

NOWOCZESNE ELEKTROWNIE FOTOWOLTAICZNE Z ZASOBNIKAMI ENERGII POŁĄCZONE Z SYSTEMEM ELEKTROENERGETYCZNYM

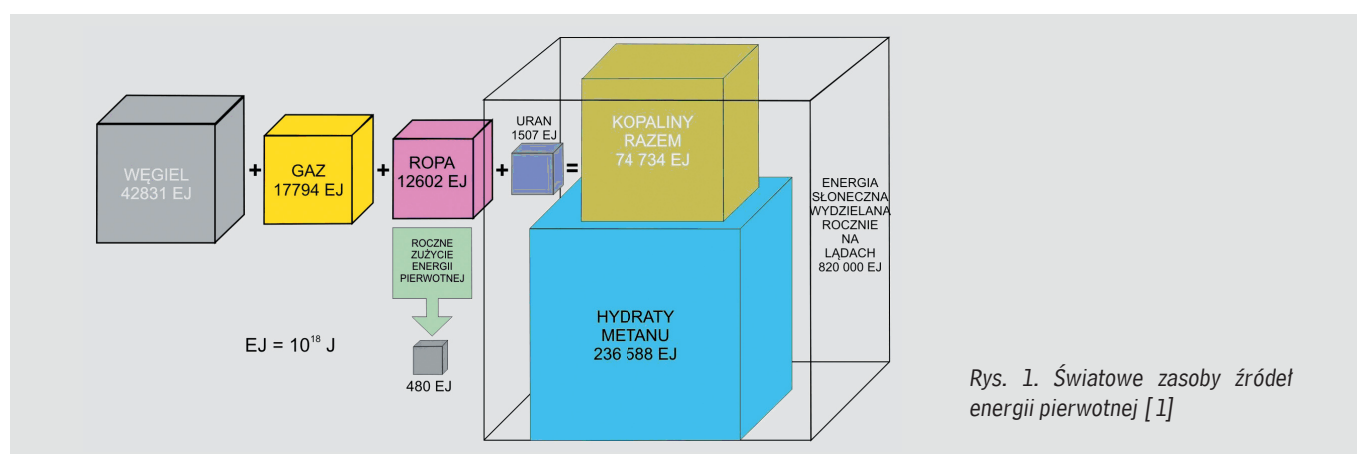
prof. dr hab. inż. Antoni Dmowski / Politechnika Warszawska
mgr inż. Kamil Kompa / Politechnika Warszawska
mgr inż. Łukasz Roślaniec / Politechnika Warszawska
mgr inż. Bernard Szymański / Politechnika Warszawska

Praca ta została wsparta z grantu N N510 325537 polskiego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, realizowanego w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej

1. WSTĘP

Energia słoneczna jest najbardziej podstawową formą energii. Procesy biochemiczne doprowadziły do utworzenia dzięki energii słonecznej złóż paliw kopalnych, będących obecnie głównym źródłem energii. Rys. 1 przedstawia porównanie ilości energii słonecznej docierającej na powierzchnię Ziemi w ciągu roku w stosunku do całkowitych zasobów źródeł energii pierwotnej [1, 2]. Przedstawione wyniki świadczą o tym, iż całkowita energia docierająca ze Słońca na powierzchnię Ziemi jest większa niż energia skumulowana we wszystkich źródłach energii pierwotnej. Pozyskanie energii słonecznej jest aktualnie możliwe dzięki zastosowaniu technologii takich jak elektrownie słoneczno-ciepłne i fotowoltaiczne (PV) czy też koncentratory słoneczne [3].

W elektrowni słoneczno-ciepłej proces przetwarzania energii Słońca rozpoczyna się od skupienia promieniowania słonecznego z wybranego obszaru, zamianie go na ciepło, które jest wykorzystane do napędzenia turbiny termodynamicznej [3]. Turbina napędza generator, który produkuje energię elektryczną. Taki proces przetwarzania ciepła jest typowy dla elektrowni wykorzystujących paliwa kopalne. W Europie tego typu elektrownia słoneczna jest zlokalizowana w Sewilli w Hiszpanii. Jednakże największa inwestycja tego typu jest planowana na pustyni Sahara w Afryce. Projekt pod nazwą DESERTEC [4] został oficjalnie zainicjowany w lipcu 2009



Rys. 1. Światowe zasoby źródeł energii pierwotnej [1]

Streszczenie

W artykule opisane są fotowoltaiczne systemy zasilania połączone z systemem elektroenergetycznym. Moc generowana z odnawialnych źródeł energii jest niestabilna, gdyż wpływają na nią warunki atmosferyczne. Jednakże współpraca elektrowni słonecznych z układami magazynowania energii (np. bateriami elektrochemicznymi) istotnie poprawia parametry pracy i stabilność systemu elektroenergetycznego. Ponadto elektrownie słoneczne często pracują w miejscach dostępnych dla

człowieka, co wymaga stosowania izolacji galwanicznej ogniw od systemu elektroenergetycznego. Ze względu na konieczność utrzymania wysokiej sprawności przetwarzania energii w elektrowniach fotowoltaicznych do konwersji energii wykorzystywane są rezonansowe przekształtniki energoelektroniczne o bardzo niskich stratach energii. Istotnym elementem systemu jest także przekształtnik sieciowy, który przekazuje energię z ogniw fotowoltaicznych do sieci.

przez konsorcjum europejskich koncernów energetycznych. Wyprodukowana energia ma być transportowana do krajów Europy i Afryki przy użyciu linii energetycznych prądu stałego.

W elektrowniach fotowoltaicznych (PV) energia promieniowania słonecznego jest przekształcana bezpośrednio w energię elektryczną dzięki wykorzystaniu zjawisk zachodzących w złączu półprzewodnikowym. W elektrowniach fotowoltaicznych oprócz ogniw fotowoltaicznych wykorzystywane są również przetworniki energoelektroniczne dostosowujące parametry energii pochodzącej z ogniw fotowoltaicznych do potrzeb użytkowych.

Obserwowany jest szybki rozwój w dziedzinie elektrowni fotowoltaicznych. Wykorzystywane są one głównie w obiektach mieszkalnych jako domowe systemy zasilania. Spotykane są również elektrownie większej mocy (> 200 kWp), przyłączane do sieci elektroenergetycznej, np. elektrownia fotowoltaiczna w Brindis (Niemcy) ma moc 40 MWp, a w Puertollano (Hiszpania) 47 MWp [5].

Przyrost mocy zainstalowanej elektrowni słonecznych w Europie jest spowodowany przede wszystkim wprowadzeniem taryfy stałej (z ang. *Feed-in Tariff*) za jednostkę energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych [6]. To właśnie wprowadzenie taryfy stałej było przyczyną zainstalowania w 2008 roku nowych elektrowni fotowoltaicznych o sumarycznej mocy 2500 MW w Hiszpanii, 1500 MW w Niemczech i 50 MW w Czechach. Można się spodziewać, iż wprowadzenie taryfy stałej w innych krajach Europy, takich jak np. Polska, doprowadziłoby do podobnych rezultatów.

W roku 2008 moc zainstalowana dużych elektrowni fotowoltaicznych (> 200 kWp) wynosiła ok. 3,8 GWp [5], podczas gdy w roku 2006 było to tylko ok. 500 MWp. Aktualnie jednostkowa moc przetworników energoelektronicznych dla elektrowni fotowoltaicznych przekracza już 1 MVA. Technologia ta staje się zatem alternatywą dla paliw kopalnych.

2. SYSTEMY FOTOWOLTAICZNE

Systemy fotowoltaiczne możemy podzielić na dwie główne grupy:

- pracujące wyspowo
- podłączane do systemu elektroenergetycznego.

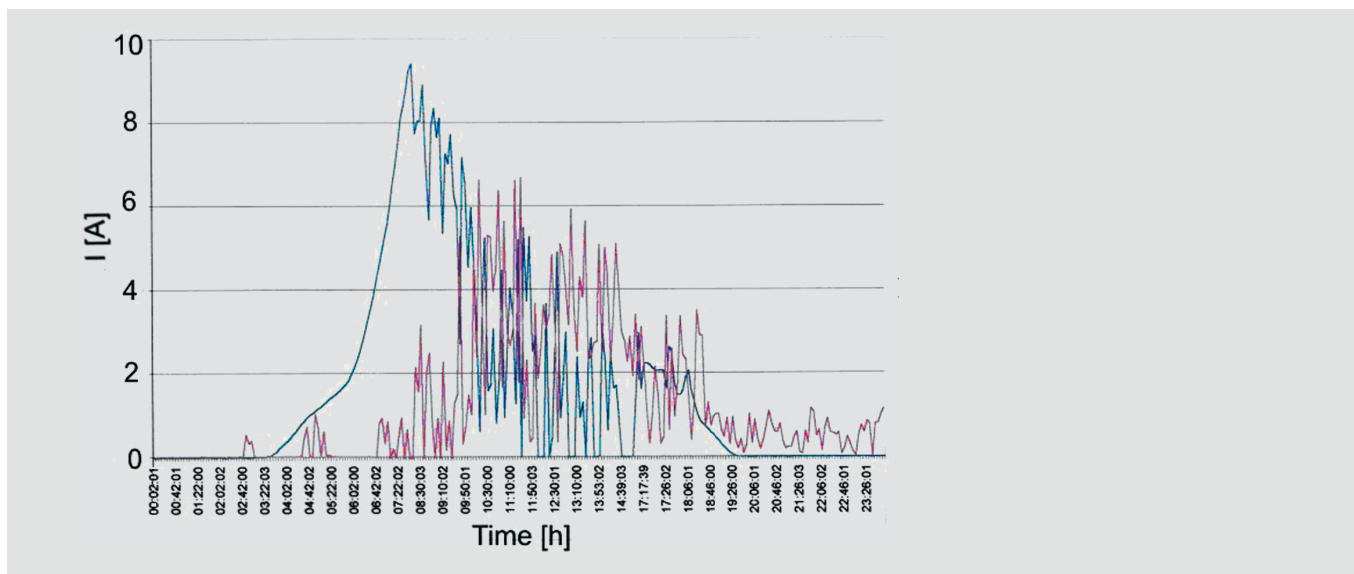
Najczęściej moc elektrowni fotowoltaicznych pracujących wyspowo dochodzi do kilku kW. Systemy takie nie mają połączenia z systemem elektroenergetycznym i służą do zasilania lokalnych odbiorców.

Elektrownie fotowoltaiczne mogą również współpracować z systemem elektroenergetycznym. Do sieci prądu przemiennego podłącza się je za pomocą odpowiedniego przetwornika energoelektronicznego prądu stałego na prąd przemienny (DC/AC). Większość przetworników energoelektronicznych DC/AC, stosowanych w elektrowniach fotowoltaicznych, wykorzystuje w pełni sterowane przyrządy półprzewodnikowe, takie jak tranzystory mocy MOSFET lub IGBT oraz odpowiednią metodę sterowania PWM. Dzięki temu możliwa jest precyzyjna i szybka regulacja przepływu mocy między systemem prądu stałego i prądu zmiennego. Ponadto prąd po stronie systemu AC pozbawiony jest niepożądanych harmonicznych i nie występuje przepływ mocy biernej.

Najbardziej kosztownym elementem systemu fotowoltaicznego jest bateria ogniw fotowoltaicznych. Dąży się zatem do maksymalizacji mocy uzyskanej z każdego ogniwa. W związku z tym przetwornik energoelektroniczny, pośredniczący między ogniwami słonecznymi a systemem elektroenergetycznym, realizuje tzw. algorytm śledzenia maksymalnego punktu mocy ogniw (z ang. *Maximal Power Point Tracking* – MPPT) [7].

3. WAHANIA MOCY

Moc elektrowni fotowoltaicznej nie jest stała w czasie i zależy od warunków pogodowych lub też pory dnia. Wahania prądu generowanego elektrowni fotowoltaicznej i wiatrowej zostały zobrazowane na rys. 2 [8]. W związku z tym elektrownie fotowoltaiczne dużej mocy, podłączone do sieci, mogą mieć wpływ na parametry pracy i stabilność systemu elektroenergetycznego. Dotyczy to szczególnie elektrowni dużej mocy zlokalizowanych daleko od głównego punktu zasilania. Niestabilność mocy pochodzącej z elektrowni fotowoltaicznych może także powodować efekt migotania [9, 10, 11].



Rys. 2. Prąd generowany z elektrowni fotowoltaicznej (niebieski) i z elektrowni wiatrowej (czerwony) [8]

Problemy te mogą być wyeliminowane przez odpowiednie metody sterowania mocą pochodzącą z elektrowni fotowoltaicznej. Czasem wymaga to obniżenia ilości produkowanej energii elektrycznej (w przypadku braku odpowiednio dużego zasobnika energii współpracującego z elektrownią). Przede wszystkim konieczne jest jednak użycie systemu sterowania elektrownią połączonego z operatorem sieci dystrybucyjnej. Jeżeli elektrownia fotowoltaiczna dużej mocy jest włączona w punkt systemu elektroenergetycznego o odpowiednio dużej mocy zwarciowej i stabilnych parametrach napięciowo-częstotliwościowych, wówczas praca elektrowni może być kompensowana odpowiednią rezerwą mocy dyspozycyjnej. Wszystko to wiąże się jednak z wysokimi kosztami eksploatacji odnawialnych źródeł energii.

4. FOTOWOLTAICZNE SYSTEMY ZASILANIA Z ZASOBNIKAMI ENERGII

Problemy opisane wcześniej mogą być istotnie ograniczone lub wyeliminowane, jeśli elektrownia fotowoltaiczna współpracuje z zasobnikiem energii. Do gromadzenia energii najczęściej stosuje się koła zamachowe, nadprzewodniki, superkondensatory lub akumulatory elektrochemiczne [12, 13]. Obecnie najbardziej efektywne w przypadku systemów fotowoltaicznych jest magazynowanie energii z wykorzystaniem akumulatorów elektrochemicznych. Najbardziej popularne są akumulatory kwasowo-ołowiowe i niklowo-kadmowe. Rozwiązanie efektywnego kosztowo systemu gromadzenia energii elektrycznej jest jednym z głównych zagadnień w rozwoju nowoczesnych systemów fotowoltaicznych.

System fotowoltaiczny wyposażony w akumulatory powinien pracować w następujących trybach (w zależności od komend pochodzących od operatora systemu elektroenergetycznego):

- dostarczanie energii do systemu elektroenergetycznego z paneli fotowoltaicznych
- dostarczanie energii do systemu elektroenergetycznego z akumulatorów i paneli fotowoltaicznych
- dostarczanie energii do systemu elektroenergetycznego z akumulatorów
- ładowanie akumulatorów z systemu elektroenergetycznego w czasie nadwyżek mocy
- zasilanie wybranych odbiorników z baterii w czasie awarii w systemie elektroenergetycznym.

5. SEPARACJA GALWANICZNA

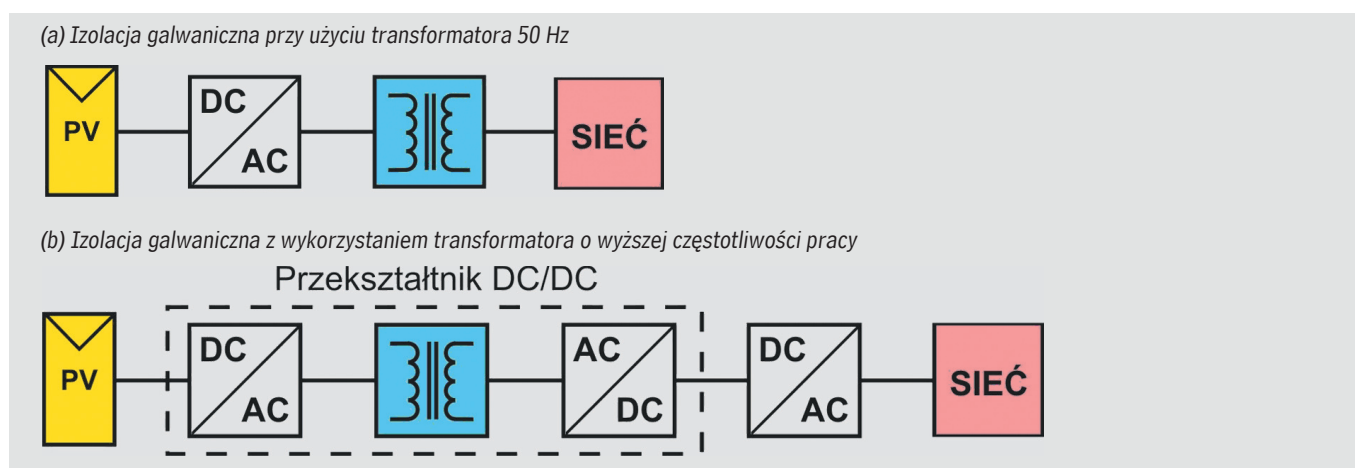
Panele fotowoltaiczne są zazwyczaj instalowane w miejscach dostępnych dla człowieka. Wymaga to z kolei izolowania paneli od sieci elektroenergetycznej. Izolacja może być zrealizowana metodą tradycyjną, w której wykorzystywany jest transformator pracujący z częstotliwością 50 Hz po stronie systemu elektroenergetycznego (rys. 3a). Możliwe jest także zastosowanie nowoczesnego transformatora o znacznie wyższej częstotliwości pra-

cy, charakteryzującego się niskimi stratami i małymi gabarytami. Transformator taki jest wewnętrznym elementem przekształtnika energoelektronicznego (rys. 3b). Rozwiązanie takie ma następujące zalety:

- niewielkie rozmiary
- duża gęstość przetwarzanej energii elektrycznej
- wysoka sprawność.

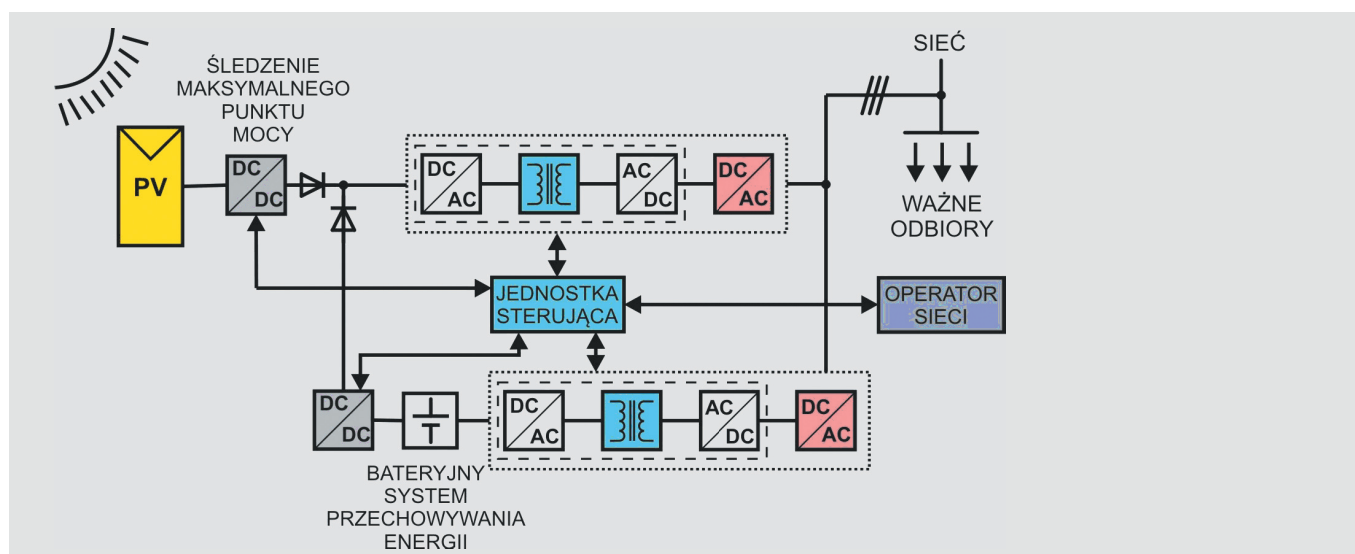
Jeżeli elektrownia fotowoltaiczna, współpracująca z zasobnikiem energii, jest odpowiednio sterowana, wtedy elektrownia taka jest w pełni dyspozycyjna i pomaga operatorowi w sterowaniu systemem elektroenergetycznym [14, 15]. Na rys. 4 pokazana jest w pełni dyspozycyjna elektrownia fotowoltaiczna z elektrochemicznym zasobnikiem energii elektrycznej. Elektrownia taka składa się z kilku bloków funkcjonalnych, tj.:

- paneli fotowoltaicznych
- przetwornicy DC/DC, gdzie śledzony jest maksymalny punkt mocy ogniwa
- przetwornicy DC/AC, która wstrzykuje energię pochodzącą z ogniw fotowoltaicznych do sieci elektroenergetycznej
- przetwornic AC/DC i DC/DC, które odpowiedzialne są za nadzór i sterowanie elektrochemicznego zasobnika energii elektrycznej.



Rys. 3. Przekształtnik energoelektroniczny z izolacją galwaniczną

W tym przypadku przetwornica DC/DC rozładowuje baterię elektrochemiczną i zapewnia stałą moc wejściową dla przetwornicy DC/AC. Ponadto jednostka sterująca nadzoruje i steruje przetwornicami energoelektronicznymi zgodnie z poleceniami operatora sieci. W tym rozwiązaniu izolacja galwaniczna zrealizowana jest za pomocą transformatora wysokoczęstotliwościowego, znajdującego się w przetwornicach DC/AC i AC/DC.

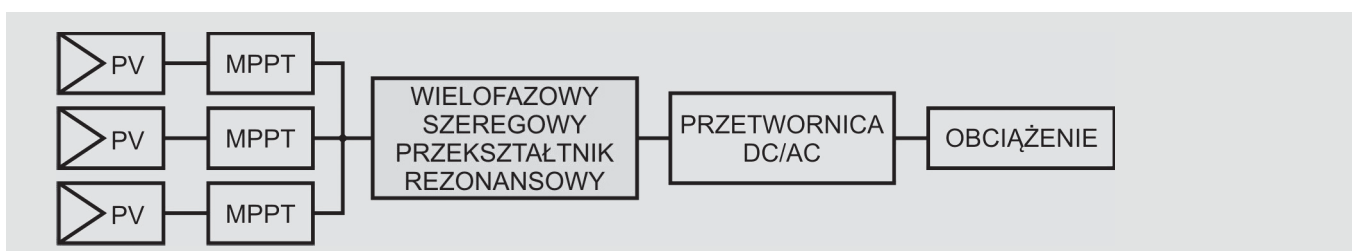


Rys. 4. Elektrownia fotowoltaiczna z zasobnikiem energii i izolacją galwaniczną

6. PRZEKSZTAŁTNIKI REZONANSOWE W SYSTEMACH FOTOWOLTAICZNYCH

Obecnie gęstość przetwarzanej energii jest ważnym czynnikiem w przypadku przekształtników energoelektronicznych. W celu zmniejszenia gabarytów urządzenia i zwiększenia gęstości przetwarzanej energii wykorzystywana jest wysoka częstotliwość przetwarzania energii. Jednakże wysoka częstotliwość skutkuje wysokimi stratami łączeniowymi tranzystorów mocy. Dlatego też, w celu zminimalizowania strat mocy wykorzystywane są miękkie techniki przełączania tranzystorów mocy. Dzięki temu możliwe jest zastosowanie małych i wydajnych transformatorów separacyjnych. Ponadto miękkie przełączanie tranzystorów przekształtnika skutkuje także niskim poziomem emisji zakłóceń elektromagnetycznych.

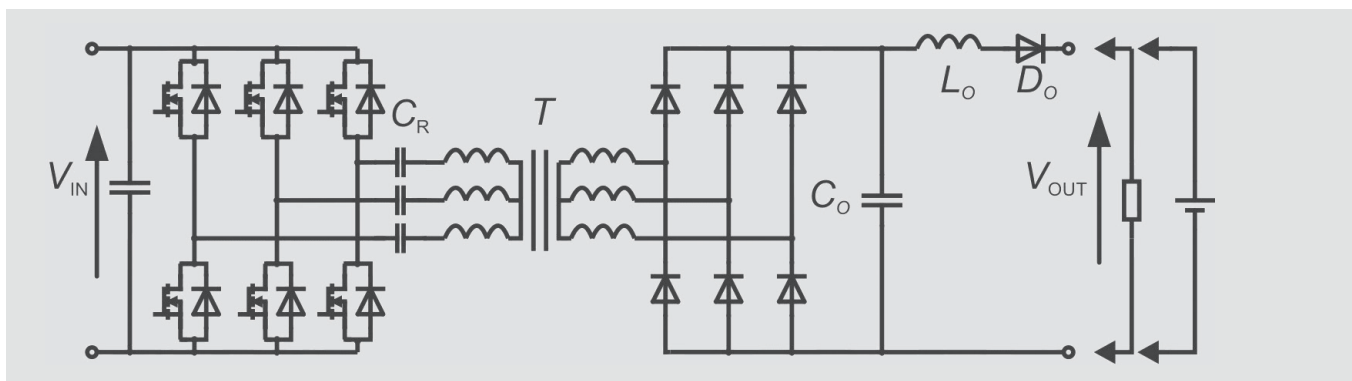
Sposób wykorzystania międko przełączanych przekształtników DC/DC w systemie fotowoltaicznym [16] obrazuje rys. 5.



Rys. 5. Wielofazowy szeregowy przekształtnik rezonansowy w elektrowni fotowoltaicznej [16]

W prezentowanym rozwiązaniu każdy z paneli fotowoltaicznych zintegrowany jest z niewielkim przekształtnikiem energoelektronicznym, śledzącym maksymalny punkt mocy ogniwa. Ponadto wykorzystany został wielofazowy przekształtnik rezonansowy. Jest on wyposażony w wysokoczęstotliwościowy transformator izolujący (wspólny dla wszystkich paneli). Zapewnia to odpowiednią izolację galwaniczną od systemu elektroenergetycznego elementów dostępnych dla człowieka. Transformator realizuje w tym wypadku także dopasowanie poziomu napięcia między panelami a przekształtnikiem DC/AC, który połączony jest z obciążeniem.

Na rys. 6 pokazany jest trójfazowy przekształtnik rezonansowy DC/DC. Przekształtnik użyty jest jako element fotowoltaicznego systemu zasilania przedstawionego na rys. 4. Przedstawiony przekształtnik DC/DC posiada wysokoczęstotliwościowy transformator izolujący oraz wykorzystuje zjawisko szeregowego rezonansu elektromagnetycznego do przetwarzania energii elektrycznej.

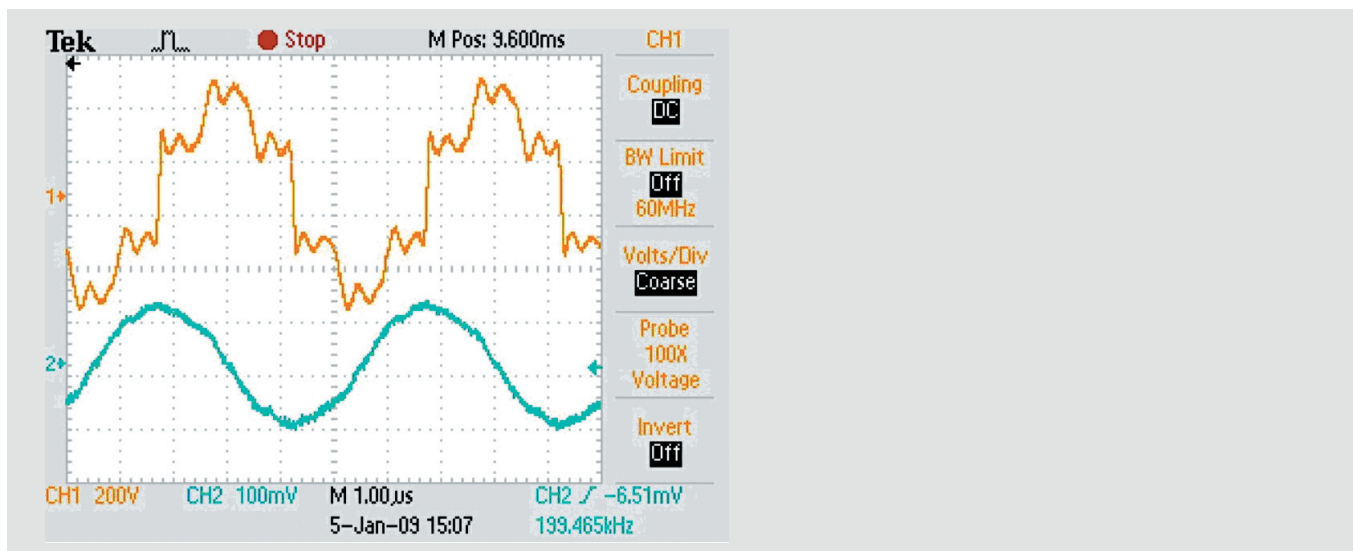


Rys. 6. Trójfazowy szeregowy przekształtnik rezonansowy

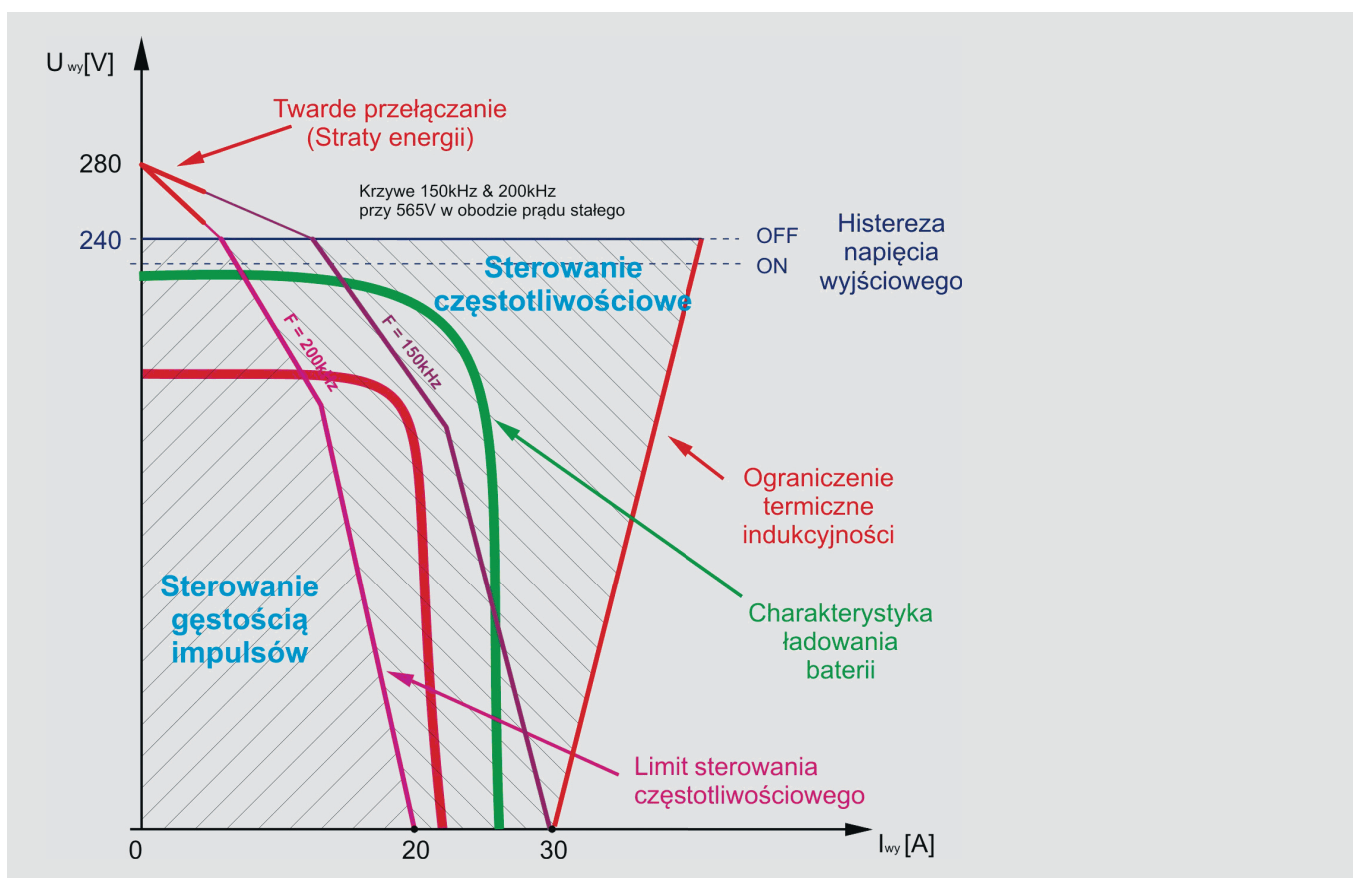
Rys. 7 prezentuje wyniki pomiarów napięcia u_R (żółty) i prądu i_R (niebieski) w obwodzie rezonansowym omawianego przekształtnika trójfazowego. Częstotliwość widocznych przebiegów wynosi:

$$f \approx 200 \text{ kHz} \quad (1)$$

Na rys. 8 pokazana jest charakterystyka wyjściowa przekształtnika z rys. 6. Przetwornica sterowana jest za pomocą sterowania częstotliwościowego i modulacji gęstości impulsów [17]. Ponadto przetwornica może pracować zarówno z obciążeniem rezystancyjnym, jak i napięciowym. Przetwornica ta może być wykorzystana jako część przekształtnika DC/AC, który przekazuje energię z elektrowni fotowoltaicznej do sieci oraz jako część przetwornicy AC/DC ładującej elektrochemiczny zasobnik energii (rys. 4).



Rys. 7. Przebiegi napięcia i prądu – szeregowy rezonansowy przekształtnik trójfazowy DC/DC z transformatorem separacyjnym



Rys. 8. Charakterystyka wyjściowa trójfazowego przekształtnika rezonansowego

7. PRZEKSZTAŁNIKI ENERGOELEKTRONICZNE PRZEKAZUJĄCE ENERGIĘ Z OGNIW FOTOWOLTAICZNYCH DO SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

Najważniejszą częścią każdej elektrowni fotowoltaicznej jest falownik współpracujący z siecią, który odpowiada za przekazywanie energii z obwodu pośredniczącego prądu stałego do sieci elektroenergetycznej. Najczęściej w układach fotowoltaicznych stosowane są falowniki napięcia. Tego typu urządzenia muszą posiadać odpowiednie cechy konstrukcyjne oraz oprogramowanie, które pozwolą im na bezpieczną współpracę z siecią elektroenergetyczną oraz utrzymywanie odpowiednich parametrów jakości prądu wyjściowego. Falowniki napięcia umożliwiają dwukierunkowy przepływ mocy, dzięki czemu możliwe jest wykorzystanie tego typu źródeł do

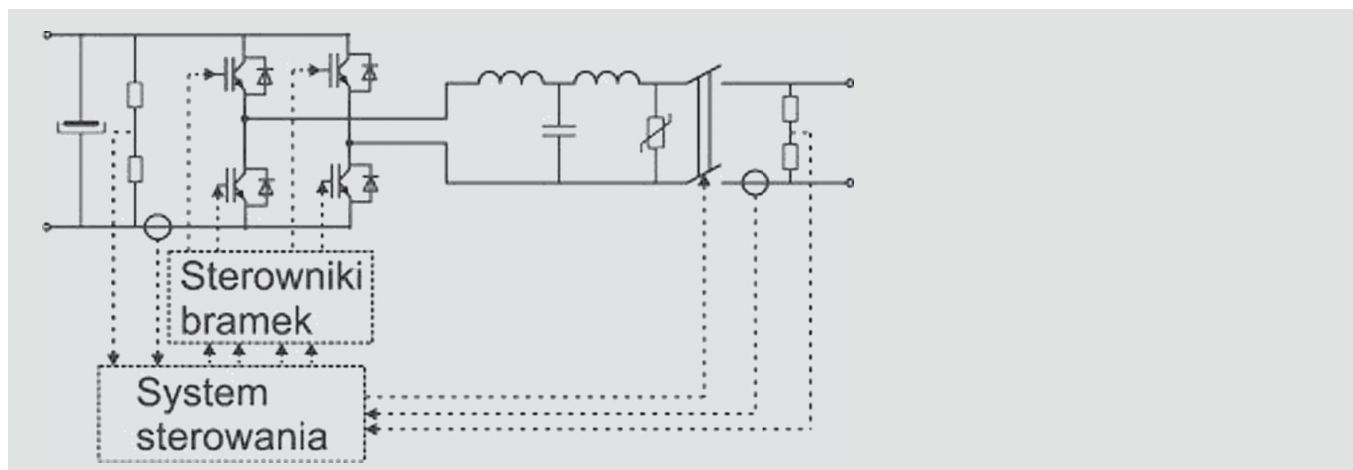
kompensacji mocy biernej. Kompensacja mocy biernej może mieć także korzystny wpływ na wartość napięcia u odbiorców, ma to szczególne znaczenie w sieciach niskiego napięcia.

Typowa konstrukcja jednofazowego falownika napięcia jest pokazana na rys. 9. Układ składa się z pojemności wejściowej, układów pomiarowych mierzących parametry wejściowe, mostka złożonego z tranzystorów IGBT, filtra wyjściowego LCL, ogranicznika przepięć, łącznika oraz układów pomiarowych mierzących parametry wyjściowe. Szczególne znaczenie dla parametrów falownika mają filtry LCL oraz filtry EMI. Jakość prądu przekazywanego do systemu zależy głównie od tych dwóch filtrów, jak również od układu sterowania przekształtnika. Model układu z rys. 9 jest aktualnie badany w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej. Projekt zakłada sprawdzenie działania trzech podstawowych technik sterowania tego typu falowników:

- histerezowy regulator prądu
- regulator PI prądu
- regulator PQ .

Dotychczas wykonano głównie badania symulacyjne za pomocą pakietu symulacyjnego PSIM. Schemat symulacyjny urządzenia przedstawiono na rys. 10. Rys. 11 przedstawia przebieg prądu wyjściowego falownika pracującego z regulatorem histerezowym prądu.

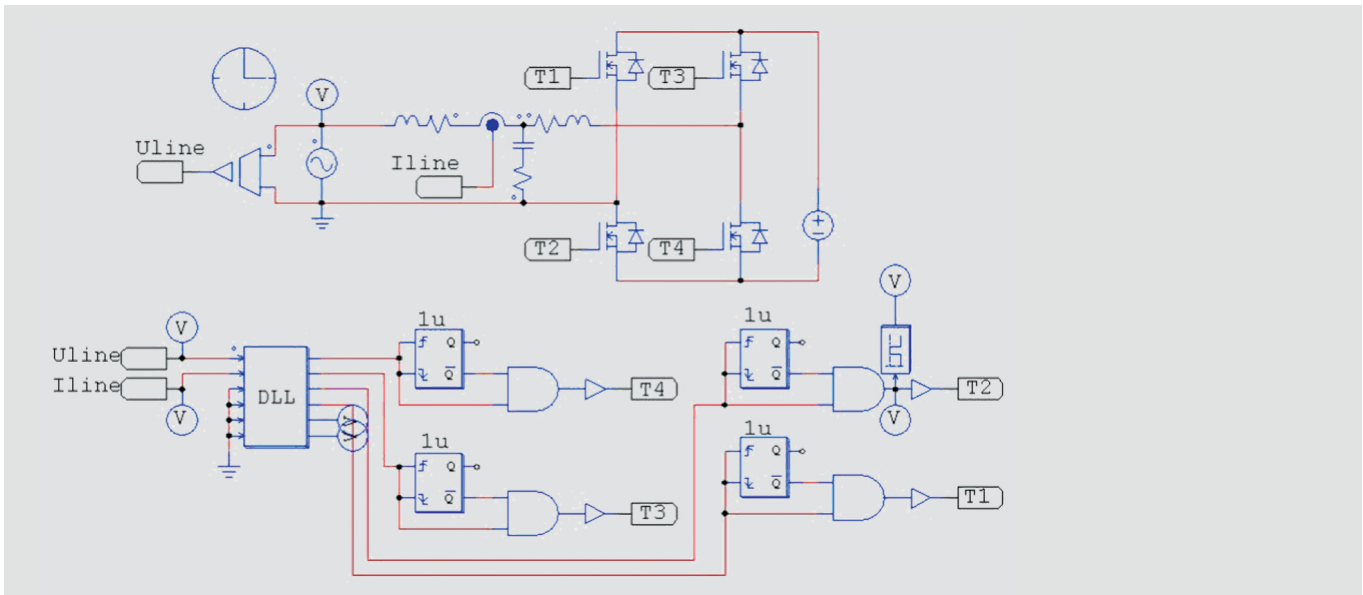
Użycie w symulacji bloku DLL (dostępnego w PSIM) pozwoliło na rozpoznanie problemów, które pojawiają się przy realizacji cyfrowego układu sterowania tego typu urządzenia.



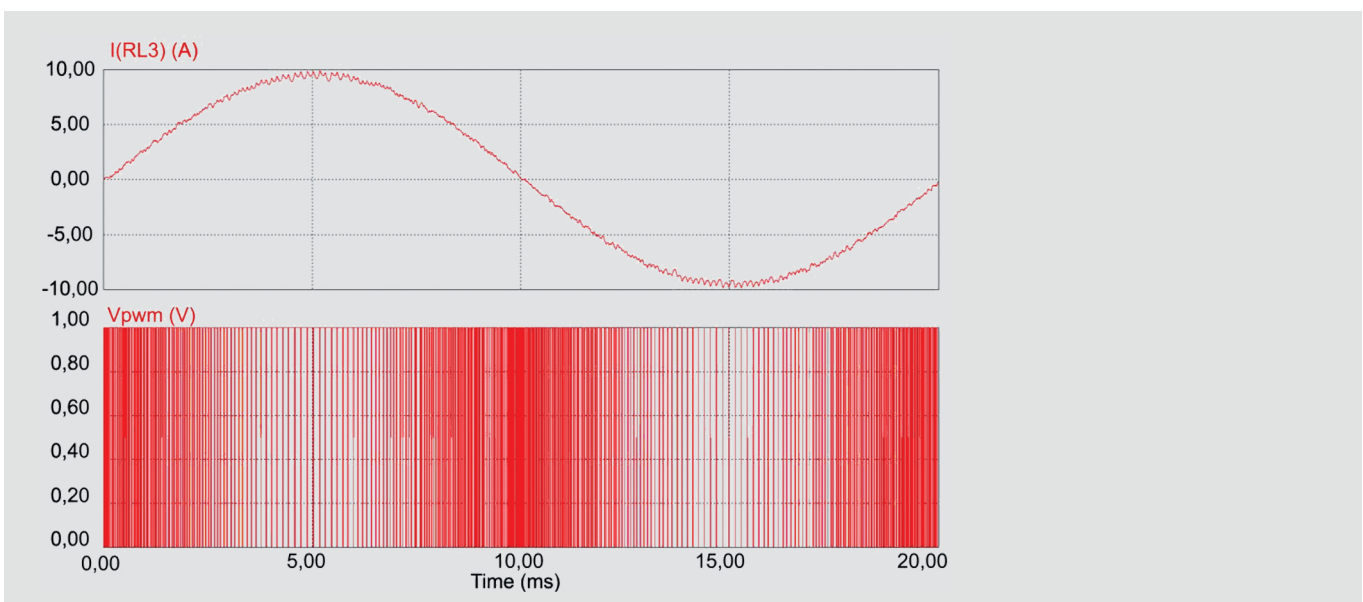
Rys. 9. Schemat ideowy jednofazowego falownika napięcia

8. PODSUMOWANIE

W artykule omówione zostały zagadnienia dotyczące generacji energii elektrycznej w elektrowniach fotowoltaicznych. Przedstawiono systemy fotowoltaiczne współpracujące z elektrochemicznym zasobnikiem energii oraz opisano funkcje, jakie system taki powinien spełniać w systemie elektroenergetycznym. Ponadto została opisana kwestia izolacji galwanicznej oraz możliwości wykorzystania rezonansowych przekształtników energoelektronicznych w elektrowniach fotowoltaicznych. Dodatkowo w artykule przedstawiono zagadnienie zwrotu energii pochodzącej z elektrowni fotowoltaicznej do sieci elektroenergetycznej.



Rys. 10. Model symulacyjny jednofazowego falownika napięcia współpracującego z idealnym źródłem napięcia



Rys. 11. Przebiegi prądu wyjściowego falownika $I(RL3)$ [A] oraz bipolarnego sygnału PWM $V(PWM)$ [V]



BIBLIOGRAFIA

1. Bartosik M., Globalny kryzys energetyczny – mit czy rzeczywistość? Proceedings of 10th International Conference „Nowoczesne urządzenia zasilające w energetyce”, 14–16 March, Zakopane, Poland 2007.
2. Survey of energy resources, World Energy Council, 2004.
3. Heinloth K., Energy Technologies, Springer Verlag, 2006.
4. Foundation D., Red Paper – An overview of Desertec Concept – 2nd Edition, Desertec Foundation, 2009.
5. Lenardic D., Large scale PV power plants – Annual and cumulative installed power output capacity – Key statistical indicators, *Annual Review*, 2008.
6. Pietruszko S., Taryfa stała (Feed-in Tariff) motorem rozwoju odnawialnych źródeł energii, Centre for Photovoltaics of the Warsaw University of Technology, 2009.
7. Blaabjerg F., Iov F., Teodorescu R., Chen Z., Power electronics in renewable energy systems. Proceedings of 12th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE), 2006.
8. Biczek P., Optymalne wykorzystanie pierwotnych nośników energii na przykładzie hybrydowej elektrowni słonecznej z ogniwami paliwowymi, PhD thesis, Warsaw University of Technology, 2003.
9. Albarracin R., Amaris H., Power Quality in distribution power networks with photovoltaic energy Sources. Proceedings of International Conference on Environment and Electrical Engineering, 10–13 May, Karpacz, Poland 2009.
10. Bien A., Rozkrut A., A measurement scale for the light flickering phenomenon, 6th International Conference, Electrical Power Quality and Utilisation, 19–21 September 2001.
11. Bien A., Hanzelka Z., Power Quality Application Guide, Voltage Disturbances. Flicker Measurement, Copper Development Association, October 2005.
12. Rashid M., Energy Technologies, Elsevier Inc. 2nd Edition, 2007.
13. Sauer D., Blank T., Kowal J., Magnor D., Energy Storage Technologies for Grids With High Penetration of Renewable Energies and for Grid Connected PV Systems, 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1–5 September, Valencia, Spain 2008.
14. Dmowski A., Szymański B., Rosłaniec Ł., Photovoltaic power plants as an alternative to conventional power generating systems, Aktualne Problemy w Elektroenergetyce Conference Proceedings, 3–5 June, Jurata, Poland 2009.
15. B. Szymański, A. Dmowski, Battery charging system in photovoltaic application. X International PhD workshop OWD 2008, 18–21 October, Wisła, Poland 2008.
16. Jacobs J., Multi-Phase Series Resonant DC-to-DC Converters, Aachen, Germany, RWTH Aachen University, Aachener Beiträge des ISEA Band 42, PhD Thesis, 2006.
17. Matysik J., Metody sterowania integracyjnego tranzystorowych falowników napięcia klasy D z szeregowym obwodem rezonansowym, *Prace Naukowe Elektryka*, zeszyt 114, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2001.