

Model agregata z gorivnimi celicami HyPM HD 8-200

Boštjan Pregelj, Jaka Fritz, Darko Vrečko, Vladimir Jovan

¹**Institut Jožef Stefan, Jamova 39, 1000 Ljubljana**

²**Center odličnosti Nizkoogljične tehnologije, Hajdrihova 19, 1000 Ljubljana**

bostjan.pregelj@ijs.si, jaka.fritz@gmail.com, darko.vrecko@ijs.si, vladimir.jovan@ijs.si

Matlab-Simulink model of a HyPM HD 8 fuel cell power unit.

Fuel cells with polymer electrolyte membrane (preliminary Polymer Electrolyte membrane fuel cells, PEM FC) are clean and efficient system for the production of electricity, which has recently become the subject of intense research. The most important advantages of the fuel cells are high efficiency, low operating temperature and high power density, while the high price and limited reliability and durability are the notable shortcomings. The improvement in these parameters can be significantly contributed by the proper dimensioning of all components in the system for a particular application. To help optimize the dimensioning of these and the use of the power unit, a model of the entire unit has been built, consisting of a fuel cell stack and important supporting components. The main subsystems of the fuel cell stack are the electrochemical process and the energy balance. The supporting subsystems i.e. the balance of plant (BoP) components, comprise the cooling system model, the blower and air-flow models. Additionally a model for estimation of the of the BoP components' power consumption is included. The paper briefly presents the models of the above-listed systems and their characteristics. The evaluation is done upon comparison of model outputs against measurements from the experimental unit. The results are commented focusing on guidelines for better design and operation of the system.

Kratek pregled prispevka

Gorivne celice s polimerno elektrolitsko membrano (angl. polymer electrolyte membrane fuel cells, PEM FC) so čist in učinkovit sistem za proizvodnjo električne energije, ki je dandanes predmet intenzivnih raziskav. Najpomembnejše prednosti gorivnih celic so visoka učinkovitost, nizka delovna temperatura ter visoka močnostna gostota, pomanjkljivosti pa visoka cena in zanesljivost in vzdržljivost. K izboljšanju teh parametrov lahko bistveno pripomoremo s pravilnim dimenzioniranjem vseh komponent v sistemu za določen namen uporabe. Za optimizacijo dimenzioniranja le-teh ter rabe agregata smo modelirali celoten agregat, sestavljen iz sklada gorivnih celic in podpornih komponent. Glavna podsistema sklada gorivnih celic sta elektrokemijski proces ter energijsko ravnovesje. Modeli podpornih sistemov pa vsebujejo modele porabe električne moči podpornih sistemov, model hladilnika za hlajenje sklada, model puhala in pretoka zraka ter model pretoka vodika. V delu so kratko predstavljeni modeli oziroma njihove karakteristike, na koncu pa primerjava izhodov modela z meritvami, ki smo jih izvedli na skladu. Rezultati so komentirani s poudarkom na smernicah za boljše zasnovno in delovanje sistema glede na namen uporabe.

1 Uvod

Gorivne celice s polimerno elektrolitsko membrano (angl. polymer electrolyte membrane fuel cells, PEM FC) so čist in učinkovit sistem za proizvodnjo električne energije, ki je, čeprav odkrit že pred časom, dandanes predmet vse bolj intenzivnih raziskav tako na področju razvoja materialov, kot tudi prenosa tehnologije v vsakdanjo rabo. Najpomembnejše prednosti gorivnih celic so visoka učinkovitost, nizka delovna temperatura ter visoka močnostna gostota [1], [2], zato so atraktivne še posebej za uporabo v pomožnih napajalnih sistemih, sistemih za brezprekinitveno napajanje, ter pri pogonu vozil. Seveda ima pa ta tehnologija tudi pomanjkljivosti. Glavne so trenutno še visoka cena, ter omejeni zanesljivost in vzdržljivost.

V gorivnih celicah poteka elektrokemijski proces, pri katerem iz vodika in kisika (iz zraka) nastaja voda, ob tem pa se sproščata električna in toplotna energija, ki se ju kot primarni oziroma stranski produkt sproti odvajata [3]. Gorivne celice so tokovni vir, kjer bremenski tok narekuje porabo reagentov in določa delovne pogoje, podporni sistemi pa morajo zagotoviti, da je obeh reagentov vedno dovolj [4]. V nasprotnem primeru pride do ireverzibilnih poškodb na membrani in sčasoma tudi do uničenja celice.

K zagotavljanju ustreznih delovnih pogojev oziroma njihovem izboljšanju lahko pomembno pripomoremo tako uporabo z naprednih konceptov vodenja in spremljanja delovanja, kot tudi s pravilno izbiro vseh podpornih komponent v agregatu glede na določen namen uporabe. S tem namreč lahko dosežemo, da posamezni podsklopi oziroma komponente večino časa delujejo v optimalnih pogojih in s čim večjim izkoristkom.

Ključno orodje za podporo tovrstnim aktivnostim pa je uporaben model procesa. Zato smo se odločili zgraditi model, ki bo simuliral za ta namen zanimive vhodno/izhodne signale/parametre agregata z gorivnimi celicami in omogočal študijo in preizkušanje naprednih pristopov vodenja kot tudi preverjanje ustreznih podpornih komponent agregata.

V delu so kratko predstavljeni modeli oziroma njihove karakteristike, na koncu pa primerjava izhodov modela z meritvami, ki smo jih izvedli na skladu. Rezultati so komentirani s poudarkom na smernicah za boljše zasnovano in delovanje sistema glede na namen uporabe.

Za praktično primerljivost smo se odločili za razvoj modela agregata, ki ga imamo v lastnem laboratoriju, saj bomo s tem lahko pred dejansko realizacijo vnaprej preizkusili določene komponente ter nove koncepte vodenja.

2 Modeliranje sistema z gorivnimi celicami

Sistem z gorivni celicami lahko v splošnem razdelimo na dva glavna podsistema. To sta sklad gorivnih celic, ter podporni sistemi za delovanje gorivnih celic.

Z vidika modeliranja pa vsakega od teh podsistemov naprej delimo v več podsistemov, ki zajemajo posamezne aspekte delovanja gorivnih celic, oziroma različne podporne sisteme.

Glavna podsistema sklada gorivnih celic sta elektrokemijski proces, ter temperaturni model sklada gorivnih celic. Model sklada gorivnih celic opisuje proces pretvarjanja kemične energije prek spajanja vodika in kisika v električno energijo, ter posledično nastajanje toplote in segrevanje sklada. Sklad gorivnih celic predstavlja skupino celic spetih skupaj v enoten sistem.

Podporni sistemi za delovanje gorivnih celic vsebujejo sledeče elemente:

- modele porabe električne moči podpornih sistemov,
- model hladilnika za hlajenje sklada,
- model puhalo za vpihovanje zraka in vodika.

Eksperimentalni agregat HyPM-HD-8-200 proizvajalca Hydrogenics, katerega model je opisan v pričujočem delu, sestavlja 80 gorivnih celic s površino membrane cca 200 cm² in nazivno močjo sklada 8 kW. Agregat vsebuje naslednje podporne sisteme: puhalo, recirkulacijska črpalka za vodik, črpalka

hladilne vode, hladilni ventilator in DCDC pretvornik za napajanje omenjenih komponent.

2.1 Model napetosti sklada gorivnih celic

Pri napetosti sklada gorivnih celic računamo napetost ene celice. Celotno napetost sklada dobimo tako, da model celice posplošimo na vse in napetost pomnožimo s številom celic spojenih v sklad:

$$U_{gc} = U_{gc,1} \cdot n_{gc} \quad (1)$$

Napetost ene celice je določena s tako imenovano Nernstovo enačbo (2), ki nam pove, kako se spreminja standardni električni potencial na katodi in anodi zaradi odstopanj v obeh kanalih od standardnih vrednosti, ko prek membrane ni toka. Razlika v napetosti nastane zaradi spremembe koncentracije in temperature reagentov.

$$U_{gc,1} = 1,23 \text{ V} \mp 0,85 \cdot 10^{-3} \cdot (T_{gc} - 298,15 \text{ K}) \frac{\text{V}}{\text{K}} + 4,3085 \cdot 10^{-5} \cdot T_{gc} \cdot \left(\ln \left(\frac{p_{H_2,an}}{p_0} \right) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{p_{O_2,ka}}{p_0} \right) \right) \quad (2)$$

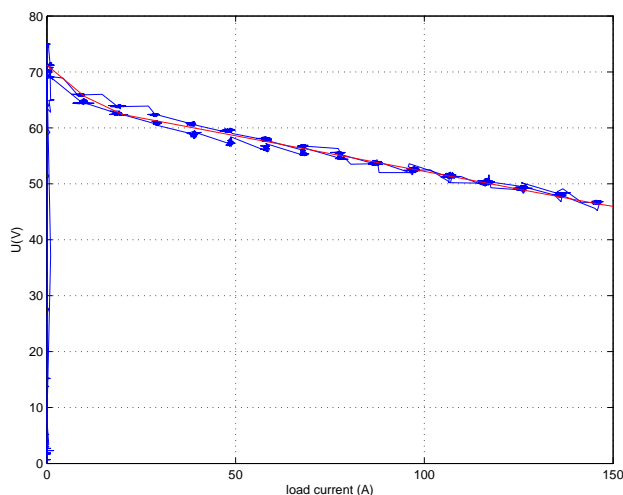
Zgornja enačba je razdeljena na tri vsote. V prvem delu je določena napetost odprtih sponk. To je napetost, ki nastane kot posledica razlike električnih potencialov med katodo in anodo. Za gorivno celico, kjer sta reagenta vodik in kisik je pri standardnih pogojih ta vrednost enaka 1,23 V. V našem primeru, kjer ne modeliramo zagona in ustavitve gorivne celice, temveč le njeno normalno stanje delovanja, se ta vrednost zmanjša zaradi toka, ki teče skozi membrano, ter drugih vplivnih veličin (slika 1). Drugi del enačbe opisuje vpliv temperature na napetost odprtih sponk. V tretjem členu enačba opisuje, kako se napetost spreminja zaradi spremembe temperature ter koncentracij reagentov in produktov [3, str. 32-34], pri čemer je koncentracija enaka tlaku reagentov – delnemu tlaku kisika v katodnem in tlaku vodika v anodnem kanalu, temperatura pa temperaturi gorivne celice.

Na končno napetost posamezne celice pa bistveno vpliva tudi obremenitev - električni tok skozi membrano in z njim povezane izgube. Le-te delimo na

- aktivacijske (narastejo v spodnjem delovnem področju)

- ohmske (naraščajo linearno), ter
- koncentracijske (narastejo v zgornjem delovnem območju).

Ko napetost celice pomnožimo s številom le-teh, lahko vse skupaj povzamemo s statično karakteristiko, t.i. polarizacijsko krivuljo, ki je prikazana na sliki 1. Le to smo pridobili iz meritev izvedenih na obravnavanem agregatu.



Slika 1: Meritve izhodne napetosti agregata pri različnih obremenitvah in ocenjena polarizacijska krivulja.

2.2 Model pretoka zraka

Za potrebe regulacije vpihovanja zraka v katodo, se v modelu sklada gorivne celice računa razmerje med masnim pretokom vpihanega kisika ter masnim pretokom porabljenega kisika, ki ga imenujemo razmerje presežka kisika in ga opišemo z enačbo (3)

$$\lambda_{O_2} = \frac{\Phi_{m,O_2,ka,vh}}{\Phi_{m,O_2,reak}} \quad (3)$$

Za izračun napetosti celice pa je pomemben tlak kisika na katodi. Vhodi modela pretoka zraka skozi katodo so:

- ϕ_{ka} – relativna vlažnost zraka,
- $T_{ka,vh}$ – temperatura vhodnega zraka,
- $\Phi_{m,zrak,ka,vh}$ – vhodni zračni pretok,
- $\Phi_{m,O_2,reak}$ – masni pretok kisika, ki reagira v gorivni celic,
- $p_{ka,vh}$ – tlak na vhodu v katodo.

Vhodni (volumski) pretok zraka je potrebno najprej pretvoriti v masni pretok, nato pa

izračunati še delež in masni pretok kisika v katodo (4)

$$\phi_{O_2,vh} = x_{O_2,ka,vh} \frac{1}{1+\omega_{ka,wh}} \rho_{zrak,ka,vh} \cdot \phi_{V,zrak,ka,vh} \quad (4)$$

Drugi del modela pretoka zraka skozi katodo opisuje, kako se spreminja delež kisika v katodi. Vhod v katodo, torej masni pretok vstopajočega zraka, smo že določili z enačbo (4). Iz katodne pa izhajajo plini na dva načina. Prvi je masni pretok reagiranega kisika, določen z enačbo (5)

$$\phi_{O_2,reaag} = M_{O_2} \frac{n_{gc} I_{gc,b}}{4F} \quad (5)$$

drugi pa masni pretok mešanice plinov, ki izstopajo na koncu katodne cevi. Ta vsebuje delež kisika, ki ni reagiral v elektrokemični reakciji, dušik, ki je inerten plin in le potuje skozi katodo, ter vodne hlape. Za naš model sta pomembna predvsem vhodni pretok kisika in pretok kisika porabljenega v reakciji. Predpostavimo, da je masni pretok kisika, ki je še prisoten v zraku na izhodu iz katodne cevi enak vrednosti izračunani po enačbi (6), v katero smo vstavili masna pretoka izračunan po (4) in (5).

$$\dot{m}_{O_2,izh} = \dot{m}_{O_2,vh} - \dot{m}_{O_2,reaag} \quad (6)$$

Masni delež kisika v katodni cevi nato izračunamo kot razmerje med masnim pretokom kisika in masnim pretokom suhega zraka (mešanica kisika in dušika).

2.3 Temperaturni model sklada

Temperaturni model sklada gorivnih celic dobimo iz energijskega ravnotežja, ki pravi, da mora biti vsota vseh vhodnih energijskih tokov enaka vsoti vseh izhodnih energijskih tokov, preneseni toploti in opravljenemu delu [4, str. 137], kar predstavimo z enačbo (7)

$$\sum(\dot{H}_i)_{vh} = \sum(\dot{H}_i)_{izh} + P_{el} + \dot{Q} \quad (7)$$

kjer je upoštevana oceno, da je masa gorivne celice (m_{gc}) 20 kg, in za specifično toploto iz literature [5] privzeta vrednost 1100 J/kgK.

Vhodi so entalpije masnih tokov plinov, ki vstopajo v gorivno celico (vodik in kisik); entalpije hlapov prisotnih v teh plinih smo zanemarili. Izhodi pa so (i) proizvedena električna moč, (ii) entalpije vseh masnih tokov

izstopnih plinov (neuporabljen kisik, preostali zrak in voda), ter (iii) toplotni tok, ki ga odvaja hladilni sistem; sevanje in konvekcijo smo zanemarili.

Na podlagi zgornjih ugotovitev, lahko enačbo (7) preoblikujemo tako, da izrazimo toploto gorivne celice

$$m_{gc} c_{gc} \frac{dT_{gc}}{dt} = \dot{H}_{reaag} + \Delta\dot{H}_{ost} - P_{el} - \dot{Q}_{hlaj}, \quad (8)$$

kjer so \dot{H}_{reaag} – entalpija reakcije, $\Delta\dot{H}_{ost}$ – sprememba entalpije med vstopajočim in izstopajočim zrakom, P_{el} – električna moč, ki jo proizvede gorivna celica, kot posledica kemične reakcije, \dot{Q}_{hlaj} – toplotni tok prehajanja toplote v hladilno tekočino. Temperaturo gorivne celice T_{gc} dobimo tako, da desno stran enačbe (8) delimo z maso in specifično toploto sklada gorivnih celic, ter integriramo odvod temperature. Za začetno vrednost integratorja smo privzeli temperaturo okolice.

2.4 Model električnih izgub

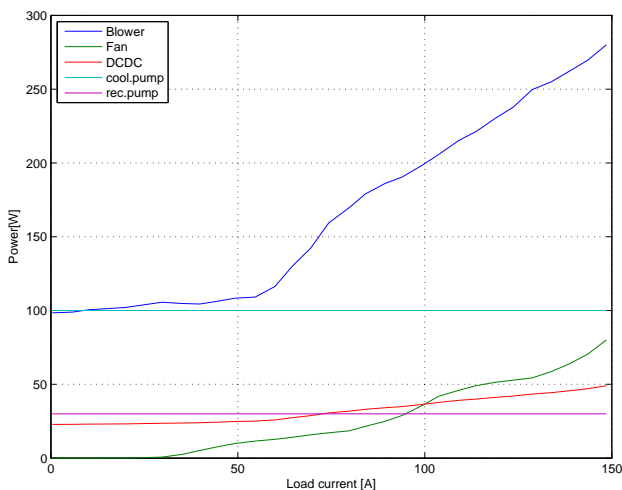
Delovanje gorivne celice je omogočeno šele z uporabo podpornih sistemov, s tujko jim pravimo tudi »balance of plant« (BoP) komponente. Zagotavljajo potrebne delovne pogoje (hlajenje), zadosten vnos reaktantov (puhalo), skrbijo za primerno regulacijo in pretvorbo izhodne napetosti, itn. Vsi ti sistemi se napajajo preko gorivne celice in porabijo za svoje delovanje nezanemarljiv delež proizvedene električne energije in posledično nižajo izkoristek celotnega sistema.

V modelu izgub smo modelirali moči, ki jih porabijo posamezni podporni sistemi. Ta del modela je pomemben tudi zato, ker iz trenutne konfiguracije ne moremo izmeriti skupnega električnega toka, ki ga teče skozi gorivno celico. S pomočjo tega modela torej lahko izračunamo, oziroma ocenimo celoten tok, ki je vsota toka bremena in toka izgub zaradi napajanja podpornih sistemov:

$$I_{gc} = I_{gc,b} + I_{gc,izg} \quad (9)$$

Moč nekaterih komponent ni odvisna od obremenitve agregata gorivne celice in je zato konstantna (recirkulacijska črpalka 30W, črpalka hladilne tekočine 100W). Moč DC/DC

pretvornika smo ocenili na 10% moči ostalih komponent. Moči puhalo za vpihovanje zraka v sklad ter ventilatorja za hlajenje pa sta regulirani glede delovno točko sklada; porabo energije obeh elementov smo določili s pomočjo meritev v nekaj delovnih točkah. Na sliki 2 so prikazane ocenjene karakteristike izgubne moči posameznih komponent. Za preverjanje porabe te moči od sedaj nismo posneli vseh potrebnih signalov.

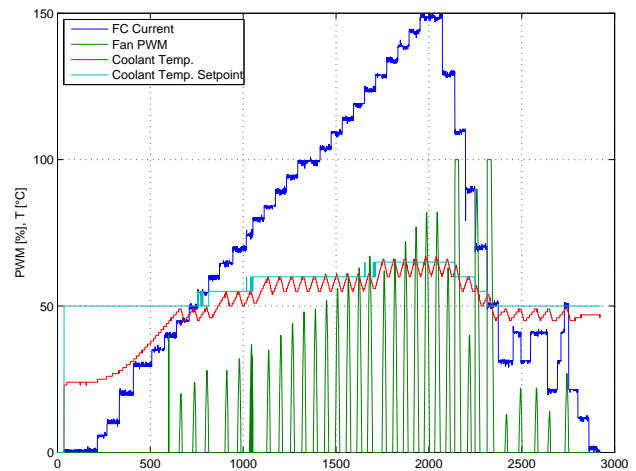


Slika 2: Karakteristika izgubne moči podpornih elementov agregata.

2.5 Model hladilnega sistema

Natančen opis modela hladilnega sistema presega obseg tega dela, zato je le kratko opisan koncept modela. Hladilni sistem zajema dve stopnji. Prvi del predstavlja prenos toplote iz gorivne celice na hladilno tekočino. Zaradi pomanjkljivih in nedostopnih podatkov smo pri tem privzeli kar nekaj predpostavk. Drugi del zajema hlajenje hladilne tekočine preko ventilatorja, ki ga krmili regulator. Moč hlajenja, ki predstavlja hitrost vrtenja ventilatorja, je določena z razliko referenčne vrednosti hladilne tekočine ter njeno temperaturo na izhodu iz gorivne celice. Predpostavlja se, da je trenutno vgrajen regulatorja integrirni regulator z močnim ojačenjem, kar je razvidno iz krmilnega signala ventilatorja na sliki 3. Oba dela hlajenja smo modelirali, kot toplotni izmenjevalnik. Pri tem smo iz dokumentacije črpalke privzeli, da je pretok vode enak 0,5 kg/s, na podlagi poizkušanja pa, da je masa hladilne tekočine, ki

je v določenem trenutku v stiku s skladom, enaka 1 kg. Masa vode, na katero piha ventilator in jo hladi, pa je 2 kg. Regulacija ventilatorja je v tej fazi izvedena tako, da kar najbolj sledi meritvam.

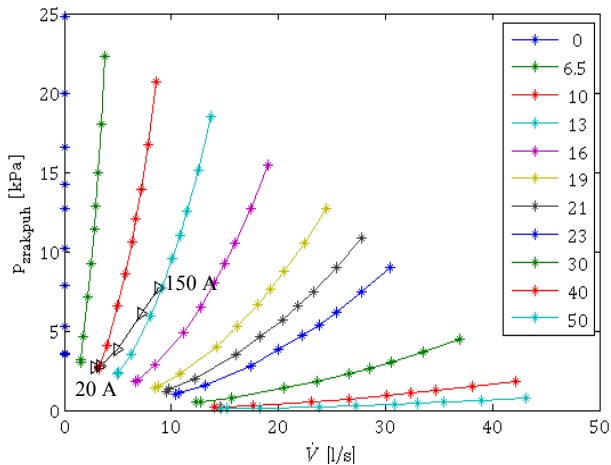


Slika 3: Meritve na osnovi katerih so določeni parametri modela hladilnega sistema.

2.6 Model puhalo

Tudi pri puhalu je opis modela okrnjen zaradi pomanjkanja prostora. Puhalo je pomemben podsistem gorivne celice. Ne le zaradi tega, ker vpihuje s kisikom bogat zrak v katodo, odvaja toploto, izpihuje generirano vodo iz katodnega kanala, temveč tudi zato, ker določa tlak zraka v katodi, ki je osnova za izračun napetosti celic sklada.

Pri puhalu so najpomembnejše relacije med tlakom, pretokom in električno močjo. Ti podatki so bili pridobljeni na osnovi meritev tlaka in pretoka v nekaj delovnih točkah sklada, ter na osnovi meritev puhalo na testnih mizah v podjetju Domel, ki proizvaja puhalo. Na sliki 4 je prikazana tlačna karakteristika puhalo pri različnih odprtostih zaslonk (različno breme), prikazanih z barvnimi črtami, ter s črnimi trikotniki vrisane delovne točke sklada pri različnih bremenskih tokovih. Iz nje je moč videti, da se tlačna upornost sklada z večanjem obremenitve manjša, saj se del kisika porabi na membrani v celici.



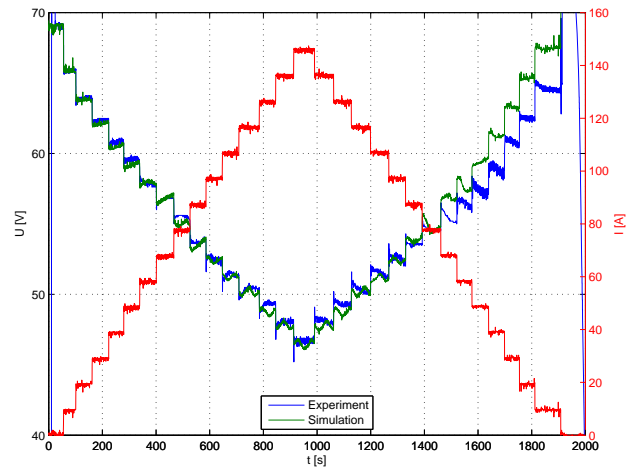
Slika 4: Meritve tlaka in pretoka na osnovi katerih so določeni parametri modela hladilnega sistema.

Puhalo je tudi precejšen porabnik energije. Zato je pomembno, da je v gorivno celico vgrajeno primerno močno puhalo, ki zagotavlja optimalne pogoje v gorivni celici, in deluje v območju najvišjih izkoristkov.

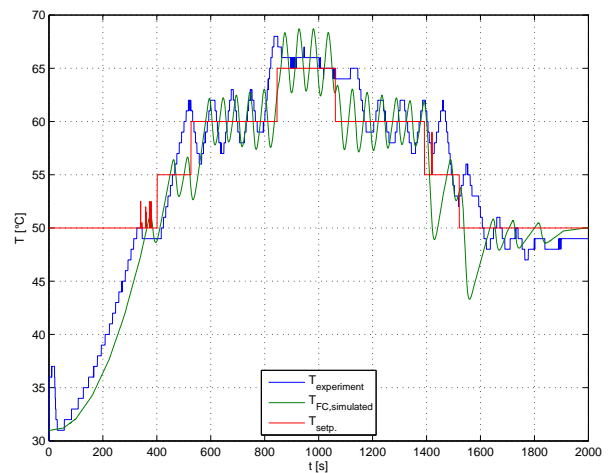
3 Simulacije in primerjava z eksperimenti

Za vrednotenje modela smo uporabili drug eksperiment, kjer bremenski tok počasi narašča do največje dovoljene obremenitve 150 A in potem spet pada proti 0. Zaradi omejenega obsega je prikazanih le nekaj zanimivejših potekov signalov.

Najzanimivejši je potek napetosti (glej sliko 5), kjer je moč opaziti, da v prvem delu simulirani odziv lepo sledi meritvam, potem pa se najprej pojavijo manjša odstopanja od delovne točke, kasneje pa večja. To je posledica temperature sklada (slika 6), saj se le-ta v prvem delu segreva – dinamiki se kar dobro ujemata. Ko se približamo referenčni vrednosti se vklopi hlajenje, ki zaradi skoraj on-off regulacije vnaša oscilacije. Simulirana temperatura oscilira z večajočim se zamikom, kar vnaša manjša odstopanja ($t = 500$ do $t = 1500$ s). V zadnji tretjini eksperimenta pa je bilo hlajenje vodeno ročno, zaradi česar pride do večjih razlik v temperaturi in posledično napetosti.



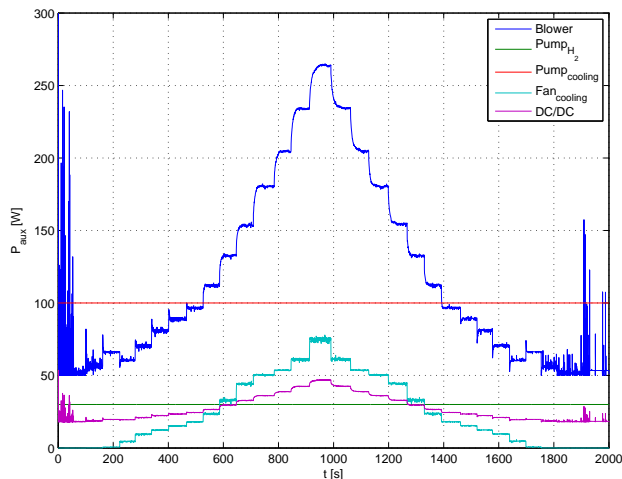
Slika 5: Potek izmerjene (modro) in simulirane (zeleno) napetosti sklada ob spremenljivi obremenitvi (rdeče, desna skala)



Slika 6: Potek temperatur: izmerjena (modro), simulirana (zeleno), referenčna (rdeče; tokovno vzbujanje kot na sliki 5).

Poleg tega so zanimivi še poteki izgubne moči (slika 7), iz česar je moč ugotoviti, da je moč, ki se troši na podpornih komponentah v »stanju pripravljenost« cca 160 W oz. ~2,5% nazivne moči, ter moč, ki se troši ob polni obremenitvi cca 600W oz ~10% nazivne moči.

Za te podatke nimamo ustreznih meritev signalov, so pa pomembni, saj služijo za oceno trenutne moči (toka) sklada gorivnih celic. S tem je moč priti tudi do bolj natančnih podatkov o polarizacijski krivulji gorivnih celic.



Slika 7: Poteki porabe moči podpornih komponent: puhalo (modro), črpalka za vodik (zeleno), črpalka hladilne vode (rdeče), ventilator (turkizno), DC/DC pretvornik (vijolično), vzbujanje modela kot na sliki 5.

4 Zaključek

V delu je prikazan celosten model 8 kW agregata z gorivnimi celicami HyPM HD8 proizvajalca Hydrogenics, ki ga imamo v laboratoriju na IJS. Obravnavanih je več podsklopov agregata: od modela napetosti sklada in toplotne bilance do karakteristik in izgubnih moči podpornih komponent agregata. Ocena modela je izvedena s primerjavo z meritvami na omenjenem agregatu. Izkazuje dovolj dobro ujemanje za uspešno uporabo

modela pri optimizaciji posameznih komponent in načrtovanju in izboljševanju vodenja agregata.

5 Zahvala

Za finančno podporo se zahvaljujemo *Centru odličnosti Nizkoogljične tehnologije CO NOT*, ki ga financira Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo in sofinancira Evropski sklad za regionalni razvoj.

6 Literatura

- [1] Lee J.S., Quan N.D., Hwang J.M., Lee S.D., Kim H., Lee H., Kim H.S.. (2005). Polymer Electrolyte Membranes for Fuel Cells. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 12(2), 175-183.
- [2] Ramos-Paja C. A., Bordons C., Romero A., Giral R., Martínez-Salamero L. (2009). Minimum Fuel Consumption Strategy for PEM Fuel Cells. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 56, 3.
- [3] J, T, Pukrushpan, A, G, Stefanopoulou, h, Peng, *Control of Fuel Cell Power Systems*, Springer-Verlag, London, 2, Izdaja, 2005.
- [4] Barbir. F., *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*, 2005
- [5] Ramos-Paja, C. A.; Giral, R.; Martinez-Salamero, L.; Romano, J.; Romero, A. and Spagnuolo, G. (2010). "A PEM fuel-cell model featuring oxygen-excess-ratio estimation and power-electronics interaction". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, No. 6 (June), pp. 1914-1924.