

Antoni DMOWSKI¹
Tomasz DZIK²

UKŁADY ENERGOELEKTRONICZNE ŁĄCZĄCE OGNIWA PALIWOWE Z SIECIĄ ROZPROSZONĄ I DYSTRYBUCYJNĄ

Referat wprowadza w tematykę ogniw paliwowych. Przedstawione są układy energoelektroniczne pozwalające połączyć ogniwa paliwowe z sieciami rozproszonymi lub z siecią energetyczną. Dzięki zaprezentowanym układom energia elektryczna wytworzona w ogniwach paliwowych może zasilać odbiorniki zarówno stałoprądowe jak i przemiennoprądowe w systemie wyspowym lub być przekazywana do elektroenergetycznej sieci zasilającej. Trafność wyboru odpowiednich rozwiązań układów energoelektronicznych została potwierdzona wybranymi wynikami badań symulacyjnych i laboratoryjnych.

1 WSTĘP

Ogniwa paliwowe zamieniają bezpośrednio energię zawartą w związkach chemicznych na energię prądu stałego. Zamiana ta następuje przy wysokiej sprawności energetycznej i bardzo małym negatywnym oddziaływaniu na środowisko. Głównie te zalety są powodem tak dużego zainteresowania tymi źródłami energii. Napięciem wyjściowym z ogniwa paliwowego jest napięcie stałe silnie ustepliwie w funkcji obciążenia. Ponadto ogniwo paliwowe jest źródłem nie przeciążalnym i z dodatkowo zabronionymi obszarami pracy. Przedmiotem referatu jest przedstawienie szeregu energoelektronicznych urządzeń przetwarzających, które umożliwiają budowę układu zasilania z ogniwem paliwowym realizującego następujące cele:

- pracę ze stabilizowanym stałym napięciem wyjściowym,
- pracę ze stabilizowanym zmiennym napięciem wyjściowym,
- pracę ogniwa jako źródła współpracującego z elektroenergetyczną siecią zasilającą.

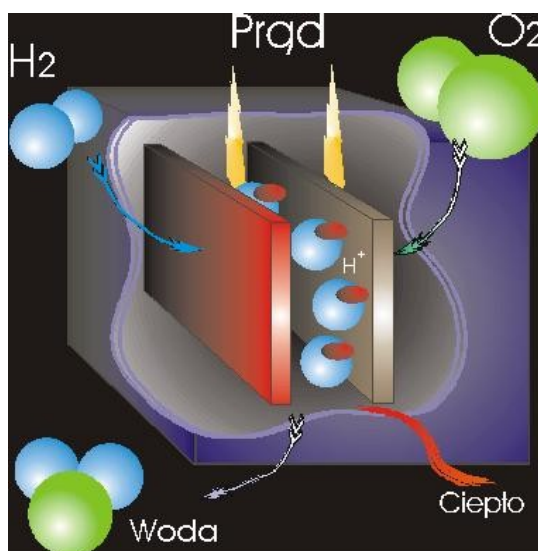
Połączenie ogniwa paliwowego z innym źródłem energii pozwala uzyskać możliwości chwilowego przeciążenia lub możliwości chwilowego magazynowania energii pochodzącej z zasilanych odbiorników np. hamowanych kontrolowanie silników elektrycznych.

¹ Politechnika Warszawska Instytut Elektroenergetyki, 00-662 Warszawa, ul Koszykowa 75, tel. (0-22) 6607366 , admowski@ee.pw.edu.pl

² Instytut Elektroenergetyki, Politechnika Warszawska, 00-662 Warszawa, ul Koszykowa 75, tel. (0-22) 6605613 tdzik@op.pl

2 OGNIWA PALIWOWE

Ogniwo paliwowe typu PEM zasilane jest wodorem a tlen potrzebny do reakcji chemicznej pobierany jest z powietrza atmosferycznego. Ogniwo zbudowane jest z dwóch elektrod przedzielonych specjalną membraną, która przepuszcza jony dodatnie nie pozwalając przeniknąć elektronom. Zamknięty obwód zewnętrzny powoduje przepływ prądu stałego. Reakcje zachodzące w ogniwie są egzotermiczne, więc jedynymi produktami ubocznymi w procesie wytwarzania prądu są czysta woda i ciepło. Zasadę działania ogniwa paliwowego przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Zasada działania ogniwa paliwowego.

Zasadniczą przewagą ogniw paliwowych w stosunku do tradycyjnych sposobów wytwarzania energii elektrycznej jest całkowity brak toksycznych odpadów i spalin. Jeżeli potraktujemy ogniwo paliwowe jak czarną skrzynkę i z jednej strony doprowadzamy paliwo wodorowe i powietrze, z drugiej otrzymujemy prąd elektryczny, czystą wodę nadającą się do użytku i ciepło (rysunek 1).

Głównym źródłem paliwa jest wodór, którego zastosowanie jest tanie i najbardziej ekologiczne. Wodór przechowywany jest obecnie w butlach lub zbiornikach pod wysokim ciśnieniem i poprzez reduktory dostarczany do ogniwa. Najnowsze technologie bezpiecznego przechowywania wodoru polegają na uwięzieniu cząsteczek gazu w specjalnym pojemniku wypełnionym wodorkami metalu. Stałe wodorki metalu są w stanie zgromadzić nawet do 3300 Wh/l energii. Dla porównania klasyczny akumulator ołowiowo-kwasowy osiąga gęstość energii rzędu 80 Wh/l.

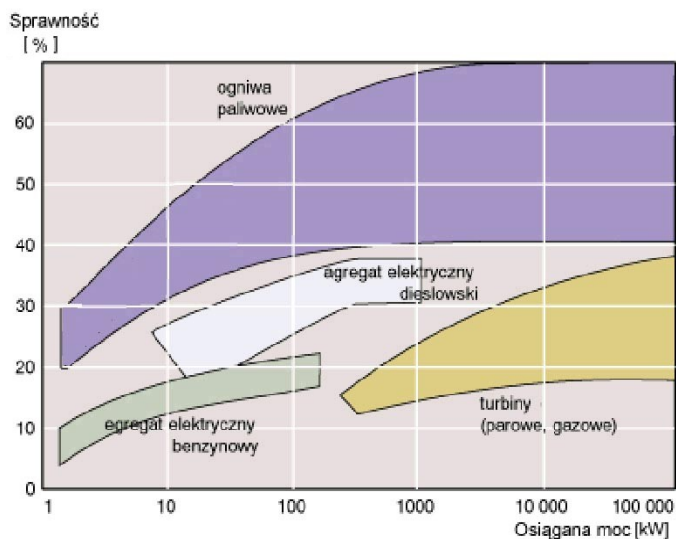
Przez zastosowanie odpowiedniego przemiennika chemicznego zwanego reformerem ogniwo paliwowe może być zasilane np.: gazem ziemnym, metanolem, biogazem.

Tabela nr 1 zawiera zestawienie różnego rodzaju ogniw paliwowych.

Tabela 1. Porównanie różnych typów ogniw paliwowych

Typ ogniwa paliwowego	Wysokotemperaturowe	Średnotemperaturowe		Niskotemperaturowe	
	„Zestalone tlenki”	Stopione węglany	Kwasowy	Zasadowy	Z membraną wymiany protonów
Elektrolit	Ceramika	Stopiona sól	H ₃ PO ₄	KOH	Polimer
Temperatura pracy	1000 °C	650 °C	190 °C	80 – 120 °C	80 – 140 °C
Paliwo	Wodór Tlenek węgla Produkty reformowania	Wodór Produkty reformowania	Wodór Produkty reformowania	Wodór	Wodór Produkty reformowania
Reformowanie	Zewnętrzne, wewnętrzne	Zewnętrzne, wewnętrzne	Zewnętrzne		Zewnętrzne
Sprawność	> 60%	> 60%	40 – 50 %	40 – 50 %	40 – 50 %
Zakres mocy	> 100MW	> 100MW	200kW do 10MW	100W do 20kW	10W do 10MW

Rysunek 2 przedstawia przykładowe porównania sprawności energetycznej różnych przetworników energii. Porównanie to wypada na korzyść ogniwa paliwowego. Ma ono najwyższą sprawność i największy zakres uzyskiwanych mocy.



Rys. 2. Porównanie sprawności różnych przetworników energii.

Sprawność układu można zwiększyć wykorzystując ogniwo paliwowe w tak zwanym układzie skojarzonym.

3 SYSTEMY ZASILANIA Z OGNIWAMI PALIWOWYMI

Na świecie pracuje wiele systemów zasilania z ogniwami paliwowymi. W Polsce także prowadzone są prace nad takimi systemami. Rysunki 3, 4 i 5 przedstawiają trzy stanowiska badawcze opracowane w ZEiGE Politechniki Warszawskiej, zbudowane przy współpracy z firmą APS Energia.

Rys. 3. Wyspowy system zasilania z wodorowym ogniwem paliwowym



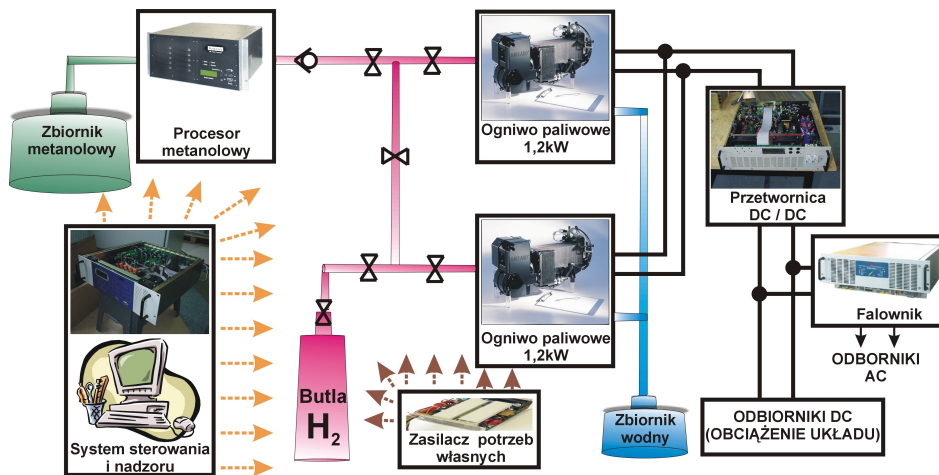
Rys. 4. System zasilania z ogniwami paliwowymi wykonany w wersji przekazywania energii do sieć energetycznej



Rys. 5. System zasilania z ogniwami paliwowymi wytwarzający energię z paliwa metanolowego [3]

Urządzenie pokazane na rysunku 3 przeznaczone jest do zasilania odbiorników prądu stałego i przemiennego. Na rysunku 4 przedstawiono urządzenie, które oprócz własności poprzedniego układu pozwala na przekazywanie wyprodukowanej energii do sieci energetycznej. W układach tych energia wytwarzana jest z paliwa wodorowego dostarczanego w butlach pod ciśnieniem.

W urządzeniu pokazanym na rysunku 5 energia wytwarzana jest z paliwa metanolowego jako podstawowego źródła. Możliwe jest to w wyniku włączenia dodatkowego elementu – procesora metanolowego. Schemat podstawowy układu oraz sposób dołączenia procesora metanolowego przedstawiany został na rysunku 6.



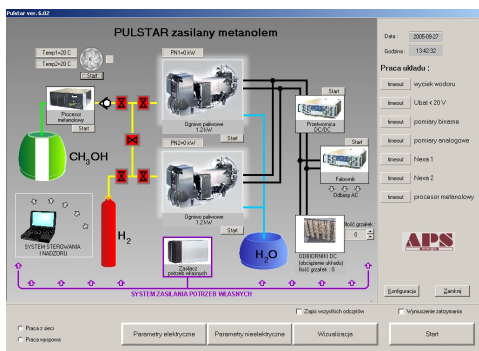
Rys. 6. Schemat uproszczony systemu zasilania z ogniwami paliwowymi zasilanymi różnymi rodzajami paliw [3]

W systemach zasilania z ogniwami paliwowymi niezbędnym elementem jest rozbudowany system sterowania i nadzoru, który czuwa nad prawidłową pracą układu. Pozwala on na sterowanie systemem z konsoli lub z dołączonego zewnętrznego komputera. Widok systemu sterowania i nadzoru przedstawia rysunek 7.

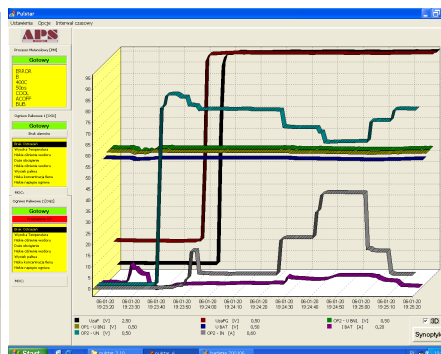


Rys. 7. System automatycznego sterowania i nadzoru

System przedstawiony na rysunku 7 wykonany jest w technice mikroprocesorowej. Budową przypomina zwykły komputer klasy PC. Karty wejściowe w zależności od potrzeb - analogowe lub cyfrowe, z izolowanymi wejściami lub nieizolowanymi - zbierają informacje o systemie i jego otoczeniu. Za pomocą łącza szeregowego RS485 komunikują się z jednostką centralną, która analizuje pomiary i odpowiednio steruje urządzeniem. Wszystkie parametry można obejrzeć na czołowej płycie modułu, gdzie znajduje się wyświetlacz LCD i szereg lampek informujących o stanie systemu. Można tutaj również podłączyć zewnętrzny komputer i przy pomocy programu sympletyki sterować i kontrolować urządzenie oraz przechodząc do wizualizacji danych obejrzeć wszystkie parametry układu. Ekran sympletyki przedstawiony jest na rysunku 8, zaś ekran wizualizacji na rysunku 9.



Rys. 8. Ekran sympletyki systemu

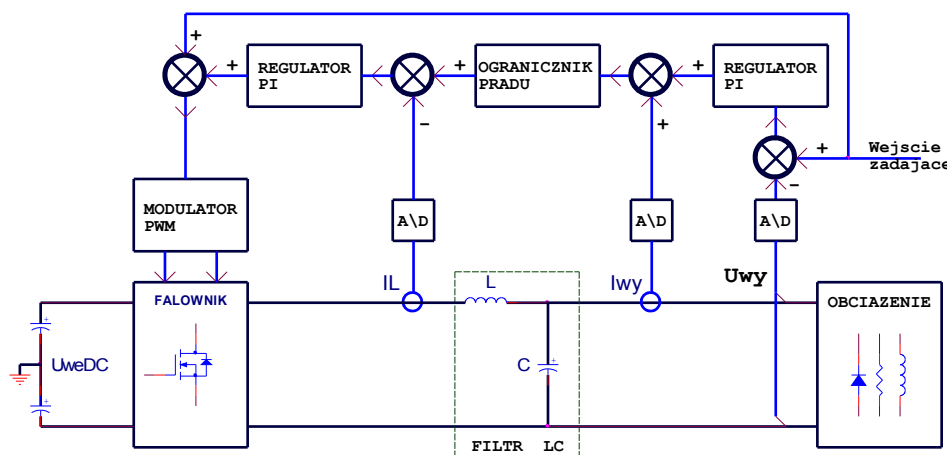


Rys. 9. Ekran wizualizacji systemu

4 PRZETWORNICE DC/AC W UKŁADACH ZASILANIA Z OGNIWAMI PALIOWYMI

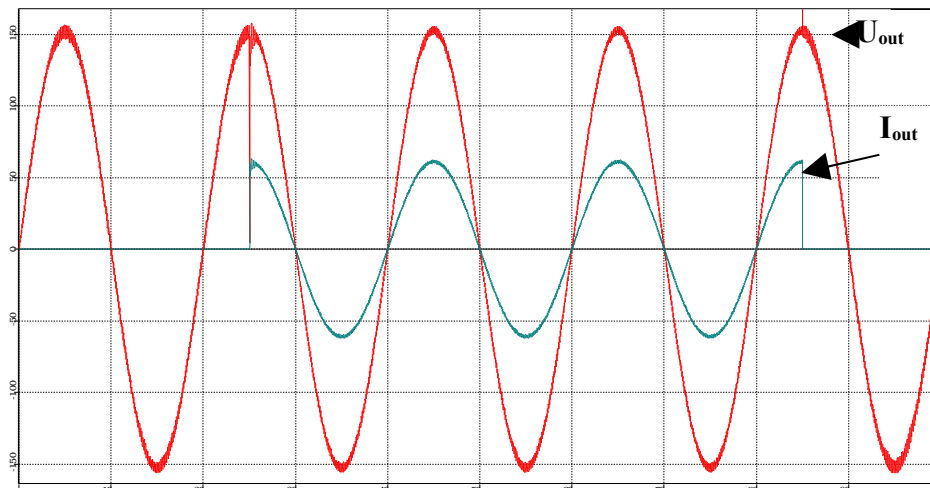
Przetwornice DC/AC umożliwiają zasilanie odbiorników prądu przemiennego, jak i przekazywanie energii z ogniwa paliwowego do sieci elektroenergetycznej. W pierwszym przypadku w układzie autonomicznym z ogniwa paliwowego są zasilane odbiorniki prądu przemiennego. Stosowane w tym przypadku układy przetwornic są analogiczne do układów stosowanych w UPS-ach [1, 6]. Podobnie jak w układach UPS-ów można zastosować układ obejściowy (By-pass ang.), który umożliwia przełączenie bezprzerwowo odbiorników zasilanych z ogniwa paliwowego na zasilanie z sieci elektroenergetycznej. Problemom budowy, zasadzie działania oraz sposobów sterowania przetwornic AC/DC poświęcono wiele miejsca w literaturze światowej i polskiej [6].

Rysunek 10 przedstawia schemat falownika, który może pracować w układzie połączonych równolegle falowników.



Rys. 10. Układ falownika z szeregowymi regulatorami, który może być częścią składową równolegle pracujących falowników w układzie master - slave

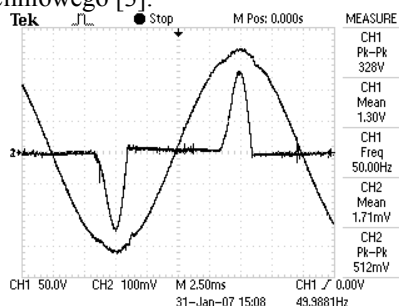
Rysunek 11 przedstawia symulację układu falownika z szeregowymi regulatorami pracującego w układzie master-slave. Do symulacji pracy falownika użyto programu symulacyjnego TCad w wersji 7.0.



Rys. 11. Symulacja pracy układu falownika z szeregowymi regulatorami pracującego w układzie master-slave

Na prezentowanym rysunku 11 przedstawiono przypadek skokowego obciążenia i odciążenia falownika od wartości 0 do wartości obciążenia maksymalnego i powrotom do wartości obciążenia równej zero. Falownik był zasilany z ogniwa paliwowego.

Rysunek 12 przedstawia oscylogramy napięcia i prądu falownika dla obciążenia silnie nieliniowego [3].

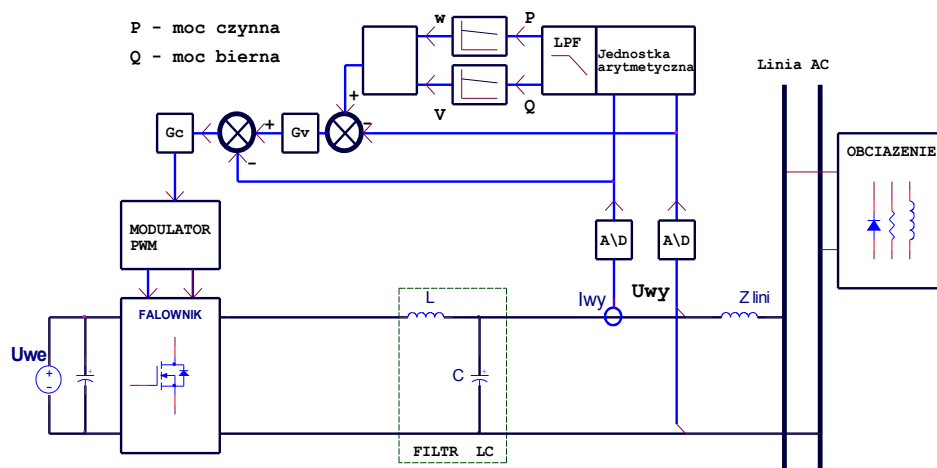


- 1 - Napięcie wyjściowe falownika (mastera)
- 2 - Prąd wyjściowy falownika (mastera) [20A/div]
- Metoda sterowania z regulatorami szeregowymi
- THDu = 2÷3%

Rys. 12. Przykładowe przebiegi prądów i napięć w układzie z rysunku 10

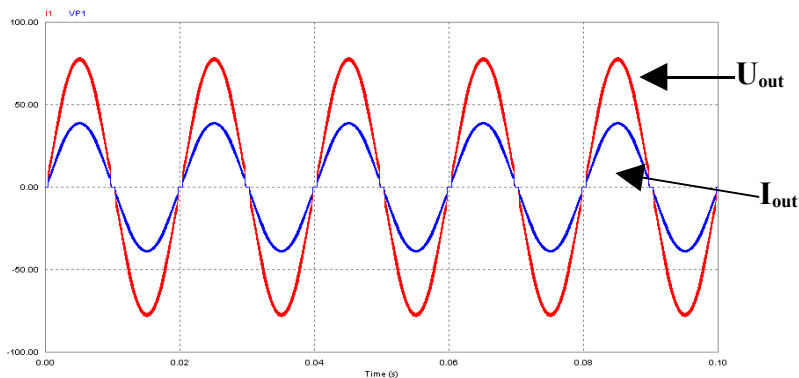
Problemy przekazywania energii z ogniwa paliwowego do sieci elektroenergetycznej nie są problemami stosunkowo nowymi. Występują one powszechnie w połączeniu źródeł odnawialnych z siecią elektroenergetyczną [8]. W zależności od wielkości mocy są stosowane jedno lub trójfazowe falowniki DC/AC. Dla małych i średnich mocy są to dzisiaj układy tranzystorowe [1, 3, 5, 6, 9, 10]. Dla układów wielkich mocy powyżej wielu megawatów rozwiązaniem lepszym wydają się układy tyrystorowe [10]. W przypadku układów tranzystorowych na podstawie badań literatury można stwierdzić, że powszechnie do zastosowania wejdą dwa układy sterowania. W układzie pierwszym po zakończonym procesie synchronizacji, układ zostaje włączony do sieci. W wyniku aktywnego regulatora prądu do sieci przekazywana jest przez falownik określona wartość prądu. W przypadku drugim do regulacji i stabilizacji wartość energii czynnej i

bierniej stosowana jest tak zwana metoda PQ. P stanowi wartość mocy czynnej, a Q wartość mocy bierniej. W układzie regulacji falownika analogicznie jak w układzie regulacji generatora synchronicznego wartość mocy czynnej jest regulatorem przez zmianę częstotliwości – kąta odchylenia między wektorami napięcia sieci i falownika [3, 9, 10]. Natomiast moc bierna przez regulację napięcia falownika. Rysunek 13 przedstawia [3, 9, 10] najczęściej stosowany schemat jednofazowy układu regulacji PQ.



Rys. 13. Układ falownika współpracującego z siecią sterowanego metodą PQ

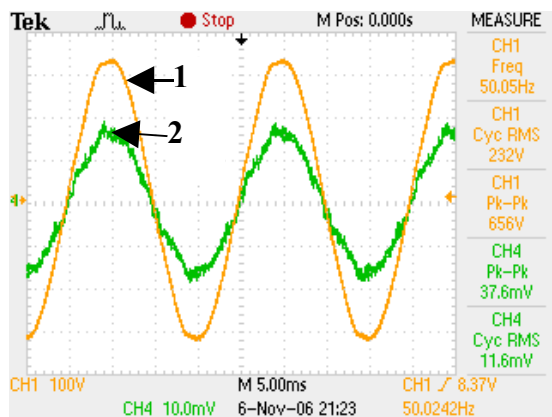
Układ regulacji falownika trójfazowego składa się z podobnych bloków funkcyjnych. Rysunek 14 przedstawia symulację układu falownika pracującego z regulacją mocy czynnej i bierniej (PQ lub f/U -droop – ang.). Do symulacji pracy falownika użyto programu symulacyjnego PSim.



Rys. 14. Symulacja pracy układu falownika z regulacją mocy czynnej i bierniej (f/U -droop).

Na prezentowanym rysunku 14 przedstawiono przypadek pracy falownika z regulacją mocy czynnej i biernej (f/U-droop) przy obciążeniu znamionowym.

Rysunek 15 przedstawia czasowe przebiegi prądu przekazywanego do sieci przez falownik jednofazowy i napięcia sieci w czasie przekazywania energii z ogniwa paliwowego do sieci elektroenergetycznej.

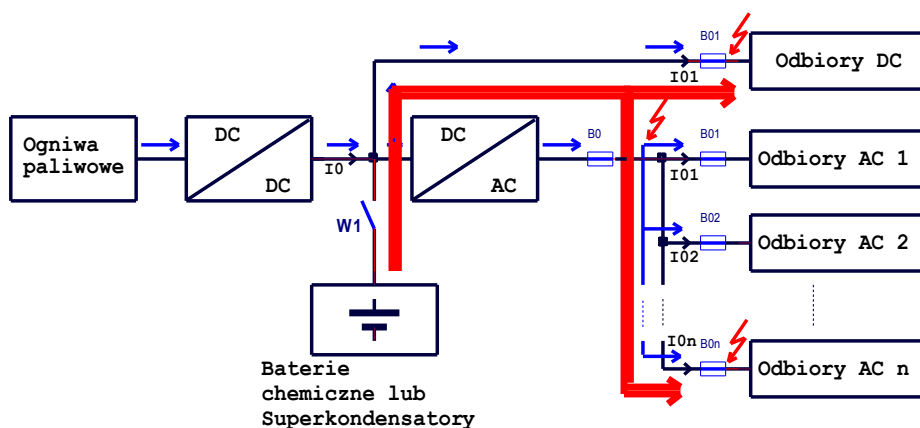


1 - Napięcie sieci energetycznej
2 - Prąd wyjściowy falownika

Rys. 15. Przykładowe przebiegi prądów i napięć w układzie z rysunku 13

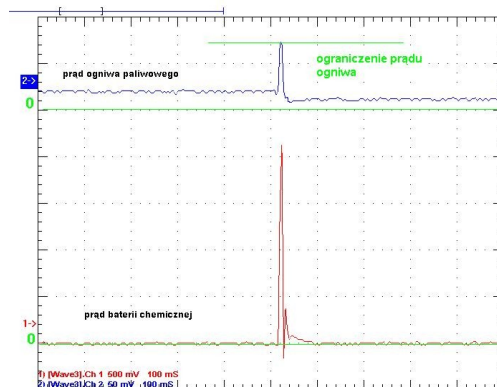
5 ZAPEWNIENIE PRZECIĄŻENIA PRĄDOWEGO SYSTEMU Z OGNIWAMI PALIWOWYMI

Jak już wspomniano na początku referatu ogniwo paliwowe jest źródłem nie przeciążalnym. Połączenie ogniwa paliwowego z innym źródłem energii pozwala uzyskać możliwości chwilowego przeciążenia. Schemat takiego układu został przedstawiony na rysunku 16.



Rys. 16. Układ współpracy ogniwa paliwowego i przetwornicy DC/DC z dodatkowym magazynem energii elektrycznej zasilającej odbiorniki DC i przetwornicę DC/AC.

W układzie, którego schemat przedstawiono na rysunku 16 połączono ogniwo paliwowe z dodatkowym źródłem energii [3, 7]. Z układu mogą być zasilane jednocześnie odbiorniki prądu stałego jak i prądu przemiennego przez przetwornicę DC/AC. W obu przypadkach jest możliwe przeciążenie. Na rysunku 17 przedstawiono wyniki badań dla układu ze schematu z rysunku 16 w czasie zwarcia (przeciążenia) w obwodzie zasilania jednego z odbiorników DC/DC.



Rys. 17. Zasada pracy układu ogniwa paliwowego i przetwornicy DC/DC z dodatkowym magazynem energii elektrycznej

Z przedstawionych przebiegów czasowych prądu wynika, że uzyskanie „dużej” wartości prądu zwarciovego było możliwe częściowo z ogniwa, częściowo z dodatkowo dołączonego źródła. Jednocześnie występujący w tym przypadku prąd z ogniwa nie przekraczał wartości dopuszczalnej (wartości ograniczenia prądu ogniwa) [2, 3, 7].

6 WNIOSKI

Na podstawie przedstawionych rozważań można wysnuć następujące wnioski:

- na podstawie badań literaturowych i wyników badań własnych można z całą pewnością stwierdzić, że w najbliższym czasie powinny powstać przemysłowe urządzenia zasilania z ogniwami paliwowymi w systemach energetyki rozproszonej.
- jako pierwsze prawdopodobnie powstaną systemy małej mocy np.: systemy zasilania potrzeb własnych elektroenergetyki, telekomunikacji lub małych obiektów mieszkalnych.
- przedstawione w referacie wyniki badań układów energoelektronicznych i elektronicznych wchodzących w skład systemów zasilania z ogniwami paliwowymi pozwalają na stwierdzenie, że są one całkowicie przygotowane do produkcji przemysłowych.
- z przedstawionych badań symulacyjnych i badań laboratoryjnych można stwierdzić, że na obecnym etapie rozwoju ogniw paliwowych i techniki przekształtnikowej nie ma żadnej przeszkody w budowie systemów zasilających odbiorniki prądu przemiennego lub przekazujących energię

elektryczną wytworzoną w ogniwie paliwowym do sieci elektroenergetycznej.

Ogniwa paliwowe ze swoimi zaletami takimi jak:

- duża sprawność
- niewielkie zanieczyszczenie środowiska
- nie są źródłem hałasu
- możliwość dowolnej lokalizacji
- system modułowy
- całkowita automatyzacja pracy
- mogą być zasilane różnymi rodzajami paliw

w połączeniu z wysokosprawnymi energoelektronicznymi układami przetwarzającymi energię elektryczną stają się dziś nowoczesnymi systemami zasilania zarówno wyspowymi jak i przekazującymi wytworzoną energię do sieci zasilającej.

Przedstawione powyżej urządzenia mogą z powodzeniem zastąpić eksploatowane dziś układy zasilania potrzeb własnych w elektroenergetyce likwidując ich podstawowe wady.

Autorzy referatu pragną gorąco podziękować firmie APS Energia za udział i pomoc w pracach badawczych.

7 LITERATURA

1. Dmowski A. Energoelektroniczne układy zasilania prądem stałym w telekomunikacji i energetyce WNT, Warszawa 1998
2. Dmowski A., Kras B. *Fuel Cell Control System And Power Converters* Elektrische Energiewandlungssysteme, Magdeburg, maj 2002, Niemcy
3. Dzik T. Układy sterowania i nadzoru systemów zasilania potrzeb własnych elektroenergetyki z ogniwami paliwowymi zasilanymi metanolem praca doktorska PW, Warszawa przewidywana obrona 2007r.
4. Dzik T., Dmowski A. „Układy elektroniczne i energoelektroniczne w systemach potrzeb własnych z ogniwami paliwowymi”, X Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Nowoczesne urządzenia zasilające w energetyce”, ISBN 83-918709-7-9, Zakopane, 14-16.03.2007, str. 23.1-23.12
5. Ozimek P. Nowa koncepcja systemu zasilania układów potrzeb własnych w elektroenergetyce praca doktorska PW, Warszawa 2006r.
6. Dmowski A., Kłos M., Dzik T. *UPS – mity i rzeczywistość* VIII międzynarodowa konferencja naukowo techniczna „Nowoczesne urządzenia zasilające w elektroenergetyce” Kozienice 2005
7. Kras B. Układ hybrydowy ogniwa paliwowego z ogniwem chemicznym do zasilania rozproszonych odbiorników o dużej dynamice zmian obciążenia praca doktorska PW, Warszawa 2004r.
8. Musznicki P. Conducted EMI identification in power electronic converters using the Wien filtering metod praca doktorska PG, Gdańsk 2007r.
9. Tuladhar A. Advanced control techniques for parallel inverter operation without control interconnections The University of British Columbia, April 2000

POWER ELECTRONICS DEVICES CONNECTING FUEL CELLS WITH DISPERSED AND POWER DISTRIBUTED GRID

The paper is familiarizing with the subject fuel cells. Arrangements presents power electronics devices connecting fuel cells with dispersed and power distribution grid. Thanks to presented arrangements the electrical energy produced in fuel cells can power both direct and alternating current receivers in island systems or to be handed over to the electrical power engineering grid.