

Spremljanje stanja gorivnih celic PEM

Pavle Boškosi, Andrej Debenjak, Dani Juričič
Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana
pavle.boskoski@ijs.si, andrej.debenjak@ijs.si, dani.juricic@ijs.si

Condition monitoring of PEM fuel cell systems

Despite the maturity of fuel cell development, the supporting systems that influence their optimal usage, reliability and longevity still require substantial development. Such supporting systems require a set of algorithms and hardware subsystems for control, condition monitoring (CM) and power conditioning. Achieving such a system four criteria should be met:

- (i) such a system should be capable of performing sufficiently fast and accurate estimation of the fuel cell condition,
- (ii) it should allow straightforward integration without any prior characterization of the fuel cell system,
- (iii) the algorithms should be computationally efficient allowing embedded implementation.

Electrochemical impedance spectroscopy is the most commonly used CM tool. Significantly, performance improvement can be achieved by employing pseudo-random binary sequence (PRBS) as a perturbation signal. The impedance characteristic is computed using continuous wavelet transform with Morlet mother wavelet. With such an approach, EIS is performed in the frequency band from 0.1 Hz to 500 Hz within 60 seconds. The resulting impedance components become dependent complex random variables. Using their distributions, the optimal thresholds are calculated employing using data from fault-free operation and the desired false alarm rate. Using a computationally efficient implementation of the proposed algorithms, a complete CM platform was built, based on modular DC-DC converter, 90 channel fuel cell voltage monitor and an embedded diagnostic algorithm. The complete solution has been evaluated on a 8.5 kW fuel cell power system.

Kratek pregled prispevka

Tehnologija gorivnih celic s protonsko prevodno membrano (ang. proton exchange membrane, PEM) in ostali podporni sistemi, ki vplivajo na zanesljivost in vzdržljivost delovanja, so dosegli precejšnjo zrelost. Kljub temu je za zagotavljanje visoke zanesljivosti in dolge življenjske dobe sistemov z gorivnimi celicami PEM potrebno še precej razvojno-raziskovalnega dela na področju nadzora in spremljanja stanja (ang. condition monitoring, CM). Takšen sistem mora izpolnjevati naslednje tri zahteve:

- (I) sistem mora hitro in natančno oceniti stanje gorivnih celic,
- (II) omogočati mora integracijo brez predhodne karakterizacije gorivnih celic,
- (III) algoritmi morajo biti računsko učinkoviti in omogočati vgrajeno izvedbo.

Pristopi za spremljanje stanja gorivnih celic PEM največkrat temeljijo na uporabi elektrokemijske impedančne spektroskopije (ang. electrochemical impedance spectroscopy, EIS). Učinkovitost metode EIS lahko bistveno izboljšamo z uporabo vzbujalnega signala oblike psevdonaključnega binarnega zaporedja (ang. pseudo-random binary sequence, PRBS), pri čemer impedančno karakteristiko izračunamo z uporabo zvezne valčne transformacije (ang. continuous wavelet transform, CWT) z Morlejevim valčkom. S tem pristopom ocenimo impedančno karakteristiko v frekvenčnem pasu od 0,1 Hz do 500 Hz v le 60 sekundah. Izračunane impedančne komponente lahko obravnavamo kot kompleksne slučajne spremenljivke. Z izpeljavo in uporabo njihovih funkcij porazdelitve verjetnosti, podatkov pridobljenih med delovanjem gorivnih celic med nominalnim delovanjem in želene stopnje verjetnosti lažnega alarma (ang. probability of false alarm, PFA) nato določimo vrednosti optimalnih pragove algoritma za zaznavanje napak. Predlagano metodologijo za spremljanje stanja smo implementirani na razviti vgrajeni platformi za spremljanje stanja. Platformo sestavljajo med seboj povezana modularni DC-DC pretvornik in 90 kanalni merilnik napetosti gorivnih celic ter vgrajen diagnostični algoritem. Celovita rešitev je bila ovrednotena na industrijskem sistemu z večjim skladom gorivnih celic PEM.

1 Uvod

Tehnologija gorivne celice PEM omogoča učinkovito pretvorbo kemične v električno energijo. Poleg tega ima izredno majhen vpliv na okolje [1]. Pretvorba energije se odvija preko elektrokemične reakcije vodika in kisika, kjer izkoristek pretvorbe dosega 55% [2, 3]. Zaradi visoke učinkovitosti pretvorbe in odsotnosti toplogrednih plinov so gorivne celice PEM med kandidati za pretvornike energije v prihodnosti.

Predpogoj za učinkovito izkoriščanje gorivnih celic PEM je sklop zanesljivih podpornih podsistemov. Ta obsega podporne sisteme za zagotavljanje delovanja sklada gorivnih celic (ang. balance of plant, BOP), DC-DC pretvornik, modul za izvajanje meritev napetosti celic ter nadzorno kontrolno enoto [4-6]. Ob teh podpornih sistemov pa algoritmi sprotne spremljanja stanja sistema omogočajo oceno trenutnega stanja gorivnih celic v realnem času.

Sodobni sistemi komercialnih gorivnih celic so opremljeni z DC-DC pretvorniki in moduli za spremljanje napetosti celic, ki izpolnjujejo le osnovne zahteve glede pretvorbe (npr. [7-13]) in spremljanja napetosti (npr. [14, 15]). Takšni sistemi ne podajajo natančne informacije o stanju sistema. Ker na vzdržljivost in zanesljivost gorivnih celic PEM vpliva vrsta napak je diagnostika pomembnega praktičnega pomena [16, 17]. Pravočasne in natančne informacije o trenutnem stanju sistema gorivnih celic omogočajo optimalno izkoriščanje glede na njegove trenutne zmogljivosti [18 in 21].

Eden izmed ciljev te študije je premostiti vrzel med opremo za merjenje v laboratorijskem okolju in opremo za uporabo na sodobnih komercialnih sistemih. V ta namen je bila razvita vgrajena platforma za sprotne spremljanje stanja gorivnih celic PEM. Razvite elektronske naprave vključujejo standardne komponente, zato je zasnovani sistem (i) komercialno izvedljiv in (ii) dovolj natančen za opravljanje sofisticiranih diagnostičnih meritev. Kombinacija DC-DC pretvornik in 90-kanalnega modula za spremljanje napetosti

gorivnih celic (ang. fuel cell voltage monitor, FCVM) je zmogljiva platforma za natančno sprotne spremljanje stanja gorivnih celic PEM. V prispevku so obravnavani naslednji podsklopi:

- DC-DC pretvornik, ki omogoča generiranje vzbujevalnih signalov za diagnostične namene,
- 90-kanalni FCVM sposoben natančnega merjenja napetosti posamezne gorivne celice sklada,
- algoritem za hitro oceno vrednosti impedance s pomočjo uporabe vzbujalnega signala PRBS in
- pristop za nastavljanje pragu detekcije in izračun splošnega kazalnika stanja (ang. condition indicator, CI).

Poslabšanje delovanja (tj. prisotnost napak) gorivnih celic PEM vpliva na njihovo impedančno karakteristiko. Te napake je zato mogoče odkriti z množico pristopov, ki temeljijo na metodologiji EIS [22-27]. Kljub visoki diagnostični ločljivosti EIS, pa njeno uporabo za sprotne nadzor zavirata dve pomanjkljivosti:

1. ocena impedance z uporabo sinusnih vzbujalnih signalov je zamudna (navadno nekaj minut) in je zato neprimerna za hitro spremljanje stanja v industrijskih aplikacijah,
2. ustrezna izbira pragov algoritma za zaznavanje napak zahteva bogat nabor zgodovinskih podatkov, ki so pogosto nedostopni.

Z namenom razrešitve prve pomanjkljivosti smo razvili algoritem za hitro oceno impedančne karakteristike gorivnih celic, ki z uporabo vzbujalnega signala PRBS v manj kot 60 sekundah zajame vse potrebne podatke. Razviti DC-DC pretvornik superponira vzbujalni signal na bremenski tok sklada gorivnih celic, modul FCVM pa poskrbi za zajem ustreznih signalov. Impedanco nato ocenimo z uporabo zvezne valčne transformacije s kompleksnim Morlejevim valčkom [28].

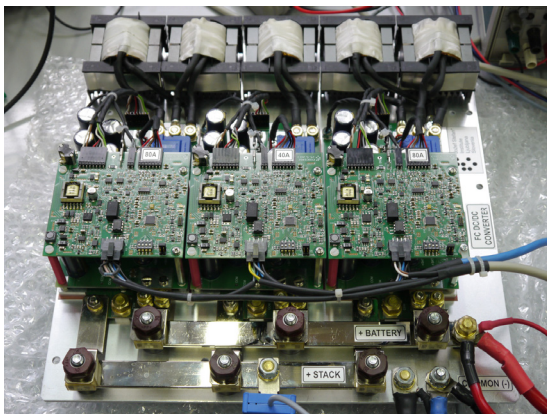
Pragove algoritma za zaznavanje napak določimo na podlagi izpeljanih funkcij porazdelitve verjetnosti ocene impedance in verjetnosti lažnega alarma [29]. Izhod algoritma za zaznavanje napak je brez-enotni kazalnik stanja sistema.

Razviti DC-DC pretvornik je predstavljen v drugem poglavju in modul FCVM v tretjem. Na kratko bomo v četrtem poglavju podali pregled metode za hitro ocenjevanje impedance z uporabo PRBS in CWT, kot tudi izvedbo algoritmov spremljanja stanja. Vrednotenje celotnega sistema je predstavljeno v petem poglavju.

2 DC-DC pretvornik

Zasnovani DC-DC pretvornik je modul, ki pretvarja izhodno napetost sistema z gorivnimi celicami v napetost naprave za shranjevanje energije (npr. litijev akumulator ali super kondenzator). S stališča DC-DC pretvornika vhodna naprava (tj. gorivna celica) in izhodna naprava (tj. akumulator) sta vir oziroma porabnik toka. Zaradi tega je DC-DC pretvornik zasnovan kot tokovni pretvornik. Takšen način delovanja je neobičajen za skoraj vse komercialno dostopne pretvornike, ki največkrat delujejo kot napetostni pretvorniki.

Za doseganje visoke učinkovitosti pretvorbe je potrebna topologija DD-DC pretvorbe s čim nižjim številom potrebnih močnostnih komponent. Zato je bil uporabljena topologija »step-down«, pri kateri se energija pretaka le med enim stikalom in močnostno tuljavo.



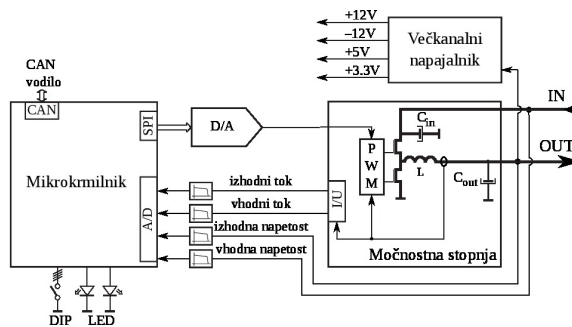
Slika 1: DC-DC pretvornik.

Ta topologija ima tri pomanjkljivosti: (i) vhodna napetost mora biti vedno višja od izhodne napetosti, (ii) vhod in izhod nista galvansko ločena in (iii) precejšnje nihanje vhodnega toka. Prva pomanjkljivost nima bistvenega pomena za srednje velike sisteme z gorivnimi celicami, ki obsegajo med 50 in 100 celic. Drugo pomanjkljivost je lahko zaobiti, saj lahko sklad gorivnih celic ozemljimo na katerikoli strani. Tretji težavi je potrebno nameniti največ pozornosti, saj nihanje toka na vhodni strani negativno vpliva na sklad gorivnih celic. Nihanje učinkovito znižujemo z uporabo elektrolitski kondenzatorjev na vhodni strani DC-DC pretvornika.

DC-DC pretvorni je zasnova tako, da lahko več njih vzporedno vezemo in tako dosegamo višje izhodne tokove. Med posamezne vzporedno vezane pretvornike je mogoče dinamično deliti delež bremenskega toka, s čimer optimiziramo učinkovitost pretvorbe. Pri trenutni izvedbi je število vzporednih DC-DC pretvornikov omejeno na osem, izmed katerih je vsak sposoben pretvorbe 80 A izhodnega toka. Na ta način lahko skupni tok doseže 640 A. Primer izvedbe 5 kW pretvornega bloka je prikazana na Sliki 1. Sklop je sestavljen iz treh vzporednih DC-DC pretvornikov, dva z zmogljivostjo 80 A in enega 40 A.

Blokovna shema na sliki 2 prikazuje konceptualno razporeditev elektronskih podsklopov DC-DC pretvornika. V grobem lahko modul razdelimo na tri funkcionalne bloke, in sicer:

- več kanali napajalnik,
- mikrokrmilniško vezje in
- močnostno stopnjo.

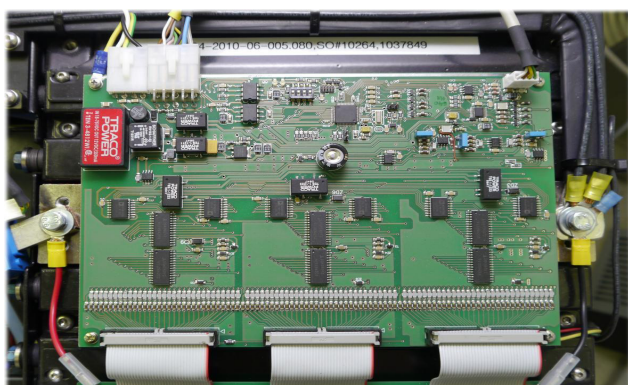


Slika 2: Blokovna shema DC-DC pretvornika.

3 Modul za spremljanje napetosti gorivnih celic

Znaten padec napetosti gorivne celice PEM, je posledica napake v delovanju gorivne celice. Zaradi tega tudi ceneni sistemi za spremljanjem delovanja potrebujejo informacijo o napetosti gorivnih celic. Med laboratorijskimi in komercialnimi diagnostičnimi rešitvami obstaja precejšnja razlika. Kompromise se sklepa predvsem med zmožnostjo hitrih in natančnih meritev na eni strani in ceno na drugi [34, 35]. Večina komercialno nameščenih FCVM sistemov je zmožnih merjenja le skupne napetosti dveh ali več sosednjih gorivnih celic s precej nizko hitrostjo vzorčenja in resolucijo. Ne glede na stroškovno učinkovitost, pa takšen pristop zadošča le za odkrivanje hujših poslabšanj stanja gorivnih celic. Zato takšna oprema ni zmožna zagotavljati natančnejše diagnostične informacije.

Izdelani modul FCVM predstavlja most med opremo za merjenje v laboratorijskem okolju in sodobno komercialno diagnostično opremo. Modul FCVM za nizko cenovno pridobivanje meritev je vgrajena naprava, sposobna opravljanja natančnih merjenje napetosti posameznih gorivnih celic v skladu do največ 90 gorivnih celic. Poleg tega predstavlja platformo za izvajanje meritev EIS na vsaki izmed celici sklada. Slika 3 prikazuje modul FCVM povezan na komercialni sklad gorivnih celic PEM.



Slika 3: Modul za spremljanje napetosti.

4 Spremljanje stanja

Vgrajeni modul FCVM uporablja metodo za hitro oceno impedance z uporabo PRBS vzbujačnega signala [28]. Na osnovi verjetnostne porazdelitve impedance posameznih frekvenčnih komponent določimo diagnostične pragove na podlagi želene vrednosti PFA [29].

4.1 Hitra ocena impedance

Ker ima vzbujačni signal lastnosti naključnega procesa, koeficiente CWT obravnavamo kot naključne spremenljivke, vrednosti impedance pri posamezni frekvenci pa kot kompleksne naključne spremenljivke [37].

Za pravilen opis ustreznih statističnih lastnosti je potrebno določiti verjetnostne porazdelitve kompleksnih vrednosti impedance. V ta namen sistem gorivnih celic vzbudimo s pomočjo PRBS signal. Postopek, ki je opisan v Debenjak et al. [28], omogoča učinkovito oceno impedance s pomočjo kompleksnih koeficientov CWT toka gorivne celice $i(t)$ in napetosti $u(t)$ z uporabo kompleksnega Morlejevega valčka.

Zvezna valčna transformacija kvadratne integrabilne funkcije $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ je definirana z [38]:

$$Wf(u, s) = \langle f(t), \psi_{u,s}(t) \rangle, \quad (1)$$

kjer je $\psi_{u,s}(t)$ skalirana in zamaknjena različica Morlejevega valjčka [39]:

$$\psi_{u,s}(t) = \pi^{-1/4} \left(e^{-j\alpha_0 t} - e^{-\alpha_0^2/2} \right) e^{t^2/2} \quad (2)$$

4.2 Vzbujačni signal PRBS

Spektralna močnostna gostota signala PRBS je na določenem frekvenčnem področju podobna spektralni močnostni gostoti belega šuma. Poleg tega lahko amplitude frekvenčnih komponent obravnavamo kot naključno spremenljivko z Gaussovo porazdelitvijo [40]. Analiza takšnega signala s CWT ohrani njegove statistične lastnosti v smislu koeficientov

transformacije. S transformacijo obeh signalov z CWT dobimo transformacijske koeficiente:

$$\begin{aligned} Wi(t, f) &= \Re(Wi(t, f)) + j\Im(Wi(t, f)) \\ Wu(t, f) &= \Re(Wu(t, f)) + j\Im(Wu(t, f)) \end{aligned} \quad (3)$$

Vrednost impedance pri določeni frekvenci obravnavamo kot kompleksno Gaussovo cirkularno slučajno spremenljivko [41]. Z uporabo kompleksnih koeficientov (3) impedanco sistema pri frekvenci $f = f_0$ izračunamo z deljenjem komponent:

$$z(t) = \frac{Wu(t, f)}{Wi(t, f)} \Big|_{f=f_0} \quad (4)$$

4.3 Funkcija porazdelitve verjetnosti kompleksne naključne spremenljivke $z(t)$

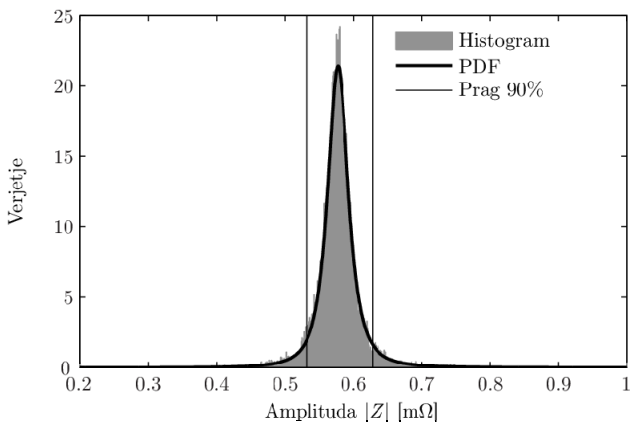
Tok $i(t)$ in napetost $u(t)$ v (4) sta korelirana, kar zapišemo s kovariančno matriko [42–44]:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_u^2 & \rho\sigma_u\sigma_i \\ \rho^*\sigma_u\sigma_i & \sigma_i^2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

kjer je ρ kompleksni korelacijski koeficient in $|\rho| \leq 1$. Posledično je porazdelitvena funkcija (PDF) kvocienta v (4) 45]:

$$f_z(z) = \frac{(1-|\rho|^2)}{\pi\sigma_u^2\sigma_i^2} \left(\frac{|z|^2}{\sigma_u^2} + \frac{1}{\sigma_i^2} - 2\frac{\rho_r z_r - \rho_i z_i}{\sigma_u\sigma_i} \right)^{-2} \quad (6)$$

Ker sta tok $i(t)$ in napetost $u(t)$ korelirana, lahko za porazdelitveno funkcijo modula kvocienta (4) zapišemo [46]:



Slika 4: Funkcija porazdelitve verjetnosti $|z(t)|$.

$$p_{|z|}(|z|) = \frac{2\sigma_u^2\sigma_i^2(1-\rho^2)|z|(\sigma_i^2|z| + \sigma_u^2)}{\left[(\sigma_i^2|z| + \sigma_u^2)^2 - 4\rho^2\sigma_u^2\sigma_i^2|z|^2 \right]^{3/2}} \quad (7)$$

Porazdelitvena funkcija (7) je simetrična in definirana na pozitivni polosi. Primer realizacije porazdelitvene funkcije (7) je prikazan na sliki 4.

4.4 Kazalnik stanja

Določanje optimalne vrednosti pragu zaznavanja je izjemnega pomena za sistem za spremljanje stanja. Previsoke vrednosti zmanjšujejo občutljivost diagnostičnega sistema, s tem pa se poveča verjetnost zgrešenih alarmov. Hkrati pa se zmanjšuje verjetnost lažnih alarmov. Na drugi strani pa prenizke mejne vrednosti povečajo verjetnost lažnih alarmov, kar znižuje verodostojnost sistema za spremljanje stanja. Zaradi tega najpogosteje ne določamo neposredno vrednost pragov detekcije, ampak raje določimo dopustno vrednost PFA [47].

Sistem za spremljanje stanja, ki temelji na nizki vrednosti PFA bo sprožil alarm le v primeru, ko se stanje gorivne celice precej poslabša. Ker poznamo PDF (7), lahko zgornjo in spodnjo mejo priročno izračunamo iz CDF spremenljivke $F_{|z|}(|z|)$:

$$\begin{aligned} T_{\downarrow} &= F_{|z|}^{-1}\left(\frac{P_{FA}}{2}\right) = \inf\{F_{|z|} \geq \frac{P_{FA}}{2}\} \\ T_{\uparrow} &= F_{|z|}^{-1}\left(1 - \frac{P_{FA}}{2}\right) = \inf\{F_{|z|} \geq 1 - \frac{P_{FA}}{2}\} \end{aligned} \quad (8)$$

Izračunane pragove (8) lahko dodatno uporabimo za preslikavo kompleksne impedance v tako imenovan kazalnik stanja (CI), ki je abstraktna značilka neposredno povezana s stanjem sistema [47]. Za optimalno delujoč sistem mora imeti CI nizke vrednosti. S slabšanjem stanja in prisotnimi napakami pa se mora vrednost CI povečati v skladu s poškodbami, ki so prisotne v sistemu. Glede na pragove določene s PFA, so vrednosti CI skalirane tako, da vrednosti blizu ena napovedujejo neposredno nevarnost odpovedi. Tako definiran CI prinaša dve prednosti:

1. brez enotski opis stanja
2. trend CI lahko uporabimo za prognostiko (tj. oceno preostale življenjske dobe)

V kontekstu gorivnih celic PEM lahko prisotnost napake bodisi povečajo ali zmanjšajo vrednosti impedančnih komponent. Zato je za delovanje brez napak vrednost CI v sredini območja, ki ga omejujejo pragovi detekcije določeni s PFA, kot to prikazuje slika 4. Posledično bodo komponente impedance v nemotenem delovanju imele vrednosti v okolici 1/2. Če izberemo za končno vrednost značilke mejo določeno s PFA, CI določimo na naslednji način:

$$CI = 2 \times (1 - p_{FA})^{-1} \left| F_{|z|}(|z|) - \frac{1}{2} \right| \quad (9)$$

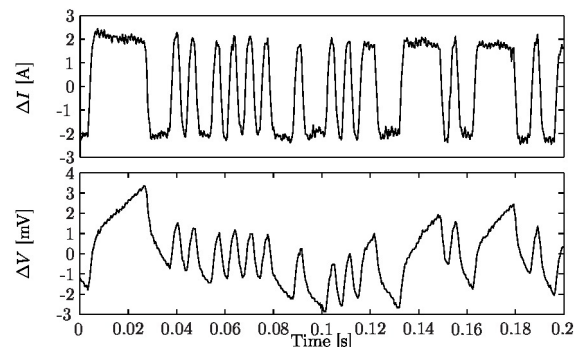
5 Potrditev metodologije

Med drugimi tudi vodne razmere znotraj gorivnih celic močno vplivajo na zanesljivost delovanja in učinkovitost gorivnih celic PEM [17]. Diagnostika teh napak ima zato veliko praktično težo, saj zagotavlja informacije za učinkovito upravljanje sistema. Številne študije kažejo na to, da je mogoče te napake odkriti z uporabo pristopov EIS [48-55]. V namen testiranja razvite strojne opreme in potrditve metodologije smo na komercialnem sistemu gorivnih celic PEM umetno povzročili napake povezane z vodnimi razmerami.

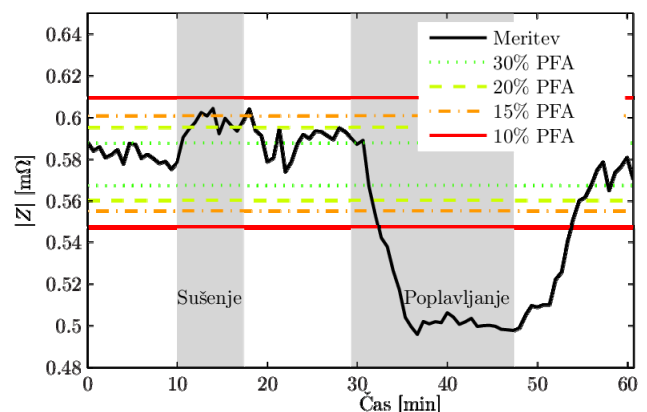
5.1 Eksperimentalni postopek

V poskusih smo sistem gorivnih celic držali v konstantni delovni točki pri konstantnih zunanjih pogojih delovanja. Enosmerni tok pretvornika smo nastavili na 70 A, medtem ko je amplituda signala PRBS znašala 2 A. Razlika med minimalnim in maksimalnim tokom je zato znašala 4 A in bila dovolj majhna, da ni povzročila težav zaradi nelinearnosti gorivnih celic PEM. Slika 5 prikazuje poteke tokovnih in napetostnih signalov gorivne celice PEM med poskusom izmerjenih.

Signale smo zajemali vsakih 40 sekund. Med poskusom smo celice vodili skozi pet stopenj: brezhibno delovanje, sušenje, brezhibno delovanje, poplavljanje, in nazaj v brezhibno delovanje. Prva faza normalnega delovanja z relativno vlažnostjo vstopnega zraka 10% je trajala 10 minut. V drugi fazi, med 10. in 17. minuto, smo zrak posušili do relativne vlažnosti 2% in ga dovajali v gorivno celico. Kasneje smo dovod zraka ponovno navlažili na 10% relativne. V četrti fazi, med 30. in 47. minuto, je bil zrak nasičen z vodno paro. Njegova relativna vlažnost je bila 100% in dovedena v sistem, kar je povzročilo poplavljanje gorivne celice. Nazadnje smo vlažnost zraka ponovno zmanjšali na začetnih 10%. Tako načrtovan eksperiment omogoča analizo odziva gorivne celice v različnih scenarijih napak različnih intenzivnosti. Vse faze poskusa so jasno označene na sliki 6.



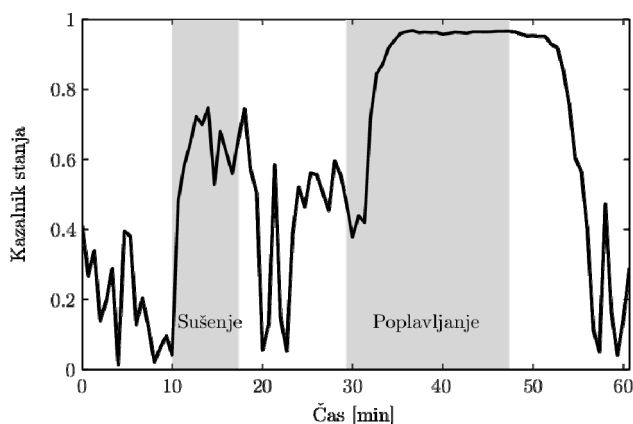
Slika 5: Primer časovnega poteka signalov.



Slika 6: Potek vrednosti impedance in pripadajočih odločitvenih pragov.

5.2 Časovni potek CI

Časovni potek CI (9) je prikazan na sliki 7. Vrednosti CI so bile izračunane za PFA = 10%. Kot je bilo pričakovati ima med brezhibnim obratovanjem CI nizke vrednosti. Ob nastopu prve napake se je vrednosti CI povečala do 0.5, kar kaže na poslabšanje stanja gorivne celice. Vrednost 0.5 jasno opisuje odmik iz nemotenega delovanja, istočasno pa je v skladu z nizko spremembo relativne vlažnosti, tj. sušenja na 8% relativno vlažnost. V primerjavi z nizko intenzivnostjo sušenja, pa v fazi poplavljanja vrednost CI doseže mejno vrednost 1. Velika sprememba v relativni vlažnosti sistema se neposredno odraža v visoki vrednosti CI. Na koncu eksperimenta, ko smo vlažnost zraka vrnili v nominalno stanje, se je CI zmanjšal, kar kaže na skoraj brezhibno delovanje. Rezultati potrjujejo, da je CI dovolj občutljiv na stanje vodnih razmer v celici. Obenem je njegova vrednost neposredno povezana z intenziteto napake glede na izbrano vrednost PFA.



Slika 7: Časovni potek kazalnika stanja.

6 Zaključek

V prispevku smo predstavili vsestranski sistem sprotne spremljanja stanja sklada gorivnih celic PEM, ki temelji na integraciji DC-DC pretvornika in modula FCVM. Posledično je sistem gorivnih celic obogaten z informacijami o trenutnem stanju, ki omogoča optimalno izkoriščanje sistema.

Celoten sistem vključuje DC-DC pretvornik z vgrajenimi diagnostičnimi zmogljivostmi, 90-

kanalni merilnik napetosti FCVM in vgrajene algoritme za obdelavo signalov in spremljanje stanja. Zasnovan DC-DC pretvornik omogoča vzporedno vezavo več pretvornikov, kar omogoča višjo moč pretvorbe. Poleg napajanja priključenih naprav DC-DC pretvornik omogoča vzbujanje sistema s gorivnimi celicami PEM s poljubnimi vzbujalnimi signali, ki jih lahko uporabimo v diagnostične namene. DC-DC pretvornik skupaj z modulom FCVM zagotavljata osnovno strojno opremo za sprotno spremljanje stanja komercialnih elektroenergetskih sistemov s gorivnimi celicami PEM. Obe napravi izpolnjujeta zahtev glede velikosti in stroškov komercialno usmerjenih aplikacij. Kljub temu vseeno izpolnjujeta zahteve po natančnosti, ki jih zahteva diagnostična metodologija.

Poleg strojne opreme, sistem za CM vključuje tudi metodo za hitro oceno impedance gorivnih celic. Predlagana metodologija ima dve prednosti. Prvič, bistveno skrajša čas, potreben za izvedbo meritev, zaradi česar je sprejemljiva za komercialne aplikacije. In drugič, metodologija izbora pragu na podlagi vrednosti PFA omogoča nedvoumno določitev vrednosti pragov. Na podlagi teh mejnih vrednosti izračunamo kazalnik stanja CI, ki opisuje splošno stanje gorivnih celic. Ta informacija je praktičnega pomena tako za proizvajalce, kot tudi za končnega uporabnika.

Tako strojna oprema, kot tudi metodologija, so bile potrjene na komercialnem sistemu s gorivnimi celicami PEM z močjo 8,5 kW. Rezultati kažejo, da celoten sistem za spremljanje stanja deluje po pričakovanjih, in da zagotavlja zahtevane informacije o stanju sistema.

7 Literatura

- [1] O. Z. Sharaf and M. F. Orhan, "An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, pp. 810–853, 2014.
- [2] F. Barbir, *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*. Elsevier, 2005.
- [3] V. Jovan, M. Perne, and J. Petrovič, "An assessment of the energetic flows in a commercial

- PEM fuel-cell system,” *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no. 12, pp. 2467–2472, 2010.
- [4] X. Yu, M. R. Starke, L. M. Tolbert, and B. Ozpineci, “Fuel cell power conditioning for electric power applications: a summary,” *Electric Power Applications*, vol. 1, no. 5, pp. 643–656, 2007.
 - [5] L. Palma, M. Harfman Todorovic, and P. Enjeti, “Analysis of common-mode voltage in utility-interactive fuel cell power conditioners,” *Industrial Electronics*, vol. 56, no. 1, pp. 20–27, 2009.
 - [6] S. N. Motapon, L. A. Dessaint, and K. Al-Haddad, “A comparative study of energy management schemes for a fuel-cell hybrid emergency power system of more-electric aircraft,” *Industrial Electronics*, vol. 61, no. 3, pp. 1320–1334, 2014.
 - [7] R. J. Wai, C. Y. Lin, R. Y. Duan, and Y. R. Chang, “High-efficiency DC-DC converter with high voltage gain and reduced switch stress,” *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 54, no. 1, pp. 354–364, 2007.
 - [8] M. Harfman Todorovic, L. Palma, and P. Enjeti, “Design of a wide input range DC-DC converter with a robust power control scheme suitable for fuel cell power conversion,” *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, no. 3, pp. 1247–1255, 2008.
 - [9] G. Wu, X. Ruan, and Z. Ye, “Non-isolated high step-up DC-DC converters adopting switched-capacitor cell,” *Industrial Electronic*, vol. PP, pp. 1–10, 2014.
 - [10] P. Xuwei and A. Rathore, “Novel bidirectional snubberless naturally commutated soft-switching current-fed full-bridge isolated DC/DC converter for fuel cell vehicles,” *Industrial Electronics*, vol. 61, no. 5, pp. 2307–2315, 2014.
 - [11] V. Valdivia, A. Barrado, A. Lazaro, M. Sanz, D. Lopez del Moral, and C. Raga, “Black-box behavioral modeling and identification of DC-DC converters with input current control for fuel cell power conditioning,” *Industrial Electronics*, vol. 61, no. 4, pp. 1891–1903, 2014.
 - [12] K. C. Tseng and C. C. Huang, “High step-up high-efficiency interleaved converter with voltage multiplier module for renewable energy system,” *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 61, no. 3, pp. 1311–1319, 2014.
 - [13] X. Hu and C. Gong, “A high gain input-parallel output-series DC/DC converter with dual coupled inductors,” *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 30, no. 3, pp. 1306–1317, 2015.
 - [14] S. Burany, R. B. Gopal, N. A. Freeman, and S. Masse, “Method and apparatus for monitoring fuel cell voltages,” *American Patent US 7,148,654*, 2006.
 - [15] M. Ordonez, M. Sonnaillon, J. Quaiocoe, and M. Iqbal, “An embedded frequency response analyzer for fuel cell monitoring and characterization,” *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, no. 6, pp. 1925–1934, 2010.
 - [16] F. A. de Bruijn, V. A. T. Dam, and G. J. M. Janssen, “Review: Durability and degradation issues of PEM fuel cell components,” *Fuel Cells*, vol. 8, no. 1, pp. 3–22, 2008.
 - [17] W. Schmittinger and A. Vahidi, “A review of the main parameters influencing long-term performance and durability of PEM fuel cells,” *Journal of Power Sources*, vol. 180, no. 1, pp. 1–14, 2008.
 - [18] B. Pregelj, D. Vrečko, and V. Jovan, “Improving the operation of a fuel-cell power unit with supervision control - a simulation study,” *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 22, pp. 9419–9428, 2011.
 - [19] S. Silva, M. Severino, and M. de Oliveira, “A stand-alone hybrid photovoltaic, fuel cell and battery system: A case study of tocantins, brazil,” *Renewable Energy*, vol. 57, pp. 384–389, 2013.
 - [20] A. J. Verhage, J. F. Coolegem, M. J. Mulder, M. H. Yildirim, and F. A. de Bruijn, “30,000 h operation of a 70 kW stationary PEM fuel cell system using hydrogen from a chlorine factory,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 11, pp. 4714–4724, 2013.
 - [21] B. Pregelj, D. Vrečko, J. Petrovčič, V. Jovan, and G. Dolanc, “A model-based approach to battery selection for truck onboard fuel cell-based APU in an anti-idling application,” *Applied Energy*, vol. 137, pp. 64–76, 2015.
 - [22] X. Z. Yuan, H. Wang, J. C. Sun, and J. Zhang, “AC impedance technique in PEM fuel cell diagnosis – A review,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, pp. 4365–4380, 2007.
 - [23] J. Wu, X. Z. Yuan, H. Wang, M. Blanco, J. J. Martin, and J. Zhang, “Diagnostic tools in PEM fuel cell research: Part I Electrochemical techniques,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 6, pp. 1735–1746, 2008.
 - [24] R. Petrone, Z. Zheng, D. Hissel, M. Péra, C. Pianese, M. Sorrentino, M. Becherif, and N. Yousfi-Steiner, “A review on model-based diagnosis methodologies for PEM-FCs,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 17, pp. 7077–7091, 2013.
 - [25] Z. Zheng, R. Petrone, M. Péra, D. Hissel, M. Becherif, C. Pianese, N. Y. Steiner, and M. Sorrentino, “A review on non-model based diagnosis methodologies for PEM fuel cell stacks and systems,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 21, pp. 8914–8926, 2013.
 - [26] S. M. Rezaei Niya and M. Hoorfar, “Study of proton exchange membrane fuel cells using electrochemical impedance spectroscopy technique – A review,” *Journal of Power Sources*, vol. 240, pp. 281–293, 2013.
 - [27] X. Z. Yuan, C. Sons, H. Wang, and J. Zhang, *Electro-chemical Impedance Spectroscopy in PEM Fuel Cells, Fundamentals and Applications*. London: Springer, 2010.

- [28] A. Debenjak, P. Boškoski, B. Musizza, J. Petrovčič, and Đ. Juričić, "Fast measurement of proton exchange membrane fuel cell impedance based on pseudo-random binary sequence perturbation signals and continuous wavelet transform," *Journal of Power Sources*, vol. 254, pp. 112–118, 2014.
- [29] P. Boškoski and A. Debenjak, "Optimal selection of proton exchange membrane fuel cell condition monitoring thresholds," *Journal of Power Sources*, vol. 268, pp. 692–699, 2014.
- [30] T. L. Skvarenina, Ed., *The Power Electronics Handbook*, ser. Industrial Electronics. CRC Press, 2001.
- [31] W. A. Kester, *Analog Devices Practical Design Techniques For Power And Thermal Management*, Analog Devices technical reference books. Analog Devices, 1998.
- [32] *Modulated Constant off-Time Control Mechanism*, Application Note. Linfinity Microelectronics, 1998.
- [33] S. H. Chee, *A New, High Efficiency Monolithic Buck Converter*. Linear Technology, 1995.
- [34] D. Webb and S. Moeller-Holst, "Measuring individual cell voltages in fuel cell stacks," *Journal of Power Sources*, vol. 103, pp. 54–60, 2001.
- [35] D. Brunner, A. K. Prasad, S. G. Advani, and B. W. Peticolas, "A robust cell voltage monitoring system for analysis and diagnosis of fuel cell or battery systems," *Journal of Power Sources*, vol. 195, no. 24, pp. 8006–8012, 2010.
- [36] B. Dobkin and J. Williams, Eds., *Analog Circuit Design - A Tutorial Guide to Applications and Solutions*. Elsevier, 2011.
- [37] R. Isermann and M. Münchhof, *Identification of Dynamic Systems: An Introduction with Applications*, ser. Advanced textbooks in control and signal processing. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [38] S. Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way*, 3rd ed. Burlington, MA: Elsevier Academic Press, 2008.
- [39] I. Daubechies, *Ten Lectures on Wavelets*, ser. CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992.
- [40] E. O. Doebelin, *System Modeling and Response*. John Wiley & Sons Inc, 1980.
- [41] P. O. Amblard, M. Gaeta, and J. L. Lacoume, "Statistics for complex variables and signals - part i: Variables," *Signal Processing*, vol. 53, pp. 1–13, 1996.
- [42] N. Goodman, "Statistical analysis based on a certain multivariate complex gaussian distribution," *The Annals of mathematical statistics*, vol. 34, no. 1, pp. 152–177, 1963.
- [43] E. Ollila, "On the circularity of a complex random variable," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 15, pp. 841–844, 2008.
- [44] A. Khurshid, Z. Al-Hemyari, and S. Kamal, "On complex random variables," *Pakistan Journal of Statistics and Operation Research*, vol. 8, no. 3, pp. 645–654, 2012.
- [45] R. J. Baxley, B. T. Walkenhorst, and G. Acosta-Marum, "Complex gaussian ratio distribution with applications for error rate calculation in fading channels with imperfect CSI," in *IEEE GLOBECOM 2010*, 2010.
- [46] M. K. Simon, *Probability Distributions Involving Gaussian Random Variables*. New York: Springer Science, 2006.
- [47] E. Bechhoefer and A. Bernhard, "A generalized process for optimal threshold setting in HUMS," in *IEEE Aerospace Conference*, 2007.
- [48] N. Fouquet, C. Doulet, C. Nouillant, G. Dauphin-Tanguy, and B. Ould-Bouamama, "Model based PEM fuel cell state-of-health monitoring via AC impedance measurements," *Journal of Power Sources*, vol. 159, pp. 905–913, 2006.
- [49] J. M. Le Canut, R. M. Abouatallah, and D. A. Harrington, "Detection of membrane drying, fuel cell flooding, and anode catalyst poisoning on PEMFC stack by electrochemical impedance spectroscopy," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 153, pp. A857–A864, 2006.
- [50] M. Rubio, A. Urquia, and S. Dormido, "Diagnosis of performance degradation phenomena in PEM fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 7, pp. 2586–2590, 2010.
- [51] A. Debenjak, M. Gašperin, B. Pregelj, M. Atanasijević-Kunc, J. Petrovčič and V. Jovan, "Detection of flooding and drying inside a PEM fuel cell stack," *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, vol. 59, no. 1, pp. 56–64, 2013.
- [52] J. Kim, I. Lee, Y. Tak, and B. Cho, "Impedance-based diagnosis of polymer electrolyte membrane fuel cell failures associated with a low frequency ripple current," *Renewable Energy*, vol. 51, pp. 302–309, 2013.
- [53] S. Tant, S. Rosini, P. X. Thivel, F. Druart, A. Rakotondrainibe, T. Geneston, and Y. Bultel, "An algorithm for diagnosis of proton exchange membrane fuel cells by electrochemical impedance spectroscopy," *Electrochimica Acta*, vol. 135, pp. 368–379, 2014.
- [54] M. Gašperin, P. Boškoski, A. Debenjak, and J. Petrovčič, "Signal processing and stochastic filtering for EIS based PHM of fuel cell systems," *Fuel Cells*, vol. 14, no. 3, pp. 457–465, 2014.
- [55] G. Dotelli, R. Ferrero, P. Stampino, S. Latorrata, and S. Toscani, "Diagnosis of PEM fuel cell drying and flooding based on power converter ripple," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 63, no. 10, pp. 2341–2348, 2014.