



INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

Zakład Systemów Zasilania (Z-5)

**Budowa hybrydowej siłowni telekomunikacyjnej
zintegrowanej na napięciu przemiennym 230VAC
wykorzystującej ogniwa paliwowe zasilane wodorem
oraz baterie sodowo-niklowe**

Praca nr 05300016

Warszawa grudzień 2006

Budowa hybrydowej siłowni telekomunikacyjnej zintegrowanej na napięciu przemiennym 230VAC wykorzystującej ogniwa paliwowe zasilane wodorem oraz baterie sodowo-niklowe

Praca nr 05300016

Słowa kluczowe (maksimum 5 słów): ogniwa paliwowe PEM, energetyka odnawialna, telekomunikacyjne systemy zasilania

Kierownik pracy: mgr inż. Robert Samborski

Wykonawcy pracy:

mgr inż.	Robert	Samborski	Z5
mgr inż.	Maciej	Kozyra	Z5
mgr inż.	Edward	Chrustowski	Z5
inż.	Jan	Komorowski	Z5
inż.	Paweł	Kliś	Z5
technik	Andrzej	Stułka	Z5
technik	Krzysztof	Kanicki	Z5
technik	Genowefa	Dziuba	Z5

Kierownik Zakładu: inż. Paweł Kliś

Spis Treści

1. Wstęp	4
2. Konwencjonalne systemy zasilania gwarantowanego w telekomunikacji.	6
2.1. Aspekty eksploatacyjne telekomunikacyjnych systemów zasilania gwarantowanego.....	8
3. Ogniw paliwowe PEM jako elektrochemiczne źródła energii w TSZG [1]	11
3.1 Historia ogniwa paliwowego	11
3.2 Budowa i zasada działania ogniwa paliwowego typu PEM	13
3.3 Sprawność ogniw paliwowych.....	19
3.4. Ogniwo paliwowe z membraną wymiany protonów (Polymer Exchange Membrane Fuel Cell – PEMFC)	21
4. Telekomunikacyjny system zasilania gwarantowanego z ogniwem paliwowym PEMFC.....	26
5. Współpraca nowego systemu zasilania z odnawialnymi źródłami energii (OZE).	29
5.1. Warunki pracy systemu zasilania z OZE [2]	30
6. Podsumowanie i wnioski końcowe	33

1. Wstęp

Konwencjonalne telekomunikacyjne systemy zasilania ulegały wielu zmianom i przeobrażeniom na przestrzeni ostatnich pięciu dziesięcioleci. Zmianą ulegały przede wszystkim centrale telefoniczne które stawiały coraz wyższe wymagania dla telekomunikacyjnym urządzeń i systemów zasilania gwarantowanego. Pomimo wielu przemian jakim poddane zostały do chwili obecnej telekomunikacyjne systemy zasilania gwarantowanego niezmienna pozostała zasada którą stosują producenci tych urządzeń. Mianowicie w myśl tej zasady odbiory (czyli urządzenia telekomunikacyjne) podłączone są bezpośrednio do zacisków baterii akumulatorów chemicznych. Rozwiązanie takie zapewnia ciągłość zasilania odbiorów w przypadku zaniku napięcia sieci zasilającej. Czas w którym system telekomunikacyjny jest zasilany tylko z baterii umożliwia naprawę awarii lub przyłączenie innego źródła zasilania.

Elementem gwarantującym ciągłość zasilania w takich systemach jest bateria akumulatorów chemicznych. Wielkość rezerwy bateryjnej w większości przypadków zależy wyłącznie od stanu technicznego baterii akumulatorów. W szczególnych, uzasadnionych przypadkach stosowany jest, jako dodatkowe awaryjne źródło energii, generator z silnikiem spalinowym (agregat prądowórczy) uruchamiany automatycznie przy zaniku napięcia sieciowego. Zasilanie bateryjne potrzebne jest wtedy tylko na czas niezbędny do uruchomienia agregatu.

Jak pokazują praktyczne doświadczenia ze współcześnie eksploatowanymi w telekomunikacji bateriami akumulatorów ołowiowo-kwasowych VRLA nie ma praktycznych dobrych metod oceny ładunku dysponowanego baterii. Jedyną miarodajną metodą jest próba wyładowania i ładowania kontrolnego gdzie mierzony jest ładunek dostarczony przy wyładowaniu oraz pobrany podczas ładowania. Inną praktycznie stosowaną metodą sprawdzającą stan baterii akumulatorów jest tak zwany krótki test. Polega on na obniżeniu napięcia zespołów prostownikowych zasilających urządzenia telekomunikacyjne do minimum, wtedy energia pobierana jest z baterii która ma wtedy wyższe napięcie. Podczas trwania testu prąd pobierany z baterii powinien mieć określoną wartość a spadek napięcia na zaciskach baterii nie powinien być większy niż określony dla danego typu baterii. Krótki test pokazuje jedynie że bateria w ogóle jest sprawna ale nie wiadomo czy jej dysponowana pojemność to 65% czy na przykład 90%.¹ Dodatkowo po przeprowadzeniu krótkiego testu dysponowany ładunek baterii zostaje zmniejszony do czasu naładowania się baterii

¹ W Telekomunikacji Polskiej S. A. bateria o pojemności poniżej 80% pojemności znamionowej uważana jest za niesprawną i podlega wymianie.

Produkowane obecnie dla telekomunikacji systemy zasilania gwarantowanego zapewniają napięcie wyjściowe stałe o wartości znamionowej 48VDC. Ogranicza to znacząco zastosowanie takich systemów zasilania wyłącznie do aplikacji telekomunikacyjnych.

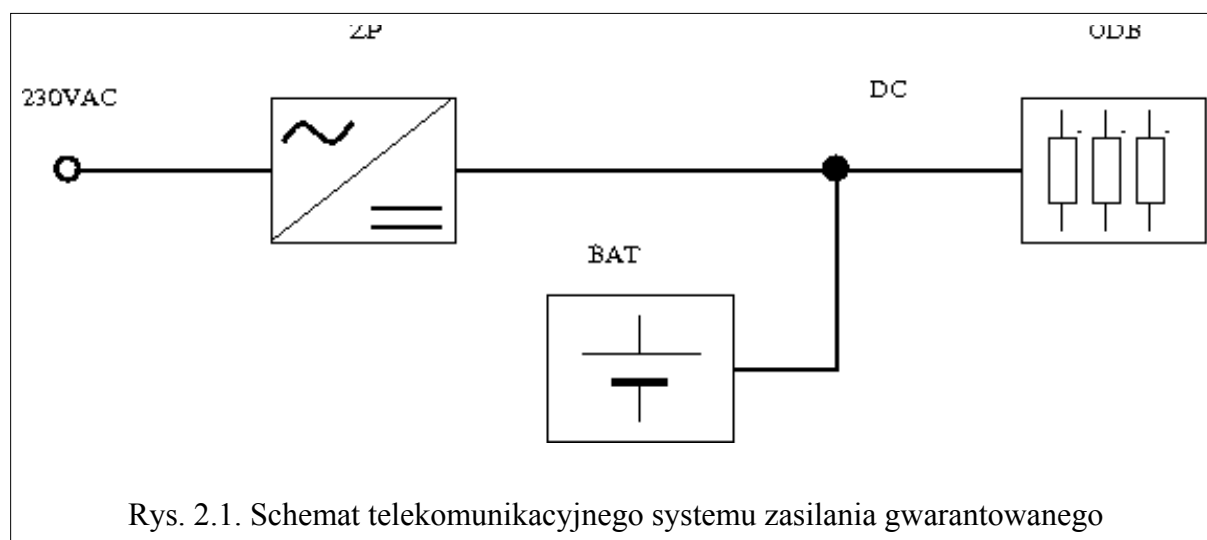
Celem niniejszej pracy jest opracowanie eksperymentalnego systemu zasilania urządzeń telekomunikacyjnych pozbawionego powyższych mankamentów. Praca badawcza w dziedzinie zastosowania ogniw paliwowych z membraną wymiany protonów (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), zasilanych wodorem, ma na celu wyeliminowanie obecnie stosowanych baterii VRLA oraz agregatów prądotwórczych. Ma to za zadanie znaczące podwyższenie niezawodności systemu zasilania i praktycznie dowolne skalowanie wymaganego czasu rezerwy zasilania tylko ilością zmagazynowanego wodoru.

Napięcie wyjściowe nowego systemu zasilania to 230VAC. Rozwiązanie takie poszerza znacząco grono odbiorców tego typu systemów i wykracza daleko poza zastosowania wyłącznie telekomunikacyjne.

Kolejnym ważnym aspektem budowy nowego systemu zasilania jest możliwość współpracy z odnawialnymi źródłami energii: ogniwami fotowoltaicznymi oraz generatorem z silnikiem wiatrowym (wiatrakiem)

2. Konwencjonalne systemy zasilania gwarantowanego w telekomunikacji.

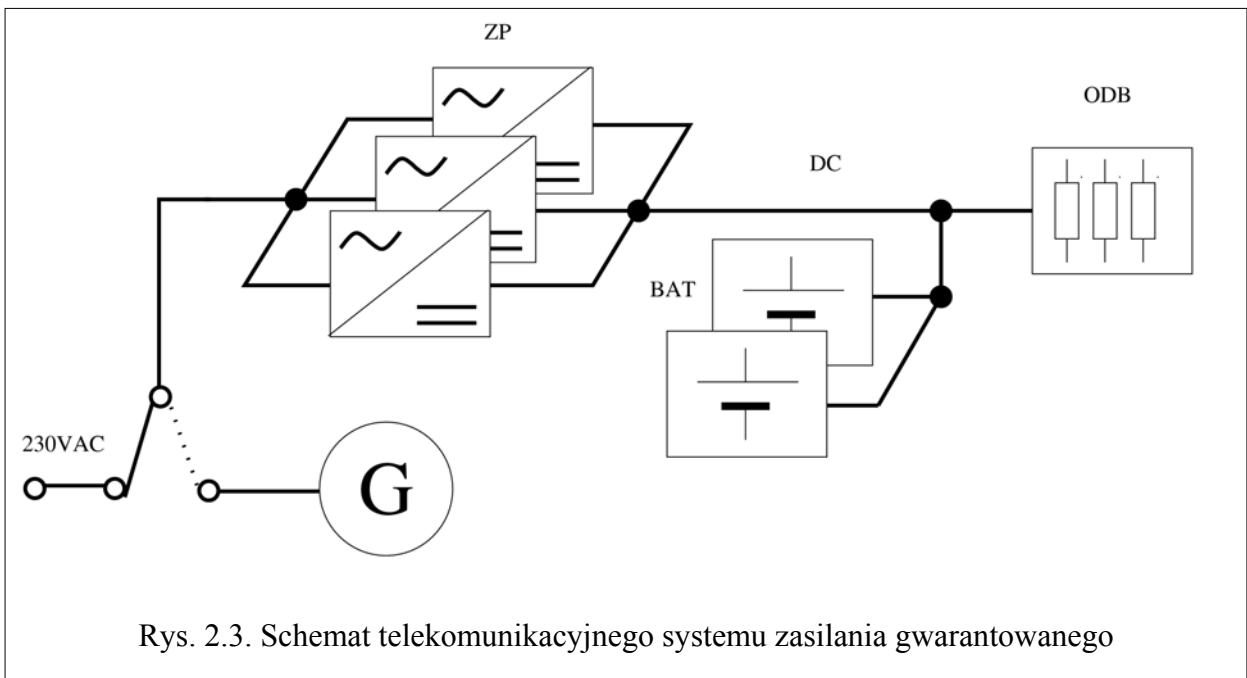
Typowy telekomunikacyjny system zasilania gwarantowanego zasadniczo składa się z zespołu prostownikowego oraz baterii akumulatorów chemicznych. Schemat takiego systemu przedstawiono na rysunku 2.1.



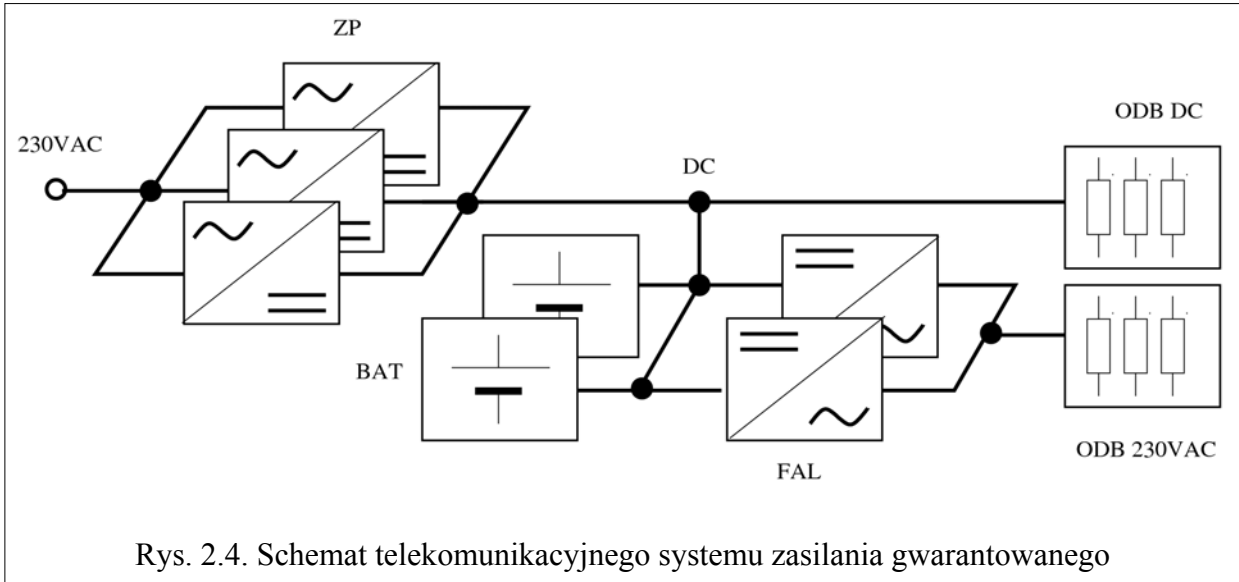
W celu zwiększenia niezawodności zasilania stosuje się w telekomunikacyjnych systemach zasilających dwie baterie akumulatorów i kilka, w zależności od potrzeb, równoległe połączonych ze sobą zespołów prostownikowych, co przedstawiono na rysunku 2.2.

W systemie tym odbiorniki (urządzenia telekomunikacyjne) przyłączone są bezpośrednio do zacisków baterii akumulatorów. Rozwiązanie takie gwarantuje ciągłość zasilania odbiorników w chwili zaniku napięcia sieci elektroenergetycznej.

W szczególnie uzasadnionych przypadkach stosowany jest w systemie zasilania urządzeń telekomunikacyjnych (UT) agregat prądowórczy uruchamiany automatycznie w momencie zaniku napięcia sieci elektroenergetycznej. W takim przypadku rezerwa bateryjna wykorzystywana jest tylko na czas trwania rozruch agregatu prądowórczego. Rozwiązanie takie przedstawiono na rysunku 2.3.



Niekiedy w telekomunikacyjnym systemie zasilania gwarantowanego (TSZG) wymagane jest dodatkowo gwarantowane napięcie przemiennie 230VAC. Stosowany jest wtedy falownik zasilany z napięcia gwarantowanego baterii 48VDC. Schemat takiego układu przedstawiono na rysunku 2.4.



Niekiedy stosowanych jest kilka falowników połączonych równolegle w celu uzyskania właściwej mocy wyjściowej oraz poprawieniu niezawodności układu zasilania 230VAC.

Ze względu na przyjęte znamionowe napięcie gwarantowane 48VDC, przedstawione rozwiązania są typowe dla aplikacji telekomunikacyjnych. Rozwiązanie przedstawione na rysunkach 2.4 i 2.5 posiada właściwości zbliżone do urządzeń typu UPS i może znaleźć szersze zastosowanie

wykraczające poza zastosowania telekomunikacyjne. Zastosowanie falowników powoduje że cały system dostarcza gwarantowanego napięcia przemiennego 230VAC.

2.1. Aspekty eksploatacyjne telekomunikacyjnych systemów zasilania gwarantowanego

Podstawowym elementem TSZG zapewniającym zasilanie rezerwowe jest bateria akumulatorów chemicznych. Od stanu baterii akumulatorów zależy rzeczywisty czas zasilania rezerwowego. W telekomunikacji powszechnie stosowane są baterie akumulatorów ołowiowo-kwasowych w obudowie hermetycznej z zaworem bezpieczeństwa oraz z elektrolitem stałym VRLA (Valve Regulated Lead Acid batteries). W wyniku powszechnego stosowania baterii VRLA zaobserwowany został szereg trudności związanych z ich eksploatacją. Podstawowym wymaganiem eksploatacyjnym dla baterii VRLA są warunki związane z temperaturą pracy. Baterie VRLA projektowane są typowo dla pracy w temperaturze 25degC. Wzrost temperatury pracy baterii o 9degC powoduje spadek jej żywotności o 50%. Wymagana jest także korekcja temperaturowa napięcia ładowania baterii oraz napięcia tak zwanej pracy buforowej. Ponieważ przebieg reakcji chemicznej wewnątrz baterii zależy w znacznym stopniu od temperatury.

Baterie VRLA produkowane są typowo jako pojedyncze ogniwa i poprzez zaciski zewnętrzne łączone w baterie o wymaganym napięciu wyjściowym. Produkowane są także jako bloki o napięciach znamionowych 4V lub 6V lub 12V. Ogniwa połączone są szeregowo wewnątrz obudowy bloku i nie ma dostępu do zacisków poszczególnych ogniw. Ułatwia to budowę baterii o wymaganym napięciu wyjściowym i w przypadku napięcia 48VDC dla urządzeń telekomunikacyjnych potrzebnym jest przykładowo cztery bloki o napięciu 12VDC.

Generalnie zarówno pojedyncze ogniwa VRLA jak i bloki produkowane są o pojemnościach od kilku do kilkuset Ah w zależności od producenta.

Podstawowym problemem występującym w systemach zasilania wyposażonych w baterie VRLA jest brak prostej możliwości pomiaru ładunku dysponowanego baterii. Dodatkowo w przypadku baterii zbudowanej z bloków gdzie nie ma dostępu do zacisków wszystkich ogniw utrudniona jest diagnostyka całej baterii. Pojemność dysponowana baterii akumulatorów jest taka jaka jest pojemność najsłabszego z ogniw.

Dlatego też jedyną miarodajną i dokładną metodą pomiaru pojemności baterii VRLA jest próba wyładowania i ładowania kontrolnego baterii z kontrolą napięcia wszystkich bloków/ogniw baterii.

Kolejnym zjawiskiem występującym podczas eksploatacji baterii VRLA jest proces nierównomiernego rozkładu napięć na poszczególnych ogniwach baterii. Zjawisko to polega na

tym, że na niektórych ogniwach szczególnie w procesie ładowania baterii napięcie jest nieco wyższe natomiast na innych nieco niższe. Suma napięć wszystkich ogniw mierzona na zaciskach całej baterii jest przy tym prawidłowa. Efekt ten powoduje że niektóre ogniwa są notorycznie niedoładowywane, natomiast na innych zbyt wysokie napięcie ładowania powoduje degradację ogniwa i w efekcie trwałą utratę pojemności całej baterii.

Aby przeciwdziałać negatywnym skutkom nierównomiernego rozkładu napięć na poszczególnych ogniwach baterii stosowane są układy wyrównywacze napięć przyłączanych bezpośrednio do zacisków każdego ogniwa/bloku baterii. Działanie układów wyrównywania napięć jest ograniczone w przypadku baterii zbudowanych z bloków, jako że nie ma wtedy dostępu do poszczególnych ogniw baterii.

Aby monitorować i przewidywać nieprawidłowe działanie baterii akumulatorów VRLA korzystne jest zastosowanie komputerowego systemu nadzoru KSN. System ten umożliwia gromadzenie danych pomiarowych o wartości napięcia wszystkich ogniw/bloków baterii oraz temperatury pracy i prądu pracy baterii. System ten umożliwia automatyczne zdalne powiadomienie obsługi o zdarzeniach które mogą wpływać na stan baterii akumulatorów, np. zbyt wysoka temperatura pracy baterii zbyt wysokie napięcie na zaciskach baterii etc. KSN mierzy wielkość ładunku pobranego i dostarczonego do baterii. Dysproporcja tych dwóch wielkości może sugerować obsłudze nieprawidłowe działanie baterii i odpowiednio szybką reakcję zanim nastąpi awaria systemu

Wnioski:

- trudna jest technicznie prawidłowa ocena pojemności dysponowanej baterii VRLA
- wiele prac badawczych wykazuje konieczność stosowania układów wyrównywania napięcia na ogniwach/blokach baterii VRLA, co z kolei podnosi koszt jednostkowy instalacji baterii
- koniecznym jest stosowanie specjalistycznych komputerowych systemów nadzoru i monitoringu baterii. Podnosi to znacząco koszt jednostkowy instalacji baterii VRLA.
- jak pokazuje praktyka stosowanie uproszczonych systemów pomiarowych i nadzoru nie przynosi miarodajnych efektów oceny stanu technicznego baterii
- baterie VRLA zawierają ołów i kwas siarkowy dlatego po zużyciu muszą podlegać procesowi starannej utylizacji.
- baterie VRLA są relatywnie niedrogie i ich parametry elektryczne dobrze są dostosowane do bieżących potrzeb TSZG
- konieczność stosowania układów wyrównywania napięć i KSN znacząco podnosi koszt

jednostkowy instalacji baterii VRLA

- baterie VRLA, ze względu na swoje wady nie zapewniają wysokiego poziomu bezpieczeństwa zasilania w TSZG
- zastosowanie systemu stabilizacji temperatury pracy baterii podnosi poziom bezpieczeństwa zasilania oraz żywotność baterii i koszt jednostkowy instalacji baterii
- Struktura sytemu zasilania przedstawiona na rysunku 2.4 wydaje się być korzystna ze względu na to że system ten dostarcza typowego gwarantowanego napięcia 230VAC, niemniej jednak wymaga odpowiedniego uwarunkowania ekonomicznego

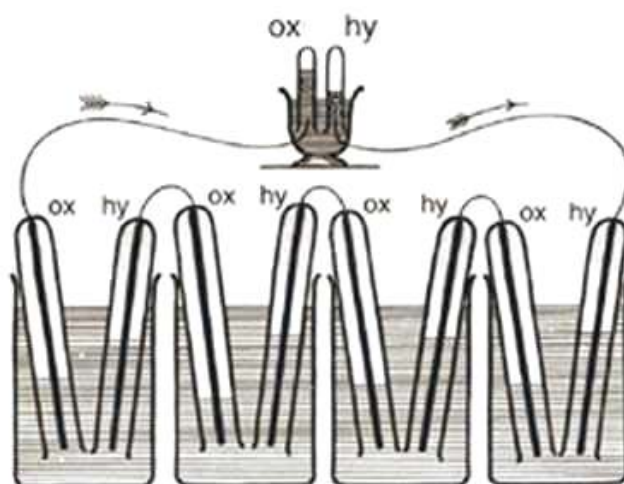
Aby nowy TSZG nie był obciążony wadami baterii akumulatorów VRLA, opracowanie tego systemu oparto o nowoczesne elektrochemiczne źródło energii jakim jest ogniwo paliwowe z membraną wymiany protonów, zasilane wodorem PEMFC.

3. Ogniwa paliwowe PEM jako elektrochemiczne źródła energii w TSZG [1]

Celem rozdziału jest przybliżenie ogniw paliwowych, a w szczególności ogniwa typu PEM. Omówiono w nim historię, budowę, zasadę działania i główne zagadnienia eksploatacyjne. Szerzej opisano zagadnienie sprawności ogniwa paliwowego oraz zamieszczono opis matematyczny ogniwa.

3.1 Historia ogniwa paliwowego

Za konstruktora ogniwa paliwowego powszechnie uważa się Sir Williama Grove'a (1811-1896), brytyjskiego prawnika i sędziego. W 1839 roku prowadził on badania nad roztworem kwasu siarkowego, polegające na elektrolizie roztworu kwasu i obserwowaniu zachodzących zmian. Do elektrolizy wykorzystywał elektrody wykonane z platyny. Wtedy zauważył ciekawe zjawisko: po odłączeniu źródła prądu przepływającego przez roztwór i zwarciu obwodu zaczynał płynąć prąd. Prąd ten płynął w przeciwnym kierunku. W czasie przeprowadzania elektrolizy wydzielal się wodór na katodzie i tlen na anodzie. Gazy te było częściowo absorbowane przez platynowe elektrody. Przy zwartym obwodzie wodór znajdujący się w okolicy elektrody był utleniany, tracąc jednocześnie elektrony. W tym momencie anoda stawała się ujemnym biegunem powstałego źródła energii elektrycznej. Poprzez zwarte przewody elektryczne elektrony płynęły do drugiej elektrody, aby został zredukowany znajdujący się przy anodzie tlen. Niestety powstałe w ten sposób źródło miało bardzo małą pojemność energetyczną i z tego względu nie zostało wprowadzone do produkcji na dużą skalę. Energia w tym źródle była otrzymywana z gazów i dlatego W. Grove nazwał swój wynalazek „baterią gazową”. W celu uzyskania lepszych parametrów elektrycznych baterii opracował w roku 1842 „łańcuch gazowy” (rys. 3.1), czyli połączenie szeregowo kilku baterii gazowych. Niestety i w tym przypadku problemem było zapewnienie ciągłego dopływu gazów do elektrod. Uważając się za prawdziwego naukowca nie planował użycia swojego wynalazku do celów praktycznych. W 1891 roku na obchodach pięćdziesięciolecia społeczności chemicznej, której był współzałożycielem, W. Grove powiedział: „dla mnie nauka przestaje być ciekawa wraz ze znalezieniem jej praktycznego zastosowania”.



Rys. 3.1 Pierwsze ogniwo paliwowe z 1842 roku tworzące tzw. „łańcuch gazowy”

W końcu XIX wieku niemiecki chemik Wilhelm Ostwald zademonstrował, że ogniwo paliwowe ma wyższą sprawność niż silniki pracujące w oparciu o zjawiska cieplne. Zgodnie z jego założeniami w wieku XX miała się rozwinąć technologia spalania chemicznego. Przewidywania naukowca nie sprawdziły się i do dziś ludzkość korzysta z klasycznych metod pozyskiwania energii przez spalanie paliw kopalnych. Dwóch innych naukowców końca XIX wieku, Ludwik Mond (właściciel firmy Brunner Mond przekształconej w ICI) i Karl Langer, opublikowało w 1889 roku nowości i ulepszenia, jakie wprowadzili do swojej poprawionej „baterii gazowej”. Zastosowali oni między innymi elektrody wykonane z porowatego metalu. Jedną z elektrod była wykonana z platyny, a druga ze złotej folii. W efekcie uzyskali przechodzące ich oczekiwania napięcie o wartości 0,73 V, ale wartość uzyskiwanego natężenia prądu płynącego w obwodzie była stosunkowo mała i podczas pracy malała.

Pomimo zachęcających możliwości nowego źródła energii elektrycznej i pracy wielu znanych naukowców, noblistów takich jak Fritz Haber i Walther Nernst, przez wiele dziesięcioleci rozwój ogniwo paliwowych był bardzo powolny. Problemem powodującym znaczne spowolnienie prac badawczych była mała żywotność ogniwa wynikająca z szybkiej korozji elektrod. Zaobserwowano dwa zjawiska występujące w tym samym czasie. Naukowcy musieli znaleźć rozwiązanie problemu szybkiej korozji elektrody tlenowej oraz szybkiego zmniejszania się wartości natężenia prądu. Podczas badań okazało się, że ilość wytwarzanej energii elektrycznej pracującego ogniwa zmniejsza się z powodu „zatrucia” elektrody tlenowej. Problem ten rozwiązano przez zastosowanie uszczelnienia w postaci teflonowej osłony elektrody. Dalsze prace związane z korozją elektrody tlenowej polegały na budowaniu specjalnych naczyń, umożliwiających jak najdokładniejsze odwzorowanie warunków panujących w pracującym ogniwie (temperatura i ciśnienie tlenu), a następnie sprawdzaniu odporności nowych materiałów, które mogłyby być

użyte jako materiał do wykonania elektrody. Testując w ten sposób wiele próbek otrzymano bardzo obiecujący materiał, który był najbardziej odporny na zaistniałe warunki zewnętrzne panujące w komorze. Tym materiałem okazały się szarozielone tlenki niklu. Z badań wynikało, że najlepszym sposobem ograniczenia korozji (stabilizacji reakcji utleniania) elektrod w ogniwie było ich wcześniejsze poddanie utlenianiu. Zabezpieczenie w ten sposób materiału elektrody umożliwiało znaczące wydłużenie żywotności elektrody. Oczywiście natychmiast pojawił się kolejny problem, gdyż w zabezpieczonym w ten sposób materiale warstwa ochronna była jednocześnie izolatorem. W celu ominięcia tej niedogodności zastosowano domieszkowane utlenianie. Najlepsze parametry utrzymano stosując domieszkowanie litem. Uzyskano w ten sposób przewodzącą elektrodę pokrytą warstwą tlenku materiału, odporną na niekorzystne warunki panujące w ogniwie. Problem z reakcjami chemicznymi został rozwiązany i w efekcie tych badań nauka otrzymała nowe hasło „wytrzymałość chemiczna ogniwa”.

Począwszy od 1932 roku Francis Tom Bacon (1904 - 1992) wraz ze swoją grupą z Cambridge powrócił do rozwijania pomysłu ogniwa paliwowego. Sukces przyszedł w 1950 roku, gdy udała się budowa pierwszego ogniwa paliwowego, które mogło znaleźć praktyczne zastosowanie. Pracowało ono z elektrolitem alkalicznym, a jako paliwa używano wodoru. Elektrody były wykonane z porowatego sprasowanego proszku niklowego, aby gaz mógł dyfundować przez elektrodę i być w kontakcie z elektrolitem. Wykorzystanie niklu zamiast platyny znacznie obniżyło koszt wytworzenia elektrod i jednocześnie całego ogniwa. Celem badań było znalezienie niezawodnych i bardzo wydajnych energetycznie źródeł zasilania, które mogłyby być wykorzystywane na statkach kosmicznych i sztucznych satelitach. O wyborze ogniw paliwowych jako źródeł zasilania zadecydowała gęstość mocy i jednoczesne produkowanie wody pitnej. Do dnia dzisiejszego wadą alkalicznych ogniw paliwowych (AFC) jest wysoki koszt budowy i stosunkowo krótki czas życia.

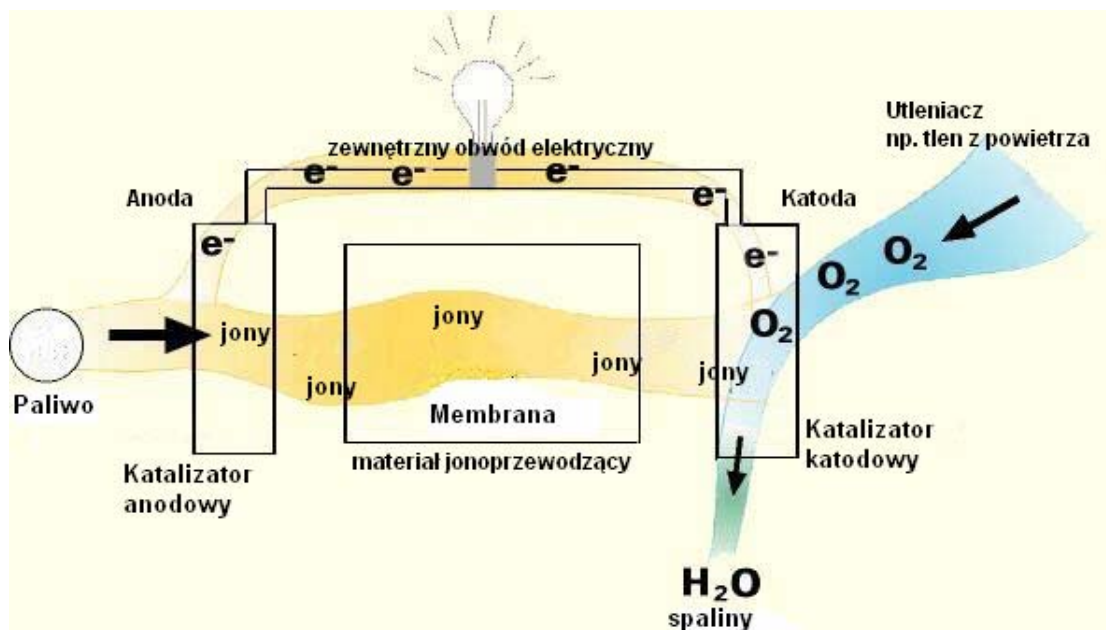
Jako pierwsze znaczące miejsce zastosowania tego typu ogniwa można uznać instalację (model PC3A-2) wykonaną przez Pratt & Whitney Aircraft na statku załogowym Apollo podczas programu kosmicznego w latach 1960-1965, zamówioną przez NASA. Rozwój tej technologii był prowadzony nie tylko w USA, ale praktycznie na całym świecie (byłym ZSRR, Japonii – Fuji Electric Corp. i Mitsubishi Electric Co., Holandii, Belgii – ELENCO N.V., Niemczech – Siemens AG i AEG, Francji, Włoszech – ENEA Research Center w Rzymie, Hiszpanii, Grecji, Portugalii).

3.2 Budowa i zasada działania ogniwa paliwowego typu PEM

Obecnie jest wiele typów ogniw paliwowych, które są jeszcze sferze badań oraz gotowych i działających już instalacji wykorzystujących te źródła energii elektrycznej. Opis budowy i zasady

działania ograniczony będzie do ogniwa ze elektrolitem stałym PEM (Proton Exchange Membrane). Wynika to z faktu, że jest ono obecnie coraz częściej brane pod uwagę przy tworzeniu nowych układów zasilania, również, a może przede wszystkim, w przypadku nowych rozwiązań technologicznych. Chodzi tu głównie o zasilanie urządzeń przenośnych, małych siłowni telekomunikacyjnych, odbiorników energii elektrycznej oddalonych od sieci elektroenergetycznych oraz w „samochodach XXI wieku” itp. Wybór ten motywowany był ponadto prostotą przedstawienia zachodzących w nim reakcji, które są odwróceniem procesu elektrolizy wody. Ich obecna popularność wiąże się także z możliwością zastosowania wielu różnych paliw – mogą być zasilane czystym wodorem oraz paliwami węglowodorowymi, przetworzonymi w procesie reformacji.

Główną i najważniejszą zaletą ogniw paliwowych jest bezpośrednia zamiana energii chemicznej zawartej w paliwie na użyteczną dla nas energię elektryczną. W przeciwieństwie do metod z pośrednictwem ciepła nie występują tu ograniczenia cyklu Carnota. Ogniwo paliwowe jest samo w sobie bardzo proste. Podstawowymi elementami, jakie są potrzebne do zachodzenia w nim reakcji chemicznych i w wyniku tego wytwarzania energii elektrycznej, są dwie elektrody pokryte katalizatorem i znajdujący się pomiędzy nimi elektrolit.



Rys. 3.2. Zasada działania ogniwa paliwowego z membraną polimerową

Oczywiście, aby uzyskać energię elektryczną, należy najpierw dostarczyć do ogniwa paliwo i utleniacz. Do jednej elektrody doprowadzane jest paliwo, a do drugiej tlen bądź powietrze. Elektroda, w której paliwo jest utleniane i wrywane są z niego elektrony jest anodą. Elektrony są

odrywane przez znajdujący się w tej elektrodzie katalizator (platyna Pt). Dodatnio naładowane protony przenoszą się przez elektrolit w kierunku drugiej elektrody, czyli katody. Tlen jest elektrycznie obojętny i w momencie, gdy jest doprowadzony do katody, przechwytuje wolne elektrony przepływające od anody przez zewnętrzny obwód elektryczny. Ujemnie naładowane jony tlenu reagują z protonami wodorowymi wytwarzając w ten sposób czystą wodę. Woda tworząca się w ogniwie jest produktem tych reakcji chemicznych. Dodatkowo podczas utleniania dostarczonego paliwa wydziela się ciepło, które również może być i jest wykorzystywane, aby podnieść w ten sposób sprawność całego systemu. Ogniwa te mają stosunkowo niską temperaturę pracy (do około 80°C). Ciepło to może być dodatkowo użyte np. do podgrzewania wody użytkowej, ogrzewania mieszkań itp.

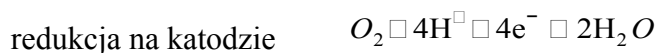
Elektrolit znajdujący się pomiędzy elektrodami jest stały. Obecnie najczęściej stosowanym materiałem jest Nafion®, będący bardzo dobrym przewodnikiem jonów. Jest to cienka folia polimerowa o grubości około 50 do 175 μm , z napyłonymi na nią porowatymi elektrodami. Całość stanowi jeden układ elektroda – membrana – elektroda (EME, lub z angielskiego Membrane Elektrode Assembly MEA). Elektrody są porowate, aby uzyskać możliwie jak największą powierzchnię aktywną elektrody. Jako elektrokatalizator w elektrodach ogniwa ze stałym elektrolitem (PEM) jest stosowana platyna, bądź platyna z dodatkiem innych metali szlachetnych, jak na przykład rut, czy molibden. Membrana wraz z elektrodami jest zamontowana pomiędzy dwiema płytkami ze stali szlachetnej bądź częściej grafitu, które posiadają wydrążone wewnątrz kanały doprowadzające paliwo i utleniacz do membrany oraz wylotowe dla nieużytego gazu i do odprowadzenia wytworzonej wody. Płytki te stanowią jednocześnie zaciski dla odprowadzenia prądu elektrycznego lub są połączeniem pomiędzy dwiema elektrodami sąsiednich membran, gdy mamy stos złożony z wielu cel (rys. 3.3).

Aby uzyskać wyższe napięcie ogniwo paliwowe musi być złożone z wielu połączonych szeregowo cel, tworząc tak zwany stos (ang. stack). Sprawność układu zależy w dużym stopniu od zastosowanego paliwa oraz temperatury.



Rys. 3.3. Rozłożona pojedyncza cewa i cały stos tworzący ogniwo paliwowe; ogniwo paliwowe PEM firmy Heliocentris GmbH

Ogniwa te zasilane są różnymi paliwami, między innymi czystym wodorem, wodorem uzyskanym z reformacji gazu ziemnego, czy metanolem. W przypadku zasilania czystym wodorem zachodzą poniższe reakcje chemiczne:



Jeśli użyjemy metanolu jako paliwa, wówczas musimy najpierw wydzielić wodór przez reformację i w efekcie otrzymujemy wodór zanieczyszczony dwutlenkiem węgla. Poniższe równania przedstawiają wszystkie zachodzące procesy:



Gdy jednak stosujemy gaz ziemny, wówczas jest on najpierw poddany procesowi reformacji w reformerze. Węglowodory (C_nH_m) są egzotermicznie cząsteczkowo oksydowane w obecności

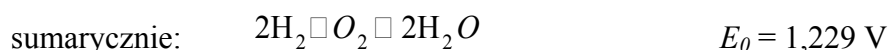
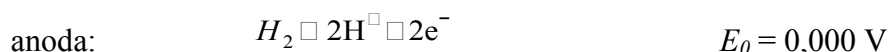
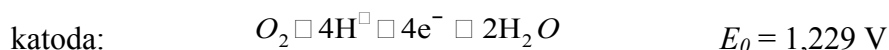
katalizatora z tlenem (O₂) lub endotermicznie reformowane parowo z parą wodną (H₂O). Podczas obu reakcji powstaje dwutlenek węgla (CO₂) oraz wodór (H₂). Gaz ziemny składa się głównie z metanu, więc przedstawiony będzie proces reformacji metanu. Rekcje reformowania:



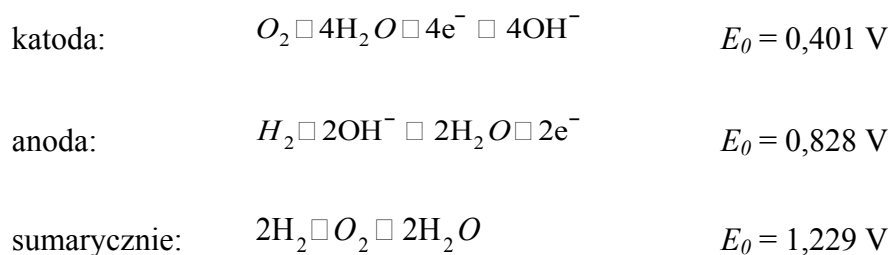
Powstający w wyniku reformacji dwutlenek węgla jest usuwany na zewnątrz, tak samo jak w przypadku stosowania metanolu. Do elektrochemicznej reakcji w ogniwie paliwowym PEM, w końcowej fazie wykorzystywany jest doprowadzony wodór. Reformowanie parowe w porównaniu z cząstkową oksydacją ma tę zaletę, że wodór jest tworzony nie tylko z metanu, lecz także z wody. Współczynnik sprawności reformera jest tym samym większy niż przy cząsteczkowym utlenianiu. Jednak do reformera trzeba dostarczyć pewną ilość ciepła ($\Delta H = +166$ kJ/mol) i wówczas ilość ciepła użytkowego, otrzymywanego z ogniwa paliwowego jest pomniejszona o tę część. Ciepło to mogłoby być wykorzystane na przykład do ogrzewania wody użytkowej. W przypadku małych systemów, aby uniknąć stosowania kosztownego układu chłodzenia (cząstkowe utlenianie), bądź układu podgrzewania reformera (reformowanie parowe), tworzy się kombinację obu tych procesów (reformowanie autotermiczne). Utlenianie metanu-węgla do dwutlenku węgla odbywa się w sposób ciągły, w szeregu reakcji cząstkowych, podczas których tworzony jest nietrwały tlenek węgla CO. Następnie jest on utleniany do dwutlenku węgla w selektywnym utleniaczu z tlenem. Niestety pojawia się tu inny problem. Nadmiar tlenu prowadzi do niepożądanego oksydacji tworzonych wodoru do pary wodnej. Jeśli wilgotność gazu procesowego wzrasta, to napięcie ogniwa, a tym samym i moc, znacznie spada. Wprawdzie do pracy ogniwa paliwowego konieczna jest wysoka wilgotność gazu procesowego, jednak bezpośrednie nawilżanie ogniwa wodą jest rozwiązaniem prostszym z punktu widzenia techniki regulacji.

Poniżej znajdują się równania reakcji chemicznych ogniw paliwowych zachodzących w dwóch różnych elektrolitach.

Elektrolit kwasowy:



Elektrolit alkaliczny:



Jak widać z tych równań możliwe do uzyskania teoretyczne napięcie na zaciskach wynosi 1,229 V niezależnie od środowiska, w którym zachodzą reakcje. Całkowite reakcje elektrochemiczne zachodzące wewnątrz wszystkich typów ogniw paliwowych przedstawionych w równaniach 0.4 i 0.5 można opisać stosując równania Nersta (tabela 3.1).

Tabela .1. Równania Nersta dla reakcji chemicznych zachodzących w ogniwie paliwowym

Reakcja ogniwa (całkowita)	Równanie Nersta
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{p_{H_2}}{p_{H_2O}} + \frac{RT}{2F} \ln \frac{1}{p_{O_2}}$
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 + CO_2 \rightarrow H_2O + CO_2$	$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{p_{H_2}}{p_{H_2O}} + \frac{RT}{2F} \ln \frac{1}{p_{O_2}} + \frac{RT}{2F} \ln \frac{1}{p_{CO_2}}$

gdzie: a – anoda, k – katoda, E – teoretyczna wartość potencjału, E^0 – zmierzona wartość potencjału, p – ciśnienie gazu, R – uniwersalna stała gazowa, T – temperatura.

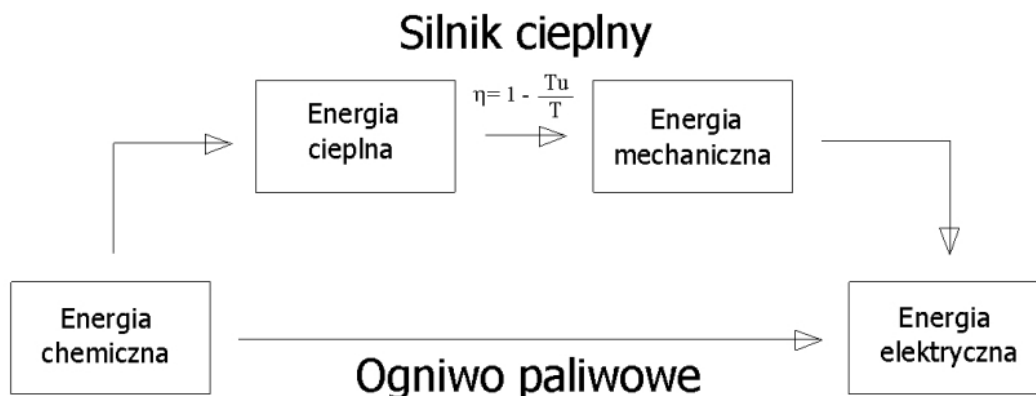
Bardzo ważną zaletą ogniw paliwowych PEM jest brak w nich jakichkolwiek części ruchomych, praktycznie bezszumowa praca oraz stosunkowo niska temperatura. Technologia oparta na ogniwach paliwowych zapewnia przyjazną środowisku, efektywną i cichą pracę. Można je stosować w systemach, które nie będą wymagały skomplikowanych układów nadzoru i kontroli poszczególnych parametrów wewnętrznych urządzenia. Na całym świecie prowadzone są prace badawcze nad wykorzystaniem jej w wielu nowych dziedzinach naszego codziennego życia, w tym również do zasilania telefonów komórkowych, komputerów przenośnych, domów i mieszkań oraz silników elektrycznych, które będą napędzały w przyszłości samochody. Specjaliści oceniają, że zastąpienie tradycyjnych metod wytwarzania energii elektrycznej z węgla przez ogniwa paliwowe powinno zmniejszyć emisję dwutlenku węgla o 40 – 60%, zaś emisję tlenków azotu o 50 – 90%.

3.3 Sprawność ogniw paliwowych

Ogniwa paliwowe dzięki swoim właściwościom są bardzo sprawnymi konwerterami energii chemicznej paliwa na elektryczną. Zamiana energii może przebiegać ciągle bez żadnych dodatkowych termicznych i mechanicznych stanów przejściowych. Ogniwa paliwowe nie podlegają ograniczeniom wynikającym z cyklu Carnota (0.16), dlatego ich sprawność elektryczna jest dużo wyższa, niż uzyskuje się w układach konwencjonalnych wytwarzających energię elektryczną.

$$\eta = 1 - \frac{T_U}{T} \quad (T_U < T) \quad (0.16)$$

Obecnie produkowane ogniwa paliwowe uzyskują sprawność elektryczną na poziomie 40 – 65%. Na rys. 3.4 pokazano porównanie przemian energetycznych zachodzących w ogniwie paliwowym i w generatorze z silnikiem spalinowym.



Rys. 3.4. Łącuch przemian energii zawartej w paliwie dla silnika cieplnego i ogniwa paliwowego

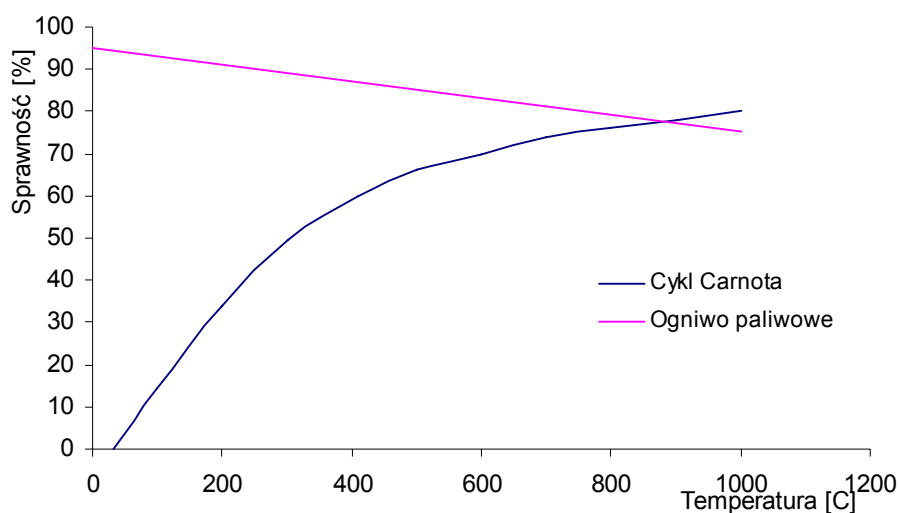
Sprawność elektryczna ogniw paliwowych jest zdefiniowana jako stosunek generowanej energii elektrycznej do ciepła reakcji chemicznej (0.17).

(0.17)

Ogniwa paliwowe umożliwiają zamianę entalpii swobodnej reakcji całkowicie na energię elektryczną. Otrzymujemy więc teoretyczną sprawność elektryczną (sprawność Gibbsa):

$$\eta_{rev} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - T \frac{\Delta S}{\Delta H} \quad (0.18)$$

Gdy entalpia i entropia są tylko nieznacznie zależne od temperatury wówczas sprawność Gibbsa (0.18) jest funkcją liniową (zależność od temperatury), co przedstawiono na rys. 3.5.



Rys. 3.5. Porównanie sprawności teoretycznej w ogniwie paliwowym i cyklu Carnota

Mierzona sprawność procesu elektrochemicznej konwersji energii w rzeczywistym ogniwie paliwowym jest sprawnością elektrochemiczną lub napięciową (0.19).

(0.19)

W równaniu (0.19) U_K oznacza aktualnie mierzoną wartość napięcia, które jest zawsze niższe od teoretycznego (U_{rev}) i zależy od prądu obciążenia. Niższa wartość napięcia spowodowana jest stratami procesu katalitycznego, ograniczoną zdolnością gazu do przenikania elektrod oraz stratami na rezystancji wewnętrznej elektrolitu i styku z elektrodami.

$$\eta_u^* = \eta_{rev} \eta_u = \frac{\Delta G}{\Delta H} \cdot \frac{-nFU_K}{\Delta G} = \frac{-nFU_K}{\Delta H} \quad (0.20)$$

Jeśli zdefiniujemy napięcie elektryczne dla $\Delta H = H_u$ i podstawimy do równań (0.14) i (0.20) otrzymujemy:

$$\eta_u^* = \frac{U_K}{U_{H_u}} \quad (0.21)$$

W normalnych warunkach pracy dalsze straty wynikają z niepełnego zużycia paliwa. Jest to określane mianem sprawności prądowej (0.22).

$$\eta_l = \frac{I}{I_{th}} \quad (0.22)$$

gdzie: I – prąd mierzony, I_{th} – prąd teoretyczny wynikający z ilości dostarczonego paliwa.

Całkowitą rzeczywistą sprawność ogniwa paliwowego określa równanie (0.23).

(0.23)

Obliczając sprawność całego układu z ogniwem paliwowym należy uwzględnić również dodatkowe straty, wynikające ze zużycia energii przez urządzenia dodatkowe (pompy, sprężarki, itp.). Ostatecznie otrzymujemy:

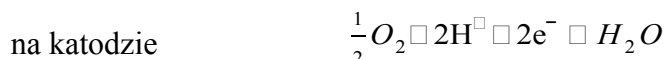
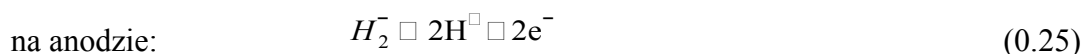
(0.24)

W praktyce ogniwa paliwowe uzyskują najlepszą sprawność nie przy wartościach znamionowych, ale poniżej tych wartości. Nadmierne zwiększanie obciążenia powoduje powstawanie dodatkowych strat cieplnych, urządzenia dodatkowe muszą zużywać więcej energii, co uniemożliwia uzyskanie lepszej sprawności.

3.4. Ogniwo paliwowe z membraną wymiany protonów (Polymer Exchange Membrane Fuel Cell – PEMFC)

Elektrolitem w tego typu ogniwach jest stała polimerowa membrana wymiany jonowej, która jest bardzo dobrym przewodnikiem protonów. Można powiedzieć, że membrana ta jest sercem całego ogniwa. Doprowadzany do anody wodór jest katalitycznie rozbijany na protony wodorowe (H^+) i elektrony. Elektrony są pozyskiwane przez znajdujący się w tej elektrodzie katalizator, natomiast dodatnio naładowane protony przenikają przez elektrolit w kierunku drugiej elektrody. Doprowadzany do katody tlen jest elektrycznie obojętny, ale przechwytuje wolne elektrony dopływające przez zewnętrzny obwód elektryczny. Ujemnie naładowane jony tlenu reagują w elektrolicie z protonami wodorowymi, dopływającymi przez elektrolit z anody. W wyniku tej reakcji wytwarzana jest czysta woda. Woda, tworząca się w ogniwie, jest usuwana po stronie katody wraz z nadmiarem powietrza.

Reakcje zachodzące w ogniwie:

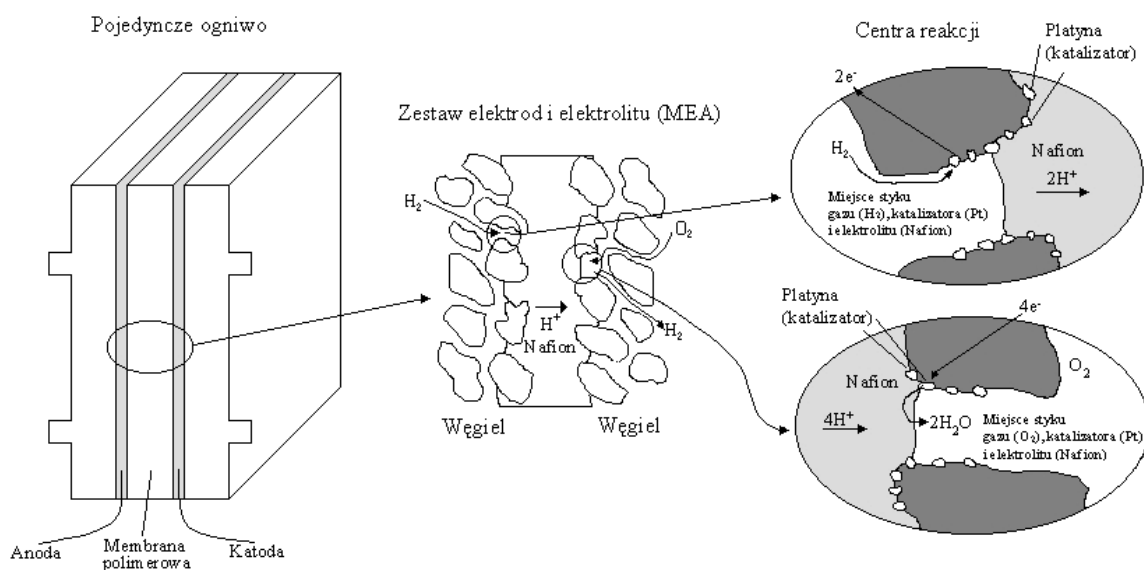


W ogniwie PEM jedyną cieczą jest czysta woda (produkt zachodzących reakcji chemicznych), dzięki czemu problemy związane z korozją poszczególnych elementów są minimalne. Stopień nawilżenia membrany ma jednak poziom krytyczny i dla uzyskania dużej sprawności ogniwo paliwowe musi pracować w stanach, gdzie woda nie może odparowywać

szybciej, niż jest produkowana. Membrana podczas pracy musi być cały czas nawilżona, a jeśli nie dotrzyma się tego warunku można doprowadzić w bardzo krótkim czasie do jej całkowitego uszkodzenia. Odwodnienie membrany wpływa na przewodnictwo protonów, zaś nadmiar wody doprowadza do zalania porów elektrod.

Ze względu na ograniczenie temperatury pracy polimerów i problemy z gospodarką wodną w membranie temperatura pracy ogniw PEM nie przekracza wartości 100°C. Jako paliwo wymagane jest stosowanie gazów bogatych w wodór, z niewielką zawartością lub bez szkodliwego tlenku węgla (CO).

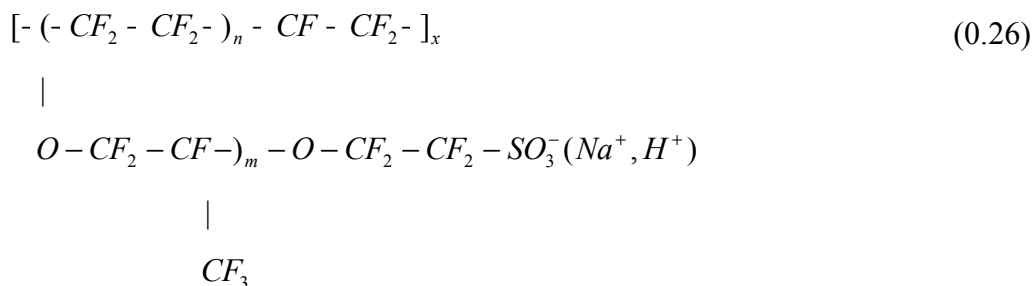
Anoda i katoda są elektrodami gazowymi wykonanymi z porowatego węgla, posiadają warstwę hydrofobową, czyli nie przyjmującą wody. W większości przypadków jako katalizator w obu elektrodach stosowana jest platyna (Pt) lub platyna w połączeniu z innymi metalami, jak np. molibdenem (Mo), rutem (Ru). Stosowanie samej platyny nie jest korzystne ze względu na koszt. Jednak jest ona najlepszym katalizatorem dla procesu utleniania wodoru i reakcji redukcji tlenu. Ziarna platyny mają średnicę 2 – 5 nm, a jej ilość maleje wraz z rozwojem tej technologii i wynosi obecnie nawet 0,05 mg/cm². Aby uzyskać jak najlepszy kontakt przewodnika protonów i prądu elektrycznego elektroda i membrana jest poddawana procesowi impregnacji.



Rys. 3.6. Struktura wewnętrzna na styku membrany i elektrody

Membrana pełni w ogniwie dwie funkcje. Po pierwsze jest środowiskiem przewodzącym jony, po drugie – separatorem gazów doprowadzanych do elektrod. Membrana, jak wcześniej wspomniano, jest wykonana ze specjalnego materiału o nazwie Nafion®, który zaczęto badać od 1960 roku. Składa się on z polimerów fluorowęglowych przypominających teflon (politetrafluoroetanu PTFE, $-(CF_2CF_2)-n$) z domieszką kwasów. Molekuły grupy kwasów sulfonicznych ($\sim SO_3H$) są chemicznie dołączone do łańcucha węglowego polimeru. W ten sposób

powstaje materiał będący bardzo dobrym przewodnikiem jonów (protonów). Taka struktura zapewnia brak jakichkolwiek ubytków podczas długotrwałego użytkowania. Dzięki brakowi migracji elektrolitu czas życia ogniwa może osiągać nawet 50000 godzin. Folia polimerowa ma grubość 50 – 175 μm. Na folię są napyłone elektrody. Całość stanowi jeden układ elektroda – membrana – elektroda (EME, lub z ang. Membrane-Elektrode-Assembly MEA). Membrany do ogniw paliwowych produkowane są przez firmę DuPont, która prowadzi w dalszym ciągu badania nad polepszeniem ich właściwości. Poniżej przedstawiono strukturę chemiczną Nafionu®.



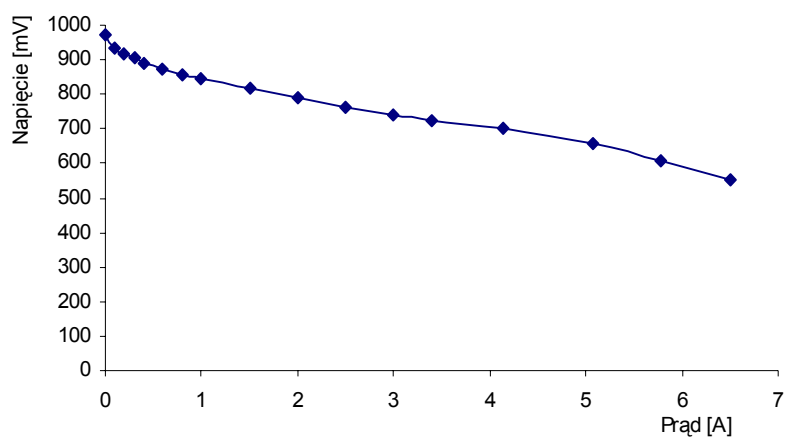
gdzie: $n \in [5 \div 15]$, $x \approx 1000$, $m \in [1 \div 5]$.

Nafion® nie jest jedyną membraną do ogniw tego typu. Membraną przewodzącą protony jest również membrana o nazwie Dow stworzona w Dow Chemical Company, czy Aciplex-S® z firmy Asahi Chemical Industry Company.

Podczas pracy ogniwa, jako produkt zachodzących reakcji, tworzy się woda. Membrana jest więc w stałym kontakcie z przepływającą wodą i w ten sposób jest ciągle nawilżana. Niestety stopień nawilżenia jest bardzo mały, a dokładnie jest o około 10 – 15 razy mniejszy od poziomu, jaki powinien być zachowany. Tym samym membrana pracuje z krytycznym poziomem znajdującej się w niej wody. W momencie gdy poziom nawilżenia membrany zaczyna się obniżać pogarszają się dość znacznie parametry wyjściowe ogniwa i otrzymujemy mniejszą ilość energii elektrycznej. Stan taki jest niebezpieczny także dla samej membrany, gdyż praca w takich warunkach może doprowadzić do trwałego i nieodwracalnego jej uszkodzenia.

Ogniwo typu PEMFC ma tę przewagę nad ogniwami typu PAFC oraz MCFC, że dostarcza większy prąd przy tym samym napięciu wyjściowym i przy tych samych rozmiarach, co pozostałe technologie. Jest to jednak możliwe jedynie przy zasilaniu ogniwa PEM czystym wodorem. W przypadku innych paliw, takich jak reformowane paliwa węglowodorowe, sprawność systemów wyposażonych w ogniwa typu MCFC, PAFC oraz SOFC jest już wyższa. Ogniwa PEM mogą być zasilane paliwami węglowodorowymi bez usuwania lub recyrkulacji produktów reakcji reformacji. Podczas reformacji powstały tlenek węgla (CO) musi być zamieniony na dwutlenek węgla (CO₂) zanim gaz zostanie podany do ogniwa, gdyż anoda może zostać „zatruta” przez te zanieczyszczenia. Pogarszają się wtedy znacznie parametry wyjściowe. Gęstość prądu uzyskiwana w ogniwie typu

PEM dochodzi nawet do 2 A/cm^2 , jednak osiągnięta jest tylko w układach laboratoryjnych. W praktyce wartość ta nie przekracza $0,5 \text{ A/cm}^2$. Teoretyczna wartość napięcia na zaciskach nieobciążonego ogniwa zasilanego wodorem powinna wynosić $1,23 \text{ V}$ (jest to minimalne napięcie potrzebne do elektrolizy wody). Straty powodowane przez reakcję wsteczną, rezystancję wewnętrzną i niezbyt wydajną dyfuzję gazów w praktyce pozwalają osiągnąć napięcie nie wyższe niż 1 V (DC) (rys. 3.8).



Rys. 3.7. Charakterystyka zewnętrzna jednej celi ogniwa z membraną PEM (powierzchnia elektrody 25 cm^2)

Ogniwa PEM mogą być chłodzone zarówno powietrzem z otoczenia, jak i cieczą. W układach zasilania, w których dąży się do minimalizacji rozmiarów zewnętrznych, stosuje się ogniwa chłodzone płynem. Taki rodzaj odbierania nadmiaru ciepła umożliwia znaczne zmniejszenie gabarytów samego ogniwa; jednocześnie likwiduje się hałas wywołany przez wentylatory. Nadmiar energii cieplnej może być użyty również do kogeneracji energii cieplnej i elektrycznej, chociaż nie poprawi to w dużym stopniu sprawności całego systemu, gdyż temperatura pracy jest zbyt niska. Stwierdzono po wielu latach badań, że najlepszą wartością temperatury dla ogniwa i zachodzących w nim procesów jest 80°C . W przypadku korzystania z powietrza z otoczenia, tlen potrzebny do reakcji chemicznych podawany jest pod ciśnieniem atmosferycznym. Podawanie go pod większym ciśnieniem zwiększa wydajność ogniwa, ale zmniejsza ogólną sprawność systemu i podnosi koszty.



Rys. 3.8. Wygląd obecnie produkowanego modułu Nexa™ z ogniwo paliwowym typu PEM firmy Ballard

Wnioski

W rozdziale została szczegółowo omówiona budowa i zasada działania ogniw paliwowych. Szczególny nacisk położono na ogniwo z membraną wymiany protonów (rys. 3.8). Zostały przytoczone równania opisujące sprawność ogniwa paliwowego.

Podsumowując można powiedzieć, że do zalet, które skłoniły autora do zainteresowania się tego typu ogniwem, należą:

- brak żrących cieczy i konieczności ich uzupełniania,
- prosta budowa,
- odporność na znaczne zmiany ciśnienia gazów,
- praktycznie nieistniejący problem korozji materiałów i długi czas życia,
- dobra dynamika,
- akceptowalne temperatury pracy.

Niestety ogniwa PEM mają również wady. Membrana i ogniwo są stosunkowo drogie, poziom nawilżenia membrany ma znaczenie krytyczne dla efektywności pracy, ogniwo łatwo ulega zniszczeniu pod wpływem tlenku węgla.

4. Telekomunikacyjny system zasilania gwarantowanego z ogniwo paliwowym PEMFC

W niniejszym rozdziale przedstawione zostaną założenia konstrukcyjne które zostały wykorzystane przy budowie nowego systemu zasilania opartego o ogniwa paliwowych zasilane wodorem:

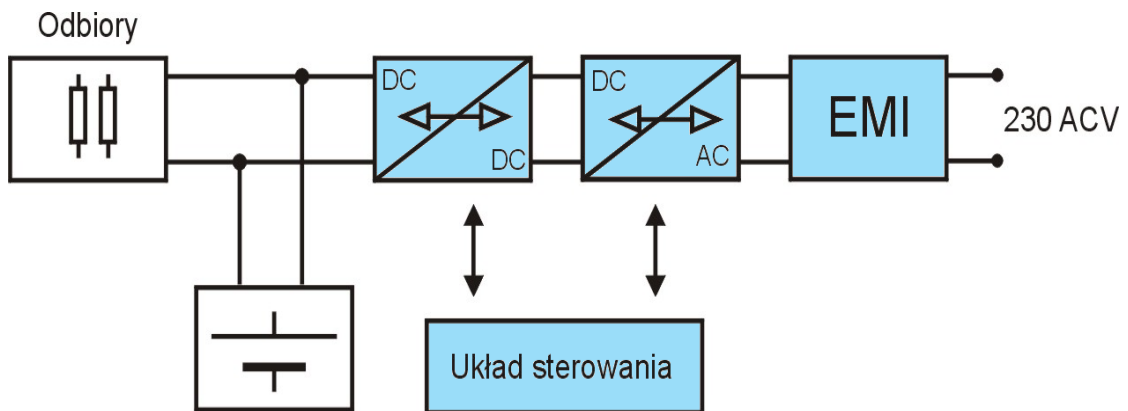
- system dostarcza gwarantowanego napięcia przemiennego 230VAC
- podstawowym niezależnym źródłem napięcia gwarantowanego jest ogniwo paliwowe zasilane wodorem PEMFC
- wszystkie inne źródła energii w systemie zintegrowane są na napięciu przemiennym 230VAC
- system umożliwia współpracę z odnawialnymi źródłami energii: ogniwami forowoltaicznymi oraz generatorem wiatrowym
- energoelektronicznego szybkiego łącznika sieciowego S1

Na rysunku 4.1. przedstawiono schemat struktury nowego systemu zasilania urządzeń telekomunikacyjnych. System składa się z następujących podzespołów:

- ogniwa paliwowego Nexa firmy Ballard zasilanego wodorem PEMFC
- dedykowanego falownika FAL zasilającego odbiorniki prądu stałego energią z ogniwa paliwowego
- dwukierunkowego urządzenia zasilającego DUZ współpracującego z baterią akumulatorów sodownikowych lub niklowokadmowych BAT.

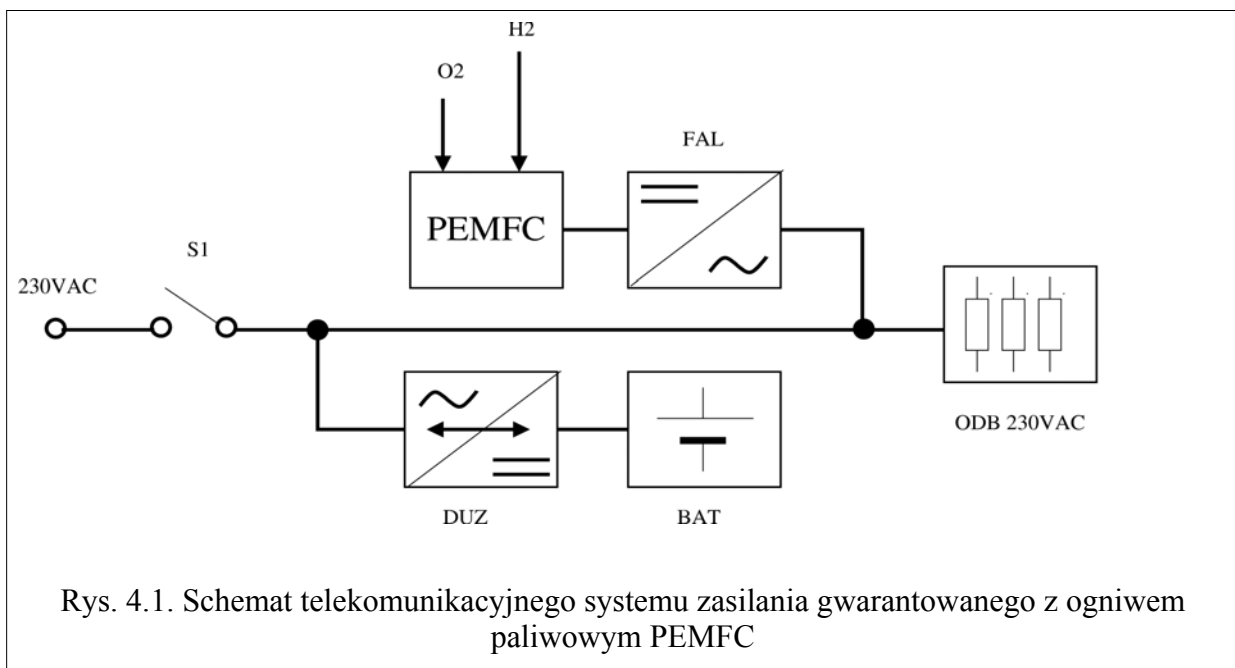
Dwukierunkowe urządzenie zasilające umożliwia, w zależności od sygnałów sterujących, ładowanie baterii akumulatorów chemicznych lub zwrot zgromadzonej w baterii akumulatorów energii do systemu elektroenergetycznego 230VAC. Dwukierunkowe urządzenie zasilające zostało opracowane i wykonane w ramach wcześniejszej pracy badawczej prowadzonej w Zakładzie Systemów Zasilania IŁ. DUZ przy współpracy z baterią akumulatorów sodowo-niklowych 48VDC tworzy układ magazynowania energii pracujący na napięciu 230VAC.

Budowę i układ pracy DUZ przedstawiono na rysunku 4.0.



Rys.4.0 Budowa i układ pracy dwukierunkowego urządzenia zasilającego DUZ wykorzystanego do budowy nowego systemu zasilania.

Schemat blokowy systemu przedstawiono na rysunku 4.1



Rys. 4.1. Schemat telekomunikacyjnego systemu zasilania gwarantowanego z ogniwem paliwowym PEMFC

Działanie układu jest następujące. Podczas pracy systemu z sieci elektroenergetycznej łącznik S1 jest zamknięty, odbiorniki zasilane są bezpośrednio z sieci. W momencie zaniku napięcia sieciowego odbiorniki zasilane są z baterii akumulatorów BAT za pośrednictwem dwukierunkowego urządzenia zasilającego DUZ. Rozruch ogniwa paliwowego trwa ok 50 sek. po tym czasie odbiorniki zasilane są z ogniw paliwowych. Dysponowany czas rezerwy zależy wtedy

wyłącznie od ilości zgromadzonego paliwa wodorowego. Możliwy jest tryb pracy w którym ogniwo paliwowe jest cały czas w stanie gotowości i zasilanie odbiorników odbywa się bezprzerwowo bez udziału DUZ i baterii akumulatorów chemicznych.

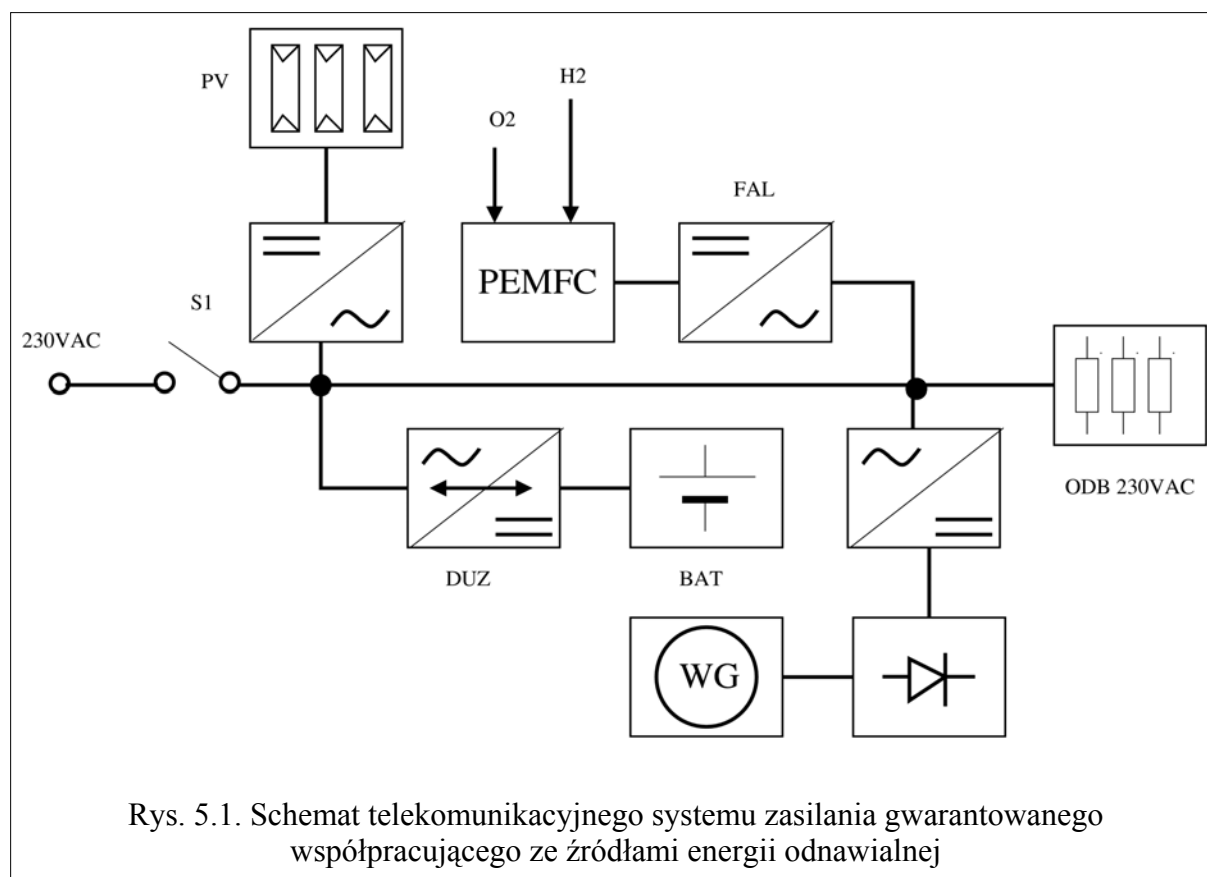
Wnioski:

- podczas zasilania odbiorników z ogniwa paliwowego możliwe jest teoretycznie zasilanie odbiorników prądu przemiennego 230VAC oraz jednoczesne ładowanie baterii akumulatorów chemicznych za pośrednictwem DUZ.
- energoelektroniczny łącznik S1 powinien mieć dynamikę zapewniającą komutację w czasie krótszym niż 10ms.
- korzystnym jest aby napięcie znamionowe baterii akumulatorów współpracującej z DUZ było znacznie wyższe niż typowo 48VDC spowoduje to niższe prądy wyładowania baterii i poprawi sprawność układu.
- Dysponowana rezerwa zasilania w systemie nie zależy od ładunku zgromadzonego w baterii akumulatorów BAT ani do jej stanu technicznego.
- Minimalna rezerwa energii zgromadzonej w baterii chemicznej wymagana jest na czas uruchomienia ogniwa paliwowego. Dotyczy to wyłącznie trybu pracy w którym ogniwo paliwowe jest wyłączone i uruchamiane po zaniku napięcia sieci elektroenergetycznej.

5. Współpraca nowego systemu zasilania z odnawialnymi źródłami energii (OZE).

Aby umożliwić współpracę nowego systemu zasilania z baterią ogniw fotowoltaicznych i generatorem z silnikiem wiatrowym, opracowany został układ w którym wszystkie pracujące w systemie źródła energii elektrycznej zintegrowane są na napięciu przemiennym 230VAC.

Schemat nowego systemu zasilania współpracującego z odnawialnymi źródłami energii przedstawiono na rysunku 5.1.



System składa się z tych samych podzespołów co układ z rysunku 4.1. Dodatkowo zawiera baterię słoneczną PV oraz układ falownika współpracujący z PV, a także generator synchroniczny trójfazowy z silnikiem wiatrowym WG. Aby zapewnić współpracę tego generatora z układem falownika zastosowano układ prostownika sześciopulsowego z filtrem pojemnościowym, układ ten na rysunku 5.1 oznaczono prostokątem z symbolem diody.

Działanie układu jest następujące. W czasie kiedy odbiorniki zasilane są z sieci elektroenergetycznej lub jeżeli łącznik S1 jest otwarty i odbiorniki zasilane są z ogniwa paliwowego układy falowników baterii fotowoltaicznej i generatora wiatrowego umożliwiają

przekazywanie energii do odbiorników. Pobór energii z falownika ogniwa paliwowego jest mniejszy o ilość energii dostarczanej do odbiorników przez odnawialne źródła energii. W skrajnym przypadku kiedy ilość energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych jest większa niż zapotrzebowanie odbiorników, ogniwa paliwowe nie są obciążane a nadmiar energii jest gromadzony w baterii akumulatorów chemicznych za pomocą DUZ.

W czasie kiedy system pracuje z sieci elektroenergetycznej (łącznik S1 jest zamknięty) istnieje możliwość przekazywania wyprodukowanej w OZE energii do elektroenergetycznej sieci zasilającej.

5.1. Warunki pracy systemu zasilania z OZE [2]

Źródła odnawialne wykorzystujące energię słońca i wiatru są w znacznej mierze nieprzewidywalne na przestrzeni niedługiego odcinka czasu. Łatwo jest oszacować z dobrym przybliżeniem roczny bilans produkcji energii, natomiast trudno jest dokładnie określić produkcję energii na najbliższy tydzień, miesiąc. Może to mieć szczególne znaczenie w odniesieniu do wyspowych systemów zasilania gwarantowanego.

Aby uniknąć niedoboru energii pochodzącej ze słońca i wiatru korzystne jest zastosowanie dodatkowego, w pełni sterowanego źródła, gwarantującego ciągłość zasilania odbiorów [1]. Dotyczy to systemów nie współpracujących z elektroenergetyczną siecią zasilającą, które będą dalej nazywane systemami off-grid.

W przypadku, kiedy siłownia fotowoltaiczna współpracuje z elektroenergetyczną siecią zasilającą, system jest nazywany on-grid. Siłownia ma wtedy możliwość przekazywania nadwyżek wytwarzanej energii do tejże sieci, a także/lub pokrywać niedobory energii z baterii słonecznych.

W momencie deficytu energii z OZE, system umożliwia zasilenie odbiorników DC z sieci prądu przemiennego oraz kontrolowane ładowanie baterii za pomocą DUZ. W czasie kiedy bateria akumulatorów jest w pełni naładowana lub jest ładowana prądem maksymalnym, nadmiar energii z OZE przekazywany jest do sieci prądu przemiennego (230VAC).

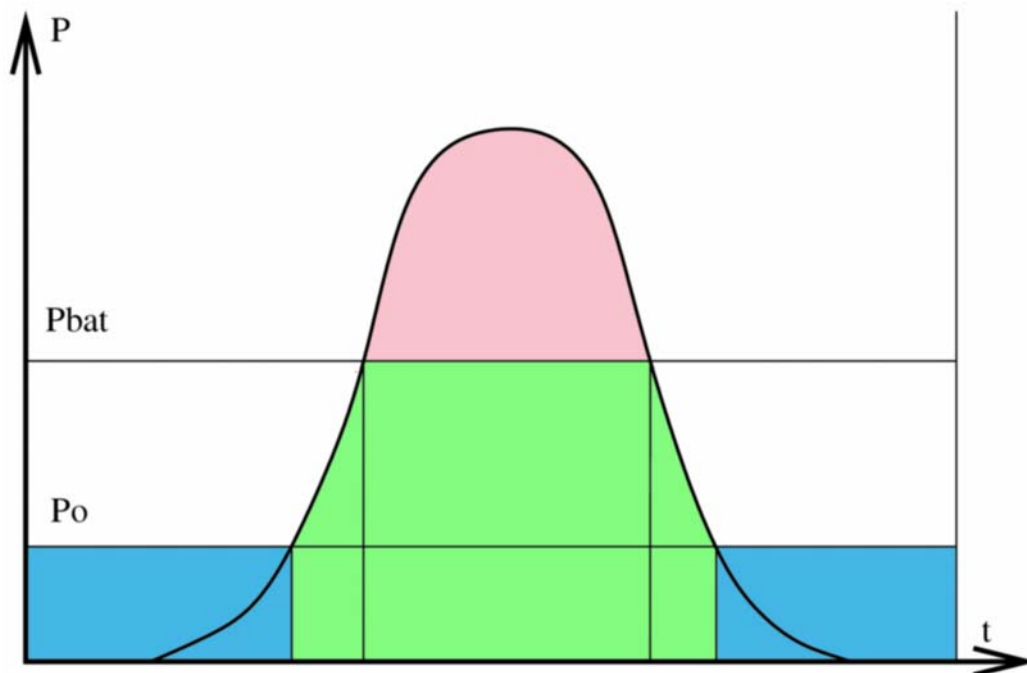
W przykładowym, dziennym cyklu pracy siłowni fotowoltaicznej (rys. 2.2) widać okresy nadmiaru i niedoboru wytwarzanej energii. Siłownie fotowoltaiczne projektowane są zazwyczaj tak, że moc szczytowa ogniw fotowoltaicznych jest kilka, kilkanaście razy większa od mocy wymaganej przez odbiornik. Jak wynika z rysunku 5.2 moc baterii słonecznych powinna umożliwić jednoczesne zasilenie odbiornika i ładowanie baterii chemicznej, z której odbiornik jest

zasilany w momencie niedoboru energii słonecznej.

Zawsze przy tego typu założeniu występuje pewien nadmiar energii, którego nie można zmagazynować w baterii akumulatorów, ani wykorzystać w odbiorniku. Można natomiast przekazać tę energię do elektroenergetycznej sieci zasilającej.

Na rysunku nr 5.3 pokazano przykładowy, orientacyjny charakter produkcji energii w siłowni fotowoltaicznej na przestrzeni roku w poszczególnych miesiącach oraz zaznaczono stałą wartość stosunku mocy wytworzonej P do mocy wymaganej przez odbiornik P_o .

Z rysunku 5.3 wynika, że w miesiącach letnich występuje nadmiar produkowanej przez



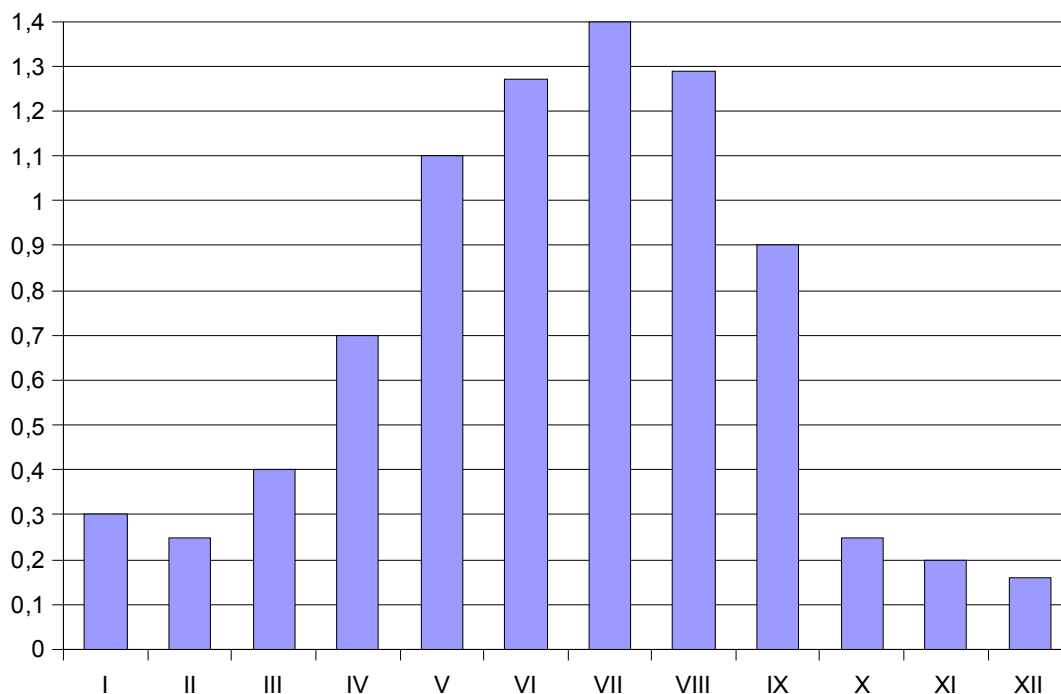
Rys. 5.2 Przykładowy dzienny cykl pracy siłowni fotowoltaicznej, P_o – moc wymagana przez odbiornik, P_{bat} – moc wymagana przez odbiornik oraz maksymalne ładowanie baterii akumulatorów, kolor niebieski – obszar niedoboru energii, kolor zielony – energia wymagana przez odbiornik i ładowanie baterii, kolor czerwony – nadwyżka energii.

baterie słoneczne energii, a w miesiącach zimowych jej niedobór. Jeżeli układ siłowni zostanie znacząco przewymiarowany np. tak, aby ilość energii produkowanej w zimie pokrywała z zapasem potrzeby odbiorów, wtedy występuje latem znacząca nadprodukcja energii. Jeżeli chcemy przekazać ten nadmiar energii do sieci, to układ falownika powinien być dobrany stosownie do

mocy szczytowej siłowni fotowoltaicznej.

Wielokrotne przewymiarowanie baterii słonecznych umożliwiające zasilanie odbiorów i

P/P_o



ładowanie baterii chemicznej w miesiącach jesienno - zimowych znacząco podnosi koszty instalacji. W takim przypadku bardziej korzystny jest układ siłowni współpracujący z elektroenergetyczną siecią zasilającą, umożliwiając dwukierunkowy przepływ energii pomiędzy siłownią fotowoltaiczną a siecią zasilającą AC.

Przewymiarowanie mocy OZE oznacza, że moc szczytowa uzyskiwana z baterii słonecznych jest kilka razy większa od zapotrzebowania mocy odbiorników. W takim układzie występować będzie znaczący nadmiar energii wytwarzanej w ogniwach fotowoltaicznych, szczególnie w miesiącach letnich. Dzięki zastosowaniu falownika możliwe jest wykorzystanie tej wytwarzanej nadmiarowo energii przez przekazanie jej do sieci zasilającej prądu przemiennego.

6. Podsumowanie i wnioski końcowe

W ramach pracy wykonano eksperymentalny system zasilania urządzeń telekomunikacyjnych wykorzystujący ogniwa paliwowe zasilane wodorem PEMFC, w układzie zastosowano dwa moduły Nexa firmy Ballard o mocy 1200W każdy. Układ pracy systemu przedstawiono na rysunku 4.1. Zaproponowane rozwiązanie umożliwia współpracę z OZE w układzie jak na rysunku 5.1. Pozytywne wyniki badań układu modelowego pokazują jednoznacznie możliwość praktycznej implementacji takiego systemu.

Wykonany układ modelowy dostarcza gwarantowanego napięcia przemiennego 230VAC podobnie jak układy UPS. Powoduje to znaczne poszerzenie kręgu potencjalnych odbiorców tego typu systemów daleko poza zastosowania telekomunikacyjne.

Zastosowanie w układzie PEMFC zasilanych wodorem powoduje że system ten nie jest obciążony problemami eksploatacyjnymi związanymi z zastosowaniem baterii ołowiowo-kwasowej VRLA.

Opracowany i wykonany eksperymentalny układ siłowni oraz wyniki badań pokazują że praca została wykonana w całości a cel pracy osiągnięto.

Wnioski:

- Zastosowanie w systemie zasilania PEMFC zasilanych wodorem umożliwia bezprzerwowe zasilanie odbiorników eliminując jednocześnie aspekty związane z eksploatacją baterii akumulatorów VRLA.
- Zastosowanie PEMFC podnosi znacząco bezpieczeństwo zasilania w systemie eliminując jednocześnie potrzebę stosowania agregatów prądotwórczych.
- Zastosowanie dodatkowej baterii akumulatorów chemicznych sodowo-niklowych lub niklowo-kadmowych w połączeniu z DUZ umożliwia magazynowanie energii wytwarzanej nadmiarowo w OZE.
- Zastosowanie baterii niklowo-kadmowej jest korzystniejsze w układzie którym moc szczytowa OZE jest wielokrotnie większa od mocy szczytowej odbiorników. Bateria ta pozwala na wielokrotnie większe prądy ładowania.
- Zastosowanie struktury systemu w którym wszystkie źródła zintegrowane są na napięciu przemiennym 230VAC umożliwia równomierny pobór mocy ze wszystkich źródeł o różnych wydajnościach chwilowych.
- Struktura systemu umożliwia rozbudowę lub alternatywne wykorzystanie układów np kogeneracji lub innych źródeł energii

- Podstawową trudnością w eksploatacji systemów z PEMFC zasilanych wodorem jest brak legislacji prawnych odnośnie użytkowania wodoru w butlach pod ciśnieniem. Sytuacja ta powoduje że wymagane są opinie specjalistów i warunki techniczne związane z bezpieczeństwem instalacji wodorowych.

[1] P.Biczel “**Optymalne wykorzystanie pierwotnych nośników energii na przykładzie hybrydowej elektrowni słonecznej z ogniwami paliwowymi**” rozprawa doktorska Politechnika Warszawska 2003

[2] R.Samborski “**Dwukierunkowy układ przekazywania energii z przetwornicą Cuk'a w fotowoltaicznych i wiatrowych systemach zasilania**” rozprawa doktorska Politechnika Warszawska 2006