

Alicja GŁÓW*
Dariusz KURZ*

SPOSOBY OCHRONY INSTALACJI FOTOWOLTAICZNYCH PRZED NASTĘPSTWAMI ZACIENIEŃ

W pracy przedstawiono możliwe przyczyny powstawania zacienień ogniw PV oraz wpływ cieniowania paneli na uzysk energii i prawdopodobieństwo ich uszkodzeń. Wskazano sposoby ochrony paneli i możliwości przeciwdziałania bądź zmniejszania efektów tego zjawiska. Dokonano szczegółowej analizy stosowności użycia diod by-pass w panelach fotowoltaicznych. Przedstawiono wpływ zacienienia części łańcucha paneli PV na kształt jego charakterystyki prądowo-napięciowej.

SŁOWA KLUCZOWE: zacienienie, ogniwo PV, dioda by-pass, orientacja panelu, mikroinwerter

1. WPROWADZENIE

Zacienienie choćby części panelu fotowoltaicznego powoduje zmniejszenie ilości promieniowania słonecznego docierającego do ogniw PV. Skutkiem tego jest spadek natężenia prądu panelu, a co za tym idzie utrata mocy i zmniejszenie sprawności generacji energii całej instalacji. Najczęstszymi przyczynami zacienień są [1,5]:

- zabrudzenia paneli,
- zalegający śnieg lub liście,
- elementy konstrukcyjne budynku,
- elementy krajobrazu,
- błędy podczas projektowania instalacji PV.

Zabrudzenia paneli powstają na skutek działania czynników zewnętrznych, takich jak kurz, pył. Częściowo są one zmywane z powierzchni panelu przez padający deszcz, jednakże spora ich ilość gromadzi się w jego dolnej części. Problemem należącym do tej grupy są również odchody ptaków, które oprócz zakrywania części panelu fotowoltaicznego, powodują stałe odbarwienia szkła i uszkodzenia powierzchni panelu. Czynnikiem powodującym zacienienia jest także zalegający śnieg, który zakrywa powierzchnię paneli i ogranicza bądź całkowicie uniemożliwia generację energii. Dodatkowo ciężar śniegu wywiera

* Politechnika Poznańska.

nacisk na panele i konstrukcję wsporczą, co może prowadzić do uszkodzeń mechanicznych instalacji. Kolejną grupą, wpływającą na obecność zacienień, są błędy podczas projektowania instalacji, polegające na nieuwzględnieniu istniejących stałych elementów konstrukcyjnych budynku, takich jak: kominy, jaskółki, wykusze czy elementy najbliższego otoczenia (inne budynki, słupy, drzewa itp.) [5].

Eliminacja wszystkich szkodliwych czynników, powodujących ograniczenie powierzchni światłoprzepuszczalnej paneli, nie jest możliwa, dlatego można zastosować pewne rozwiązania, mające na celu całkowite bądź częściowe niwelowanie skutków zacienień. Można w tej grupie wyróżnić m.in.:

- cykliczne czyszczenie paneli,
- umieszczenie w konstrukcji panelu fotowoltaicznego diod by-pass,
- odpowiedni projekt instalacji uwzględniający stałe elementy otoczenia,
- prawidłowe ustawienie paneli (pionowe/poziome),
- właściwa konfiguracja połączeń paneli w tzw. stringi,
- stosowanie inwerterów z wieloma trackerami MPP bądź mikroinwerterów.

Zastosowanie się do przedstawionych wytycznych wyeliminuje wiele sytuacji, mogących powodować zacienienia ogniw i straty w procesie generacji energii. Wpłyne to na podwyższenie sprawności pracy instalacji PV, co wiąże się z ograniczeniem strat ekonomicznych.

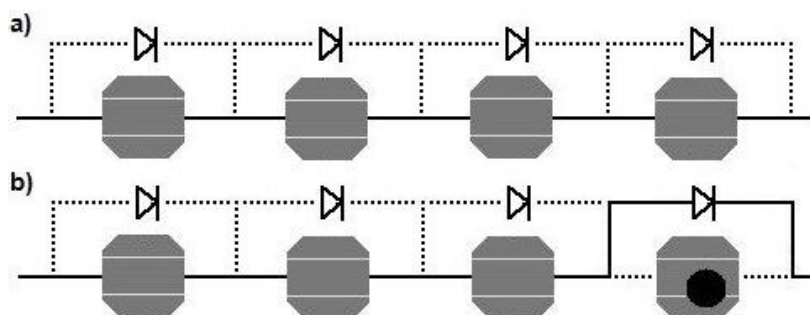
2. DIODY BY-PASS

Obecnie jedną z możliwości przeciwdziałania efektom zacienienia ogniwa jest zastosowanie diod by-pass w konstrukcji panelu, przy połączeniach ogniw fotowoltaicznych już na etapie produkcji paneli. Diodę tę, zwaną inaczej bocznikującą, umieszcza się równolegle do łańcucha ogniw tak, aby kierunek jej polaryzacji był do nich przeciwny. Dioda zaczyna działać w panelu wówczas, gdy jedna z jego partii zostanie przysłonięta. Głównym zadaniem diody by-pass jest umożliwienie przepływu prądu, pochodzącego z pozostałych niezacienionych ogniw fotowoltaicznych panelu [2, 5].

Zasada działania diody by-pass została przedstawiona na rysunku 1, ilustrującym przepływ prądu przez ogniwa fotowoltaiczne (oznaczonym linią ciągłą) w przypadku pracy normalnej (rys. 1 a) oraz zacienienia jednego z ogniw (rys. 1 b).

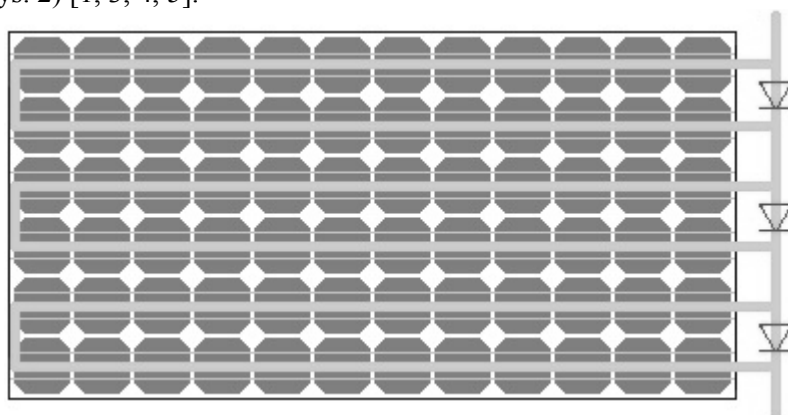
W układzie z rysunku 1a wszystkie diody spolaryzowane są w kierunku zaporowym, a prąd przepływa przez ogniwa spolaryzowane w kierunku przewodzenia. W drugim przypadku (rys. 1b) zasłonięte zostało czwarte ogniwo, które nie jest w stanie wygenerować takiej samej ilości prądu, co ogniwa niezacienione. Ponieważ ogniwa połączone są ze sobą szeregowo, to zacienione ogniwo dla całego układu staje się opornikiem, a przepływający przez nie z

pozostałych ogniw prąd jest tracony w postaci wydzielanego ciepła. Obecność prądu wstecznego w tym ogniwie powoduje zmianę jego polaryzacji, a co za tym idzie pojawienie się ujemnego napięcia, które zmienia polaryzację diody by-pass. Kiedy dioda zaczyna przewodzić, prąd pochodzący z niezacięzionych ogniw, przepływa przez nią, wyłączając w ten sposób z układu zacięziony fragment panelu i eliminując straty mocy w całej instalacji fotowoltaicznej.



Rys. 1. Przepływ prądu przez ogniwa fotowoltaiczne w panelu podczas [5]:
a) pracy normalnej, b) zacięnienia czwartego ogniwa (łańcucha ogniw)

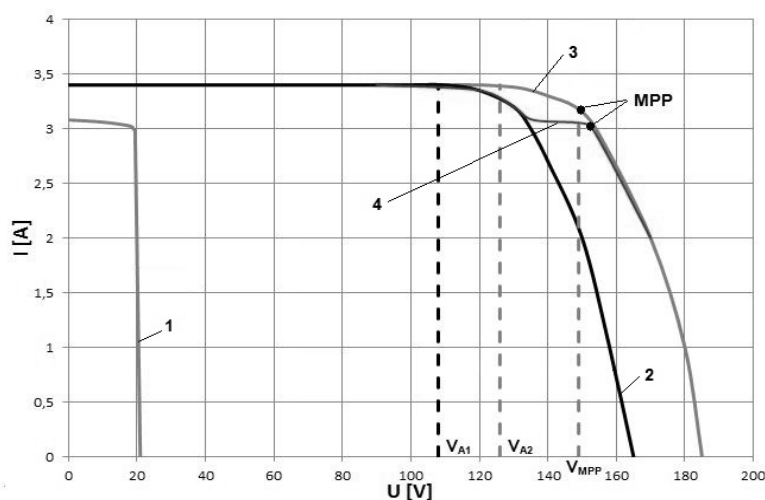
Oprócz tej najważniejszej funkcji dioda chroni także zacięzione ogniwo przed uszkodzeniami powstałymi wskutek przepływu prądu wstecznego, powodującego jego bardzo mocne nagrzewanie się i powstawanie gorących punktów panelu, tzw. hot spot'ów [5, 7]. W efekcie, po ustąpieniu czasowego zacięnienia, uszkodzone ogniwo nadal powodowałoby straty mocy w instalacji PV. Warto zaznaczyć, że w najpopularniejszych panelach dostępnych obecnie na rynku, składających się z trzech łańcuchów po 20-24 ogniw, stosuje się trzy diody by-pass (rys. 2) [1, 3, 4, 5].



Rys. 2. Schemat ideowy panelu fotowoltaicznego z trzema łańcuchami ogniw PV i diodami bocznikującymi [5]

Podzielenie panelu na trzy łańcuchy ogniw, w chwili wystąpienia zacięń, powoduje większe prawdopodobieństwo maksymalizacji uzysku energii, niż w przypadku panelu z jedną diodą lub jej brakiem. Wtedy w przypadku jakiegokolwiek zacięcia cały panel zostałby wyłączony z łańcucha paneli i wpływał na cały system. Dla paneli z trzema diodami bocznikującymi w przypadku wystąpienia zacięcia np. na jednym ogniwie, wyłączeniu ulegnie tylko jeden łańcuch ogniw a nie cały panel, dzięki czemu spadek mocy będzie wynosił tylko 33 %.

Na rysunku 3 przedstawiono wpływ obecności diody by-pass na charakterystykę prądowo-napięciową łańcucha paneli fotowoltaicznych złożonego z dziewięciu paneli M55 firmy Siemens, przy zacięciu jednego z nich. Jest to panel monokrystaliczny o mocy znamionowej 55 W, składający się z 36 ogniw fotowoltaicznych. W celu wykonania tej charakterystyki przyjęto określone warunki: w panelach występują idealne diody by-pass (zerowa strata napięcia w paśmie przepustowym), temperatura paneli wynosi 40°C (odpowiada to średniej temperatur paneli uzyskanych zimą i latem) [1].



Rys. 3. Charakterystyki prądowo-napięciowe dla paneli M55 [1]: 1 - jednego panelu przy $E = 900 \text{ W/m}^2$ (częściowe zacięnie), 2 - ośmiu paneli przy $E = 1000 \text{ W/m}^2$, 3 - dziewięciu paneli przy $E = 1000 \text{ W/m}^2$, 4 - ośmiu paneli przy $E = 1000 \text{ W/m}^2$ i jednego przy $E = 900 \text{ W/m}^2$ oraz zastosowaniu diody by-pass

Analizując przedstawioną na rysunku 3 charakterystykę prądowo – napięciową panelu PV (oznaczoną numerem 1) można zauważyć obniżenie wartości prądu, spowodowane częściowym zacięciem (mniejszą wartością gęstości mocy promieniowania wynoszącą $E = 900 \text{ W/m}^2$ zamiast $E = 1000 \text{ W/m}^2$ jak w normalnych warunkach pracy pozostałych paneli). Krzywe

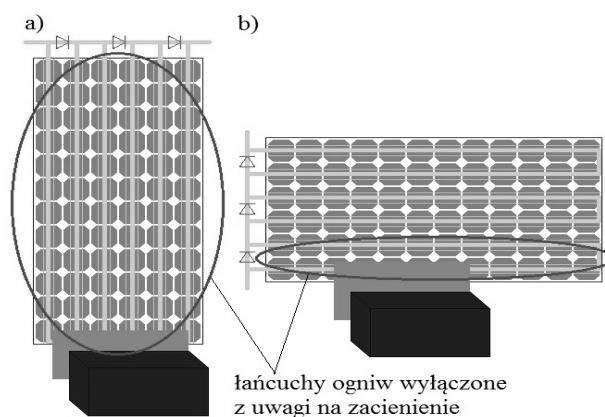
2 i 3, to charakterystyki dla łańcucha odpowiednio 8 i 9 paneli otrzymane przy $E = 1000 \text{ W/m}^2$. Dzięki zastosowaniu diody by-pass w łańcuchu 9 paneli (8 podczas pracy normalnej i 1 zacięniowego) jego charakterystyka prądowo – napięciowa przybrała niestandardowy kształt (krzywa numer 4). W efekcie w punkcie mocy maksymalnej MPP (w porównaniu do krzywej 3 dla 9 paneli bez zacięnienia) obniżeniu uległa wartość prądu, natomiast napięcie osiągnęło większą wartość. Punkty oznaczone jako V_{A1} oraz V_{A2} są granicami dla stałej wartości prądu, wynoszącej 3,4 A, na początkowej części prostoliniowej charakterystyki. Punkt mocy maksymalnej MPP dla łańcucha dziewięciu paneli (krzywa 3) przypada dla napięcia V_{MPP} , wynoszącego 148 V, natomiast dla krzywej 4 (9 paneli z jednym zacięniowym) napięcie to wynosi ok. 150 V.

W przypadku większego zacięnienia prąd panelu zmalałby proporcjonalnie do gęstości mocy promieniowania słonecznego a punkt MPP obniżyłby się jeszcze bardziej (niż jest to przedstawione na rys.3). Wartość prądu w MPP także wynosiłaby tyle samo, co dla pojedynczego zacięniowego panelu a napięcie wzrosłoby w porównaniu do wartości przy pracy normalnej. Gdyby nie obecność diody by-pass, prąd płynący przez wszystkie panele obniżyłby się do wartości prądu wydatkowanego przez zacięniowy panel, przez co strata mocy byłaby dużo większa niż w łańcuchu z diodą, gdzie przez każdy panel płynie możliwie maksymalny prąd. Warto też zaznaczyć, że na kształt charakterystyki ma wpływ liczba paneli znajdujących się w łańcuchu. W momencie większej liczby połączonych paneli zacięnienie jednego z nich będzie miało mniejsze znaczenie na jej przebieg. Również różnice pomiędzy wartościami napięcia obwodu otwartego będą odpowiednio mniejsze.

3. ORIENTACJA PANELI

Na powstanie niektórych zacięnień użytkownik instalacji fotowoltaicznej często nie ma żadnego wpływu. Dlatego też, aby diody by-pass spełniały właściwie swoją funkcję, istotne jest prawidłowe ustawienie paneli, w odpowiedniej orientacji, poziomej bądź pionowej. Ma to istotne znaczenie w przypadku zacięnienia paneli przez zalegający zimą śnieg bądź stałe elementy budynku lub krajobrazu, co przedstawiono na rysunku 4.

W przypadku pionowego ustawienia panelu PV, przedstawionego na rysunku 4a, cień spowodowany jakimś elementem stałym bądź zalegającym na dole panelu śniegiem, spowoduje wyłączenie wszystkich trzech łańcuchów ogniów. Skutkować to będzie brakiem produkcji energii. Ułożenie tego samego panelu w pozycji poziomej (rys. 4b) zminimalizuje skutek zacięnienia i wyłączy tylko jeden z trzech łańcuchów ogniów, a produkcja energii będzie wynosiła ok. 66 % mocy znamionowej [3, 5, 6]. Jeśli cień pojawiałby się na panelu nie z dołu (jak na rys. 4) a z boku, właściwsze byłoby ułożenie panelu w orientacji pionowej, aby zminimalizować skutki cienia.



Rys. 4. Wpływ ustawienia panelu PV na utratę jego mocy spowodowane zacięciem [5, 6]

Rozważając więc możliwości przeciwdziałania skutkom zacięć należy zwrócić uwagę na orientację paneli w zależności od ułożenia ogniw oraz od kierunku, z którego może pojawić się zacięcie. Zakładając na przykład, że łańcuchy ogniw w panelu połączone są pionowo a zacięcie będzie następowało od strony południowej (tak jak na rys. 4), należałoby w takim przypadku zamontować panele na dachu w orientacji poziomej. Natomiast, jeśli zacięcie będzie powstawać od strony zachodniej bądź wschodniej, wtedy panele należy ustawić pionowo. W obydwu przypadkach dąży się do ograniczenia spadku mocy, który, w opisanych wyżej sytuacjach, będzie miał miejsce tylko na poszczególnych fragmentach panelu.

4. DOBÓR INWERTERA

W sytuacji, gdy niemożliwe jest umieszczenie paneli tylko w strefie nienarażonej na zacięcenia, można zastosować dwa lub więcej niezależnych inwerterów, które spowodują oddzielenie poszczególnych stref i uzyskanie z każdej z osobna maksymalnych mocy. Istnieje możliwość zastąpienia większej liczby inwerterów jednym, wyposażonym w kilka trackerów MPP, których zadaniem jest obciążanie podłączonych paneli tak, aby uzyskać z nich możliwie najwyższą moc. Jeśli inwerter będzie posiadał dwa trackery MPP, możliwe jest podzielenie paneli na dwie strefy i podłączenie każdej z osobna. W przypadku, gdy w jednej ze stref będzie miało miejsce zacięcenie, to rzutuje ono negatywnie tylko na tę jedną część instalacji, w trakcie, gdy druga pracuje bez żadnych zakłóceń i spadków mocy. Można sobie wyobrazić taką sytuację, gdy lukarna umieszczona jest centralnie na dachu (patrząc z przodu), gdzie od rana do południa będzie rzucała cień na lewo od siebie, natomiast od południa do wieczora na prawą część dachu. Zastosowanie inwertera z dwoma trackerami

MPP pozwoli na osiągnięcie optymalnych uzysków energii z każdej z dwóch części instalacji. Takie rozwiązanie jest konieczne, gdy na etapie projektu wiadomo, że instalacja będzie nierównomiernie oświetlana, gdyż pozwoli to na wyeliminowanie strat mocy nawet o kilka procent [5].

Kolejnym ze sposobów uzyskania większej wydajności instalacji jest zastosowanie mikroinwerterów, które montowane są do każdego panelu osobno. W ten sposób mniejszy uzysk z jednego panelu nie ogranicza wydajności całej instalacji. Jednakże takie rozwiązanie znacznie podnosi koszt całej instalacji i stosowane jest tylko w miejscach stałego zacięnienia. Oprócz zadania, mającego na celu eliminację problemu nierównej generacji mocy paneli, mikroinwerter może służyć do monitoringu całej instalacji. Dzięki jego obecności, możliwe jest zlokalizowanie panelu wytwarzającego dużo mniejszą moc i generującego straty. W ten sposób można sprawdzić, czy dany panel uległ uszkodzeniu czy został chwilowo zacięniony.

5. WNIOSKI

Zacięnienia instalacji fotowoltaicznej mają negatywny wpływ na natężenie prądu i uzysk mocy, które wiążą się ze zmniejszeniem sprawności generowania energii oraz ze stratami finansowymi dla użytkownika.

Istnieje wiele sposobów przeciwdziałania skutkom zacięnień lub w pewnej części zapobiegania ich powstawaniu. Niektóre z nich to np. stosowanie diod by-pass w konstrukcji panelu, odpowiednia orientacja paneli i właściwe szeregowe połączenia paneli fotowoltaicznych w „stringi”, a także odpowiedni dobór inwertera dla danej instalacji. Obecność diod by-pass w konstrukcji panelu fotowoltaicznego pozwala na wyłączenie jego przysłoniętej części w celu wyeliminowania źródła strat dla całej instalacji. Dioda by-pass spełnia także funkcje ochronne przed uszkodzeniami, powstałymi przez przepływający prąd wsteczny, powodujący nagrzewanie panelu i tworzenie się hot-spot'ów. Obecność diod by-pass ma również wpływ na charakterystykę prądowo-napięciową łańcucha paneli w przypadku zacięnienia jednego panelu.

Kolejnym sposobem na przeciwdziałanie niektórym skutkom zacięnień jest odpowiednia analiza miejsca ich występowania. Wyboru właściwej orientacji panelu należy dokonać w taki sposób, aby obecne diody bocznikujące mogły wyłączyć tylko jakiś fragment panelu a nie cały panel.

Rozważając kolejną z możliwości eliminacji skutków zacięnień jest dobranie w odpowiedni sposób urządzeń wchodzących w skład instalacji fotowoltaicznej, którymi są różne rodzaje inwerterów. Jak w poprzednim przypadku i tu na etapie projektowania należy szczegółowo przeanalizować warunki, dla których jest planowana inwestycja instalacji fotowoltaicznej. W pierwszej kolejności należy wziąć pod uwagę umieszczenie instalacji w strefie niezagrożonej występowaniem zacięnień. Jeśli dla danego przypadku nie można uniknąć zacięnień, należy

podzielić instalację na strefy i zastosować inwertery, które umożliwią niezależny uzysk maksymalnej mocy z każdej ze stref. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie mikroinwerterów, zamontowanych osobno do każdego z paneli. Umożliwia to wyeliminowanie panelu osłabiającego całą instalację i pozwala na większy uzysk energii.

Zastosowanie diod by-pass, prawidłowe rozplanowanie elementów instalacji, odpowiednia orientacja paneli oraz właściwe łączenie paneli fotowoltaicznych w „stringi” w przypadku wystąpienia zacinienia może minimalizować straty mocy, a co za tym idzie podnosić sprawność całej instalacji. Warto zaznaczyć, że oprócz przeciwdziałaniu skutkom zacinień, należy przede wszystkim dążyć do eliminacji przyczyn ich powstawania. Z uwagi na ten fakt, przed montażem instalacji należy szczegółowo przeanalizować rozplanowanie jej elementów, w celu uniknięcia stałych elementów zacieniających oraz uwzględnić strefy zagrożenia cieniem. Natomiast podczas użytkowania instalacji należy pamiętać o przestrzeganiu zaleceń eksploatacyjnych producentów elementów instalacji oraz o cyklicznym czyszczeniu paneli.

LITERATURA

- [1] Haberlin H., Photovoltaics. System Designed and Practice, John Wiley & Sons Ltd., 2012.
- [2] Hegedus S., Luque A., Handbook of photovoltaic science and engineering, Wiley, 2003.
- [3] Jastrzębska G., Ogniwa słoneczne, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2013.
- [4] Sarnik M. T., Podstawy Fotowoltaiki, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2008.
- [5] Szymański B., Małe instalacje fotowoltaiczne., Geosystem, Kraków, 2013.
- [6] <http://solaris18.blogspot.com/2012/10/diody-bocznikujace-i-ich-wpyw-na.html>, dn. 14.01.2014.
- [7] <http://solaris18.blogspot.com/2012/03/goracy-punkt-hot-spot-realny-problem.html>, dn. 14.01.2014.

METHODS OF PROTECTION THE PHOTOVOLTAIC SYSTEMS AGAINST CONSEQUENCE OF SHADING

The paper presents the possible causes of shading PV cells and the effect of shading panels on energy yield and the likelihood of damage. Pointed out ways to protect the panels and options for countering or reducing the effects of this phenomenon. Detailed analysis was carried of the appropriateness of the use of bypass diodes in solar panels. Presents the effect of shading parts of the chain of PV panels on the shape of the current-voltage characteristics.