

Vodenje hibridnega agregata z gorivnimi celicami

Boštjan Pregelj^{1,2}, Darko Vrečko^{1,2}, Vladimir Jovan^{1,2}

¹Institut Jožef Stefan, Jamova 39, 1000 Ljubljana

²Center odličnosti nizkoogljicne tehnologije, Hajdrihova 19, 1000 Ljubljana

bostjan.pregelj@ijs.si, darko.vrecko@ijs.si, vladimir.jovan@ijs.si

An approach to hybrid-fuel cell system control.

Polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells are proving to be a clean and efficient energy source and are nowadays under extensive research. Their key advantages are high efficiency, low operating temperature and high power density. An important aspect in the integration of fuel cells in everyday use is their responsiveness to load demand. In this regard, due to the complex internal dynamics, fuel cells belong to the slower responsive sources. For greater general applicability, they are often connected to the battery or super-capacitor into a hybrid power source via power converter. Control algorithm design for this combination presents an interesting challenge. It must be able to successfully adapt to working conditions and operate optimally in terms of efficiency and reliability while minimizing impacts on stack degradation. This paper presents the approach by using the supervisory control automaton that switches between operational modes and sets the reference for the lower level control loops. The results are shown in simulation on the model of a widely used 1.2 kW Nexa (by Ballard) power module.

Kratek pregled prispevka

Gorivne celice z membrano iz polimernega materiala (*angl. polymer electrolyte membrane fuel cells*) 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. Pomemben vidik pri vključevanju gorivnih celic v vsakodnevno uporabo je njihova odzivnost na potrebe porabnika. V tem pogledu gorivne celice spadajo med počasneje odzivne vire zaradi kompleksne notranje dinamike. Zato so za širšo uporabnost so večkrat povezane z akumulatorjem ali kondenzatorjem v hibridni močnostni vir, ki poleg sklada in akumulatorja vključuje še močnostni pretvornik. Načrtovanje vodenja za omenjeni sestav predstavlja zanimiv načrtovalski izziv. Algoritem za vodenje sistema gorivnih celic se mora uspešno prilagoditi delovnim pogojem ter delovati optimalno v smislu učinkovitosti, zanesljivosti ter čim manjšega vpliva na življenjsko dobo. V delu je prikazan pristop z uporabo nadzornega avtomata, ki preklaplja med režimi delovanja ter nastavlja reference za regulacijo na spodnjem nivoju.

1 Uvod

Gorivne celice z membrano iz polimernega materiala (*angl. Polymer Electrolyte Membrane fuel cells*, v nadaljevanju PEM gorivne celice) so čist in učinkovit sistem za proizvodnjo električne energije, katerega prvi pomembnejši primeri uporabe segajo že v čase poletov na luno, vendar postajajo dandanes predmet vse intenzivnejših raziskav; še posebej na področjih prenosnih aplikacij, sistemov za brezprekinitveno napajanje, ter pogona vozil. Najpomembnejše prednosti gorivnih celic so visoka učinkovitost, nizka delovna temperatura ter visoka močnostna gostota [1], [2].

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 odvaja. 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. V nasprotnem primeru pride do nereverzibilnih poškodb na membrani in sčasoma tudi do uničenja celice. Algoritem za vodenje sistema gorivnih celic se mora uspešno prilagoditi delovnim pogojem ter v vsakem trenutku delovati optimalno v smislu učinkovitosti, zanesljivosti ter čim manjšega vpliva na življenjsko dobo komponent sistema.

Pomemben vidik pri vključevanju gorivnih celic v vsakodnevno uporabo je njihova odzivnost na potrebe porabnika. V tem pogledu gorivne celice spadajo med počasneje odzivne vire, kar je posledica kompleksne dinamike, povezane z masnimi in toplotnimi ravnovesnimi zakoni znotraj in zunaj sklada. Za nekatere primere uporabe je to dovolj (elektromotor, viličar,...), a za večino ne. Zato so gorivne celice za večjo uporabnost navadno povezane z akumulatorjem (ali superkondenzatorjem) v hibridni močnostni vir [3]. Tak sistem za proizvodnjo energije na gorivne celice pa se poleg sklada in akumulatorja sestoji še iz podsistema za dovajanje zraka (kisika) in vodika, podsistema za uravnavanje temperature

in vlage in DC/DC pretvornika [4]. Pri tem akumulator nase prevzame tokovne sunke, ki so posledica nepredvidenih sprememb na strani porabnika, sklad pa v sprejemljivem času zagotovi zadostno moč. Ključni izvršni člen pri tem procesu je DC/DC pretvornik, ki napetost sklada prilagaja napetosti akumulatorja tako, da iz sklada teče želen tok, katerega referenco pa spreminjamo zvezno.

Nekatere rešitve predlagajo izvedbe z dvema DC/DC pretvornikoma, ki napetosti vodila prilagajata eden napetost sklada in drugi napetost akumulatorja [5]. Druge izvedbe, kot tudi v tem delu uporabljeni pristop, predpostavljajo le uporabo pretvornika med skladom in vodilom. To deloma omeji njegovo uporabnost, saj izhodna napetost lahko nekoliko niha glede na izpraznjenost akumulatorja ter bremenski tok, ima pa nekatere pomembne prednosti: preprostejše vodenje, nižja cena in manjše izgube.

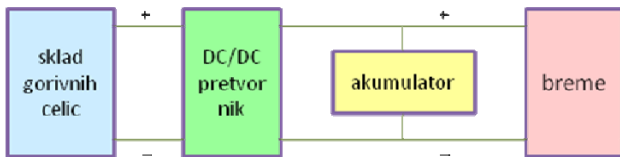
V delu predlagamo pristop k vodenju celotnega sistema na osnovi hibridnega avtomata. Načrtovan je v smislu celostne optimizacije delovanja sistema s stališča učinkovite, varne, zanesljive in dolgotrajne uporabe tako sklada kot akumulatorja [6], [7]. Pri tem vodenje deli na višji in nižji nivo. Nadzorni regulacijski algoritem na višjem nivoju zbira podatke o stanju sistema ter na osnovi le-teh nastavlja reference za delovanje sklada GC.

V delu je so predstavljene osnovne karakteristike (modela) sistema z gorivnimi celicami, iz njih določene smernice za načrtovanje vodenja. Predstavljen je razširjen model sklada z modeloma DC/DC pretvornika in akumulatorja, ter predlagan algoritem vodenja na višjem nivoju. V simulaciji so prikazani rezultati vodenja na določenem bremenskem profilu.

2 Razširjeni model hibridnega sistema z gorivnimi celicami

Za študijo dogajanja v celotnem sistemu in načrtovanje naprednega sistema za vodenje

potrebujemo model vseh elementov v produkcijski in distribucijski verigi. Tak razširjeni model se sestoji iz modelov sklada GC, elektronskega močnostnega (DC/DC) pretvornika, akumulatorja in bremena.



Slika 1: Shematski prikaz celotnega sklopa sistema za proizvodnjo električne energije: od proizvodnje do porabnika.

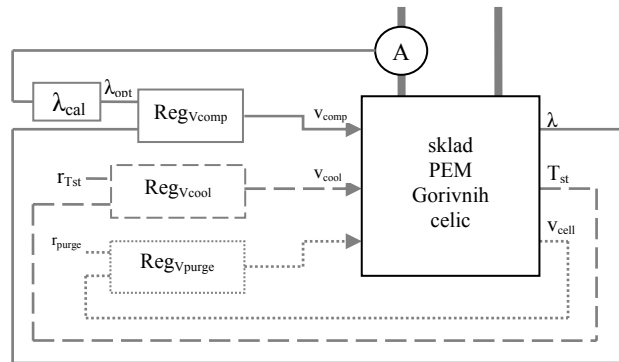
2.1 Model agregata z gorivnimi celicami

Pri načrtovanju vodenja sistema z gorivnimi celicami je bil uporabljen model v akademski praksi pogostega sistema Nexa, podjetja Ballard (glej sliko 2), ki je prav zato zanimiv tudi s stališča primerljivosti doseženih rezultatov.



Slika 2: 1,2 kW agregat s PEM gorivnimi celicami Nexa proizvajalca Ballard.

Model [8], ki je realiziran v okolju Matla-Simulink in omogoča zelo natančno študijo dogajanja v sistemu, predpostavlja tri glavne regulirne vhode, kot je prikazano na sliki 3. To so vpihovanje zraka, hlajenje ter izpihovanje odvečne vode. V tem delu se ukvarjamo le s prvim, ki ima tudi največji vpliv na učinkovitost delovanja sklada. Poleg tega velja omeniti še uravnavanje vlage, ki pri tem sistemu izvedeno z dodatnim vlažilnikom in zato lahko v modelu predpostavljamo 100% vlažnost.



Slika 3: Shema vodenja agregata z GC: tri regulacijske zanke: vpihovanje zraka (polna črta), hlajenja sistema (črtkana), izpihovanje odvečne vode in vodika (točkasto).

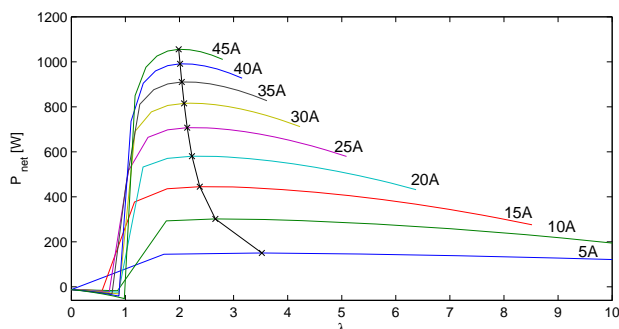
Za normalno delovanje sistema z gorivnimi celicami je potrebno bremenskemu toku primerno dodajati reagenta zrak (O_2) in vodik (H_2). Zrak se v sistem vpihuje s kompresorjem, ki zagotavlja želen tlak, vodik pa navadno shranjen v jeklenki ali metal-hidridnem rezervoarju z reducirnim ventilom, ki mu tlak pred vstopom v sistem zmanjša na cca 7 barov. Interna regulacija pretoka na vodikovi (anodni) strani je izvedena mehansko glede na pretok na kisikovi (katodni) strani, zato ga je načeloma vedno dovolj. Iz tehnoloških razlogov se zrak dodaja v presežku [9] glede na razmerje, ki ga določa kemijska reakcija. Zato definiramo faktor presežka kisika λ :

$$\lambda = \frac{\text{dovedeni } O_2}{\text{porabljeni } O_2} \quad (1)$$

Optimalna vrednost faktorja λ se v odvisnosti od obremenitve sistema spreminja in se giblje med 2 in 3. Za zagotavljanje dolge življenjske dobe je bolj kritična spodnja meja λ , ki mora tudi ob prehodnih pojavih vedno ostati nad 1. Ob pomanjkanju reagentov na membrani med delovanjem (*angl.: starvation*) se le-ta uničuje in sčasoma lahko odpove. Pri večjih vrednostih λ pa gre za nepotrebno povečevanje porabe energije za delovanje kompresorja, ki se napaja iz sklada in ga štejemo med glavne porabnike izgubne moči. Tako statična karakteristika izhodne moči, ki jo računamo kot

$$P_{\text{izhodna}} = P_{\text{sklada}} - P_{\text{izgubna}} \quad (2)$$

izkazuje izrazite maksimume kot je prikazano na sliki 4.



Slika 4: Izhodna moč sistema glede na faktor λ pri različnih tokovnih obremenitvah. Na sliki so označene tudi točke maksimalne izhodne moči.

2.2 Poenostavljeni model močnostnega pretvornika

Poznamo dva značilna tipa pretvornikov; prvi dajejo na izhodu znižano napetost (*angl.*: *buck converter*), drugi pa z uporabo tuljave izhodno napetost povečajo (*angl.*: *boost converter*). Obstajajo tudi kompleksnejši in dražji pretvorniki, ki omogočajo tako višjo kot nižjo izhodno napetost. V našem primeru uporabljeni pretvornik je tipa *buck*, ki na izhodu daje le napetosti, nižje od vhodne.

Zaradi nekaj redov hitrejša dinamike pretvornika od ostalih komponent je bil uporabljen poenostavljen statični model DC/DC pretvornika:

$$d = \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}}; \quad \mu = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{I_{\text{out}} U_{\text{out}}}{I_{\text{in}} U_{\text{in}}}, \quad (3)$$

kjer je d delilnik razmerja napetosti – vhod v model – obravnavan kot regulirna veličina, ter μ izkoristek pretvornika, za katerega smo privzeli konstantno vrednost 95 %.

2.3 Model akumulatorja

Za model akumulatorja smo uporabili model svinčevega akumulatorja iz knjižnice Sim Power Systems v okolju Matlab/Simulink [10] (sicer vsebuje tudi modele Litij-ionskega, nikelj-kadmijevega in pa nikelj-metal-hidridnega akumulatorja)

$$U_{\text{batt}} = E - I_{\text{batt}} R_{\text{batt}}$$

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} + A^{-B \cdot it}; \quad it = \int_0^t I_{\text{batt}} dt, \quad (4)$$

kjer je U_{batt} napetost na sponkah, I_{batt} tok iz akumulatorja, E napetost odprtih sponk, E_0 nazivna napetost, Q kapaciteta akumulatorja, K polarizacijska napetost ter A in B eksponentalna napetost oz. kapaciteta.

Model pa glede na tok in napetost na sponkah akumulatorja ocenjuje tudi njegovo stanje napolnjenosti (*angl.* *state of charge – SOC*), ki je v osnovi podano z

$$\text{SOC} = 100 \left(1 - \frac{\int I_{\text{batt}} dt}{Q} \right), \quad (5)$$

kjer je Q kapaciteta akumulatorja. Uporabili smo model akumulatorja z vrednostmi $Q = 10$ Ah, $E_0 = 25.29$ V, $R_{\text{batt}} = 0.06$ Ohm, $A = 1.32$, $B = 375$. Kapaciteta akumulatorja se navadno določi v skladu z zahtevami odjema ter razpoložljivim agregatom z gorivnimi celicami (na primer tako, da odgovarja nekaj-urnemu polnjenju z maksimalno močjo sklada).

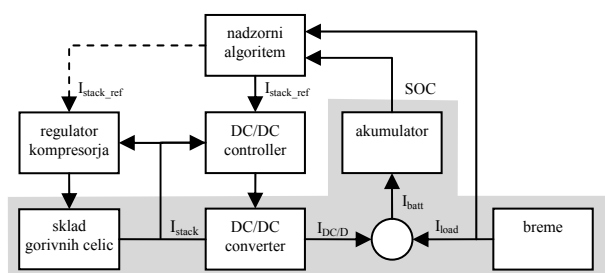
3 Načrtovanje vodenja razširjenega sistema

Pri načrtovanju regulacijske sheme za vodenje celotnega sistema potrebujemo hierarhijo ciljev vodenja. Shema vodenja v obsega tri regulacijske zanke: *a)* za polnjenje akumulatorja, *b)* nastavljanje izhodne napetosti pretvornika in *c)* vpihovanje zraka v sklad. Kot je pokazano v [11], [12], visoka napetost na odprtih sponkah sklada škodi posameznim celicam, saj zmanjšuje površino katalizatorja. Hkrati pa je pomembno spremljati napetost na posamezni celici oz navadno skupku celic. Če le-ta v povprečju pade pod 0,5 V na posamezno celico, to lahko pomeni, da je na eni od celic negativna napetost, in posledično toliko večja na sosednjih celicah, kar iz prej navedenih razlogov vodi v uničenje.

Poleg tega želimo še čim bolj zvezno spreminjanje obremenitve sklada in delovanje v območju z največjim izkoristkom, glede

akumulatorja pa stanje napolnjenosti (SOC) med 40 in 80 %, tokove polnjenja/praznjenja v zahtevanih mejah ter optimiranje števila ciklov polnjenja.

Zgoraj omenjene zahteve privedejo do dvo-nivojske regulacijske sheme. Na zgornjem nivoju je napredni nadzorni regulacijski algoritem, ki glede na stanje akumulatorja ter velikost bremenskega toka določa referenco za tok sklada (I_{stack_ref}) v smislu čim večje (optimalne) učinkovitosti in zdravega delovanja celotnega sistema. Na spodnjem nivoju pa regulator DC/DC pretvornika izhodno napetost nastavlja tako, da iz celice vedno teče ravno zahtevan tok. Posredno je v to shemo vključen tudi regulator kompresorja za vpihovanje zraka v sklad. Shema predlaganega sistema vodenja je prikazana na sliki 8.



Slika 5: Shema vodenja razširjenega modela.

3.1 Koordinirano vodenje razširjenega sistema

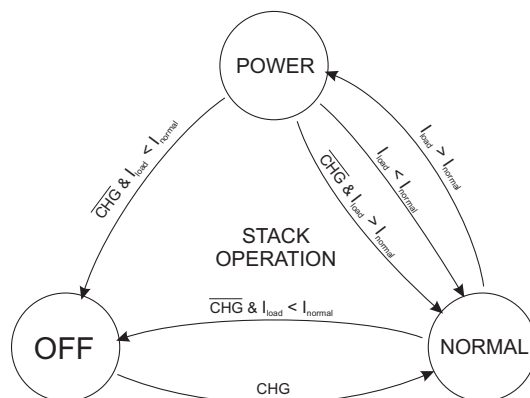
Za nadzorni regulacijski algoritem v delu predlagamo strategijo vodenja, ki predpostavlja 3 režime delovanja sklada

- **OFF** – izklop sklada,
- **NORMAL** – sklad deluje v delovni točki z največjo učinkovitosti,
- **POWER** – sklad deluje z veliko močjo ob nižji učinkovitosti ter možni degradaciji.

Pogoji preklonov med stanji upoštevajo tako stanje akumulatorja – polnjenje oz. praznjenje, stanje napolnjenosti in pa bremenski tok glede na to ali je večji oz. manjši od optimalnega s stališča sklada GC. V praksi sistem večinoma deluje v režimih **OFF** in **NORMAL**; v prvem sklad ne obratuje, v drugem pa deluje v delovni točki z največjim izkoristkom ($I_{normal} = 20$ A). Ob zelo velikih bremenskih tokovih ter

izpraznjenem akumulatorju pa preklopi v **POWER**. V tem režimu, se I_{stack_ref} določa glede na trenutno stanje akumulatorja (*polnjenja / praznjenja*): ko je akumulator v stanju polnjenja je I_{stack_ref} večji od bremenskega toka, sicer pa manjši. V splošnem pa algoritem tudi v tem režimu zaradi učinkovitosti in degradacije stremi k čim nižjim vrednostim I_{stack_ref} , to je proti I_{normal} .

Te zahteve je mogoče realizirati s končnim avtomatom z diagramom prehajanja stanj, kot je prikazano na sliki 6. Poleg tega je glede na specifične lastnosti odjema oz. njegovega profila mogoče postaviti dodatne časovne pogoje. Pri prehodih med stanji se referenčna vrednost toka spremeni zvezno, po rampi; s tem zagotovimo, da je tudi med prehodnimi pojavi v sklad dovajanega dovolj zraka tako, da ves čas deluje v varnem območju.



Slika 6. Predlagana shema nadzornega vodenja za razširjeni sistem

3.2 Vodenje na nižjem nivoju – regulacija DC/DC pretvornika

Element, s katerim lahko vplivamo na polnjenje akumulatorja in ob enem hkrati obremenjenost sklada, je DC/DC pretvornik. Z določanjem faktorja prenosa napetosti d namreč nastavljamo njegovo izhodno napetost, le-ta pa poganja tok (I_{DCDC}). Izhodna napetost višja od napetosti akumulatorja pomeni polnjenje, nižja pa ta tok ustavi. I_{DCDC} pa neposredno določa velikost toka sklada (I_{stack}). Regulacijski zakon PID regulatorja, ki uravnava vrednost d je naslednji:

$$d = K_p \left(I_{stack_err}(t) + \frac{1}{T_i} \int I_{stack_err}(t) dt \right) - \frac{K_p}{T_i} (d - d_{lim}),$$

$$K_p = 10 \%, T_i = 2 \text{ s} \quad (6)$$

kjer je I_{stack_err} razlika med izmerjeno (ali ocenjeno) in referenčno vrednostjo toka sklada. Tudi pri tem regulatorju je bila izvedena zaščita proti integralskemu pobegu, saj d lahko zavzame le vrednosti na intervalu med 0 in 1.

3.3 Vodenje na nižjem nivoju – regulacija vpihovanja zraka v sklad

Na osnovi na sliki 3 prikazane karakteristike lahko določimo funkcijo optimalnega faktorja λ pri določeni tokovni obremenitvi in jo uporabimo kot referenco za regulator kompresorja, ki vpihuje zrak v sklad. Z regulacijo referenčne vrednosti λ k optimalni se zmanjšajo nepotrebne izgube in tako poveča izkoristek sistema, kar je ponazorjeno v nadaljevanju. Za regulacijo faktorja λ smo uporabili PI regulator.

$$U_{comp} = K_p \left(\lambda_{err}(t) + \frac{1}{T_i} \int \lambda_{err}(t) dt \right) - \frac{K_p}{T_i} (U_{comp} - U_{comp_lim}),$$

$$K_p = 3 \%, T_i = 2 \text{ s} \quad (7)$$

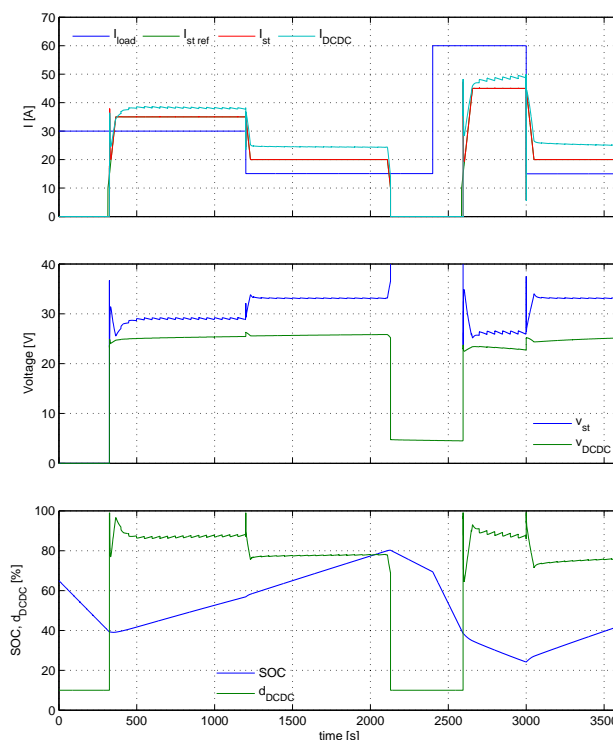
kjer je $\lambda_{err}(t)$ razlika med ocenjeno in referenčno vrednostjo λ . Zaradi omejenega območja napetosti na kompresorju (0 – 100 %), je izvedena tudi zaščita proti integralskemu pobegu.

Poudariti velja, da je odvisnost $\lambda_{opt}(I_{stack})$ sicer nelinearna – kaže se predvsem v spodnjem območju delovanja – vendar se iz tehnoloških razlogov delovanju v tem območju izogibamo, saj se pri nizkih tokovih zaradi visokih napetosti na posameznih celicah pojavljajo ireverzibilne degenerativne spremembe.

Ključni problem vodenja je zagotavljanje zadostne količine dovedenega zraka ob prehodnih pojavih, kjer se poraba hipoma zelo poveča in posledično faktor λ lahko začasno pade celo pod vrednost 1. Zato se boljšemu delovanju približamo tudi z druge strani – z nadzorom odjema toka iz sklada, kot je opisano v poglavju 3.1.

4 Simulacijski preizkus

Simulacijska shema razširjenega modela (predstavljen v poglavju 2) ter predlaganega sistema vodenja je izvedena okolju Matlab/Simulink. Uporabljen je bil akumulator manjše kapacitete ($Q = 10 \text{ Ah}$), da smo v simulaciji lahko na relativno kratki časovni skali prikazali zanimivejše pojave.



Slika 7. Prikaz vodenja razširjenega sistema z GC; poteki od zgoraj navzdol: 1) tok sklada, tok iz pretvornika ter bremenski tok, 2) napetost sklada in pretvornika, 3) razmerje pretvornika d ter stanje akumulatorja SOC.

Za preizkuse smo uporabili vzorčni profil bremenskega toka, ki je prikazan s prekinjeno črto na zgornjem diagramu slike 7.: 20 minut je bremenski tok 30 A, nato 20 min 15 A, sledi 10 min s tokom 60 A in na koncu še 10 min s tokom 15 A. Na sliki je moč videti, da lahko z regulacijo DC/DC pretvornika z akumulatorjem zelo dobro kompenziramo tokovne sunke, ki jih povzročajo spremenljivo breme tako, da jih sklad ne čuti, pa tudi izhodna napetost ne niha preveč (srednji diagram, zelena črta). Hkrati zagotavljamo da se akumulator brez prekinitvev polni in prazni prek celotnega dovoljenega območja (spodnji diagram, modra črta).

5 Zaključek

V delu je prikazan model razširjenega sistema praktično uporabnega agregata z gorivnimi celicami. Opisano je načrtovanje vodenja celotnega sistema in komentirana izbira dvonivojskega vodenja. Algoritmi na višjem nivoju vodijo podsisteme v varnih območjih delovanja, medtem ko regulatorji na spodnjem nivoju skrbijo za optimalno delovanje komponent. Za oceno kvalitete je prikazano vodenje na simuliranem profilu bremena.

6 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.

7 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] Suh K.W., Stefanopoulou A.G., (2005). Coordination of converter and fuel cell controllers. *International Journal of Energy Research*, 29(12), 1167–1189.
- [4] Jiang Z., Dougal R. A. (2009) Design and testing of a fuel-cell powered battery charging station.
- [5] Arce A., del Real A. J., Bordons C. (2009). MPC for battery/fuel cell hybrid vehicles including fuel cell dynamics and battery performance improvement. *Journal of Process Control*, 19, 1289-1304.
- [6] Ruetschi P., (2004). Aging mechanisms and service life of lead–acid batteries. *Journal of Power Sources*, 127, 33-44.
- [7] Vetter J., Novák P., Wagner M.R., Veitb C., Möller K.-C., Besenhard J.O., Winter M., Wohlfahrt-Mehrens M., Vogler C., Hammouche A. (2005). Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 147, 269-281.
- [8] del Real A.J., Arce A., Bordons C. (2007). Development and experimental validation of a PEM fuel cell dynamic model. *Journal of Power Sources*, 173, 1, 310-324.
- [9] 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.
- [10] Mathworks MATLAB/Simulink software and reference library.
- [11] Yousfi-Steiner N., Moçotéguy Ph., Candusso D., Hissel D., (2009). A review on polymer electrolyte membrane fuel cell catalyst degradation and starvation issues: Causes, consequences and diagnostic for mitigation. *Journal of Power Sources*, 194, 130-145.
- [12] Borup R.L., Davey J.R., Garzon F.H., Wood D.L., Inbody M.A. (2006). PEM fuel cell electrocatalyst durability measurements. *Journal of Power Sources*, 163, 76-81.