avulla voidaan laskea ympyrän pinta-ala yhtälöllä 55:

$$A_{\text{ympyrä}} = \pi * r^2 \quad (55)$$

r on ympyrän säde [m]

jolloin kyseisen tuuliturbiinin siipien pyyhkäisemäksi pinta-alaksi saadaan:

$$A_{\text{ympyrä}} = \pi * \left(\frac{6\text{ m}}{2}\right)^2 = 28,274 \text{ m}^2$$

Nyt voidaan laskea kello 5-16 saatu kokonaisteho integroimalla tuulennopeuden ja ajan mukaan:

$$\begin{aligned} W_{\text{turbiini}} = & \left(\frac{1}{2} * 1,225\text{kg/m}^3 * (7\text{m/s})^3 * 28,274\text{m}^2 * 0,23\right) * 4\text{h} + \\ & \left(\frac{1}{2} * 1,225\text{kg/m}^3 * (13\text{m/s})^3 * 28,274\text{m}^2 * 0,17\right) * 1\text{h} + \\ & \left(\frac{1}{2} * 1,225\text{kg/m}^3 * (12\text{m/s})^3 * 28,274\text{m}^2 * 0,18\right) * 1\text{h} + \\ & \left(\frac{1}{2} * 1,225\text{kg/m}^3 * (10\text{m/s})^3 * 28,274\text{m}^2 * 0,21\right) * 2\text{h} \end{aligned}$$

$$=5,465 \text{ Kwh} + 6,468 \text{ kWh} + 5,387 \text{ kWh} + 7,273 \text{ kWh} = 24,59 \text{ kWh}$$

Todellisuudessa tuulen nopeuden arvot vaihtelevat todennäköisesti lyhyemmillä aikaväleillä, sekä arvioitaessa tulevaisuuden tehonarvoja, voidaan käyttää tuuli-logeista kerätyjä keskimääräisiä tuulennopeuksia. Riippuen järjestelmästä tuulivoiman huipputehoa voidaan nostaa lisäämällä tuuliturbiinien määrää. Kuten aurinkoenergiankin tuotossa, täytyy ottaa huomioon huipputehon aikana akuston latausvirran suuruus. Riippuen akuston virtakestoisuudesta, täytyy tietyissä tilanteissa huipputehosta leikata osa pois, niin ettei akustolle sallittu latausvirta ylity. Hyötynä tämän kaltaisissa ylimitoituksissa on, että myös pienemmillä tuulennopeuksilla saadaan tuotettua riittävä määrä energiaa kuorman tarpeisiin.

Jos edelliseen esimerkkilaskuun halutaan ottaa tarvittavan akkukapasiteetin määrä laskuihin, kun kuorman hetkellinen tehontarve on 2 kW.

Kuorma kuluttaa energiaa 11 tunnin aikana:

$$11 \text{ h} * 2 \text{ kW} = 22 \text{ kWh}$$

Oletetaan, että ennen tilanteen alkua akut on ladattu täyteen varaukseen. Ensimmäisen 5 tunnin aikana akkuja puretaan:

$$5,465 \text{ kWh} / 4\text{h} = 1,36625 \text{ kW}$$

$$2 \text{ kW} - 1,36625 \text{ kW} = 0,63375 \text{ kW}$$

$$4 \text{ h} * 0,63375 \text{ kW} = 2,535 \text{ kWh}$$

$$2,535 \text{ kWh} + (2 \text{ kW} * 1 \text{ h}) = 4,535 \text{ kWh}$$

Seuraavan tunnin aikana tuulennopeus on riittävän suuri, jotta akkuja voidaan ladata. Oletetaan, että akkujen hyötysuhde ladatessa on 0,9:

$$6,468 \text{ kWh} - 2 \text{ kWh} = 4,468 \text{ kWh}$$

Edellä lasketun verran energiaa jää kuorman jälkeen akuille.

Jos järjestelmän jännite on 57 V silloin kun akkuja ladataan, tulee latausvirraksi:

$$4,468 \text{ kW} / 57 \text{ V} = 78,4 \text{ A}$$

Akkuja saadaan ladattua:

$$0,9 * 4,468 \text{ kWh} = 4,02 \text{ kWh}$$

jolloin varaustasoksi tulee:

$$4,02 \text{ kWh} - 4,535 \text{ kWh} = -0,5138 \text{ kWh}$$

Seuraavan tunnin aikana tuulennopeus on jälleen riittävä, jolloin akusto saadaan ladattua kokonaan. Viimeisen kahden tunnin aikana akuista puretaan:

$$2 \text{ h} * 2 \text{ kW} = 4 \text{ kWh}$$

Suurin kapasiteetti kyseisessä tilanteessa vaaditaan akulta ensimmäisen 5 tunnin aikana, jolloin kapasiteetin suuruudeksi tarvitaan:

$$Q_{\text{batt.}} = 4,535 \text{ kWh} / (24 * 2,00\text{V}) = 94,5 \text{ Ah}$$

Kun oletetaan, ettei akuston jännitetasoja tiedetä ja valitaan laskua varten jännitteeksi 2 V/kenno. Tällöin kapasiteetin arvo on todennäköisesti ylimitoitettu, koska 2 V:n nimellisjännitteisissä kennoissa jännitteiden arvot ovat yli 2 V, ja vain täysin puretun akun arvo voidaan olettaa olevan 2 V. Suurin latausvirta laskettiin edellä, jolloin akuilta vaaditaan laskettu kapasiteetti ja 78,4 A:n latausvirtakestoisuus.

5.4 Tuuliturbiinin kytkeytyminen järjestelmään

Tuulivoimalla saatava sähkö on vaihtosähköä. Tästä syystä jännite täytyy tasasuunnata konverterilla, ennen kuin se voidaan kytkeä järjestelmän kiskoon. Kuten aurinkosähkön kanssa täytyy tasasähkön jännitetaso saada järjestelmään sopivaksi. Tätä varten tuuliturbiinin jälkeen vaihtosähkö johdetaan tuulilaturille, jolla vaihtosähkö saadaan tasasähköksi ja samalla määrättyä laturille ulostulojännitteenarvo.

6 Generaattori

Generaattori on laite, jonka pyörimisliikkeen avulla liike-energia voidaan muuttaa sähköenergiaksi. Generaattori koostuu kahdesta pääosasta: staattorista ja roottorista. Staattori on paikoillaan oleva osa, jonka sisä- tai ulkopuolella roottori pyörii. Staattoriin on käämitty käämejä, joihin indusoituu jännite, ja sitä kautta syntyy virtaa. Jännitteen muodostuminen johtuu magneettikentänmuutoksesta staattorin käämeissä, joka indusoituu niihin. Staattorin käämit pyrkivät vastustamaan muutosta, jonka vuoksi ne muodostavat vastakkaisuuntaisen voiman. Tätä ilmiötä kutsutaan sähkömotoriseksi voimaksi. Voiman suuruuteen vaikuttaa staattorissa olevien käämien johtimen kierrosluku ja johdinsilmukoiden pinta-ala siten, että johdinkierrosten lukumäärä ja silmukoiden pinta-ala kasvattaa sähkömoottorista voimaa. Indusoitunut sähkömoottorinen voima voidaan laskea yhtälöllä 56:

$$e = - N * A * \frac{d}{dt} * B \quad (56)$$

e on indusoitunut sähkömotorinen voima [V]

N on johdinsilmukoiden lukumäärä

A on johdinsilmukan pinta-ala [m^2]

B on magneettivuon tiheys [$T = 1 \text{ Wb}/m^2$]

Jotta magneettikenttä muuttuisi staattorin käämeille, pyöritetään roottoria. Roottorin pyörimisenergia saadaan tuotettua polttamalla polttoainetta moottorissa, jossa polttoaineen polttamisesta syntyvä tilavuudenmuutos sylintereissä ohjataan väännöksi pyörimisakselille. Tässä toimenpiteessä menee suuri osa polttoaineen kemiallisesta energi-

asta hukkaan erilaisten pyörimistä vastustavien tekijöiden vuoksi, osa siirtyy lämmöksi ympäröivään tilaan, osa hyödyttömäksi moottorin liikkeeksi ja sitä kautta ääneksi.

Järjestelmän sijainnista ja etenkin generaattorin sijainnista johtuen, voidaan generaattorin ominaisuuksia mietittäessä pitää melutasoa hyvinkin tärkeänä ominaisuutena. Lisäksi on ilmeistä, että mitä pienempi melutaso on, sitä vähemmän generaattori tärisee ja näin ollen myös hukkaan menevä osuus on pienempi. Täytyy kuitenkin muistaa, että generaattorin melutasoa voidaan laskea vaimentamalla vain syntynyttä ääntä erilaisilla koteloinneilla ym. jolloin todellisuudessa ylimääräistä tärinää syntyy yhtä paljon, mutta äänen pääsy ulkopuolelle on estetty.

Pyörivän akselin päässä on magneetit, jotka pyörivät staattorin sisällä tai ulkopuolella. Kun staattorin käämien asettelu ja magneettien pyörimisnopeus ovat halutut, saadaan tietyn taajuista ja tehoista sähköä. Hybridijärjestelmän kannalta taajuudella tai vaihtosähkön jännitteen arvolla ei ole sen suurempaa merkitystä, koska se tasasuunnataan, ennen järjestelmään pääsyä. Lisäksi ATS:n toiminta estää verkon kanssa samanaikaisen kytkeytymisen, jolloin verkon taajuudesta tai jännitteen suuruudella ei ole merkitystä generaattorin käyttöä mietittäessä.

6.1 Generaattorin käyttö

Generaattori toimii hybridijärjestelmässä pääsääntöisesti varavoimalähteenä. Verkollisissa järjestelmissä generaattoria ei pyöritetä kuin tilanteissa, joissa uusiutuvat energianlähteet eivät tuota tarpeeksi energiaa, ja sähköverkko on poissa käytöstä. Tämä johtuu seikoista, että generaattori tarvitsee toimiakseen polttoainetta, jota kuluu pyörittäessä sitä. Polttoaine luonnollisesti kuluu ja näin olleen polttoainesäiliötä täytyy uudelleentäyttää sitä mukaan, kun polttoainetta kuluu. Tästä syystä järjestelmän kyky toimia itsenäisenä huonontuu. Toisena seikkana, joka puoltaa mielummin verkon käyttöä, on generaattorilla tuotetun energian hinta. Energian hinta määräytyy hyötysuhteen ja polttoaineen hinnan mukaan. Nykyisin korkeat öljynhinnat ja suhteellisen huonot hyötysuhteet, etenkin pienemmillä generaattoreilla nostavat tuotetun energian hintaa korkealle. Korkean energianhinnan vuoksi ylimitoitetuilla generaattoreilla kannattaa myös ladata akustoa, vaikka se viekin uusiutuvan energian varastoimismahdollisuuksia.

Generaattori täytyy jokatapauksessa olla järjestelmässä, jossa kuormana toimii kriittinen kuorma. Jos kuorman ei ole sallittua katketa välillä, ei voi luottaa siihen, että sähköverkko ja uusiutuvien energianlähteiden energiantuotto ei olisi samaan aikaan poikki tilanteessa, jossa akustokin on purettu tyhjäksi. Todennäköisyys tämän kaltaisiin tapahtumiin on pieni, etenkin paikoissa, missä sähköverkko on hyvin luotettava. Huonoimmassa tilanteessa generaattoria ei tarvita koko järjestelmän elinaikana kertaa-kaan.

6.2 Generaattorin mitoitus

Generaattorin rakenteesta ja fysikaalisista ilmiöistä johtuvista tehon tuoton suuruuksista ei oteta tässä työssä kantaa, koska oletetaan, ettei generaattoria rakenneta itse. Käytetään muiden valmistajien valmiiksi antamia pätötehon ja näennäistehon suuruuksia hyödyksi.

Generaattori täytyy minimissään mitoittaa osakuormalle järjestelmissä, joissa generaattorin käynnistyttyä irroitetaan PLD-releellä osa kuormasta pois. Tällöin mitoitus tehdään yhtälön 57 tai 58 mukaisesti:

$$P_{\text{gene}} = \frac{P_{\text{load}} - P_{\text{unimportant.load}}}{\eta_{\text{rect.}}} \quad (57)$$

$$S_{\text{gene}} = \frac{P_{\text{load}} - P_{\text{unimportant.load}}}{\cos \varphi_{\text{gene}} * \eta_{\text{rect.}}} \quad (58)$$

P_{gene} on generaattorin pätöteho [W]

S_{gene} on generaattorin näennäisteho [VA]

P_{load} on kuorman teho [W]

$P_{\text{unimportant.load}}$ on irroitettavan kuorman teho [W]

$\eta_{\text{rect.}}$ on tasasuuntaajien hyötysuhde [%]

Vastaavasti järjestelmissä, joissa releellä ei irroiteta osaa kuormasta ollenkaan, voidaan yhtälöjen 57 ja 58 mukaan laskea sijoittamalla irroitettavan kuorman tehon arvoksi 0.

Mikäli generaattorilla halutaan ladata myös akustoa, täytyy lataukseen kuluvaan tehon suuruus lisätä kuorman tehontarpeeseen yhtälöjen 59 ja 60 mukaisesti. Yhtälössä voi-

daan soveltaa myös samankaltaista osakuorman erotusta käyttämällä yhtälöjä 57 ja 58 hyödyksi:

$$P_{\text{gene}} = \frac{(P_{\text{load}} - P_{\text{unimportant.load.}}) + \frac{W_{\text{batt.tot.recharge}}}{t_{\text{recharge}}}}{\eta_{\text{rect.}}} \quad (59)$$

$$S_{\text{gene}} = \frac{(P_{\text{load}} - P_{\text{unimportant.load.}}) + \frac{W_{\text{batt.tot.recharge}}}{t_{\text{recharge}}}}{\cos \varphi_{\text{gene}} * \eta_{\text{rect.}}} \quad (60)$$

P_{gene} on generaattorin pätöteho [W]

S_{gene} on generaattorin näennäisteho [VA]

P_{load} on kuorman teho [W]

$P_{\text{unimportant.load.}}$ on irroitettavan kuorman teho [W]

$W_{\text{batt.tot.recharge}}$ on kuormaan ladattavan energian määrä [Wh] (ks. hybridijärjestelmän mitoitus)

t_{recharge} on lataukseen käytettävä aika [h]

$\eta_{\text{rect.}}$ on tasasuuntaajien hyötysuhde [%]

Generaattorin tehon suuruus osataan nyt laskea AC-lähteillä ladatessa, osakuorman irroituksella ja koko kuorman syötössä. Tämän lisäksi täytyy vielä ottaa huomioon generaattoria valitessa eri tehontarpeiden mukaan, ettei generaattori ole täysin ylimitoitettu, jolloin hyötysuhde laskee rajusti. Täytyy ottaa myös huomioon, ettei generaattori ole mitoitettu ominaisuuksien puolesta liian tarkasti lasketun tehon mukaan, sillä generaattorin käyminen saattaa muuttua epätasaisemmaksi, jos sitä pyöritetään kokoajan maksimiteholla, sekä liitäntöjen ja johtimien vastukset saattavat nostaa tarvittavan kokonaistehon määrää.

Valmistajien arvojen ja tietojen mukaan generaattori valitaan olemaan vähän yli lasketun tehon arvon yli. Jos generaattorin käyttäytymisestä erilaisilla kuormituksilla ei ole yhtään tietoa, voidaan käyttää esimerkiksi 1,5 * laskettu tehonarvo. Minimissään generaattori voidaan mitoittaa tasasuuntaajien käynnistymisvaiheessa syntyvien tehopiikkien mukaan (ks. hybridijärjestelmän mitoitus –osio, yhtälöt 72, 73).

6.3 Generaattorin kytkeytyminen järjestelmään

Generaattori voidaan kytkeä suoraan tasasuuntaajille järjestelmässä, joissa ei ole sähköverkkoa kytkettynä. Vaihtoehtoisesti generaattori voidaan kytkeä järjestelmän AC-terminaaleihin, joiden kautta sähkö johdetaan tasasuuntaajille. Järjestelmässä, jossa on generaattorin lisäksi AC-lähteenä myös sähköverkko, täytyy generaattori kytkeä automatic transfer switchin eli ATS:n kautta tasasuuntaajille.

7 Hybridijärjestelmän mitoitus

Hybridijärjestelmän mitoitus alkaa kartoittamalla halutut/mahdolliset energianlähteet: kuinka paljon kokonaistehonmäärästä halutaan milläkin tehonlähteellä tuottaa; kuinka kauan järjestelmän täytyy toimia akkujen avulla; tarvitaanko varavoimanlähteeksi generaattori vai onko kuorman katkeaminen sallittu tietyissä tilanteissa?

Kun alkukartoitus järjestelmän rakenteesta ja luonteesta on päätetty, täytyy eri energianlähteet ja järjestelmän komponentit mitoittaa.

7.1 Hybridijärjestelmän mitoittamiseen tarvittavat yhtälöt

Kuorma käyttää kokonaisenergia voidaan laskea seuraavasti:

$$W_{\text{Load.tot}} = t_{\text{Load}} * P_{\text{Load}} \quad (61)$$

t_{Load} on kuorman päälläoloaika [h]

P_{Load} on kuorman tehontarve [W]

Akuista purettu energia lasketaan:

$$W_{\text{batt.tot}} = t_{\text{backup}} * P_{\text{Load}} \quad (4)$$

t_{backup} on akkujen purkuaika [h]

P_{Load} on kuorman tehontarve [W]

Akuista puretun energian perusteella voidaan laskea akkujen tarvittava yhteiskapasiteetti $Q_{\text{Batt.tot}}$. Koska kuorman kuluttama kokonaisteho voidaan laskea ajan ja tehon

tulona, voidaan kokonaistehosta saada Ah jakamalla se jännitteellä. Tällöin akuston kapasiteetti voidaan laskea yhtälöllä 6:

$$Q_{\text{Batt.}} = \frac{W_{\text{batt.tot}}}{U_{\text{batt.}}} \quad (6)$$

$U_{\text{batt.min.}}$ on Akkujen jännitetaso (ks. akku-osiosta tarkemmin) [V]

Akkujen kokonaiskapasiteetin perusteella voidaan määrittää rinnankytkettyjen akkujen lukumäärä yhtälöllä 7. Akkujen määrään vaikuttaa akun kapasiteetin lisäksi sen hyötysuhde purettaessa ja akun kapasiteetista purettavan osuuden määrä:

$$n_{\text{batt.quantity}} = \frac{Q_{\text{batt.}}}{Q_{\text{per.batt.}} * \eta_{\text{batt.}} * (q_{\text{ave.charged}} - q_{\text{depth}})} \quad (7)$$

$Q_{\text{per.batt.}}$ on yhden rinnan olevan akun kapasiteetti [Ah]

$\eta_{\text{Batt.}}$ on akun hyötysuhde purettaessa [%]

$q_{\text{ave.charged}}$ on keskimääräinen saavutettu lataustaso [%]

q_{depth} on purkauksen salittu syvyys [%]

Akkujen lataamiseen käytetty teho voidaan laskea yhtälön 62 mukaan. Akkujen lataamiseen käytetty teho on sama kuin sieltä purettu kokonaisteho, mutta koska lataamisessa syntyy häviöitä, täytyy ne ottaa huomioon. Tämä tehdään lisäämällä akun latauksen hyötysuhteen erotus 100 %:sta täyteen sataan prosenttiin:

$$W_{\text{batt.tot.recharge}} = (1 + (1 - \eta_{\text{Batt.recharge}})) * W_{\text{batt.tot.}} \quad (62)$$

$\eta_{\text{Batt.recharge}}$ on akun hyötysuhde latauksessa [%]

Nyt tiedetään, että kuorma kuluttaa ajassa t_{Load} $W_{\text{Load.tot.}}$:n verran wattitunteja. Akut syöttävät kuormalle tehoa t_{backup} ajan verran kuorman käyntiajasta. Muille tehonlähteille jää tällöin vuorokaudessa $W_{\text{power.resource}}$:n verran wattituntien syöttämistä.

$$W_{\text{power.resource}} = (t_{\text{Load}} - t_{\text{backup}}) * P_{\text{Load}} \quad (63)$$

Ja koska akut ovat purettu tiettyyn pisteeseen, täytyy niiden lataaminen myös suorittaa muilla tehonlähteillä. Tällöin muille tehonlähteille tulee kokonaistehoksi:

$$W_{\text{powers.resource.tot}} = W_{\text{power.resource}} + W_{\text{batt.tot.recharge}} \quad (64)$$

Hybridijärjestelmässä voidaan käyttää yhtenä tehonlähdemuotona uusiutuvaa energiaa. Jotta uusiutuva energianlähde voitaisiin mitoittaa, täytyy tietää, kuinka suuren osan kokonaistehosta sillä halutaan pystyä syöttämään.

Esimerkiksi, jos päädytään järjestelmään, jossa kokokuormansyöttö halutaan toteuttaa uusiutuvalla energialla, on uusiutuvan energianlähteen kokonaisteho oltava yhtäsuuri kuin $W_{\text{power.resource.tot}}$. Mikäli järjestelmässä halutaan vain osa kuormansyötöstä hoitaa uusiutuvalla energialla, voidaan lisätä yhtälöön 64 kerroin $k_{\text{renewable}}$. Kertoimen avulla voidaan määrittellä uusiutuvan energianlähteen haluttu maksimiosuus kokonaistehon määrästä. Kun uusiutuvan energianlähteen osuus kuorman tarvitsemasta kokonaistehosta poistetaan, jää jäljelle muilla tehonlähteillä suoritettava osuus.

$$\begin{aligned} W_{\text{renewable}} &= (W_{\text{power.resource}} + W_{\text{batt.tot.recharge}}) * k_{\text{renewable}} \quad (65) \\ &= W_{\text{power.resource.tot}} * k_{\text{renewable}} \end{aligned}$$

$k_{\text{renewable}}=1$, järjestelmä pystyy optimaalisissa oloissa toimimaan pelkällä uusiutuvalla energialla

$k_{\text{renewable}}<1$, osa kuorman vaatimasta tehosta tuotetaan muulla kuin uusiutuvalla energialla.

$k_{\text{renewable}}>1$, järjestelmä pystyy toimimaan pelkän uusiutuvan energianlähteen avulla optimiolosuhteita huonommissakin olosuhteissa.

Nyt tiedetään kuinka paljon wattitunteja uusiutuvan energianlähteen täytyisi pystyä tuottamaan. Tämän tiedon avulla, sekä aikaisemmissa osioissa esiteltujen auringonsäteilyllä tuotetun sähkötehon laskentayhtälöillä, tuulen avulla tuotetun sähkötehon laskentayhtälöillä ja erilaisilla tuuli-lokeilla, voidaan toteuttaa uusiutuvan energianlähteen mitoitus.

Uusiutuvat energianlähteet kytketään erilaisten tuuli- ja aurinkolataajien kautta järjestelmään. Nyt täytyy vielä laskea, kuinka monta laturia järjestelmään tarvitaan, tasasuuntaajien määrä, sekä generaattorin mitoitus.

Tuuli- ja aurinkolataajille annetaan valmistajien sivuilla maksimiulosantotehot. Tällöin suurin latureiden kappalemäärä tarvitaan silloin, kun uusiutuvan energianlähteen hetkellisteen arvo $P_{\text{renewable.max.}}$ [W] on korkeimmillaan eli aurinkoenergiaa käytettäessä silloin kun auringonsäteily on voimakkaammillaan ja tuulienergiaa käytettäessä suurin sallittu tuulennopeus.

$$n_{\text{charger.quantity}} = \frac{P_{\text{renewable.max.}}}{P_{\text{charger.max.}}} \quad (66)$$

$P_{\text{charger.max.}}$ on lataajan maksimi ulosantoteho [W]

Uusiutuvien energianlähteiden lataajien määrä tulee pyöristää ylöspäin seuraavaksi kokonaisluvuksi. Mikäli luku pyöristetään ylöspäin, voidaan vastaavasti myös uusiutuvien energioiden valjastamiseen käytettävien laitteiden määrää vähän lisätä, jotta saadaan optimaalisissa olosuhteissa koko lataajien kapasiteetti käytettyä.

Järjestelmän tasasuuntaajien määrä voidaan puolestaan laskea yhtälöllä 67. Delta Energy Systemsin järjestelmissä laitetaan yksi tasasuuntaaja minimimäärää enemmän, jolloin yksi tasasuuntaaja voi mennä rikki ja järjestelmä toimii edelleen. Yksi ylimääräinen tasasuuntaaja mahdollistaa myös tasasuuntaajien kierrätyksen, jolloin kaikki saavat tasaisen määrän kuormitusta ja odotettu elinikä pitenee.

$$n_{\text{rectifier}} = 1 + \frac{P_{\text{load}}}{P_{\text{rectifier.max.}}} \quad (67)$$

$P_{\text{rectifier.max.}}$ on Tasasuuntaajan maksimi ulosantoteho [W]

Mikäli vaihtosähkölähteillä halutaan myös ladata akusto, täytyy tasasuuntaajien määrää kasvattaa siten, että saadaan yhtälö 68 muodostettua. Latausaikaa päätettäessä on otettava huomioon, ettei latausvirta saa ylittää akun virtakestoisuusrajaa:

$$n_{\text{rectifier}} = n_{\text{redu}} + \frac{P_{\text{load}} + \left(\frac{W_{\text{batt.tot.recharge}}}{t_{\text{recharge}}}\right)}{P_{\text{rectifier.max.}}} \quad (68)$$

P_{load} on kuorman tehontarve [W]

$W_{\text{batt.tot.recharge}}$ on akuston lataamiseen kulunut energia [Wh]

t_{recharge} on latausaika [h]

$P_{\text{rectifier.max.}}$ on tasasuuntaajan maksimiulosantoteho [W]

n_{redu} on redundanttisten tasasuuntaajien lukumäärä

Generaattorin nimellisteho annetaan usein näennäistehona S [VA]. Näennäisteho tarkoittaa generaattorin kokonaistehoa, johon kuuluu loisteho Q [var] ja pätöteho P [W]. Pätöteho ja loisteho toimivat suorakulmaisen kolmion kateetteina, joiden hypotenuusana toimii näennäisteho S . Tällöin näennäisteho S voidaan laskea kateettien pituuksien avulla ja käyttämällä cosinin ja sinin arvoja hyväksi, yhtälöjen 69 - 71 avulla:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (69)$$

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} \quad (70)$$

$$S = \frac{Q}{\sin \varphi} \quad (71)$$

φ on näennäistehon ja pätötehon välinen kulma.

Nyt voidaan kuorman tehontarpeen avulla mitoittaa generaattori yhtälön 73 (ks. sivu 67) mukaisesti. Tasasuuntaajissa tapahtuu häviöitä, jonka vuoksi generaattorin tuotama teho täytyy olla suurempi kuin kuorman tarvitsema teho, sekä tasasuuntaajien käynnistymisvaiheessa ottama virtapiikki nostavat generaattorin tehon tarvetta.

Tasasuuntaajan käynnistymisvaiheessa ottama virtapiikki ja siitä aiheutuva hetkellistehon tarpeen nousu voidaan laskea yhtälöllä 72 (ks. sivu 67, lue myös generaattoriosio). Tasasuuntaajat käynnistetään porrastetusti, jolloin kaikki järjestelmän tasasuuntaajat

eivät ota samanaikaisesti virtapiikkiä, vaan suurin tehon tarve tulee tilanteessa, jossa kuorman tarvitsemaa tehoa P_{Load} varten on käynnistetty jo kaikki muut paitsi yksi tasasuuntaaja ja viimeinen tarvittava tasasuuntaaja ottaa käynnistysvirtapiikin.

$$P_{peak} = U_{system} * I_{peak} \quad (72)$$

$$S_{gene} = \frac{[(n_{rectifier}-2)*P_{rectifier.max.}] + (P_{peak})}{\cos \varphi * \eta_{rect.}} \quad (73)$$

$\eta_{rect.}$ on tasasuuntaajan hyötysuhde [%]

U_{system} on tasasuuntaajien ulostulojännite [V]

I_{peak} on tasasuuntaajan ottama virtapiikki [A]

$n_{rectifier}$ on tasasuuntaajien määrä

Virtapiikin suuruus tasasuuntaajan käynnistymisvaiheessa määrää tasasuuntaajan tilanne. Virtapiikki johtuu tasasuuntaajan loistehokomponenteista: keloista ja kondensaattoreista. Mikäli tasasuuntaajan loistehokomponentit ovat jo valmiiksi varatut, ei käynnistyessä tapahdu virtapiikkiä. Sen sijaan, jos loistehon tarve on suurimmillaan eli loistehokomponentit ovat tyhjänä, on virtapiikki suurin.

Esimerkiksi jos halutaan toteuttaa Lissabonissa aurinkopaneelien avulla verkoton järjestelmä, joka pyörii ympäri vuoden 24 tuntia vuorokaudessa 3 kW:n teholla. Järjestelmä halutaan toteuttaa siten, että se toimisi pelkkien aurinkopaneelien avulla ympärivuoden, mutta varavoimana järjestelmässä on myös generaattori. Aurinkopaneelit on asennettu etelän suuntaan ja ne suunnataan siten, että ne ovat kohtisuorassa aurinkoa vasten, kun vuodenaika ja vuorokauden aika on otollisin ja siitä vielä $+10^\circ$ horisonttiin nähden.

Etsitään Lissabonin leveysaste:

$$L = 37,7^\circ$$

Jotta järjestelmä voisi toimia ympärivuoden, täytyy sen toimia myös huonoimmalla mahdollisella vuodenaajalla aurinkoenergian tuottamiseen nähden.

Huonoin mahdollinen aika järjestelmälle lasketaan:

$$\alpha_{\min} = 90^\circ - 37,7^\circ + (-23,45^\circ) = 28,85^\circ$$

Eli, silloin kuin deklinaatiokulma on $23,45^\circ$ eteläisellä pallonpuoliskolla.

Paras aika paneeleille on:

$$\alpha_{\max} = 90^\circ - 37,7^\circ + 23,45^\circ = 75,75^\circ$$

josta paneeleita käännetään 10° horisontin tasosta normaaliin päin:

$$\beta = (90^\circ - 75,75^\circ) + 10^\circ = 24,25^\circ$$

Lasketaan kallistetun paneelin aurinkotuntien määrä:

$$\begin{aligned} \text{Päivän pituus kallistetulla paneelilla} &= \frac{2}{15} * \cos^{-1}(-\tan(37,7^\circ - 24,25^\circ) * \tan(-23,45^\circ)) \\ &= 11,2 \text{ h} \end{aligned}$$

Näin ollen valotonta aikaa jää vuorokaudessa:

$$t_{\text{batt.}} = (24 - 11,2)\text{h} = 12,8 \text{ h}$$

Kuorma kuluttaa vuorokauden aikana:

$$W_{\text{load}} = 24\text{h} * 3 \text{ kW} = 72 \text{ kWh}$$

Tällöin aurinkopaneelien täytyy pystyä tuottamaan 11,2 h valoisana aikana 72 kWh energiaa. Akkujen kapasiteetiksi puolestaan täytyy varata 12,8 h kuormansyöttöaika.

Joulukuussa 21. päivä deklinaatiokulma on kyseiset $-23,45$. Tästä syystä lasketaan keskimäärin joulukuussa saatu säteilyn määrä horisontaaliselle pinnalle päivän aikana keskimääräisenä joulukuunpäivänä, katsotaan ilmakehän ulkopuoliselle horisontaaliselle

tasolle tullut säteily jolloin päivän aikana horisontaaliselle tasolle saatu säteily ja laskeaan keskimäärin jouluissa päivän aikana saatu säteilynteho kallistetulle tasolle.

$$h_{ss} = \cos^{-1}(-\tan(37,7^\circ) * \tan(-23,45^\circ)) = 70,41^\circ$$

$$H = \frac{24 * 956,3}{\pi} * \left[1 + 0,033 * \cos\left(\frac{360 * 344}{365}\right) \right] * \\ \left[\cos(37,7) \cos(-23,05) \sin(70,41) + \right. \\ \left. \left[\frac{\pi * 70,41}{180} \right] \sin(37,7) \sin(-23,05) \right] = 2\,949,75 \text{ Wh/m}^2$$

Ilmakehän ulkopuoliselle tasolle keskimäärin tulee:

$$H' = 15,25 \text{ MJ/m}^2 = 4\,236,11 \text{ W/m}^2$$

\underline{K}_T :n arvoksi tulee tällöin:

$$\underline{K}_T = \frac{2949,75}{4236,11} = 0,696$$

H_D/H :n arvoksi voidaan laskea:

$$H_D/H = 1,032 - 0,694 * 0,696 - 1,771 * 0,696^2 + 1,562 * 0,696^3 = 0,2177$$

$$h_{ss}' = \cos^{-1}(-\tan(37,7 - 24,25) * \tan(-23,45^\circ)) = 84,05^\circ$$

Kerroin \underline{R}_B lasketaan seuraavaksi:

$$\underline{R}_B = \frac{\cos(37,7 - 24,25) * \cos(-23,05) * \sin(84,05) + \left(\frac{\pi}{180}\right) * 84,05 * \sin(37,7 - 24,25) * \sin(-23,45)}{\cos(37,7) * \cos(-23,05) * \sin(70,41) + \left(\frac{\pi}{180}\right) * 70,41 * \sin(37,7) * \sin(-23,05)} = 1,94988$$

Nyt voidaan laskea \underline{R} kun oletetaan, että maanpinnan heijastuskerroin on 0,17:

$$\underline{R} = [1 - 0,2177] * 1,94988 + 0,2177 * \left[\frac{1 + \cos(24,25)}{2} \right] + 0,17 * \left[\frac{1 - \cos(24,25)}{2} \right] = 1,741$$

Joulukuun keskimääräisenä päivänä saadaan säteilyä:

$$H_{\text{tot.}} = 1,741 * 2\,949,75 \text{ Wh/m}^2 = 5\,135 \text{ Wh/m}^2$$

olettaen, että laskettu suoransäteilyn H arvo on realistinen.

Jos heikoimpana päivänä aurinkopaneeleille tulee aurinkotunteja edellä lasketut 11,2 h tuottamaan kuorman $W_{\text{power.resource}}$ ja lataamaan akut, jotka syöttävät heikoimpana päivänä lasketut 12,8 h kuormaa. Akuista purettu energia on

$$W_{\text{batt.tot.}} = 12,8 \text{ h} * 3 \text{ kW} = 38,4 \text{ kWh}$$

Ja sen lataamiseen tarvittu energia, kun lataushyötysuhde oletetaan 85 %:

$$W_{\text{batt.tot.recharge}} = (1 + (1 - 0,85)) * 38,4 \text{ kWh} = 44,16 \text{ kWh}$$

Kuorma kuluttaa tänä aikana:

$$W_{\text{power.resource}} = (24 - 12,8) \text{ h} * 3 \text{ kW} = 33,6 \text{ kWh}$$

Nyt uusiutuvan täytyy tuottaa joulukuun keskimääräisen päivän säteilyn arvoilla yhteensä:

$$W_{\text{renewable}} = (33,6 + 44,16) \text{ kWh} * 1 = 77,76 \text{ kWh}$$

Oletetaan aurinkopaneelien hyötysuhteeksi 15 %, jolloin voidaan laskea arvioitu kokonaispinta-ala paneelistolle:

$$A = \frac{77,76 \text{ kWh}}{5135 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2} * 0,15} = 100,95 \text{ m}^2$$

Akkujen kapasiteetti täytyy olla minimissään, jos käytetään jälleen akkusiossa esiteltyjä esimerkkiakkuja:

$$Q_{\text{Batt.tot.}} = \frac{38,4 \text{ kWh}}{49,44 \text{ V}} = 777 \text{ Ah}$$

Akkujen kapasiteettia voidaan hieman ylivoittaa vielä edellä lasketusta, tilanteita varten, joissa yön jälkeen aurinkopaneelit eivät pystykkään tuottamaan kuormalle kaikkea tehoa. Ylivoitetaan akustoa hieman:

$$Q_{\text{Batt.tot.}} = \frac{44,4 \text{ kWh}}{49,44 \text{ V}} = 898 \text{ Ah}$$

Nyt voidaan laskea mahdollinen huipputeho joulukuun keskimääräisellä säteilyn määrällä, jotta akusto voidaan valita kestävämmän kyseistä tuotettua latausvirtaa. Suurin teho saavutetaan tyypillisesti silloin, kun aurinko on korkeimmillaan. Luonnollisesti aurinkopaneelien asettelukulmalla on vaikutusta huipputehon aikaan, mutta yleensä paneelit ovat kallistettuna siten, että päivän huippusäteilyn aikaan paneeleilla saadaan kerättyä suurimpia osuuksia säteilystä käyttöön.

Kokonaissäteilyn hetkellinen arvo koostuu pääosin suorasta säteilystä, mutta säteilyn kokonaisarvoa nostaa suoran säteilyn lisäksi hajasäteily ja maasta heijastunut säteily. Koska tässä tilanteessa ei ole tietoa kuin arvioidusta säteilyn arvosta, oletetaan, että tehokäyrä tekee suurinpiirtein siniallon muotoisen käyrän. Tällöin saadaan laskettua arvioidulla päivän aikana saadulla säteilyn määrällä jakamalla se siihen kuluneella ajalla, jolloin saadaan tehollisarvo hetkelliselle tehonarvolle ja kertomalla se $\sqrt{2}$. Lasketaan vertailun vuoksi myös arvioitu säteilyn huippuarvo oletetuilla säteilyn arvoilla.

Päivän aikana saadun säteilyn määrän avulla laskettu huipputeho on:

Päivän pituus paneelilla kuun keskimääräisellä deklinaatiokulomalla

$$= \frac{2}{15} * \cos^{-1}(-\tan(37,7^\circ - 24,25^\circ) * \tan(-23,05^\circ)) = 11,2 \text{ h}$$

$$P_{\text{ave}} = \frac{\left(5135 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2} * 100,95 \text{ m}^2\right) * 0,15}{11,2 \text{ h}} = 6 \text{ 942,57 W}$$

Nyt arvioidaan keskimääräisestä tehosta huippuarvo kun oletetaan, että tehokäyrä on siniallon muotoinen:

$$P_{PV,peak} = \sqrt{2} * 6942,57 \text{ W} = 9\ 818 \text{ W}$$

Lasketaan vertailuarvoksi suoran-, haja- ja maasta heijastuneen säteilyn summa, eli kokonaissäteilyn arvo päivän huipputehonaikaan eriteltynä.

Maksimi säteilynteho tulee joulukuussa keskimääräisenä säteilypäivänä, keskimääräisellä deklinaatiokulmalla, joka on $23,05^\circ$, silloin kun aurinko on korkeimmillaan, joka tarkoittaa:

$$\alpha_{max} = 90^\circ - 37,7^\circ - 23,05^\circ = 29,25^\circ$$

Tällöin suoran säteilyn teho G_{Bt} lasketaan:

$$G_{Bt} = G_{Bn} * \cos(\theta)$$

Jossa G_{Bn} on joulukuussa keskimäärin ilmassan vaikutuksesta:

$$\begin{aligned} G_{Bn} &= [956,3 * [1 + 0,033 * \cos(\frac{360*344}{365})]] * \cos(90 - 29,25) \\ &= 481,692 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

$$G_{Bt} = 481,692 * \cos(90 - (29,25 + 24,25)) = 387,21 \text{ W/m}^2$$

Lisäksi vielä paneelille tulee samanaikaisesti epäsuoraa säteilyä ja maan heijastamaa säteilyä.

Epäsuoran säteilyn arvo oletetaan tässä esimerkissä olevan n. 15 % suoransäteilyn tehokkuudesta eli n. 60 W/m^2 , jolloin kaltevalle tasolle tulee:

$$G_{Dt} = 60 \text{ W/m}^2 * [\frac{1 + \cos(24,25)}{2}] = 57,35 \text{ W/m}^2$$

Maasta heijastuu:

$$G_{Gt} = 0,17 * (997,88 + 60) * \left[\frac{1 - \cos(24,25)}{2} \right] = 7,93 \text{ W/m}^2$$

Nyt kokonais säteily paneelille maksimaalisena aikana joulukuussa on:

$$G_{tot.} = 391,95 \text{ W/m}^2 + 57,35 \text{ W/m}^2 + 7,93 \text{ W/m}^2 = 457,23 \text{ W/m}^2$$

Ja koska paneeleita on 100,95 m² ja oletetaan, että kaikki paneelit on asennettu samaan kallistuskulmaan, eikä paneelit varjosta toisiaan missään vaiheessa kiertoa, on huipputeho tällöin:

$$P_{PV,peak} = (457,23 \text{ W/m}^2 * 100,95 \text{ m}^2) * 0,15 = 6,9 \text{ kW}$$

Erikseen laskettujen säteilyiden summasäteilyksi laskettu arvo on n. 70 % edellä lasketusta päivän aikana arvioidusta kokonaissäteilyn määrän avulla lasketusta piikkitehosta.

$$\Delta P_{peak} = \frac{6,9 \text{ kW}}{9,8 \text{ kW}} * 100 \% = 70,5 \%$$

Lasketaan isomman piikkitehon mukaan akuston virtakestoisuus tarve.

Aurinkopaneeleilla ladatessa akkuja käytetään *boost charge* -jännitetasoa ja valitaan esimerkki akuille suositelluksi jännitteeksi 57,6V, josta seuraa että latausvirran suuruudeksi tulee:

$$I_{batt.} = I_{PV} - I_{Load} = \frac{9,8 \text{ kW}}{57,6 \text{ V}} - \frac{3 \text{ kW}}{57,6 \text{ V}} = 170 \text{ A} - 52 \text{ A} = 118 \text{ A}$$

Järjestelmään tarvittavien aurinkolataajien määrä, kun yhden lataajan maksimiulosantoteho on 3 000 W:

$$n_{charger.quantity} = \frac{9,8 \text{ kW}}{3 \text{ kW}} = 3,3$$

eli minimissään lataajia tarvitaan 4 kpl. Järjestelmään tarvitaan generaattoria varten 2900B tasasuuntaajia, joiden maksimiulosantoteho on 2 900 W, kun generaattorilla ei ladata akustoa ja järjestelmässä on yksi ylimääräinen redundanttinen tasasuuntaaja:

$$n_{\text{rectifier}} = 1 + \frac{3 \text{ kW}}{2,9 \text{ kW}} = 2,03 \text{ eli } 3 \text{ kpl.}$$

Generaattorin nimellistehon suuruus valitaan olemaan, kun tasasuuntaajien hyötysuhde on 96 % ja niiden tehopiikki käynnistyessään on 124 % tasasuuntaajasta otetusta tehosta ja generaattorin tehokerroin $\cos \varphi = 0,9$:

$$S_{\text{gene}} = \frac{[(3 - 2) * 2\,900] + (1,24 * (3\,000 - 2\,900) \text{ W})}{0,9 * 0,96} = 3\,225,6 \text{ VA}$$

Kyseinen laskettu generaattorille tarvittu näennäistehon määrä on minimiarvo. Generaattorin pyörimisen sujuvuuden kannalta voi generaattorinkin mitoittaa hieman reiluksi.

Akusto valitaan olemaan nimellisjänniteeltään 48 V, kapasiteetti tulee olla $\geq 777 \text{ Ah}$. Aurinkopaneelien kokonaispinta-ala on $\geq 100,95 \text{ m}^2$, 15 % hyötysuhteella ja generaattori mitoitetaan olemaan esimerkiksi $\geq 4\,000 \text{ VA}$.

7.2 Komponenttien mitoitus

Järjestelmässä käytettävien komponenttien mitoitus tehdään järjestelmän jännitetason ja virran suuruuksien mukaan siten, että jokainen komponentti mitoitetaan sille epäedullisimman tilanteen mukaan eli silloin kun jännite on suurimmillaan ja suurimmilla virran arvoilla.

7.2.1 AC-energianlähteet

Generaattori ja mahdollinen sähköverkko kytketään AC-liittimiin. Tällöin terminaalien tulee kestää verkosta riippuen esimerkiksi 230 V vaihejännite tai kahden vaiheen välillä oleva pääjännite eli 400 V. AC-liittimien jälkeen virta kulkee ATS:n kautta tasasuuntaajille, josta se johdetaan järjestelmän kiskoon. Suurin virta syntyy tilanteessa, jossa

kaikki paitsi yksi tasasuuntaaja syöttävät jo kuormaa ja viimeinen käynnistyy ottaen käynnistysvirtapiikin. Tällöin terminaalien ja ATS:n kautta kulkevan virran suuruus lasketaan yhtälöllä 74:

$$I_{AC} = \frac{\frac{[(n_{\text{rectifier.per.phase}} - 1) * P_{\text{rectifier.max.}}] + (P_{\text{peak}})}{\eta_{\text{rectifier}}}}{U_{\text{min}}} \quad (74)$$

$n_{\text{rectifier.per.phase}}$ on tasasuuntaajien lukumäärä yhden vaiheen syöttämänä

$P_{\text{rectifier.max.}}$ on tasasuuntaajan ulostulojännite maksimissaan [W]

$\eta_{\text{rectifier}}$ on tasasuuntaajien hyötysuhde [%]

P_{peak} on tasasuuntaajan käynnistyessä ottama tehopiikki [W]

U_{min} on vaihejännitteen alin arvo, jolla tasasuuntaaja pystyy syöttämään täyden tehon [V]

Esimerkiksi käytettäessä Delta Energyn 2900B tasasuuntaajia, maksimi ulostuloteho on 2900 W, jonka tasasuuntaaja pystyy vielä syöttämään 170,6 V:n jännitteellä. Hyötysuhdeksi oletetaan 96 % ja yhden vaiheen takana on tässä esimerkissä 3 tasasuuntaajaa, joista jokainen syöttää kuormaa maksimitehollaan. Tällöin suurin virta, jonka AC-liittimen ja ATS:n täytyy vaiheen osalta kestää on, kun tasasuuntaaja ottaa käynnistyessään 1,235 kertaisen tehon verrattuna jatkuvakestoiseen maksimitehoon.

$$I_{AC} = \frac{\frac{[(3 - 1) * 2900 \text{ W}] + (2900 \text{ W} * 1,235)}{0,96}}{170 \text{ V}} = 55,2 \text{ A}$$

Mikäli komponentti kestää lyhytkestoiset virtapiikit, voidaan terminaalit mitoittaa jatkuvan maksimivirran mukaiseksi

7.2.2 Uusiutuvat energianlähteet

Uusiutuvat energianlähteet kiinnitetään joko suoraan lataajaan tai mahdollisesti liittämälaitikon kautta. Lataajan jälkeen virta syötetään järjestelmän kiskoon. Ennen lataajaa kulkeva virta voidaan laskea yhtälöllä 75 seuraavanlaisesti:

$$I_{\text{renewable}} = \frac{\frac{P_{\text{renewable.peak}}}{\eta_{\text{renewable.charger}}}}{U_{\text{charger.min}}} \quad (75)$$

$P_{\text{renewable,peak}}$ on uusiutuvan energianlähteen maksimiteho [W]

$\eta_{\text{renewable.charger}}$ on uusiutuvan energianlähteen lataajan hyötysuhde [%]

$U_{\text{charger.min}}$ on uusiutuvan energianlähteen lataajan minimijännitteen arvo, jolla se kykenee syöttämään järjestelmään maksimitehon. [V]

Eli esimerkiksi, jos tuuliturbiinin lataaja kykenee maksimissaan syöttämään järjestelmään 3 000 W, 100 V:n jännitteellä ja lataajan hyötysuhde on 95 %, on maksimivirta tuuliturbiinilta lataajalle:

$$I_{\text{renewable}} = \frac{\frac{3000 \text{ W}}{0,95}}{100 \text{ V}} = 31,58 \text{ A}$$

7.2.3 Järjestelmän kisko

Järjestelmän kiskolta vaaditaan eniten tilanteessa, missä akuston lataus ja kuorman tehontarve on maksimaalista. Tällöin järjestelmänkiskossa kulkevan virran suuruus on:

$$I_{\text{system.rail}} = I_{\text{batt.}} + I_{\text{load}} \quad (76)$$

7.2.4 Akkujohtimet

Järjestelmän kiskon ja akuston välillä kulkee suurin virta, joko silloin kun sitä ladataan suurimmalla virralla tai vastaavasti puretaan suurimmalla virralla. Purettaessa suurin virta syntyy kun akun jännite on pienimmässä sallitussa arvossa, ladattaessa vastaavasti silloin, kun tehontuotto on suurinta tai akusto purettu sallittuun syvyyteen. Tällöin johtimien ja mittausvastuksen virtakestoisuus täytyy olla joko:

$$I_{\text{batt.wire}} = I_{\text{batt.}}$$

tai

$$I_{\text{batt.wire}} = \frac{P_{\text{load}}}{U_{\text{batt.}}}$$

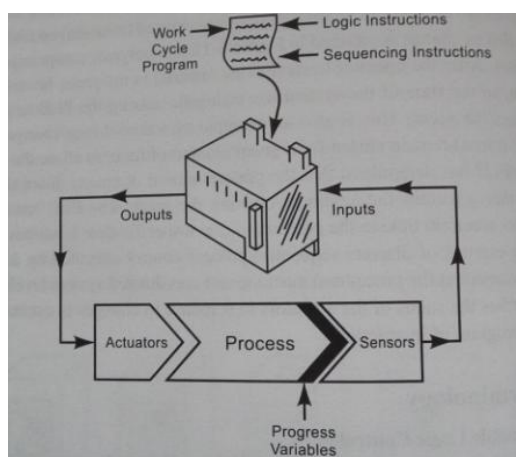
Akun suojaksi laitettavat katkaisijat mitoitetaan suurimman sallitun purkuvirran mukaisesti.

8 PLC-laitteet järjestelmänvalvojana

Termi PLC tulee sanoista "Programmable Logic Controller" eli suomeksi ohjelmoitava logiikka ohjain. Käytännössä tämä tarkoittaa tietokonemaista ohjainta, johon voidaan ohjelmoida erilaisia tapahtumia. PLC-laitteeseen saadaan input -väylistä halutuilta sensoreilta tai mittareilta tietoa, jonka jälkeen PLC-laite tekee halutut toiminnot lähettämällä output -väylistä toimijoille toimintakäskyn. Toimijalaitteilta ja sensoreilta tarvitaan tällöin kykyä lähettää ja vastaanottaa, eli kommunikoida PLC-laitteen kanssa.

PLC-laitteet toimivat ja kommunikoivat digitaalisella viestinnällä eli 1:n ja 0:n avulla. Näillä saadaan erilaisia toimintoja AND/OR/NOT logiikoiden avulla. [16 s. 420 - 425.]

Hybridijärjestelmässä PLC-laite toimii järjestelmänvalvojana. Järjestelmänvalvoja ohjaa koko hybridijärjestelmän toimintaa ja energianlähteiden valintaa.



Kuva 29. PLC-laitteen toiminta [16 s. 386]

8.1 PLC-laitteen rakenne

PLC-laitteet koostuvat tyypillisesti seuraavista osista:

- Prosessori.
- Muistiyksikkö.
- Tehonlähde.
- Sisäänmeno-/ulostulo -portit.
- Ohjelmointilaite.

Proessori tarkastelee sisäänmeno -porteista saatuja tietoja, toteuttaa logiikoita ja ohjaillee ulostuloporttien toimintaa. Proessori koostuu yhdestä tai useammasta mikroprossessorista, jotka ovat suunniteltu sisäänmeno/ulostulo -porttien tyylisiin sovelluksiin.

Muistiyksikkö varastoi työkierto-ohjelman, sisääntulo-/ulosmenoporttien tiloja ja ohjaimen toimintoja. Muistiyksikkö koostuu kahdesta erilaisesta muistista; käyttäjämuisti ja järjestelmämuisti. Ohjelmoitu työkierto-ohjelma on varastoitu käyttäjämuistiin ja ohjaimen toiminnot järjestelmämuistiin. Yhteen liitetty prosessori ja muistiyksikkö muodostavat suorittimen.

Tehonlähde syöttää PLC-laitteelle sen tarvitseman tehon. PLC-laite on aktiivinen laite, joka tarvitsee myös energiaa toimiakseen.

Sisäänmeno/ulostulo -portit vastaanottavat tietoja ja lähettävät tiedot toimijoille. Sisäänmeno -porteista saadaan mittaustietoja, jotka käsitellään prosessorin ja muistin kautta. Ulosmenoportista lähetetään halutut toiminnot laitteille.

Viimeinen komponentti on ohjelmointilaite. Tämä laite välittää koko työkierto-ohjelman muistimodulille. [16 s. 387.]

8.2 Järjestelmänvalvojan käyttö hybridijärjestelmässä

Järjestelmänvalvoja ohjaa hybridijärjestelmän toimintaa. Sen avulla saadaan virta- ja jännitetietoja eri pisteistä. Saatujen tietojen perusteella järjestelmänvalvojaan ohjelmoidaan tarvittavat toiminnot eri tilanteiden mukaan, sekä jaetaan halutut hälyytystiedot.

Esimerkki toiminto jännitetiedon avulla tehdystä toiminnosta voisi olla akun jännitetason aleneminen tiettyyn pisteeseen, jonka vuoksi generaattori käynnistetään. Kun jännite saavuttaa järjestelmänvalvojalle ohjelmoidun pisteen, lähetetään määritellystä output väylästä generaattorin käynnistyslaitteelle signaali.

Delta Energy Systemsin omaa järjestelmän valvojaa nimitetään PSC X, jonka kehittynein versio on PSC 3. Järjestelmän valvojan toiminnot tässä työssä tehdään PSC 3 val-

miiden toimintojen sekä uusien ominaisuuksien pohjalta, mutta samanlaisia toimintoja voidaan tietysti käyttää muillakin järjestelmänvalvojilla.

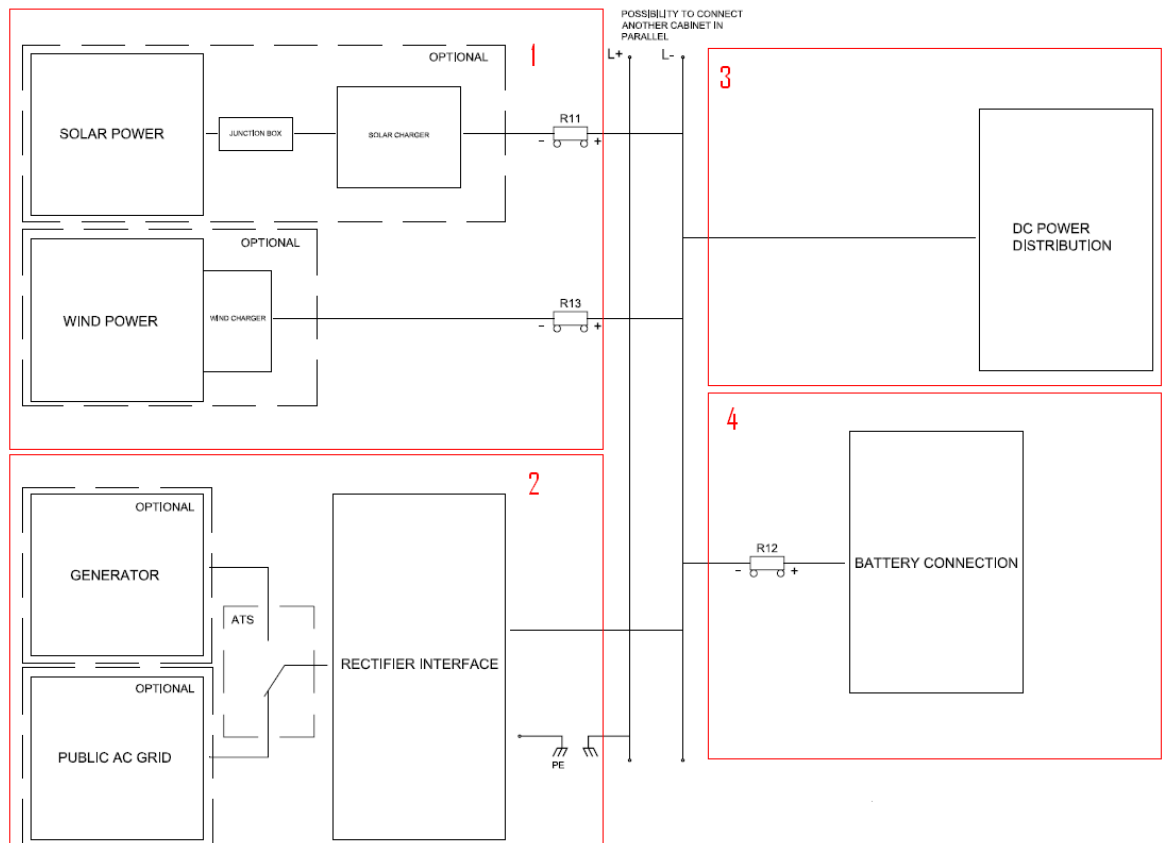


Kuva 30. PSC3 –järjestelmänvalvoja

8.3 Järjestelmänvalvojan funktiot ja mittaukset

Tässä työssä järjestelmänvalvojan toiminta-alueet on jaettu neljään eri alueeseen. Nä-mä neljä aluetta käydään jokainen erikseen läpi, esitellään järjestelmänvalvojan mit-taukset ja toiminnot. Kuvassa 31 (ks. seuraava sivu) pääpiirikaavioon jaetaan punaisella viivalla toiminta-alueisiin.

Ensimmäiseen alueeseen kuuluu uusiutuvat energianlähteet, niiden lataajat sekä mit-tausvastukset. Toinen alue sisältää AC-lähteet eli vaihtosähkölähteet, ATS-kytkimen eli *Automatic Trasfer Switchin*, sekä tasasuuntaajat. Kolmanteen alueeseen kuuluu ta-sasähköjakelu, joka sisältää myös mahdolliset suojakatkaisijat. Neljäs alue puolestaan sisältää akuston, sen suojakatkaisijat, sekä akuston ja järjestelmän kiskon välisen mit-tausvastuksen.



Kuva 31. PLC laitteen toiminta-alueet

8.4 Järjestelmänvalvojan alueet

8.4.1 Uusiutuvat energianlähteet

Tässä hybridijärjestelmässä uusiutuvina energianlähteinä voi toimia joko aurinkoenergia tai tuulienergia, sekä joissain tapauksissa molemmat. Hybridijärjestelmässä tulisi uusiutuva energianlähde priorisoida tärkeimmäksi energianlähteeksi, joka syöttää kuormalle tehoa aina kun vain mahdollista. Priorisoinnin ansiosta uusiutuvan energian käytöllä saadaan korkeat alkuinvestoinnit katettua nopeammin, jolloin myös mahdollisesti ruvetaan säästämään rahaa nopeammin.

Uusiutuvan energianlähteen priorisointi onnistuu säätämällä uusiutuvan energianlähteen lataajasta sen ulostulo jännite suuremmaksi, kuin tasasuuntaajien jännitetaso. Tällöin tilanteissa, joissa uusiutuva energianlähde pystyy syöttämään koko kuorman, ei tasasuuntaajilta tule yhtään virtaa, eikä tällöin myöskään tehoa ja tasasuuntaajat on mahdollista sammuttaa. Tilanteissa puolestaan, jolloin uusiutuva energianlähde ei pys-

tykkään tuottamaan kaikkea kuorman tarvitsemaa tehoa, syöttää tasasuuntaajat tai akusto puuttuvan tehonmäärän.

Verkottomissa hybridijärjestelmissä ensisijaisena lisäenergiansyöttäjänä, kun uusiutuva energianlähde ei pysty syöttämään kaikkea tehoa kuormalle, käytetään akustoa. Tällöin saadaan järjestelmä toimimaan mahdollisimman pitkiä aikoja ilman generaattorin apua ja polttoaineen polttamista. Mikäli akusto ladataan uusiutuvalla energialla, saadaan uusiutuvien energianlähteiden käytön osuutta lisättyä purkamalla akkuja määrättyyn syvyyteen ennen generaattorin käynnistämistä, koska akuista purettu teho on tuotettu uusiutuvalla energialla.

Jännitetason säätöä varten tarvitaan järjestelmänvalvojan ja uusiutuvan energianlähteen lataajan välille kommunikointia. Järjestelmänvalvojalle voidaan asettaa haluttu jännitetaso, jonka mukaan se ohjaa laturin jännitettä. Tätä varten laturissa täytyy olla oma jännitemittaus. Lataaja lähettää kyseisen jännitetiedon järjestelmänvalvojalle, joka puolestaan vertailee saatua jännitetietoa sille ohjelmoituun jännitetasoon.

Mikäli saatu jännitetieto ja järjestelmänvalvojalle asetettu haluttu jännitetaso poikkeaa toisistaan, lähettää järjestelmänvalvoja *output*-väylästä tiedon lataajalle. Lataaja saa järjestelmänvalvojalta käskyn pienentää tai suurentaa jännitettä, joka tarkoittaa laturissa olevan säätömuuntajan säätämistä. Mittaustulos täytyy saada riittävän usein, jotta jännitetaso saataisiin pidettyä haluttuna, sillä uusiutuvan energian tehon ja jännitteen suuruus voi vaihdella nopeastikin.

Jännitetason lisäksi käyttäjälle todennäköisesti kiinnostava tieto uusiutuvan energianlähteen toiminnasta on siitä saatu hyöty eli tuotettu energian määrä. Tuotettu energian määrä voidaan mitata esimerkiksi mittausvastuksen avulla.

Järjestelmänvalvojan täytyy tietää vastuksen suuruus, jännitteen suuruus, sekä kulunut aika. Teho voidaan laskea ohmin lain avulla, josta johtamalla saadaan teho. Laskukaava ja sen johtaminen esitellään yhtälössä 2.

Kun tiedetään hetkellinen teho ja integroidaan sitä ajan suhteen, saadaan tuloksena tuotettu energia eli wattituntimäärä. Tätä varten järjestelmänvalvojan on saatava ajanmittaus.

$$U = I * R \quad (2)$$

U on jännite [V]

I on virta [A]

R on vastus [Ω]

Jolloin yhtälö saadaan muotoon:

$$I = \frac{U}{R}$$

Hetkellinen teho voidaan laskea seuraavasti:

$$P = U * I \quad (5)$$

P on teho [W]

Johon I:n paikalle sijoittamalla $\frac{U}{R}$, saadaan hetkellisen tehon arvo laskettua seuraavasti:

$$P = U * \frac{U}{R} = \frac{U * U}{R} = \frac{U^2}{R}$$

Kun hetkellinen teho kerrotaan sitä kestäneellä ajalla, saadaan tuotettu kokonaisenergia:

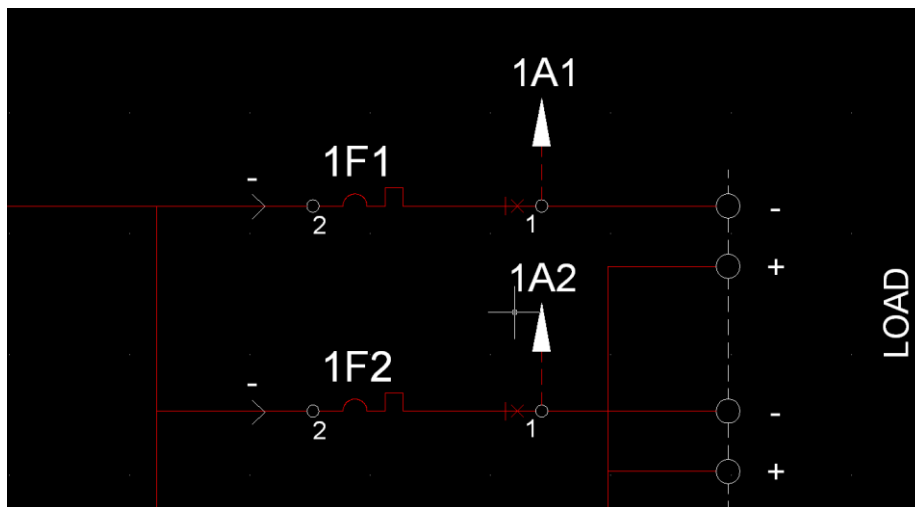
$$W = t * \frac{U^2}{R} \quad (77)$$

t on kulunut aika [h]

W on energia [Wh]

Uusiutuvan energianlähteen lataaja täytyy suojata erilaisilta vikatilanteilta. Tätä varten uusiutuvan energianlähteen lataajan eteen täytyy laittaa suojakatkaisin. Suojakatkaisimelta puolestaan vaaditaan järjestelmävalvojalle tieto sen tilasta. Mikäli katkaisija on lauennut, eli se ei enää johda sähköä, täytyy ilmoitus saada esimerkiksi valvomoon tai ihmiselle, joka tarkistaa tilanteen, häiriön syyn ja korjaa tilanteen.

Suojakytkimen tilasta saadaan tieto välitettyä PLC laitteelle esimerkiksi seuraavanlaisella järjestelyllä:



Kuva 32. Suojakatkaisijat vetävät

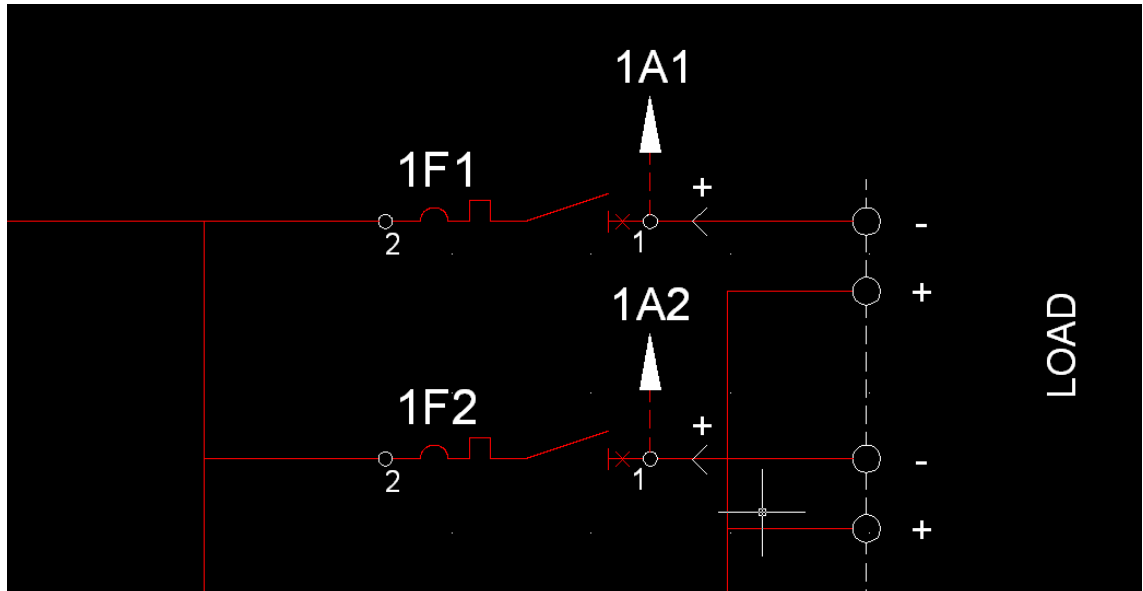
Silloin kun suojakatkaisijat vetävät saadaan katkaisijan ulostulopäästä otettua plusmaadoitetussa järjestelmässä negatiivinen jännite. Tilanteessa, missä järjestelmävalvoja saa negatiivisen jännitetiedon katkaisijoilta, on kaikki kunnossa, eikä toimenpiteisiin tarvitse ryhtyä.

Kyseistä väylää pitkin menee myös pieni määrä virtaa, mutta jos mittauspiirin impedanssi on suuri, jää virta niin pieneksi, ettei sitä varten tarvitse laittaa paksuja johtimia tai tehohäviöitä synny suuria määriä. Virran suuruus voidaan laskea ohmin lain perusteella:

$$I = \frac{U}{R} \quad (2)$$

josta seuraa, että kun $R = \infty$, virta menee lähelle 0 A.

Tilanteessa, jossa suojakatkaisijat laukeavat, tulee kuorman puolelta positiivinen jännite. Tällöin järjestelmänvalvoja saa tiedon, että katkaisijat tai tietty katkaisija on lauenut, ja voi antaa hälytystiedon esimerkiksi valvomon näytölle.



Kuva 33. Suojakatkaisijat ovat laenneet

Lataajien suojakatkaisijoiden lisäksi uusiutuvia energianlähteitä täytyy suojata ylikuormitukselta. Esimerkiksi tuuliturbiinien lavat täytyy saada pysäytettyä liian suurilla tuulenopeuksilla tai ohjata mekaanista jarrua hidastamaan pyörimistä. Tätä varten järjestelmänvalvojalle täytyy saada tieto tuuliturbiinin roottorin pyörimisnopeudesta. Järjestelmänvalvojalle asetellaan käytettävien tuuliturbiinien valmistajien suosittelema maksimipyörimisnopeus. Kun maksimipyörimisnopeus saavutetaan, järjestelmänvalvojan täytyy lähettää tieto tuuliturbiinin ohjaajalle, joka rupeaa jarruttamaan turbiinien pyörimistä tai vastaavasti, jos käytetään erillistä jarrua, lähettää järjestelmänvalvoja jarrulle jarrutuskäskyn.

Aurinkopaneeleita käytettäessä voi tietyissä tilanteissa ongelmana olla paneelien ylikuumentuminen. Mikäli järjestelmässä käytetään jäähdytysjärjestelmää aurinkopaneelille, tulee saada paneelien lämpötilasta tieto. Tätä varten paneelien pinnasta mitataan lämpötila-anturilla paneelin lämpötila ja viedään lämpötilatieto järjestelmänvalvojalle. Järjestelmässä käytettyjen paneelien valmistajilta saatujen maksimilämpötilojen avulla voidaan asettaa lämpötilarajat. Kun paneelilta tulee aseteltu maksimilämpötilan arvo, täytyy järjestelmänvalvojan *output*-väylästä lähettää käynnistys signaali jäähdytysjär-

jestelmälle. Puolestaan järjestelmänvalvojalle voidaan myös asetella tietty lämpötilan arvo, jonka saavutettaessa jäähdytysjärjestelmälle lähetetään sammumistieto tai mahdollisesti jäähdytysjärjestelmälle asetetaan vain tietty toiminta-aika, jonka jälkeen jäähdytys sammuu itsestään.

Vielä akkujen eliniän parantamiseksi täytyy ohjata uusiutuvien energianlähteiden ulostulojännitettä. Akuilta täytyy saada lämpötilatieto järjestelmänvalvojalle, johon on säädetty akkujen valmistajien antamien tietojen perusteella sallitut akkujen lämpötilat. Jatkuva *boost charge* -jännitetaso liian pitkänä latausaikoina hajottaa akkuja ja kiehuttaa akkunestettä. Tämän vuoksi säädetään lämpötilan ja yhtäkestoisen latausajan mukaan valmistajien suosittelemat arvot, jonka perusteella järjestelmänvalvoja lähettää latureille jännitteensäätökäskyn. Kun jompikumpi raja tulee vastaan: lämpötila tai *boost charge* -lataustason latausaika, tulee jännitettä laskea. Jännitetaso tulisi olla tiputtamisen jälkeenkin vielä suurempi kuin tasasuuntaajien jännitetaso.

Verkollisissa hybridijärjestelmissä voi akuston kokonaiskapasiteetti olla hyvinkin pieni. Tällöin sallittu latausvirtakin jää pieneksi. Jos uusiutuvat energianlähteet on mitoitettu tämänlaisessa järjestelmässä suureksi, täytyy niiden laturien ulostulovirtaa rajoittaa niin, ettei kuorman virrantarpeen jälkeen akustolle pääse liian suurta virtaa. Virran rajoittaminen onnistuu säätämällä ulostulojännitteen arvoa siten, ettei akuston ja järjestelmän jännite-ero pääse kasvamaan liian suureksi.

8.4.2 AC-tehonlähteet, ATS ja tasasuuntaajat

Yhtenä tämän hybridijärjestelmän vaihtosähkölähteenä toimii generaattori. Pääsääntöisesti verkollisissa hybridijärjestelmissä generaattori toimii varavoimanlähteenä ja on käytössä vain silloin, kun verkko ei ole käytettävissä. Jotta generaattoria pystyttäisiin käyttämään itsenäisissä järjestelmissä, täytyy järjestelmänvalvojalla pystyä hoitamaan generaattorin käynnistys.

Generaattorin käynnistämiseen johtavat tekijät ovat akkujen purkautuminen määritellyyn tasoon, josta saadaan tieto mittausvastuksen yli olevasta jännitemittauksesta. Kun akkujen jännite laskee määrättyyn tasoon, täytyy vielä verkon olla poissa käytöstä, ennen kuin generaattori käynnistetään. Verkottomissa hybridijärjestelmissä generaatto-

rin käynnistämiseen vaadittavat tekijät sen sijaan ovat pelkän akuston purkautuminen määriteltyyn jännitetasoon.

Verkon käytettävyydestä saadaan tieto mitattaessa verkon terminaalien ja nollan välinen jännite-ero. Mikäli näiden välillä on jännite, on verkko käytettävissä. Jos jännitettä ei ole, voidaan tehdä päätelmä ettei verkko ole käytettävissä ja joudutaan käynnistämään generaattori, sekä ohjaamaan ATS-kytkin generaattorin puolelle.

Generaattori tarvitsee toimiakseen polttoainetta. Tätä varten tarvitaan polttoainesäiliö. Polttoaineen määrästä täytyy saada tieto riittävän aikaisin ennen kuin se pääsee loppumaan. Polttoaineen määrästä voidaan saada tieto esimerkiksi erilaisilla sensoreilla, jotka lähettävät järjestelmänvalvojalle *inputtiin* signaalin, kun polttoainesäiliön nesteen pinta alittaa tietyn rajan. Hybridijärjestelmän sijainnista riippuen hälytysraja täytyy mitoittaa niin korkealle, että uudelleen tankkaus kyetään suorittamaan ennen polttoaineen loppumista.

Mikäli järjestelmä sijaitsee asutuksien lähellä, voi generaattorin käynnistäminen olla myös kellonajasta riippuvainen. Generaattorin käyttämisestä syntyvä ääni saattaa olla yöaikaan niin häiritsevää, ettei sitä voida sallia. Tällöin järjestelmänvalvojalle täytyy järjestää akuston kapasiteetin ja kellonajan mukaan järjestelmä, jossa akusto täytetään yötä varten jo aikaisemmin. Tätä varten tarvitaan jälleen akuston jännitetietoa, akuston kokonaiskapasiteettia ja järjestelmänvalvojan sisäistä kelloa.

Tietyllä ajanhetkellä järjestelmänvalvoja mittaa akuston jännitetasoa ja arvioi käytettävän kapasiteetin suuruuden ja arvioi kuorman tehontarpeen avulla järjestelmän päälläpysymisajan. Jos jännitetaso on päässyt laskemaan liian pieneksi ajanhetkellä t_1 , käynnistetään generaattori ja hoidetaan sillä kuormansyöttö ajanhetkeen t_2 , jolloin akustoa ei tarvitse käyttää ja sen kapasiteetti säilyy yön ajaksi suurempana. Toisena vaihtoehtona on, että generaattorilla myös ladataan akusto. Tämä vaatii kuitenkin generaattorin mitoittamiselta suuremman nimellistehon, kuin pelkän kuorman syöttäminen.

Generaattorin polttoaineen säästämiseksi täytyy myös huolehtia sen sammuttamisesta tilanteissa, joissa sitä ei enää tarvita. Tämän kaltaisia tilanteita voi olla esimerkiksi verkollisissa hybridijärjestelmissä verkon jännitteen palaaminen. Generaattorin sammut-

tamisessa tulisi olla pieni viive, sillä esimerkiksi verkon jännitteen häviämisen jälkeen on todennäköistä, että jännite voi palata hetkellisesti kun jakamoiden releet yrittävät jälleenkytkä verkon toimintaan. Järjestelmänvalvojalle voidaan esimerkiksi ohjelmoida 15 minuutin viive sen jälkeen kun verkon jännite on palautunut ja pysynyt yhtäjaksoisesti yllä. Tällöin voidaan ehkäistä generaattorin turhia pienikestoisia sammutustilanteita, joissa generaattori sammutetaan vain pieneksi ajaksi.

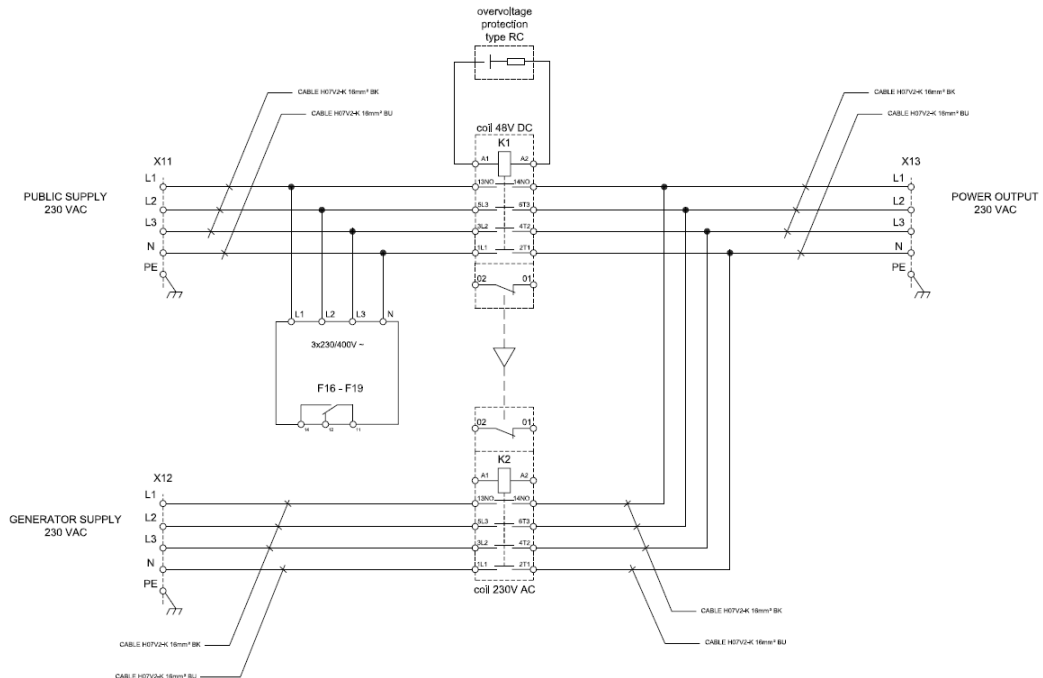
Toisena generaattorin sammutusperusteena voi olla tasasuuntaajien virran tippuessa nolnaan. Käytännössä tämänkaltainen tilanne tulee vain silloin kuin uusiutuva energianlähde kykenee syöttämään koko kuorman yksinään tai tasasuuntaajien vikatilanteet. Molemmissa tilanteissa generaattorin käynnissä pitäminen on tarpeetonta. Kuten verkon jännitteen palaamistilanteessa, myös tasasuuntaajien virran tippuessa nolnaan, kannattaa järjestelmänvalvojaan laittaa pienikestoisen viive.

Tietyissä järjestelmissä generaattorin sammutusperuste voi olla myös akuston ja järjestelmäkiskon välissä olevan mittausvastuksen jännitemittauksesta saatu nolnan voltin jännite. Tämä mittaustulos tarkoittaa, että järjestelmän ja akuston välillä ei ole jännitettä. Tämä puolestaan tarkoittaa, että akuston suuntaan ei myöskään kulje yhtään virtaa, joka taas puolestaan tarkoittaa sitä, että akusto on ladattu.

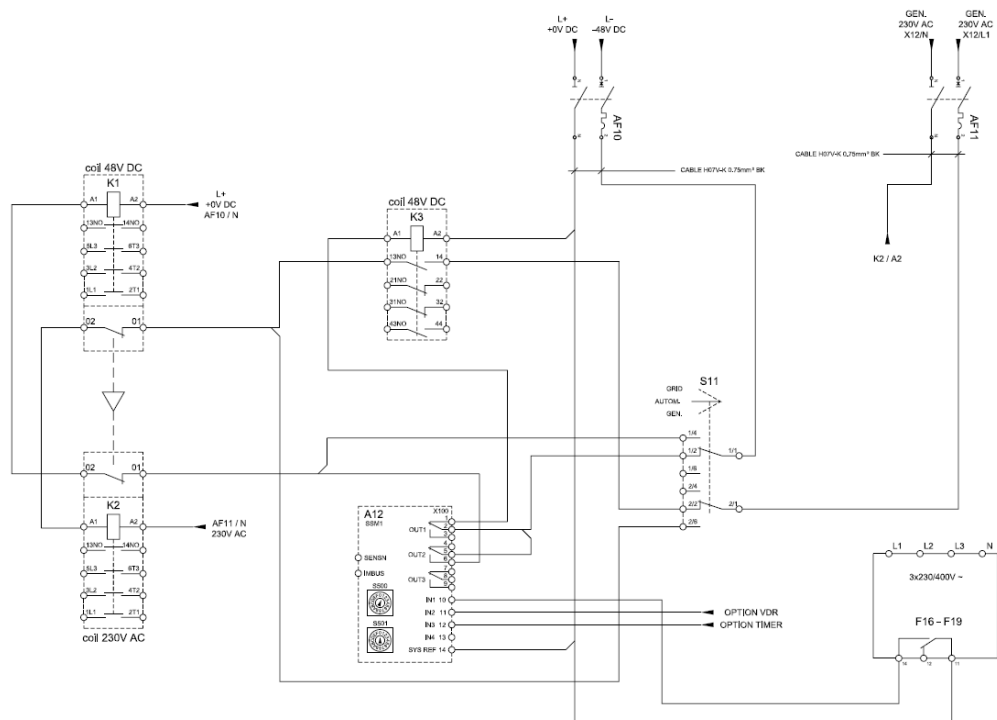
Akuston kokonaiskapasiteetti voi toimia yhtenä tekijänä mietittäessä kannattaako generaattori sulkea kyseisessä tilanteessa. Mikäli akuston kokonaiskapasiteetti on todella pieni, tarkoittaa se huonoimmassa tapauksessa sitä, että akusto puretaan jälleen generaattorin sammuttamisen jälkeen hetkessä ja generaattori täytyy käynnistää uudelleen. Järjestelmä, missä akuston kokonaiskapasiteetti on huomattavan suuri, on perustelumpaa sulkea generaattori tilanteissa, joissa akusto on kokonaan ladattu. Tällöin akusto pystyy syöttämään kuorman yksinään pidemmän aikaa ja generaattori täytyy mahdollisesti käynnistää vasta hyvinkin pitkän ajan päästä uudelleen, jos uusiutuvat energian lähteet tai verkko ei kykene tuottamaan tehoa.

ATS eli "Automatic Transfer Switch" tarkoittaa suomeksi automaattista vaihtokytkintä. Molemmat järjestelmän vaihtosähkölähteistä generaattori ja verkko on kytketty siihen. ATS pystyy vaihtelevaan kytkimen asentoon niin, että tasasuuntaajat saavat sähköä verkosta tai generaattorilta. Molempien vaihtosähkölähteiden samanaikainen kytkeyty-

minen on estetty niin mekaanisesti, kuin ohjauspuolellakin. Koska samanaikainen kytkeytyminen on estetty, generaattoria ei tarvitse tahdistaa verkon kanssa samaan vaihekulmaan.



Kuva 34. ATS:n kytkeytyminen järjestelmään [4.]



Kuva 35. ATS:n ohjauspiirikaavio [4.]

ATS-kytkimeltä saadaan kytkimen asennon tieto järjestelmänvalvojalle. Järjestelmänvalvojalla pystytään ohjaamaan kytkimen asentoa ja priorisoimaan jompikumpi vaihtosähkölähteistä. Verkollisissa järjestelmissä verkko on priorisoitu tehonlähde lähes poikkeuksetta, sillä verkosta ostettu sähkö on yleensä edullisempaa kuin generaattorilla tuotettu sähkö.

ATS on johdotettu tasasuuntaajille. Tasasuuntaajilla voidaan vaihtosähkölähteiden tuottama vaihtosähkö tasasuunnata tasasähköksi. Tasasuuntaajat puolestaan ovat kytketty järjestelmän kiskoon. Järjestelmä tehdään siten, että siihen pystytään kytkemään rinnan eri määrä tasasuuntaajia. Tasasuuntaajien määrää vaihtelemalla voidaan järjestelmä mitoittaa kuorman tehontarpeen mukaan. Jokaiselta tasasuuntaajalta saadaan järjestelmänvalvojalle jännite- ja virtatieto. Järjestelmänvalvoja pystyy kontrolloimaan samalla tavalla, kuin uusiutuvien energianlähteiden lataajien jännitetasoa, myös tasasuuntaajien ulostulojännitettä. Jännitetaso tulee asetella uusiutuvien energianlähteiden jännitetasoa pienemmäksi, joka tarkoittaa sitä, että tasasuuntaajien tehontuotto on sekundääristä.

Järjestelmänvalvojista voidaan asettaa päälle asetus, jolla kaikkia tasasuuntaajia kuormitetaan tasaisesti. Kaikki tasasuuntaajat, joita ei kyseisellä hetkellä tarvita, voidaan laittaa valmiustilaan. Kun tasasuuntaaja on valmiustilassa, se ei kuluta niin paljon tehoa, kuin tilanteessa, missä se on kokonaan päällä. Tällöin järjestelmän hyötysuhde saadaan paremmaksi. Tätä kutsutaan *efficiency modeksi*.

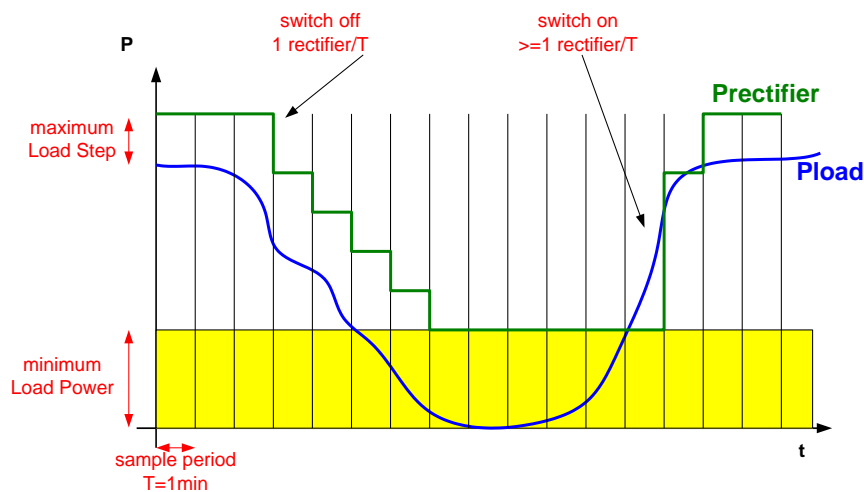
Järjestelmän tasasuuntaajien määrä mitoitetaan edellä esitetyllä yhtälöllä 71 niin, että niitä voi olla ylimääräisiä, joka johtaa siihen, ettei jokaista tasasuuntaajaa tarvita samanaikaisesti. Myös tilanne, jossa uusiutuva energianlähde kykenee syöttämään kuorman osittain tai kokonaan, johtaa tilanteeseen, ettei kaikkia tasasuuntaajia tarvita.

Jotta jokaista tasasuuntaajaa kuormitettaisiin tasaisesti yhtä pitkiä aikoja, jolloin niiden oletettu elinikä on yhtä pitkä, täytyy järjestelmänvalvojan kierrättää jokaista tasasuuntaajaa yhtä pitkiä aikoja. Tasasuuntaajien kierrätyksestä voidaan hyötyä tasaisen kuormituksen lisäksi myös saamalla tietoja tasasuuntaajien kunnosta.

Periaatteessa ilman tasasuuntaajien kierrätystä, käyttämättömät tasasuuntaajat voivat olla rikki, joka selviää vasta siinä tilanteessa kun toinen tasasuuntaaja hajoaa ja poissa käytöstä ollut tasasuuntaaja tulee tarpeelliseksi tai kuorman tehon tarve kasvaa syystä tai toisesta niin isoksi, että jokaista tasasuuntaajaa tarvitaan. Tässä tilanteessa vikaantuneen tasasuuntaajan hälytys saadaan siinä vaiheessa, kun sitä tarvitaan. Sen sijaan kierrätystä käytettäessä mahdollisuutena on saada tieto hajoamisesta jo siinä vaiheessa kun sitä ei tarvitse käyttää.

Kierrätys toimii siten, että tasasuuntaajia on päällä vain aina sen verran, kuin kuorman tehontarve vaatii. Loput tasasuuntaajat ovat lepotilassa. Kun seuraava tasasuuntaaja käynnistetään, pääsee aikaisemmin ollut tasasuuntaaja lepotilaan.

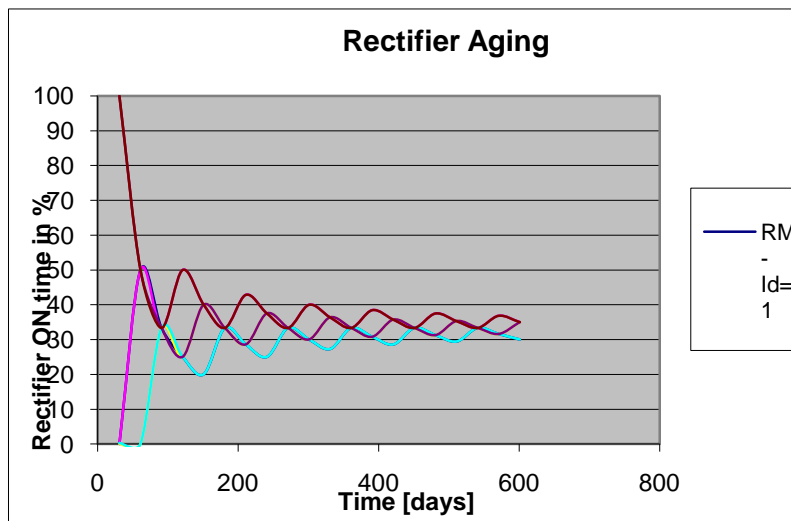
Kuvassa 36 ja taulukossa 4 kuvataan kierrätystoiminnon ja *efficiency moden* toiminta:



Kuva 36. Tasasuuntaajien päälle- ja poiskytketyminen [4.]

Taulukko 4. Tasasuuntaajien kierrätystä [4.]

Command	State	State	State	State	State	# RM on
system start	on	on	on	on	on	5 (all)
stop one RFM	off	on	on	on	on	4
stop one RFM	off	off	on	on	on	3
stop one RFM	off	off	off	on	on	2
start one RFM	on	off	off	on	on	3
stop one RFM	on	off	off	off	on	2
start one RFM	on	on	off	off	on	3
stop one RFM	on	on	off	off	off	2
start one RFM	on	on	on	off	off	3
disable Efficiency mode	on	on	on	on	on	5 (all)



Kuva 38. Tasasuuntaajien kuormituksen vaikutus arvioituun elinikään [4.]

Tasasuuntaajille voidaan järjestelmänvalvojan avulla asettaa akuston latauksen esto. Tämä onnistuu siten, että järjestelmänvalvojalla, jolla pystytään kontrolloimaan tasasuuntaajien jännitetasoa, säädetään jännitettä akuston jännitetason mukaan ylöspäin. Jännite järjestelmän ja akuston välillä pysyy nollassa voltissa, eikä silloin virtaa

kulje akuston suuntaa, eikä akustolta kuorman suuntaan. Akuston ja järjestelmän jännite-ero saadaan mitattua mittausvastuksen yli.

Latauksen estoa voidaan hyödyntää järjestelmässä, jossa akuston lataus halutaan suorittaa kokonaisuudessaan uusiutuville energianlähteillä. Tällöin akkujen varaustila täytyy olla sen verran alhainen, jotta kuorman yli jäävä energia saadaan varastoitua akkuihin, eikä niitä ole varattu generaattorilla.

Generaattoria käytettäessä tulee ottaa huomioon generaattorin nimellisteho. Mikäli generaattori on kuorman tehontarpeeseen nähden ylimitoitettu, kannattaa ylimääräinen teho hyödyntää akuston lataukseen, eikä pyörittää generaattoria huonoilla hyötysuhteilla osakuormituksella.

Kuten uusiutuvien energianlähteiden lataajienkin kanssa, täytyy akuston latausvirtaa tietyissä tapauksissa rajoittaa. Virran rajoitus onnistuu säätämällä jännitetasoa akuston jännitetasoon mukaan pikkuhiljaa ylöspäin.

8.4.3 Tasasähköjakelu

Jakelu kuormalle toteutetaan jakelukiskon kautta. Jakelukiskosta voidaan virransyöttö kuormalle ottaa suoraan riviliittimellä tai suojakatkaisimen jälkeen. Suojakatkaisinta käyttäessä saadaan katkaisimen laukaisutieto samalla tavalla kuin uusiutuvan energianlähteen lataajan suojakatkaisimesta.



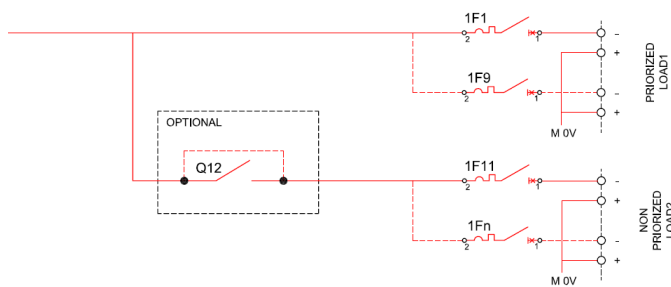
Kuva 40. Jakelukisko, suojakatkaisijat ja hälytystieto PSC 3:seen.

Katkaisutietojen lisäksi jakelukiskoon voidaan järjestää järjestelmänvalvojan avulla osan kuorman irroitus relettä käyttämällä. Osakuorman irroitus voidaan toteuttaa esimerkiksi tilanteissa, missä akuston jännite lähestyy määritettyä maksimisyvyyttä. Näissä tilanteissa voidaan vähemmän tärkeä kuorma irroittaa, jonka ansiosta tärkeämpi kuorma saa akustolta virtaa pidemmän aikaa. Yksi mahdollinen tilanne esimerkiksi verkollisissa hybridijärjestelmissä on verkon syötön katkeaminen. Tämä mahdollistaa sen, että akuston kapasiteetti voidaan mitoittaa pienemmäksi.



Kuva 41. Hälytys signaalin saaminen ja vieminen PSC 3:seen

Osakuorman irroitus mahdollistaa myös generaattorin mitoituksen pienemmäksi. Järjestelmänvalvojalle voidaan määrittää funktio: kun ATS on generaattorisyötön asennossa, annetaan kuormanerotusreleelle ulosmenoportista pulssi, joka ohjaa releen aukeaksi.



Kuva 39. Osakuormanerotusrele [4.]

8.4.4 Akusto

Akuston ja sen mittausvastuksen mittaukset määrittelevät suurimman osan hybridijärjestelmän toiminnoista. Jännitemittauksen ja jännitteen suunnan avulla saadaan tietoa virran suunnasta eli puretaanko akkuja vai ladataanko niitä.

Akuston varaustila voidaan mitata jännitteen avulla. Akustoa koskevassa osiossa on kerrottu tarkemmin akuston jännitteen käyttäytymisestä erilaisissa tilanteissa. Vaihtoehtoisesti varaustila voidaan myös laskea puretusta virrasta. Tätä varten järjestelmänvalvojalle täytyy syöttää akuston alkuarvoksi niiden kapasiteetti, jonka jälkeen järjestelmänvalvoja laskee mittausvastuksen avulla puretun virran määrän ajansuhteen. Latauksessa voidaan samaa virran ja ajan integroimista hyödyntää kapasiteetin laskemisessa. Nyt saadaan jatkuvasti puretun ja ladatun virtamäärän arvo tietoon, jota vertaillaan annettuun alkukokonaiskapasiteetin määrään.

Ongelmana kapasiteetin laskemisessa tulee akkujen kunnon heikennyttyä niiden kyky varastoida energiaa itseensä. Järjestelmänvalvojan kapasiteetin laskeminen suoritetaan samoja latauskäyriä käyttäen, joka ei ota huomioon akkujen kunnon huonontumista. Ajan mittaan laskettu varaustila ja todellinen varaustila rupeavat poikkeamaan toisistaan enemmän ja enemmän. Tätä varten varaustilan laskemiseen täytyy käyttää korjauskerrointa. Korjauskerrointa käytetään jokaisessa purku- ja latausvaiheessa, jolloin mitattu arvo pysyy lähellä realistista arvoa.

Korjauskertoimen määrittelemisen pitää puolestaan tehdä käytetyn akkutyypin mukaisesti. Myös saman valmistajan samantyyppisissä akuissa voi olla yksilöllisiä eroja, jonka vuoksi korjauskertoimen määrittelemisen tulee vaikeaksi ja varaustilan laskemisesta vaikeaa. Integroimalla varaustilaa virran ja ajan suhteen saadaan kuitenkin ainakin hyvin suuntaa-antavia mittaustuloksia.

Syklisessä käytössä akkuja puretaan ja uudelleenladataan jatkuvasti. Tämän kaltainen käyttö vanhentaa akkuja nopeasti. Akkujen elinikään vaikuttaa niiden syväpurkauksien määrä ja syvyys. Järjestelmänvalvojalle kannattaa asetella virran purkumäärien perusteella tai jännitetason perusteella purkamissyvyysraja. Mitä vähemmän akkujen kokonaiskapasiteetista puretaan, sitä pidempi niiden oletettu elinikä tulee olemaan. Pitkällä tähtäimellä suurempi akuston kapasiteetti, jonka johdosta akkuja ei tarvitse purkaa niin syväälle, tulee halvemmaksi ratkaisuksi kuin pienemmän kokonaiskapasiteetin käyttö

syvemmillä. Akkujen saavuttaessa sallittu maksimipurkaustaso, saadaan järjestelmänvalvojalle tieto ja lähetetään käsky tasasuuntaajille käynnistää tasasuuntaajat ja/tai generaattori.

Mikäli hybridijärjestelmän akkujen kunnosta halutaan saada tietoa, esimerkiksi akkujen vaihtoa varten täytyy järjestelmänvalvojan vertailla purkuaikoja. Jotta purkuaikoja voitaisiin vertailla, kannattaa valita sellainen purkuväli, joka toteutuisi mahdollisimman usein. Tästä syystä esimerkiksi verkottomissa hybridijärjestelmissä ei kannata valita purkuvertailuajaksi 95 - 90 %:n väliä kokonaiskapasiteetista. Verkottomissa hybridijärjestelmissä akuston latausajat saattavat, etenkin uusiutuvilla energianlähteillä ladattaessa, jäädä niin lyhyiksi, ettei näin suurta varaustilaa saavuteta kuin harvoin. Tämän vuoksi kannattaa vertailuväliksi valita pienempi ja useammin toistuva väli. Esimerkiksi järjestelmässä, jossa maksimipurkaussyvyudeksi on valittu 50 % kokonaiskapasiteetista, voidaan vertailuväliksi valita 65 - 60 %.

Ensimmäinen mittaustulos johon myöhemmin toteutuneita purkuaikoja vertaillaan, kannattaa tehdä siinä vaiheessa kun akuston kunto on vielä hyvä ja sille annetun kapasiteetin suuruinen. Jotta purkuajat olisivat vertailukelpoisia, täytyy kuorman tehontarpeen olla molemmissa mittaustuloksissa sama. Vakiokuormilla tämä ei tuota ongelmia, mutta muuttuvilla kuormituksilla aikojen vertailu on vaikeampaa.

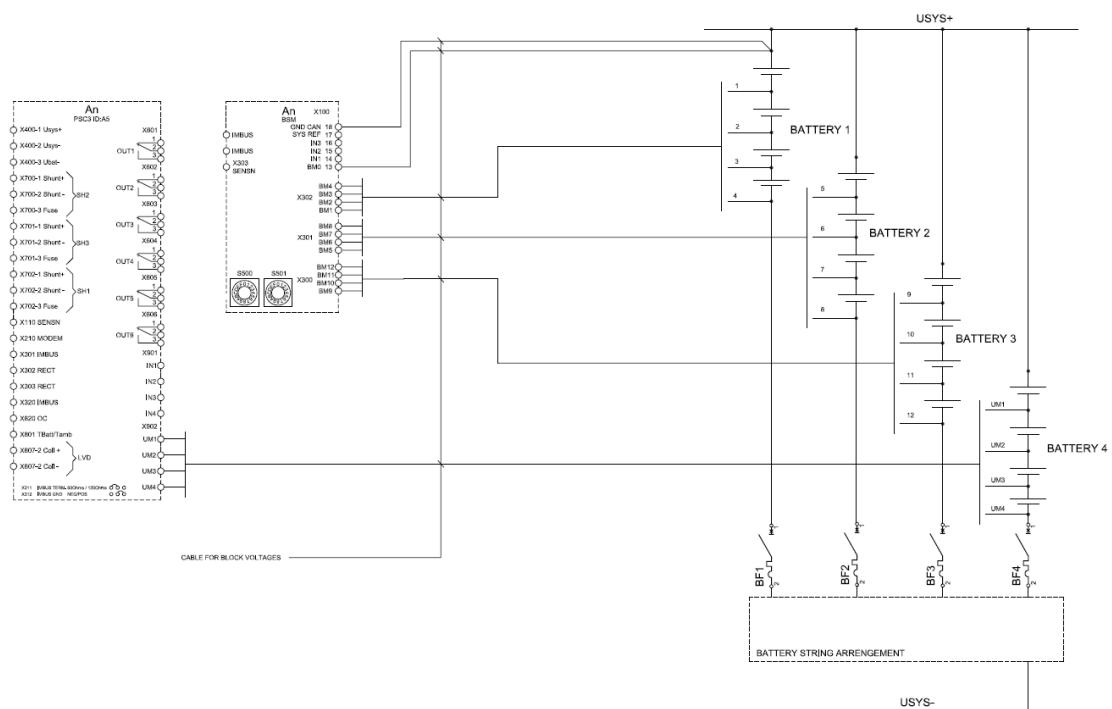
Jotta erilaisilla kuormituksilla saataisiin vertailukelpoisia tuloksia, täytyy järjestelmänvalvojalle saada erilaisia purkukäyriä. Käyrien kulmakertoimien suuruus kasvaa kuorman tehontarpeen kasvaessa. Järjestelmänvalvojan täytyy osata laskea alkuperäisen purkuajan perusteella arvioidut purkuajat suuremmilla ja pienemmillä tehontarpeilla mitatun käyrän perusteella. Nyt järjestelmänvalvoja osaa vertailla tulevaisuudessa tulevissa purkutilanteissa eron alkuperäisestä purkukäyrästä ja mitatusta käyrästä.

Koska akkujen käyttäytyminen erilaisissa purkutilanteissa eri akuilla ja valmistajilla voi vaihdella, voidaan järjestelmänvalvojaan asetella oletetut keskiarvolliset purkukäyrät, jotka suurinpiirtein vastaavat kyseisen tyyppin akkuja. Valmiit keskiarvolliset käyrät voivat poiketa käytetyn akun todellisista purkukäyristä jonkin verran, minkä takia mittaustulokset eivät ole tarkkoja. Arvioiduista purkuajoista tulee epätarkkoja, mutta antavat

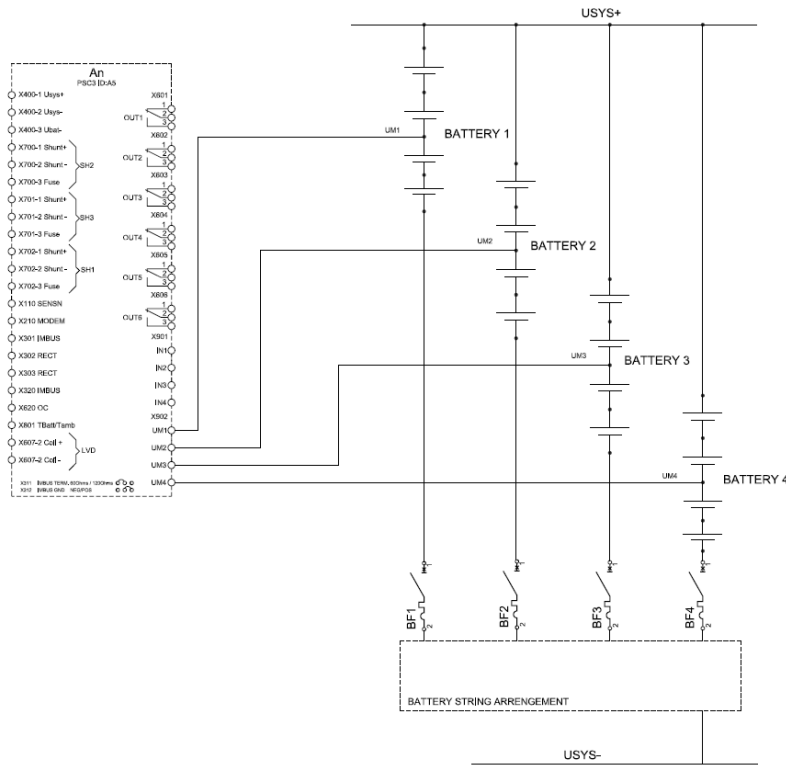
hyvän suuntaa-antavan arvion akun kunnosta. Purkuajkojen vertailusta voidaan lähettää tieto eteenpäin, kun purkuajkojen ero ylittää määritellyn rajan.

Akuston purkuajkojen vertailun lisäksi akustolle voidaan järjestää erilaisia yksittäisiä tai sarjaan kytketyn akkujonon jännitemittauksia. Näiden mittausten avulla saadaan tieto onko akut varautuneet tasaisesti, tai onko jokin akku mahdollisesti hajonnut kokonaan. Normaalioltilanteessa jännitteet ovat samansuuruisia. Pieniä heittoja saattaa olla yksilöistä johtuen, sillä akut eivät ole täysin identtisiä vaikka valmistaja ja akun tyyppi olisikin sama. Järjestelmänvalvojalle voidaan asettaa *battery block measurement* tai *battery middlepoint measurement* kuvien 42 ja 43 mukaisesti.

Battery block measurementilla saadaan yksittäisistä akuista tietoa. *Battery middlepoint measurementilla* saadaan puolestaan tieto sarjaan kytkettyjen akkujen puolivälistä molempiin päihin eli periaatteessa viallisen akun sijainnin puolestavälistä eteenpäin. Kuvassa 43 esimerkiksi on neljä akkua sarjassa, jolloin tiedetään, onko vika kahdessa ensimmäisessä vai kahdessa viimeisessä akussa.



Kuva 42. Battery block measurement -akkumittaus [4]

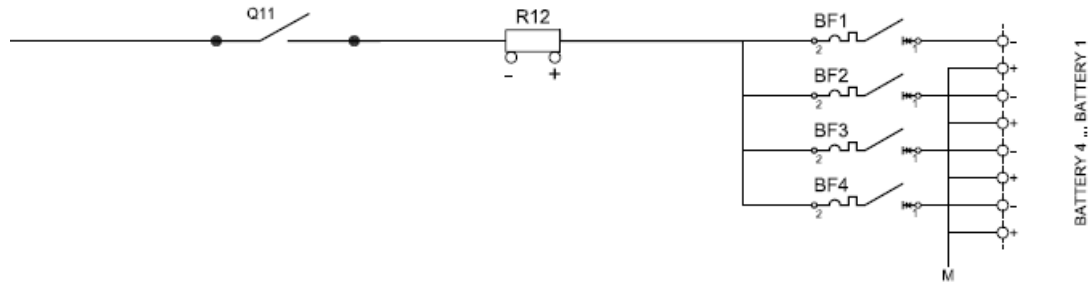


Kuva 43. Battery midpoint measurement -akkumittaus [4]

Akkujen eliniän maksimoimiseksi kannattaa akuston lämpötilaa mitata. Liian suuret lämpötilat keittävät akkuja ja haihduttavat akkunestettä tai suljetuissa akuissa nostavat akun sisällä painetta. Suuri lämpötila syntyy, jos akkua ladataan suurilla jännitteillä ja virroilla. Suuret latausjännitteet aiheuttavat akun sulfatoitumista. Järjestelmänvalvojalle voidaan asettaa maksimi lämpötila-arvot akustolle, joka saavutettaessa täytyy järjestelmän jännitetasoa alentaa tai vastaavasti käynnistää akuston jäähdytys.

Jos akustoa päästään syystä tai toisesta purkamaan yli maksimipurkausrajan, täytyy akku irrottaa ennen täydellistä syväpurkautumista. Kun akku syväpurkautuu liian syväälle, se menettää kykynsä uudelleenvarautua. Tästä syystä kannattaa järjestelmän kiskon ja akuston väliin laittaa vielä rele.

Kun mittausvastuksen yli mitatusta jännitteestä saadaan mittaustulos, jossa akuston jännite on tippunut jo lähes tyhjän akun jännitetasolle, kannattaa akusto irrottaa järjestelmästä. Tämä on ainut tilanne tässä hybridijärjestelmässä, kun akusto irrotetaan muusta järjestelmästä.



Kuva 44. Akuston kytkeytyminen järjestelmään. [4]

9 Yhteenveto

Uusiutuvia energianlähteitä hyödyntävät virranjakelujärjestelmät ovat nykyisin jo erinomaisia vaihtoehtoja perinteisten pelkästään sähköverkkoon tukeutuvien tai generaattorilla pyörivien järjestelmien rinnalla. Nykyisillä laitteilla ja niiden hyötysuhteilla saavutetaan pidemmällä aikavälillä hyötyjä ja tulevaisuudessa kun laitteet parantuvat ja hinnat laskevat, tulee työssä käsiteltyjen hybridijärjestelmien hyödystä entistä suurempia.

Uusiutuvien energianlähteiden käytön ainoana ongelmana tulee energiantuoton epä säännöllisyys. Aurinkoenergian tuottoa voidaan laskea melko tarkasti, mutta tuulen avulla tuotetun energian tuottoajankohta voi olla milloin tahansa. Tämä tuottaa varastointi ongelman. Nykyaikaiset akut ovat vielä melko kalliita, pienikapasiteettisia kokonsa nähden ja niiden oletetut eliniät sen verran lyhyitä, että ne laskevat etenkin verkkoon kytkemättömän hybridijärjestelmän hyötyjä pienemmäksi.

Vaikka kuorman energiantarve ja uusiutuvan energiantuotot pystyttäisiinkin laskemaan tarkasti, ongelmia aiheuttaa edelleen uusiutuvan energian tuottamisajankohta. Esimerkiksi hybridijärjestelmässä, jossa uusiutuvaa energiaa tuotetaan tuuliturbiineilla ja aurinkopaneeleilla, voi järjestelmän kannalta olla ongelmallinen tilanne tulla, kun energia tuotetaan samanaikaisesti. Oletetaan, että energiaa tuotetaan vuorokaudessa yhtä paljon kun kuorma kuluttaa, ja huipputehon aikaan tehontuotto on yli kuorman tehontarpeen. Tällöin täytyy energia saada varastoitua, jotta tuotettu energianmäärä on riittävä kuorman energiantarpeen suhteen. Jotta energiaa saataisiin varastoitua riittävästi huipputehojen aikaan, täytyy luonnollisesti järjestelmä varustaa suurella akustokapasiteetilla.

Nyt esimerkkihybridijärjestelmä oltaisiin luotu aurinkopaneelien ja tuulivoiman mitoituksilla siten, että saman aikainen huipputeho on yli kuorman tehontarpeen, jotta todennäköisyys olisi suurempi, että järjestelmän olisi kykeneväinen toimimaan uusiutuvan energian avulla, jottei generaattoria tarvittaisi, koska järjestelmään ei ole kytketty sähköverkkoa. Mikäli uusiutuvat energianlähteet tuottavat samanaikaisesti energian, täytyi akuston kapasiteettia kasvattaa huomattavasti. Nyt seuraa kysymys: onko kyseinen tilanne kuinka todennäköinen ja kuinka usein se toistuu; kuinka paljon generaattori maksaa; kuinka paljon generaattorin pyörittäminen maksaa verrattuna akuston kapasiteetin kasvattamiseen verrattuna ja uusiutuvien energianlähteiden huipputehon kasvattamiseen nähden; kuinka pitkä oletetusta takaisinmaksuajasta tulee akuston ja uusiutuvien energianlähteiden valjastamiseen käytettävien laitteiden kasvattamisesta verrattuna generaattorin hintaan ja kyseisen ajankohdan dieselin tai vastaavan polttoaineen hintaan nähden?

Järjestelmän mitoittaminen on kohtalaisen työlästä johtuen eri sijainneissa johtuvista monista muuttujista, sekä kuluttajan alkuinvestointien ja käyttötarpeiden mukaisista tekijöistä. Lisämuuttujia järjestelmän mitoittamiseen vaikuttavista seikoista tekee käytettyjen paneelien ja tuuliturbiinien ostohetken hinnat, akkujen hinnat ja niiden laatu, generaattorin hinta sekä generaattorin polttoaineen hinta.

Monen muuttujan summa johtaa siihen, että yksittäinen hybridi-virranjakojärjestelmä joudutaan erikseen tilaajan halujen, sekä sijaintien ja ajanhetken tuotteiden hintojen mukaan suunnittelemaan erikseen, jotta päästäisiin taloudellisesti kaikkein edullisimpiin ja toimivimpiin ratkaisuihin. Jos jokaisen järjestelmän suunnitteleminen joudutaan käyttämään aikaa ja työvoimaa, nostaa se lopullista hintaa huomattavia määriä.

Mikäli hybridijärjestelmät halutaan tuottaa mahdollisimman samanlaisilla kaavoilla ja muodostaa muutamia tuoteperheitä, tulee ne mitoittaa keskimääräisillä ja oletetuilla arvoilla, jonka jälkeen loppuenergia kuorman tarpeeseen otetaan generaattorin tai sähköverkon avulla. Tällöin voidaan saavuttaa yleispäteviä järjestelmiä, jotka toimivat paikassa kuin paikassa, muttei välttämättä täysin optimaalisesti verrattuna erikseen mitoitettuun ja suunniteltuun järjestelmään. Vakiojärjestelmillä suunnittelutyö saadaan puolestaan huomattavasti edullisemmaksi ja todennäköisesti itse tuote myös kuluttajalle mielenkiintoisemmaksi.

Tuoteperheet voitaisiin jakaa tietyille tehoalueille siten, että suunnittelutyöhön ei tarvitse tehdä kuin uusiutuvien energioiden huipputehon mitoitus, joka johtaa mahdollisten sulakkeiden ym. suojiin mitoitukseen. Järjestelmän kiskon ja muut perusosat mitoitetaan kyseisen tehoalueen suurimman tehon mukaan siten, että suurimmalla teholla kiskosto ja mittausvastuksen jne. olisivat käytössä maksimaalisesti ja pienemmillä tehoilla hieman ylimitoitettut. Kun tuoteperheitä on riittävä määrä ja niistä muutellaan vain pientä määrää osia, tilauksesta riippumatta, saadaan aikaiseksi helposti ja edullisesti muunneltavissa oleva järjestelmä.

Vielä kun uusiutuvien energianlähteiden mitoitukseen tekee valmiin laskentataulukon, johon syöttää paikan koordinaatit ja millä energian haluaa tuottaa, sekä kuinka suuren osuuden milläkin energianlähteellä haluaa tuottaa ja millä todennäköisyydellä se täytyy pystyä tuottamaan, saadaan aikaiseksi toimiva ja todella kilpailukykyinen järjestelmä.

Lähteet

- [1] Sanakirja, <<http://www.sanakirja.org>> Luettu 3.4.2011
- [2] Helgren, Matti; Heikkinen, Lauri; Suomalainen Lauri; Kala Janne. 1999. Energia ja ympäristö. Helsinki: Opetushallitus, Hakapaino Oy. 3. tarkastettu painos.
- [3] Sähkömoottorit, <http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf> Luettu 18.3.2011
- [4] Delta Energy Systemsin sisäiset tiedostot.
- [5] Nasa, sää-lokit <<http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?uid=3030>> Luettu 18.3.2011
- [6] Hämeenoja, Eeva. 1993. Akkuopas. Tampere: Kirjapaino Öhrling.
- [7] Enersys, Akkudata. <http://www.enersys-emea.com/reserve/pdf/EN-OPzV-OGfH-002_1108.pdf> Luettu 15.3.2011.
- [8] Linden, David. 1994. Handbook of batteries, second edition. USA: McGraw-Hill, inc.
- [9] Erat, Bruno; Erkkilä, Vesa; Nyman, Christer; Peippo, Kimmo; Peltola, Seppo; Suokivi, Hannu. 2008. Aurinko-opas, Aurinkoenergiaa rakennuksiin. Porvoo: Painoyhtymä Oy.
- [10] Aurinkopaneelin toiminta, <<http://www.tkk.fi/Units/AES/projects/renew/pv/pv-toiminta.html>> Luettu 21.3.2011
- [11] Markvart, Tom; Castaner, Luis. 2003. Practical Handbook of Photovoltaics, Fundamentals and applications. UK, USA, Japan: Elsevier, Inc.
- [12] Lehtiartikkeli, <<http://www.tekniikkatalous.fi/energia/article207655.ece>> Luettu 25.3.2011
- [13] Soteris A. Kalogirou. 2009. Solar Energy Engineering, Processes and Systems. USA, UK: Elsevier, Inc.
- [14] Dunn, P.D. 1986. Renewable energies: sources, conversion and application. UK, London: Peter Peregrinus Ltd.
- [15] Manwwell, J.F.; McGowan, J.G.; Rogers, A.L. 2009. Wind Energy Explained, Theory, desing and application. West Sussex, UK: John Wiley & Sons Ltd.
- [16] Daniel E. Kandray; P.E. 2010. Programmable Automation Technologies, An Introduction to CNC, Robotics and PLCs. New York, USA: Industrial Press inc.

Taulukko 1. Keskimääräisiä ilmakehän ulkopuolella sijaitsevalle horisontaaliselle tasolle päivän aikana tulevan säteilyn määriä H' . [13, s. 94.]

Latitude	Jan 17	Feb 16	Mar 16	Apr 15	May 15	June 11	July 17	Aug 16	Sept 15	Oct 15	Nov 14	Dec 10
60°S	41.1	31.9	21.2	10.9	4.4	2.1	3.1	7.8	16.7	28.1	38.4	43.6
55°S	41.7	33.7	23.8	13.8	7.1	4.5	5.6	10.7	19.5	30.2	39.4	43.9
50°S	42.4	35.3	26.3	16.8	10.0	7.2	8.4	13.6	22.2	32.1	40.3	44.2
45°S	42.9	36.8	28.6	19.6	12.9	10.0	11.2	16.5	24.7	33.8	41.1	44.4
40°S	43.1	37.9	30.7	22.3	15.8	12.9	14.1	19.3	27.1	35.3	41.6	44.4
35°S	43.2	38.8	32.5	24.8	18.6	15.8	17.0	22.0	29.2	36.5	41.9	44.2
30°S	43.0	39.5	34.1	27.2	21.4	18.7	19.8	24.5	31.1	37.5	41.9	43.7
25°S	42.5	39.9	35.4	29.4	24.1	21.5	22.5	26.9	32.8	38.1	41.6	43.0
20°S	41.5	39.9	36.5	31.3	26.6	24.2	25.1	29.1	34.2	38.5	41.1	42.0
15°S	40.8	39.7	37.2	33.1	28.9	26.8	27.6	31.1	35.4	38.7	40.3	40.8
10°S	39.5	39.3	37.7	34.6	31.1	29.2	29.9	32.8	36.3	38.5	39.3	39.3
5°S	38.0	38.5	38.0	35.8	33.0	31.4	32.0	34.4	36.9	38.1	37.9	37.6
0	36.2	37.4	37.9	36.8	34.8	33.5	33.9	35.7	37.2	37.3	36.4	35.6
5°N	34.2	36.1	37.5	37.5	36.3	35.3	35.6	36.7	37.3	36.3	34.5	33.5
10°N	32.0	34.6	36.9	37.9	37.5	37.0	37.1	37.5	37.0	35.1	32.5	31.1
15°N	29.5	32.7	35.9	38.0	38.5	38.4	38.3	38.0	36.5	33.5	30.2	28.5
20°N	26.9	30.7	34.7	37.9	39.3	39.5	39.3	38.2	35.7	31.8	27.7	25.7
25°N	24.1	28.4	33.3	37.5	39.8	40.4	40.0	38.2	34.7	29.8	25.1	22.9
30°N	21.3	26.0	31.6	36.8	40.0	41.1	40.4	37.9	33.4	27.5	22.3	19.9
35°N	18.3	23.3	29.6	35.8	39.9	41.5	40.6	37.3	31.8	25.1	19.4	16.8
40°N	15.2	20.5	27.4	34.6	39.7	41.7	40.6	36.5	30.0	22.5	16.4	13.7
45°N	12.1	17.6	25.0	33.1	39.2	41.7	40.4	35.4	27.9	19.8	13.4	10.7
50°N	9.1	14.6	22.5	31.4	38.4	41.5	40.0	34.1	25.7	16.9	10.4	7.7
55°N	6.1	11.6	19.7	29.5	37.6	41.3	39.4	32.7	23.2	13.9	7.4	4.8
60°N	3.4	8.5	16.8	27.4	36.6	41.0	38.8	31.0	20.6	10.9	4.5	2.3

Taulukko 2. Leveysaste ja vuodenaika –kertoimia [11, s. 55]

Table 3 Coefficients of the third-order polynomial for estimation of monthly average diffuse horizontal irradiation from $(KT_d)_m$ values for use in Equation (22). Source: reference [1]. Winter = November to February; spring = March, April; summer = May to August; autumn = September, October

Latitude band	Season	c_0	c_1	c_2	c_3	$(KT_d)_m$ validation range
$61^\circ\text{N} > \phi > 56^\circ\text{N}$	Winter	1.061	-0.397	-2.975	2.583	[0.11, 0.50]
	Spring	0.974	-0.553	-1.304	0.877	[0.24, 0.50]
	Summer	1.131	-0.895	-1.616	1.555	[0.26, 0.60]
	Autumn	0.999	-0.788	-0.940	0.788	[0.21, 0.51]
$56^\circ\text{N} > \phi > 52^\circ\text{N}$	Winter	1.002	-0.546	-1.867	1.490	[0.14, 0.49]
	Spring	1.011	-0.607	-1.441	1.075	[0.22, 0.59]
	Summer	1.056	-0.626	-1.676	1.317	[0.29, 0.64]
	Autumn	0.969	-0.624	-1.146	0.811	[0.23, 0.53]
$\phi < 52^\circ\text{N}$	Winter	1.032	-0.694	-1.771	1.562	[0.15, 0.51]
	Spring	1.049	-0.822	-1.250	1.124	[0.23, 0.61]
	Summer	0.998	-0.583	-1.392	0.995	[0.27, 0.63]
	Autumn	1.019	-0.874	-0.964	0.909	[0.22, 0.55]

Huom. Taulukossa 4. olevat $\phi = L$ tässä työssä.

Taulukko 3. Suositeltu Julianin luku keskimääräisille kuukauden päiville [13, s. 56.]

Table 2.1 Day Number and Recommended Average Day for Each Month

Month	Day number	Average day of the month		
		Date	N	δ (deg.)
January	i	17	17	-20.92
February	$31 + i$	16	47	-12.95
March	$59 + i$	16	75	-2.42
April	$90 + i$	15	105	9.41
May	$120 + i$	15	135	18.79
June	$151 + i$	11	162	23.09
July	$181 + i$	17	198	21.18
August	$212 + i$	16	228	13.45
September	$243 + i$	15	258	2.22
October	$273 + i$	15	288	-9.60
November	$304 + i$	14	318	-18.91
December	$334 + i$	10	344	-23.05