

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Teknillisen fysiikan koulutusohjelma

ERIKOISTYÖ
Tfy-44.198 Materiaalifysiikka
5.8.1999

AURINKOSÄHKÖ-POLTTOKENNO –LAITTEISTON SUUNNITTELU JA
TOTEUTUS

Matti Noponen
45755D

Professuuri: Tfy-44		Opintojakson koodi: Tfy-44.198	
Työn nimi: Aurinkosähkö-polttokenno –järjestelmän suunnittelu ja toteutus			
in English: Design and Implementation of a Photovoltaic – Fuel Cell –System			
a) Työn taustaa, b) mitä on tehtävä, c) miten on tehtävä			
<p>a) Vety on lupaava vaihtoehto energianvarastointiin. Esimerkiksi aurinkosähköä voidaan ke- sällä muuttaa elektrolyysillä vedyksi, joka varastoidaan ja muutetaan talvella takaisin sähköksi esimerkiksi polttokennolla. Vedyn tarjoama etu akkuihin nähden on se, että varaston teho- ja energiakomponentit saadaan erotettua toisistaan, mikä vaikuttaa järjestelmän kustannuksiin. Lisäksi vedyn energiavarastointikapasiteetti tilavuuden suhteen saadaan akkuja paremmaksi eikä vetyvarastoon liity itsepurkautumista kuten akuilla.</p> <p>b) Tämän erikoistyön tavoitteena on rakentaa laitteisto, jolla voidaan simuloida aurinkosäh- kö-polttokenno –järjestelmää. Laitteistoon kuuluu aurinkosähköpaneelit, polttokenno, akusto, kuorma sekä säätöjärjestelmä. Aurinkosähköpaneeleja simuloidaan ohjattavalla te- holähteellä. Tätä varten on löydettävä sopiva malli, jolla paneelien tuottama virta voi- daan arvioida. Vetyjärjestelmää varten on suunniteltava tarkoitukseen soveltuva vetypan- neeli. Lisäksi järjestelmän vaatima säätöjärjestelmä on toteutettava.</p> <p>c) Aurinkosähkö-polttokenno –järjestelmän säätöjärjestelmä ja aurinkosähköpaneelien si- mulointi toteutetaan graafisella HP VEE –ohjelmointikielellä. Vetypaneelin suunnittelussa on huomioitava mahdollisuus laajentaa laitteistoa siten, että siihen voidaan liittää tule- vaisuudessa elektrolyyseri. Työssä voidaan käyttää joko Analytic Power Corp. tai BCS Technology, Inc. valmistamaa polttokennoa. Valinta tapahtuu näiden ominaisuuksien karakterisoinnin jälkeen. Laitteiston tulisi olla perusta tulevaisuudessa jatkuvalla poltto- kennojärjestelmien tutkimuksille.</p>			
Aikaisemmin tehdyt erikoistyöt:			
Tfy-56.198; Polymeeripolttokennojen kustannusten muodostuminen; kirjallisuusselvitys			
Tekijän nimi: Matti Noponen		Opintokirja: 45755D	
Osoite: Sateentie 6 B 102 02100 Espoo		puh. kotiin/työhön 050 - 572 7902	
Päiväys: 5.8.1999	Ehdottaja: Prof. Peter Lund	Ohjaaja: DI Tuomas Mennola	Valvova professori: Prof. Olli Ikkala

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Teknillisen fysiikan koulutusohjelma

Tietotekniikan osasto

ERIKOISTYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä: Matti Noponen

Opintokirja: 45755D

Työn nimi: Aurinkosähkö-polttokenno –järjestelmän suunnittelu ja toteutus

Tiivistelmä:

Tässä erikoistyössä on kuvattu aurinkosähkö-polttokenno –järjestelmän teoriaa, rakennetun laitteiston komponentit sekä laaditut mittausohjelmat. Lisäksi on esitelty järjestelmän koeajojen tulokset sekä pohdittu järjestelmän kehitysehdotuksia.

Vuosi: 1999 **Sivumäärä:** 35

Työn luonne: Laitesuunnittelu ja ohjelmointi

Arkiston luokituskoodi: Fe 44

Työn numero:

Sisällysluettelo

1. Johdanto.....	1
2. Aurinkosähkö-polttokenno –järjestelmän komponentit	2
2.1. Aurinkosähköpaneelit	2
2.1.1. Aurinkosähköpaneelin maksimitehopisteet	4
2.1.2. Auringon säteilyn intensiteetin laskenta kallistetuille pinoille.....	5
2.2. Akusto.....	6
2.3. Vetyjärjestelmä.....	7
2.3.1. Polttokenno	8
2.4. Aurinkosähkö-polttokenno –järjestelmän säätö ja erilaiset ohjausstrategiat	9
3. SAPHYS - norjalainen aurinkosähkö-polttokenno –järjestelmän tutkimus	11
3.1. Vetyvarastolla erotettu aurinkosähkö-polttokenno –järjestelmä.....	11
3.2. Yhdistetty aurinkosähkö-polttokenno –järjestelmä, versio 1.....	12
3.3. Yhdistetty aurinkosähkö-polttokenno –järjestelmä, versio 2.....	13
4. Aurinkosähkö-polttokenno –järjestelmän taloudellisuus.....	14
5. Koelaitteisto	16
5.1. Koelaitteiston komponentit	16
5.1.1. Aurinkosähköpaneeli	16
5.1.2. Akku.....	17
5.1.3. Polttokenno	17
5.1.4. Kuorma.....	17
5.1.5. Kaasukeskus	18
5.1.6. Ohjausjärjestelmät ja tietokone	19
5.2. Mittausohjelmat.....	20
5.2.1. Polttokennon IV-käyrän mittaus.....	20
5.2.2. Akun hyötysuhteen mittaus.....	21
5.2.3. Laitteiston testiajot	21
6. Mittaukset ja mittaustulokset	26

6.1. APC- ja BCS-polttokennojen IV-käyrien mittaukset	26
6.2. Akun hyötysuhteen määrittäminen	28
6.3. Koelaitteiston testiajot	29
7. Kehitysehdotukset	33
8. Lähdeluettelo.....	35

1. Johdanto

Polttokennotutkimus on aloitettu TKK:n Teknillisen Fysiikan Energiateknologiat laboratoriossa vuonna 1990. Tällöin tutkimus keskittyi vedyn tuottamiseen aurinkosähkön avulla sekä energiajärjestelmiin, joissa polttokennot olivat osana energianvarastointiketjua. Järjestelmätutkimuksessa ongelmaksi muodostui polttokennojen epäluotettavuus, minkä seurauksena tutkimus kohdistui käsittelemään polymeeripolttokennojen rakenteisiin liittyviä kysymyksiä.

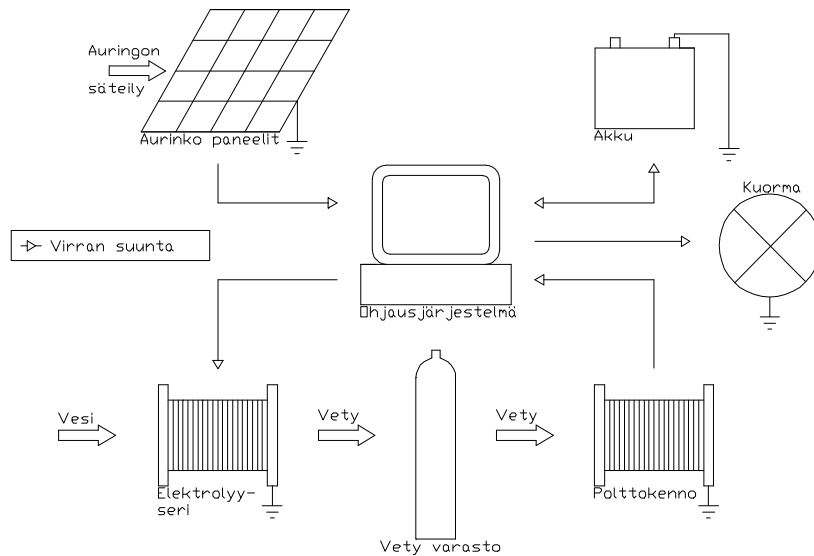
Koska polttokennojen luotettavuus on parantunut ja kustannukset alentuneet, on mielenkiinto polttokennosovelluksia kohtaan kasvanut. Mainittakoon tässä muun muassa autoteollisuus, joka on kaavaillut aloittavansa polttokennolla toimivien autojen sarjatuotannon kymmenen vuoden sisällä. Koska mielenkiinto polttokennojärjestelmiä kohtaan on kasvanut, aloitetaan Energiatekniikat laboratoriossa järjestelmätutkimus uudelleen. Tämän erikoistyön tarkoituksena on saada rakennettua koelaitteisto, jonka avulla tutkimus voitaisiin käynnistää.

Erikoistyö on kolmivaiheinen. Ensimmäisenä tehtävänä oli tutkia aurinkosähkö-polttokenno –järjestelmän teoreettista puolta, jota luvut 2 – 4 käsittelevät. Luvussa 2 on käsitelty järjestelmän komponenttien teoriaa, luvussa 3 erityyppisiä järjestelmäratkaisuja ja luvussa 4 aurinkosähkö-polttokenno –järjestelmän taloudellisuutta.

Toisena vaiheena erikoistyössä oli laitteiston hankkiminen ja koelaitteiston rakentaminen. Luvussa 5 esitellään toteutettu järjestelmä, sen komponentit sekä laaditut tietokoneohjelmat. Erikoistyön pääpaino oli työn tässä osuudessa.

Kolmantena vaiheena oli suorittaa testiajoja toteutetulla laitteistolla. Testiajojen tulokset on raportoitu luvussa 6. Lisäksi luvussa 7 on pohdittu testilaitteiston kehittämismahdollisuuksia.

2. Aurinkosähkö-polttokenno –järjestelmän komponentit



Kuva 1 Aurinkosähkö-polttokenno –järjestelmän komponentit

Omavaraisen aurinkosähkö-polttokenno –järjestelmän (PV-FC –järjestelmä¹) peruskomponentit on esitetty kuvassa 1. Järjestelmän energian tuottajina toimivat aurinkosähköpaneelit. Muut järjestelmän komponentit, joita ovat akku, elektrolyyseri, vetyvarasto ja polttokenno, kuuluvat energian varastointijärjestelmään. Akku on järjestelmän lyhytaikainen energian varasto. Tällä katetaan muutaman päivän tehotarpeet sekä lyhytaikaiset tehopiikit. Elektrolyyserin, vetyvaraston ja polttokennon muodostama järjestelmä (H₂ –järjestelmä²) toimii PV-FC –järjestelmän pitkäaikaisena energian varastona.[4]

Seuraavissa alakappaleissa tarkastellaan lähemmin PV-FC –järjestelmän komponentteihin liittyvää teoriaa.

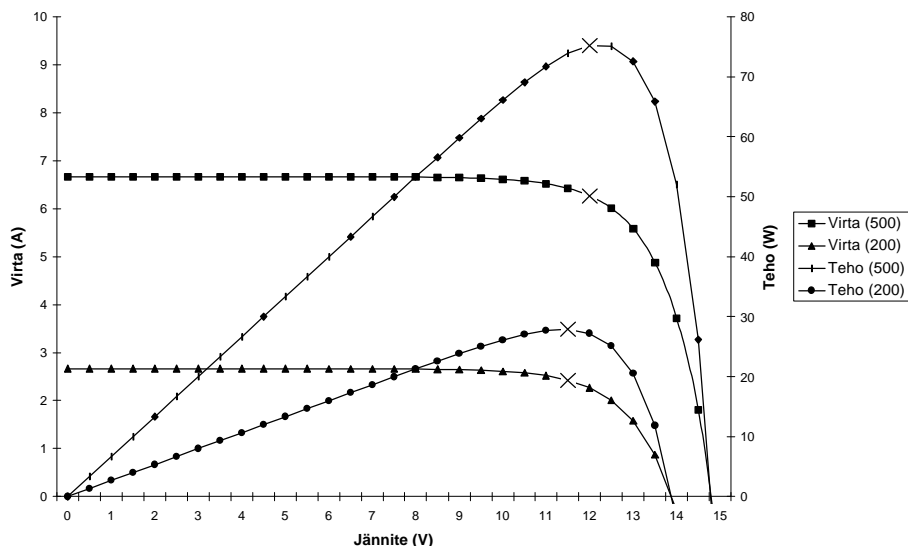
2.1. Aurinkosähköpaneelit

Aurinkosähköpaneelit ovat PV-FC –järjestelmän energian tuottajia. Yksistään aurinkosähköpaneelit eivät kuitenkaan kykene tyydyttämään useissakaan tapauksissa koko

¹ PhotoVoltaic - Fuel Cell –järjestelmä

² Vety –järjestelmä

järjestelmän energiantarvetta, koska aurinkopaneeleista saatava energiamäärä on suoraan verrannollinen auringonvalon intensiteettiin.



Kuva 2 Aurinkosähköpaneelin virta- ja tehokäyrät jännitteen funktiona säteilyintensiteetin ollessa 200 W/m^2 ja 500 W/m^2

Kuvassa 2 esitetyt aurinkosähköpaneelin virta- ja tehokäyrät on laskettu yksidiodikytkennällä [6]

$$I = A\alpha G - A\beta \left(e^{\gamma U} - 1 \right) - \frac{U}{R_{sh}}, \quad (1)$$

- missä
- I = paneelivirta (A)
 - U = paneelijännite (V)
 - A = paneelin pinta-ala (m^2)
 - G = säteilyn intensiteetti (W/m^2)
 - R_{sh} = shunttivastus.

Parametrit α , β ja γ lasketaan kaavoista

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 T, \quad \beta = e^{-\beta_0 + \beta_1 T}, \quad \gamma = \frac{\gamma_0}{T}, \quad (2)$$

missä esiintyvät parametrit α_0 , α_1 , β_0 , β_1 ja γ_0 voidaan estimoida kullekin paneelityypille mitattujen ominaiskäyrien perusteella ja T on paneelin lämpötila (K).

Kuvan 2 virta- ja tehokäyrät on laskettu säteilyn intensiteetin ollessa 200 W/m^2 ja 500 W/m^2 . Lisäksi käyrästään on merkitty maksimitehopisteet rasteilla molemmilla intensiteeteillä.

Seuraavissa alakappaleissa tarkastellaan aurinkosähköpaneelin maksimitehopisteen laskemista sekä auringon säteilyn intensiteetin laskentaa kallistetuille pinnoille.

2.1.1. Aurinkosähköpaneelin maksimitehopisteet

Aurinkosähköpaneelin maksimitehopiste saataisiin laskettua kaavasta (1). Tässä työssä on kuitenkin käytetty kuorman vaatiman tehotarpeen mallia, koska tämän ohjelmointi on helppoa. Koko malli voidaan kirjoittaa yhtenä funktiona, jolloin ohjelma nopeutuu. Kaavasta (1) ei edes saataisi tarkkoja aurinkosähköpaneelin virtoja, koska muun muassa aurinkosähköpaneelin lämpötilan arviointi on epätarkkaa.

Kuorman vaatiman tehotarpeen mallissa lasketaan aluksi järjestelmän energiankulutus vakioteholla vuorokaudessa

$$W' = Pt, \quad (3)$$

missä W' = energiankulutus vuorokaudessa,
 P = järjestelmän kuluttama teho,
 t = järjestelmän käyttöaika vuorokaudessa.

Kun järjestelmän käyttöjännite tunnetaan, saadaan laskettua paljonko järjestelmä kuluttaa varausta

$$Q' = \frac{W'}{U}, \quad (4)$$

missä Q' = kulutettu varaus päivässä,
 U = järjestelmän käyttöjännite.

Kun tiedetään keskimääräinen säteilyn intensiteetti tietylle ajanjaksolle halutulla tasolla, saadaan laskettua aurinkosähköpaneelin tuottaman virran mitoitusarvo

$$I' = \frac{Q'}{G_{i,ave}}, \quad (5)$$

missä I' = virran mitoitusarvo
 $G_{i,ave}$ = keskimääräinen säteilyn intensiteetti mitoitusajanjaksolla.

Lopulta aurinkosähköpaneeleista saatu virta saadaan laskettua kaavalla

$$I = I' G_{i,j}, \quad (6)$$

missä $G_{i,j}$ = säteilyn intensiteetti ajanhetkellä j .

2.1.2. Auringon säteilyn intensiteetin laskenta kallistetuille pinnoille

Kallistetulle pinnalle tuleva auringon säteilyn intensiteetti (G_i) muodostuu suoran (G_{bi}), haja- (G_{di}) sekä heijastuneen säteilyn (G_{ri}) komponenttien summasta eli

$$G_i = G_{bi} + G_{di} + G_{ri}. \quad (7)$$

Suoran säteilyn intensiteetti kallistetulla pinnalla saadaan kaavasta [5]

$$G_{bi} = G_b \cos \theta_i / \sin \theta_s, \quad (8)$$

missä G_b = suoran säteilyn intensiteetti vaakasuoralla pinnalla (W/m^2),

θ_i = säteilyn tulokulma kallistetulle pinnaan normaalin suhteen

θ_s = auringon korkeuskulma ($^\circ$).

Säteilyn tulokulma kallistetulle pinnaan normaalin suhteen saadaan kaavasta

$$\cos \theta_i = \sin \theta_s \cos \beta + \cos \theta_s \sin \beta \cos(\varphi_s - \varphi_i), \quad (9)$$

missä β = pinnan kallistuskulma vaakatasosta ($^\circ$),

φ_i = pinnan atsimuuttikulma ($^\circ$ etelästä länteen),

φ_s = auringon atsimuuttikulma ($^\circ$).

Auringon korkeuskulma saadaan laskettua kaavasta

$$\sin \theta_s = \sin l \sin \delta_s - \cos l \cos \delta_s \cos(\pi t / 12h) \quad (10)$$

ja auringon atsimuuttikulma kaavasta

$$\tan \varphi_s = \frac{\cos \varphi_s \sin(\pi t / 12h)}{\cos l \sin \delta_s + \sin l \cos \varphi_s \cos(\pi t / 12h)}, \quad (11)$$

missä l = leveyspiiri ($^\circ$ päiväntasaajalta pohjoiseen),

δ_s = auringon deklinaatio ($^\circ$),

t = paikallinen aurinkoaika.

Auringon deklinaatio saadaan kaavasta

$$\delta_s = 23,45^\circ \sin[2\pi(J - 81)/368], \quad (12)$$

missä J = päivän järjestysnumero vuoden alusta lukien.

Hajasäteilyn intensiteettiä ei voida laskea analyttisesti kuin isotrooppisen taivaan tapauksessa. Tästä syystä on käytettävä tarkempia malleja haluttaessa päästä tarkempiin tuloksiin. Tässä työssä on käytetty hajasäteilyn intensiteetin laskentaan Klucherin mallia. Malli antaa hyviä tuloksia etelään suunnatuille tasoille ja on helposti ohjelmoitavissa. Toisaalta muille ilmansuunnille mallin virhe on niin suuri, ettei luotettavia arvoja saada. [5]

Klucherin mallilla hajasäteily saadaan kaavasta

$$G_{di} = G_d \left(1 + F \cos^2 \theta_i \cos^3 \theta_s\right) \left[1 + F \sin^3(\beta/2)\right] (1 + \cos\beta) / 2, \quad (13)$$

missä kerroin F saadaan laskettua kaavasta

$$F = 1 - \frac{G_d}{G}, \quad (14)$$

missä G = kokonaissäteilyn intensiteetti vaakasuoralla pinnalla (W/m^2).

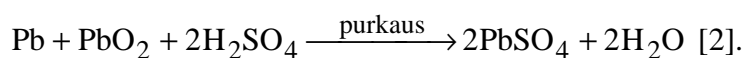
Maasta heijastuneen säteilyn oletetaan jakautuvan isotrooppisesti. Kallistetulle pinnalle tulevan heijastuneen säteilyn intensiteetti saadaan laskettua kaavasta

$$G_{ri} = \rho_g G (1 - \cos\beta) / 2. \quad (15)$$

2.2. Akusto

Akusto toimii PV-FC -järjestelmässä lyhytaikaisena energiavarastona sekä tehopiikkien tasoittajana. Akuston kapasiteetti pyritään mitoittamaan siten, että sillä pystytään kattamaan muutaman päivän energiatarpeet. [4]

Akku koostuu sarjaan kytketyistä akkukenoista, ja akusto puolestaan joko rinnan tai sarjaan kytketyistä akuista. Yleisimmin käytetty akkutyyppe on lyijyakku. Tämän kemiallinen virtaa tuottava reaktioyhtälö on



Vastaavasti akkua varattaessa reaktioyhtälö on päinvastainen.

Akun kennojännitteen määräävät elektrolyytin väkevyys, purkaus/lataus –virta, lämpötila sekä akun kapasiteetti. Koska tämän erikoistyön puitteissa pyrittiin akun muut ominaisuudet akun kapasiteettia lukuunottamatta pitämään vakioina, käsitellään tässäkin pelkästään akun kapasiteetin vaikutusta kennojännitteeseen.

Akun kapasiteetti määritellään

$$K = \int I dt, \quad (16)$$

missä K = akun kapasiteetti,
 I = lataus/purkaus –virta,
 t = aika.

Kun tietyllä aikavälillä oletetaan virran pysyvän vakiona, saadaan kaava (16) kirjoitettua muotoon

$$K = \sum_i I_i \Delta t_i, \quad (17)$$

missä I_i = aikaväliä Δt_i vastaava virta.

Akun virtahyötysuhde määritellään

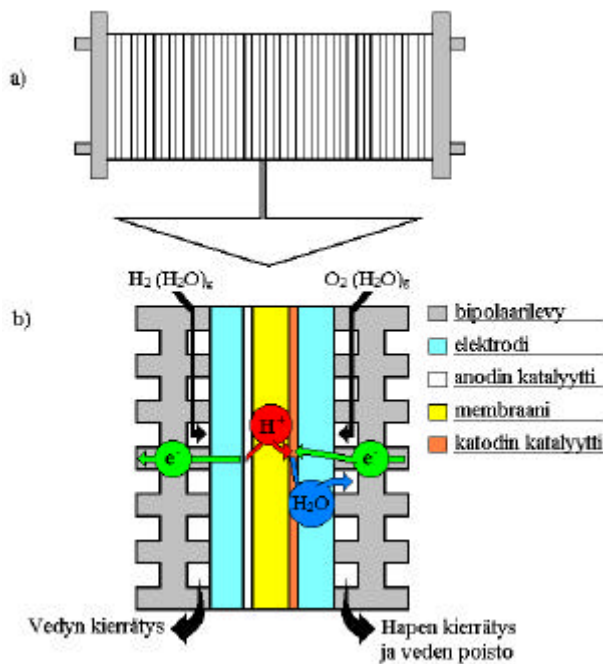
$$\eta = \frac{K_{\text{purkaus}}}{K_{\text{lataus}}}, \quad (18)$$

missä K_{purkaus} = akusta purettu kapasiteetti,
 K_{lataus} = akkuun ladattu kapasiteetti.

2.3. Vetyjärjestelmä

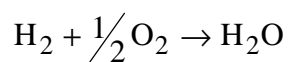
Polttokenno on PV-FC –järjestelmän pitkäaikaisen energiavaraston sähköä tuottavana komponentti. Muut H_2 –järjestelmän komponentit ovat elektrolyyseri ja vetyvarasto. Elektrolyyserillä tuotetaan vedestä ja sähköstä vetyä, joka varastoidaan vetyvarastoon esimerkiksi metallihydridiin tai paineastiaan. Sähköä tarvittaessa vetyvarastosta voidaan purkaa vetyä ja hyödyntää tämä polttokennossa.

2.3.1. Polttokenno

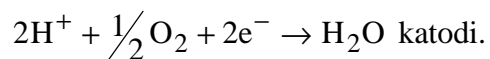
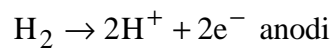


Kuva 3 PEMFC:n rakenne ja reaktiot

Polttokennot tuottavat sähköä sähkökemiallisten reaktioiden tuotteena. Useimmiten reagoivina aineina käytetään happea ja vetyä. Tällöin kokonaisreaktion reaktioetju on



eli tuotteena syntyy vettä. Sähkön muodostumisen havainnoistaan anodi ja katodi puolen reaktiot



Koska kokonaisreaktio on eksotermisen, syntyy reaktiotuotteena lisäksi lämpöä.

Tässä erikoistyössä käytettiin polttokennona polymeeripolttokennoa (PEMFC³). PEMFC:n rakenne on esitetty kuvassa 3. PEMFC muodostuu useasta sarjaan kytketystä yksikkökennosta (kuva 3a). Yksikkökkenno (kuva 3b) puolestaan rakentuu bipolaarilevyistä, elektrodeista, katalyytistä sekä membraanista. Bipolaarilevyt toimivat kaasuvirtauskanavistona, mutta toisaalta näiden pitää olla myös sähköjohtavaa materiaalia. Useimmiten bipolaarilevyjen materiaali on grafiittia.

Elektrodit toimivat polttokennossa anodina ja katodina. Elektrodien materiaalin pitää olla huokoista, jotta siinä pystyisi liikkumaan niin kaasut kuin vesikin. Useimmin käytetty materiaali on hiilipaperi tai -kangas.

PEMFC:ssä tarvitaan katalyyttipinnoitteita, koska varsinkin katodipuolen reaktio on hidas. Katalyyttinä käytetään platinaa.

Membraani on PEMFC:n tärkein osa. Tältä vaaditaan protonijohtavuutta ja elektronien läpäisemättömyyttä. Lisäksi membraani erottaa happi- ja vetykaasut toisistaan.

2.4. Aurinkosähkö-polttokenno –järjestelmän säätö ja erilaiset ohjausstrategiat

Akku toimii PV-FC –järjestelmässä säätöjärjestelmän tärkeimpänä komponenttina [4]. Eri komponenttien säädöt tapahtuvat akun varaustilaa ja jännitettä seuraamalla. Säätöjärjestelmällä on kaksi tarkoitusta: suojata järjestelmän komponentteja ylikuormittumiselta sekä saada komponentit toimimaan maksimitehollaan. Suojausjärjestelmien rakentaminen on helppoa, mutta jokaisen komponentin ajaminen maksimitehollaan on vaikeaa. Tämä johtuu siitä, että eri komponenteilla on erilaiset virta-jännite –käyrät. Tätä ongelmaa voidaan helpottaa sijoittamalla komponenttien väliin DC/DC –muuntimia. Nämä aiheuttavat toisaalta tehonmenetyksiä, jotka usein korvautuvat kuitenkin sillä, että järjestelmän komponentit saadaan toimimaan paremmalla hyötysuhteella.

PV-FC –järjestelmän yksinkertaisin ohjausstrategia on akun varaustilan pitäminen tiettyjen rajojen sisällä vuodenajasta riippumatta. Tällä ei kuitenkaan päästä parhaisiin mahdollisiin tuloksiin, vaan kehittyneempiäkin ohjausstrategioita on.

Kuukaudesta riippuvilla ohjausrajoilla päästään polttokennon ja elektrolyysin tehokkaampaan hyödyntämiseen. Kesällä akusto saisi purkaantua syvälle, jolloin elektro-

³ Proton Exchange Membrane Fuel Cell

lyyseri toimisi paremmalla teholla. Keskitälvellä puolestaan akun latausta pidettäisiin täydempänä, jolloin polttokenno toimisi paremmalla hyötysuhteella.

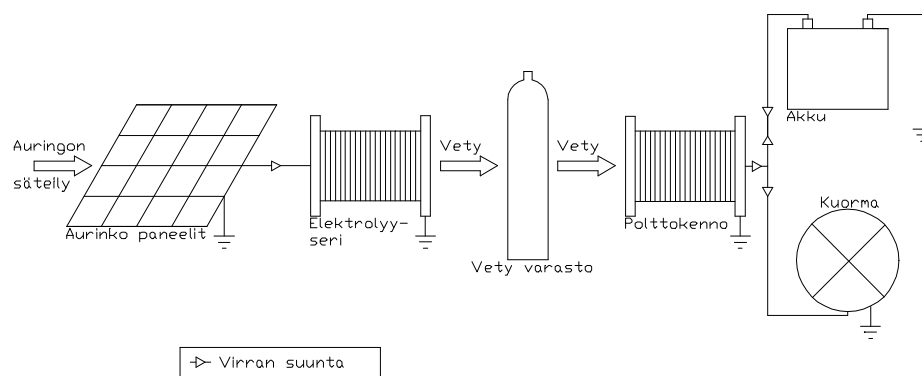
Akun poistaminen PV-FC –järjestelmästä parantaisi hyötysuhdetta. Tällöin polttokennon ja elektrolyysin pitäisi pystyä toimimaan epäsäännöllisin ajoin, epäsäännöllisillä tehoilla. Tämä saattaa lyhentää komponenttien käyttöikää, mikä olisi huomioitava laskelmissa.

PV-FC –järjestelmän ohjauksessa voitaisiin käyttää myös hyödyksi sääennusteita. Tämä malli vaatisi monimutkaista dynaamista optimointia sekä nykyistä luotettavampia ja useammin päivittyviä sääennusteita.

3. SAPHYS - norjalainen aurinkosähkö-polttokenno –järjestelmän tutkimus

SAPHYS-projektissa [1] pyrittiin löytämään optimaalinen säätöjärjestelmä PV-FC –järjestelmälle. Projektissa käsiteltiin kolmea erilaista järjestelmää.

3.1. Vetyvarastolla erotettu aurinkosähkö-polttokenno –järjestelmä



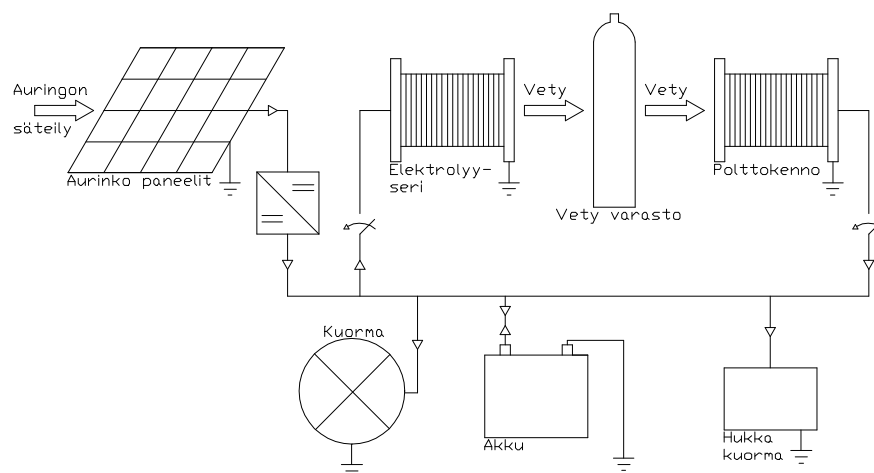
Kuva 4 H₂-varastolla erotettu PV-FC –järjestelmä

Ensimmäinen järjestelmä, jonka SAPHYS esitteli, on kuvan 4 H₂-varastolla erotettu PV-FC –järjestelmä. Aurinkosähköpaneeli saadaan toimimaan järjestelmässä maksimaalisella teholla, koska tällä on kuormanaan ainoastaan elektrolyyseri. Elektrolyyserille pätee sama; koska elektrolyyserin tehollähteenä on pelkästään aurinko sähköpaneeli, saadaan se toimimaan maksimiteholla. Koska aurinkosähköpaneeli ja elektrolyyseri saadaan toimimaan helposti maksimitehoillaan, voidaan järjestelmän ohjausjärjestelmä tehdä yksinkertaiseksi. Järjestelmän dynamiikka on myös yksinkertainen, koska H₂-varasto erottaa vety- ja sähköjärjestelmät toisistaan. Lisäksi instrumentointi on helppoa, koska DC/DC –muuntimia ei välttämättä tarvita.

Järjestelmän suurin haittapuoli on huono hyötysuhde. Tämä johtuu siitä, että hyötysuhde laskee, kun ensiksi elektrolyyserillä valmistetaan vetyä, joka pitää muuttaa heti takaisin sähköksi. Lisäksi elektrolyyserin toiminta pitkällä aikavälillä maksimiteholla on mahdotonta, koska sen virta-jännite käyrä muuttuu ajan myötä.

Järjestelmän huonosta hyötysuhteesta huolimatta kuvan 4 mukainen laitteisto tulee olemaan tulevaisuudessa varteenotettava vaihtoehto. Järjestelmä tulisi luultavasti käyttöön, jos vedyn ja sähkön tuotanto eriytettäisiin. Varsinkin eteläisissä Välimeren maissa tutkitaan paljon vedyn tuottamista aurinkoenergian avulla. Näiltä aurinkoisilta seuduilta vety kuljetettaisiin sitä tarvitseviin maihin, jossa yksi mahdollisuus vedyn hyödyntämiseen on juuri kuvan 4 mukainen laitteisto.

3.2. Yhdistetty aurinkosähkö-polttokenno –järjestelmä, versio 1



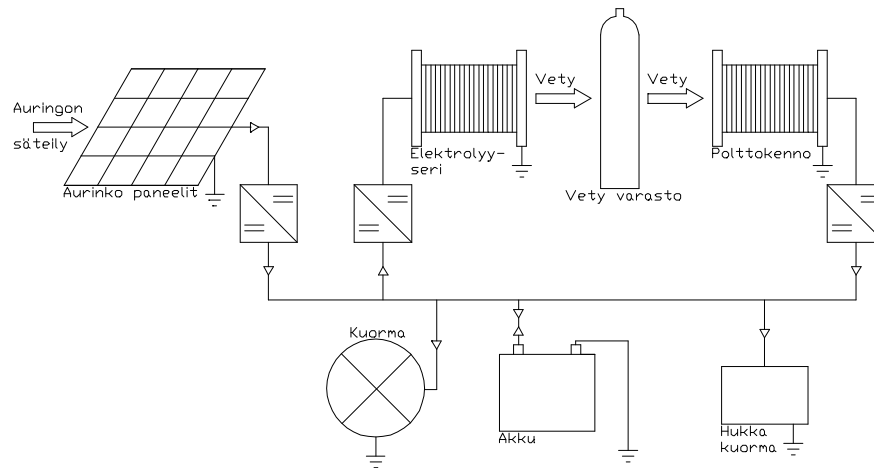
Kuva 5 Yhdistetty PV-FC –järjestelmä, versio 1

Jotta PV-FC –järjestelmä saataisiin toimimaan paremmalla hyötysuhteella, on aurinkosähköpaneelit saatava kytkettyä suoraan kuormaan. Tällöin tulee kuitenkin ongelmaksi se, miten aurinkosähköpaneelit saataisiin toimimaan maksimitehollaan. SAPHYS –ohjelmassa ratkaistiin tämä ongelma kuvan 5 mukaisella järjestelmällä. Aurinkosähköpaneelien ja muun järjestelmän väliin kytkettiin DC/DC –muunnin, niin sanottu MPT⁴. Järjestelmän muut komponentit olivat samassa sähköisessä kytkennässä, lukuunottamatta elektrolyyseriä ja polttokennoa, jotka eivät ole koskaan samaan aikaan toiminnassa. Hukkakuorma liitettiin laitteistoon tilanteita varten, joissa sekä vetyvarasto ja akku ovat täynnä. Tällöin ylimääräinen energia voidaan kuluttaa ilman, että muu järjestelmä vahingoittuu.

⁴ Maximum Power Tracer

Laitteiston hyötysuhde parani olennaisesti verrattuna ensimmäiseen versioon. Ongelmana oli kuitenkin elektrolyysin ja polttokennon tehokäyrien sovittaminen kuorman ja akun tehokäyriin, siten että järjestelmä toimisi parhaalla mahdollisella hyötysuhteella. Lisäksi laitteiston ohjausjärjestelmä vaati huolellisempaa suunnittelua.

3.3. Yhdistetty aurinkosähkö-polttokenno –järjestelmä, versio 2

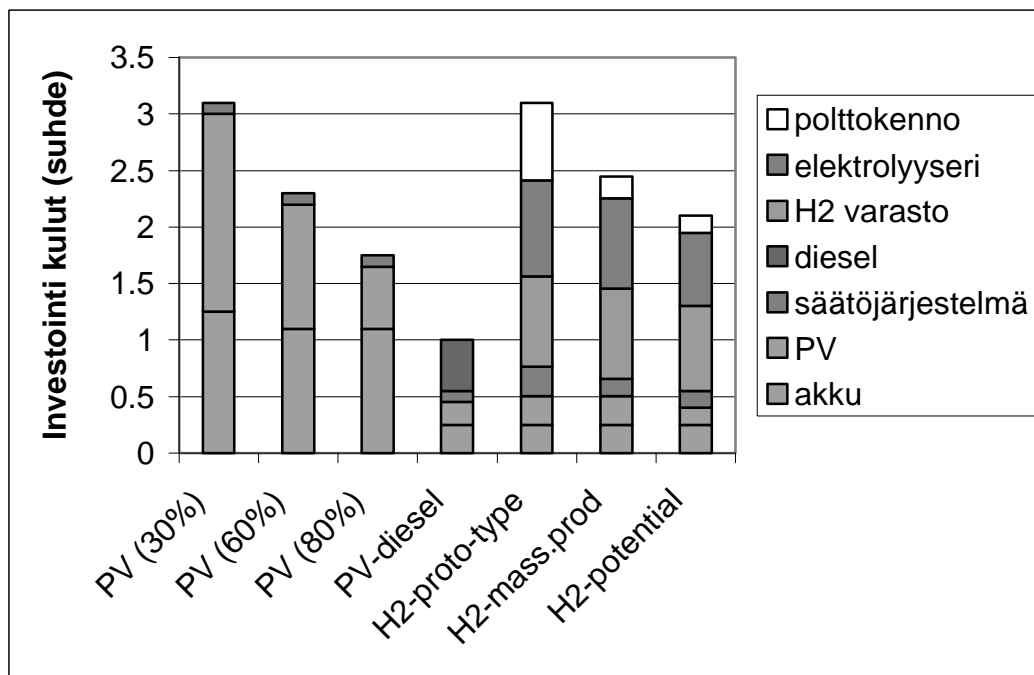


Kuva 6 Yhdistetty PV-FC –järjestelmä, versio 2

SAPHYS –ohjelman kolmannessa PV-FC –järjestelmässä pyrittiin ratkaisemaan versiossa 1 havaitut ongelmat. Nyt elektrolyyseri ja polttokenno erotettiin muusta järjestelmästä omilla DC/DC –muuntimilla. Muutoin järjestelmä pysyi version 1 kaltaisena. Koska muuntimilla pystyttiin ohjaamaan jännitettä helposti, voitiin elektrolyyseriä ja polttokennoa käyttää paremmalla hyötysuhteella kuin versio 1 :ssä. Täten koko laitteiston hyötysuhdetta saatiin parannettua. Tämä jäikin SAPHYS –tutkimuksen lopulliseksi ratkaisuksi PV-FC –järjestelmäksi. Tutkimukset osoittivat, että hyötysuhteen parantamisen kannalta olennaisin tekijä on se, että aurinkosähköpaneelin tuottama teho saadaan maksimoitua.

4. Aurinkosähkö-polttokenno –järjestelmän taloudellisuus

Neste Oy:n tekemän tutkimuksen [3] mukaan PV-FC –järjestelmä on taloudellisesti perusteltu ratkaisu, kun verrataan sitä PV-akku ja PV-diesel –järjestelmiin. Varsinkin pitkällä tähtäimellä PV-FC –järjestelmä osoittautui kannattavaksi. Tutkimuksen tulokset on esitetty kuvissa 7 ja 8.



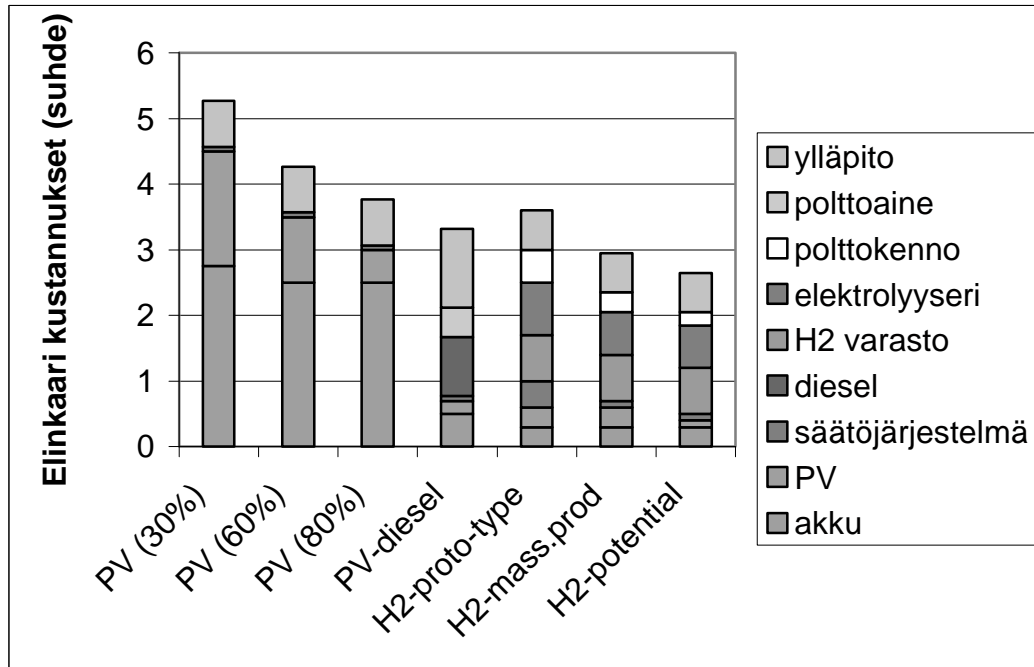
Kuva 7 Eri järjestelmien investointikustannukset

Kuvassa 7 on Nesteen tekemän järjestelmähintavertailun tulokset. Järjestelmät ovat seuraavanlaisia:

- 1) tavanomainen PV-akku –järjestelmä.
- 2) PV-akku –järjestelmä, jossa akkua puretaan 60 %.
- 3) PV-akku –järjestelmä, jossa akkua puretaan 80 %.
- 4) tavanomainen PV-diesel –järjestelmä.
- 5) tavanomainen PV-FC –järjestelmä.
- 6) PV-FC –järjestelmä polttokennojen tultua massatuotantoon.
- 7) PV-FC –järjestelmän mahdollinen tulevaisuus.

Kuten kuvasta 7 voidaan nähdä on PV-diesel –järjestelmän alkukustannukset selvästi alhaisimmat. Muiden järjestelmien osalta näihin arvoihin ei uskota pääsevän edes tulevaisuudessa. Huomion arvoista tutkimuksessa oli kuitenkin se, että PV-akku ja PV-

FC –järjestelmät ovat jo tänä päivänä investointikustannuksiltaan yhtä edullisia ja tulevaisuudessa PV-FC –järjestelmien uskotaan olevan jo huomattavasti edullisempia.

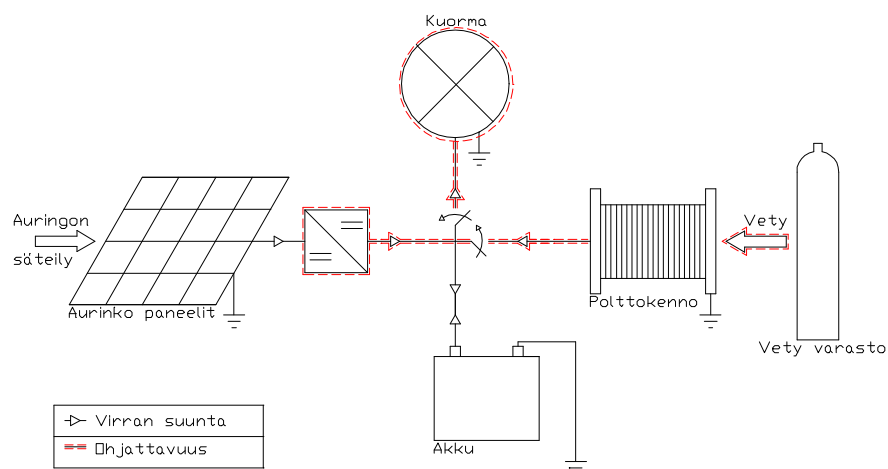


Kuva 8 Eri järjestelmien elinkaarikustannukset

Elinkaarikustannuksiltaan PV-FC –järjestelmä on jo nykyisin lähes kilpailukykyinen PV-diesel –järjestelmän kanssa, kuten kuvasta 8 nähdään. Toisaalta ero PV-akku –järjestelmiin on jo nykyiselläänkin huomattava.

Ainakin siis tämän tutkimuksen tulosten mukaan PV-FC –järjestelmä on varsinkin tulevaisuudessa varteenotettava vaihtoehto valittaessa pienjärjestelmien energiantuottojärjestelmää.

5. Koelaitteisto



Kuva 9 Toteutettu laitteisto

Kuvassa 9 on esitetty laitteisto, joka tämän erikoistyön puitteissa päädyttiin rakentamaan. Koelaitteiston energian tuottajana toimii tietokoneohjattava teholähde, jolla simuloidaan aurinkopaneelia. Aurinkopaneelin simuloinnissa on käytetty luvussa 2.1.1. esitettyä MPP-mallia, minkä takia kuvan 9 laitteistoon on lisätty DC/DC –muunnin.

Painepulloon varastoitu vety muutetaan energiaksi polttokennolla. Akku toimii järjestelmän lyhytaikaisena energiavarastona sekä tehopiikkien tasaajana. Lisäksi laitteistossa on ohjattava kuorma sekä tietokoneohjattu säätöjärjestelmä. Komponentit, joita järjestelmässä pystytään ohjaamaan joko tietokoneella tai manuaalisesti, on ympäröity kuvan 9 laitteistoon katkoviivalla.

5.1. Koelaitteiston komponentit

5.1.1. Aurinkosähköpaneeli

Aurinkosähköpaneeleita simuloitiin ohjattavalla teholähteellä, jota ohjattiin GP-IB –väylän avulla. Simuloinnin perustana käytettiin luvussa 2.1.1 kuvattua MPP-mallia. Ohjattavan teholähteen tekniset tiedot ovat:

valmistaja: Hewlett Packard
malli: HP 6032A Power supply, 0-60 V/0-50 A, 1000W

5.1.2. Akku

Akku on 12 V ja 110 Ah paikallisakku. Se on ostettu vuonna 1993, eikä varsinaisen mittausajanjakson aikana käynyt ilmi, että akku olisi päässyt vioittumaan. Akun tekniset tiedot ovat:

valmistaja: Neste, NAPS
malli: Solarpower, 12 V/110 Ah

5.1.3. Polttokenno

Järjestelmään sopivia polttokennoja olisi ollut kaksi, molemmat vapaasti hengittäviä. Suurempi, APC:n⁵ valmistama 200 W kenno, oli kuitenkin menettänyt suoritusarvoaan niin paljon, ettei sitä voinut työssä käyttää. Pienempi 75 W:n polttokenno soveltuu järjestelmän vaatimuksiin kuitenkin hyvin ja tätä käytettiinkin laitteiston koeajossa. Polttokennon lisävarusteena oli polttokennon lämpötilansäädin, jota tässä työssä ei kuitenkaan käytetty. Polttokennon tekniset tiedot ovat:

valmistaja: BCS Technology, Inc.
malli: 75 W Air-Breathing Fuel Cell Stack

BCS:n polttokenno on rakennettu 21 yksikkökennosta, jotka on liitetty sarjaan. Suurilla virroilla toimittaessa tulisi käyttää erillisiä puhaltimia riittävän hapen saannin turvaamiseksi sekä polttokennon ylikuumentumisen estämiseksi.

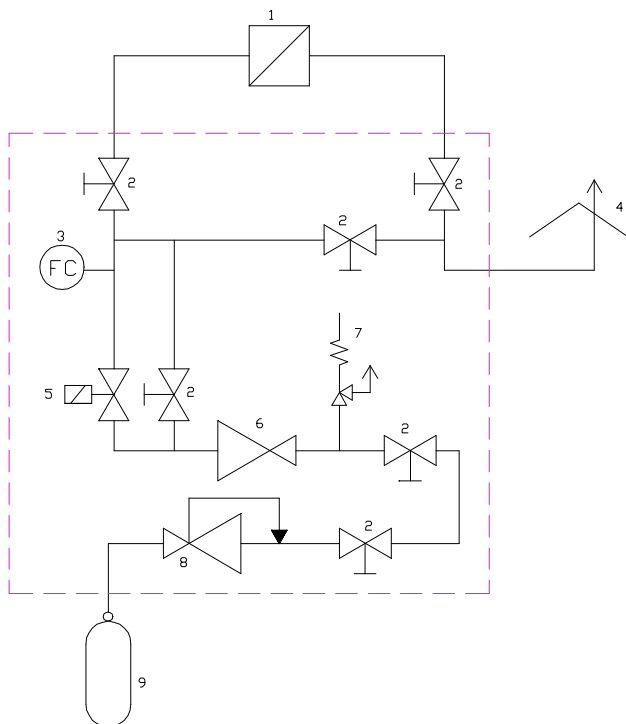
5.1.4. Kuorma

Järjestelmän kuormana käytettiin resistiivistä 500 W kuormaa. Tämä oli tarkoitettu toimivan 26 V jännitteellä, mutta koska järjestelmän käyttöjännite oli noin 12 V, oli maksimikuorma noin 107 W. Kuorman suuruutta pystyi säätämään portaitaisesti nollassa aina maksimitehoon asti. Kuorman tekniset tiedot ovat:

valmistaja: Meyer-vastus
malli: 0-500 W/26 V

⁵ Analytic Power Corp.

5.1.5. Kaasukeskus



Kuva 10 Kaasukeskus

Kaasukeskus on kuvan 10 mukainen. Katkoviivalla rajattu alue kuvaa kaasupaneelia; muut osat ovat järjestelmän muita osia, joissa virtaa vetyä. Taulukossa 1 on selitetty kuvassa 10 käytettyjen symbolien merkitykset, annettu tiedot komponenttien valmistajista sekä komponenttien tärkeimmistä tiedoista.

Taulukko 1 Kaasukeskuksen komponentit

nro	Laite	Valmistaja	Huomautuksia
1	Polttokenno	BCS Technology, Inc.	60 W _{max}
2	Sulkuventtiili (6 kpl)	Aga	VB 200/CG
3	Massavirtaussäädin	Bronkhorst High-Tech	0-75 l/h H ₂ , 0-5 bar
4	Ulospuhallus		
5	Magneettiventtiili	Bürkert	0-26 bar, 4 W
6	Paineenalenin	Aga	0-4 bar
7	Varoventtiili	Aga	SS-4RSA5
8	Paineenalenin	Aga	0-12 bar
9	Vety pullo	Aga	50 l H ₂ , 200 bar
	Pulloletku	Aga	0,9 m + H ₂ mutteri

Kaasupaneeliin haluttiin asentaa kaksi paineenaleninta, jotta tarvittaessa ensimmäisen

paineenalentimen jälkeen kaasuvirtaus voitaisiin jakaa useampaan haaraan. Tähän mennessä tarvetta ei kuitenkaan ole ilmennyt.

5.1.6. Ohjausjärjestelmät ja tietokone

Järjestelmän ohjausparametreinä toimivat syötetiedostona ollut vuoden 1979 säätiedosto, ohjattavan teholähteen, polttokennon sekä kuorman virrat sekä jännitteet ja polttokennon lämpötila. Jännitemittaukset tehtiin Hewlett Packard –dataloggerin avulla. Virtamittauksissa oli käytettävä apuna shunteja, joiden yli olevaa jännitettä mittaamalla saadaan virta laskettua kaavasta

$$I = \frac{U}{R}, \quad (19)$$

missä I = virta,
 U = jännite,
 R = vastus.

Shuntit sijoitettiin siten, että polttokennon ja kuorman virtaa mitattiin 5 A virran mittaukseen tarkoitetuilla shunteilla, ja ohjattavan teholähteen virtaa 15 A shuntilla. Ohjattavassa teholähteessä on myöskin jännitteen ja virran mittaus, mutta tämä osoittautui epätarkaksi, joten sitä ei käytetty.

Polttokennon lämpötilamittaukseen käytettiin K-tyyppin termoparia. Vaikka termopari ei ole kovin tarkka, katsottiin sen täyttävän tämän laitteiston vaatiman tarkkuustason.

Dataloggeri on järjestelmän tiedonkeruu- ja ohjausyksikkö. Tähän on yhdistetty relemultiplekserikortti, johon puolestaan jännite ja lämpötilamittausta varten on yhdistetty 16-kanavainen multiplekserikortti. Relemultiplekserikortti on liitetty yleismittariin. Dataloggeri kommunikoi tietokoneen kanssa GP-IB –väylän kautta.

Magneettiventtiili ja massavirtaussäädin vaativat erilliset teholähteet. Magneettiventtiilin teholähteenä käytettiin Amrelin valmistamaa ohjattavaa teholähdettä, joka kommunikoi tietokoneen kanssa GP-IB –väylän kautta. Magneettiventtiilin avulla saadaan kytkettyä vetyvirtaus joko päälle tai pois päältä. Massavirtaussäätimen teholähde oli Bronkhorst High-Tech:n valmistama yksinomaan massavirtaussäätimen säätöön tarkoitettu nelikanavainen teholähde. Sitä ei ollut mahdollista säätää tietokoneen avulla.

Ohjausjärjestelmän komponenttien sekä tietokoneen tiedot on taulukossa 2.

Taulukko 2 Ohjausjärjestelmän komponenttien ja tietokoneen tiedot

Laite	Valmistaja	Huomautuksia
Shuntti 1	Thermovolt AB	5A 60 mV 0,5%
Shuntti 2	Thermovolt AB	15A 60 mV
Massavirtaussäätimen teholähde	Bronkhorst High-Tech	E5514-FA
Magneettiventtiilin teholähde	Amrel	PPS-1326
Tietokone	Digital	FR-810 WW-A9
Dataloggeri	Hewlett Packard	HP 75000, series B
Dataloggerin kortit:		
Multimeter	Hewlett Packard	HP E1326B
16CH thermocouple relay mux	Hewlett Packard	HP E1347A
Relay mux	Hewlett Packard	HP E1345-66201

5.2. Mittausohjelmat

Tämän työn puitteissa tehtiin kolme mittausohjelmaa: ohjelmat polttokennon IV-käyrän ja akun hyötysuhteen mittaukseen sekä koelaitteiston testiajoja varten. Mittausohjelmat on ohjelmoitu Hewlett Packardin HP VEE –ohjelmointiympäristössä. HP VEE on graafinen ohjelmointikieli, joka mahdollistaa mittausohjelmien nopean kirjoittamisen sekä selkeiden käyttöliittymien toteuttamisen.

Kaikki kolme mittausohjelmaa oltaisiin voitu liittää samaan ohjelmaan, mutta tämä olisi tehnyt ohjelmasta vaikeasti luettavan eikä tähän nähty muutenkaan riittäviä perusteita. Tämän työn puitteissa keskityttiin lähinnä koelaitteiston testiajo –ohjelman laatimiseen, joten muiden ohjelmien käyttöliittymiin ja luettavuuteen ei ole yritettykään kiinnittää huomiota.

5.2.1. Polttokennon IV-käyrän mittaus

Koska koelaitteistoon oli tarjolla kaksi polttokennoa, piti näiden ominaisuudet saada karakterisoitua, jotta laitteistoon paremmin soveltuva polttokenno voitiin valita. Lisäksi polttokennojen kunnosta ei ollut ajantasalla olevaa tietoa. Polttokennon IV-käyrä mittausta varten oli jo olemassa toimiva laitteisto, mutta katsottiin kuitenkin tarpeelliseksi rakentaa uusi, polttokennojärjestelmien tarpeita paremmin huomioiva laitteisto.

Polttokennon IV-käyrän mittausohjelma on tiedostossa *c:\Matti\CurrentMeasurement 2602.vee*. Ohjelman tärkeimmät toiminnot ovat magneettiventtiilin säätö, polttokennon toimintajännitteen ja –virran sekä lämpötilan lukeminen sekä näiden tallentami-

nen käyttäjän määrittelemään tiedostoon. Lisäksi mitattujen arvojen kehittymistä voidaan seurata IV-, jännite-aika- sekä lämpötila-aika –kuvaajista. Ohjelma on toteutettu yhdellä while –silmukalla, joka loppuu vasta, kun ohjelma lopetetaan HP VEE:n stop –nappulasta.

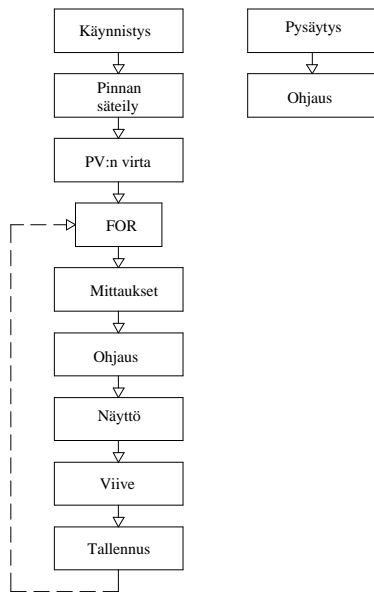
5.2.2. Akun hyötysuhteen mittaus

Akun hyötysuhteen mittaamista varten on olemassa kaksi erillistä ohjelmaa. Tiedostossa *c:\Matti\BatteryDischarge0403.vee* on ohjelma, jonka avulla akku puretaan. Ohjelma mittaa akun purkautumisvirran ja toimintajännitteen, jotka se tallentaa käyttäjän määrittelemään tiedostoon. Ohjelma laskee lisäksi akun varaustilan kaavan (17) mukaisesti ja tallentaa varaustilan tiedostoon. Kun varaustila on laskenut ohjelman käyttäjän asettamalle rajalle, ohjelma keskeytyy. Mitattujen arvojen kehittymistä voidaan seurata kuten IV-käyrä mittauksessa.

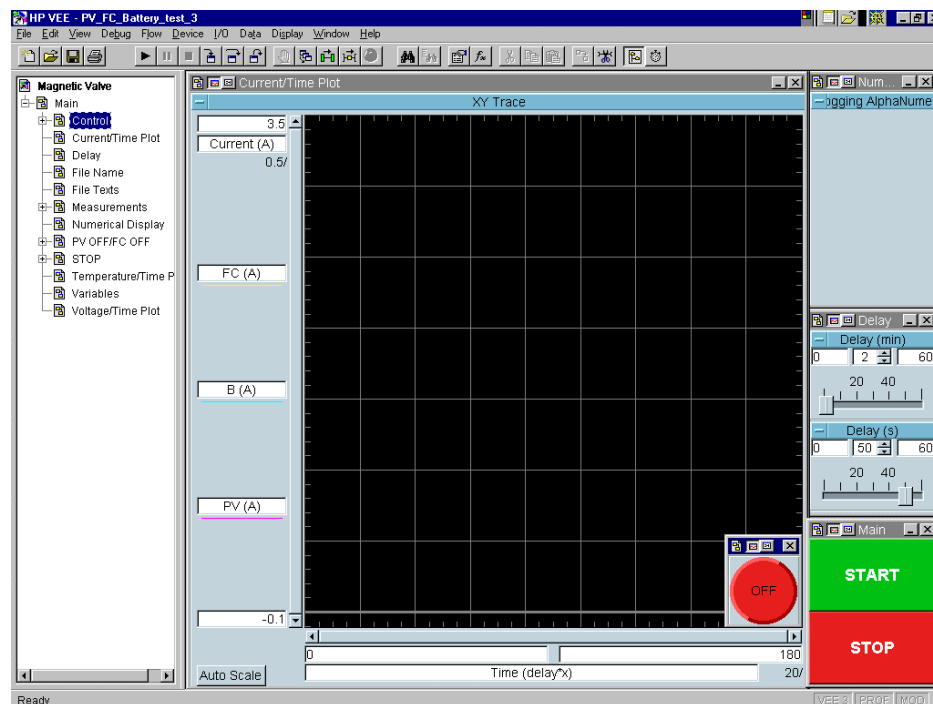
Tiedostossa *c:\Matti\Battery0803.vee* on ohjelma, jolla voidaan ladata akkua. Ohjelma mittaa ohjelmoitavasta teholähteestä syötetyn virran ja jännitteen sekä tallentaa nämä käyttäjän määrittelemään tiedostoon. Ohjelma laskee akun varaustilan samalla tavalla kuin ohjelmassa *BatteryDischarge0403.vee* ja tallettaa varaustilan tiedostoon. Ohjelma keskeytyy, kun akun jännite on kohonnut käyttäjän määräämän rajan ylle ja akun latausvirta laskenut rajan alle. Mitattujen suureiden seuranta onnistuu kuten edellisissäkin ohjelmissa.

5.2.3. Laitteiston testiajot

Laitteiston testiajon ohjelma on tiedostossa *c:\Matti\PV_FC_Battery_final.vee*. Ohjelman rakenne on esitetty kuvassa 11 ja käyttöliittymä kuvassa 12.



Kuva 11 Testiajo-ohjelman rakenne



Kuva 12 Testiajo-ohjelman käyttöliittymä

Ohjelma käynnistyy, eli menee kuvan 11 rakennekaavion kohtaan käynnistys, kun hiirellä painetaan vihreää START painiketta. Tämän jälkeen ohjelma kysyy käyttäjältä tiedostoa, johon mittaustulokset tallennetaan. Oletusarvona on ”päivämäärä.1”. Tämän jälkeen ohjelma lukee säädätin tiedostosta. Säädätinä käytetään vuonna 1979 Helsingissä mitattuja suoran- ja hajasäteilyn komponentteja sekä keskimääräisiä kuu-

kausikohtaisia maan heijastuskertoimia. Heijastuskertoimet on saatu viitteestä [5]. Säätiiedostosta ohjelma laskee käyttäjän määrittelemään kulmaan tulleen säteilyn intensiteetin luvussa 2.1. esitetyllä tavalla.

Säteilyn intensiteetin laskennan jälkeen ohjelma määrittelee, kuinka suuri virta kyseisellä intensiteettitasolla on saatavissa. Laskenta tapahtuu luvun 2.2.1. mallin mukaisesti. Sekä intensiteetin että paneelin tuottaman virran laskennassa käsitellään vektoria, joka on säätiiedoston sarakkeiden lukumäärän kokoinen; vektorin koko on 8760 tässä tapauksessa⁶. Tietojen käsittely vektorina nopeuttaa huomattavasti ohjelman toimintaa.

Kun aurinkosähköpaneelin tuottama virta on laskettu, menee ohjelma for –silmukkaan. Silmukka käsittelee vektorin alkio kerrallaan järjestyksessä ensimmäisestä viimeiseen.

Ohjelma menee silmukassa ensinnä aliohjelmaan Measurements, jonka avulla mitataan järjestelmässä kulkevat virrat, komponenttien jännitteet sekä polttokennon lämpötila. Measurements –aliohjelma sisältää myös aliohjelman, joka laskee akun kapasiteetin kaavan (17) mukaisesti.

Kun ohjelma on saanut luettua mittausarvot, seuraa ohjelmassa aliohjelma Control. Tämän avulla järjestelmää ohjataan alla esitetyllä tavalla. Koska ohjaus on tehty if/then/else –rakenteella, lukee ohjelma ensin ehdon (1), jos tämä ei toteudu siirtyy ehtoon (2), jne.

ehto 1: Aurinkosähköpaneeli on toiminnassa ja polttokenno ei, jos kaikki seuraavat ehdot toteutuvat yhtäaikaan:

- aurinkosähköpaneelin laskettu virran arvo $> 0,2$ A
- akun jännite < 14 V
- ohjelmoitavan teholähteen jännite $< 14,15$ V

⁶ Vuoden 1979 säätiiedostossa on jokaisen päivän jokaisen aurinkotunnin intensiteettitiedot, jolloin tiedostossa on sarakkeita $365 * 24 = 8760$.

ehto 2: Polttokenno on toiminnassa ja aurinkosähköpaneeli ei, jos kaikki seuraavat ehdot toteutuvat yhtäaikaan:

- akun varaustila laskenut $> 2 \text{ Ah}$
- polttokenno päällä ja akun varaustila laskenut $> 1 \text{ Ah}$
- polttokennon lämpötila $< 70 \text{ °C}$
- akun jännite $< 14 \text{ V}$
- polttokennon jännite $< 14,15 \text{ V}$

ehto 3: Aurinkosähköpaneelit ja polttokenno ovat poissa päältä, jos jokin seuraavista ehdoista toteutuu:

- akun jännite $> 14 \text{ V}$
- polttokennon lämpötila $> 70 \text{ °C}$
- polttokennon jännite $> 14,15 \text{ V}$
- aurinkosähköpaneelin jännite $> 14,15 \text{ V}$
- akku varaustila laskenut $< 2 \text{ Ah}$

Jos ehto 1 toteutuu, alkaa ohjattava teholähde tuottaa laskettua aurinkosähköpaneelin virtaa. Teholähteen jännitteeksi asetetaan $14,15 \text{ V}$. Tällöin polttokenno ei ole toiminnassa, mikä varmistetaan asettamalla magneettiventtiilin teholähteen toimintavirta ja –jännite pois päältä.

Jos puolestaan ehto 2 toteutuu, avautuu magneettiventtiili. Magneettiventtiilin teholähteen virraksi asetetaan $0,27 \text{ A}$ ja jännitteeksi $16,5 \text{ V}$. Aurinkosähköpaneelia simuloivan ohjattavan teholähteen virraksi asetetaan tällöin 0 A ja jännitteeksi $14,15 \text{ V}$.

Jos ehdoista 1 tai 2 ei kumpikaan toteudu, on ehdon 3 toteuduttava. Tätä ehtoa ei olisi tarvinnut kirjoittaa, vaan olisi riittänyt määrittellä se else:ksi. Mahdollisten virhetointojen takia oli kuitenkin perusteltua kirjoittaa tämäkin omaksi else if –lausekkeeksi. Ehdon 3 toteutuessa ovat sekä simuloitava aurinkosähköpaneeli että polttokenno poissa käytöstä. Tällöin aurinkosähköpaneelia simuloivan ohjattavan teholähteen virraksi asetetaan 0 A ja jännitteeksi $14,15 \text{ V}$ sekä magneettiventtiilin teholähteen virraksi 0 A ja jännitteeksi 0 V .

Lisäksi Control –aliohjelmasta on kytkentä käyttöliittymään. Tämä ilmoittaa, mikä ehdoista 1, 2 tai 3 on toteutunut. Kuvassa 12 tämä näkyy punaisena OFF kiekkona, joka tarkoittaa, että ehto 3 on voimassa.

Control –aliohjelman jälkeen testiajo-ohjelmassa seuraa mitattujen suureiden visuaalisointi. Nämä aliohjelmat on koottu kuvan 11 rakennekaaviossa kohtaan näyttö. Mittausten etenemistä voi seurata neljältä eri näytöltä. NumericalDisplay –aliohjelma näyttää jokaisen mittauskerran mitattujen suureiden lukuarvot. Current/Time Plot esittää polttokennon ja aurinkosähköpaneelisimulaattorin tuottamien virtojen sekä kuorman syömän virran kehityksen ajan suhteen. Voltage/Time Plot esittää puolestaan samojen komponenttien jännitteen kehityksen ajan suhteen ja Temperature/Time Plot esittää polttokennon lämpötilan kehityksen ajan suhteen.

Näyttö –aliohjelmien jälkeen testiajo-ohjelmassa määritellään mittauksen viive. Tämä on välttämätöntä, jotta ohjelma saataisiin vastaamaan mahdollisimman paljon todellisuutta. Sää tiedosto sisälsi säteilydataa vuoden jokaiselta aurinkotunnilta, joten viive pitäisi asettaa vastaamaan yhtä aurinkotuntia. Tämän erikoistyön puitteissa päädyttiin kuitenkin lyhentämään viive arvoon 2 min 50 s. Viive on toteutettu HP VEE:stä löytyneellä valmiilla funktiolla, siten että viiveen minuutit ja sekunnit on valittava erikseen.

Viiveen jälkeen ohjelma kirjoittaa mitatut arvot alussa käyttäjän määrittelemään tiedostoon. Ensimmäisessä for –silmukassa ohjelma kirjoittaa tiedostoon kutakin saraketta vastaavat suureet ja yksiköt näkyviin, muilla kerroilla tiedostoon kirjoitetaan pelkästään mitatut arvot.

Kun mittaus on päättynyt tai se halutaan lopettaa ennenkuin ohjelma on loppunut, pitää käyttöliittymässä olevaa STOP –painiketta painaa. Tämän periaate on sama kuin Control –aliohjelman ehto 3: aurinkosähköpaneelisimulaattori ja magneettiventtiili kytketään pois päältä.

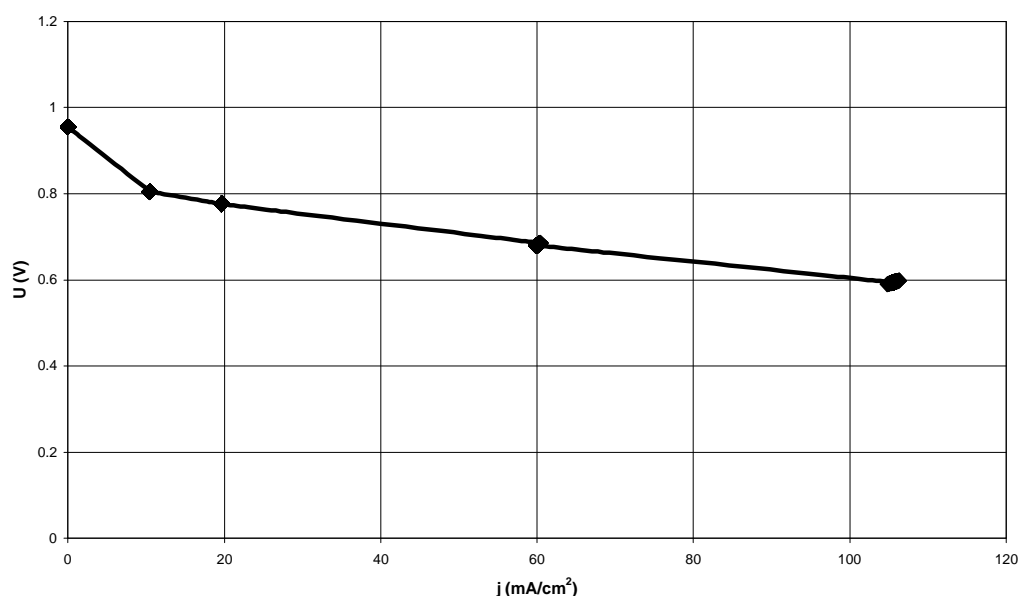
6. Mittaukset ja mittaustulokset

6.1. APC- ja BCS-polttokennojen IV-käyrien mittaukset

APC-polttokennon IV-käyrä mittaukset epäonnistuivat täysin, koska polttokenno oli pahasti vaurioitunut. Sen suorituskyky oli vain noin 10-20 % ilmoitetusta, eikä edes kennon elvyttämistoimenpiteistä ollut merkittävää hyötyä. Lisäksi polttokennon suoritusarvot vaihtelivat mittauksissa niin paljon, ettei kunnollisen IV-käyrän määrittäminen onnistunut.

BCS-polttokenno oli puolestaan suoritusarvoissaan, jotka tälle oli ilmoitettu ja tälle saatiinkin mitattua IV-käyrä. Mittaukset tehtiin 19.2.1999 ja näissä pyrittiin selvittämään polttokennon IV-käyrän lisäksi myös minimi kaasuvirtaukset eri tehon arvoille.

IV-käyrän mittauksessa laitteistona toimi BCS-polttokenno, Meyer-vastuksen kuorma sekä tietokoneohjattu mittauslaitteisto. Polttokennoa ajettiin tietyllä kuorman tehotasolla aina niin pitkään, kunnes polttokennon suoritusarvo oli vakiintunut jollekin tasolle, eli sen jännitteen ja virran arvot pysyivät vakaana tietyn ajanjakson. BCS-polttokennon IV-käyrä on esitetty kuvassa 13. Tässä on otettu huomioon se, että BCS-polttokenno sisältää 21 yksikkökennoa, joiden pinta-ala on 25 cm^2 .



Kuva 13 BCS Technology, Inc. polttokennon IV-käyrä

Ongelmiksi BCS-polttokennon IV-käyrän mittauksessa tuli se, että polttokenno lämpeni suurilla tehoilla noin 80 °C. Tämä alkaa olla polymeeripolttokennon maksimi toimintalämpötiloja membraanin lämmönsietokyvyn takia. Toisekseen lämpötilan jatkuva muuttuminen kuormaan syötetyn tehon funktiona tekee IV-käyrän eri pisteiden välisen vertailun mahdottomaksi, koska polttokennon teho riippuu olennaisesti lämpötilasta.

Toinen IV-käyrän määrittelyssä ilmennyt ongelma oli happivaje polttokennon katodilla. Kun kuorma alkoi olla noin 40 W, ei konvektio enää riittänyt kuljettamaan happea tarpeeksi. Suurentamalla ilmavirtausta voitiin havaita polttokennon suoritusarvojen kohentuminen sekä vakiintuminen. Varsinkin suurilla tehoilla oli havaittavissa se, että pienetkin ilmavirran vaihtelut, kuten oven avaaminen tai sulkeminen, vaikuttivat polttokennon toimintaan merkittävästi.

Kolmas ongelma IV-käyrän mittauksessa oli se, että myös BCS-polttokennossa oli havaittavissa jonkin tasoista elpymistä. Koska tätäkään kennoa ei oltu käytetty moneen kuukauteen, on ollut todennäköistä, että polttokennon MEA:t ovat ehtineet kuivua. Kennoa käytettäessä nämä taas kostuivat, jolloin kennon suoritusarvot kohosivat, kuten mittauksissakin voitiin havaita. Elpymisestä aiheutunut virhe IV-käyrän määrittelyyn oli kuitenkin pienin edellä esitetyistä, koska kennoa pyrittiin käyttämään ennen IV-käyrä mittausta paljon.

Tulkittaessa IV-käyrämittauksia on muistettava, että tulokset ovat vain suuntaa antavia. Jos haluttaisiin saada tarkempia tuloksia, olisi mittausjärjestelyihin kiinnitettävä suurempaa huomiota. Esimerkiksi taso, jolla polttokennon tehon on vakiintunut, pitäisi määrittellä tarkasti. Tällöin mittaustulokset olisivat tarkemmin toistettavissa.

Minimivetyvirtaus tietylle kuorman arvolle määritettiin siten, että polttokennon suoritusarvojen annettiin ensin vakiintua jollekin tietylle tasolle. Tämän jälkeen vetyvirtausta vähennettiin kunnes polttokennon suoritusarvot romahtivat. Lopuksi vetyvirtausta lisättiin sen verran, että polttokenno elpyi aikaisemmalle tasolleen, jonka jälkeen minimi vetyvirtauksen määrä pyrittiin arvioimaan.

Taulukossa 3 on esitetty mittauksen tulokset.

Taulukko 3 Kuorman tehoja vastaavat vetyvirtaukset

Meyer-vastuksen ilmoittama kuorma (W)	Kuormaa vastaava vetyvirtaus (NI/h)
10	3,75
20	7,5
40	11,25
80	22,5

Minimivety määrän mittausta häirtasivat samat ongelmat kuin IV-käyrän mittaustakin. Vetyvirtausmittauksessa oli kuitenkin tarkoitus vain etsiä vetyvirtausarvot, joilla polttokenno pystyy varmasti toimimaan eri tehoilla. Suuret virherajat huomioitiin virtausarvoja määritettäessä, juuri mittaauksessa ilmenneiden epätarkkuuksien takia.

6.2. Akun hyötysuhteen määrittäminen

Accun hyötysuhteen määrittäminen oli tehtävä, jotta saatiin karakterisoitua accun tila mittaushetkellä. Accua ei oltu käytetty pitkään aikaan ja monet sen kennoista olivat ehtineet kuivua. Vaikka accun kuivuneisiin kennoihin lisättiin accuvettä, ei voitu olla varmoja accun ominaisuuksien säilymisestä valmistajan ilmoittamissa arvoissa.

Accun hyötysuhteen mittaus sisälsi kaksi erilaista mittaussjärjestelyä, toinen accun purkamista ja toinen accun lataamista varten. Accun purkamisessa laitteistona oli Solarpower-accu, Meyer-vastuksen kuorma sekä tietokoneohjattu mittaussjärjestelmä. Accun lataamisessa laitteistona oli puolestaan Solarpower-accu ja Hewlett Packard – ohjattava teholähde.

Accun hyötysuhteen mittaukset tehtiin 8.3.1999. Aluksi accu ladattiin 5 A virralla ”täyteen”⁷, jonka jälkeen sitä purettiin 2 Ah tehon ollessa 5 W. Tämän jälkeen accu ladattiin jälleen alkuperäisiin jännitteen ja virran arvoihin. Accun 2 Ah:n purkaustasoon päädyttiin, koska tätä käytettiin lopullisessa koeajossa rajana sille, että accun varaustila on pudonnut liian alas. Acculle laskettiin virtahyötysuhde kaavan (18) avulla, jolloin tulokseksi tuli

$$\eta_{\text{accu}} = 1.$$

⁷ jännite ≥ 14 V, virta ≤ 4.8 A

Hyötysuhteen ideaalisuus selittyy ainakin kahdella asialla. Ensinnäkin akkua ei suinkaan ladattu täyteen. Tämä käy selville siitä, että teholähde syötti akkuun vielä 4,8 A virtaa. Akku on vasta silloin täynnä, kun siihen syötetty virta on saman suuruinen kuin akussa tapahtuva itsepurkaus. Toiseksi akkua purettiin vain 2 Ah eikä suinkaan 110 Ah, joka on akun ilmoitettu kapasiteetti.

Molemmat puutteellisuudet akun hyötysuhteen mittauksessa on kuitenkin selitettävissä koeajolaitteiston järjestelyillä. Ensinnäkin akkua purettiin koeajoissa vain kyseiset 2 Ah, koska tiedoksi riitti, että akusta löytyy ainakin 2 Ah kapasiteetti. Akkua ei ladattu täyteen, koska akun hyötysuhde olisi laskenut huomattavasti yritettäessä ladata akkua täyteen akun ja teholähteen jännite-erojen tasaantuessa. Myöskään teholähteen jännitetason nostaminen ei tullut kysymykseen, koska akun maksimi jännitetaso on 14,20 V, jonka jälkeen lisääntynyt vedyn muodostus aiheuttaa turvallisuusriskin.

Näiden mittausten perusteella voidaan vain todeta, että akku vaikutti olevan kunnossa ainakin 2 Ah purkaustasoon asti ja akun virtahyötysuhde on lähellä ideaalia, kun akku ladataan 5 A virralla arvoihin 14 V ja 4,8 A.

6.3. Koelaitteiston testiajot

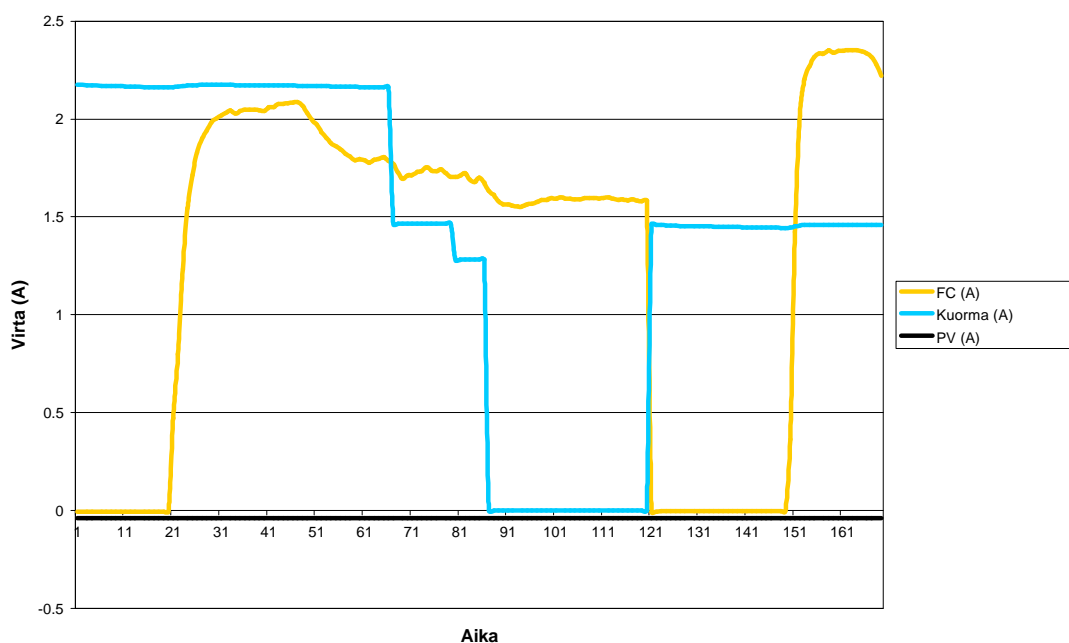
Koelaitteiston testiajot tehtiin 10.-12.3.1999 välisenä aikana. Testiajot tehtiin ohjelmalla *c:\Matti\PV_FC_Battery_test.vee*, joka oli hieman muuteltu kappaleessa 5.2.3. esitetystä ohjelmasta. Muutokset tehtiin, koska säätiedostosta valittiin jokaista vuodenaikaa kuvaavat ajanjaksot. Pääosiltaan testiajo-ohjelma pysyi kuitenkin entisen kaltaisenaan.

Säätiedostosta valittiin jokaiselta vuodenajalta kyseistä ajanjaksoa hyvin kuvaava viikko. Talvi viikoksi valittiin 24.-31.12, kevätviikoksi 12.-19.3, kesäviikoksi 3.-10.08 ja syysviikoksi 2.-09.11. väliset ajanjaksot. Jokaisen viikon aikana aurinkosähköpaneelin tuottamat virrat laskettiin luvussa 5.2.3. kuvatulla mallilla erillisellä ohjelmalla, ja tulokset tallennettiin tiedostoihin *Talvi2412-3112.txt*, *Kevät1203-1903.txt*, *Kesä0308-1008.txt* ja *Syky0211-0911.txt*. Tämä tehtiin, jotta voitiin seurata testiajo-ohjelman toimivuutta. Muuten testiajo-ohjelma vastasi luvussa 5.2.3. esitettyä ohjelmarakennetta.

Koelaitteiston testiajo toteutettiin luvussa 5. esitetyin komponentein ja järjestelyin. Testiajojen viiveeksi valittiin 2 min 50 s, jolloin yksi mittaus kesti noin kahdeksan tuntia⁸. Taulukossa 4 on merkitty tiedostot, joihin tulokset on tallennettu.

Taulukko 4 Virtatiedostoja vastaavat koeajojen tulostiedostot

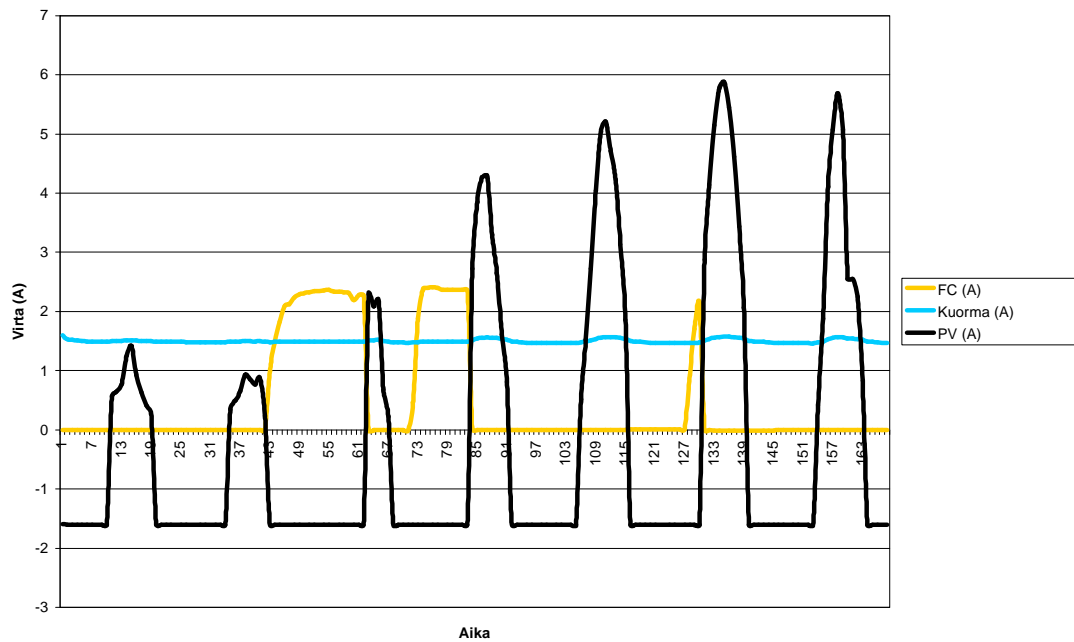
Virtatiedosto	Koeajotiedosto
<i>Talvi2412-3112.txt</i>	<i>c:\Matti\Measurements\10_03_1999.iv</i>
<i>Kevät1203-1903.txt</i>	<i>c:\Matti\Measurements\11_03_1999.iv</i>
<i>Kesä0308-1008.txt</i>	<i>c:\Matti\Measurements\11_03_1999_kesa.iv</i>
<i>Syksy0211-0911.txt</i>	<i>c:\Matti\Measurements\12_03_1999.iv</i>



Kuva 14 Talvi

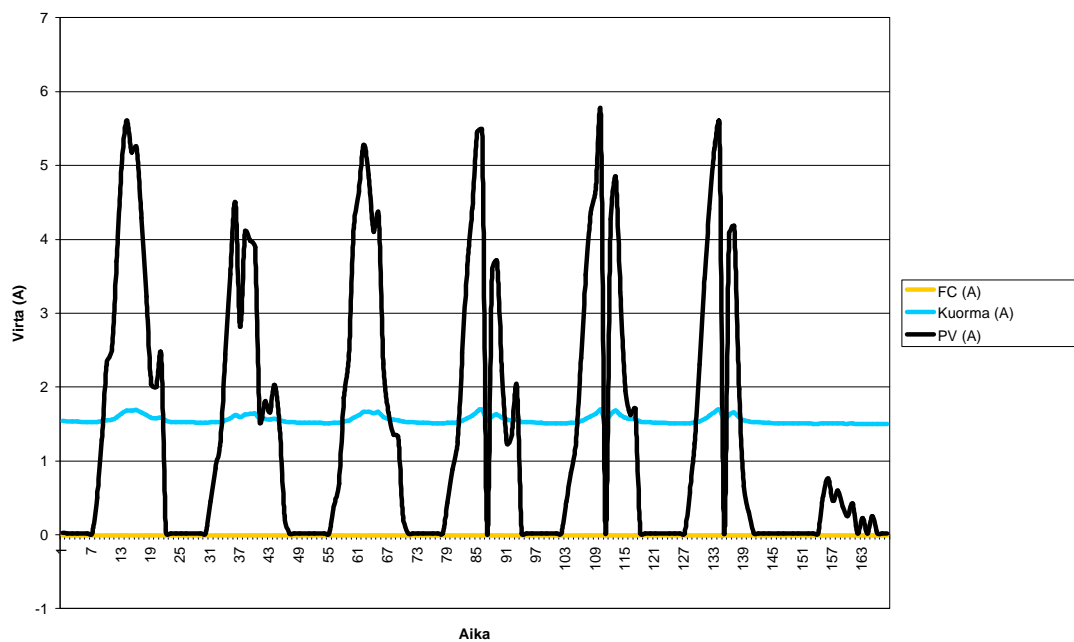
Kuvassa 14 on esitetty polttokennon ja aurinkosähköpaneelisimulaattorin tuottamat virrat sekä kuorman kuluttama virta koeajon aikana. Mittauksen alussa kuorma oli liian suuri. Polttokenno ei pystynyt tuottamaan tarvittavaa määrää energiaa, joten kuormaa laskettiin siten, että akku pääsi täyttymään. Aurinkosähköpaneelin ei pitänyt tuottaa energiaa järjestelmälle. Talviviikon ajolla haluttiinkin testata ohjelman toimivuutta polttokennon kannalta. Minkäänlaisia ongelmia ohjelmassa ei ilmennyt.

⁸ 170 s · 168 h/vko = 7 h 56 min



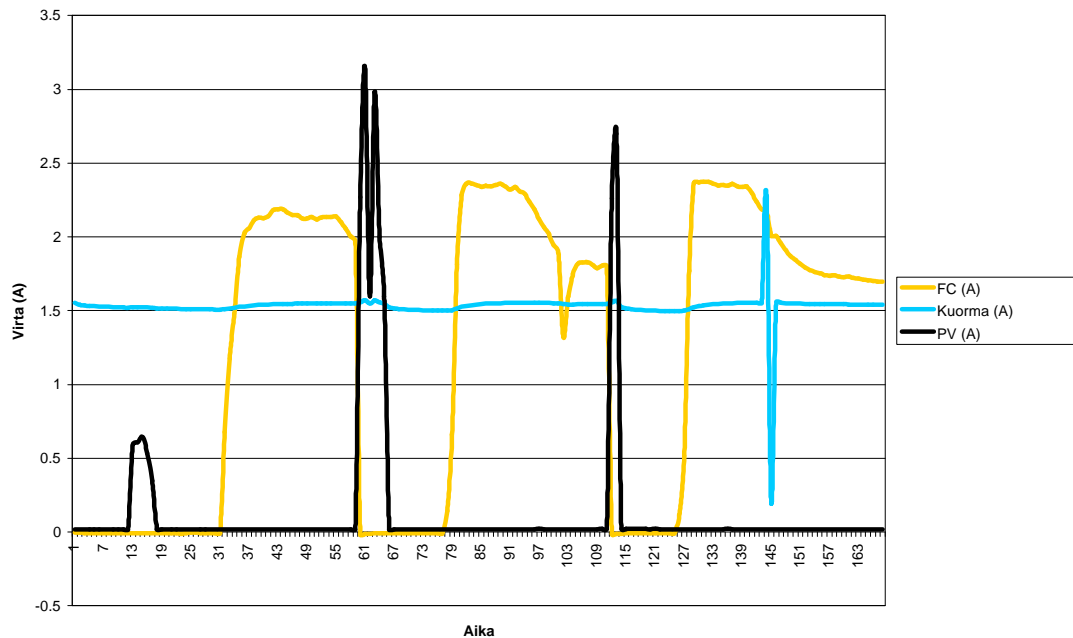
Kuva 15 Kevät

Kevätviikon koeajolla, joka on esitetty kuvassa 15, pyrittiin testaamaan polttokennon ja aurinkosähköpaneelin välisten ohjausparametrien toimivuutta. Ongelmia ohjausparametrien kanssa ei ollut, mutta tämän mittauksen aikana havaittiin, että aurinkosähköpaneelisimulaattori toimi kuormana ollessaan pois päältä. Syyksi ilmeni, että simulaattorin jännite asetettiin 0 V:iin.



Kuva 16 Kesä

Kesäviikon koeajolla, esitetty kuvassa 16, testattiin aurinkosähköpaneelisimulaattorin ohjausparametrien toimivuutta. Koeajo meni suunnitelmien mukaan, ja kevätviikon koeajossa ilmennyt ongelmakin saatiin poistettua.



Kuva 17 Syksy

Kuvassa 17 on esitetty syysviikon koeajon virran käyttäytyminen. Tällä ajanjaksolla testattiin uudelleen polttokennon ja aurinkosähköpaneelisimulaattorin välisten ohjausparametrien toimivuutta. Ohjausparametreissa ei ilmennyt ongelmia. Polttokennon virrantuoton väheneminen selittyy sillä, että polttokennon ja akun välinen potentiaaliero pieneni, jolloin akku polttokennon toimintajännitteellä alkoi olla täynnä.

Vaikka koeajomittaukset eivät ole kaikin puolin vertailukelpoisia, muun muassa aurinkosähköpaneelin virranmittausjärjestelmien muututtua, vastasivat koeajojen tulokset niille asetettuja vaatimuksia. Ohjausalgoritmi toimi moitteettomasti kaikissa tapauksissa, eikä laitteistossakaan ilmennyt puutteita. Mittaukset olivat siten varsin onnistuneita.

7. Kehitysehdotukset

Vaikka rakennettu koelaitteisto täytti sille asetetut tavoitteet, jäi laitteistoon paljon parannettavaa. Ensimmäinen tehtävä olisi saada järjestelmä omavaraiseksi lisäämällä laitteistoon elektrolyyseri ja ladattava vetyvarasto. Tällöin järjestelmä ei olisi riippuvainen vedyn toimituksista, jolloin järjestelmän huoltokustannukset alenisivat huomattavasti.

Toisekseen laitteistoon olisi hyvä saada liitettyä oikea aurinkosähköpaneeli, jotta voitaisiin ratkaista siihen liittyvät ongelmat. Tällä hetkellä aurinkosähköpaneeli toimii järjestelmässä ideaalisesti, eikä tämä todellakaan ole tilanne käytännössä. Samalla mittauksiin ei tarvittaisi erillistä säätiedostoa.

Ohjausalgoritmejä olisi myös kehitettävä paremmiksi. Tämän erikoistyön puitteissa tyydyttiin yksinkertaisimpaan ratkaisuun, mutta kuten kappaleessa 2.4. esitettiin, kehittyneempiäkin ohjausstrategioita on kehitetty.

Tietokoneohjattava kuorma on suositeltava hankinta, jos järjestelmää kehitetään enemmän todellisuutta vastaavaksi. Koska kuorma on todellisuudessa harvoin tasainen, olisi erilaisten kuormaskenaarioiden vaikutusta syytä testata.

Jos ohjattava kuorma hankitaan laitteistoon, on tällöin vetyvirtauksen säätö saatava tietokoneohjatuksi. Koska eri kuorman arvoilla tarvitaan erilaisia määriä vetyä, olisi järjestelmän toimivuuden kannalta olennaisen tärkeää, että vetyvirtauksen säätö olisi automatisoitu.

Kuten luvussa 3. kerrottiin, oli norjalainen SAPHYS ohjelma pitänyt hyötysuhde mielessä parhaimpana luvussa 3.3. esitettyä järjestelmää. Tässä sekä elektrolyyseri että polttokenno oli erotettu muusta järjestelmästä DC/DC –muuntimien avulla, jolloin järjestelmän hyötysuhde parani. DC/DC –muuntimet voisivat parantaa myös tämän erikoistyön puitteissa rakennetun laitteiston hyötysuhdetta. Näillä taattaisiin se, että akku ei toimisi laitteiston hallitsevana komponenttina, vaan kaikki komponentit saataisiin toimimaan maksimaalisella tehollaan.

Jotta päästäisiin täyteen varmuuteen mittausohjelman ja koelaitteiston komponenttien toimivuudesta, olisi laitteistolta tehtävä paljon pidempiä koeajoja. On täysin eri asia tehdä koeajoja, jotka kestävät vain muutaman tunnin, kuin mittauksia, jotka kestävät

useita päiviä. Pidemmissä mittauksissa kysymykseen tulevat tietokoneohjelman muistinhallinta, komponenttien kestävyys ja erilaiset häiriötilanteet, joita lyhyissä mittaus-tilanteissa ei esiinny.

Kaiken tämän lisäksi järjestelmän kustannuskysymyksiin tulisi kiinnittää huomiota ja erilaisia kustannusanalyysyjä tulisi tehdä erilaisilla skenaarioilla, kuten luvussa 4. Luvun 4 tutkimus oli tehty 90-luvun alkupuolella, jonka jälkeen tutkimukseen kuuluneiden järjestelmien kustannukset ovat muuttuneet. Loppujen lopuksi tämänkin järjestelmän kehittäminen on kannattavaa, vain jos järjestelmän kustannukset ovat kilpailukykyisellä tasolla verrattuna muihin järjestelmiin.

8. Lähdeluettelo

- [1] **Havre K., Gaudernack B.**, Design Configurations for Stand Alone Photovoltaic hydrogen power systems (SAPHYS), *Proceedings of the 2nd Nordic Symposium on Hydrogen and Fuel Cells for Energy Storage*, Otaniemi 1995
- [2] **Koskinen K.**, Lyijyakut, *Insko 38-77 Ia*
- [3] **Leppänen J.**, Commercial Photovoltaic-Hydrogen Applications, *Proceedings of the 2nd Nordic Symposium on Hydrogen and Fuel Cells for Energy Storage*, Otaniemi 1995
- [4] **Vanhanen J.**, Aurinkovetyenergiäjärjestelmän simulointimallien kehittäminen ja komponenttien optimointi, *Raportti TKK-F-B135*, Otaniemi 1991
- [5] **Vartiainen E.**, Auringon säteilyn intensiteetin laskenta kallistetulle pinnalle, Otaniemi 1997
- [6] **Virkkula A.**, Omavaraisen aurinkosähkölaitoksen komponenttitarkasteluja sekä koelaitteiston testaus, *Raportti TKK-F-B136*, Otaniemi 1991