

Marcin JARNUT, Grzegorz BENYSEK

Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej

Zastosowanie układów energoelektronicznych w technologii SmartGrid i V2G

Streszczenie. Artykuł przedstawia zastosowania układów energoelektronicznych we współczesnych i przyszłych rozwiązaniach sieci energetycznych wyposażonych w elementy technologii SmartGrid i Vehicle To Grid. Przedstawione zostały także podstawy działania tych technologii z uwzględnieniem ich wpływu na system energetyczny.

Abstract. The paper introduces application of power electronics devices into the modern and future electric grids equipped with SmartGrid and Vehicle To Grid technology. Fundamentals of operation of these technologies have been described as well as their influence on power system. (**Application of power electronics devices in SmartGrid and V2G (Vehicle To Grid) technologies.**)

Słowa kluczowe: SmartGrid, pojazdy elektryczne, przekształtniki energoelektroniczne, sieci dystrybucyjne.

Keywords: SmartGrid, electrical vehicles, power electronics converters, distribution grids.

Wstęp

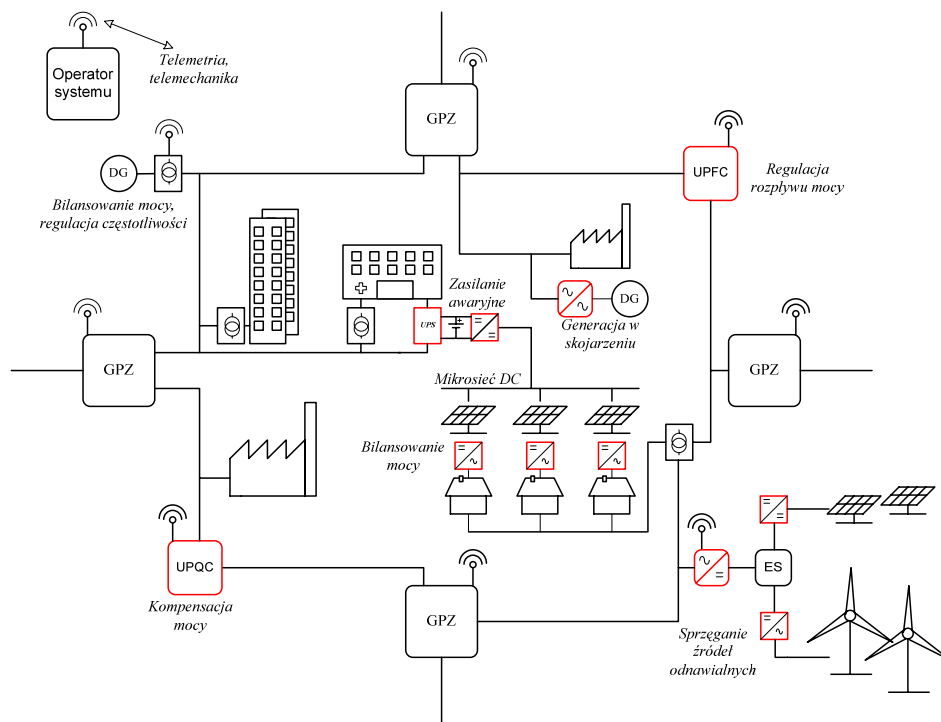
Zwiększenie komfortu użytkowania urządzeń elektrycznych wymogło zwiększenie elastyczności przekształcania energii elektrycznej. W efekcie pojawiły się nowe grupy urządzeń w postaci przekształtników energoelektronicznych. Pozwalają one na swobodne sterowanie procesami przemian energii elektrycznej na inne użyteczne formy energii. Duże nasycenie systemu energetycznego tymi układami spowodowało z czasem powstanie problemów niespotykanych wcześniej w energetyce zawodowej tzn. degradacji jakości zasilania objawiające się pogorszeniem parametrów napięć w sieciach dystrybucyjnych, a w skrajnych przypadkach do awarii elementów infrastruktury energetycznej powodujących pozbawienia zasilania odbiorców. Rosnąca świadomość związana z jakością energii elektrycznej oraz kompatybilnością elektromagnetyczną zapoczątkowała rozwój nowej rodziny układów energoelektronicznych - kondycjonerów energii elektrycznej [3]. Do grupy tej zaliczyć można:

- kompensatory mocy biernej i mocy odkształcenia;
- sterowniki rozpięty mocy;
- układy odtwarzania napięć;
- układy gwarantowanego zasilania;
- interfejsy energoelektroniczne źródeł rozproszonych.

Optymalnym rozwiązaniem kondycjonera energii jest realizacja w jednym układzie największej możliwej liczby funkcji przypisanych do wymienionych wyżej grup przekształtników energoelektronicznych. Poza zmniejszeniem kosztów ułatwia to także zarządzanie systemem wyposażonym w takie rozwiązania.

Zwiększenie niezawodności i stabilności systemu dystrybucyjnego osiąga się poprzez rozproszenie źródeł energii, oraz inne rozwiązania systemowe związane z reagowaniem na zmieniające się w czasie zapotrzebowanie na energię elektryczną [1, 2]. Wśród źródeł takich coraz większy udział stanowią, źródła odnawialne sprzęgane z siecią dystrybucyjną za pośrednictwem przekształtników energoelektronicznych. Zmiana

strategii sterowania umożliwia wykorzystanie ich do świadczenia usług dodatkowych takich jak regulacja napięcia, kompensacja mocy biernej, stabilizacja częstotliwości, które ogólnie określane są pojęciem „*ancillary services*”, natomiast sieci o tak rozbudowanej strukturze sprzętowej „*SmartGrids*” (rys. 1) [2, 4].



Rys.1 Uproszczona struktura sieci dystrybucyjnej typu *SmartGrid* .

Znane lub proponowane do tej pory rozwiązania uwzględniały reagowanie na zjawiska zachodzące w sieci dystrybucyjnej na poziomie wysokich i średnich napięć. W świetle ostatnich awarii powodowanych przez trudne do przewidzenia zjawiska atmosferyczne warto się jednak zastanowić czy przy obecnym stanie techniki nie można zwiększyć niezawodności dystrybuowania energii elektrycznej na poziomie sieci niskich napięć. Pewną szansą wydaje się być planowana budowa infrastruktury ładowania pojazdów elektrycznych. Duże rozproszenie i nasycenie stacjami ładowania takich pojazdów jak również znaczna gęstość energii zawartej w bateriach samochodów elektrycznych pozwala przypuszczać, że przy zapewnieniu dwukierunkowości przepływu energii technologia ta może także zwiększyć niezawodność systemu energetycznego. Rozwiązania takie są już rozpatrywane pod hasłem „*V2G – Vehicle To Grid*” [7].

SmartGrids

Celem tworzenia systemów typu *SmartGrid* jest opracowanie rozwiązań nadających za rosnącymi wymaganiami odbiorców w stosunku do dostawców energii elektrycznej jak również wykorzystanie niedostępnych do tej pory rozwiązań zwłaszcza z udziałem układów energoelektronicznych do poprawy jakości zasilania. Istotnym elementem technologii *SmartGrid* jest platforma decyzyjna oparta na nowoczesnej telemetrii i telemechanice. Osiągnięcie pełnej funkcjonalności takiego systemu wymaga

VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

także obciążenia Operatora Systemu dodatkowymi funkcjami związanymi z procesem predykcji zachowań sieci oraz z procesem decyzyjnym dotyczącym użycia dostępnych w ramach technologii środków zaradczych. Oprócz jednak dodatkowych zadań Operator zyskuje nowe możliwości zwiększenia niezawodności systemu zwłaszcza w stanach dynamicznych.

Distributed Generation

W większości przypadków właścicielami źródeł rozproszonych nazywanych „*Distribution Generation*” (*DG*) nie są firmy związane z energetyką zawodową, korzystanie z dodatkowych usług realizowanych za ich pomocą wiąże się zatem dla Operatora z dodatkowymi opłatami. Oczywiście część z tych kosztów rekompensowana jest przez zmniejszone opłaty za niedotrzymanie standardów jakościowych obsługi odbiorców oraz przez zwiększenie przepustowości systemu zmniejszające nakłady na rozbudowę sieci.

Istotną zaletą źródeł typu *DG* jest ich dynamika, która w połączeniu z lokalnymi magazynami energii znacząco mogłaby poprawić pewność zasilania oraz poprawić parametry energii elektrycznej związane z krótkotrwałymi wahaniami napięcia i częstotliwości. Systemowe rozwiązania związane z magazynowaniem energii w znacznym stopniu jeśli nie wyłącznie oparte są na magazynowaniu energii w elektrowniach szczytowo-pompowych. Oprócz niezaprzeczalnej zalety w postaci znacznych mocy takich źródeł, rozwiązanie to ma wadę, nie może być usytuowane gdziekolwiek, ale tylko w miejscach o odpowiednich warunkach terenowych i hydrologicznych. Również magazyny działające na bazie sprężonego powietrza potrzebują odpowiednich warunków geologicznych. Ograniczeń takich pozbawione są źródła odnawialne takie jak farmy wiatrowe (*WG*) i elektrownie słoneczne (*PV*), których lokalizacja jest łatwiejsza. Niestety posiadają one też wady w postaci niewielkich mocy i dużej zależności generowanej mocy od warunków atmosferycznych. Ich zaletą oprócz możliwości większego rozproszenia w sieci dystrybucyjnej są większe możliwości regulacyjne uzyskiwane przy wykorzystaniu przekształtników energoelektronicznych [2, 6].

Integracja wspomnianych wcześniej elementów w jednym systemie oraz możliwość elastycznego ich wykorzystania przez Operatora Systemu jest ideą sieci typu *SmartGrids* i już się odbywa.

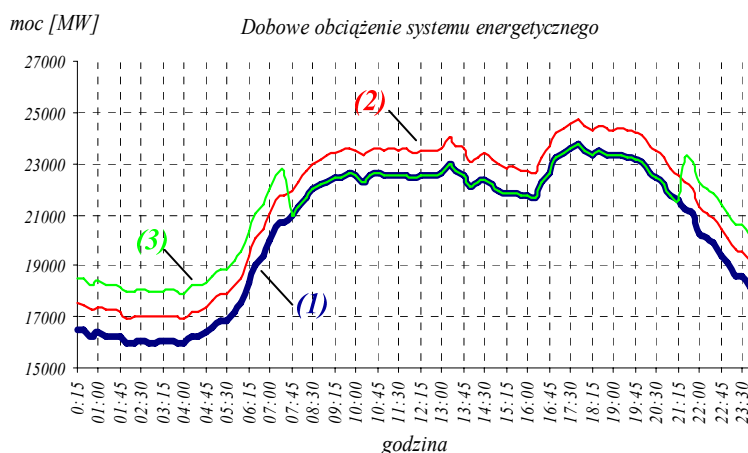
Ancillary services

Usługi dodatkowe świadczone przez *DG* na rzecz sieci dystrybucyjnych nazywane „*ancillary services*” dotyczą działań związanych ze wzmocnieniem systemu w stanach przejściowych i awaryjnych, w których z różnych względów wymagana jest dodatkowa moc. W szczególności obejmują:

- redukcję strat przesyłowych poprzez zmniejszenie drogi przesyłu energii tzn. energia elektryczna jest przetwarzana bliżej miejsca generacji;
- regulację napięcia w miejscu przyłączenia, która ze względu na wykorzystanie układów energoelektronicznych jest regulacją szybszą i dokładniejszą od dotychczas stosowanych np. regulacji zaczepowej;
- bilansowanie mocy na terenie gdzie obciążenia szczytowe powodować mogą przeciążenia i związane z nimi zmiany częstotliwości;
- bilansowanie dobowe obciążeń w układach wyposażonych dodatkowo w magazyn energii – „*energy storage*” (*ES*);
- rezerwowe lokalne zasilanie w stanach awaryjnych sieci.

W przyszłości po osiągnięciu znacznego rozproszenia źródeł energii w Systemie oraz przy już istniejącej możliwości wyboru przez odbiorcę źródła wykorzystywanej przez niego energii konieczna stanie się regulacja rozplywu mocy w systemie, która realizowana będzie przez energoelektroniczne układy typu *UPFC* (*Unified Power Flow Controller*), które po zmianie strategii sterowania realizować mogą także funkcje podobne do źródeł *DG* poprawiając jakość energii elektrycznej. Nazywane one są wtedy *UPQC* (*Unified Power Quality Controller*). Struktura tych układów ze stałonapięciowym obwodem pośredniczącym czyni z nich także doskonałe narzędzie do sprzęgania generacji rozproszonej lub miejscowych magazynów energii z systemem dystrybucyjnym. Przykłady zastosowań układów energoelektronicznych w technologii *SmartGrid* przedstawiono w [2, 5].

V2G – Vehicle To Grid

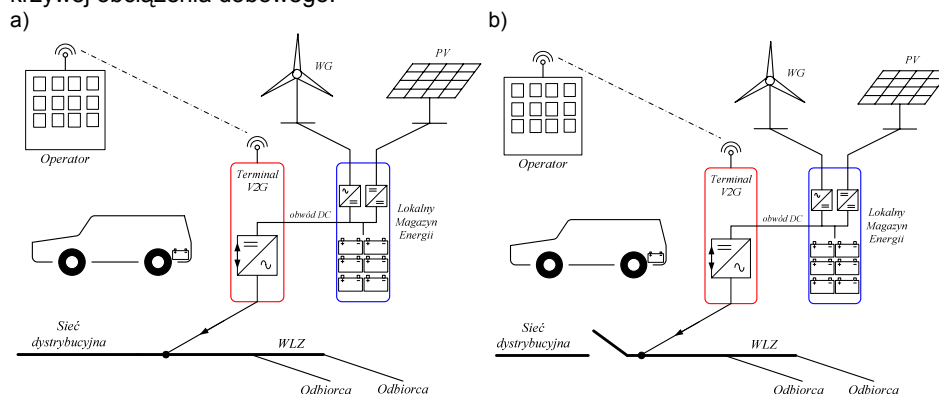


Rys. 2 Dobowe obciążenie systemu energetycznego w okresie zimowym z uwzględnieniem obciążenia stacjami ładowania pojazdów elektrycznych.

Proces zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych jak i wahania cen paliw kopalnych powodowane przez wyczerpanie łatwiej dostępnych złóż zapoczątkowały rozwój idei samochodów hybrydowych i elektrycznych – „electrical vehicles” (*EV*). Choć pozycja producentów aut z silnikami spalinowymi wydaje się niezagrażona to wielu z nich rozpoczęło prace lub już wprowadziło do sprzedaży auta wyposażone w silnik elektryczny. Bardzo ważnym zagadnieniem w przypadku tych pojazdów jest ich zasięg, który w obecnej chwili jest szacowany na ok. 100 km. Jest on ograniczony pojemnością i konstrukcją baterii zasilających silnik, ale także w znacznym stopniu brakiem infrastruktury do ich szybkiego ładowania. Obecnie realizowane są projekty związane z rozwojem sieci terminali do ładowania pojazdów typu *EV* oraz prace nad specjalnymi bateriami o dużej gęstości energii. Należy zatem zadać pytanie czy system dystrybucyjny energii elektrycznej jest przygotowany na scenariusz boomu motoryzacji elektrycznej, skoro już w tej chwili brakuje rezerw mocy? Na rysunku 2 przedstawiono dobowe obciążenie systemu energetycznego z uwzględnieniem dodatkowego obciążenia terminalami ładowania pojazdów elektrycznych. Większość produkowanych obecnie pojazdów *EV* posiada magazyn o pojemności ok. 20 kWh, co przy założeniu ładowania prądem 10 – cio godzinnym oznacza obciążenie przez każde z nich systemu mocą ok. 2 kW przez czas 10 – ciu godzin. Przy liczbie 1000 aut

VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

elektrycznych oznacza to dodatkowe 2 MW obciążenia i nie jest znaczące dla systemu. Wyobraźmy sobie jednak szybkie przejście na ten sposób zasilania pojazdów co oznacza np. w ciągu kilku lat wzrost ilości EV do 1 mln sztuk. System zostałby obciążony dodatkowo 2 GW mocy. Można jednak sytuację odwrócić i zapytać czy można taką nową infrastrukturę wykorzystać także do poprawy stabilności sieci dystrybucyjnej? Widoczne na rysunku 2 wykresy dobrego obciążenia polskiego systemu energetycznego: bez uwzględnienia dodatkowej mocy na ładowanie aut elektrycznych (krzywa (1)), z uwzględnieniem tej mocy przez całą dobę ze współczynnikiem jednoczesności 0,5 (krzywa (2)), oraz z mocą na ładowanie ograniczoną czasowo przez działania systemowe w godzinach np. 21:30 do 7:30 pokazują, że wprowadzenie pewnych działań operatora w sieciach z elementami V2G pozwoliłoby na wyrównanie krzywej obciążenia dobrego.



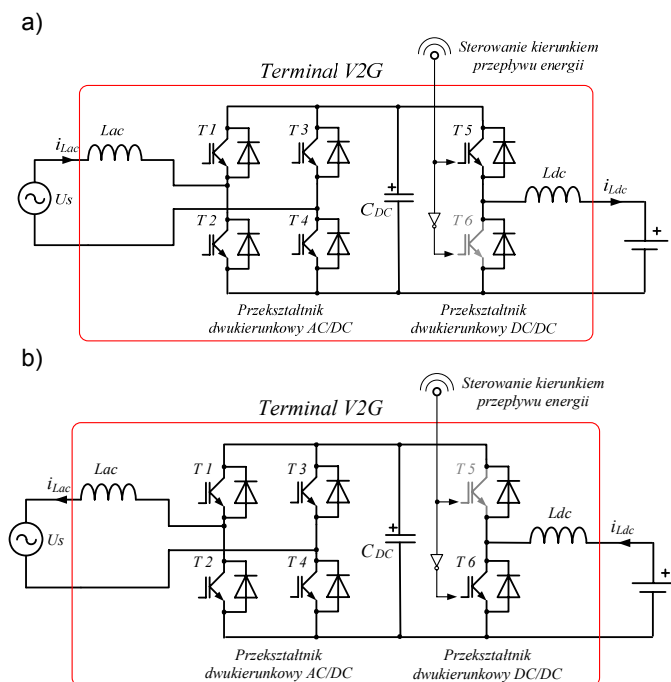
Rys. 3. Wykorzystanie technologii V2G w sieciach n.n.: a) kompensacja mocy biernej i mocy odształcenia, b) zasilanie awaryjne.

Wykorzystanie potencjału w postaci dużego rozproszenia stacji ładowania oraz potencjalnej energii zmagazynowanej w pojazdach stało się podstawą nowej technologii nazywanej V2G – *Vehicle To Grid*. Technologia jest oparta o dwukierunkowy przepływ energii w terminalu, który możliwy jest do osiągnięcia tylko z wykorzystaniem energoelektronicznych przekształtników dwukierunkowych. Poza strukturą sprzętową technologia ta musi także posiadać platformę teleinformatyczną do akwizycji danych o aktualnym stanie każdego z pojazdów oraz terminali ładowania. Oprócz funkcji rozliczeniowych może ona pełnić także w połączeniu z Operatorem Systemu funkcje decyzyjne. Energia gromadzona w bateriach może być wykorzystana przez operatora podobnie jak w układach *SmartGrids*. O ile układy typu *SmartGrid* związane są z działaniami Operatora na poziomie średnich i wysokich napięć, tak technologia V2G ze względu na małe moce ograniczona jest do sieci niskich napięć. Stanowić może jednak doskonałe jej uzupełnienie w sieciach promieniowych niskich napięć. Choć sumaryczna energia zgromadzona w zasobnikach pojazdów osiąga duże wartości to ze względu na jej rozczłonkowanie nie może ona być wykorzystana do stabilizacji częstotliwości w systemie energetycznym gdyż mało prawdopodobne wydaje się przyłączenie w określonej lokalizacji dużej liczby pojazdów do sieci dystrybucyjnej w tym samym czasie w celu bilansowania mocy. Rozwiązania systemowe w postaci różnicowania taryf rozliczeniowych za pobraną lub oddaną energię w zależności od pory dnia spowodować mogą jednak, że technologia V2G stać się może dodatkowym instrumentem w ręku Operatora prowadzącym do zwiększenia niezawodności systemu także na poziomie

sieci niskich napięć. Zasadne natomiast wydają się działania w celu wykorzystania infrastruktury ładowania pojazdów *EV* jako elementów lokalnego rynku bilansującego energię wytwarzaną w niewielkich lokalnych źródłach odnawialnych z energią z sieci dystrybucyjnych. Pozwoliłoby to na przeniesienie dużej części inwestycji w rozbudowę systemu a związaną z rozwojem motoryzacji elektrycznej na poziom niskich napięć i dałoby czas na uruchomienie nowych systemowych mocy wytwórczych. Jakże zatem funkcje przydatne z punktu widzenia systemu mogą pełnić terminale ładowania pojazdów elektrycznych? Ideę wykorzystania technologii *V2G* w sieciach n.n. przedstawia rysunek 3, na którym terminal *V2G* przedstawiony został w dwóch trybach pracy: *online* (rys.3 a) oraz *offline* (rys.3 b).

Ze względu na implementację w strukturze terminala dwukierunkowych przekształtników energoelektronicznych mogą one realizować:

- stabilizację napięć;
- kompensację mocy biernej;
- kompensację mocy odkształcenia;
- zasilanie awaryjne (lokalnie);
- sprzęganie źródeł rozproszonych z siecią.

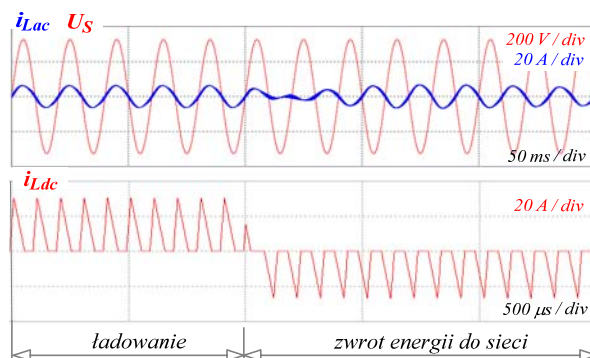


Rys.4. Układy energoelektroniczne w terminalu V2G: a) tryb ładowania zasobników energii, b) tryb zwrotu energii do sieci dystrybucyjnej.

Na rysunku 4 przedstawione zostały schematy uproszczone części energoelektronicznej terminala *V2G* realizującej funkcje ładowania lokalnego zasobnika energii *ES* lub akumulatorów pojazdów elektrycznych *EV* (rys.4 a) oraz zwrotu energii pochodzącej z *ES* lub akumulatorów *EV* do sieci dystrybucyjnej (rys.4 b). W Polsce jak i w Europie brak jest jeszcze uwarunkowań prawnych związanych ze sprzedażą energii elektrycznej na poziomie sieci niskich napięć, w wielu krajach europejskich trwają natomiast prace

VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

związane z przystosowaniem układów pomiarowych energii elektrycznej na taką ewentualność.



Rys.5. Przebiegi czasowe napięcia sieci dystrybucyjnej U_s oraz prądów: i_{Lac} po stronie AC oraz i_{Ldc} po stronie DC terminala V2G

Zwrot energii w układzie z rysunku 4 realizowany jest poprzez zmianę kierunku energii w przekształtniku dwukierunkowym DC/DC. Ze względu na dopasowanie napięciowe zasobnika energii oraz obwodu DC dwukierunkowego przekształtnika AC/DC jest to przekształtnik typu *Buck – Boost*. Zmiana kierunku wymuszana jest przez blokowanie pracy jednego z tranzystorów np.: $T5$ (OFF) – praca typu boost, przekazywanie energii do kondensatora C_{DC} i dalej przez przekształtnik AC/DC do sieci dystrybucyjnej; $T6$ (OFF) – praca typu Buck, ładowanie akumulatora EV lub zasobnika ES z kondensatora C_{DC} , który jest doładowywany przez przekształtnik AC/DC. Zmiana trybu pracy i kierunku przepływu energii widoczna jest w zmianie biegunowości prądu induktora L_{dc} oraz w zmianie fazy prądu induktora L_{ac} i została przedstawiona na rysunku 5.

Podsumowanie

Mimo zapowiadanych [8] na najbliższe lata dużych inwestycji w sektor energetyczny zwłaszcza w odbudowę i zwiększenie mocy wytwórczych we współczesnych i przyszłościowych sieciach dystrybucyjnych nastąpić musi rozwój generacji rozproszonej wspomaganej lokalnymi magazynami energii. Wykorzystanie takiej rozbudowanej infrastruktury do zwiększenia niezawodności Systemu możliwe jest jedynie z wykorzystaniem zaawansowanych układów energoelektronicznych wspomaganych nowoczesnymi systemami telemetrycznymi i telemechanicznymi. Dynamika jaką pozwala osiągnąć połączenie tych technologii pozwoli uniezależnić jakość dostawy energii elektrycznej od nieprzewidywalnych zjawisk atmosferycznych oraz zdarzeń w sieci. Zasadne zatem staje się rozwijanie technologii dwukierunkowych przekształtników energoelektronicznych do zastosowań energetycznych umożliwiających wpływanie na parametry energii elektrycznej.

Literatura

- [1] G. Benysek, *Impovement in the Quality of Delivery of Electrical Energy Using Power Electronics Systems*, Springer-Verlag, London, 2007.
- [2] R. Strzelecki, G. Benysek, *Power Electronics In Smart Electrical Energy Networks*, Springer-Verlag, London, 2008.
- [3] J.S. Lai, *Power conditioning circuit topologies*, IEE Ind. Electronics Magazine, vol.3 (2009), n.2.

- [4] S. Mossoud, B. Wollenberg, *Toward a smart grid: power delivery for the 21st century*, IEEE Power and Energy Magazine, 3 (2005), n.5.
- [5] F. Blabjerg, Z. Chen, S.B. Kjaer, *Power electronics as efficiency interface in dispersed power generation systems*, IEEE Trans. on Power Electronics, vol 19, (2004), n.5.
- [6] T.J. Hammond, *Integrating renewable energy sources into European grids*, Electrical Power and Energy Systems, 30 (2008)
- [7] W. Kempton, J. Tomić, *Vehicle-to-grid Power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy*, Journal of Power Sources , 144 (2005).
- [8] Ministerstwo Gospodarki, *Program dla elektroenergetyki*, Warszawa, 27 marca 2006.

Autorzy: dr hab. inż. Grzegorz Benysek, prof. UZ, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej, ul. Licealna 9, 65-001 Zielona Góra, E-mail: g.benysek@iee.uz.zgora.pl; dr inż. Marcin Jarnut, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej, ul. Licealna 9, 65-001 Zielona Góra, E-mail: m.jarnut@iee.uz.zgora.pl