

Dorota BUGAŁA*, Artur BUGAŁA*

ODPORNOŚĆ INSTALACJI FOTOWOLTAICZNEJ NA ELEKTROMAGNETYCZNE ZABURZENIA UDAROWE

W pracy dokonano analizy poprawności funkcjonowania instalacji fotowoltaicznej o znamionowej mocy elektrycznej 3500 W, składającej się z 14 modułów fotowoltaicznych oraz przetwornika energoelektronicznego w postaci jednofazowego falownika napięcia, wyposażonego w układ śledzenia punktu mocy maksymalnej, w przypadku wystąpienia udarowego zakłócenia elektromagnetycznego typu surge. Udar napięciowy o parametrach 1,2/50 μ s, symulujący wyładowanie piorunowe, został wprowadzony do układu od strony sieci elektroenergetycznej. W celu komputerowego odwzorowania sygnału zaburzającego wykorzystano zalecenia zawarte w normie PN-EN 61000-4-5 „badanie odporności na udary typu surge”. Wykazano istotne zmiany wartości napięcia elektrycznego po stronie stałoprądowej, związanej z układem generacji mocy elektrycznej przez układ fotowoltaiczny, oraz zmiennoprądowej w układzie przemiennika DC/AC.

SŁOWA KLUCZOWE: udar napięciowy, zaburzenie elektromagnetyczne, instalacja fotowoltaiczna, symulacja komputerowa, Matlab.

1. WPROWADZENIE

Dyrektywa kompatybilność elektromagnetyczna 2014/30/UE [1] nie określa jasno, jakie wymagania powinna spełniać instalacja elektryczna i elektroniczna w obiektach, zakłada jedynie, że badania takiej instalacji powinny być wykonywane.

Przez odporność pracującego urządzenia lub systemu rozumie się zdolność do pracy podczas oddziaływania na nie określonych zaburzeń elektromagnetycznych lub umownych sygnałów zakłócających. Obecnie znormalizowane są laboratoryjne badania odporności urządzeń na zaburzenia elektromagnetyczne takie jak: odporność na wyładowania elektrostatyczne, odporność na udary czy na elektryczne szybkie stany przejściowe.

W założeniach Polskiej Polityki Energetycznej do 2030 roku stawiany jest duży nacisk na rozwój generacji rozproszonych energii elektrycznej, w tym mikro, małych i dużych instalacji fotowoltaicznych, co stanowi o ich popularności i szerokim wykorzystaniu w Polsce i na świecie [6].

* Politechnika Poznańska

Wśród elementów składowych instalacji fotowoltaicznych sieciowych (on-grid), jak i wyspowych (off-grid) wyróżnić można następujące urządzenia energoelektroniczne: falowniki, regulatory ładowania, przekształtniki DC/DC, inne układy optymalizacji pracy układu PV [2, 4]. Urządzenia te należą do grupy urządzeń wrażliwych na zaburzenia elektromagnetyczne. Niespełnienie wymagań kompatybilności elektromagnetycznej oraz ich niewłaściwa instalacja (np. brak ekwipotencjalizacji potencjałów) może prowadzić do ich awarii i wyłączenia części lub całości pracującego systemu [10].

Z uwagi na szkodliwość badań odporności na wybrane zaburzenia elektromagnetyczne zasadnym jest wykorzystanie komputerowych narzędzi symulacyjnych do wykonania modelu instalacji fotowoltaicznej pracującej podczas oddziaływania zaburzeń.

2. INSTALACJE FOTOWOLTAICZNE

System fotowoltaiczny stanowi układ połączonych urządzeń składowych umożliwiających pozyskanie energii promieniowania słonecznego, jej przetworzenie w energię elektryczną w oparciu o występowanie w strukturze materiału ogniwa słonecznego efektu fotowoltaicznego wewnętrznego oraz dostosowanie parametrów sygnałów elektrycznych do wymagań jakościowych sieci elektroenergetycznej (układ sieciowy on-grid) lub zasilanego odbiornika energii elektrycznej (układ wyspowy off-grid). Niezależnie od zastosowanej konfiguracji, konieczność ekspozycji powierzchni modułów fotowoltaicznych na promieniowanie słoneczne zwiększa ryzyko oddziaływania niekorzystnych czynników zewnętrznych, w tym bezpośrednich wyładowań piorunowych lub sprzężeń generowanych w otoczeniu miejsca instalacji fotoprzetworników. Stwarza to konieczność zastosowania odpowiednich środków ochrony przed bezpośrednim wyładowaniem piorunowym oraz przed możliwymi przepięciami elektrycznymi.

Istotnym parametrem wpływającym na ryzyko ograniczenia niezawodności i bezawaryjności instalacji fotowoltaicznej jest liczba występowania doziemnych piorunowych wyładowań atmosferycznych w miejscu jej lokalizacji. W Polsce dane o częstości występowania doziemnych wyładowań atmosferycznych są uzyskiwane z systemów automatycznej lokalizacji wyładowań LLS (Lightning Location System). Przykładem systemu dedykowanego do rejestracji doziemnych wyładowań atmosferycznych z dużą dokładnością danych jest system PE-RUN lub LINET [5].

Zgodnie z zaleceniami normy [9] umieszczeniu urządzeń technicznych wyposażonych w elementy elektryczne na płaszczyźnie konstrukcji dachu budynku powinno towarzyszyć zapewnienie odpowiedniej przestrzeni ochronnej, stworzonej przez układ zwodów pionowych lub poziomych, jak również odległości wzajemnej między chronionym urządzeniem a instalacją odgromową. Dodatkowym środkiem ochrony jest zastosowanie ograniczników przepięć typu T1+T2.

Wymagania zawarte w normie [8] przedstawiają relację między kątem ochronnym i wysokością zwodu w celu zapewnienia odpowiedniego stopnia ochrony obiektu wrażliwego.

Dodatkowo w celu wyznaczenia miejsc na płaszczyźnie instalacji modułów fotowoltaicznych zagrożonych bezpośrednim wyładowaniem piorunowym można zastosować zasadę toczącej się kuli o promieniu zależnym od poziomu wymaganej ochrony odgromowej.

Dokładne wyznaczenie prawidłowych odstępów izolacyjnych pomiędzy zwodami i przewodami instalacji odgromowej a chronionymi urządzeniami jest zadaniem trudnym. W sytuacji połączenia instalacji fotowoltaicznej z siecią elektroenergetyczną, oprócz środków redukcji zagrożenia bezpośrednim udarem piorunowym, należy zastosować również odpowiednie układy ograniczników przepięć (SPD) w sekcji aparatury pomiarowej, przekształtników DC/AC od strony stała – i zmiennoprądowej czy regulatorów ładowania magazynów energii. Dodatkowo, w zależności od miejsca wprowadzenia udaru piorunowego falownik energoelektroniczny należy zabezpieczyć od strony sieci elektroenergetycznej poprzez zastosowanie SPD typu II.

3. ELEKTROMAGNETYCZNE ZABURZENIA UDAROWE

Napięciowy udar piorunowy pełny scharakteryzowany jest następującymi parametrami: wartością szczytową, czasem trwania czoła T_1 , umownym początkiem udaru O_1 i czasem do półszczytu T_2 . Udar piorunowy normalny, to udar pełny o czasie trwania czoła $1,2 \mu\text{s}$ i czasem do półszczytu $50 \mu\text{s}$. Oznacza się go jako 1,2/50. Prąd udarowy z kolei scharakteryzowany jest: wartością prądu rozumianą zwykle jako wartość szczytowa i dalej zestawem takich samych parametrów jak w udarze napięciowym łączeniowym T_1 , O_1 i T_2 z tym, że inaczej obecnie definiuje się umowny początek niż poprzednio. Normalne prądy udarowe z kształtem silnego tłumienia wykładniczego skategoryzowano jako udary: 1/20, 4/10, 8/20 i 30/80 μs [3].

Udar napięciowy dany jest wzorem (1):

$$v(t) = AV_p \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_1}} \right) e^{\frac{-t}{\tau_2}} \quad (1)$$

gdzie:

A – amplituda impulsu,

τ_1 , τ_2 – stałe czasowe,

t – czas rozpoczęcia impulsu,

V_p – napięcie udarowe.

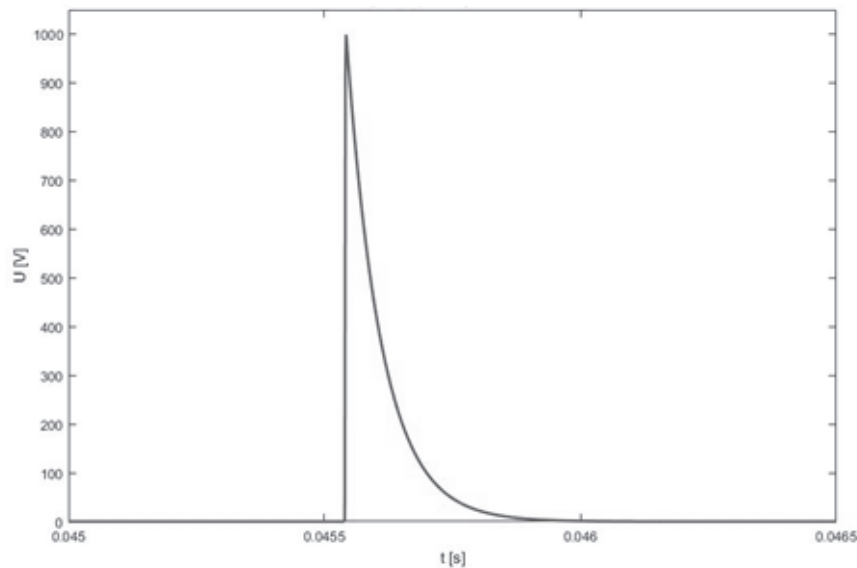
Do udarów piorunowych spowodowanych piorunowymi stanami przejściowymi należą [3]:

- bezpośrednie uderzenia pioruna w obwód zewnętrzny (znajdujący się na wolnym powietrzu), wywołujący duże prądy, które wytwarzają napięcia w wyniku przepływu przez rezystancję ziemi lub w wyniku przepływu przez impedancję obwodu zewnętrznego;
- pośrednie uderzenie pioruna (wyładowanie między chmurami lub w ich obrębie albo wyładowanie do pobliskich obiektów, wytwarzające pola elektromagnetyczne), które indukuje napięcia/prądy w przewodach na zewnątrz i/lub w budynku;
- przepływ w ziemi prądu wyładowania atmosferycznego w wyniku pobliskich bezpośrednich wyładowań doziemnych, sprzęgającego się ze wspólnymi trasami uziomowymi systemu uziemienia instalacji.

Laboratoryjne badanie odporności urządzeń na udary wykonuje się na stanowisku zawierającym [7]:

- urządzenie badane,
- wyposażenie pomocnicze, gdy jest wymagane,
- układy sprzęgająco-odprzegające,
- generator,
- ziemia odniesienia.

Generator udarów zgodny z normą [7] zamodelowano w środowisku Matlab/Simulink. Impuls piorunowy został zadeklarowany w postaci bloku funkcyjnego, bloku zegarowego, bloku z wartością stałą oraz funkcji Step. Kształt przebiegu impulsu z generatora przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Przebieg impulsu udarowego

4. MODEL INSTALACJI FOTOWOLTAICZNEJ

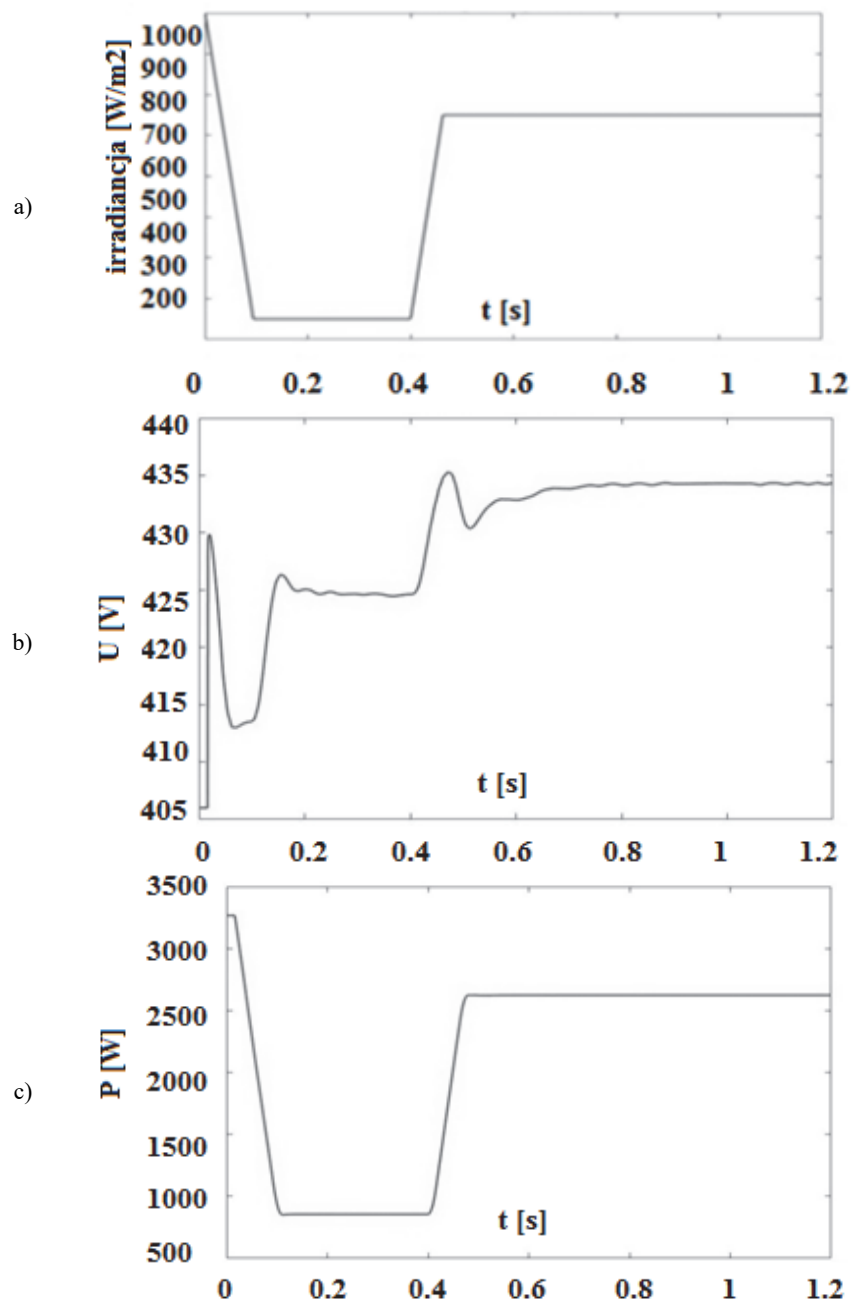
Model badanej instalacji fotowoltaicznej przedstawiono na rysunku 2. W obwód urządzeń zasilających wchodzi 14 modułów PV połączonych w jeden string. Moc całej instalacji PV wynosi 3500 W. Układ wyposażony jest w układ sterowania, śledzący punkt mocy maksymalnej.

discrete
1.32e-06 s
powergui

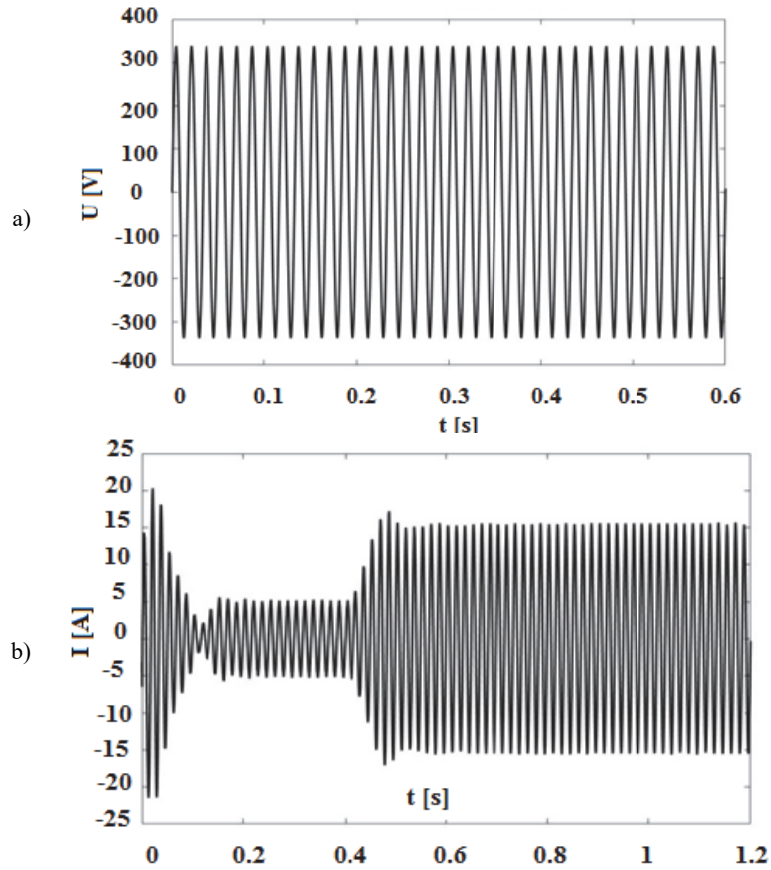


Rys. 2. Model instalacji PV

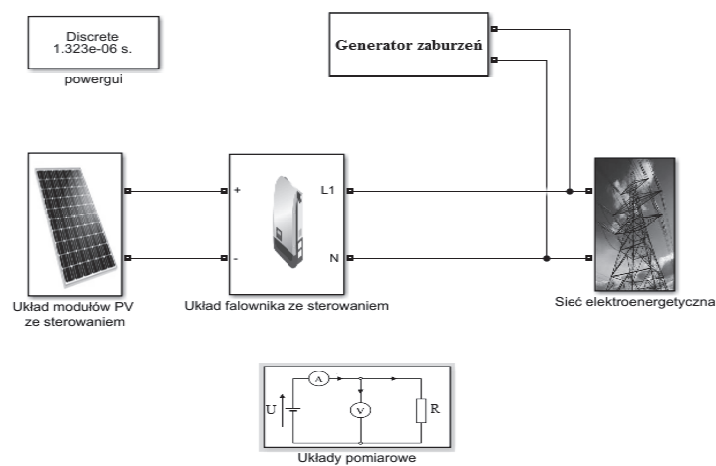
Wartości napięć i mocy oraz irradiancji mierzonej na powierzchni paneli fotowoltaicznych w zależności od czasu przedstawiono na rysunku 3. Wartości prądu i napięcia DC z układu PV są konwertowane na prąd i napięcie AC za pomocą układu inwertera opartego na sterowanym mostku H. Wartości prądów i napięć za układem inwertera (czyli w układzie sieci elektroenergetycznej) przedstawiono na rysunku 4. Wartość amplitudy napięcia wynosi 325 V natomiast wartość amplitudy prądu 20 A.



Rys. 3. Przebiegi czasowe: a) irradiancji średniej, b) napięcia oraz c) mocy modułów PV



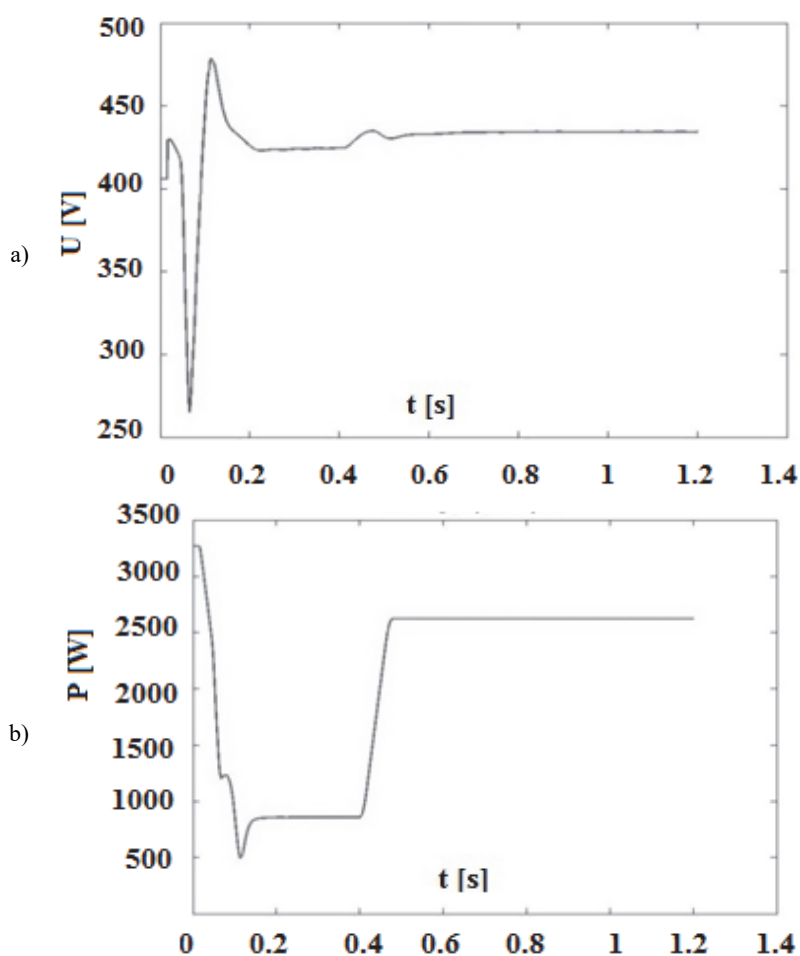
Rys. 4. Przebiegi a) napięcia i b) prądu sieci elektroenergetycznej



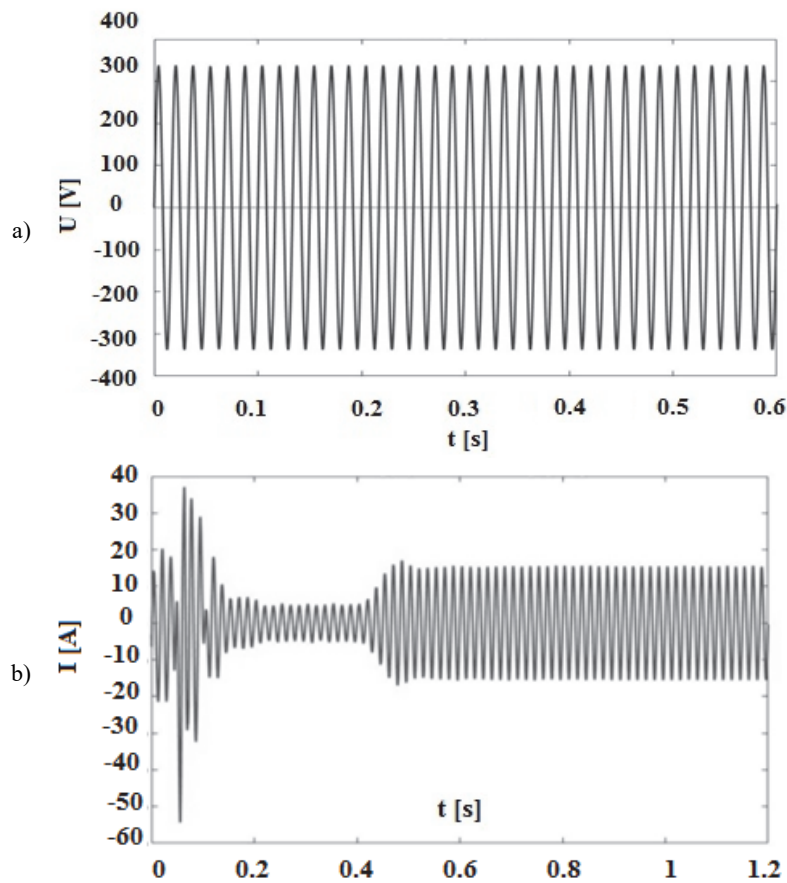
Rys. 5. Układ fotowoltaiczny zaburzany udarem napięciowym

Wpływ zaburzeń na przebiegi napięcia i mocy instalacji PV przedstawiono na rysunku 6. Natomiast na rysunku 7 przedstawiono przebiegi prądu i napięcia w sieci elektroenergetycznej.

W momencie wystąpienia udaru napięciowego wartość amplitudy napięcia łańcucha modułów PV z wartości 415 V spada do wartości 300 V, co powoduje spadek mocy w układzie do ok 500 W. Prąd w sieci elektroenergetycznej pod wpływem zaburzenia wzrasta niebezpiecznie do wartości amplitudy prawie 60 A. Przy tak wysokiej wartości prądu może dojść do zniszczenia elementów układu.



Rys. 6. Przebiegi czasowe a) napięcia i b) mocy instalacji fotowoltaicznej



Rys. 7. Przebiegi czasowe (a) napięcia, (b) prądu sieci elektroenergetycznej

5. PODSUMOWANIE

Dzięki zastosowaniu komputerowych narzędzi symulacyjnych możliwe jest sprawdzenie zachowania się instalacji podczas oddziaływania na nią wybranych zaburzeń elektromagnetycznych. Umożliwia to wykrycie potencjalnych uszkodzeń oraz daje możliwość zastosowania dodatkowych elementów zabezpieczających.

Moduły fotowoltaiczne oraz współpracujące z nimi przetworniki energoelektroniczne DC/AC stanowią potencjalne źródło narażenia na uszkodzenie w wyniku bezpośredniego oddziaływania wyładowania piorunowego, jak również sprzężeń z obiektami znajdującymi się w bezpośrednim otoczeniu. Problematyka analizowanego zjawiska jest istotna, ponieważ na terenie Polski rejestruje się rocznie około 20 dni burzowych oraz średnio 2 uderzenia pioruna na powierzchni 1 m^2 [5].

Należy objąć ochroną urządzenia instalacji fotowoltaicznej znajdujące się na ścianach budynków i obiektów budowlanych.

Producent modułów fotowoltaicznych oraz inwerterów powinien odpowiednimi badaniami potwierdzić wytrzymałość urządzenia na przepięcia. Dodatkowo w przypadku doboru ograniczników przepięć typu T1+T2 należy określić wartość prądu udarowego. Stosowanie ograniczników w postaci iskierników gazowych zwiększa skuteczność ochrony elementów wrażliwych. Stosowanie ograniczników warystorowych o prądzie mniejszym niż 12,5 kA zmniejsza skuteczność ochrony odgromowej instalacji fotowoltaicznej. Dodatkowe zabezpieczenie instalacji polega również na zastosowaniu wyłącznika nadprądowego o charakterystyce B lub C albo rozłącznika topikowego oraz wyłącznika różnicowoprądowego.

W zależności od długości przewodów połączeniowych na drodze moduł fotowoltaiczny oraz falownik należy zastosować jeden lub dwa ograniczniki typu T1+T2 lub T2 w pobliżu falownika oraz fotoprzetwornika.

LITERATURA

- [1] Dyrektywa 2014/30/UE – Kompatybilność elektromagnetyczna.
- [2] Haberlin H., Photovoltaics. System Design and Practice, Wiley, 2012.
- [3] Kałat W., Modelowanie znormalizowanych udarów prądowych i napięciowych przy użyciu funkcji jednowykładniczej, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 85, NR 4/2009.
- [4] Klugemann - Radziemska E., Fotowoltaika w teorii i praktyce, Wydawnictwo BTC, Legionowo, 2010.
- [5] Łoboda Marek, Aktualizacja danych o częstości doziemnych wyładowań atmosferycznych w Polsce do oceny ryzyka zagrożenia piorunowego obiektów budowlanych, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej 289, Elektrotechnika 33, 2013, pp. 159–169
- [6] Szczerbowski R., Instalacje fotowoltaiczne - aspekty techniczno-ekonomiczne, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 90, NR 10/2014.
- [7] PN-EN 61000-4-5:2014-10 – Kompatybilność elektromagnetyczna – Część 4–2: Metody badań i pomiarów. Badania odporności na udary.
- [8] PN-EN 62305-1:2008, Ochrona odgromowa – Część 1: Wymagania ogólne.
- [9] PN-EN 62305-4:2009, Ochrona odgromowa – Część 4: Urządzenia elektryczne i elektroniczne w obiektach budowlanych.
- [10] <http://www.instsani.pl/513/parametry-pracy-paneli-pv>.

THE IMMUNITY OF THE PHOTOVOLTAIC INSTALLATION TO ELECTROMAGNETIC SURGE DISTURBANCES

The work analyzes the correctness of the photovoltaic system operation with a nominal electrical power of 3500 W, consisting of 14 solar modules and a power electronics transducer in the form of a single-phase voltage inverter equipped with a maximum

power point tracking system, in the case of a surge electromagnetic interference. The voltage surge with the parameters 1.2/50 μ s, simulating a lightning discharge, was introduced into the system from the power grid side. For the purpose of computer imaging of the disturbing signal, the recommendations included in the PN-EN 61000-4-5 standard "Surge Resistance Test" were used. Significant changes in the voltage value on the DC side, related to the system of electric power generation by the solar system, and AC current in the DC/AC converter system have been shown.

(Received: 12.02.2019, revised: 13.03.2019)

