

Michał HARASIMCZUK\*

## **HYBRYDOWY SYSTEM MAGAZYNOWANIA ENERGII FOTOWOLTAICZNEJ**

W artykule przedstawiono oraz opisano hybrydowy system zarządzania energią pozyskaną z paneli fotowoltaicznych. W systemie tym jako magazyny energii zostaną wykorzystane akumulatory oraz superkondensatory. Zostanie omówiona zasada sterowania przepływem energii pomiędzy poszczególnymi elementami systemu umożliwiającą zachowanie pracy panelu fotowoltaicznej w maksymalnym punkcie mocy przy jednoczesnym niewielkim wpływie systemu na jakość energii w sieci energetycznej. W artykule zaprezentowano nowy sposób zarządzania magazynowaniem energii fotowoltaicznej umożliwiający zmniejszenie wagi magazynów przy zachowaniu pierwotnej wydajności systemu.

SŁOWA KLUCZOWE: magazynowanie energii, superkondensator, panel fotowoltaiczny

### **1. ZASADA DZIAŁANIA SYSTEMU MAGAZYNOWANIA ENERGII Z PANELI FOTOWOLTAICZNYCH**

#### **1.1. Znaczenie magazynowania energii**

Pozyskiwanie energii ze źródeł odnawialnych staje się coraz popularniejsze. Marginalny wpływ OZE na środowisko naturalne oraz niewielkie koszty związane z ich obsługą powodują, że w przyszłości może stać się to jedno z głównych źródeł pozyskiwania energii elektrycznej. Panele fotowoltaiczne są obecnie jednym z najczęściej wykorzystywanych odnawialnych źródeł energii [8]. Niestety nieregularne dostarczanie energii elektrycznej przez panel znacznie utrudnia jej wykorzystywanie. W systemie autonomicznym niepodłączonym do sieci energetycznej produkcja energii elektrycznej jedynie w okresie słonecznym wymusza konieczność jej gromadzenia w ciągu dnia a następnie wykorzystywanie jej w nocy lub w czasie niekorzystnych warunków atmosferycznych. W systemie fotowoltaicznym współpracującym z siecią energetyczną oddawanie energii bezpośrednio do sieci negatywnie wpływa na jej jakość. Jest to spowodowane nieregularną produkcją energii przez panel fotowoltaiczny niezależną od

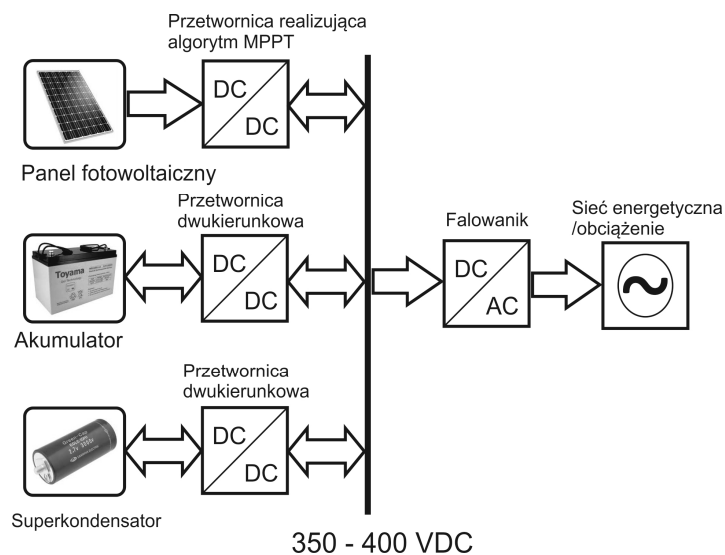
---

\* Politechnika Białostocka

zapotrzebowania na tą energię przez obciążenie/sieć energetyczną. Magazynowanie energii pochodzącej z panelu fotowoltaicznego umożliwia uniezależnienie ilości energii oddawanej do sieci energetycznej od energii dostarczonej przez panel fotowoltaiczny. W konwencjonalnym systemie zarządzania energią fotowoltaiczną jako magazyny energii wykorzystywane są jedynie akumulatory. Charakteryzują się one względnie dużą gęstością energii przy jednoczesnej niewielkiej gęstości mocy. Ładowanie akumulatorów zbyt dużymi prądami lub prądami z wysoką częstotliwością negatywnie wpływa na ich żywotność. Problemów tych nie posiadają superkondensatory, które cechuje około stukrotnie większa gęstość mocy w stosunku do akumulatorów. Gęstość energii jest z kolei około dziesięciokrotnie mniejsza. Jednocześnie superkondensatory są lepiej przystosowane na zmiany wartości prądu ładowania/rozładowywania z wysoką częstotliwością oraz cechują się znacznie lepszą żywotnością. Dodanie superkondensatorów do konwencjonalnego systemu magazynowania energii elektrycznej umożliwia odciążenie akumulatorów od niesprzyjających warunków prądowych, zachowanie pracy ogniwa w maksymalnym punkcie mocy oraz poprawę jakości oddawanej energii elektrycznej.

## 1.2. Topologia systemu

Na rysunku 1 przedstawiono schemat systemu magazynowania energii pochodzącej z paneli fotowoltaicznych wykorzystujących akumulatory oraz superkondensatory jako magazyny energii.



Rys 1. System fotowoltaiczny współpracujący z siecią energetyczną wykorzystujący superkondensatory oraz akumulatory

Panel fotowoltaiczny jest obsługiwany przez przekształtnik podwyższający napięcie. Wzmacnia on napięcie wyjściowe panelu do napięcia wspólnej szyny wysokiego napięcia stałego wynoszącego 350 – 400 V. Przekształtnik ten odpowiada również za realizację algorytmu MPPT zapewniającego pracę ogniwa fotowoltaicznego w maksymalnym punkcie mocy. Oba magazyny energii, akumulatory oraz superkondensatory, są obsługiwane przez dwukierunkowe przekształtniki obniżające – podwyższające napięcie podłączone do wspólnej szyny wysokiego napięcia stałego. Tryb pracy przekształtnika jest uzależniony od kierunku przepływu prądu magazynu energii. Podczas ładowania któregośkolwiek z nich przetwornica pracuje w trybie obniżającym napięcie, w czasie rozładowywania w trybie podwyższającym. Falownik odpowiada za zmianę napięcia stałego na napięcie zmienne o parametrach sieci.

### 1.3. Zasada sterowania

Akumulatory odgrywają istotną rolę w kosztach systemu magazynującego energię fotowoltaiczną. Zazwyczaj w systemie tym są wykorzystywane akumulatory kwasowo – ołowiowe, które są stosunkowo tanie i jednocześnie są w stanie zmagazynować znaczne ilości energii elektrycznej [6]. Ich żywotność wynosi ok. 1000 cykli pracy. Powoduje to konieczność okresowej wymiany akumulatorów. Negatywnie wpływa to na koszty obsługi systemu. Akumulatory wykazują spadek żywotności przy pracy z prądami z dużą częstotliwością lub przy pracy ze zbyt dużymi prądami. Całkowicie innymi właściwościami charakteryzują się superkondensatory [9]. Są znacznie żywotniejsze (ok. 1 000 000 cykli pracy) oraz charakteryzują się znacznie większą gęstością mocy. Niestety nie są w stanie zmagazynować tak dużych porcji energii jak akumulatory. Dodanie do systemu magazynowania energii superkondensatorów umożliwia poprawę warunków pracy akumulatorów [3 – 5]. Natomiast w systemie podłączonym do sieci energetycznej umożliwiło również poprawę jakości oddawanej energii elektrycznej [2],[7]. Na rysunku 2 został zamieszczony schemat elektryczny prostego systemu fotowoltaicznego umożliwiającego magazynowanie energii w akumulatorach oraz superkondensatorach.

Klucz  $T_1$  umożliwia sterowanie przekształtnikiem podwyższającym napięcie obsługującym panel fotowoltaiczny. Klucze  $T_2$ ,  $T_3$  oraz  $T_4$ ,  $T_5$  odpowiadają za sterowanie dwoma przekształtnikami dwukierunkowymi podwyższająco – obniżającymi napięcie obsługującymi akumulatory oraz superkondensatory. Na rysunku 3 został umieszczony schemat blokowy pokazujący zasadę sterowania przepływem prądu pomiędzy poszczególnymi elementami systemu zamieszczonego na rysunku 2.

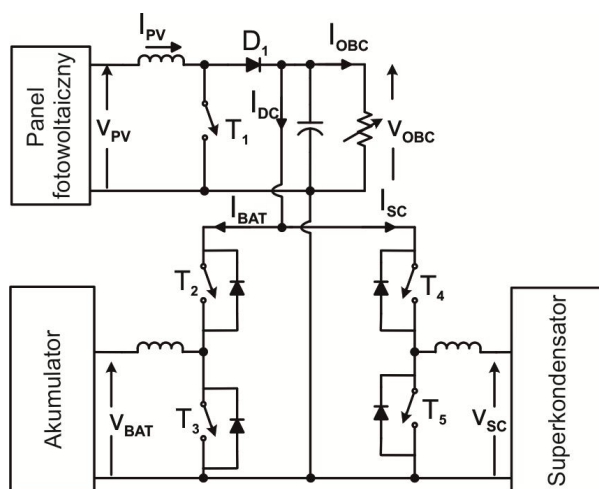
Regulatory PI (inercyjno – całkujące) dobrze odzwierciedlają zasadę sterowania przekształtników zasilanych prądowo. Transmitancję tego regulatora można zapisać za pomocą zależności (1 – 3) [1]:

$$PI(s) = Kp \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) \quad (1)$$

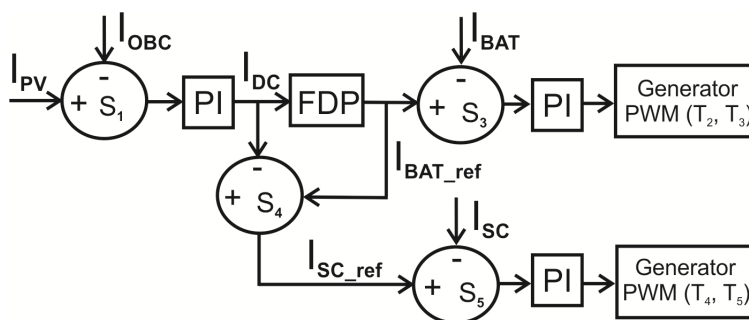
$$K_p = \frac{L}{V_{DC} T_0} \quad (2)$$

$$\tau_i = \frac{L}{R} \quad (3)$$

gdzie:  $L$  – indukcyjność wyjściowa przekształtnika,  $V_{DC}$  – spadek napięcia na indukcyjności w czasie  $T_0$ ,  $T_0$  – czas przewodzenia klucza



Rys. 2. Uproszczony schemat elektryczny systemu fotowoltaicznego



Rys. 3. Zasada sterowania systemu magazynującego energię

W wyniku różnicy sygnałów odpowiadających za prąd obciążenia ( $I_{OBC}$ ) i prąd wyjściowy przekształtnika realizującego algorytm MPPT ( $I_{PV}$ ) otrzymu-

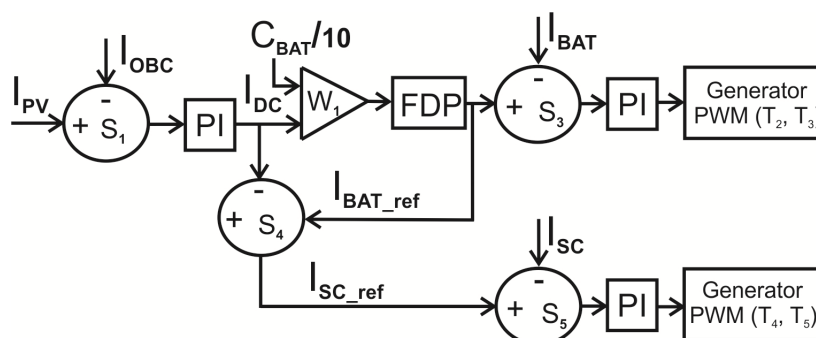
jemy sygnał reprezentujący całkowity zadany prąd magazynów energii ( $I_{DC}$ ). W celu poprawy żywotności akumulatorów zastosowano filtr dolnoprzepustowy (FDP) filtrujący składowe wysokiej częstotliwości sygnału odpowiadającego za regulowanie prądu akumulatora. Sumator  $S_3$  wraz z umieszczonymi szeregowo regulatorem PI oraz generatorem PWM odpowiadają za sterowanie przekształtnikiem w celu regulacji prądu akumulatora. Sumator  $S_4$  odpowiada za ustalenie sygnału reprezentującego zadany prąd superkondensatora ( $I_{SC\_ref}$ ). Jest on wynikiem różnicy sygnału  $I_{BAT\_ref}$  i sygnału  $I_{DC}$  (suma prądów akumulatora oraz superkondensatora powinna być równa różnicy pomiędzy prądem wyjściowym panelu fotowoltaicznego a prądem obciążenia zgodnie z zależnością 4). Sumator  $S_5$  wraz z umieszczonymi szeregowo regulatorem PI oraz generatorem PWM odpowiadają za sterowanie przekształtnikiem w celu regulacji prądu superkondensatora.

$$I_{PV} - I_{OBC} = I_{DC} = I_{SC} + I_{BAT} \quad (4)$$

## 2. NOWY SYSTEM MAGAZYNOWANIA ENERGII FOTOWOLTAICZNEJ

### 2.1. Zasada działania systemu

W dotychczasowych systemach magazynowania energii przy wykorzystaniu superkondensatorów oraz akumulatorów superkondensatory pełniły jedynie rolę pomocniczą odciażając akumulator od pracy przy prądach z dużą częstotliwością. Na rysunku 4 został zaprezentowany schemat blokowy obrazujący zasadę sterowania systemem, w którym część energii jest magazynowana w superkondensatorach. W systemie tym superkondensator poza umożliwieniem filtracji prądu akumulatora ma za zadanie zmagazynować część energii powstałej w okresie wzmożonego nasłonecznienia.

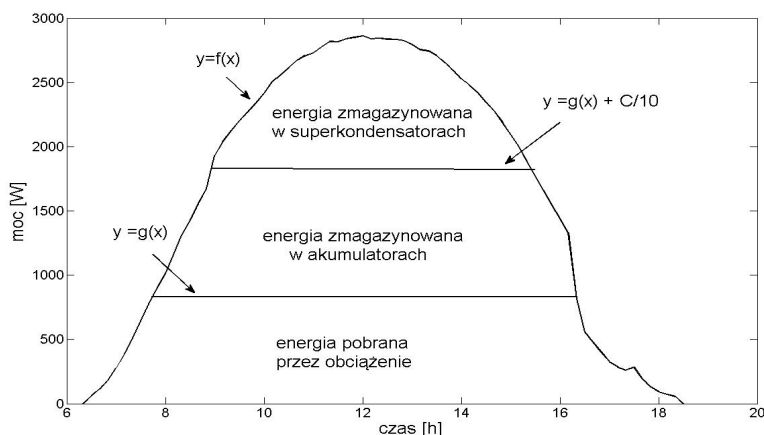


Rys. 4. Zasada sterowania systemu magazynującego energię w superkondensatorach i akumulatorach

W stosunku do zasady sterowania przedstawionej na rysunku 3 został dodany element blokowy  $W_1$ . Ma on za zadanie ograniczyć maksymalny prąd akumulatora do wartości nieprzekraczającej jednej dziesiątej pojemności akumulatorów. Jest to optymalna wartość prądu ładowania akumulatorów kwasowo – ołowiowych [10]. W systemie, w którym cała energia była magazynowana w akumulatorach dobierano ich pojemność do maksymalnego prądu ładowania lub ładowano zbyt dużymi prądami negatywnie wpływającymi na ich żywotność.

## 2.2. Analiza matematyczna energii zgromadzonej przez zasobniki

Na rysunku 5 zaprezentowano dzienny przebieg mocy wyjściowej panelu fotowoltaicznego o mocy 3kWp na terenie Białegostoku 9 kwietnia 2015 roku, w dniu w którym uzysk energii był największy w ciągu całego roku [11].



Rys. 5. Przebieg mocy wyjściowej panelu fotowoltaicznego

Energię wyprodukowaną przez panel fotowoltaiczny zmagazynowaną w akumulatorach, superkondensatorach oraz oddaną do sieci można wyrazić za pomocą wzorów (5) – (8).

$$E_{PV} = \int_0^{24} f(x) dx \quad (5)$$

$$E_{CAP} = \int_{x_3}^{x_4} (f(x) - g(x) + C/10) \quad (6)$$

$$E_{BAT} = \int_{x_1}^{x_2} (f(x) - g(x)) dx - E_{CAP} \quad (7)$$

$$E_{OBC} = E_{PV} - E_{BAT} - E_{CAP} \quad (8)$$

gdzie:  $E_{PV}$  – całkowita energia wyprodukowana przez panel fotowoltaiczny,  $E_{BAT}$  energia zmagazynowana w akumulatorach,  $E_{CAP}$  – energia zmagazynowana w superkondensatorach,  $C$  – pojemność akumulatorów,  $E_{OBC}$  – energia pobrana przez obciążenie.

## 2.2. Dobór optymalnej wagi magazynów energii

Zaprezentowany system magazynowania energii umożliwia zmniejszenie wagi magazynów przy zachowaniu pożądanej gęstości mocy i energii. Tabela 1 przedstawia porównanie żelowego akumulatora kwasowo – ołowiowego z superkondensatorem [12 – 13].

Tabela 1. Właściwości akumulatora i superkondensatora

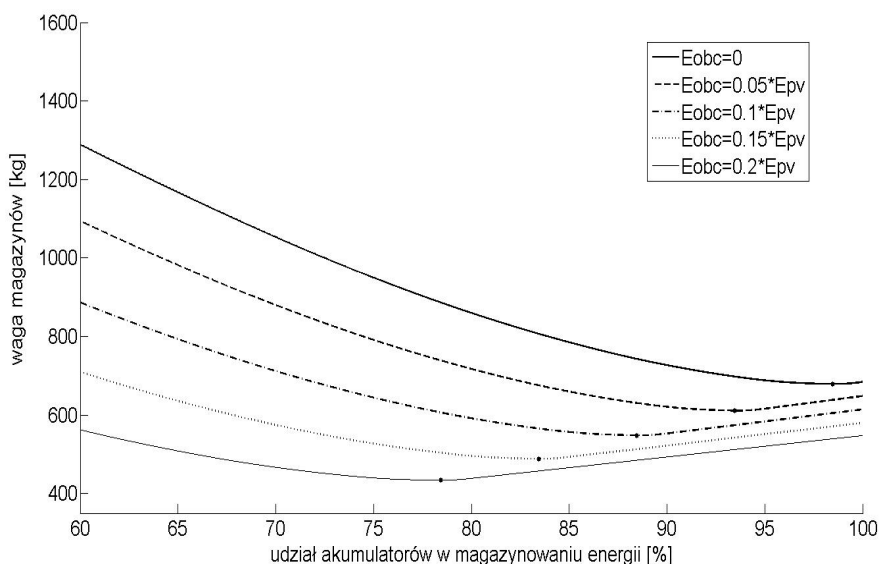
	Model	Napięcie [V]	Pojemność	Energia [Wh]	Waga [kg]	Gęstość energii [Wh/kg]
Akumulator	HZY EV 12 - 100	12	100 Ah	1200	28,3	42,40
Super-kondensator	BCAP 3000	2,7	3000 F	3,0375	0,5	6,075

Na rysunku 6 przedstawiono charakterystyki wagi magazynów energii w funkcji udziału akumulatora w jej magazynowaniu. Charakterystyki zostały wykreślone przy różnych stałych wartościach prądów obciążenia dla przebiegu mocy wyjściowej panelu fotowoltaicznego przedstawionego na rysunku 5. Charakterystyki te możemy opisać za pomocą wzoru (9):

$$h(C) = \left( \frac{1}{g_{bat}} \int_{x1}^{x2} (f(x) - p_{obc}) - \frac{1}{g_{cap}} \int_{x3}^{x4} (f(x) - p_{obc} + C/10) \right) \times 100\% \quad (9)$$

gdzie:  $p_{obc}$  – moc obciążenia,  $g_{cap}$  – gęstość energii superkondensatora,  $g_{bat}$  – gęstość energii akumulatora.

Zgodnie z charakterystykami przedstawionymi na rysunku 6 możemy zauważyć wyraźną zależność wagi magazynów energii od udziału akumulatorów/ superkondensatorów w ich magazynowaniu. Należy nadmienić, że wraz ze zwiększaniem udziałów akumulatorów w magazynowaniu energii proporcjonalnie zmniejsza się udział superkondensatorów. Punkt minimum poszczególnych charakterystyk jest uzależniony od prądu pobieranego przez obciążenie w czasie dostarczania energii przez panel fotowoltaiczny.



Rys. 6. Charakterystyka wagi magazynów energii w funkcji udziału akumulatorów w jej magazynowaniu

### 3. PODSUMOWANIE

W artykule została przedstawiona zasada magazynowania energii z paneli fotowoltaicznych. Przedstawiono nowy sposób zarządzania magazynowaną energią w systemie zawierającym akumulatory oraz superkondensatory. Zaprezentowany hybrydowy system akumulacji energii umożliwia zmniejszenie wagi magazynów przy zachowaniu pierwotnej wydajności systemu. Można to uzyskać poprzez zastąpienie części akumulatorów superkondensatorami, które mają za zadanie zgromadzić energię elektryczną w okresie wzmożonego nasłonecznienia, ograniczając dzięki temu prąd ładowania akumulatorów do 10% ich pojemności. W artykule przedstawiono sposób doboru minimalnej wagi zasobników w zależności od energii dostarczonej przez panel fotowoltaiczny oraz pobranej przez obciążenie/sieć energetyczną. Zaobserwowano istotny wpływ prądu obciążenia na procentowy udział akumulatorów/superkondensatorów w magazynowaniu energii. Podczas niepobierania energii przez obciążenie w czasie jej produkcji przez PV najmniejszą wagę magazynów uzyskano przy całkowitej akumulacji energii w akumulatorach. Zwiększenie energii pobranej przez obciążenie pozwala na zmniejszenie wagi zasobników. Przy mocy obciążenia wynoszącej 0,2 maksymalnej mocy wyjściowej panelu fotowoltaicznego analizowanego dnia, waga magazynów przy całkowitej akumulacji energii przez akumula-



tory wynosiła 547 kg. Zastąpienie części akumulatorów superkondensatorami umożliwiło uzyskanie wagi 437 kg. przy akumulacji 78% energii w akumulatorach i 22% energii w superkondensatorach.

### LITERATURA

- [1] Cabrane Z., Ouassaid M., Maaroufi M. *Integration of supercapacitor in photovoltaic energy storage: Modelling and control*, International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2014, str. 185 – 190.
- [2] Citro C., Luna A., Rocabert J., Munoz-Aguilar R.S., Candela I., Rodriguez P., *Overview of power processing structures for embedding Energy Storage in PV power converters*, 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (2011), str. 2492 – 2498.
- [3] Gee A. M., Robinson F. V. P., and Dunn R. W., “*Analysis of battery lifetime extension in a small-scale wind-energy system using supercapacitors*,” IEEE Trans. Energy Convers (2013), tom 28, nr 1, str. 24–33.
- [4] Glavin M.E., Chan P.K.W., Armstrong S.; Hurley W.G., *A stand-alone photovoltaic supercapacitor battery hybrid energy storage system*, 13th. Power Electronics and Motion Control Conference, (2008), str. 1688 – 1695.
- [5] Kollimalla S.K.; Mishra M.K.; Lakshmi Narasamma N. *A New Control Strategy for Interfacing Battery Supercapacitor Storage Systems for PV System*, Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), 2014 IEEE Students' Conference(2014), str. 1 – 6.
- [6] Nehrir M. H., Wang C., Strunz K., Aki H., Ramakumar R., Bing J. et al., “*A review of hybrid renewable/alternative energy systems for electric power generation: Configurations, control, and applications*,” IEEE Trans.Sustain. Energy (2011), tom. 2, nr 4, str. 392–403.
- [7] Wei Li, Joos G., Belanger J., *Real-Time Simulation of a Wind Turbine Generator Coupled With a Battery Supercapacitor Energy Storage System*, Industrial Electronics, IEEE Transactions (2010), tom: 57, nr: 4 str. 1137 – 1145.
- [8] REN21, "Renewables 2013: Global Status Report (GSR)," [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015\\_Onlinebook\\_low1.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf) (29.02.2016)
- [9] <http://powerelectronics.com/site-files/powerelectronics.com/files/archive/powerelectronics.com/images/archive/310PET23.pdf> (29.02.2016)
- [10] <http://www.brooksequipment.com/files/ps-121000.pdf> (29.02.2016)
- [11] <http://elektrownia.pb.edu.pl/> (29.02.2016)
- [12] <http://www.leria.com.pl/HZY.pdf> (29.02.2016)

### NOVEL SUPERCAPACITOR STORAGE SYSTEM

The paper presents hybrid energy storage system extracted from photovoltaic panels. Presented storage system used batteries and supercapacitors. The control of the flow energy between the elements of the systems has been discussed. Maintained the work of

photovoltaic panel in maximum power point while low impact of storage system on power quality in the grid. The new way to manage storage energy has been proposed. The use of supercapacitors enables to obtain a reduced weight energy storage elements while maintaining the original efficiency of the system. In this paper, results of calculations of weight energy storage at different operating conditions are presented. When the power load equaled 0.2 maximum power output of the photovoltaic panel in analyzed day, a reduction of weight storage elements from 547 kg to 437 kg has been achieved.

*(Received: 1. 02. 2016, revised: 7. 03. 2016)*