

Grzegorz GRZECZKA¹
Piotr SZYMAK²

ODPORNOŚĆ SYSTEMU ZASILANIA ELEKTRYCZNEGO OPARTEGO NA OGNIWIE PALIWOWYM PEM NA DYNAMICZNE ZMIANY OBCIĄŻENIA

Coraz częściej w różnego rodzaju środkach transportu stosuje się napęd elektryczny oparty o niekonwencjonalne źródła energii. Jednym z przykładów takich źródeł jest ogniwo paliwowe typu PEM. Jako przeciwwagę dla bezsprzecznych zalet tego typu ogniw często podaje się, że nie są one zdolne przyjmować dużych zmian obciążenia.

W niniejszym artykule przedstawiono analizę reakcji systemu zasilania elektrycznego opartego na ogniwie paliwowym typu PEM o mocy 6 kW, na dynamiczne zmiany obciążenia w zakresie jego mocy znamionowej. Zaprezentowano proces modelowania podsystemu zasilania gazami reakcyjnymi oraz zawarto wybrane wyniki badań eksperymentalnych zaprojektowanego i zbudowanego systemu zasilania.

SYSTEM OF ELECTRIC SUPPLY BASED ON PEM FUEL CELL TO WORK WITHOUT AIR ACCESS

More often, electric drives based on unconventional sources of energy are used in different means of transport. One of the examples is PEM fuel cell. It is often given as the contrary to the advantages of the cells that they are not capable to respond on large changes of a load.

In the paper, an analysis of reaction of an electric supply system based on PEM fuel cell with power 6kW on dynamic changes of a load was presented. A process of modeling supply subsystem of reactant gasses and selected results of experiments based on designed and built supply system was inserted.

1. WSTĘP

Od dłuższego czasu poszukiwane i badane są alternatywne do paliw kopalnych źródła energii, w szczególności takie, które nie wpływają negatywnie na środowisko naturalne. Dlatego też dużym powodzeniem w zasilaniu obiektów stacjonarnych oraz urządzeń mobilnych cieszą się niekonwencjonalne źródła energii. Jednym z urządzeń stanowiących przełom w dziedzinie niekonwencjonalnych źródeł energii jest ogniwo paliwowe, uzyskujące energię elektryczną i ciepło bezpośrednio z zachodzącej w nim reakcji

¹ Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny; 81-103 Gdynia; ul. Śmidowicza 69.
tel: + 48 58 626-29-94, Fax: + 48 58 626-25-67, e-mail: g.grzeczka@amw.gdynia.pl

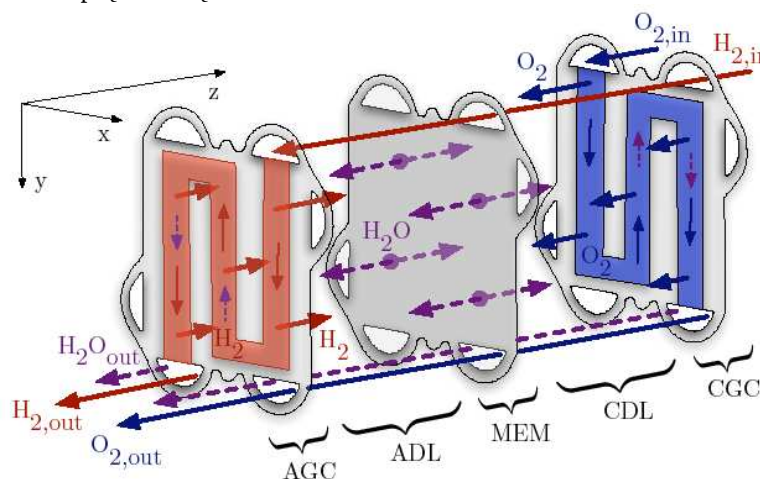
² Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny; 81-103 Gdynia; ul. Śmidowicza 69.
tel: + 48 58 626-28-81, Fax: + 48 58 626-25-67, e-mail: p.szymak@amw.gdynia.pl

chemicznej wodoru i tlenu [4]. Ogniwa charakteryzują się dużą czystością, sprawnością i gęstością energetyczną. Wodór, będący paliwem dla ogniw paliwowych, jest najpowszechniej występującym pierwiastkiem we Wszechświecie. Można go uzyskiwać z wody wykorzystując alternatywne źródła energii takie, jak energia słoneczna, czy energia wiatru oraz z szeregu innych substancji obecnych w przyrodzie, (np. bakterie z rodzaju *clostridium* uzyskują wodór z odpadów biologicznych).

Istnieje kilka różnych typów ogniw paliwowych. Jednym z najczęściej stosowanych dla mobilnych platform jest niskotemperaturowe ogniwo typu PEM (ang. *Proton Exchange Membrane*), pracujące w zakresie temperatur od 50°C do 90°C. Ta technologia jest szczególnie przydatna dla mobilnych zastosowań odkąd oferuje największą grawimetryczność i wolumetryczność elektryczną spośród wszystkich ogniw paliwowych (więcej niż 700W/kg i 1100W/dm³) i działa w temp. do 80°C. Jako podstawową wadę tego typu ogniw podawano w literaturze brak możliwości przyjmowania dynamicznych zmian obciążenia co powoduje konieczność stosowania buforu w postaci akumulatorów. Z analizy zasady działania stosu PEMFC wynika, że ta właściwość zależy przede wszystkim od możliwości systemów zasilania wodorem i tlenem. W kolejnym rozdziale przedstawiona zostanie przyjęta logika modelowania toru zasilania stosu wodorem i tlenem. Następnie przedstawione zostaną wybrane wyniki badań eksperymentalnych zaprojektowanego i zbudowanego systemu zasilania.

2. MODEL PRZEPŁYWU W PRZEDZIALE KATODY I ANODY

Całkowite napięcie ogniwa zarówno nadnapięcie aktywacji η_{act} jak i nadnapięcie koncentracji η_{conc} zależą od koncentracji substratów reakcji na warstwie katalizatora, dlatego też, określenie tych parametrów jest istotne. Ponadto powinny być znane natężenia przepływów i masy molowe gazów reakcyjnych dla zadanych parametrów roboczych, w szczególności prądu obciążenia.



Rys. 1. Schematyczna reprezentacja transportu tlenu i wodoru wewnątrz powtarzających się elementów ogniwa PEM [8]

Transport konwekcyjny gazu wewnątrz kanału gazowego w płaszczyźnie xy (zobacz rys. 1) jest kierowany przez gradient ciśnienia wywołanego przez elementy pomocnicze ogniwa paliwowego (np. sprężarkę powietrza, czy też pompę wodoru). Podstawowe reakcje syntezy ogniwa paliwowego mogą być odniesione do wynikowego prądu ogniwa paliwowego poprzez prawo Faradaya [3]:

$$\dot{N}_i = \frac{I_{el}}{n_i F} \quad (1.2)$$

gdzie: n_i – reprezentuje liczbę moli elektronów biorących udział w reakcji na mol gazu

reakcyjnego i ($n_{O_2} = 4$, $n_{H_2} = 2$, $n_{H_2O} = 2$),

$\dot{N}_i$ – molowe natężenie przepływu substancji i w [mol/s].

Równanie 1.12 reprezentuje minimalną szybkość dostarczania gazów reakcyjnych, które są wymagane do produkcji odpowiedniej wartości prądu elektrycznego. Dla ułatwienia wyrażenia rzeczywistej szybkości dostarczania gazów reakcyjnych wprowadza się bezwymiarowy współczynnik λ , nazywany stechiometrycznym natężeniem przepływu. Współczynnik ten jest definiowany osobno dla przedziału anody oraz katody i uzależnia dostarczanie gazów reakcyjnych do prądu dostarczonego przez ogniwo paliwowe:

$$\lambda = \frac{\text{rzeczywiste dostarczanie gazów reakcyjnych}}{\text{wymagane dostarczanie gazów reakcyjnych}} \quad (1.3)$$

Podstawiając do równania 1.12, można zapisać jako:

$$\lambda_i = \frac{\dot{N}_{i,actual} n_i F}{I_{el}} = \frac{\dot{m}_i n_i F}{M_i I_{el}} \quad (1.4)$$

gdzie: $\dot{N}_{i,actual}$ – rzeczywiste molowe natężenie przepływu substancji i w [mol/s],

$\dot{m}_i$ – masowe natężenie przepływu substancji i [kg/s],

M_i – masa molowa substancji i [kg/mol].

Przy założeniu, że:

- 1) gazy zachowują prawo idealnego gazu,
- 2) temperatura gazów reakcyjnych w przedziale katody i anody jest równa temperaturze stosu,
- 3) właściwości przepływów (temperatura, ciśnienie i wilgotność) wychodzących z katody i anody są takie same jak przepływów wchodzących,
- 4) w momencie osiągnięcia przez gaz wilgotności względnej 100% para wodna w nim zawarta skrapla się do postaci płynnej, a w momencie spadku wilgotności względnej poniżej 100% woda paruje lub gromadzi się w przedziale katody i/lub anody, na podstawie zasady zachowania masy można zapisać dla:

a) katody:

$$\frac{dm_{O_2}}{dt} = \dot{m}_{O_2,in} - \dot{m}_{O_2,out} - \dot{m}_{O_2,react} \quad (1.5)$$

$$\frac{dm_{H_2O,c}}{dt} = \dot{m}_{H_2O,c,in} - \dot{m}_{H_2O,c,out} + \dot{m}_{H_2O,c,gen} + \dot{m}_{H_2O,MEM} \quad (1.6)$$

gdzie poszczególne indeksy oznaczają:

in – masy wchodzące do katody,

out – masy wychodzące z katody,

react – masy biorące udział w reakcji,

gen – masy wytworzone w katodzie,

MEM – masy wytworzone w membranie.

Natężenie zużycia tlenu i produkcji wody można obliczyć odpowiednio z danych zależności [8]:

$$\dot{m}_{O_2,react} = M_{O_2} \times \frac{I_{el}}{4F} \quad (1.7)$$

$$\dot{m}_{H_2O,c,gen} = M_{H_2O} \times \frac{I_{el}}{2F} \quad (1.8)$$

gdzie: M_{O_2} – masa molowa tlenu w [kg/mol],

M_{H_2O} – masa molowa wody w [kg/mol].

Natomiast wlotowe i wylotowe masowe natężenia przepływów tlenu i pary wodnej oblicza się z wlotowych i wylotowych warunków przepływu katody wykorzystując właściwości termodynamiczne [15] [16], co pokazane zostanie w dalszej części sprawozdania.

b) anody:

$$\frac{dm_{H_2}}{dt} = \dot{m}_{H_2,in} - \dot{m}_{H_2,out} - \dot{m}_{H_2,react} \quad (1.9)$$

$$\frac{dm_{H_2O,a}}{dt} = \dot{m}_{H_2O,a,in} - \dot{m}_{H_2O,a,out} - \dot{m}_{H_2O,MEM} \quad (1.10)$$

Natężenie zużycia wodoru w przedziale anody można obliczyć z zależności [8]:

$$\dot{m}_{H_2,react} = M_{H_2} \times \frac{I_{el}}{2F} \quad (1.11)$$

gdzie: M_{H_2} – masa molowa wodoru w [kg/mol].

Natomiast wlotowe i wylotowe masowe natężenia przepływów wodoru i pary wodnej oblicza się z wlotowych i wylotowych warunków przepływu anody wykorzystując właściwości termodynamiczne [16].

W tym celu wykorzystuje się zależności na masowe natężenie przepływu między dwoma objętościami z wykorzystaniem równania dyszy. Natężenie to przechodzące przez dyszę jest funkcją ciśnienia wyższego p_u i niższego p_d , a charakterystyka przepływu jest dzielona na dwa obszary w zależności od krytycznego stosunku ciśnień r_{crit} :

$$r_{crit} = \left(\frac{p_d}{p_u} \right)_{crit} = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (1.12)$$

gdzie: κ – stosunek pojemności ciepła właściwego gazu przemiany realizowanej przy stałym ciśnieniu i ciepła właściwego gazu przemiany realizowanej przy stałej objętości. Dla normalnego przepływu (tj. gdy spadek ciśnienia mniejszy od krytycznego stosunku ciśnień) masowe natężenie przepływu oblicza się z równania [16]:

$$\dot{m}_i = \frac{C_D A_T p_u}{\sqrt{RT_u}} \cdot \sqrt{\kappa pr} \cdot \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa - 1} \left[1 - (pr)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]} \quad (1.13)$$

Natomiast dla przepływu krytycznego masowe natężenie przepływu oblicza się na podstawie zależności [16]:

$$\dot{m}_i = \frac{C_D A_T p_u}{\sqrt{RT_u}} \sqrt{\kappa} \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{2(\kappa - 1)}} \quad (1.14)$$

gdzie: C_D – współczynnik wypływu dyszy,
 A_T – otwarta powierzchnia dyszy w $[m^2]$,
 T_u – temperatura gazu o wyższym ciśnieniu.

Następnie, mając dany przepływ całkowity wykorzystuje się współczynnik wilgotności do oddzielenia natężenia przepływu pary wodnej od natężenia przepływu suchego substratu reakcji tlenu lub wodoru. W dalszej części opracowania przedstawione zostaną odpowiednie zależności dla katody, przy czym takie same będą obowiązywały dla anody.

Przy założeniu, że przepływający gaz zachowuje się jak gaz idealny, ciśnienie parcjale pary wodnej może być uzyskane z zależności na wilgotność względną, czyli

$p_{H_2O} = \psi \cdot p_{sat}(T)$, gdzie ψ – wilgotność względna, $p_{sat}(T)$ – ciśnienie nasycenia pary wodnej. Ponieważ nawilżony gaz jest mieszaniną suchego gazu i pary wodnej, to ciśnienie parcjale suchego gazu, np. tlenu $p_{O_2, dry}$ jest różnicą pomiędzy całkowitym ciśnieniem p a ciśnieniem pary wodnej p_{H_2O} . Stąd zawartość wilgotności H_r można zapisać jako [16]:

$$H_r = \frac{M_{H_2O}}{M_{O_2}} \frac{p_{H_2O}}{p_{O_2, dry}} \quad (1.15)$$

Natomiast natężenia przepływu suchego tlenu i pary wodnej może być obliczone z zależności [16]:

$$\dot{m}_{O_2,dry} = \frac{1}{1 + H_r} \dot{m}_{O_2,hydr} \quad (1.16)$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_{O_2,hydr} - \dot{m}_{O_2,dry} \quad (1.17)$$

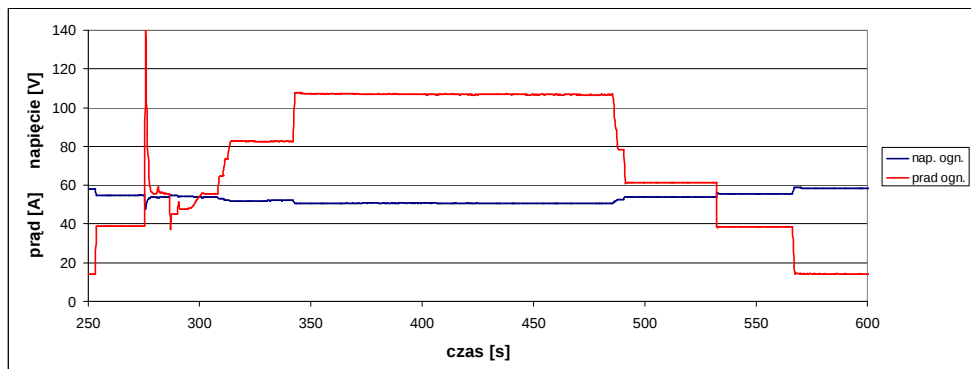
gdzie indeksy *dry* i *hydr* dotyczą odpowiednio gazu suchego i nawilżonego. Powyższe zależności wykorzystane zostały podczas tworzenia modelu symulacyjnego, który z kolei posłużył do zaprojektowania rzeczywistego systemu zasilania ogniwa.

3. WYBRANE WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

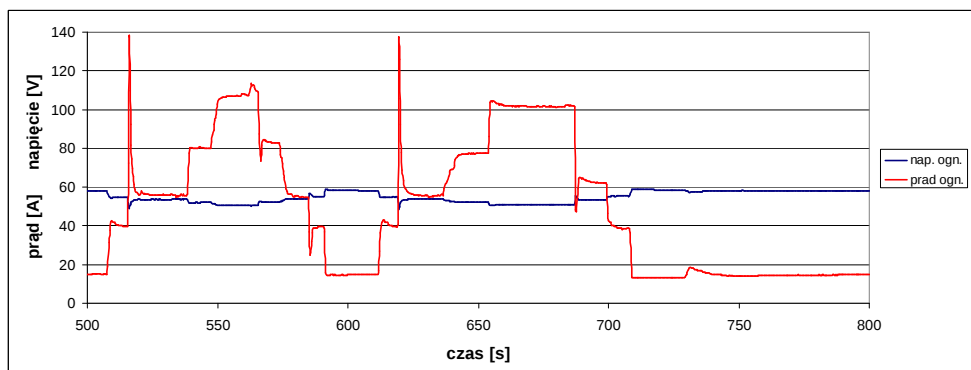
Parametry badanego systemu zasilania elektrycznego opartego o ogniwo paliwowe PEM o mocy 6 kW zostały zarejestrowane podczas załączania oraz wyłączania silnika o mocy 5,5 kW sprzęgniętego z prądnicą (rys. 2.). Proces ten przeprowadzono z załączoną i wyłączoną baterią superkondensatorów stanowiących wymagany teoretycznie bufor.

W chwili początkowej system ogniwa paliwowego generuje moc równą 0,86 kW na potrzeby zasilania obwodów mocy przetwornicy DC/DC oraz własne (pompy, czujniki, sterownik PLC).

W 275 sekundzie eksperymentu załączono silnik prądu stałego o mocy 5,5 kW sprzęgnięty wałem z prądnicą 3,5 kW. W kolejnych fazach skokowo zwiększano a następnie zmniejszano obciążenie prądnicy a tym samym badanego stosu.



Rys. 2. Przebieg zmian napięcia i prądu stosu ogniwa paliwowego w trakcie załączania i zmian obciążenia silnika 5,5 kW, z odłączonymi superkondensatorami.



Rys. 3 Przebieg zmian napięcia i prądu stosu ogniwa paliwowego w trakcie załączania i zmian obciążenia silnika 5,5 kW, z załączonymi superkondensatorami (cykl powtórzony dwukrotnie).

Identyczny eksperyment przeprowadzono przy załączonej baterii superkondensatorów. Opisanym wcześniej zmianom prądu obciążenia badanego systemu zasilania elektrycznego odpowiadają porównywalne zmiany prądu i napięcia ogniwa paliwowego. Włączeniu silnika elektrycznego odpowiada impulsowy wzrost prądu ogniwa, ale o krótkim czasie trwania, czemu odpowiada przepięcie o wartości ok. 10 V. Przy 68 celach stosu ogniwa paliwowego daje to średnio 0,14 V spadku napięcia na pojedynczej celi. Nie stwarza to zagrożenia uszkodzenia ogniwa paliwowego.

Maksymalne wartości napięcia i prądu stosu w przypadku zastosowania i braku bufora są bardzo zbliżone. Jedyne widoczne różnice dotyczą kształtu przebiegu prądu. Z jednej strony superkondensator złagodził dynamikę zmian, jednak jednocześnie wprowadził dodatkowe zniekształcenia.

4. WNIOSKI

Opracowany system zasilania elektrycznego oparty o ogniwo paliwowe PEM, przystosowany do pracy w warunkach bez dostępu powietrza poprawnie reaguje na zmiany prądu obciążenia oraz dobrze stabilizuje napięcie zasilające odbiorniki energii elektrycznej.

Dla poprawnej pracy silnika DC o mocy tego samego rzędu, co moc systemu PEMFC nie jest konieczne stosowanie bufora w postaci superkondensatorów lub akumulatorów.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Browning D.J., Lakeman J.B.; *The Role of Fuel Cells in the Supply of Silent Power for Operations in Littoral Waters*, Symposium on Novel Vehicle Concepts and Emerging Vehicle Technologies, 2003.
- [2] Bernardi D., Verbrugge M., "A mathematical model of the solidpolymer-electrolyte fuel cell," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 139, no. 9, pp. 2477 – 2491, 1992
- [3] Barbir F., "PEM Fuel Cells: Theory and Practice", ELSEVIER Academic Press, London 2005
- [4] Bujło P., „Polimerowe, superjonowe membrany dla ogniw paliwowych typu PEMFC”, rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2006

- [5] Dmowski A., Kras B., „Ogniwo paliwowe w układach zasilania potrzeb własnych”, Materiały VII Międzynarodowej Konferencji „Nowoczesne urządzenia zasilające w energetyce”, Warszawa 2004
- [6] Dmowski A., Kras B.: „Fuel Cell Control System And Power Converters”. Elektrische Energiewandlungssysteme, Magdeburg, maj 2002
- [7] Gasser F., „An analytical, control-oriented state space model for a PEM fuel cell system”, rozprawa doktorska, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne 2006
- [8] Gemmen R., “Analysis for the effect of inverter ripple current on fuel cell operating condition,” Journal of Fluids Engineering, vol. 125, no. 3, pp. 576–585, 2003.
- [9] Grzeczka G., Szymak P.: *Analysis of Using Fuel Cell Technology for Autonomous Underwater Vehicle Power Supply*, Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modeling and Simulation (ACMOS '09), WSEAS Press, Istambul 2009, pp. 153-156.
- [10] Szymak P., Grzeczka G.: *Opracowanie technologii rezerwowego zasilania elektrycznego okrętu podwodnego z zastosowaniem wodorowego ogniwa paliwowego*, sprawozdanie z pracy badawczej, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 2008.
- [11] Szymak P.: *Model matematyczny stosu ogniwa paliwowego PEM zasilanego czystym tlenem i wodorem*, Logistyka nr 3/2009, Instytut Logistyki i Magazynowania, Szczyrk, 2009, pp. 78-79.