

Diagnostični modul za gorivne celice s protonsko prevodno membrano

Andrej DEBENJAK, Bojan MUSIZZA, Matej GAŠPERIN, Janko PETROVČIČ

Izvleček: Zanesljivost delovanja gorivnih celic s protonsko prevodno membrano (PEM) je tesno povezana z napakami, ki se med delovanjem pojavljajo znotraj celic. V tem članku je predstavljen diagnostični modul FCVM 2404, ki omogoča izvajanje diagnostičnih meritev za odkrivanje napak v gorivnih celicah PEM znotraj večjega sklada serijsko vezanih celic. Pri snovanju modula so bile uporabljene cenovno učinkovite rešitve merjenja napetosti vseh gorivnih celic sklada. Poleg osnovnega merjenja napetosti celic je modul zasnovan tako, da omogoča izvedbo merilnih postopkov elektrokemijske impedančne spektroskopije (EIS), na podlagi katere je mogoče med delovanjem diagnosticirati napake, povezane z neustrezno vlažnostjo. Poleg diagnostičnega modula je v članku predstavljen tudi postopek obdelave signalov in izračuna impedance, ki sta bila uporabljena pri diagnosticiranju napak na realnem sistemu ob uporabi modula in metode EIS. Pridobljeni diagnostični rezultati potrjujejo, da modul FCVM 2404 omogoča opravljanje dovolj natančnih meritev, ki jih zahteva metoda EIS. Poleg tega pa tudi potrjujejo, da je diagnosticiranje prekomernega izsuševanja membran PEM in poplavljanja gorivnih celic izvedljivo, pri čemer meritve kažejo na to, da je izsuševanje nekoliko težje zaznati. Modul skupaj z diagnostičnim postopkom predstavlja pomemben gradnik pri snovanju zanesljivih gorivnih celic PEM prihodnosti.

Ključne besede: gorivne celice PEM, diagnostika napak, diagnostični modul, elektrokemijska impedančna spektroskopija

1 Uvod

Gorivne celice so elektrokemične naprave, ki kemično vezano energijo goriva neposredno (brez kakršnihkoli gibajočih se delov) pretvarjajo v električno energijo z visokim izkoristkom, ki običajno dosega vrednosti od 45 do 60 %. Ker gorivne celice pri svojem delovanju ne proizvajajo nikakršnih okolju škodljivih snovi, predstavljajo pomembno »zeleno« alternativno današnjim načinom zagotavljanja energije v aplikacijah, kot so prevozna sredstva, delovni stroji, generatorji električne energije na odročnih krajih in zasilna ter

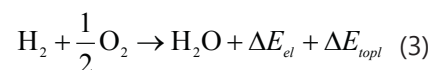
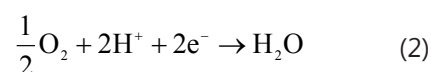
Andrej Debenjak, univ. dipl. inž., dr. Bojan Musizza, univ. dipl. inž., dr. Matej Gašperin, univ. dipl. inž.; vsi Institut "Jožef Stefan"; dr. Janko Petrovčič, univ. dipl. inž., Institut "Jožef Stefan" in Center odličnosti nizkoogljicne tehnologije

brezprekinitvena napajanja. Poleg teh standardnih primerov uporabe pa se pojavljajo tudi nove rešitve. Ena takšnih je na primer sistem pomožnega napajanja na osnovi gorivnih celic, ki zagotavlja električno energijo in toploto, ki jo potrebuje posadka kamiona v času, ko je parkirana na počivališču [1].

Med različnimi vrstami gorivnih celic predstavljajo gorivne celice s protonsko prevodno membrano (gorivne celice PEM) najprimernejšo alternativo današnjim motorjem z notranjim zgorevanjem. Prednosti gorivnih celic PEM v primerjavi z ostalimi tipi so nizke temperature obratovanja, tihost delovanja, kratki zagonski in ustavitveni časi ter visoke specifične gostote moči.

Bistven del gorivne celice PEM je membrana PEM, ki mora imeti dve pomembni lastnosti: protonsko prevodnost za vodikove ione (protone) in električno izolativnost. Za takšno

delovanje mora biti membrana ustrezno navlažena [2]. Elektrokemične reakcije, ki potekajo na anodi (oksidacija vodika) in katodi (redukcija kisika) gorivne celice PEM, opisujeta enačbi (1) in (2). Enačba (3) pa opisuje celostno redoks elektrokemijsko reakcijo, ki nakazuje, da pri poteku reakcije poleg vode nastajata tudi električna in toplotna energija.



Kljub številnim dobrim lastnostim in prednostim gorivnih celic PEM se le-te v aplikacijah vsakodnevne uporabe še vedno ne uporabljajo tako množično, kot bi pričakovali. Tehnologija gorivnih celic PEM se namreč

poleg visoke proizvodne cene še vedno sooča s težavami, povezanimi z zagotavljanjem zanesljivosti delovanja in vzdržljivosti [3]. Priložnosti za okvare sistemov je nekaj tudi med okvarami, ki se lahko zgodijo znotraj posameznih celic med delovanjem. Pričakujemo lahko okvare, kot so:

- pomanjkanje reagenta (osiromašenost plinov pri končnih celicah),
- lokalno uničenje membrane PEM (pregretje, poškodbe zaradi zmrzovanja, puščanje membran),
- električni kratki stik,
- lokalno preveliko povečanje temperature (vroče točke zaradi koncentracije električnega toka),
- izsušitev membrane PEM zaradi preveč intenzivnega odvajanja nastale vode (preveliko dovajanje katodnega zraka) in
- poplavljanje plinsko difuzne plasti in plinskih kanalčkov za dovod reagentov zaradi neučinkovitega odvajanja vode.

Da bi lahko povečali zanesljivost delovanja gorivnih celic PEM in s tem njihovo zanimivost za uporabo v aplikacijah vsakodnevene uporabe, je torej ključnega pomena, da diagnostični sistem vse naštetih napake in okvare med delovanjem čim prej avtomatsko identificira, odpravi težave v regulaciji in poskrbi za nadaljnje nemoteno delovanje gorivnih celic, spremembo načina vodenja ali alarmiranje uporabnika.

Z ozirom na fleksibilnost, ki jo omogočajo sodobna elektronska vezja, je najprimernejša pot odkrivanja naštetih napak preko obdelave in analize tokovnih in napetostnih signalov gorivne celice. Večina problemov pri obratovanju se odraža v bolj ali manj znižani napetosti celice, zato je odkrivanje in diagnosticiranje vrste napake le na podlagi merjenja napetosti posameznih celic v večini primerov neučinkovito – odkrivamo lahko

le resnejše okvare, kot sta raztrgana membrana ali električni kratki stik. Tako diagnostiko lahko uporabimo le za zaznavanje kritičnih okvar in varnostno zaustavitev sistema. Ne moremo pa je uporabljati za odkrivanje napak, ki sicer ne vodijo v takojšnje uničenje gorivnih celic, vseeno pa negativno vplivajo na kvaliteto delovanja. Takšna dva problema sta izsuševanje membran PEM in poplavljanje celic.

Membrana PEM mora biti primerno navlažena, da omogoča protonsko prevodnost. Za optimalno delovanje bi bilo zato potrebno spremljati vlažnost membran in z regulacijskim sistemom poskrbeti, da je ta vedno znotraj optimalnih vrednosti. Ker pa neposredno merjenje vlažnosti membrane ni izvedljivo, se za ocenjevanje stanja v celicah (ali je membrana preveč izsušena ali pa je prišlo do poplavljanja) uporablja zahtevnejša diagnostika, ki temelji na obdelavi signalov toka in napetosti celic.

Izvajanje diagnostike na gorivnih celicah PEM zahteva ustrezne merilne sklope, ki morajo biti v komercialnih aplikacijah robustni in cenovno dosegljivi. V tem prispevku je predstavljen diagnostični modul za

gorivne celice PEM FCVM 2404, ki omogoča izvajanje meritev, potrebnih za izvedbo diagnostičnih metod na osnovi elektrokemijske impedančne spektroskopije (EIS). Poleg osnovnega opisa modula prispevek predstavlja tudi primer izvedenih meritev na realnem sistemu z gorivnimi celicami PEM.

■ 2 Diagnostični modul

V nasprotju s potrebami laboratorijskih eksperimentov, kjer je običajno potrebno meriti le karakteristike samostojne (posamezne) celice, je pri komercialno orientiranih aplikacijah z gorivnimi celicami PEM potrebna takšna merilna oprema, ki omogoča meritve napetosti vseh posameznih celic znotraj večjega sklada gorivnih celic. Sklad pa je tipično sestavljen iz nekaj deset gorivnih celic. Na trgu razpoložljiva namenska (laboratorijska) oprema za merjenje napetosti celic znotraj večjih skladov že omogoča takšne meritve, kljub temu pa uporabljene konstrukcijske rešitve in merilni koncepti zaradi previsoke cene niso primerni za uporabo v komercialnih aplikacijah [4]. Poleg tega so zahteve v zvezi z zanesljivostjo, velikostjo, težo in predvsem ceno v primeru komercialnih aplikacij veliko strožje. Da bi izpolnili te



Slika 1. Električno vezje diagnostičnega modula FCVM 2404, priklučeno na sklad 80 gorivnih celic PEM

zahteve, proizvajalci merilne opreme oziroma modulov za komercialne aplikacije uporabljajo konstrukcijske rešitve, pri katerih se ne meri napetosti posameznih celic, pač pa le skupne napetosti dveh ali več sosednjih celic, pa še to le z dokaj nizko razločljivostjo [5]. Takšen pristop je sicer cenovno zelo učinkovit v primeru, ko je potrebno zaznati večje napake oziroma okvare, popolnoma pa odpove, ko je potrebno pridobiti izčrpnjšo informacijo o trenutnem stanju sklada in vsake izmed njegovih gorivnih celic.

Pri razvoju diagnostičnega modula FCVM 2404 za gorivne celice PEM smo želeli odpraviti vse prej naštejte pomanjkljivosti trenutno na trgu dostopne merilne opreme. Razviti diagnostični modul, ki je prikazan na *sliki 1*, omogoča merjenje napetosti do 90 gorivnih celic in skupno napetost ter tok sklada. Poleg tega zmore tudi sočasno odčitavati izmenični del napetosti izbranih treh celic, na podlagi katerih je mogoče izračunati impedanco celic v območju do 300 Hz. V 30 korakih je tako mogoče izmeriti impedanco vseh gorivnih celic sklada. Na *sliki 1* je vidno tiskano vezje diagnostičnega modula, ki je postavljeno nad skladom 80 gorivnih celic. Njegovi električni priključni sponki sta vidni levo (pozitivna) in desno (negativna) od modula. Povezave od modula do posameznih gorivnih celic so izvedene s pomočjo treh ploskih tračnih kablov in množico vzmetnih kontaktov, ki so v neposrednem stiku z gorivnimi celicami. Na *sliki 1* so vidni le robovi celic sklada, kjer so izvedeni kontakti (spodnji rob slike).

Najzahtevnejši izziv pri merjenju napetosti posameznih celic znotraj večjega sklada je povezan z visokim sofaznim potencialom, ki nastane zaradi serijske vezave gorivnih celic v sklad. Na trgu dostopni skladi z gorivnimi celicami PEM so tipično sestavljeni iz 50 do 100 serijsko vezanih celic, kar pomeni, da znaša celotna napetost s tokom neobremenjenega sklada med 60 in 120 V. Tako visoka sofazna napetost pa omejuje uporabo integriranih vezij z multiplekserji, katerih najvišja dovoljena

delovna napetost ne sme prekoračiti 44 V. Da se izognemo tej omejitvi integriranih multiplekserjev, je vhodna stopnja diagnostičnega modula zasnovana na osnovi stolpne (totem-pole) vezave treh parov multiplekserjev. Vsak par izmed njih je nato povezan s posebnim diferencialnim ojačevalnikom (operacijski ojačevalnik s širokim območjem sofazne napetosti). Pari multiplekserjev so s stališča napetostnih razmer postavljeni drug nad drugim tako, da vsak par pokrije eno tretjino celotne napetosti sklada. Tako vsak posamezni multiplekser pokriva le 36 V napetosti. Konstrukcijska rešitev s pari multiplekserjev je uporabljena z namenom, da se razpolovi potrebno število multiplekserjev, diferencialnih ojačevalnikov in AD-pretvornikov ter tako zniža cena izvedbe. Elementi, ki dejansko »opravijo« s sofazno napetostjo, so posebni diferencialni ojačevalniki, ki izločijo sofazno komponento ter diferencialne signale pretvorijo v enopolne (single-ended), primerne za AD-pretvorbo.

Diagnostični modul lahko obratuje v enem izmed dveh različnih načinov. Prvi način – nadzorni način – omogoča sekvenčno spremljanje vseh napetosti celic znotraj sklada. Drugi način – diagnostični način – pa omogoča natančno merjenje sprememb v napetosti posamezne

celice sklada, in sicer v frekvenčnem razponu do 300 Hz.

2.1 Nadzorni način delovanja

V nadzornem načinu je mogoče spremljati absolutne vrednosti napetosti vseh posameznih celic znotraj sklada, sestavljenega iz do 90 celic. V tem načinu je razločljivost merjenja napetosti 0,8 mV, pri čemer se meritve osvežujejo na 400 ms. Poleg meritev napetosti posameznih celic diagnostični modul omogoča tudi meritve napetosti in toka celotnega sklada z razločljivostma 24 mV in 10 mA, pri čemer za merjenje toka uporabljamo tokovni pretvornik s Hallovim senzorjem.

Nadzorni način delovanja je primeren za osnovno spremljanje napetosti gorivnih celic, s pomočjo katerega lahko sklepamo na trenutno stanje sistema in odkrivamo večje okvare, ki lahko nastanejo med delovanjem (npr. nezadostna količina reagentov, uničena membrana, kratki stik,...). Za ta namen je mogoče zajete meritve prenesti na zunanjo napravo (npr. namizni računalnik, nadzorniški terminal ali regulator) preko CAN ali RS 485 vodila. Diagnostični modul lahko samostojno komunicira s standardnim industrijskim nadzornim terminalom in uporabniku omogoča, da poljubno



Slika 2. Prikaz napetostnega profila večjega sklada gorivnih celic PEM na HMI-terminalu

dostopa do podatkov o napetostih posameznih celic. Primer takšnega delovanja je prikazan na *sliki 2*, kjer lahko na HMI-terminalu opazujemo trenutni napetostni profil celotnega sklada. S slike je razvidno, da celice znotraj sklada nimajo enakih napetosti, ampak se med seboj razlikujejo. Do variacij med drugim prihaja zaradi konstrukcijskih toleranc, neenakomernega temperaturnega profila sklada, osiromašenosti goriva v posameznih delih sklada in zaradi okvar ali napak. Spremljanje takšnega napetostnega profila sklada nam omogoča odkrivanje in diagnosticiranje večjih napak gorivnih celic.

2.2 Diagnostični način delovanja

V drugem diagnostičnem načinu diagnostični modul omogoča izvajanje meritev, ki so potrebne za zahtevnejše diagnostične metode. Te omogočajo odkrivanje napak in okvar, ki jih samo s spremljanjem napetosti ni mogoče odkriti. Diagnostični modul je namensko prilagojen za izvajanje meritev, ki jih zahteva metoda EIS. Diagnostika EIS temelji na meritvah hitrih sprememb napetosti in toka gorivne celice. Za ta namen sta potrebni visoka razločljivost in frekvenca vzorčenja napetosti in toka [6, 7]. Visoka razločljivost je potrebna, ker amplituda superponirane vzbujalne komponente, ki je ključna za izvedbo metode EIS, znaša le nekaj mV. Prav tako je tudi relativno visoka frekvenca vzorčenja potrebna za nekompromisno vzorčenje superponiranih izmeničnih komponent, katerih frekvenčni spekter sega preko nekaj 100 Hz.

V diagnostičnem načinu diagnostični modul doseže visoko razločljivost tako, da zajete vhodne signale dodatno analogno obdela še pred pretvorbo z AD-pretvornikom. Tako se od celotne napetosti celice najprej analogno odšteje enosmerna komponenta, preostali del pa ojači s faktorjem 10. Tako pripravljen signal nato AD-pretvornik pretvori v digitalno obliko z 12-bitno razločljivostjo.

V diagnostičnem načinu delovanja se meritve napetosti posamezne celice znotraj sklada izvajajo s frekven-

co vzorčenja 5 kHz. Zajem napetosti poteka sočasno na treh izbranih celicah, obenem pa modul meri še napetost in tok celotnega sklada. Razločljivost meritev napetosti celic v primeru diagnostičnega načina znaša 80 μ V, razločljivosti meritev napetosti in toka celotnega sklada pa sta enaki kot pri nadzornem načinu.

Zaradi velike količine podatkov v diagnostičnem načinu je podatke na zunanjo napravo moč prenašati le s pomočjo povezave CAN, ki se hkrati uporablja tudi za upravljanje diagnostičnega modula. Modul od nadzornega sistema sprejema ukaze o tem, v katerem načinu naj deluje ter na katerih celicah znotraj sklada naj izvaja meritve. V prihodnosti bo diagnostični modul FCVM 2404 poleg merilnih zmogljivosti ponujal tudi možnost lokalne obdelave podatkov in izvajanja diagnostičnih algoritmov, saj vsebuje zmogljiv mikrokontroler z jedrom ARM M3.

3 Diagnostične meritve

Diagnostični modul FCVM 2404 je v diagnostičnem smislu zasnovan predvsem za izvajanje diagnostike s pomočjo metode elektrokemijske impedančne spektroskopije.

3.1 Opis metode EIS in obdelave signalov

Osnovna hipoteza metode EIS je, da na podlagi meritev impedančne gorivne celice lahko sklepamo na to, kaj se znotraj celice dogaja: metoda naj bi omogočala oceno, ali celica normalno obratuje, je njena membrana preveč izsušena ali je celica poplavljenjena [6, 8]. Da lahko izmerimo impedanco celice, moramo celico ustrezno vzbujati ter pri tem posneti signal vzbujanja in njen odziv. Celice je potrebno v primeru diagnostike EIS vzbujati s primerним testnim tokovnim signalom, celica pa se na to vzbujanje odzove z ustreznim napetostnim odzivom. Zaradi preprostejše nadaljnje obdelave smo kot vzbujalne signale uporabljali sinusne signale, ki smo jih superponirali na odjemni enosmerni tok celice.

Ob predpostavki, da je sistem gorivne celice v okolici delovne točke linearen, se le-ta na sinusno vzbujanje odzove s sinusnim napetostnim odzivom. Sinusni vzbujevalni tokovni in odzivni napetostni signal lahko v časovnem prostoru zapišemo s pomočjo kompleksorjev:

$$I = I_0 e^{j\omega_0 t} \quad (4)$$

$$U = U_0 e^{j(\omega_0 t + \varphi)} \quad (5)$$

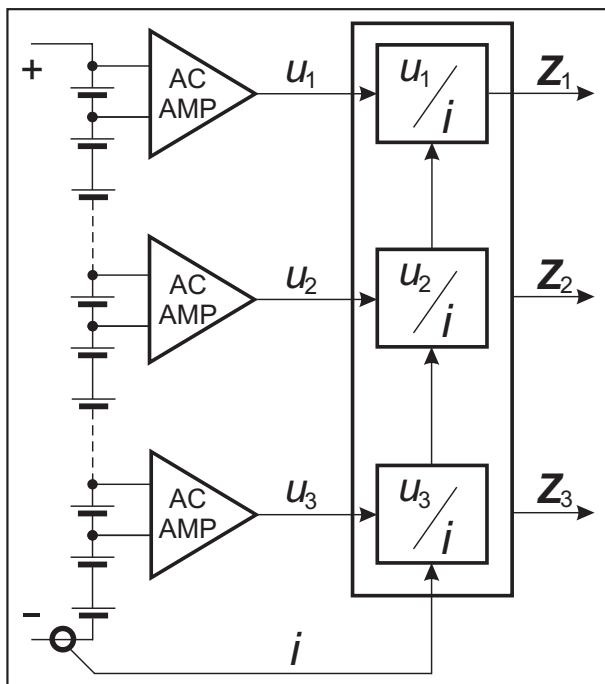
kjer je ω_0 krožna frekvenca vzbujevalnega signala ($\omega_0 = 2\pi f_0$), I_0 in U_0 sta amplitudi signalov in φ fazni zamik napetostnega odziva. Vrednost impedance Z gorivne celice pri vzbujeni krožni frekvenci ω_0 izračunamo kot razmerje po Ohmovem zakonu:

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{U_0 e^{j(\omega_0 t + \varphi)}}{I_0 e^{j\omega_0 t}} = Z_0 e^{j\varphi} \quad (6)$$

kjer je Z_0 amplituda impedance in φ fazni kot impedance gorivne celice pri izbrani krožni frekvenci ω_0 .

Realni napajalni sistem z gorivnimi celicami je med delovanjem podvržen še vplivom lastnih električnih podsistemov in električne obremenitve, kar v meritve vnaša nezaželenne frekvenčne komponente ter šum. Zaradi tega impedance ni mogoče izračunati neposredno z uporabo enačb (4) do (6), ampak je posamezne signale potrebno najprej ustrezno predhodno obdelati, nato pa s pomočjo Fourierove transformacije signale preslikati v frekvenčni prostor. V frekvenčnem prostoru je nato možno na preprost način izračunati vrednost kompleksne impedance gorivne celice. Glavni orodji pri tej signalni obdelavi sta filtriranje in hitra Fourierova transformacija (FFT). Postopek, ki smo ga uporabili za obdelavo signalov in izračun impedance, je sestavljen iz naslednjih korakov:

- odstranitev linearnih trendov iz časovnih potekov signalov,
- nizkopasovno filtriranje,
- oknjenje s Hammingovim oknom,
- izračun FFT-transformacij toka in napetosti ter



Slika 3. Konceptualna shema zajema signalov z diagnostičnim modulom in izračuna vrednosti impedance

- izračun impedance z medsebojnim kompleksnim deljenjem členov transformacij pri vzbujalni frekvenci.

Na *sliki 3* je prikazan koncept zajema signalov in izračuna impedance, ki smo ga izvedli z diagnostičnim modulom FCVM 2404. Na levem delu slike je prikazan niz gorivnih celic, ki so povezane v sklad. Meritve napetostnih odzivov opravljamo sočasno v skupinah po tri, kot je to opisano v drugem poglavju. Napetostnim odzivom celic diagnostični modul najprej ojači le izmenično komponento (na *sliki 3* so ojačevalniki, označeni z AC AMP), nato pa jih zajame s pomočjo AD-pretvornika. V končnem koraku na podlagi zajetih signalov napetosti in toka izračunamo trenutno vrednost impedance.

3.2 Predstavitev rezultatov

Diagnostični rezultati, ki jih predstavljamo v tem prispevku, so bili pridobljeni na večjem skladu, sestavljenem iz 80 gorivnih celic PEM (skupna električna moč sklada do 8 kW). Sklad smo povezali na elektronsko breme, ki nam je omogočilo natančno nastavljanje odjemnega toka in superponiranje vzbujalnega signala. Diagnostični modul smo

povezali na namizni računalnik, s pomočjo katerega smo upravljali modul in na katerega smo prenašali podatke meritev za nadaljnjo obdelavo. Modul FCVM 2404 trenutno še nima vgrajenih algoritmov obdelave signalov za analizo EIS in na njej temelječo diagnostiko.

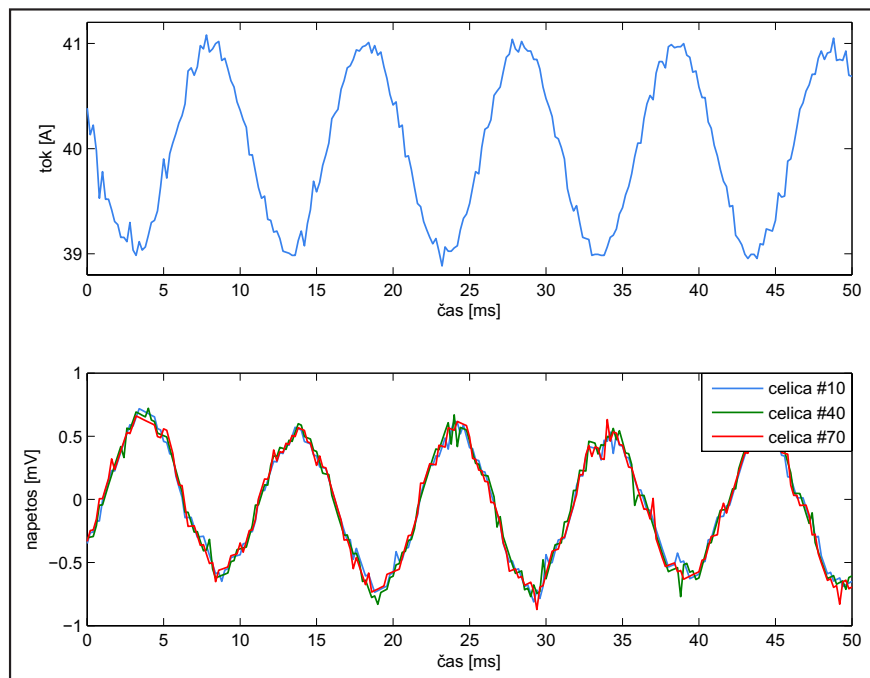
Med poskusom smo opravljali meritve na treh izbranih celicah znotraj sklada. Na podlagi predhodnih eksperimentov smo sklad vzbujali s sinusnimi signali frekvenc 10, 30, 100 in 300 Hz [9]. Vrednost

enosmerne komponente odjemnega toka je bila 40 A, pri čemer je bila amplituda superponirane sinusne komponente 1 A. Primer zajetih signalov je predstavljen na *sliki 4*, s katere je razvidno tudi, da je napetostni odziv celice v območju le nekaj mV. Z namenom, da izmerimo impedanco celic pri normalnih obratovalnih pogojih in pri nenormalnih pogojih povečane izsušeno-

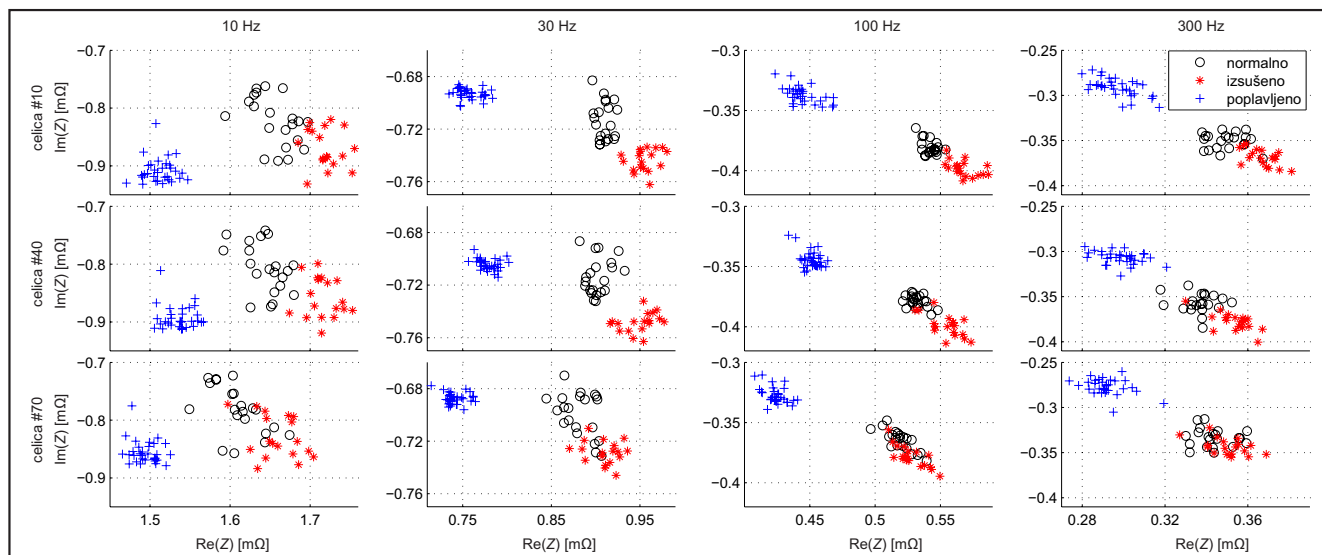
sti oziroma poplavljenosti, smo med poskusom kontrolirano spreminjali vlažnost vhodnega katodnega zraka. Izsuševanje smo dosegli tako, da smo celicam dovajali le popolnoma suh zrak. V nasprotnem primeru pa smo poplavljanje celic izzvali tako, da smo v sklad dovajali zelo vlažen zrak, ki smo ga pripravljali v ločenem generatorju vodne pare.

Rezultati izračuna impedanc in njihove odvisnosti od vlažnosti so predstavljeni na *sliki 5*. V vrsticah so predstavljeni rezultati posamezne celice, v stolpcih pa impedance vseh treh celic pri isti frekvenci vzbujanja. Posamezne barve in oblike točk ponazarjajo parametre, pri katerih je bila opravljena meritev: črni krogi ponazarjajo meritve pri normalno obratujočem skladu, rdeče zvezdice pri izsuševanju in modri križci pri poplavljanju.

Dobljeni rezultati potrjujejo dve pomembni hipotezi. Najprej lahko ugotovimo, da je diagnostični modul zmožen izvajati meritve, ki jih zahteva metoda EIS, in s tem izpolnjuje zastavljene zahteve. S *slike 5* pa je vidno, da je na podlagi vrednosti impedance mogoče diagnosticirati oziroma oceniti stopnjo poplavljanja ali izsuševanja celic. S *slike* je razvidno, da je pri frekvenci



Slika 4. Meritve toka celotnega sklada in sprememb v napetosti treh gorivnih celic znotraj sklada



Slika 5. Impedance treh celic pri frekvencah vzbujalnega signala 10, 30, 100 in 300 Hz v primeru normalno obratujočega sklada (črni krogi), v primeru izsuševanja (rdeče zvezdice) in v primeru poplavljanja (modri križci)

10 Hz za diagnostiko pomemben le realni del impedance – zmanjšana vrednost realnega dela nakazuje na poplavljanje in povečana na izsuševanje. Po drugi strani pa so pri ostalih treh testnih frekvencah informativne tako spremembe vrednosti realnega kot tudi imaginarnega dela impedance. Tako zmanjševanje vrednosti realnega in hkratno povečevanje imaginarnega dela impedance nakazuje na poplavljanje, ravno nasprotno dogajanje pa na izsuševanje.

Potrebno pa je omeniti, da je diagnosticiranje izsuševanja veliko zahtevnejše od diagnosticiranja poplavljanja, saj ima očitno izsuševanje precej manjši vpliv na impedanco od poplavljanja. To je razvidno iz prekrivanja rezultatov v primerih normalno delujočih celic in izsušenih celic. Žal pa je diagnosticiranje izsuševanja s stališča zaščite celic pred mehanskimi okvarami veliko pomembnejše, saj v nasprotju od poplavljanja izsuševanje lahko vodi tudi v okvaro membrane PEM.

■ 4 Zaključek

Za izboljšanje zanesljivosti delovanja gorivnih celic PEM, ki je ena izmed pomembnih in potrebnih zahtev pri uvajanju tehnologije PEM v komercialne aplikacije, so rešitve na področju sprotnega diagnosticiranja in odpravljanja napak zelo do-

brodošle. Diagnostični modul FCVM 2404 je zasnovan tako, da omogoča več načinov diagnostičnih meritev. Pri načrtovanju modula je bila poleg funkcionalnih zahtev zelo pomembna tudi njegova cenovna učinkovitost.

Diagnostični modul trenutno omogoča izvajanje meritev toka in napetosti vseh celic ter prenos rezultatov meritev na osebni računalnik. Njegov mikrokontroler pa bo v prihodnosti omogočal tudi lokalno spremljanje impedanc celic in izvajanja diagnostičnih algoritmov. Te funkcionalnosti bodo implementirane v programski kodi modula.

Na podlagi laboratorijskih meritev smo pokazali, da diagnostični modul omogoča opravljanje meritev, ki jih zahteva metoda EIS. Pri eksperimentiranju smo se posvetili diagnosticiranju izsuševanja in poplavljanja, ki sta s stališča zagotavljanja zanesljivosti delovanja sklada gorivnih celic zelo pomembna parametra. Ugotovili smo, da je s pomočjo diagnostičnega modula FCVM 2404 in metode EIS mogoče diagnosticirati tako poplavljanje kot tudi izsuševanje. Diagnostika izsuševanja je nekoliko zahtevnejša in manj natančnejša od diagnostike poplavljanja.

Pri nadaljnjem delu želimo razviti odločitveni algoritem, ki bo poskrbel za ustrezno odločitev v mejnih

primerih. Le-tega bo potrebno skupaj z obdelavo signalov in izračunom impedance implementirati v programsko opremo diagnostičnega modula. Pri razvoju algoritmov bomo poskušali zasnovati tudi takšne algoritme, ki bi lahko merili impedanco celic le na podlagi »naravnih« vzbujalnih signalov, ki nastajajo pri delovnih obremenitvah sklada.

Viri

- [1] Fuel Cell Based On-board Power Generation, <http://www.fch-ju.eu/project/fuel-cell-based-board-power-generation>.
- [2] Barbir, F.: PEM Fuel Cells: Theory and Practice, Elsevier, 2005.
- [3] Wu, J., Yuan, X. Z., Martin, J. J., Wang, H., Zhang, J., Shen, J.: A review of PEM fuel cell durability: Degradation mechanisms and mitigation strategies, *Journal of Power Sources*, 184(1), str. 104–119, 2008.
- [4] Wasterlain, S., Candusso, D., Harel, F., Hissel, D., François, X., Development of new test instruments and protocols for the diagnostic of fuel cell stacks, *Journal of Power Sources*, 196(12), str. 5325–5333, 2011.
- [5] Vale, M., Epp, B., Masse, B., Joos, N. I.: Fuel Cell Voltage Monitoring System and Associated Electrical Connectors, US Patent, no. US2005/0215124, 2005.

- [6] Yuan, X., Wang, H., Sun, J., Zhang, J., AC impedance technique in PEM fuel cell diagnosis – A review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(17), str. 4365–4380, 2007.
- [7] Yuan, X. Z., Song, C., Wang, H., Zhang, J.: Electrochemical Impedance Spectroscopy in PEM Fuel Cells, *Fundamentals and Applications*, Springer, London, 2010.
- [8] Le Canut, J. M., Abouatallah, R. M., Harrington, D. A.: Detection of Membrane Drying, Fuel Cell Flooding, and Anode Catalyst Poisoning on PEMFC Stacks by EIS, *Journal of The Electrochemical Society*, 153(5), str. A857–A864, 2006.
- [9] Debenjak, A., Gašperin, M., Pregelj, B., Atanasijević-Kunc, M., Petrovčič, J., Jovan, V.: Detection of flooding and drying inside a PEM fuel cell stack, *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 59(1), str. 56–64, 2013.

PEM fuel cell diagnostic module

Abstract: The reliability of operation of fuel cells with proton exchange membrane (PEM) is closely related to faults that can occur inside the cell during operation. This paper describes a FCVM 2404 diagnostics module which makes possible the diagnostics measurements required for fault detection in the PEM fuel cells inside a larger stack of cells connected in series. The diagnostic module was designed around cost-effective solutions for measurement of voltage of all the fuel cells of the stack. Besides basic voltage measurement the module also provides the means for performing measurements that are used for diagnostics based on electrochemical impedance spectroscopy (EIS), which is an effective tool for diagnostics of water management faults. In addition, the paper outlines the proposed procedure of signal processing and computation of the impedance, which has been used for fault diagnostics on real PEM fuel cell system where the data was acquired with the diagnostics module. The results confirm that the FCVM 2404 diagnostics module provides enough accurate measurements required by the EIS method. Furthermore, the results also confirm the feasibility to diagnose the membrane drying and fuel cell flooding faults with the developed module and proposed procedure. However, an indication that the diagnostics of drying is more demanding in comparison to the diagnostics of flooding was observed. The diagnostics module along with diagnostics procedure presents an important element of more reliable PEM fuel cells of the future.

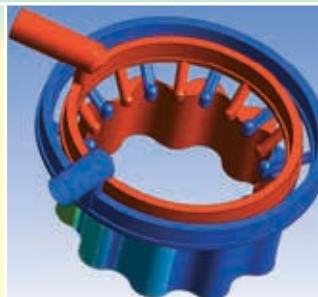
Key words: PEM fuel cells, fault diagnostics, diagnostic module, electrochemical impedance spectroscopy

LABORATORIJ ZA POGONSKO-KRMILNO HIDRAVLIKO

Smo laboratorij z dolgoletno tradicijo na področju pogonsko-krmilne hidravlike. Ukvarjamo se z oljno in tudi ekološko prijazno vodno PK hidravliko, pri tem pa uporabljamo sofisticirano in sodobno merilno in programsko opremo. To se odraža v večjem številu uspešno zaključenih projektov in sodelovanju z uspešnimi slovenskimi podjetji.

Obrnite se na nas, če potrebujete:

- razvoj in optimiranje hidravličnih sestavin in naprav
- izdelavo hidravličnih naprav
- izboljšave in popravilo hidravličnih naprav in strojev
- izdelavo sodobnega krmilja za hidravlične stroje
- izobraževanje na področju hidravlike
- ekološke hidravlične naprave za pitno vodo
- izdelavo ali izris hidravličnih shem
- itd.



Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo
Aškerčeva 6
1000 Ljubljana
T: 01/4771115, 01/4771411
E: lpkh@fs.uni-lj.si
<http://lab.fs.uni-lj.si/lft/>

