

Grzegorz Grzeczka
Piotr Szymak
Akademia Marynarki Wojennej

SYSTEM ZASILANIA WODOREM OGNIWA PALIOWEGO PEM NIEZALEŻNEGO OD POWIETRZA

STRESZCZENIE

Coraz częściej do zasilania różnego rodzaju urządzeń i pojazdów, przeznaczonych zarówno do zastosowań cywilnych, jak i militarnych, wykorzystuje się wodorowe ogniwa paliwowe. Jednym z bardziej popularnych ogniw wodorowych są niskotemperaturowe ogniwa typu PEM (*Proton Exchange Membrane*). W przypadku ich stosowania w warunkach bez dostępu powietrza (np. pod wodą) istnieje potrzeba dostarczania do ogniwa i czystego wodoru, i czystego tlenu. W niniejszym artykule przedstawiono architekturę systemu zasilania wodorem ogniwa paliwowego typu PEM przeznaczonego do pracy w warunkach podwodnych. Dodatkowo przedstawiono wybrane wyniki rzeczywistej realizacji omawianego systemu.

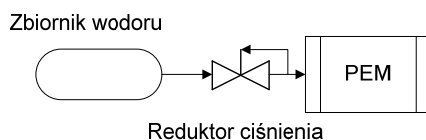
Słowa kluczowe:

ogniwo paliwowe PEM niezależne od powietrza, sterowanie przepływem wodoru.

WSTĘP

Polimerowe ogniwa paliwowe są urządzeniami elektrochemicznymi, które wytwarzają energię użyteczną (elektryczność, ciepło) w wyniku reakcji chemicznej wodoru z tlenem. Produktem ubocznym jest woda. Reakcja chemiczna zachodząca w ogniwie polega na rozbiciu wodoru na proton i elektron na anodzie, a następnie na połączeniu substratów reakcji na katodzie. Procesom elektrochemicznym towarzyszy przepływ elektronu od anody do katody z pominięciem nieprzepuszczalnej membrany. W wyniku elektrochemicznej reakcji wodoru i tlenu powstaje prąd elektryczny, woda i ciepło. Paliwo — wodór w stanie czystym lub w mieszaninie z innymi gazami — jest doprowadzany w sposób ciągły do anody, a utleniacz — tlen w stanie czystym lub mieszaninie (powietrze) — podawany jest w sposób ciągły do katody.

Konfiguracja systemu zasilania wodorem zależy od wielu czynników. Teoretycznie najprostsze rozwiązanie systemu mogłoby wyglądać jak na rysunku 1. Jedynym wymaganym elementem jest reduktor ciśnienia, jednak długoterminowa praca tak zasilanego ogniwa możliwa byłaby tylko przy zachowaniu ekstremalnej czystości zarówno wodoru, jak i tlenu. Nieuniknione zanieczyszczenia w wodorze i tak w końcu zgromadzą się na anodzie. Ponadto zgromadzi się para wodna, szczególnie przy niskich gęstościach prądu.

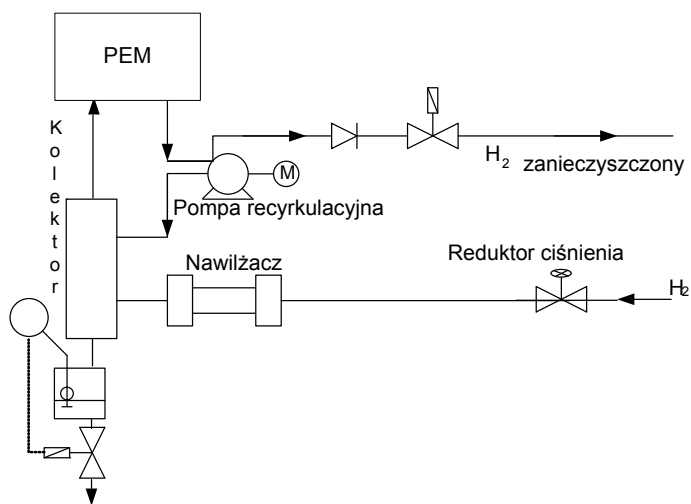


Rys. 1. Schemat najprostszego teoretycznego systemu zasilania wodorem

Źródło: opracowanie własne.

Powoduje to konieczność wprowadzenia zaworu umożliwiającego otwarcie wylotu systemu. Jego otwarcie powinno być funkcją napięcia cel (szczególnie końcowych) oraz czasu.

Jeżeli z powodów bezpieczeństwa, zachowania bilansu mas czy zwiększenia efektywności układu wylot wodoru jest niepożądany, a taka sytuacja występuje w pojazdach podwodnych, konieczne jest zastosowanie rozwiązania przedstawionego na rysunku 2. Wodór z wyjścia stosu paliwowego po odpowiednim sprężeniu jest podawany na wejście stosu. Należy pamiętać o odpowiednim odseparowaniu wody, a jednocześnie utrzymaniu właściwego nawilżenia wodoru doprowadzanego do wejścia stosu.



Rys. 2. Schemat realizowanego systemu zasilania wodorem

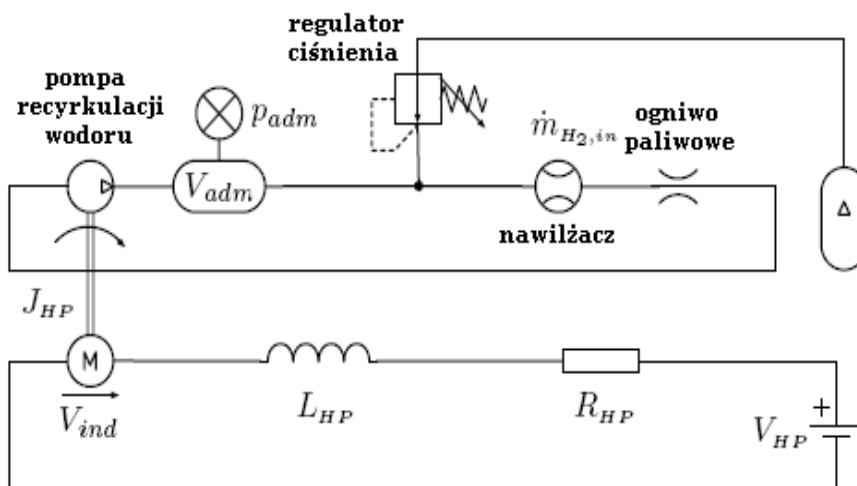
Źródło: opracowanie własne.

Typowo wilgotność względna wodoru na wejściu do stosu powinna być zbliżona do stu procent w celu zachowania elektroosmotycznych właściwości membrany. Dlatego koniecznym elementem systemu zasilania wodorem jest nawilżacz. Tak więc konfiguracja systemu wodoru przedstawiona na rysunku 2. stała się podstawą do badań modelowych i realizacji systemu.

ZAŁOŻENIA MODELU MATEMATYCZNEGO SYSTEMU ZASILANIA WODOREM

Przyjęto, że podsystem zasilania wodorem składa się z: regulatora ciśnienia P podłączonego do źródła wodoru, nawilżacza i pompy recyrkulacji wodoru HP .

Z punktu widzenia sterowania sygnałem wejściowym dla podsystemu zasilania wodoru jest napięcie zasilające pompę, a wyjściowym natężenie przepływu wodoru przez przedział anody ogniwa paliwowego. Model podsystemu zasilania wodoru może więc być zbudowany na podstawie schematu pokazanego na rysunku 3. Ciśnienie wodoru wewnątrz rurowego systemu zasilania jest bezpośrednio sterowane przez regulator ciśnienia, stąd też dynamika zmienności ciśnienia w przedziale wodoru zależy od charakterystyki regulatora ciśnienia [5].



Rys. 3. Schemat modelu podsystemu zasilania wodorem ogniwa paliwowego PEM

Źródło: opracowanie własne.

Ciśnienie w przedziale wodoru może być sterowane przez mechaniczny regulator ciśnienia, który sprzęga wysokie ciśnienie (standardowo 50–250 bar) pojemnika magazynowania wodoru z niskim ciśnieniem systemu rurowego zasilania wodoru. Poprzez obciążenie wstępne sprężyny ustawia się żądane ciśnienie robocze. Podczas działania zawór sterowany wewnątrz regulatora ciśnienia dostraja natężenie przepływu w przedziale wodoru dla sterowania ciśnieniem do żądanego poziomu.

Dla potrzeb regulacji ciśnienia do ustalonego poziomu przez wstępnie obciążoną sprężynę wykorzystywana jest hydro-mechaniczna pętla zwrotna (zrealizowana przez szereg połączonych ze sobą bardzo czułych objętości czujników). Dynamika zamkniętej pętli regulacji zależy od dokładnej geometrii różnych objętości czujników i połączeń wzajemnych razem z charakterystyką tarcia kinetycznego i spoczynkowego. Określony typ regulatora ciśnienia charakteryzuje się minimalnym spadkiem ciśnienia, jakie musi na nim wystąpić przy zadanym ciśnieniu wyjściowym i natężeniu przepływu. Ponadto charakteryzuje się określonymi stałymi czasowymi otwarcia i zamknięcia zaworu (rzędu kilku sekund). Dlatego też istotne jest uwzględnienie tych parametrów przy sterowaniu pracą systemu ogniwa paliwowego.

Przystosowując równania pracy sprężarki powietrza do pompy recyrkulacji wodoru *HP* (*Hydrogen Pump*), otrzymuje się model w przestrzeni stanów zapisany za pomocą następujących zależności:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{HP}}{dt} \\ \frac{d\omega_{HP}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{HP}}{L_{HP}} & -\frac{k_{t,HP}}{L_{HP}} \\ \frac{k_{t,HP}}{J_{HP}} & -\frac{k_{f,HP}}{J_{HP}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{HP} \\ \omega_{HP} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{1}{L_{HP}} [V_{HP}] \quad (1)$$

$$\dot{m}_{H_2} = \begin{bmatrix} 0 & k_{m,HP} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{HP} \\ \omega_{HP} \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdzie:

- $k_{f, HP}$ — współczynnik całkowitego tarcia w [Nm s/rad];
- $k_{t, HP}$ — stała momentu obrotowego silnika w [Nm/A];
- ω_{HP} — prędkość obrotowa pompy w [rad/s].

Dla nowoczesnych pomp recyrkulacji wodoru z wbudowanym sterownikiem szybkiego prądu można założyć, że zadana wartość prądu silnika jest sygnałem wejściowym użytkownika. Stąd też równania (1) i (2) redukują się do postaci:

$$\frac{d\omega_{HP}}{dt} = -\frac{k_{f,HP}}{J_{HP}}\omega_{HP} + \frac{k_{t,HP}}{J_{HP}}i_{HP} ; \quad (3)$$

$$\dot{m}_{H_2} = k_{m,HP} \cdot \omega_{HP} \quad (4)$$

Ze względu na to, że system przewodów rurowych zasilania wodoru *HS* (*Hydrogen Supply*) reprezentuje zamkniętą pętlę, to sama dynamika ciśnienia może być wyrażona poprzez równowagę masy w objętości systemu przewodów rurowych następująco [5]:

$$\frac{dm_{HS}}{dt} = \dot{m}_{H_2,in} - \dot{m}_{H_2,out} \quad (5)$$

$$\frac{dp_{HS}}{dt} = \frac{RT}{V_{HS}M_{H_2}}(\dot{m}_{H_2,in} - \dot{m}_{H_2,out}) = \frac{RT}{V_{HS}M_{H_2}}\left(\dot{m}_{H_2,PR} - \frac{I_{el}}{2F}M_{H_2}\right) \quad (6)$$

gdzie

$\dot{m}_{H_2,PR} = f(p_{HS})$ — funkcja ciśnienia wodoru, może być obliczona przy użyciu prezentowanych wcześniej równań dyszy.

Nawilżenie wlotowego gazu do żądanej wartości względnej wilgotności wymaga obliczenia wymaganej ilości wody, która musi być wprowadzona do tego gazu. W tym celu niezbędny będzie statyczny model nawilżacza. Model ten dodatkowo umożliwia określenie zmiany w całkowitym natężeniu przepływu i ciśnienie spowodowane wprowadzeniem dodatkowej wody. Zakładając, że: temperatura przepływu jest stała, woda wprowadzana jest do gazu w formie pary wodnej, a ilość wprowadzanej pary wodnej jest obliczana na podstawie przepływu pary wodnej na wyjściu elementu chłodzącego i żądanego przepływu pary wodnej dla zapewnienia zadanej wilgotności ψ_{des} , natężenie przepływu wprowadzanej do gazu (np. wodoru) pary wodnej można obliczyć, korzystając z zależności [5]:

$$\dot{m}_{v,inj} = \frac{M_V}{M_{H_2}} \frac{\psi_{des} p_{sat}(T)}{p_{H_2,dry}} \dot{m}_{H_2,dry} - \dot{m}_v \quad (7)$$

gdzie:

M_V — masa molowa pary wodnej;

M_{H_2} — masa molowa suchego wodoru;

$p_{H_2,dry}$ — ciśnienie suchego wodoru;

$\dot{m}_{v,inj}$, \dot{m}_v , $\dot{m}_{H_2,dry}$ — natężenie przepływu wprowadzanej pary wodnej, pary wodnej wychodzącej z układu chłodzenia, suchego wodoru.

Ilość wody wewnątrz zamkniętego podsystemu zasilania wodoru może być określona przy zastosowaniu zależności na współczynnik transferu wody określony w modelu stosu ogniów paliwowych. Ze względu na to, że molowa frakcja wody na wlocie ogniwa paliwowego zależy od ilości wody skroplonej w systemie, wartość wilgotności wodoru najlepiej uzyskiwać w wyniku jego pomiaru bezpośredniego.

Model został zaimplementowany w środowisku Simulink, a wyniki symulacji posłużyły do doboru parametrów elementów rzeczywistego systemu.

REALIZACJA SYSTEMU

Rzeczywisty układ zrealizowany został zgodnie z założeniami przedstawionymi w poprzednich punktach. Połączenia wykonano rurkami o średnicy 8 mm ze stali kwasoodpornej. Do redukcji ciśnienia gazu wykorzystano typowy reduktor umożliwiający redukcję do 2 bar. Takie ciśnienie zapewnia określony przez model przepływ na poziomie 20 lN/min. Do nawilżania gazu zastosowano nawilżacz typu FC125-240-01-02 firmy PERMA PURE LLC wykorzystujący osmotyczne właściwości nafionu. Do recyklingu wodoru zastosowano pompę membranową. Właściwa realizacja wprowadzania wodoru z wyjścia stosu na jego wejście wymagała wykonania kolektora umożliwiającego mieszanie gazów oraz odprowadzanie nadmiaru wody. Implementacja została pokazana na fotografii 1.



Fot. 1. Realizacja kolektora umożliwiającego recyrkulację wodoru

Źródło: fotografia wykonana przez autorów.

WNIOSKI

Zaproponowany w artykule podsystem zasilania wodorem jest jednym z najprostszych rozwiązań w realizacji systemu zasilania opartego na ogniwie paliwowym PEM do pracy w warunkach bez dostępu powietrza. Zaprojektowany na podstawie teorii działania ogniwa paliwowego typu PEM oraz modelu matematycznego system zasilania wodorem ogniwa o mocy 5 kW spełnił swoje zadanie i umożliwia długotrwałą, stabilną i bezpieczną pracę stosu. System uzupełniony został przetwornikami pomiarowymi umożliwiającymi kontrolę oraz wizualizację stanów eksploatacyjnych tego układu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Grzeczka G., Szymak P., *Opracowanie technologii rezerwowego zasilania elektrycznego okrętu podwodnego z zastosowaniem wodorowego ogniwa paliwowego*, sprawozdanie z pracy badawczej, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia 2008.
- [2] Lakeman B., Browing D., *The Role of Fuel Cells in the Supply of Silent Power for Operations in Littoral Waters*; internet, <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ada428713&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>, 2004.
- [3] Szczęsna-Kaczmarek A., *Physiological characteristic of transition from an oxygen deficit to steady state during submaximal exercise: Comparison children and young adults*, 'Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska', 2005, Vol. LX, Suppl. XVI, 527, pp. 335–339.
- [4] Szymak P., *Control of supply subsystems of fuel cell stack*, Proceedings of the 3rd Hydrogen & Energy Symposium, Empa Materials Science and Technology, Braunwald 2009, pp. 80–83.
- [5] Szymak P., *Model matematyczny stosu ogniwa paliwowego PEM zasilanego czystym tlenem i wodorem*, „Logistyka”, 2009, nr 3, s. 78–79.

HYDROGEN SYSTEM FOR SUPPLYING AIR INDEPENDENT PEM FUEL CELL

ABSTRACT

Hydrogen fuel cells are more and more often used to drive different devices and vehicles both for civilian and military applications. One of the more popular hydrogen fuel cells is low-temperature PEM (Proton Exchange Membrane). When used without access to air, e.g. in underwater

conditions, such cells have to be fed with both hydrogen and oxygen. The paper presents an architecture of a PEM type fuel cell hydrogen supply subsystem designed to work in underwater conditions. Additionally, it includes some chosen results of real realization of the system presented.

Keywords:

air independent PEM fuel cell, control of hydrogen flow.

Recenzent dr hab. inż. Bogusław Łazarz, prof. PŚ