

Świeradów-Zdrój, 29.03-1.04.2012

Układ przekształcania energii paneli fotowoltaicznych na potrzeby systemu ładowania baterii elektrochemicznych

Paweł Staniak¹⁾, Grzegorz Iwański¹⁾, Wojciech Moćko^{2),3)}*1) Politechnika Warszawska, ISEP, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa**2) Instytut Transportu Samochodowego, ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa**3) Instytut Podstawowych Problemów Techniki, ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa**pawel.staniak@ee.pw.edu.pl*

STRESZCZENIE

Artykuł przedstawia system przekształcania energii w układzie ze źródłami fotowoltaicznymi oraz odbiornikami w postaci baterii elektrochemicznych. Opisano założenia działania całego systemu i przekształtników w nim zawartych. Następnie skoncentrowano się na przekształtniku dołączonym do źródła fotowoltaicznego. Podano jego strukturę, układ sterowania oraz wyniki pracy symulacyjnej w programie PSIM. W artykule zawarto także implementację modelu panelu fotowoltaicznego opartego na obwodzie zastępczym ogniwa i jego równaniach.

1. WSTĘP

Wzrost konsumpcji energii przy jednoczesnym zmniejszaniu się źródeł konwencjonalnych wpływa na rozwój sposobów pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych (m. in. energia wiatru, wody, promieniowania słonecznego). Intensywne działania społeczne, ekonomiczne oraz polityczne w celu promocji „czystej energii” obserwuje się w zasadzie z początkiem XXI wieku. Kraje UE, w tym Polska, zobligowane zostały odpowiednimi aktami prawnymi do osiągnięcia ustalonych poziomów udziału energii z odnawialnych źródeł w całkowitym jej zużyciu. Osiągnięcie planowanych progów wymaga inwestycji w rozwój technologii źródeł odnawialnych.

Wytwarzanie energii elektrycznej z zastosowaniem ogniw fotowoltaicznych przetwarzających energię promieniowania słonecznego przeszło w ostatniej dekadzie znaczącą ewolucję. Na początku 2000 roku całkowita moc zainstalowana na świecie wynosiła 1,4 GW, podczas gdy w końcu 2009 roku wynosiła 22,8 GW, przy czym w Europie znajdowała się przeważająca część instalacji (całkowita moc 16 GW, z czego 10 GW w Niemczech). W 2010 roku roczna światowa produkcja systemów PV osiągnęła 24 GW, to jest tyle ile sumaryczna produkcja tego typu systemów w ciągu

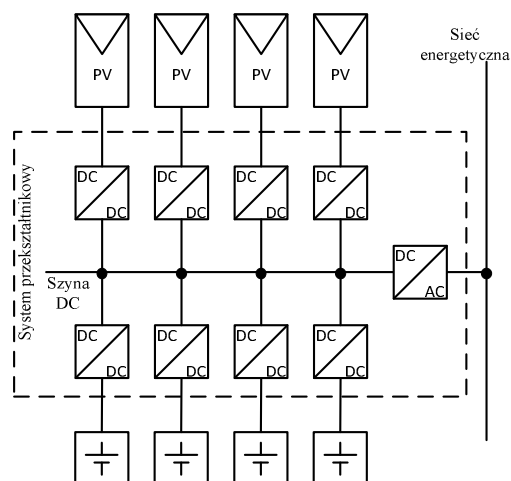
poprzednich 10 lat. W perspektywie zarysowuje się dynamiczny rozwój tej gałęzi energetyki podobny do szybkiego rozwoju technologii systemów przetwarzania energii wiatru mający miejsce w pierwszej dekadzie XXI wieku.

Perspektywy rozwoju pojazdów elektrycznych wskazują, że zapotrzebowanie na energię elektryczną będzie w przyszłości rosło szybciej niż wynikałoby to tylko z obserwowalnych dziś tendencji. Pewne bariery takie jak koszty magazynów energii, ich żywotność oraz gęstość energii powodują, że rozwój tych technologii jest jak na razie w znacznym stopniu ograniczony. Niemniej jednak, na świecie (w tym i w Polsce) prowadzi się szeroko prace badawcze i rozwojowe w poszukiwaniu nowych materiałów do budowy baterii elektrochemicznych dedykowanych do pojazdów elektrycznych i hybrydowych podnoszących ich żywotność oraz gęstość energii. Uważa się, że osiągnięcie bariery zasięgu pojazdu na poziomie 200 km przy rozsądnej cenie magazynu energii spowoduje gwałtowny wzrost użytkowanych pojazdów produkowanych w oparciu o te technologie. Konieczność ładowania magazynów energii będących źródłem zasilania tych pojazdów jest kolejnym argumentem w kierunku rozwoju technologii źródeł odnawialnych, w tym przede wszystkim systemów źródeł pracujących w lokalnych sieciach energetycznych. Zapewnienie dostaw energii na poziomie przewidywanego zapotrzebowania ze źródeł konwencjonalnych wymagałoby nie tylko budowy nowych bloków systemowych, ale również rozbudowy infrastruktury służącej przesyłaniu energii elektrycznej, co może okazać się o wiele kosztowniejsze niż instalacje źródeł rozproszonych na poziomie sieci dystrybucyjnej. Już w chwili obecnej okazuje się, że w wielu miejscach (szczególnie na północy kraju) dołączenie dużej farmy wiatrowej wymaga przebudowy bądź budowy nowej linii zasilającej, co w niektórych przypadkach stawia pod znakiem zapytania sens ekonomiczny całego przedsięwzięcia.

Źródła energii odnawialnej takie jak turbiny wiatrowe, czy panele PV cechują się dużą zmiennością dostępnej mocy co przedstawiane jest często jako ich wada i rzeczywiście mogą wpływać negatywnie na system energetyczny, do którego są przyłączone. Stabilizacja zmienności mocy systemów źródeł odnawialnych przy dużej ich koncentracji w systemie energetycznym wymaga stosowania krótko- i długoterminowych magazynów energii elektrycznej lub zarządzania mocą obciążeń. W przypadku, gdy z siecią z dużym udziałem zmiennych z natury źródeł odnawialnych współpracują magazyny energii, możliwe jest przy spełnieniu pewnych warunków technicznych, osiągnięcie profilu ładowania baterii dopasowanego do aktualnej dostępnej mocy źródeł odnawialnych pracujących w sieci. W przypadku zdecentralizowanego ładowania magazynów (np. ładowanie nocne w domu), dopasowane ładowania wymaga dostępu do informacji nt. energii w sieci dystrybucyjnej (koncepcja *smart-grid*). Istnieje również możliwość budowy scentralizowanych systemów źródeł odnawialnych dedykowanych do ładowania baterii

elektrochemicznych podlegających szybkiej wymianie po naładowaniu do określonego poziomu na magazyn nienaładowany.

Niniejszy artykuł dotyczy koncepcji automatycznej stacji ładowania akumulatorów trakcyjnych dla pojazdów elektrycznych zasilanej w znacznym stopniu ze źródeł odnawialnych i przedstawia zaprojektowany system przekształtnikowy współpracujący ze źródłem odnawialnym jakim są panele fotowoltaiczne. Schemat blokowy projektowanego systemu przedstawiony na rys. 1 obrazuje odmienność funkcji modułów przekształtnikowych użytych w układzie.



Rys. 1. Schemat ideowy systemu

Jedną z podstawowych cech źródła fotowoltaicznego jest zależność mocy wytwarzanej od warunków atmosferycznych. Priorytetem jest uzyskiwanie maksymalnej energii przy danym poziomie nasłonecznienia oraz temperatury. Osiągnięte jest to przez stosowanie układu przekształtnikowego wraz z zaimplementowanym układem sterowania śledzącym punkt, w którym moc ogniwa jest maksymalna (ang. *Maximum Power Point Tracking*). Powyższe zadanie powinny umożliwić przetworniki DC/DC dołączone do źródeł PV na rys. 1. Założono, że napięcie źródeł PV jest niższe od napięcia wspólnej szyny DC, stąd układy DC/DC współpracujące z modułami PV będą miały strukturę przetworników podwyższających (ang. *boost converters*).

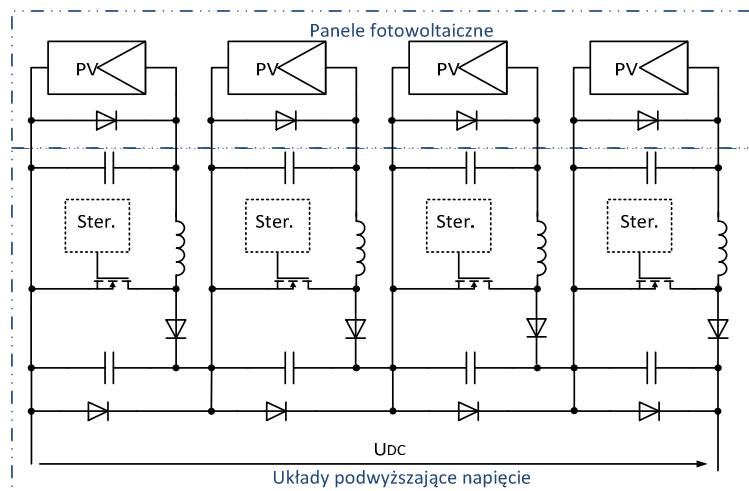
Istotnym elementem systemu ze źródłami odnawialnymi jest element magazynujący energię. Rolę tę pełnią baterie elektrochemiczne. Ciągłe największym powodzeniem ze względu na cenę cieszą się akumulatory kwasowo – ołowiowe. W aplikacjach nowoczesnych zastosowaną są już jednak droższe, ale o lepszych parametrach elektrycznych m.in. baterie litowo – jonowe, litowo – polimerowe. Wszystkie te rodzaje baterii posiadają odrębne własności fizykochemiczne, stąd konieczne stało się dołączenie układów przekształtnikowych ładujących baterię wg zadanej charakterystyki ładowania oraz kontrolującej parametry elektryczne oraz termiczne baterii. Przetworniki pełniące rolę „inteligentnej ładowarki” dołączone są do wspólnej szyny napięcia

pośredniczącego – rys. 1. Założono, że baterie elektrochemiczne będą miały napięcie maksymalne niższe niż napięcie wspólnej szyny DC, stąd układy DC/DC odpowiedzialne za ładowanie magazynów będą miały strukturę przekształtników obniżających (ang. *buck converter*).

Stacja ładowania akumulatorów może być wyposażona w energoelektroniczne układy typu DC/AC sprzęgające wspólną szynę napięcia stałego z siecią energetyczną, co pozwala na oddawanie nadwyżek energii ze źródeł do systemu energetycznego i uzupełnianie niedoborów w czasie, gdy dostępna ze źródeł moc jest niewystarczająca do zaplanowanego ładowania baterii. W przypadku, gdy stacja jest systemem autonomicznym bez podłączenia do systemu energetycznego, wskazane jest zastosowanie centralnego magazynu, spiętego z szyną DC, pełniącego rolę bufora dla nadwyżek i niedoborów energii pochodzącej ze źródeł.

2. PRZEKSZTAŁTNIKI WSPÓŁPRACUJĄCE Z OGNIWAMI FOTOWOLTAICZNYMI

W literaturze znaleźć można wiele topologii i rozwiązań przekształtników współpracujących z ogniwami fotowoltaicznymi [1-4]. W systemie zastosowano przekształtnik wielowejściowy podwyższający napięcie. Strukturę układu przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Struktura układu wielowejściowego podwyższającego napięcie

Przekształtnik przedstawiony na rys. 2, jest od strony źródła układem wielowejściowym, którego wejścia są dołączone do każdego z modułów fotowoltaicznych (albo niewielkich zestawów modułów PV połączonych szeregowo), natomiast od strony szyny DC jest układem połączonym kaskadowo. Dzięki takiej topologii zapewniono:

- uzyskanie odpowiedniego poziomu napięcia na wyjściu przekształtnika (w układzie pośredniczącym);

- lepsze wykorzystanie ogniw fotowoltaicznych – każdy z modułów (niewielki zestaw modułów) posiada niezależny układ regulacji realizujący algorytm śledzenia punktu mocy maksymalnej, a jednocześnie uniknięto stosowania układów transformatorowych o niższej sprawności;
- lepsze zabezpieczanie źródeł fotowoltaicznych – w przypadku zaciemnienia lub uszkodzenia jednego z ogniw energia jest przekazywana przez diodę zabezpieczającą;
- powiększenie niezawodności i jakości dostaw. Uszkodzenie jednego z przekształtników nie powoduje wyłączenia pozostałych.

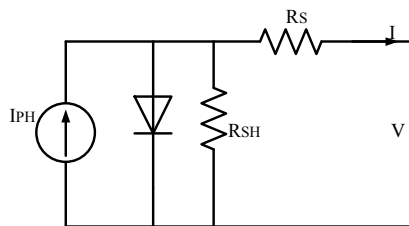
Układ przekształtnika zaimplementowano w programie symulacyjnym PSIM. Dodatkowo zbudowano model panelu fotowoltaicznego. Implementacja ogniwa fotowoltaicznego opierała się na wzorach modelu obwodowego ogniwa fotowoltaicznego [5]. Schemat układu przedstawiono na rys. 3 natomiast użyte równania zaprezentowano na pozycjach (1 - 3).

$$I = N_P I_{PH} - N_P I_S \left(\text{EXP} \left(\frac{q \left(\frac{V + I R_S}{N_S + N_P} \right)}{k T_C A} \right) - 1 \right) - \left(\frac{N_P V}{N_S} + I R_S \right) / R_{SH} \quad (1)$$

$$I_{PH} = (I_{SC} + K_I (T_C - T_{REF})) / \lambda \quad (2)$$

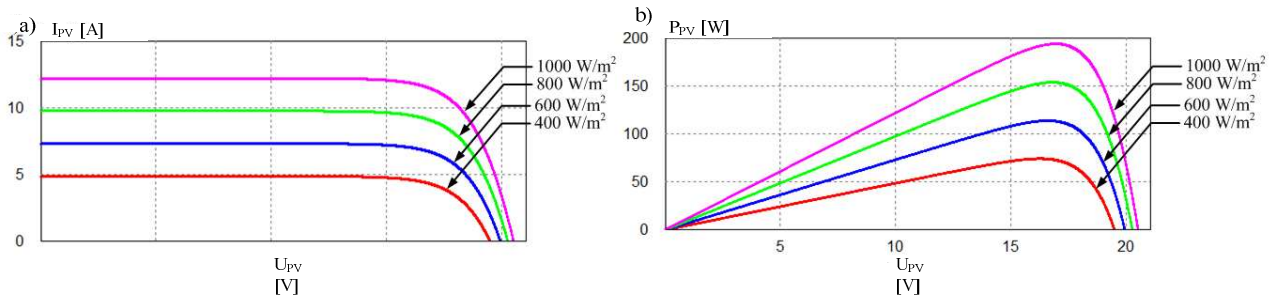
$$I_S = I_{RS} \left(\frac{T_C}{T_{REF}} \right)^3 \text{EXP} \left(\frac{q E_G \left(\frac{1}{T_{REF}} - \frac{1}{T_C} \right)}{k A} \right) \quad (3)$$

Przy czym przyjęto: I – prąd wyjściowy ogniwa fotowoltaicznego [A], I_{PH} – prąd nośników mniejszościowych (generowany pod wpływem padających promieni świetlnych) [A], I_S – prąd nasycenia diody [A], I_{SC} – prąd zwarcia ogniwa w warunkach standardowych [A], I_{RS} – prąd nasycenia diody w warunkach znamionowych [A], V – napięcie wyjściowe ogniwa fotowoltaicznego [V], R_S – rezystancja szeregową reprezentująca straty ohmowe [Ω], R_{SH} – rezystancja równoległa [Ω], q – ładunek elektronu [C], k – stała Boltzmann’a [J/K], T_C – temperatura pracy ogniwa [C], T_{REF} – temperatura referencyjna [C], A – wsp. idealności diody, K_I – wsp. temperaturowy, λ – wartość nasłonecznienia [W/m^2], E_G – przerwa energetyczna, N_P – ilość ogniw połączonych równolegle, N_S – ilość ogniw połączonych szeregowo.



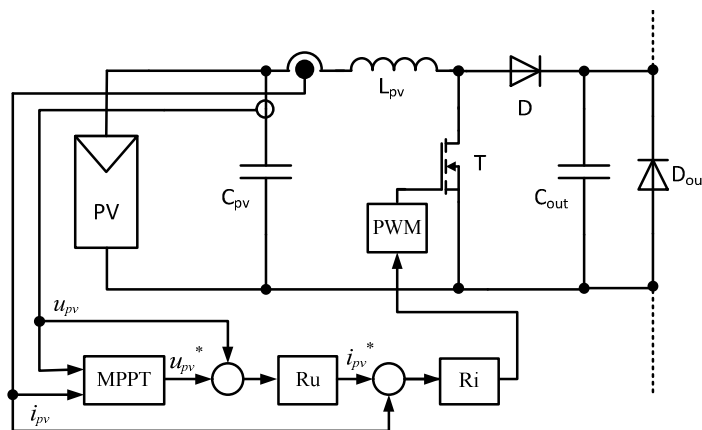
Rys. 3. Model obwodowy ogniwa fotowoltaicznego

Uzyskane w programie PSIM charakterystyki modelu panelu fotowoltaicznego przedstawiono na rys. 4. Dla takiego modelu panelu fotowoltaicznego punkty mocy maksymalnej dla różnych wartości promieniowania nie odpowiadają tej samej wartości napięcia na panelu. W związku z tym zaimplementowana zostanie metoda poszukiwania punktu mocy maksymalnej, a produktem wyjściowym tego algorytmu będzie sygnał zadany dla regulatora napięcia panelu fotowoltaicznego.

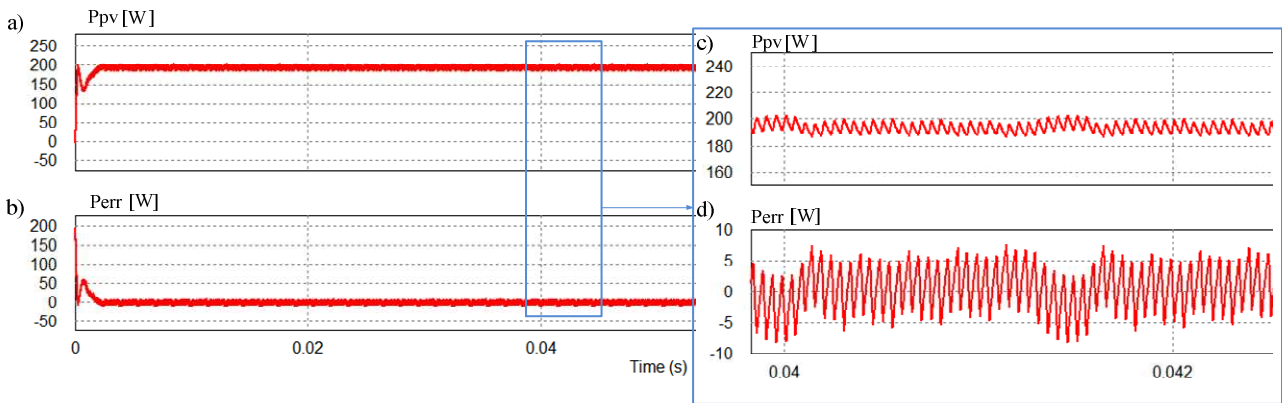


Rys. 4. Charakterystyki uzyskane po zaimplementowaniu modelu matematycznego panelu fotowoltaicznego

Układ regulacji dla pojedynczego przekształtnika przedstawiono na rys. 5. Dla wszystkich pozostałych układów wchodzących w skład przekształtnika multiwejściowego struktura regulacji jest identyczna a ich działania wzajemnie niezależne. Przedstawiony blok MPPT odpowiedzialny jest za śledzenie punktu mocy maksymalnej, czyli odbiór maksymalnej możliwej mocy ze źródła w danych warunkach promieniowania słonecznego. Na rys. 6 oraz rys. 7 przedstawiono działanie układu z zaimplementowanym algorytmem śledzenia punktu mocy maksymalnej: P&O. Algorytm ze względu na prostotę implementacji jest powszechnie stosowany w większości aplikacji. Algorytm działania znaleźć można w literaturze [6,7] poświęconej zagadnieniu śledzenia punktu mocy maksymalnej, dlatego też w niniejszym artykule nie będzie szczegółowo omawiany.

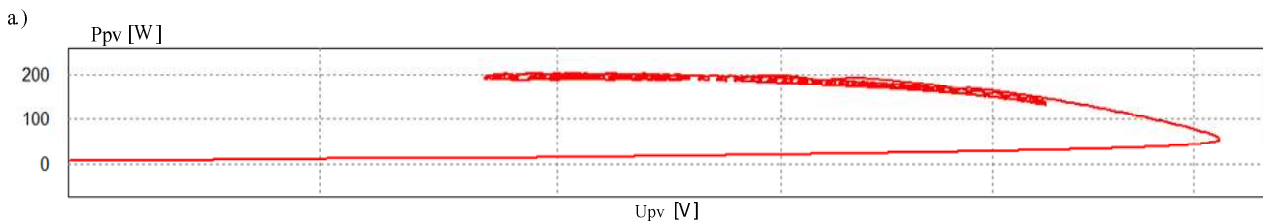


Rys. 5. Schemat układu regulacji dla pojedynczego przekształtnika wchodzącego w skład kaskady przekształtników

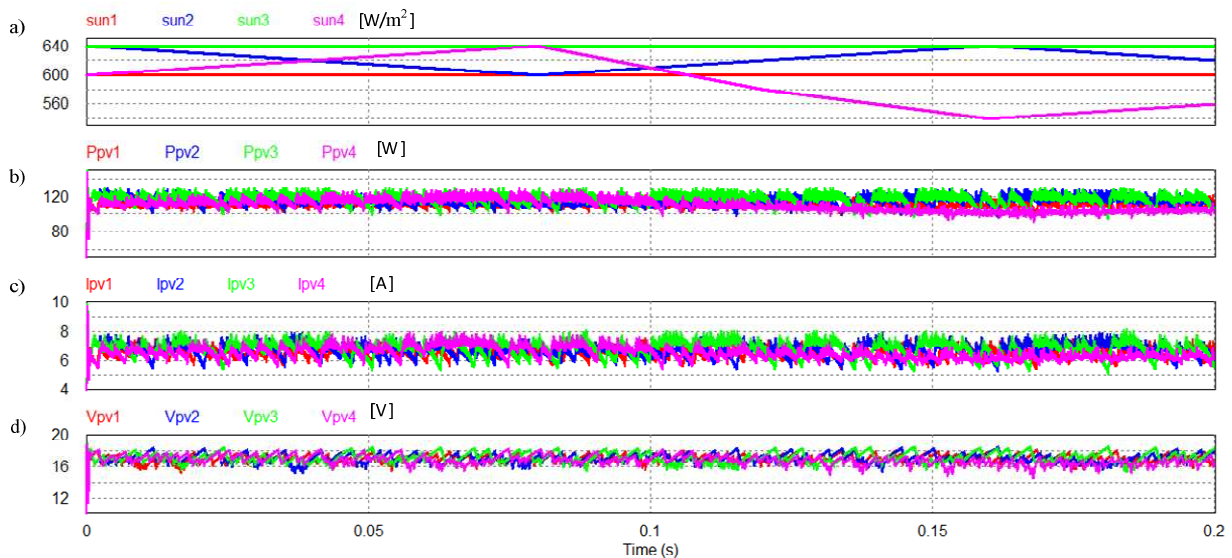


Rys. 6. Przebiegi czasowe a), c) mocy oraz jej błędu b), d) wzg. mocy rzeczywistej dla zadanego nasłonecznienia 1000 W/m^2 przy wykorzystaniu algorytmu P&O

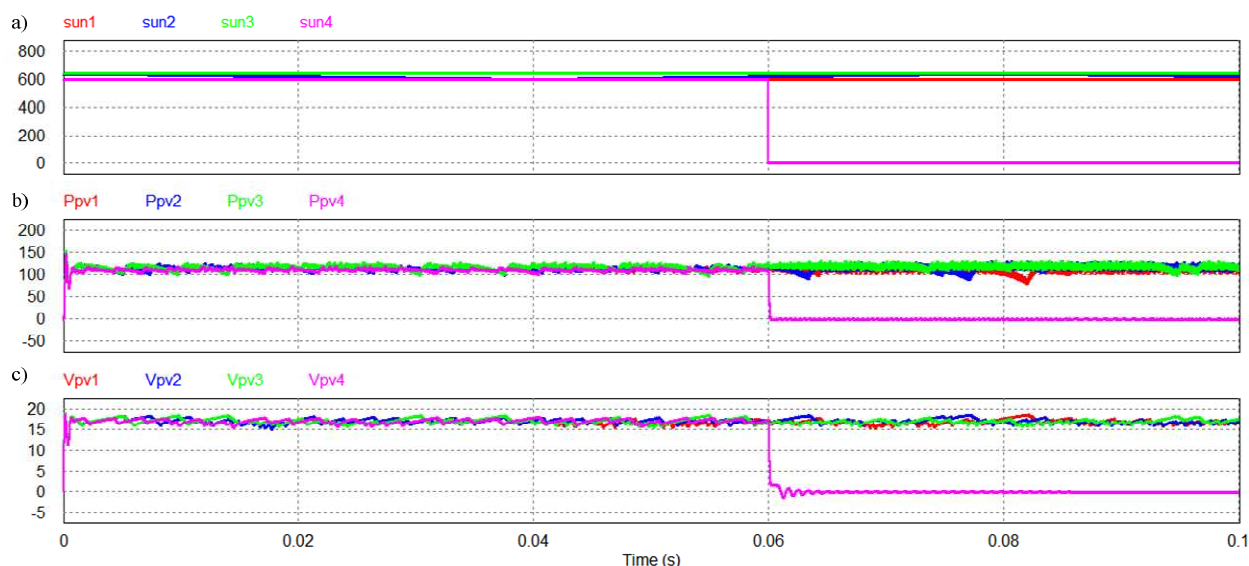
Rys. 7 pokazuje jak punkt pracy układu podąża do wartości bliskiej mocy maksymalnej. Na rys. 6 przedstawiono z jakim błędem ta moc jest osiągnięta. Działanie kaskady przekształtników DC/DC współpracujących z modułami PV przedstawiono na rys. 8, rys. 9. Rys. 8 Przedstawia działanie w normalnych warunkach pracy przy zmiennym nasłonecznieniu, natomiast rys. 9 pokazuje działanie układu w przypadku całkowitego zaciemnienia jednego z modułów fotowoltaicznych. W przypadku zaciemnienia zaczyna działać dioda zabezpieczająca.



Rys. 7. Wykres mocy ogniwa fotowoltaicznego dla zadanego nasłonecznienia przy wykorzystaniu algorytmu P&O



Rys. 8. Przebiegi czasowe: a) zmian nasłonecznienia, b) mocy, c) prądu oraz d) napięcia na ogniwie fotowoltaicznym w układzie z kaskadowym przekształtnikiem



Rys. 9. Przebiegi czasowe: a) mocy, b) prądu, c) napięcia na ogniwie fotowoltaicznym w układzie z kaskadowym przekształtnikiem przy całkowitym zaciemnieniu jednego z ogniw

3. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono schemat blokowy systemu przekształcania i zarządzania energią energii dla systemu fotowoltaicznego przeznaczonego do ładowania baterii elektrochemicznych. W układzie w którym wymagany jest obwód pośredniczący prądu, przekształcanie energii realizowane jest z wykorzystaniem wielowejściowego przekształtnika DC/DC. To pozwala na zmniejszenie liczby paneli obsługiwanych przez jeden moduł przekształtnika energoelektronicznego, co w konsekwencji powoduje zwiększenie sprawności wytwarzania energii przez panele PV oraz zwiększenie niezawodności źródła jako całości, gdyż uszkodzenie jednego modułu nie powoduje odłączenia całego źródła. W pracy przedstawiono założenia pracy systemu, w tym możliwość współpracy z siecią (ang. *On grid*) jak i pracujących niezależnie od sieci (*Off grid*). W artykule skoncentrowano się na analizie pracy i sterowania przekształtników dołączonych do źródeł PV z uwzględnieniem algorytmu poszukiwania mocy maksymalnej zespołu paneli. Przedstawiono symulacje ich pracy w programie symulacyjnym PSIM. Na podstawie przeprowadzonych analiz zaprojektowano i wykonano model systemu elektroenergetycznego, który jest obecnie w fazie badań.

PODZIĘKOWANIA

Przedstawione prace zostały sfinansowane w ramach realizacji projektu badawczo rozwojowego nr N R10 0020 10 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Li W., He X., Review of Nonisolated High-Step-Up DC/DC Converters In Photovoltaic Grid-Connected Applications, *Industrial Electronics (ISIE)*, vol. 58, 2011, s. 1239-1250
- [2] Yao C., Ruan X., Wang X., Isolated Buck-Boost DC/DC Converter for PV Grid-Connected System, *Industrial Electronics (ISIE)*, 2010, s. 889-894
- [3] Xiao W., Ozog N., Dunford W.G., Topology Study o Photovoltaic Interface for Maximum Power Point Traking, *Industrial Electronics (ISIE)*, vol. 54, 2007, s. 1696-1704
- [4] Glasner I., Appelbaum J., Advantage of boost vs. buck topology for Maximum Power Point Tracker in Photovoltaic Systems, 1996
- [5] Tsai H.L., Tu C.-S., Su Y.-J., Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK, *World Congress on Engineering and Computer Science*, 2008
- [6] Salas V., Olias E., Barrado A., Lazaro A., Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2006, s. 1555-1678
- [7] Yu T.-C., Lin Y.-C., *A Study on Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Systems*, 2010