

Środki ochrony przeciwporażeniowej w instalacjach fotowoltaicznych

Streszczenie. Wprowadzane regulacje prawne w zakresie pozyskiwania zielonej energii jak również jej zbywania oraz mechanizmy wsparcia finansowego, wpływają na dynamiczny rozwój tego sektora energetyki. Instalacje fotowoltaiczne stają się coraz powszechniej używanym źródłem pozyskiwania energii elektrycznej. W artykule przedstawiono aspekty prawne oraz techniczne stosowania środków ochrony przeciwporażeniowej w instalacjach fotowoltaicznych. Przeprowadzono analizę ich skuteczności z uwzględnieniem ograniczeń technicznych wynikających ze specyfiki obwodów DC tych instalacji.

Abstract. Presently introduced legislative regulations acquisition of green energy as well as its selling supporting financial mechanisms, contribute to the dynamic development of the energy sector. Photovoltaic installations are becoming more widely used sources of energy acquisitions. The paper presents technical and legal aspects of shock protection used in photovoltaic installations. An analysis of effectiveness of shock protection systems taking into account technical limitations due to specific features of DC circuits in these installations has been carried out. (**Precautions of shock protection in photovoltaic installation**).

Słowa kluczowe: instalacje fotowoltaiczna, ochrona przeciwporażeniowa, rażenie prądem stałym

Keywords: photovoltaic installation, shock protection, DC shock

Wstęp

Wprowadzane obecnie w Polsce regulacje prawne w zakresie pozyskiwania i zbywania energii wyprodukowanej w prosumenckich mikro instalacjach, wpływają na dynamiczny rozwój sektora "zielonej" energetyki. Polska zobowiązana jest do 2020 r. zwiększyć procentowy udział energii wyprodukowanej ze źródeł odnawialnych w ogólnym bilansie energetycznym do poziomu 15 % [1].

Technologia fotowoltaiczna staje się coraz częściej wykorzystywana w mikro instalacjach (≤ 10 kW), zabudowywanych na dachach domów jednorodzinnych lub w postaci zestawów modułów wolnostojących na prywatnych posesjach. Instalacje tego typu w większości eksploatowane i konserwowane są przez osoby nie mające odpowiedniej wiedzy oraz przygotowania praktycznego, dotyczącego bezpieczeństwa obsługi urządzeń i instalacji elektrycznych. Instalacje fotowoltaiczne (PV) to najczęściej kosztowne, kompleksowe inwestycje, których okres eksploatacji wynosi kilkadziesiąt lat. Wielu producentów paneli fotowoltaicznych gwarantuje ich żywotność na okres powyżej 20 lat [2, 3].

Projektując i budując instalacje PV, należy odpowiednio dobrać środki ochrony przeciwporażeniowej, uwzględnić negatywny wpływ czynników środowiskowych, tak aby cała instalacja prawidłowo funkcjonowała przez zakładany okres eksploatacji oraz aby nie stwarzała niebezpieczeństwa dla osób postronnych. Zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie [4], obwody strony DC należy traktować jako urządzenia pod napięciem, nawet jeśli cała instalacja PV jest odłączona od strony AC (od sieci elektroenergetycznej).

Podstawowe zasady ochrony przeciwporażeniowej

Najpoważniejszym zagrożeniem, jakie może wystąpić podczas użytkowania instalacji PV jest bezpośrednie oddziaływanie prądu elektrycznego na organizm żywy. Wystąpienie niekorzystnych zmian patofizjologicznych w organizmie uzależnione jest od wartości i rodzaju prądu rażeniowego oraz od drogi i czasu przepływu.

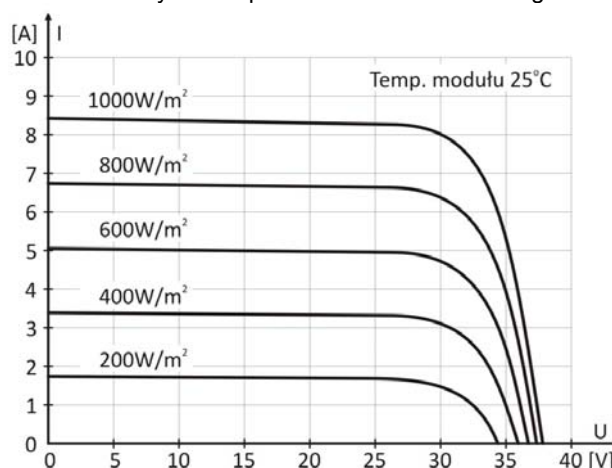
Podstawową zasadą ochrony przed porażeniem prądem elektrycznym zgodnie z normą [5], jest zapewnienie braku dostępu do części czynnych niebezpiecznych w normalnych warunkach użytkowania lub w przypadku pojedynczego uszkodzenia. Zasady ograniczenia dostępności mogą różnić się w zależności od kwalifikacji użytkowników: osoby postronne, poinstruowane, wykwalifikowane. Wszystkie środki ochrony powinny być tak projektowane i

wykonywane, aby były skuteczne przez cały okres spodziewanego użytkowania instalacji PV, zgodnie z jej przeznaczeniem i przy właściwej konserwacji [5].

W instalacjach elektrycznych niskiego napięcia, ochrona przed porażeniem prądem elektrycznym, powinna składać się z odpowiednio dobranego środka ochrony podstawowej i niezależnego środka ochrony przy uszkodzeniu lub wzmocnionego środka ochrony, który zapewnia zarówno ochronę podstawową jak i ochronę przy uszkodzeniu [6]. W warunkach specjalnych, wynikających z przeznaczenia pomieszczenia lub wpływów zewnętrznych, norma [6, 7], nakazuje zastosowanie dodatkowo środków ochrony uzupełniającej.

Budowa obwodów DC instalacji PV

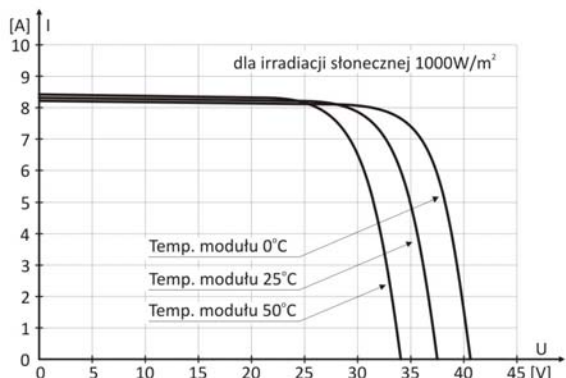
Pojedynczy moduł PV np. o mocy 250 W, może wygenerować napięcie stałe w zakresie do 40 V (rys. 1, 2). Wartość generowanego prądu uzależniona jest bardzo silnie od intensywności promieniowania słonecznego.



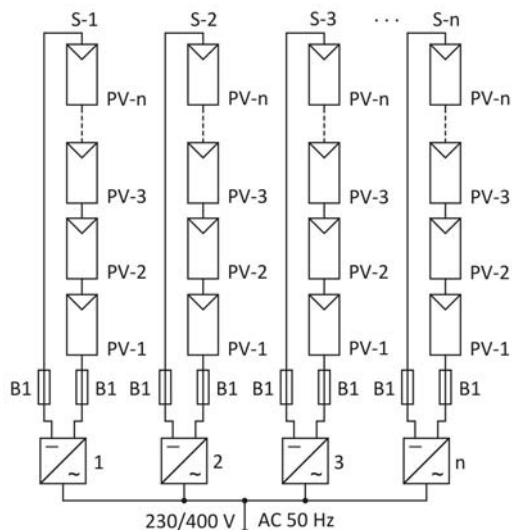
Rys. 1. Charakterystyki $I=f(U)$ przykładowego modułu o mocy 250 W dla różnych wartości iradiacji słonecznej ($t = \text{const.}$) [3]

W celu uzyskania większych mocy, moduły PV łączy się ze sobą szeregowo i/lub równolegle. Połączenie szeregowe powoduje wzrost napięcia w obwodzie DC, proporcjonalnie do ilości połączonych modułów (rys. 3). Maksymalne dozwolone napięcie obwodu otwartego DC w warunkach standardowych ($U_{OC\ STC}$) [4], ograniczone jest specyfikacją techniczną zastosowanych urządzeń: inwertera, modułów

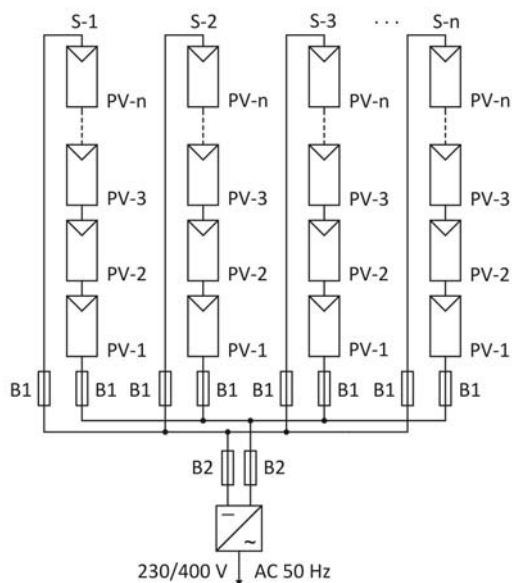
PV, elementów zabezpieczających oraz okablowania (typowo $U_{OC\ STC} = 1000\text{ V}$). W celu osiągnięcia wyższych prądów, a tym samym wyższych mocy w instalacji, szeregowe łańcuchy modułów PV łączy się równoległe (rys. 4). Maksymalna wartość prądu strony DC ograniczona jest parametrami technicznymi zastosowanego inwertera. Należy przestrzegać zasady, że wszystkie łączone moduły PV powinny posiadać te same parametry techniczne.



Rys. 2. Charakterystyki $I=f(U)$ przykładowego modułu o mocy 250 W dla różnych temp. pracy (irradjacja słoneczna const.) [3]

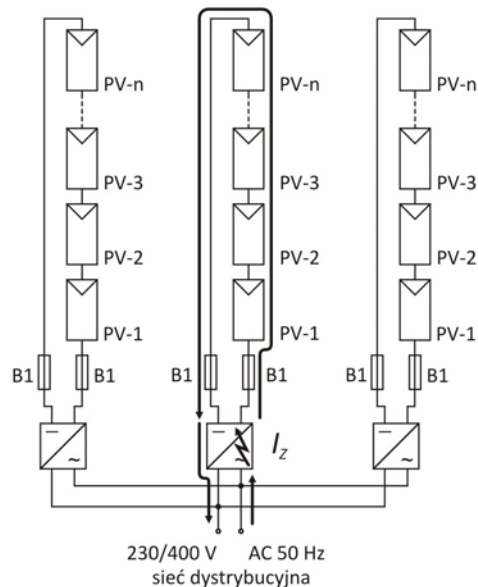


Rys. 3. Szeregowe połączenie modułów PV z inwerterami DC/AC

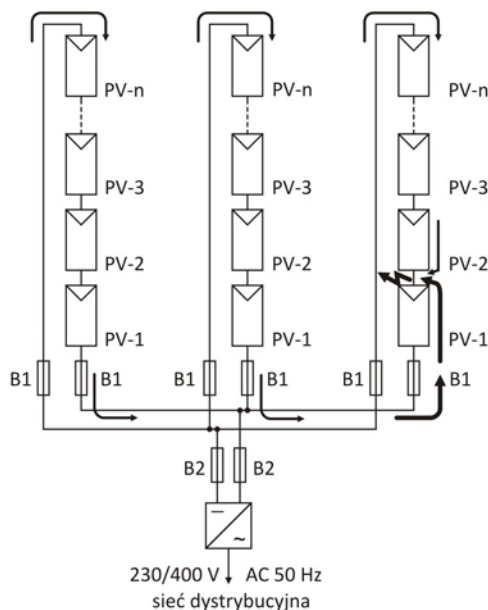


Rys.4. Połączenie równoległe łańcuchów (szeregowych) modułów PV do centralnego inwertera DC/AC instalacji PV

Norma [4] nakazuje stosować urządzenia zabezpieczające w obwodach DC do ochrony modułów PV i okablowania przed prądami zwarciowymi po stronie AC inwertera (w przypadku braku separacji galwanicznej - rys. 5) oraz przed prądami wstecznymi występującymi przy uszkodzeniu jednego z kilku połączonych równoległe łańcuchów modułów PV (rys. 6).



Rys. 5. Przepływ prądu zwarciowego wywołanego uszkodzeniem falownika bez separacji galwanicznej w instalacji PV



Rys. 6. Przepływ prądu wstecznego w przypadku zwarcia w obwodzie DC instalacji PV

Dopuszczalna wartość prądu wstecznego dla pojedynczego modułu PV określona jest normie [8] i wynosi od 2 do 2,6 znamionowego prądu zwarciowego danego modułu. Wartość wstecznego uzależniona jest od liczby połączonych równoległe łańcuchów modułów PV i już dla trzech łańcuchów może przekroczyć warunek graniczny zapisany w normie [8]. Przepływ prądu wstecznego przez moduły PV wpływa na wzrost ich temperatury pracy, a w skrajnych przypadkach może prowadzić do uszkodzeń termicznych i pojawienia się łuku elektrycznego [1, 9].

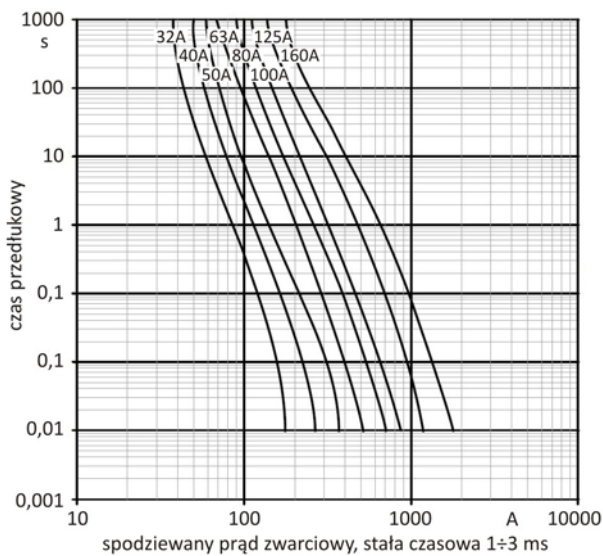
Wyłączanie prądu w obwodach DC instalacji PV jest bardziej skomplikowane niż w obwodach prądu przemiennego AC. W obwodach prądu przemiennego, przejście przebiegu prądu przez zero umożliwia łatwe zgaszenie powstałego łuku elektrycznego między zestykami urządzenia wyłączającego. Ze względu na brak tej możliwości w obwodach prądu stałego, kryteria doboru urządzeń zabezpieczających jak również ich konstrukcji mechanicznej są bardziej rygorystyczne. W przypadku wyłączania łuku elektrycznego prądu stałego występuje nierówny jego podział na dwa zestyki. Na zestyk o polaryzacji dodatniej przypada 70% a na zestyk ujemny - 30% [10]. Plazma łuku elektrycznego powoduje migrację jonów metali ze styku o polaryzacji dodatniej co wpływa na przyspieszoną jego degradację i zwiększenie rezystancji.

Istotnym czynnikiem determinującym dobór urządzeń wyłączających i zabezpieczających instalacje PV jest wartość napięcia roboczego obwodów DC (do 1000 V).

Jako zabezpieczenia przeciążeniowe i zwarciovowe w obwodach DC instalacji PV najczęściej stosowane są bezpieczniki [11, 12]. Posiadać powinny charakterystykę czasowo-prądową typu gPV (rys. 7) zgodnie z wymogami normy [13], napięcie znamionowe wyższe niż najwyższe możliwe napięcie w obwodzie DC ($<U_{OC\ STC}$) oraz prąd znamionowy spełniający zależność [1]:

$$(1) \quad 1,4 \cdot I_{SC} \leq I_n \leq 2,4 \cdot I_{SC}$$

gdzie: I_{SC} - znamionowy prąd zwarciovowy chronionych modułów PV, I_n - znamionowy prąd bezpiecznika.



Rys. 7. Charakterystyka czasowo-prądowa bezpieczników typu gPV o zdolności odłączania do 1000 V DC, rozmiar NH1 [14]

W obwodach DC instalacji PV należy montować rozłączniki i wyłączniki w których stosowane są rozwiązania eliminujące asymetrię podziału łuku elektrycznego. Podstawowym rozwiązaniem jest zastosowanie urządzeń rozłączających w których przepływ jonów dodatnich blokowany jest za pomocą zabudowanego magnesu trwałego. Są to tzw. urządzenia spolaryzowane, w których ściśle należy przestrzegać oznaczonej biegunowości podłączenia. Niewłaściwe podłączenie może być przyczyną przyspieszonego uszkodzenia styków łączeniowych [10].

Do zabezpieczania obwodów DC instalacji PV najlepszym rozwiązaniem są rozłączniki i wyłączniki bezpolaryzacyjne. Blokowanie przepływu jonów dodatnich uzyskiwane jest przez wytworzenie pola magnetycznego w

skutek przepływającego prądu przez urządzenie. Powstające pole magnetyczne zmienia swoją polaryzację ze zmianą kierunku przepływu prądu. Jest to bardzo istotna cecha w przypadku wyłączania prądów wstecznych powstających w obwodach DC instalacji PV [15].

Środki ochrony przeciwporażeniowej w instalacjach PV

Ochronę podstawową w instalacjach i urządzeniach elektrycznych użytkowanych przez osoby postronne (niewykwalifikowane), stanowią środki techniczne chroniące przed dotykiem bezpośrednim części czynnych niebezpiecznych. Typowym rozwiązaniem jest zastosowanie izolacji podstawowej lub obudów izolacyjnych o stopniu ochrony co najmniej IP2X lub IPXXB, chroniących przed umyślnym (zamierzonym) dotykiem części czynnych niebezpiecznych [7].

W przypadku instalacji PV, dobierając środki ochrony podstawowej należy uwzględnić szczególnie negatywne wpływy środowiskowe, wynikające z lokalizacji modułów PV na zewnątrz obiektów budowlanych oraz wartości napięć występujących w obwodach DC.

Zgodnie z wymogami normy [4], w obwodach instalacji PV o napięciu $U_{OC\ max} > 120\ V\ DC$, jako środek ochrony przeciwporażeniowej należy stosować izolację wzmocnioną lub podwójną. Dostępne na rynku moduły PV, standardowo produkowane są w II klasie ochronności i przystosowane są do pracy w zakresie temperatur $-40^{\circ}C \div +90^{\circ}C$, zapewniając szczelność na poziomie IP67. Maksymalne napięcie w obwodzie DC, łączącym pojedyncze panele w łańcuchy może wynosić 1000 V [16]. W tabeli 1 zestawiono parametry techniczne przykładowego panelu PV.

Tabela 1. Dane techniczne przykładowego modułu PV [17]

Ogniwa krzemowe polikrystaliczne	156 x 156 mm
Liczba ogniw	60 (6 x 10)
Współczynnik temp. I_{SC}	$0,05 \pm 0,01\ \%/^{\circ}C$
Współczynnik temp. V_{OC}	$-0,32 \pm 0,02\ \%/^{\circ}C$
Współczynnik temp. P_m	$-0,43 \pm 0,05\ \%/^{\circ}C$
Moc maksymalna P_m	260 W
Napięcie przy mocy maksymalnej V_m	31 V
Prąd przy mocy maksymalnej I_m	8,39 A
Napięcie w obwodzie otwartym V_{OC}	38,4 V
Prąd zwarcia I_{SC}	8,6 A
Sprawność modułu	16%
Maksymalne napięcie w obwodzie	1000 V
Tolerancja mocy	0/+3%
Wartość znamionowa bezpiecznika szeregowego	20 A
Zakres temperatur pracy	$-40^{\circ}C \div +90^{\circ}C$
Szczelność modułu	IP67
Klasa ochronności	II

W połączonych szeregowo modułach PV może wystąpić szkodliwe zjawisko jeśli jeden z modułów zostanie częściowo zacieniony. Moduł ten zaczyna pracować jako odbiornik a prąd przez niego płynący może spowodować jego termiczne uszkodzenie. W celu uniknięcia takiej usterki w modułach montowane są diody bocznikujące wybrane sekcje ogniw [18, 19].

Na oprzewodowanie obwodów DC, łączących moduły PV powinno stosować się kable jednożyłowe na napięcie min. 0,6/1 kV. Kable powinny być podwójnie izolowane, odporne na promieniowanie UV i ozon. Muszą ponadto wykazywać się odpowiednią odpornością mechaniczną oraz wysokim poziomem odporności na skrajne zmiany temperatur pracy [16]. Ze względu na maksymalne temperatury pracy i sposób wykonywania instalacji, wyznaczając dopuszczalną długość kabli, wymagane jest stosowanie współczynników korekcyjnych w odniesieniu do wartości określonych przez

producentów. W tabeli 2 zestawiono dane techniczne kabla PV1F, wytwarzanego przez wielu producentów z przeznaczeniem do wykorzystania w obwodach DC instalacji PV.

Do łączenia kabli w obwodach DC należy stosować certyfikowane złącza systemowe zapewniające odpowiednią klasę szczelności na poziomie min. IP67 oraz parametry techniczne, porównywalne z właściwościami kabla PV-1F (np. złącza MK-4).

Tabela 2. Właściwości techniczne kabla typu PV1-F [20]

typ	PV1-F
napięcie pracy (AC)	600/1000 V
napięcie pracy (DC)	1800 V
napięcie testu (50 Hz)	4000 V
zakres temperatur	-40°C ÷ +90°C
max. temp. na żyłę	+120°C
min. promień gięcia	4x (średnica zew.)
elastyczność	klasa 5
<ul style="list-style-type: none"> - podwójna izolacja, - odporny na warunki atmosferyczne, promieniowanie UV, ozon, - dobra odporność na oleje oraz chemikalia, - zewnętrzna opona odporna na przetarcia i uszkodzenia, - dzięki podwójnej izolacji, krótkotrwale odporny na bardzo wysoką temperaturę podczas zwarcia (5s/200°C) - przewidywany okres eksploatacji - 25 lat, - bezhalogenowość. 	

Ochronę przy uszkodzeniu w instalacjach elektrycznych zapewniają rozwiązania techniczne, których zadaniem jest skuteczna ochrona użytkowników urządzeń i instalacji, w przypadku gdy na częściach przewodzących dostępnych lub obcych, pojawi się niebezpieczne napięcie w danych warunkach (ochrona przy dotyku pośrednim).

Najczęstszymi uszkodzeniami występującymi w obwodach DC instalacji PV są przebicia elektryczne izolacji wynikające z wysokich wartości napięć roboczych, negatywnych wpływów atmosferycznych (wilgoć, temperatura, promieniowanie UV, ozon) oraz naprężeń mechanicznych. Bardzo istotne jest więc zapewnienie odpowiedniej ochrony podstawowej i ochrony przy uszkodzeniu aby każda osoba, która może mieć bezpośredni dostęp do wybudowanej instalacji PV była bezpieczna.

Podsumowanie

Instalacje PV powinny być zaprojektowane i wykonane zgodnie z obowiązującymi przepisami, normami i rozwiązaniami technicznymi gwarantującymi niezawodne działanie oraz odpowiednią ochronę ludzi, którzy będą pracować przy obsłudze i konserwacji.

W obwodach DC instalacji PV nie mają zastosowania typowe środki ochrony przeciwporażeniowej stosowane w instalacjach niskiego napięcia AC.

Dwoma podstawowymi problemami z zapewnieniem skutecznej ochrony przeciwporażeniowej w instalacjach PV jest brak możliwości wyłączenia obwodów DC dopóki moduły PV są wystawione na promieniowanie słoneczne oraz mała wartość generowanego prądu zwarciovego. Typowe prądy zwarciovowe w obwodach szeregowo połączonych modułów PV są tylko o ok. 10% większe od znamionowych prądów pracy. W związku z tym bezcelowe jest stosowanie w obwodach DC ochrony polegającej na samoczynnym wyłączeniu zasilania w wymaganym czasie.

Zastosowanie izolacji wzmocnionej lub podwójnej jako środka ochrony przeciwporażeniowej nie wyklucza ryzyka powstania uszkodzenia. W instalacjach PV powinna być stosowana ochrona uzupełniająca w postaci miejscowych połączeń wyrównawczych. Połączeniami objęte powinny być wszystkie części przewodzące dostępne i części

przewodzące obce instalacji, przewody ochronne urządzeń, metalowe konstrukcje wsporcze, podesty, zbrojenia konstrukcji betonowych, itd.

Ze względu, że obwody DC instalacji PV najczęściej są izolowane od ziemi, wystąpienie pierwszego uszkodzenia izolacji i przepływu prądu doziemnego nie będzie skutkowało wyłączeniem. Tolerowanie tego stanu zbyt długo może skutkować powstaniem drugiego uszkodzenia izolacji w innym miejscu obwodu. Wystąpienie podwójnego uszkodzenia może skutkować przepływem prądu doziemnego oraz powstaniem łuków elektrycznych DC, których samoczynne zgaszenie jest mało prawdopodobne. Uszkodzenia tego typu są niebezpieczne ze względu na bardzo duże ryzyko powstania pożaru.

Wskazane jest stosowanie urządzeń monitorujących na bieżąco stan izolacji i sygnalizujących powstanie pierwszego uszkodzenia.

LITERATURA

- [1] Szczerbowski R.: Instalacje fotowoltaiczne - aspekty techniczno-ekonomiczne, Przegląd Elektrotechniczny, R.90, nr 10/2014, s. 31-36
- [2] Klugmann-Radziemska E.: Fotowoltaika w teorii i praktyce, Wydawnictwo BTC, Legionowo 2010
- [3] Messenger R. A., Ventre J.: Photovoltaic systems engineering, Taylor&Francis Group, 2010
- [4] Norma PN-HD 60364-7-712:2007 Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Część 7-712: Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji. Fotowoltaiczne (PV) układy zasilania
- [5] Norma PN-EN 61140:2005/A1:2008 Ochrona przed porażeniem prądem elektrycznym - Wspólne aspekty instalacji i urządzeń
- [6] Norma PN-HD 60364-4-41:2009 Instalacje elektryczne niskiego napięcia. Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Ochrona przed porażeniem elektrycznym
- [7] Musiał E.: Ochrona przeciwporażeniowa w urządzeniach niskiego napięcia. Konsekwencje ustanowienia normy PN-HD 60364-4-41:2009, INPE nr 129/130, 2010, s. 5-39
- [8] PN-EN 61730-2:2007 Ocena bezpieczeństwa modułu fotowoltaicznego (PV) - Część 2: Wymagania dotyczące badań
- [9] Petrone G., Spagnuolo G., Teodorescu R., Veerachary M., Vitelli M.: Reliability issues in photovoltaic power processing systems, Industrial Electronics IEEE Transactions on, Volume 55, Issue 7, 2008, s. 2569-2580
- [10] Gałach M.: Wyłączniki i rozłączniki Noark Electric dla instalacji PV, INPE nr 172-173, 2014, s. 69-76
- [11] Kłopotcki R.: Bezpieczniki PV i ograniczniki Etitec-PV do ochrony systemów PV, ElektroSystemy nr 5, 2009, s. 98-102
- [12] Kłopotcki R.: Zabezpieczenia elektrowni fotowoltaicznych w praktyce, Elektroinstalator nr 3, 2013, s. 18-21
- [13] Norma PN-EN 60269-6:2011 Bezpieczniki topikowe niskonapięciowe - Część 6: Wymagania dodatkowe dotyczące wkładek topikowych do zabezpieczania fotowoltaicznych systemów energetycznych
- [14] Rozwiązania w zakresie łączenia, kontroli i bezpieczeństwa instalacji elektrycznych niskiego napięcia, katalog SOCOMEC Innovative Power Solutions, 2015
- [15] Eltawil M. A., Zhao Z.: Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, Issue 1, 2010, s. 112-129
- [16] Kowalski P.: Ogniwa fotowoltaiczne. Dobór przewodów łączeniowych, Polski Instalator nr 1, 2014, s. 20-23
- [17] Upsolar Germany GmbH, katalog produktów 2015
- [18] Schneider Electric - Poradnik Inżyniera Elektryka 2015
- [19] Jarzyńska K.: Produkty niskonapięciowe w instalacjach PV, INPE, nr 167, 2013, str. 21-26
- [20] HELUKABEL, Katalog produktów - Kable i przewody, 2014

Autor: dr inż. Paweł Czaja, Politechnika Częstochowska, Instytut Telekomunikacji i Kompatybilności Elektromagnetyczne, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: czajap@el.pcz.czest.pl