

Michał KRYSTKOWIAK*
Mariusz ŚWIDERSKI*

ALGORYTM STEROWANIA ROZPROSZONYMI MOCAMI WYTWÓRCZYMI DLA ELEKTROWNI SOLARNYCH

W artykule zaprezentowano koncepcję algorytmu sterującego rozproszoną elektrownią słoneczną bazującą na zespole niewielkich przetwornic DC/DC pracujących jako wspólny system. Polega on na zbieraniu danych z układu, przy zapewnieniu dopasowania mocy wytwórczej do odbiornika i jednoczesnym zachowaniu wysokiego poziomu niezawodności dla całej struktury. Ponadto opracowany algorytm powinien charakteryzować się dużą dynamiką, przy spełnieniu wszelkich zasad związanych z projektowaniem przekształtników dla systemów solarnych.

SŁOWA KLUCZOWE: ogniwa PV, elektrownia solarna, algorytm sterowania, rozproszona elektrownia solarna

1. WPROWADZENIE

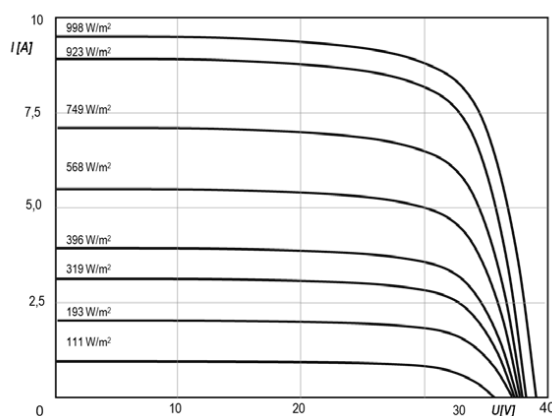
W artykule przedstawiono koncepcję algorytmu sterującego rozproszoną elektrownią słoneczną bazującą na zespole przetwornic DC/DC. Jego zadaniem jest zapewnienie dopasowania mocy wytwórczej do odbiornika, przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiedniego (wysokiego) poziomu niezawodności dla całej struktury. Dodatkowo algorytm powinien się charakteryzować jak największą dynamiką układu, przy spełnieniu wszelkich zasad związanych z projektowaniem przekształtników dla systemów solarnych. W celu prawidłowego funkcjonowania należy pozyskiwać informacje zarówno o samych przetwornicach, jak również o warunkach pracy odbiornika. Dane te, w następnej kolejności, poddane są analizie – zgodnie z techniką Big Data, celem skutecznego przewidywania zachowania zarówno strony wytwórczej, jak i strony odbiornika. Uzasadnieniem wyboru mechanizmów Big Data powinno być występowanie dużej różnorodności w zbieranych informacjach, a także mając na celu konieczność przewidywalności zdarzeń w pracy całego układu, gromadzenie ogromnych zasobów informacji. Będą to dane począwszy od parametrów elektrycznych mierzonych w każdym elemencie systemu i przy zaciskach odbiornika, a koń-

* Politechnika Poznańska.

cząc na danych pochodzących ze środowiska otaczającego takich, jak np. rozkład temperatury. Podejście to ma zastosowanie tam, gdzie dużej ilości danych cyfrowych towarzyszy potrzeba zdobywania nowych informacji i wiedzy, czego bezkompromisowym gwarantem jest dokładne poznanie (przez algorytm) odbiornika i zdolności wytwórczej systemu.

2. UZASADNIENIE ROZPROSZONEJ KONSTRUKCJI PV

Produkowane na skalę przemysłową panele fotowoltaiczne (PV) zwyczajowo mają rozmiar 1450×950 mm, co daje w konsekwencji powierzchnię $S = 1,387 \text{ m}^2$. Standardowa charakterystyka prądowo – napięciowa dla przykładowego panelu PV została przedstawiona na rys. 1.



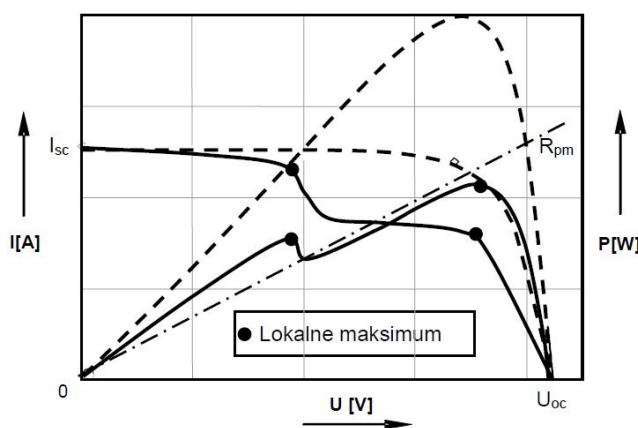
Rys. 1. Przykładowa charakterystyka prądowo – napięciowa panelu PV

W klasycznym systemie solarnym zależnie od doboru przekształtnika energoelektronicznego, spotyka się połączenia szeregowo, jak również równoległe paneli PV. Dla charakterystyki pokazanej na rys. 1 oznacza to odpowiednio sumowanie napięć obwodu otwartego i sumowanie prądów w stanie zwarcia. Niemniej kształt charakterystyki pozostanie analogiczny, a jedynie wielkości napięć i prądów ulegną zmianie. Podczas prac z panelem PV o powierzchni niespełna $S \approx 1,4 \text{ m}^2$ autorzy zwrócili uwagę na wydajność konwersji fotowoltaicznej przy nierównomiernym oświetleniu panelu.

Pierwszą myślą, przy zmaganiach z problemem nierównomiernego oświetlenia, jest przeanalizowanie czynników powodujących owe niekorzystne zjawisko. Z punktu widzenia skali całego systemu łącznie z źródłem promieniowania w postaci słońca pojedynczy panel (a nawet grupa paneli pracujących w jednym systemie) jest od strony słońca widziany jako bardzo niewielki punkt, wręcz

o elementarnej powierzchni. Rozpatrując tą sytuację w ten sposób trudno mówić o nierównomierności oświetlenia. Podążając dalej podanym tokiem rozważań i przyjmując, że górna warstwa atmosfery jest pośrednim źródłem promieniowania słonecznego oraz porównując skalę oświetlonego sklepienia górnych warstw atmosfery ziemskiej do powierzchni badanego panelu, po raz kolejny trudno stwierdzić nierównomierne oświetlenie panelu PV. Dopiero świadomość, gdzie w podanym sposobie rozumowania występują głównie zakłócenia w równomierności oświetlenia daje nam pewne wyobrażenie, z jakim problemem mamy tu styczność. Zakłócenia te występują w niewielkiej odległości od panelu PV – są to głównie zanieczyszczenia na powierzchni panelu, wystające elementy konstrukcji, np.: dachów, masztów antenowych, instalacji odgromowej. Dodatkowo elementami otoczenia systemu PV, które mogą powodować częściowe zacienienie modułu lub instalacji, mogą być warunki naturalne takie, jak: chmury, drzewa, sąsiednie budynki, a nawet zalegający śnieg. Jak się okazuje ich wpływ na działanie pojedynczego panelu jest znaczny, a co za tym idzie również na funkcjonowanie całego systemu.

W warunkach nierównomiernego nasłonecznienia modułu PV temperatura zacienionego ogniwa może wzrosnąć do takiej wartości, że powstaje punkt przegrzania (hot spot) i ogniwo może ulec uszkodzeniu. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest przepływ prądu (tzw. prądu ciemnego) w kierunku przeciwnym przez nieoświetlone ogniwo. W przypadku, kiedy zacienienie obejmuje zaledwie 2% powierzchni modułu, maksymalna moc zostaje zmniejszona aż o 70% [1]. Sytuację z nierównomiernym oświetleniem ilustruje charakterystyka prądowo – napięciowa panelu PV przedstawiona na rys. 2.



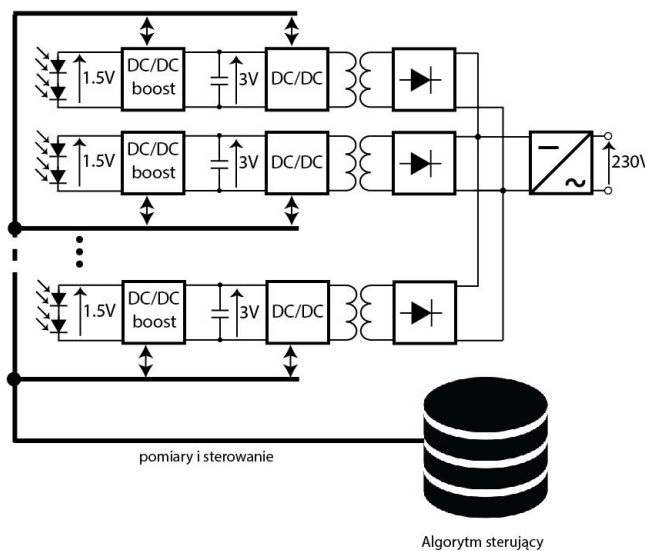
Rys. 2. Charakterystyka prądowo – napięciowa panelu PV w warunkach normalnych i nierównomiernego oświetlenia

Analizując rys. 2 można łatwo dostrzec jak znacząco ograniczona zostaje moc generowana przez panel PV, a ponadto powstają dwa lokalne maksima, które w klasycznym ujęciu sterowania z wykorzystaniem algorytmów MPPT mogą być bardzo trudne do wykrycia. Algorytm łatwo może utknąć w niekorzystnie najbardziej wydajnym punkcie pracy charakterystyki, co jeszcze dodatkowo pogorszy sprawność konwersji energii PV. Dlatego autorzy postanowili dokonać faktoryzacji panelu PV na panele o mniejszej powierzchni w taki sposób, by jak najbardziej zminimalizować niekorzystne efekty utraty sprawności przy nierównomiernym oświetleniu, mając przy tym na uwadze, że rozwiązanie takie nie może cenowo znacznie się różnić od aktualnych rozwiązań dostępnych na rynku.

3. BUDOWA ELEKTRYCZNA ROZPROSZONEGO SYSTEMU PANELI PV

Opisywany panel o niewielkiej powierzchni będzie tak dobrany, aby przy możliwie niewielkim napięciu rzędu 1,5 V generować prąd na poziomie kilkunastu Amperów. Praca z tak małym napięciem ma uzasadnienie ekonomiczne, gdyż eliminuje to potrzebę dodatkowej rozbudowy układu przetwornic małej mocy. Pierwszą z przetwornic będzie bezpośrednio połączony z panelem przekształtnik DC/DC typu BOOST [6], celem zapewnienia ciągłości pobieranego prądu z panelu PV. Kluczowym zadaniem tego przekształtnika jest ponadto zapewnienie odpowiedniego napięcia na zaciskach superkondensatora pełniącego rolę bufora na czas zaniku, bądź znaczącego zmniejszenia promieniowania słonecznego. Przetwornica ta będzie miała zaimplementowany algorytm MPPT tak, aby najbardziej wydajnie wykorzystywać dostępną moc elektryczną generowaną przez panel. Następnym elementem łańcucha przetwarzania energii jest izolowana przetwornica DC/DC. Zastosowanie takiej przetwornicy ma w znacznym stopniu ułatwić łączenie równoległe pojedynczych modułów. Ważną funkcją tej przetwornicy będzie zapewnienie spełnienia warunku równości wartości napięć w stopniu wyjściowym dla każdego z modułów. Do wspólnej szyny DC będzie mógł zostać dołączony falownik, który uzupełnia całą konstrukcję o możliwość pracy z odbiornikami sieciowymi, bądź zapewni bezpośrednią możliwość (przy odpowiednim sterowaniu) współpracy z siecią energetyczną. Dodatkowym elementem systemu mogą być zasobniki energii w postaci klasycznych akumulatorów, które będą odbierać i magazynować energię z systemu PV wtedy, gdy nie jest ona potrzebna w systemie energetycznym, a oddawać w czasie, gdy zapotrzebowanie na energię jest duże a promieniowanie słoneczne niewielkie, np. w nocy. Układ odpowiednich przekształtników wraz z pakietem akumulatorów również można dołączyć do szyny DC systemu. Taki układ uzupełniony o magazyn energii w postaci akumulatorów oraz stan-

ardowo wyposażony w superkondensator w torze przetwarzania energii będzie cechował się bardzo dużą dynamiką i niewrażliwością na chwilowe znaczące pobory energii.



Rys. 3. Koncepcja systemu generacji energii z zastosowaniem rozproszonych paneli PV

4. PRZEGLĄD ALGORYTMÓW MPPT

Najważniejszymi czynnikami wpływającymi na położenie punktu maksymalnej mocy systemu PV na charakterystyce prądowo – napięciowej są: sposób oświetlenia panelu, temperatura, stan degradacji ogniwa oraz jego obciążenie. Niestety parametry te nie są stałe w czasie, stąd konieczność śledzenia położenia punktu maksymalnej mocy w celu zapewnienia jak największej efektywności przetwarzania energii słonecznej w elektryczną. Maximum Power Point Tracking (MPPT) [2] jest techniką stosowaną w systemach fotowoltaicznych polegającą na wprowadzeniu do algorytmu sterownia przetwornicą DC/DC techniki wyszukiwania punktu mocy maksymalnej zapewniającej odpowiednie dopasowanie parametrów pracy modułu PV do obciążenia. Istnieje wiele technik podążania za punktem mocy maksymalnej [3].

Pierwszą z opisanych technik jest metoda stałego napięcia (open-circuitvoltage). Bazuje ona na fakcie, że stosunek napięcia punktu maksymalnej mocy U_{MPP} i wartości napięcia otwartego obwodu U_{OC} jest w przybliżeniu stały.

$$\frac{U_{MPP}}{U_{OC}} = const$$

Zadawane napięcie pracy przetwornicy ustalane jest na wartość kU_{OC} , gdzie k przyjmuje najczęściej wartość $k = 76\%$. Metoda dla poprawnego działania wymaga pomiaru U_{OC} przy zerowym prądzie paneli PV, stąd obciążenie jest wielokrotnie odłączane. Dodatkowo konieczna jest kalibracja parametru k spowodowana starzeniem się paneli PV. Jest to przybliżona metoda śledzenia punktu mocy maksymalnej.

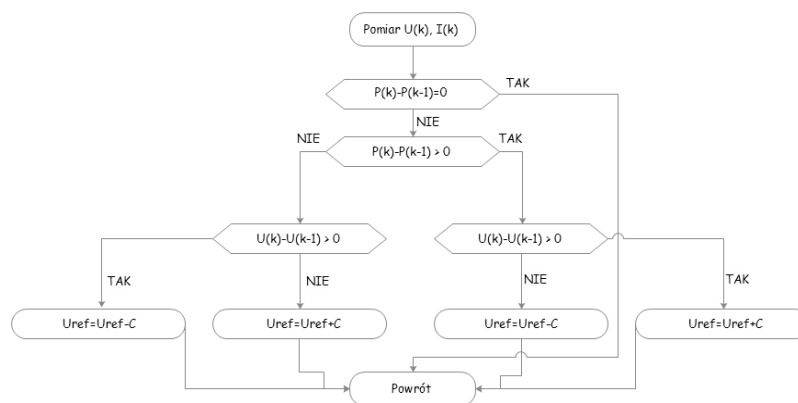
Drugą techniką jest metoda stałego prądu (short-circuitcurrent). Bazuje ona na fakcie, że prąd w maksymalnym punkcie mocy I_{MPP} jest proporcjonalny do prądu zwarcia wyjścia I_{SC} modułu PV.

$$\frac{I_{MPP}}{I_{sc}} = const$$

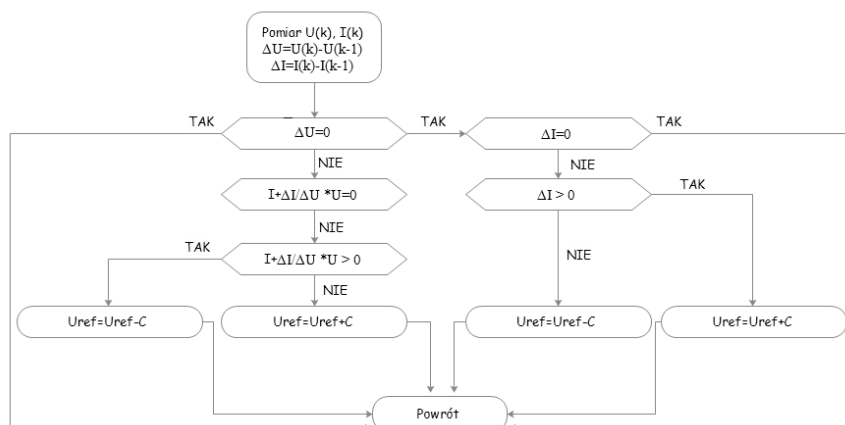
Zadawany prąd pracy przetwornicy ustalany jest na wartość kI_{sc} , gdzie k przyjmuje najczęściej wartość $k = 78\%–92\%$. Metoda dla poprawnego działania wymaga pomiaru I_{sc} , stąd następuje wielokrotne zwieranie wyjścia modułu. Również w tym przypadku dodatkowo konieczna jest kalibracja parametru k spowodowana starzeniem się paneli PV. Jest to przybliżona metoda śledzenia punktu mocy maksymalnej.

Trzecią techniką jest metoda wspinaczkowa (perturb and observe) [4]. Algorytm ten często nazywany jest metodą wchodzenia i cofania się, opiera się na zasadzie P&O. Maksymalny punkt mocy osiąga się przez porównanie mocy przed i po zmianie napięcia pracy przetwornicy. W przypadku, gdy chwilowa wartość mocy jest większa niż poprzednia oznacza to, że zaburzenie zostało wykonane w właściwym kierunku. W przeciwnym wypadku następuje zmiana kierunku zaburzenia. Schemat blokowy algorytmu przedstawiono na rys. 4. Metoda ta po osiągnięciu punktu wierzchołkowego (stan ustalony) na charakterystyce $P(U)$ może powodować oscylacje wokół punktu mocy maksymalnej, co z kolei jest powodem strat energii. Zaletą tego algorytmu jest natomiast łatwa implementacja oraz pewność znalezienia się w lokalnym maksimum mocy systemu PV.

Ostatnią przytoczoną techniką jest metoda przewodności przyrostowej [5] (incremental conductance). Bazuje na regule dopasowania impedancji. Kontroluje moc w taki sposób, aby dopasować rezystancję wewnętrzną modułu PV do rezystancji wejściowej konwertera. Algorytm przewodności przyrostowej pozwala uzyskać większą dokładność niż opisana metoda P&O przy szybko zmiennych warunkach oraz zapewnia szybkie znalezienie się w lokalnym maksimum MPPT. Istotną wadą tego rozwiązania jest zwiększona ilość obliczeń w porównaniu do metody P&O. Algorytm może powodować oscylacje przy dużych zmianach oświetlenia. W omawianym przypadku zostanie użyta właśnie ta metoda.



Rys. 4. Schemat blokowy algorytmu P&O



Rys. 5. Schemat blokowy algorytmu Incremental Conductance

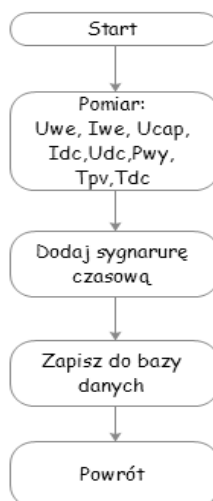
5. ALGORYTM STEROWANIA SYSTEMEM ROZPROSZONYCH PANELI PV

Sterowanie proponowanym systemem rozproszonych paneli PV odbywać się będzie dwutorowo. Pierwszym zadaniem algorytmu będzie sterowanie online mające zapewnić właściwe odszukanie punktu mocy maksymalnej i prace w jego okolicach, a także odpowiednie parametry elektryczne panujące na szynie DC. W tym celu wykorzystany zostanie układ scalony z zaimplementowanym odpowiednim algorytmem. Druga funkcja opracowanego systemu stero-

wania polega na gromadzeniu danych związanych z pracą przetwornicy, jak również wyznaczeniu predykcji. Parametrami mierzonymi będą:

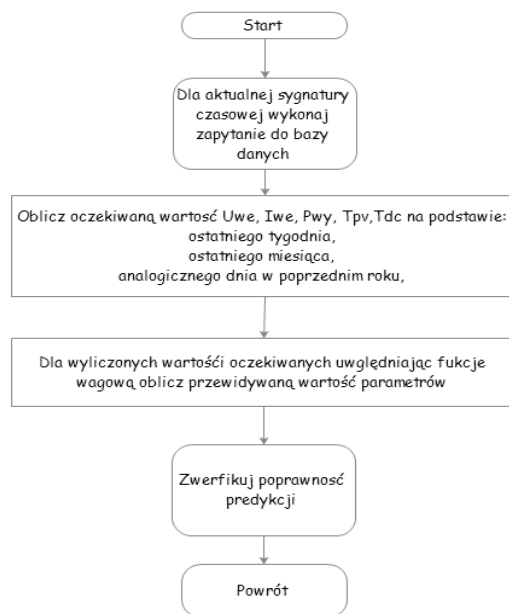
- U_{we} – napięcie wyjściowe panelu PV (w punkcie mocy maksymalnej),
- I_{we} – prąd wyjściowy panelu PV (w punkcie mocy maksymalnej),
- U_{cap} – napięcie na zaciskach superkondensatora,
- I_{DC} – prąd wyjściowy dostarczany do szyny DC,
- U_{DC} – napięcie wyjściowe szyny DC,
- P_{wy} – moc pobierana przed odbiorniki,
- T_{PV} – temperatura panelu PV,
- T_{DC} – temperatura układu przetwornic.

Sekwencja pomiarowa będzie wykonywana cyklicznie w losowych odstępach czasu. Ponadto istnieje możliwość zaimplementowania analizy różnicowej, która będzie pobierać zestaw danych tylko w przypadku zmiany wybranych parametrów o założoną wartość. Wstępnie podczas implementacji będzie to wyłącznie pomiar co określony czas (rys. 6).



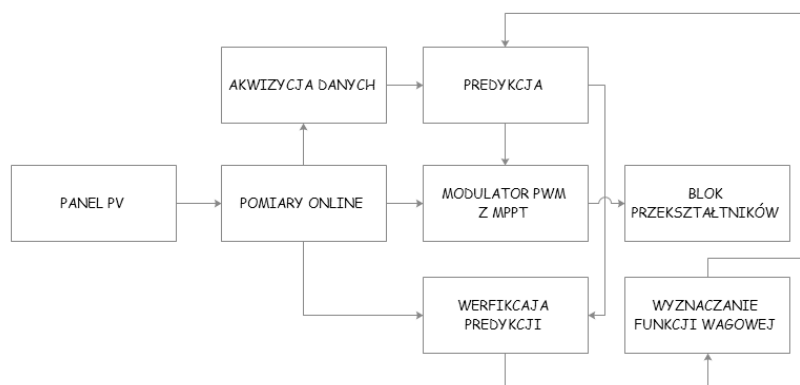
Rys. 6. Procedura wykonująca pomiary (akwizycję danych)

Sekwencja sterowania predykcyjnego ma na celu wyznaczenie spodziewanych parametrów pracy układu na podstawie danych archiwizowanych podczas działania układu. Wiedząc, że zjawiska pogodowe związane z porami roku powtarzają się cyklicznie, można próbować przewidywać parametry otoczenia, w którym system fotowoltaiczny zostanie zainstalowany. Działanie algorytmu wyznaczania przewidywanych parametrów ilustruje rys. 7.



Rys. 7. Procedura wyznaczania wartości oczekiwanych

Przewidywanie pozwoli odpowiednio dostosować moc generowaną do danego zapotrzebowania, eliminować powtarzające się przyczyny zacięnięć jeszcze przed ich wystąpieniem, co znacząco wpłynie na żywotność panelu. Ponadto umożliwi (o ile zapotrzebowanie na moc będzie poniżej maksymalnego) odpowiednio aktywację bądź dezaktywację poszczególnych paneli PV wyszukując przy tym te, których temperatura jest najniższa. Poglądowy schemat układu sterowania pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Schemat blokowy układu sterowania

6. PODSUMOWANIE

Przedstawione rozwiązanie polegające na podziale standardowego panelu PV na mniejsze części zdecydowanie poprawi niezawodność układu, jak również znacząco ograniczy problem zacienień. Algorytm sterowania wraz z techniką predykcji pozwoli w pewnym stopniu zbudować model promieniowania słonecznego dla miejsca ulokowania systemu oraz poznać odbiornik w takim stopniu, aby z wyprzedzeniem reagować na powtarzające się zwiększone zapotrzebowanie mocy w układzie. Prezentowane rozwiązanie umożliwi również zwiększenie żywotności zaimplementowanych w systemie paneli fotowoltaicznych. Autorzy planują w najbliższym czasie praktyczną realizację przedstawionego rozwiązania.

LITERATURA

- [1] Ewa Klugmann–Radziemska, Odnawialne źródła energii – przykłady obliczeniowe, Wydanie V, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2015.
- [2] Krystkowiak M., Gulczyński A., Model symulacyjny i eksperymentalny przekształtnika solarnego współpracującego z siecią energetyczną, Prace Instytutu Elektrotechniki 2016, Z.273, s. 95–104.
- [3] T. ESRAM, P.L. CHAPMAN, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, June 2007.
- [4] Y. Chu and P. Meisen, "Review and comparison of different solar energy technologies," Global Energy Network Institute (GENI), San Diego, CA, 2011.
- [5] Safari A, Mekhilef S. 'Incremental Conductance Mppt Method For PV Systems' IEEE, DOI: 10.1109/CCECE.2011.6030470.
- [6] A. Cordeiro; D. Foito; V. Fernão Pires, A PV panel simulator based on a two quadrant DC/DC power converter with a sliding mode controller. 2015 ICRERA 2015. Pages: 928 – 932, DOI: 10.1109/ICRERA.2015.7418545.

CONTROL ALGORITHM OF SOLAR POWER PLANT WITH SPREAD SYSTEM OF PV PANELS

The article presents the concepts of control algorithm distributed solar power plant based on small power DC/DC converters working as a common system as seen from the terminals of the receiver. The work algorithm will involve the collection of data from the system, while ensuring fit generation capacity to the receiver and at the same time maintaining a high level of reliability for the entire structure. Additionally the elaborated algorithm will be characterized as the greatest dynamics of the system, while maintain in gall the rule relating to the design of inverters for solar systems.

(Received: 13. 02. 2017, revised: 28. 02. 2017)