

Mariusz ŚWIDERSKI*, Dominik MATECKI*, Norbert MIELCZAREK*

PRZEGLĄD WYBRANYCH ROZWIĄZAŃ POPRAWY WYDAJNOŚCI ENERGETYCZNEJ INSTALACJI FOTOWOLTAICZNEJ W WARUNKACH WYSTĘPOWANIA CZĘŚCIOWYCH ZACIENIEŃ

Mając na uwadze rosnącą popularność instalacji fotowoltaicznych oraz coraz większą ilość różnych rozwiązań technicznych, mających na celu poprawę jej wydajności, dokonany został przegląd i porównanie tych rozwiązań. Zaprezentowana została ogólna struktura klasycznego systemu fotowoltaicznego, jak również problem wpływu zjawiska zacieleniania na działanie takiej instalacji. Następnie przedstawiono kolejno najpopularniejsze rozwiązania techniczne, które wpływają na wydajność energetyczną systemu fotowoltaicznego podczas występowania zacieleniania. Zaprezentowane zostały również rozwiązania autorskie, które obecnie są w fazie badań i testów laboratoryjnych.

SŁOWA KLUCZOWE: instalacja fotowoltaiczna, dioda bocznikująca, optymalizer, mikroinwerter, rozproszony system fotowoltaiczny.

1. WPROWADZENIE

1.1. Ogólna struktura systemu fotowoltaicznego

Klasyczny system fotowoltaiczny [1, 2] połączony z siecią elektroenergetyczną przedstawiono na rys. 1.1. Nazywany jest on on-grid i składa się z następujących elementów:

- paneli fotowoltaicznych, czyli z łańcucha paneli fotowoltaicznych (PV) połączonych szeregowo tak, by ich sumaryczne znamionowe napięcie nie przekraczało napięcia pracy falownika po stronie obwodu prądu stałego,
- systemu mocowania paneli – nie jest to istotą tego opracowania,
- inwertera DC/AC – podłączonego do łańcucha PV z jednej strony i do sieci elektroenergetycznej z drugiej,
- zabezpieczeń, czyli zespołu urządzeń mających automatycznie wyłączyć instalację w przypadku niesprawności sieci,
- okablowania,

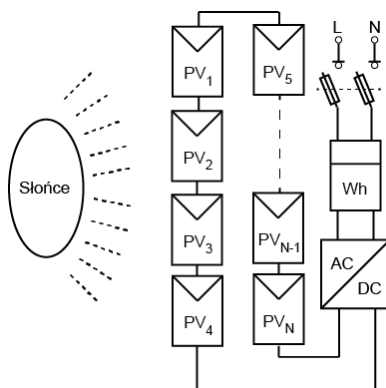
* Politechnika Poznańska

- dwukierunkowego licznika energii – również nie będącego istotą tego opracowania.

Oprócz systemów on-grid spotykane są, znacznie rzadziej, systemy typu off-grid, które nie muszą oddawać energii do sieci, ale za to po wyposażeniu w regulator ładowania i pakiet akumulatorów posiadają funkcje jej magazynowania. Wyposażone są one dodatkowo w:

- regulator ładowania baterii (BMS) – kontrolujący parametry systemu fotowoltaicznego oraz akumulatorów,
- akumulatory – odpowiednio dobrane do potrzeb instalacji.

Z punktu widzenia zjawiska zacienienia oba wymienione typy instalacji rozpatrywane są identycznie, dlatego też, w dalszej części opracowania, nie będzie różnicowania ich typu.



Rys. 1.1. Uproszczony model ogólnej struktury systemu fotowoltaicznego

1.2. Zjawisko zacienienia

Zjawisko zacienienia występuje wtedy, gdy część panelu fotowoltaicznego zostanie czasowo bądź długotrwale, przy pomocy cienia, odcięta od promieniowania słonecznego. Powstające cienie dzieli się na stałe i okresowe. Zacienienia stałe powstają od obiektów o znacznych rozmiarach, będących blisko powierzchni panelu, które rzucają cień na panel i są, z punktu widzenia panelu, niezależne od ruchu Słońca. Są to głównie elementy zabudowy, np.: zadaszenia, kominy, lukarny, czerpnie i wyrzutnie powietrza, jak również elementy przyrody – drzewa oraz ukształtowanie (wzniesienia) terenu itp. Zacienienia czasowe (okresowe) zależą natomiast od ruchu Słońca, jak również od ruchu samych obiektów wytwarzających cień. Przykładowo, przyczynami występowania zacienień okresowych mogą być: śnieg, liście, ptasie odchody, pyły, sadza, jak również niewielkie maszty antenowe czy elementy instalacji odgromowej [2].

Zjawisko zacienienia nie jest stałe w ciągu roku ponieważ długość padających na panel cieni zależy od wysokości i ruchu Słońca, a ruch Słońca zależy od pory

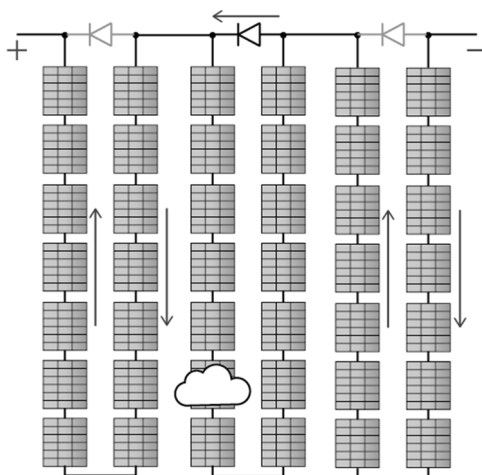
dnia i roku. Najgorsze warunki słoneczne (najmniejsze nasłonecznienie) i najdłuższe cienie występują w okresie zimowym. Oprócz czasu trwania zjawiska zacienienia istotny jest również jego stopień, informujący o tym, jaki procent promieniowania został zaabsorbowany przez obiekty występujące w pobliżu panelu [3].

Zacienienie jest szczególnie niepożądanym zjawiskiem z uwagi na spadek generacji energii z instalacji fotowoltaicznej. Spadek ten jest nieproporcjonalnie duży w stosunku do procentowego stopnia zacienienia powierzchni panelu i może prowadzić do utraty niemal całej jego mocy. Ponadto, zacienienie powoduje lokalne nagrzewanie się panelu, co prowadzi do dalszego spadku jego wydajności energetycznej. W ekstremalnych sytuacjach te nagrzane punkty mogą powodować pożar instalacji. Zacienienie jednego z ogniw panelu fotowoltaicznego powoduje spadek prądu generowanego w całym panelu (PV), a to przekłada się na spadek prądu generowanego przez cały ciąg, połączonych ze sobą, paneli. System bowiem dostosowuje swoją wydajność do najsłabszego w nim ogniwa. Aby uchronić pracę systemu fotowoltaicznego przed negatywnymi skutkami zacienienia stosuje się głównie tzw. diody bocznikujące lub moduły optymalizujące pracę poszczególnych paneli – pod kątem uzyskania MPP (MPP – Maximum Power Point) [4, 5].

2. PRZEGLĄD STOSOWANYCH ROZWIĄZAŃ

2.1. Diody bocznikujące

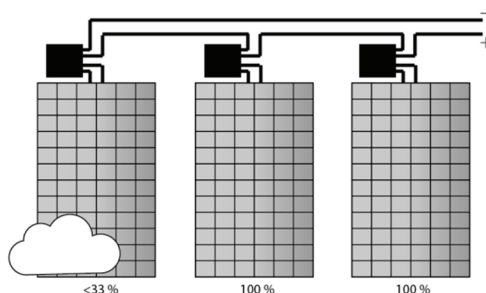
Najpopularniejszym rozwiązaniem w instalacjach fotowoltaicznych są diody bocznikujące [6]. Stosowane, aby uchronić panele przed negatywnymi skutkami zacienienia, umożliwiają przepływ prądu z obejściem zacienionego ogniwa. Standardem jest wykorzystanie 3 diod w jednym panelu wtedy zadziałanie jednej z diod powoduje spadek mocy panelu o 33,3%. Dioda uruchamia się samoistnie, w zależności od konkretnego modelu i projektu, gdy różnica w oświetleniu poszczególnych ogniw sięga, co najmniej 20%. Niektórzy producenci wprowadzają do swojej oferty moduły wyposażone w 4 diody bocznikujące. Im więcej diod, tym system podczas zacienienia pozostaje bardziej wydajny, jednak pojawiają się ograniczenia konstrukcyjne, dotyczące ilości wyprowadzeń. Diody są montowane na etapie produkcji, ale można je samodzielnie zastosować jedynie dla całego panelu – rozwiązanie staje się nieopłacalne. Przykładowy schemat panelu z zainstalowanymi 3 diodami, z których jedna bocznikuje swoją sekcję przedstawiono na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Schemat blokowy panelu fotowoltaicznego, wyposażonego w trzy diody bocznikujące

2.2. Optymalizery mocy

Drugim, co do popularności rozwiązaniem stosowanym w instalacjach fotowoltaicznych, są optymalizery mocy [7]. Pozwalają one na uzyskanie maksymalnej wartości sprawności przez każdy panel z osobna, kiedy połączone są razem, tworząc tzw. „string” (łańcuch). Zastosowanie optymalizatorów powoduje, że praca żadnego z paneli połączonych razem ze sobą w łańcuch nie wpływa na inny. Inaczej jest przy rozwiązaniu standardowym (bez optymalizatorów) – panele i falownik (przekształtnik energoelektroniczny), wyposażony w algorytm MPPT (Maximum Power Point Tracking), śledzą punkty mocy maksymalnej dla wszystkich paneli w stringu. Jeżeli na przykład jeden z nich jest w jakimś stopniu zacięnięty, na mocy traci cały łańcuch, ponieważ panele połączone są ze sobą szeregowo. Przy zastosowaniu optymalizatorów inwerter musi śledzić punkt mocy maksymalnej dla całego ciągu paneli; realizowane jest to po stronie optymalizatorów. Dzięki temu, każdy z paneli rozpatrywany jest indywidualnie. A zatem, zacięnięcie jednego z modułów nie wpływa negatywnie na pracę pozostałych. Przykładowo, gdy w ciągu 3 paneli jeden z nich zacięnięty jest w 33%, to tylko ten jeden panel będzie działał z mocą mniejszą o 33%, a pozostałe dwa panele z ciągu będą pracowały z pełną mocą. Dodatkowo, każdy z paneli jest obciążony ujemną albo dodatnią tolerancją mocy. Przykładowy schemat instalacji z modułami optymalizatorów przedstawiono na rys. 2.2.

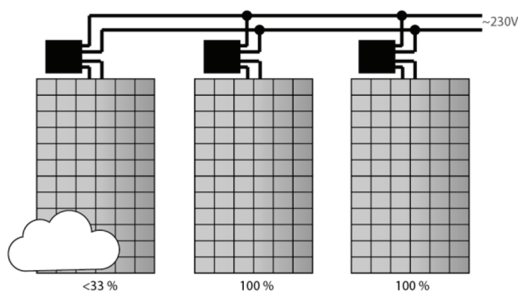


Rys. 2.2. Schemat blokowy instalacji fotowoltaicznej z modułami optymalizerów

2.3. Mikroinwertery

Trzecim, co do popularności, rozwiązaniem stosowanym w instalacjach fotowoltaicznych są mikroinwertery [8]. W odróżnieniu od układu z tradycyjnym falownikiem, w mikroinwerterze prąd stały, produkowany przez instalację fotowoltaiczną, jest zamieniany na prąd przemienny bezpośrednio przy każdym panelu przez indywidualny mikroinwerter. Urządzenia te mają układ śledzenia maksymalnego punktu mocy (MPPT), więc każdy moduł zawsze pracuje z maksymalną wydajnością. Dzięki mikroinwerterom praca żadnego z paneli nie jest ograniczana słabiej pracującym, nawet jeżeli na którymś z nich pojawi się zacinienie.

Do zalet stosowania mikroinwerterów można zaliczyć możliwość budowania instalacji fotowoltaicznych już od jednego modułu. Następnie, mikroinwertery pozwalają zachować łatwość rozbudowy instalacji fotowoltaicznej. Wystarczy podłączyć kolejny panel fotowoltaiczny wraz z mikroinwerterem. Dzięki temu, że każdy mikroinwerter ma swój tzw. MPP-tracker, możliwe jest budowanie instalacji fotowoltaicznych na nietypowych budynkach, gdzie na części paneli występuje np. zacinienie. Jest możliwość monitorowania każdego panelu oddzielnie – może to być ważna korzyść dla wymagających użytkowników, nastawionych na dokładną analizę pracy mikroinstalacji fotowoltaicznej. Rozwiązanie to nie jest jednak wolne od wad – do najważniejszych z nich zaliczyć można fakt, że największe firmy wycofują ze swoich ofert mikroinwertery. Kolejną wadą jest ryzyko wystawienia na ekstremalne warunki, gdyż mikroinwertery są montowane pod panelami fotowoltaicznymi, przez co narażone są na trudne warunki atmosferyczne – np. temperatury nawet od -20°C do $+70^{\circ}\text{C}$. Utrudnione jest ich serwisowanie, gdyż w przypadku awarii najczęściej konieczne będzie zastosowanie dodatkowego sprzętu, by zdemontować panel fotowoltaiczny i mikroinwerter pod nim zainstalowany. Dodatkowo, w literaturze można znaleźć informację, że takie rozwiązania zwiększają ryzyko powstania pożaru. Przykładowy schemat instalacji z mikroinwerterami przedstawiono na rys. 2.3.

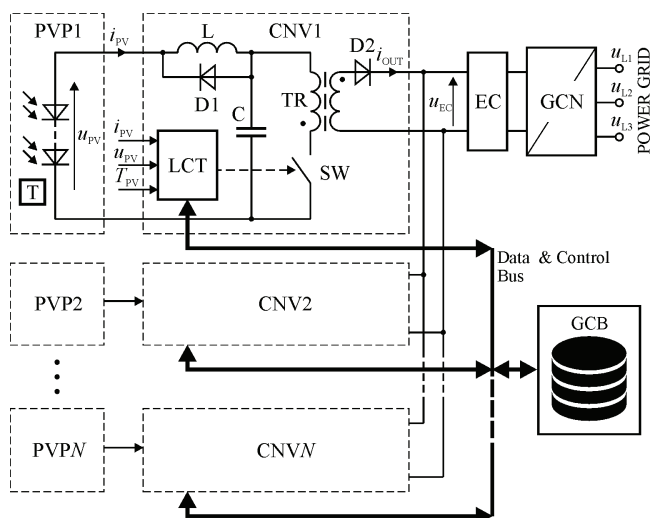


Rys. 2.3. Schemat blokowy instalacji fotowoltaicznej z mikroinwerterami

3. PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ, BĘDĄCYCH W TRAKCIE BADAŃ

3.1. Rozproszony system fotowoltaiczny

W zakładzie Energoelektroniki i Sterowania Politechniki Poznańskiej opracowywana jest struktura elektrowni fotowoltaicznej, łączącej najlepsze cechy przedstawionych w rozdziale 2 rozwiązań. Ogólną koncepcję systemu generacji energii (elektrowni) solarnej, bazującego na systemie tzw. rozproszonych paneli fotowoltaicznych, przedstawiono na rys. 3.1. Polega ona użyciu większej liczby paneli PV o mniejszej mocy, sprzęgniętych z indywidualnymi przetwornicami DC/DC. Rozpatruje się przy tym rzadko uwzględniane aspekty pracy przetwornic [11]. Wspólny obwód DC systemu dołączony jest do zasobnika energii, a dalej, do falownika sieciowego.



Rys. 3.1. Schemat elektrowni z systemem rozproszonych paneli fotowoltaicznych

Proponowany system podzielony został na następujące bloki: niskonapięciowych modułów fotowoltaicznych (PVP), konwerterów DC/DC małej mocy (CNV) – każdy konwerter połączony jest z pojedynczym modułem PVP, zasobnika energii (EC) – opartego na technologii LiION, falownika (GCN), umożliwiającego przekazywanie energii do sieci elektroenergetycznej i globalnego bloku sterowania pracą systemu (GCB). Blok CNV zawiera m.in. konwerter typu *flyback*, wyposażony w lokalny kontroler (LCT). Blok LCT monitoruje: napięcie wyjściowe PVP (u_{PV}), prąd wyjściowy PVP (i_{PV}) i temperaturę modułu (T_{PV}). Na podstawie tych wielkości LCT realizuje algorytm śledzenia punktu mocy maksymalnej (MPPT). Lokalne układy sterowania poszczególnymi konwerterami dołączono do GCB za pośrednictwem globalnej, izolowanej, magistrali danych (sterowania).

Dla celów porównawczych sprawności i EMC w przetwornicach DC/DC planowane jest zastosowanie zarówno klasycznych przyrządów mocy MOSFET (Si), jak i modułów IPM z przyrządami mocy w technologii GaN [13].

3.2. Inne technologie

Perowskit [9] to minerał zbudowany z tytanu (IV) wapnia, CaTiO_3 . Został on odkryty w 1838 roku w okolicach gór Ural przez niemieckiego mineraloga Gustava Rose. Odkryto, że perowskity pochłaniają światło słoneczne o długości fali od 300 do 800 nm, w sposób, który umożliwia produkowanie przez nie energii elektrycznej; poza tym minerały te charakteryzują się wysoką elastycznością, są przezroczyste i lekkie. Polska fizyk Olga Malinkiewicz w czasie pracy w Hiszpanii opracowała metodę pokrywania różnych materiałów perowskitami. W 2014 r. wraz z Piotrem Krychem i Arturem Kupczunasem założyła firmę Saule Sp. z o. o., działającą pod nazwą Saule Technologies. Firma ta zajmując się zastosowaniem perowskitów, prowadzeniem badań oraz komercjalizacją rozwiązań. Po przeprowadzeniu szeregu doświadczeń i badań podano, że będzie istniała możliwość tworzenia ogniw fotowoltaicznych na materiałach tekstylnych, foli czy nawet kartce papieru. Niestety głównym problemem oraz wyzwaniem jest słaba odporność na wodę czy też zmienne warunki atmosferyczne paneli budowane na bazie perowskitów.

Kolejne rozwiązanie wykorzystuje CPV (Concentrated Photovoltaics) [10], technologię, która bazuje na skupianiu promieni słonecznych na absorberze, którym jest ogniwo fotowoltaiczne. Zaletą technologii CPV, w porównaniu do tradycyjnej fotowoltaiki, jest większa efektywność konwersji, sięgająca nawet 40%.

Dostępne są również systemy nadążne [12], śledzące położenie słońca podczas dnia. Korzyści płynące z stosowania systemów nadążnych to możliwość nakierowania powierzchni modułów fotowoltaicznych pod najkorzystniejszym (energetycznie) kątem padania promieni słonecznych. Jest to metoda, która pozwala na zwiększenie uzysku energetycznego względem stacjonarnego systemu fotowolta-

icznego nawet do 45%. Jednak, systemy nadążne ze względu na elementy ruchome wymagają częstych przeglądów i konserwacji oraz są stosunkowo drogie, stąd są raczej niechętnie stosowane.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawione rozwiązania zostały sklasyfikowane w następujących kryteriach: czy jest możliwy montaż w istniejącej instalacji elektroenergetycznej, jaka jest minimalna strata wydajności systemu przy zacienieniu 30x30cm, poziom zabezpieczenia w przypadku awarii, wpływ danego rozwiązania na częstotliwość przeglądów, czy dostępna jest funkcja autodiagnostyki oraz koszt instalacji. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Zestawienie rozwiązań służącej poprawie wydajności energetycznej instalacji fotowoltaicznej.

	Dioda bocznikująca	Optymalizer	Mikroinwerter	Rozproszony system fotowoltaiczny
montaż w istniejącym systemie	ograniczony (do powierzchni jednego panelu)	łatwy	skomplikowany (sieć elektroenergetyczna na dachu)	niemożliwy
minimalna strata wydajności systemu fotowoltaicznego przy zacienieniu 30x30cm	przy 4 diodach około 25% powierzchni panelu	powierzchnia jednego panelu (znacznie obniżona moc całego panelu)	powierzchnia jednego panelu (znacznie obniżona moc całego panelu)	około 6% powierzchni ekwiwalentnego panelu
poziom zabezpieczenia w przypadku awarii	znikomy (uszkodzenie całej instalacji)	znikomy (uszkodzenie całej instalacji)	średni (jednak większe ryzyko pożaru)	bardzo duży (uszkodzenie nie wpływa na pozostałą instalację)
zmniejszenie częstotliwości przeglądów	nie	nie	nie	tak
autodiagnostyka	brak	przeważnie brak (potrzeba dodatkowych elementów)	przeważnie brak potrzebny dodatkowy moduł	pełna
koszt	mały	250-350 zł na panel + dedykowany inwerter	około 1000 zł na panel – koszt inwertera dla całego systemu	około 100 zł za moduł dla powierzchni ekwiwalentnego panelu 1600 zł

Analizując powyższe zestawienie widać, że każde ze wskazanych rozwiązań ma inny obszar zastosowań. Przy budowie farmy fotowoltaicznej na terenie płaskim, wolnych od przeszkód terenowych, wystarczą diody bocznikujące, przy budowie jednorodzinnej mogą okazać się wystarczające optymalizery lub, jeśli jest taka potrzeba, mikroinwertery. Jednak dla zabudowy z wieloma źródłami zacienień najlepszym rozwiązaniem będzie system rozproszony – taki typ zabudowy występuje na obszarach silnie zurbanizowanych.

LITERATURA

- [1] Anguita J. M., Almonacid G., Aguilera J., Perez P.J., de la Casa J., Maintenance and evaluation during the design of building integrated grid-connected photovoltaic systems, 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003.
- [2] Lange G., Fotowoltaika. Wszystko, co warto wiedzieć, cz. 1, GLOBEnergia (2012), nr 4.
- [3] Głuchy D., Kurz D., Trzmiel G.: Analysis of the influence of shading by horizon of PV cells on the operational parameters of a photovoltaics system, *Przegląd Elektrotechniczny*, 04/2014, pp. 78–80
- [4] Daliotto S., Napoli F., Guerriero P., d’Alessandro V., A modified bypass circuit for improved hot spot reliability of solar panels subject to partial shading, *Sol Energy*, Vol. 134, (2016), 211–218.
- [5] Trzmiel G., Głuchy D., Kurz D., The impact of shading on the exploitation of photovoltaic installations, *Renewable Energy*, 153, 2020, pp. 480–498
- [6] Acciari G, Graci D., La Scala A, Higher PV Module Efficiency by a Novel CBS Bypass, *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol. 26, no. 5, may 2011.
- [7] Fu Y., Qi, J. Li Y., Zhang X., Chen M., Analysis and Verification of the Stability for PV Series-Connected Power Optimizer System, 10th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia, BEXCO, Busan, Korea, May 27–30, 2019.
- [8] Yuan J., Blaabjerg F., Yang Y., Sangwongwanich A., Shen Y., An Overview of Photovoltaic Microinverters: Topology, Efficiency, and Reliability, 13th International Conference on Compatibility IEEE, Power Electronics and Power Engineering, 2019.
- [9] Niesen B., Werner J., Walter., P. Seif J., Allebé C., Sacchetto., Despeisse M., Moon S., Nicolay S., De Wolf S., Ballif C., High-efficiency perovskite/silicon heterojunction tandem solar cells, *IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2016.
- [10] Raupp C., Tatapudi S., Bicer B., TamizhMani G., Performance and Reliability Evaluation of Concentrated Photovoltaic (CPV) Power Plants, *IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2015.
- [11] Nallathambi C., Vishnu D., Saravana Ilango G., Reference cell based dual axis solar tracking for large scale pv systems, 3rd International Conference on Electrical, Electronics, Engineering Trends, Communication, Optimization and Sciences, *EEECOS 2016*.
- [12] Mielczarek N., Wykorzystanie symulacji Processor-In-the-Loop do weryfikacji algorytmów sterowania w energoelektronice, *Konferencja ZKwE, Kiekrz*, 2011
- [13] Product page of Texas Instruments: <http://www.ti.com/product/LMG3411R070>. Accessed: December 2018.

OVERVIEW OF SELECTED SOLUTIONS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF SOLAR INSTALLATION IN THE EVENT OF PARTIAL LENGTHS

Bearing in mind the growing popularity of solar installations and the increasing number of equal technical solutions aimed at improving its efficiency, a review and comparison of these solutions was carried out. The introduction presents the general structure of a classic photovoltaic system as well as the problem of the effect of shading for such an installation. Then the article presents successively the most popular technical solutions that affect the efficiency of the photovoltaic system during the occurrence of shading. In the next chapter solutions that are currently in the research and laboratory tests phase have been highlighted. The work ends with a summary.

(Received: 05.12.2019 , revised: 17.12.2019)