

PAULINA NIEDZIELA¹, KONRAD GÓRAK¹, CZESŁAW PUCHALSKI²

¹ Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Biologiczno-Rolniczy, e-mail: paulaniedziela@gmail.com, konrad.gorak@interia.pl

² Uniwersytet Rzeszowski, Katedra Bioenergetyki i Analizy Żywności, e-mail: cpuchal@ur.edu.pl

ZACIENIENIE PANELI FOTOWOLTAICZNYCH

W pracy przedstawiono wpływ zacielenia na działanie ogniw fotowoltaicznych oraz oddziaływanie cienia na uzysk energii. Dokonano analizy prawdopodobieństwa uszkodzenia paneli fotowoltaicznych. Wykazano możliwości ochrony modułów, sposoby zapobiegania lub zmniejszania efektu zjawiska zacielenia.

Słowa kluczowe: moduł fotowoltaiczny, diody by-pass, orientacja modułu, hot-spot, inwerter, zacielenie

I. WSTĘP

Obecnie prowadzi się bardzo intensywnie badania nad nowymi technologiami dotyczącymi wykorzystania energii słońca. Postęp technologiczny dotyczący produkcji paneli fotowoltaicznych doprowadził do istotnego wzrostu nowych systemów PV [REN 21]. Zacielenie ma ogromny wpływ na efektywność i prace instalacji fotowoltaicznych. Powoduje natychmiastowy spadek generowanego prądu [Haberlin 2012]. Dodatkowo efekt zacielenia może powodować tworzenie się gorących punktów, tzw. hot-spot'ów [Szymański 2014].

Najczęstszymi przyczynami zacielenia są [Ramabadran i Mathur 2009, Sullivan i in. 2013, Wandhare i in. 2013, Wang i Hsu 2011]:

- Zabrudzenia paneli,
- Zalegające liście lub śnieg,
- Elementy konstrukcyjne budynku,
- Elementy krajobrazu,
- Błędy przy projektowaniu instalacji fotowoltaicznej [Głów i Kurz 2014].

Instalacja fotowoltaiczna, podobnie jak każda inna będzie pod wpływem czynników atmosferycznych ulegać ciągłemu zabrudzeniu, co przyczynia się do spadku wydajności modułów [Szymański 2012 a, b, c]. Zabrudzenia paneli fotowoltaicznych powstają głównie w wyniku działania czynników zewnętrznych takich jak kurz czy pył. Część zanieczyszczeń jest zmywana przez deszcz, jednak spora ilość zanieczyszczeń gromadzi się w dolnej części panelu. Kolejnym problemem zaliczanym do tej grupy są odchody ptaków. Pomimo, że powodują one zacielenie paneli PV, przyczynią się również do ich stałego uszkodzenia, wyrządzając odbarwienia szkła i uszkodzenia powierzchni panelu. Porą

zimową, czynnikiem powodującym zacienienie modułów jest zalegający śnieg, który częściowo lub całkowicie uniemożliwia generację energii. Ciężar śniegu wywiera nacisk na moduły i konstrukcję wspierającą co mocno oddziałuje na konstrukcję instalacji, powodując uszkodzenia mechaniczne. Do zacienienia mogą się również przyczynić błędy przy projektowaniu instalacji, wynikające z nieuwzględnienia istniejących elementów konstrukcji budynków, takich jak kominy, ptaki (np. jaskółki), wykusze czy elementy najbliższego otoczenia [Jarmuda 2015].

Usunięcie wszystkich negatywnych czynników wpływających na wydajność paneli PV nie jest możliwe, jednak można postępować zgodnie z pewnymi rozwiązaniami, które mają na celu całkowite lub częściowe wyeliminowanie skutków zanieczyszczeń. W tej grupie możemy wymienić m.in.:

- Systematyczne czyszczenie modułów,
- Zamontowanie w instalacji fotowoltaicznej diod bocznikujących,
- Stworzenie prawidłowego projektu instalacji fotowoltaicznej, uwzględniającego stałe elementy otoczenia,
- Właściwa konfiguracja połączenia modułów,
- Zastosowanie inwerterów z wieloma trackerami MPP lub mikroinwerterów [Głów i Kurz 2014].

Zastosowanie się do wyżej wymienionych wytycznych, może wyeliminować wiele sytuacji powodujących zacienienie ogniw i straty w procesie generacji energii. Wpływie to na podwyższenie sprawności pracy modułów fotowoltaicznych, i przyczyni się do zmniejszenia strat ekonomicznych [Cipriani i in. 2014].

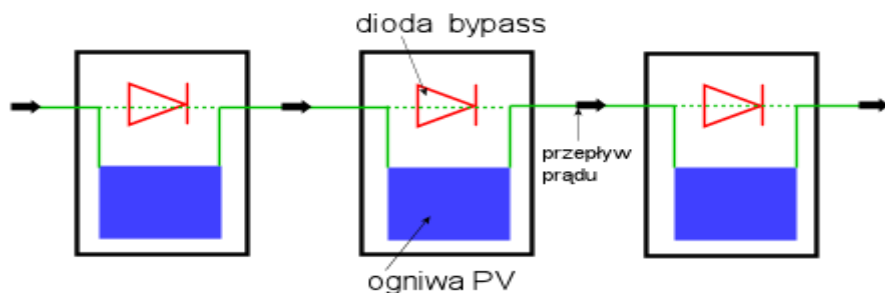
Celem opracowania było przedstawienie wpływu zacienienia na działanie ogniw fotowoltaicznych oraz oddziaływania cienia na uzysk energii. Powyższy problem zaprezentowano na tle działania diody bocznikującej, charakterystyki prądowo napięciowej paneli fotowoltaicznych, orientacji paneli fotowoltaicznych i zastosowania inwerterów oraz mikroinwerterów.

II. DZIAŁANIE DIODY BOCZNIKUJĄCEJ

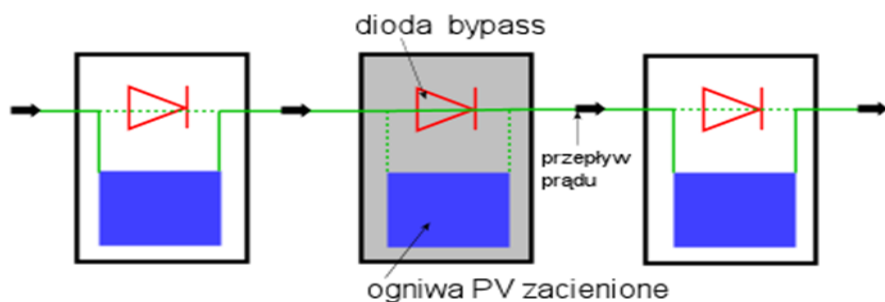
W celu zapobiegania skutkom zacienienia w modułach PV stosuje się diody bocznikujące (ang. *by-pass*). Diody bocznikujące są niezbędnym elementem budowy modułu, zabezpieczającym instalację przed negatywnym działaniem zacienienia. Diodę instaluje się równolegle do łańcucha ogniwa, tak aby kierunek jej polaryzacji był do niej przeciwny [Klugmann-Radziemska 2010]. Dioda bocznikująca zaczyna działać wówczas, gdy jedno z ogniw zostanie przysłonięte. Najważniejszym zadaniem tej diody jest umożliwienie dalszego przepływu prądu z ogniwa które nie zostały zacienione [Tomasz 2018]. Ciężko jest określić, jakie zacienienie spowoduje polaryzację diody bocznikującej w kierunku przewodzenia. W głównej mierze zależy to od rodzaju ogniw oraz od wykorzystanych diod bocznikujących, jednak zazwyczaj 20% różnica oświetlenia wystarczy do aktywacji diody bocznikującej. Gdy na ogniwa fotowoltaiczne pada promieniowanie słoneczne bez zacienienia, prąd przepływa tak jak na rys. 1 [Szymański 2013, 2014].

W chwili gdy dojdzie do zacienienia, ogniwo nie jest w stanie produkować takiej samej ilości energii co niezacienione ogniwo. Staje się ono opornikiem, w którym większość prądu z niezacienionych ogniw przekształca się w energię cieplną. Duży prąd wsteczny w zacienionym ogniwie może wywołać tzw. odwróconą polaryzację. Napięcie wstecznej polaryzacji osiąga w typowych ogniwach od 15 do 20 V [Kaszubowski 2018]. Ujemne napięcie sprawia, że dioda bocznikująca polaryzuje się w kierunku przewodzenia i daje

możliwość przepływu prądu z niezacienionych ogniw. Przepływ prądu przez ogniwa zacienione przedstawia rys. 1 [Szymański 2014].



Ogniwa niezacienione / Solar panels unshaded



Ogniwo środkowe zacienione / Solar panel (in the middle) shaded

Rys. 1. Przepływ prądu przez ogniwa fotowoltaiczne w normalnych warunkach i podczas zacienienia drugiego ogniwa [Szymański 2012 c]

Ryc. 1. Flow stream by cell photovoltaic in normal conditioner [after Szymański 2012c]

Diody bocznikujące chronią również przed przepływem prądu wstecznego, powodującego wytworzenie energii cieplnej i powstawania gorących punktów tzw. hot-spot'ów [Głów i Kurz 2014]. W rezultacie, po ustąpieniu czasowego zacienienia uszkodzone ogniwo wciąż powodowałoby ubytki energii w instalacji PV. Warto zauważyć, że w najbardziej rozpowszechnionych modułach fotowoltaicznych składających się z trzech łańcuchów po 20-24 ogniwa, wykorzystuje się trzy diody bocznikujące [Szymański 2014].

Większa liczba diod bocznikujących wpływa korzystnie na instalacje PV [Kaszubowski 2018]. Zazwyczaj stosowane są 3 diody bocznikujące. W standardowym module zacienienie jednego ogniwa powoduje utratę mocy o 33% [Jarmuda 2015].

III. CHARAKTERYSTYKA PRĄDOWO NAPIĘCIOWA PANELI FOTOWOLTAICZNYCH

Wynikiem różnego rodzaju zacienienia, modułów fotowoltaicznych jest niedopasowanie prądowe lub napięciowe powiązanych paneli. Lekkie zacienienie panelu, jest impulsem do spadku prądu i do niedopasowania prądu między poszczególnymi modułami, przyczynia się

również do spadku wydajności wszystkich modułów w łańcuchu [Szymański 2018]. Silne zacinienie panelu powoduje zadziałanie diod bocznikujących, co skutkuje spadkiem napięcia i niedopasowaniem napięciowym, który może stać się problemem, kiedy występują połączenia równoległe między panelami. W falownikach o mocach od kilku kW z jednym MMPT, często może dochodzić do połączeń równoległych dwóch, a nawet trzech łańcuchów [Kazimierski 2011]. Gdy poszczególne moduły w jednym z szeregów są pod wpływem zacinienia, zaczyna się tworzyć kilka punktów „mocy maksymalnej”. Z definicji jest to tylko jeden punkt maksymalny, można go nazywać globalnym punktem mocy maksymalnej, a dodatkowe – lokalnymi punktami [Szymański 2014].

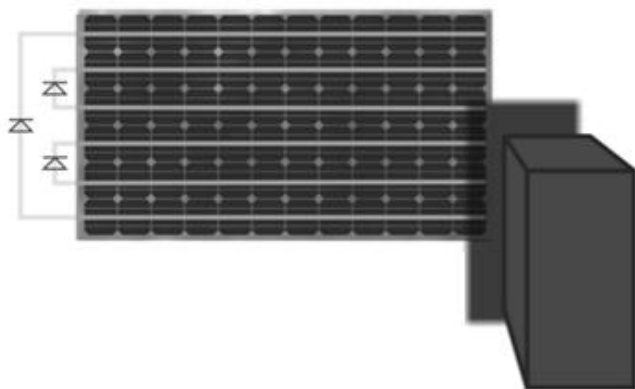
Jakość napięcia i różnice w mocy dla pojedynczych lokalnych punktów mocy maksymalnej zależy od ilości zaciennionych paneli i długości łańcucha oraz zróżnicowania intensywności promieniowania słonecznego pomiędzy polami zaciennionymi i niezaciennionym. Strata mocy liniowo zwiększa się wraz ze wzrostem powierzchni zaciennienia modułu [Znidarec i in. 2017]. Jeżeli występuje kilka lokalnych punktów mocy maksymalnej, falownik powinien odnaleźć punkt globalny, co istotnie obniżyłoby utratę mocy wynikającą z zaciennienia. W związku z zastosowaniem algorytmu śledzenia punktu mocy maksymalnej, falownik nie jest w stanie odnaleźć punktu globalnego [Szymański 2014]. Falownik dąży zawsze do optymalizacji napięcia łańcucha połączonych paneli, a ponieważ lokalne punkty mocy często znajdują się po stronie wyższego napięcia, algorytm uznaje za optymalne, „nie widząc” punktu globalnego [Głów i Kurz 2014].

IV. ORIENTACJA PANELI FOTOWOLTAICZNYCH

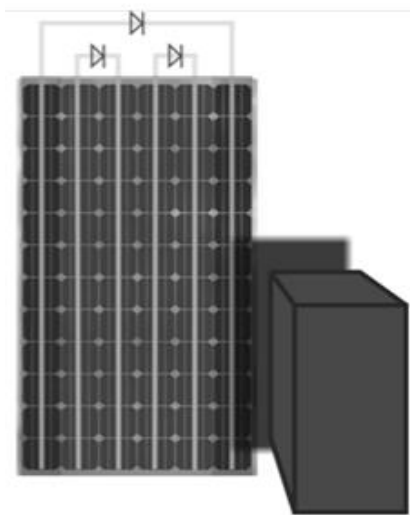
Na etapie projektowania należy zwrócić uwagę na miejsce, w którym instalacja PV ma być zamontowana [Głów i Kurz 2014]. Miejsce to powinno umożliwić uzyskanie maksymalnej ilości promieni słonecznych, a w przypadku wykorzystania falowników stringowych należy wziąć pod uwagę kierunek oraz kąt nachylenia paneli fotowoltaicznych. Różne kierunku a także kąty nachylenia w przypadku zastosowania jednego falownika stringowego, może doprowadzić do spadku mocy ze względu na dysproporcje w ekspozycji światła [Szymański 2013, 2014].

Optymalny kąt nachylenia modułów w stosunku do słońca wynosi ok. 90°. Wynika stąd że w polskich warunkach klimatycznych, najbardziej optymalny kąt roczny nachylenia paneli do ziemi to +/- 35°. Jednak w związku ze zmianą położenia słońca w ciągu roku można wykorzystać trzy kąty nachylenia około 20° dla okresu letniego, około 45° dla okresu jesień/ wiosna, oraz 65° dla okresu zimowego. W przypadku dachu pochylego panele montuje się zgodnie z kątem nachylenia dachu, ponieważ zmiana kąta modułów wiąże się z dużymi kosztami, które nie przekładają się na znaczące zwiększenie produkcji energii [Kras 2017]. Na niektóre zaciennienia użytkownik instalacji fotowoltaicznej nie ma wpływu. Dlatego też, aby diody bocznikujące spełniały swoją funkcję, istotnym jest dokonanie montażu instalacji PV, w odpowiedniej orientacji, poziomej lub pionowej [Głów i Kurz 2014].

Podczas gdy panel ustawiony jest poziomo (rys. 2), cień pojawia się wzdłuż modułu. Zaciennienie spowodowane jest elementem stałym lub zalegającym u dołu, spowoduje to wyłączeniem wszystkich trzech ogniw. Rezultatem będzie brak produkcji energii. Natomiast ułożenie tego panelu w pozycji pionowej (rys. 2) zmniejszy skutek zaciennienia i odłączy tylko jeden z trzech łańcuchów ogniw, a spadek energii wyniesie tylko 33% [Głów i Kurz 2014].



Ustawienie poziome paneli
Horizontal panel settings



Ustawienie pionowe paneli
Vertical panel settings

Rys. 2. Wpływ ustawienia poziomego i pionowego panelu PV na pojawiające się zacinienie od wschodu lub zachodu [Szymański 2012]

Ryc. 2. *The effect of the vertical setting of the PV panel on the occurring shading from the east or west [after Szymański 2012]*

Analizując możliwości przeciwdziałania skutkom zacinień, warto zwrócić uwagę na orientację paneli w zależności od położenia ogniw oraz od kierunku, z którego może pojawić się zacinienie [Głów i Kurz 2014]. Przyjmując, że łańcuchy ogniw w module połączone są pionowo, a zacinienie będzie padać od strony południowej, należałoby w takiej sytuacji zamontować panele na dachu w orientacji poziomej. Zaś, jeżeli zacinienie będzie powstawać od strony zachodniej lub wschodniej, w tym przypadku należy ułożyć panel pionowo [Szymański 2014]. W każdym z tych przypadków, dąży się do maksymalnego obniżenia spadku mocy, który w opisanych wyżej sytuacjach, będzie występował tylko na poszczególnych fragmentach panelu.

V. ZASTOSOWANIE INWERTERÓW ORAZ MIKROINWERTERÓW

W sytuacji, kiedy zamontowanie instalacji fotowoltaicznej jest możliwe tylko w miejscu gdzie występuje zacinienie, można wykorzystać dwa lub więcej niezależnych, inwerterów, które doprowadzą do oddzielenia poszczególnych stref i umożliwią uzyskanie z każdej z osobna maksymalnej mocy [Głów i Kurz 2014]. Inwerter jest podstawowym urządzeniem instalacji fotowoltaicznej. Moduły fotowoltaiczne połączone szeregowo tworzą łańcuchy

o odpowiednim maksymalnym napięciu roboczym U_{ocmax} , produkują energię elektryczną w warunkach nasłonecznienia. Sercem instalacji fotowoltaicznej jest inwerter, zmieniający napięcie i prąd stały na napięcie i prąd przemienny. Inwerter kontroluje również poprzez filtr LC, wartość mocy wyjściowej przesyłanej do sieci [Krakowski 2018]. Istnieje możliwość zastąpienia większej ilości inwerterów jednym falownikiem wyposażonym w kilka trackerów MPP [Szymański 2014].

MPP tracker (ang. *Maximum Power Point Tracker*) jest to moduł, w który wyposażony jest każdy nowoczesny inwerter. Służy on do wyszukiwania maksymalnej mocy, z jaką może działać instalacja i tak obciążyć moduły fotowoltaiczne, aby pracowały w tym punkcie. Punkt mocy maksymalnej to miejsce, w którym iloczyn prądu i napięcia jest najwyższy. Jeżeli falownik będzie posiadał dwa trackery MPP, jest możliwe podzielenie paneli na dwie strefy i podłączenie każdej z osobna [Szymański 2014]. W sytuacji, gdy w jednej strefie będzie występować zacinienie, to ma on wpływ tylko na jedną część instalacji, w trakcie gdy druga część pracuje bez żadnych zakłóceń i spadków mocy. Wykorzystanie trackerów MPP w inwerterach pozwala zwiększyć uzysk energetyczny nawet o 20% w stosunku do starych konstrukcji, które nie posiadają układów do śledzenia punktu maksymalnej mocy. W związku, że punkt MPP dla modułów fotowoltaicznych, zmienia się w zależności od warunków atmosferycznych takich jak nasłonecznienie czy temperatura, ważną jest jego ciągła obserwacja [Głów i Kurz 2014].

Kolejnym istotnym sposobem uzyskania lepszej wydajności instalacji jest wykorzystanie mikroinwerterów, które montowane są w każdym module osobno [Kras 2017]. Przy takim rozwiązaniu, mniejszy uzysk z jednego panelu nie zmniejsza wydajności całej instalacji. Rozwiązanie to znacznie podnosi koszty całej instalacji, dlatego stosowane są tylko w miejscach stałego zacinienia. Oprócz eliminacji problemu nierównomiernej generacji mocy paneli, mikroinwerter może również służyć do monitoringu całej instalacji [Krakowski 2018]. Dzięki jego obecności, możliwe jest zlokalizowanie modułu generującego dużo mniejszą moc i wytwarzającego straty. W ten sposób można sprawdzić czy panel uległ uszkodzeniu, czy chwilowemu zacinieniu [Głów i Kurz 2014].

VI. PODSUMOWANIE

Zacinienie instalacji fotowoltaicznej ma negatywny wpływ na natężenie prądu oraz uzysk mocy. Powoduje ono zmniejszenie sprawności generowania energii oraz straty finansowe dla użytkownika. Istnieje wiele sposobów umożliwiających zminimalizowanie wpływu zacinienia, lub w pewnym stopniu zapobiegania ich powstawaniu. Niektóre z nich to np. wykorzystywanie diod bocznikujących w konstrukcji instalacji fotowoltaicznej, odpowiednia orientacja paneli oraz prawidłowe szeregowe połączenie modułów PV w stringu, jak również prawidłowy dobór inwertera do instalacji. Wykorzystanie diod bocznikujących umożliwia pominięcie ogniwa, na które wpływa zacinienie w celu wyeliminowania źródła strat dla całej instalacji. Dioda bocznikująca spełnia również funkcje ochronne. Zabezpiecza przed powstaniem uszkodzeń zaistniałych podczas przepływu prądu wstecznego, powodującego nagrzewanie się panelu i utworzenia tzw. hot-spotów.

Kolejnym sposobem na wyeliminowanie niekorzystnego działania zacinienia, jest analiza miejsca ich zamontowania. Wybór właściwej orientacji modułu należy dokonywać w taki sposób, aby obecne diody bocznikujące mogły wyłączyć tylko jakiś fragment panelu a nie całą instalację fotowoltaiczną.

Eliminacja skutków zacinienia jest możliwa poprzez dobranie odpowiednich urządzeń wchodzących w skład instalacji fotowoltaicznej, którymi są różnego rodzaju inwertery.

Należy pamiętać że montaż inwerterów generuje zwiększenie kosztów całej instalacji. W pierwszej kolejności należy wziąć pod uwagę umieszczenie inwerterów w miejscu niezagrożonym zacienieniem. Jeżeli w danym przypadku nie jest możliwe uniknięcie zacienienia należy podzielić instalację na strefy i zastosować inwertery, które pozwolą na uzysk maksymalnej mocy. Inną metodą jest wykorzystanie mikroinwerterów, zamontowanych osobno do każdego modułu. Pozwala to na wyeliminowanie modułu osłabiającego całą instalację oraz umożliwia większy uzysk energii.

BIBLIOGRAFIA

1. Cipriani G., Di Dio V., La Manna D., Miceli R., Galluzzo G. R. 2014. Technical and Economical Comparison between Different Topologies of PV Plant Under Mismatch Effect. Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). 1-6.
2. Głów A., Kurz D. 2014. Sposoby ochrony instalacji fotowoltaicznych przed następstwami zacienienia. Poznań.
3. Haberlin H. 2012. Photovoltaics. System Designed and Practice. John Wiley & Sons Ltd.
4. Jarmuda T. 2015. Modelowanie struktury systemu fotowoltaicznego i symulacja efektów rozproszonego zacienienia w środowisku matlab&simulink. Electrical Engineering. No. 81. 135-144.
5. Kaszubowski F. 2018. Diody bocznikujące. [dok. elektr. <http://sunsol.pl/blog/diody-bocznikujaca/>. data dostępu 8.11.2018].
6. Kazimierski S. 2011. Szacowanie osłabienia promieniowania słonecznego na skutek zacienienia dzięki wykresom pozycji słońca. [dok. elektr. http://ptes-ises.itc.pw.edu.pl/art/2011_1.pdf. data dostępu .06.11.2018].
7. Klugmann-Radziemska E. 2010. Fotowoltaika w teorii i praktyce. BTC. Legionowo.
8. Krakowski R. 2018. Inwertery centralne dla instalacji fotowoltaicznych. [dok. elektroniczny <http://redinpe.com/attachments/article/200/ipi95.pdf>. data dostępu. 8.12.2018].
9. Kras M. 2017. Monter instalacji fotowoltaicznej. Fundacja VCC. Lublin.
10. Ramabadran R., Mathur B. 2009. Effect of shading on series and paralel connected solar PV modules. Modern Applied Science. Vol. 3. No. 10. 32.
11. REN 21. 2013. STEERING COMMITTEE. Renewables. Global status report. France.
12. Sullivan C., Averbuch J., Latham A. 2013. Decrease in photovoltaic power output from ripple: Simple general calculation and the effect of partial shading. Power Electronics. IEEE Trnasactions on energy conversion. Vol. 28. No. 2. 740-747.
13. Szymański B. 2012a. Gorący punkt (hot spot) – realny problem czy kreatywny marketing. 2012. [dok. elektr. <http://solaris18.blogspot.com/search?q=hot+spot> data dostępu_9.11.2018]
14. Szymański B. 2012b. Czy instalację fotowoltaiczną należy myć? [dok. elektr. <http://solaris18.blogspot.com/2012/10/czy-instalacje-fotowoltaiczna-nalez-y-myc.html>. data dostępu 09.11.2018].
15. Szymański B. 2012c. Diody bocznikujące i ich wpływ na wydajność paneli PV. [dok. elektr. <http://solaris18.blogspot.com/2012/10/diody-bocznikujace-i-ich-wpyw-na.html>. data dostępu 8.11.2018].
16. Szymański B. 2013. Małe instalacje fotowoltaiczne. Geosystem. Kraków.
17. Szymański B. 2014. Instalacje fotowoltaiczne. Geosystem. Kraków.

18. Szymański B. 2018. Skutki słabego i silnego zacielenia modułu fotowoltaicznego [dok. elektr. <http://tbkeco.pl/artykuly/skutki-slabego-i-silnego-zacienienia-modulu-fotowoltaicznego/>. data dostępu 8.11.2018].
19. Tomasz. 2018. Wpływ zacielenia na prace instalacji fotowoltaicznej [dok. elektr. <http://bioenergy.pl/wpływ-zacienienia-na-prace-instalacji-fotowoltaicznej/2016/>. data dostępu 8.11.2018].
20. Wandhare R. G., Agarwal V., Jain S. 2013. Novel Multi-Input Solar PV Topologies for 1- ϕ and 3- ϕ Stand Alone Applications to Mitigate the Effects of Partial Shading. Applied Power Electronics Conference And Exposition (APEC). Twenty-Eighth Annual IEEE Conference. 76-83.
21. Wang Y.J., Hsu P.C. 2011. An investigation on partial shading of PV modules with different connection configurations of PV cells. Energy. Vol. 36. No. 5.3069-3078.
22. Znidarec M., Topic D., Busic J. 2017. Influence of shading on I-V characteristics of thin film PV modules. Journal of energy technology. JET Volume 10. 47-60.

SHADING SOLAR PANELS

Summary

The paper presents the effect of shading on the operation of photovoltaic cells and the impact of shadow on energy yield and the likelihood of their damage. The possibilities of module protection, methods of preventing or reducing the effects of shading have been demonstrated.

Keywords: module photovoltaic, diodes by-pass, direction module, inverter, shading