

Piotr STRZELCZYK¹
Paweł GIL²

WPLYW ZAĆMIENIA SŁOŃCA NA PRODUKCJĘ ENERGII ELEKTRYCZNEJ PRZEZ SYSTEM FOTOWOLTAICZNY

W pracy zaprezentowano wpływ zaćmienia słonecznego z dnia 20.03.2015 na zmiany mocy oraz energii elektrycznej produkowanej przez system fotowoltaiczny w porównaniu do bezchmurnego dnia 17.03.2015 oraz do dnia 20.03.2014. System fotowoltaiczny wykorzystuje moduły z krzemu monokrystalicznego oraz inwerter solarny Soladin 600 podłączony do uczelnianej sieci elektrycznej. Moc szczytowa systemu wynosi 330W. Instalacja pracuje w Rzeszowie ($\varphi=50^{\circ}02'N$ $\lambda=22^{\circ}17'E$). Moduły fotowoltaiczne zamontowane są na ramie pod stałym kątem 30° względem horyzontu (poziomu). Układ pomiarowy systemu fotowoltaicznego obejmował pomiar napięcia oraz prądu DC przed inwerterem, napięcia, prądu AC, mocy oraz częstotliwości na wyjściu inwertera. Zaprezentowano również pomiary całkowitego i bezpośredniego natężenia promieniowania słonecznego oraz promieniowanie rozproszone w dniu zaćmienia Słońca 20.03.2015 oraz w dniach 17.03.2015 i 20.03.2014 padające na płaszczyznę poziomą. Wszystkie parametry były mierzone co 10 sekund i uśredniane do 1 minutowych wartości. Dokonano również obserwacji wizualnych tarczy Słońca przy wykorzystaniu aparatu fotograficznego DSLR SONY A-57 oraz teleskopu typu Maksutow-Cassegrain o ogniskowej $f=1500\text{mm}$, oraz aperturze 127mm. Światłosiła teleskopu wynosi $F 1:11,8$. Zestaw zamontowany był na montażu paralaktycznym HEQ-5 SynScan. Wyniki badań ukazują, że podczas maksimum zaćmienia Słońca w Rzeszowie, które wystąpiło o godzinie 10:56 chwilowa moc systemu fotowoltaicznego zmalała o 60%, natomiast dobowa energia elektryczna zmalała o -13,4% w stosunku do niezachmurzonego dnia.

Słowa kluczowe: zaćmienie Słońca, system fotowoltaiczny, promieniowanie całkowite, wpływ zaćmienia na zmianę natężenia promieniowania, produkcja energii elektrycznej

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Piotr Strzelczyk, Zakład Termodynamiki i Mechaniki Płynów, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów; e-mail: piotstrz@prz.edu.pl, tel: 17 865 1608

² Paweł Gil, Zakład Termodynamiki i Mechaniki Płynów, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów

1. Wstęp

Zaćmienie Słońca jest to zjawisko astronomiczne powstające, gdy Księżyc znajdzie się pomiędzy Słońcem a Ziemią i tym samym przysłoni światło Słoneczne. Zjawisko to występuje, co najmniej dwa razy w roku na kuli ziemskiej.

Energetyka konwencjonalna, produkująca energię elektryczną opartą na paliwach kopalnych jest niezależna od zaćmienia Słońca, natomiast energetyka, w której dominującą rolę stanowią systemy fotowoltaiczne podczas zaćmienia Słońca doznaje znaczącego spadku generowanej mocy elektrycznej.

W 2015 roku w Europie systemy fotowoltaiczne posiadały moc szczytową około 89GW [1], natomiast moc systemów fotowoltaicznych zainstalowana w Polsce do marca 2015r. szacowana była na ok. 7 MW [2].

Systemy fotowoltaiczne bezpośrednio przetwarzają światło słoneczne na energię elektryczną wykorzystując zjawisko fotowoltaiczne [3][4]. Ogniwo fotowoltaiczne wytwarza prąd elektryczny bez żadnych procesów mechanicznych lub chemicznych, bez ubytków i zużycia. Systemy fotowoltaiczne są bezgłośnie, nie wytwarzają zanieczyszczeń w czasie eksploatacji oraz są praktycznie bezobsługowe, dlatego stają się konkurencyjne dla innych źródeł energii. Otrzymywany w ogniwach fotowoltaicznych prąd stały jest za pośrednictwem inwerterów solarnych przekształcany w prąd przemienny o parametrach sieci odbiorczej. Wyprodukowany prąd przemienny może być wykorzystywany, jako źródło zasilania w miejscu zamontowania modułów fotowoltaicznych bądź dostarczany do sieci elektroenergetycznej.

Oprócz pomiarów prowadzonych w Politechnice Rzeszowskiej wpływ zjawiska zaćmienia Słońca z dnia 20.03.2015 na produkcję energii elektrycznej badany był na Wydziale Energetyki i Paliw AGH w Krakowie. Dla Krakowa zaćmienie trwało pomiędzy godz. 9:44 a 12:04, maksimum osiągając o godz. 10:53. Całkowite natężenie promieniowania słonecznego w tym momencie wyniosło 214 W/m^2 natomiast wartość teoretyczna dla tej lokalizacji powinna wynosić 600 W/m^2 . Spowodowało to zatem jednostkowy spadek mocy instalacji fotowoltaicznej z przewidywanych 3,3kW do wartości 1,12kW (66%) [5], przy maksymalnym przesłonięciu tarczy słonecznej 62,8% [6]

Celem prowadzonych badań jest określenie wpływu zaćmienia Słońca na redukcję mocy oraz energii elektrycznej produkowanej przez system fotowoltaiczny.

2. Stanowiska pomiarowe

W celu oceny jakościowej i ilościowej zaćmienia Słońca wykorzystano dane pomiarowe z istniejącego systemu fotowoltaicznego, z czujników promieniowania słonecznego oraz dokonano obserwacji wizualnych utrwalonych na fotografiach.

2.1. Stanowisko do pomiarów właściwości promieniowania słonecznego

Laboratorium energii słonecznej Zakładu Termodynamiki i Mechaniki Płynów Politechniki Rzeszowskiej wyposażone jest w system śledzenia Słońca SOLYS 2, na którym są zamontowane dwa pyranometry, pyrgeometr oraz pyrliometr (rys. 1).

Pierwszy pyranometr Kipp & Zonen CMP 22 służy do pomiaru całkowitego natężenia promieniowania słonecznego na powierzchni poziomej natomiast drugi pyranometr Kipp & Zonen CMP22 zacieniany przez kulkę systemu śledzenia Słońca do pomiaru promieniowania rozproszonego na powierzchni poziomej. Do pomiaru natężenia promieniowania długofalowego na powierzchni poziomej służy pyrgeometr Kipp & Zonen CGR4. Promieniowanie słoneczne bezpośrednie padające na powierzchnię prostopadłą do kierunku propagacji promieniowania zarejestrowano przy wykorzystaniu pyrliometru Kipp & Zonen CHP1.

Wymienione czujniki promieniowania są podłączone do multimetru Keithley 2002 dokonującego pomiaru, co 10 sekund i uśredniającego do wartości minutowych. Pomiaru minutowe są zapisywane w pliku tekstowym.



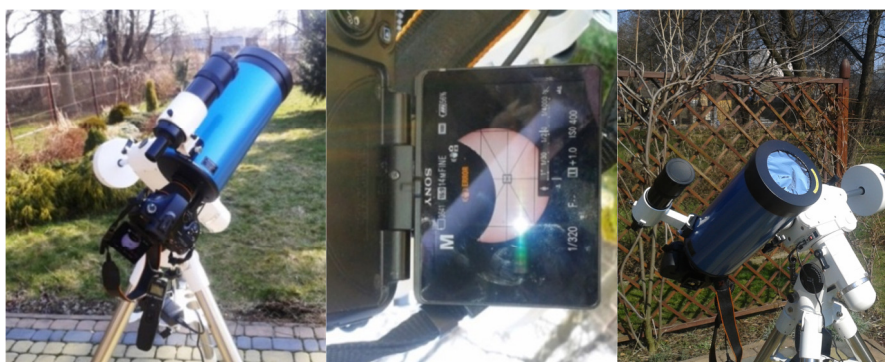
Rys. 1. Układ śledzenia Słońca z zamontowanymi czujnikami promieniowania całkowitego, bezpośredniego, rozproszonego oraz promieniowania cieplnego atmosfery

Fig. 1. The Sun tracking system with mounted radiometers designed for measuring the irradiance on a plane surface, normal incidence direct solar radiation, scattered radiation and for atmospheric IR (infrared) radiation measurement

2.2. Obserwacja wizualna

Obserwację przebiegu zaćmienia Słońca zarejestrowano na serii zdjęć tarczy Słońca przy wykorzystaniu aparatu fotograficznego DSLR SONY A-57 oraz teleskopu typu Maksutow-Cassegrain o ogniskowej $f=1500\text{mm}$, oraz aperturze 127mm . Światłosiła teleskopu wynosi $F 1:11,8$. Zestaw zamontowany był na montażu paralaktycznym HEQ-5 SynScan. Fotografowano w ognisku głównym teleskopu (rys. 2).

Zastosowano filtr fotograficzny obiektywowy do obserwacji Słońca w postaci aluminiowanej folii mylarowej Baader Planetarium ND 3,5 natomiast w wyciągu okularowym, do którego podwieszono aparat fotograficzny, zainstalowano 1,25" filtr Baader Planetarium: IR/UV-Cut. Miało to na celu usunięcie z widma składowej ultrafioletowej i podczerwonej, mogących zaświecić matrycę. Zdjęcia wykonano w Rzeszowie: $\varphi=50^{\circ}02'09.3''N$, $\lambda=21^{\circ}59'11.5''E$.



Rys. 2. Obserwacja wizualna zaćmienia Słońca: teleskop typu Maksutow-Cassegrain z aparatem fotograficznym DSLR SONY A-57 na montażu paralaktycznym

Fig. 2. Visual observation of the solar eclipse: telescope type Maksutow-Cassegrain camera Sony DSLR A-57 on an equatorial mount

2.3. System fotowoltaiczny

System fotowoltaiczny z modułami monokrystalicznymi zainstalowany na pomoście badawczym Zakładu Termodynamiki i Mechaniki Płynów Politechniki Rzeszowskiej (rys. 3).



Rys. 3. System fotowoltaiczny Zakładu Termodynamiki i Mechaniki Płynów

Fig. 3. Photovoltaic system of the Department of Thermodynamics and Fluid Mechanics

System składa się z trzech modułów fotowoltaicznych wykonanych z krzemu monokrystalicznego oraz inwertera solarnego SOLADIN 600. System dostarcza energię elektryczną do uczelnianej sieci elektrycznej a jego łączna moc szczytowa wynosi 330W [3].

Moduły fotowoltaiczne zamontowane są na ramie pod stałym kątem 30° względem horyzontu (poziomu) oraz odchylone w kierunku zachodnim o 20°. Układ pomiarowy systemu fotowoltaicznego obejmował pomiar napięcia oraz prądu DC przed inwerterem, napięcia, prądu AC, mocy oraz częstotliwości na wyjściu inwertera. Wszystkie parametry były mierzone, co 10 sekund i uśredniane do 1 minutowych wartości.

3. Obliczenia

W celu oceny ilościowej zaćmienia Słońca na system fotowoltaiczny zastosowano następujące wskaźniki:

Produkcja energii elektrycznej E_{AC} oddanej do sieci energetycznej przez system fotowoltaiczny o mocy P_{AC} od wschodu do zachodu Słońca:

$$E_{AC} = \int P_{AC} \cdot dt [kWh] \quad (1)$$

Nasłonecznienie E_{sun} na płaszczyznę poziomą:

$$E_{sun} = \int G \cdot dt [kWh/m^2] \quad (2)$$

Promieniowanie słoneczne docierające do płaszczyzny poziomej ma w ogólnym przypadku trzy składowe [7]:

$$G = G_d + G_b \quad (3)$$

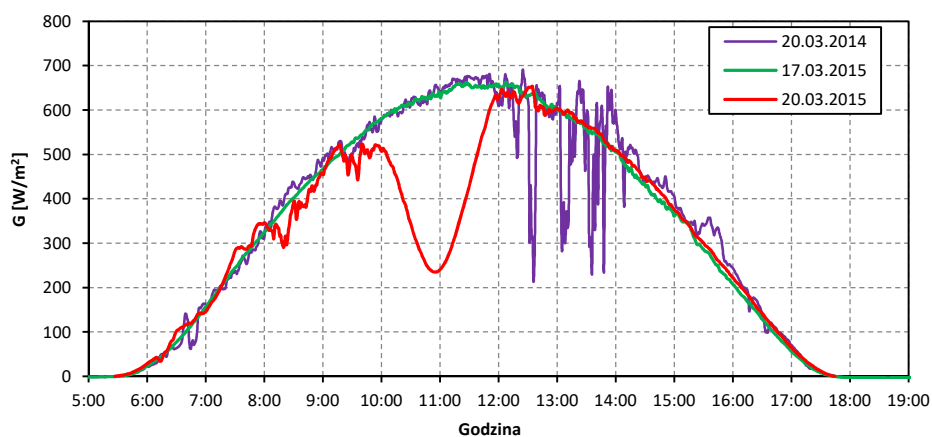
gdzie: promieniowanie całkowite G , jest sumą promieniowania bezpośredniego G_b (dochodzącego z widocznej tarczy słonecznej) i rozproszonego G_d rozpraszane przez chmury, cząstki pyłu i aerozoli zawieszonych w powietrzu.

4. Wyniki pomiarów

Na rysunku 4 zaprezentowano zmienność całkowitego natężenia promieniowania Słonecznego G padającego na powierzchnie poziomą dnia 20.03.2014, 17.03.2015 oraz 20.03.2015 w Rzeszowie. Maksymalna wartość całkowitego natężenia promieniowania Słonecznego w dniu 17.03.2015 wynosiła $G=662 [W/m^2]$, natomiast w dniu 20.03.2015 $G=645 [W/m^2]$.

Przebieg jakościowy i ilościowy całkowitego natężenia promieniowania Słonecznego (z wyłączeniem zaćmienia słonecznego) jest bardzo podobny w dniach 20.03.2015 17.03.2015 oraz 20.03.2015, z tym, że dnia 20.03.2014 po południu zarejestrowano małe zachmurzenie. Według zmierzonych danych oraz

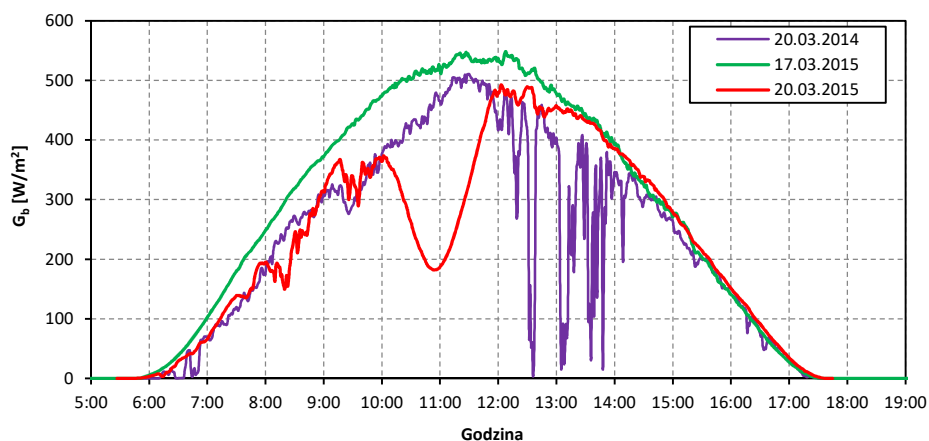
z symulacji zaćmienia programu „Stellarium” wynika, że zaćmienie Słońca w Rzeszowie rozpoczęło się o godzinie 09:46 osiągnęło maksimum o godzinie 10:56 i zakończyło się o godzinie 12:06 (rys. 8).



Rys. 4. Dobowa zmienność całkowitego natężenia promieniowania Słonecznego G padającego na powierzchnię poziomą dnia 20.03.2014, 17.03.2015 oraz 20.03.2015 w Rzeszowie

Fig. 4. Daily variation of total solar irradiance G incident on a horizontal surface on 03.20.2014, 03.17.2015 and 03.20.2015 in Rzeszow

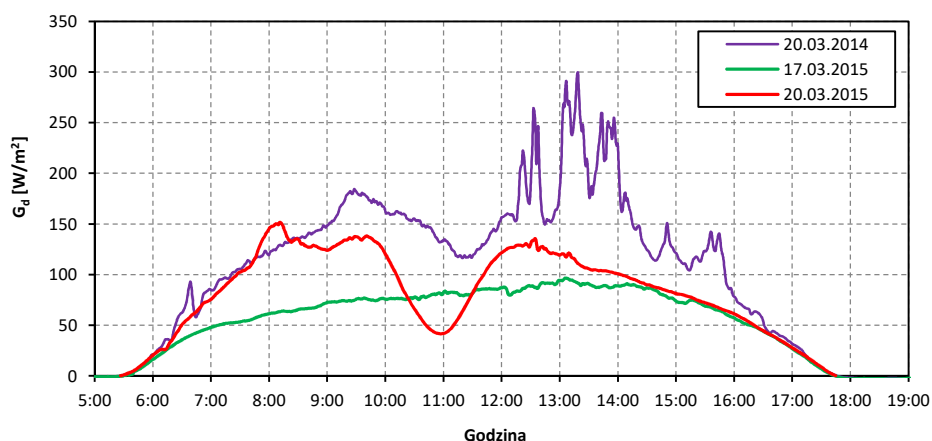
Na rysunku 5 przedstawiono dobową zmienność bezpośredniego natężenia promieniowania Słonecznego G_b padającego na powierzchnię poziomą dnia 20.03.2014, 17.03.2015 oraz 20.03.2015 w Rzeszowie.



Rys. 5. Dobowa zmienność bezpośredniego natężenia promieniowania Słonecznego G_b padającego na powierzchnię poziomą dnia 20.03.2014, 17.03.2015 oraz 20.03.2015 w Rzeszowie

Fig. 5. Daily variability of direct solar radiation incident on the horizontal surfaces G_b on 03.20.2014, 03.17.2015 and 03.20.2015 in Rzeszow

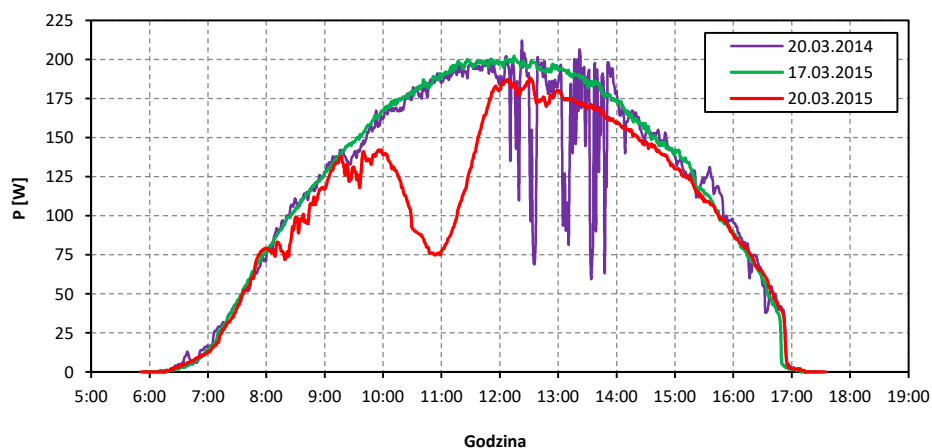
Na rysunku 6 przedstawiono dobową zmienność promieniowania rozproszonego G_d padającego na powierzchnie poziomą dnia 17.03.2015 oraz 20.03.2015 w Rzeszowie. Widać, że wzrostowi udziału promieniowania rozproszonego przez chmury i aerozole towarzyszy spadek udziału promieniowania bezpośredniego.



Rys. 6. Dobowa zmienność promieniowania rozproszonego G_d padającego na powierzchnie poziomą dnia 20.03.2014, 17.03.2015 oraz 20.03.2015 w Rzeszowie

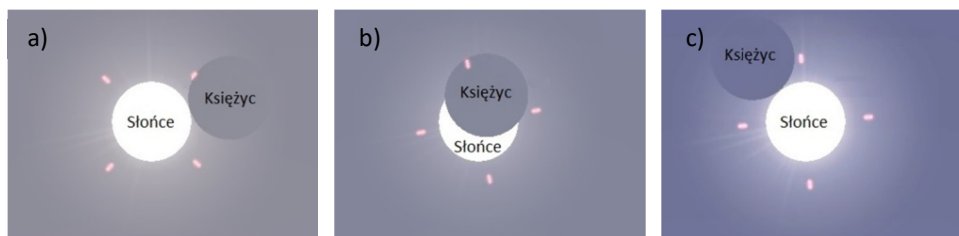
Fig. 6. Daily variation of scattered radiation incident on a horizontal surface G_d 03.20.2014, 17.03.2015 and 03.20.2015 in Rzeszow

Na rysunku 7 zaprezentowano dobową zmienność mocy elektrycznej P oddawanej przez system fotowoltaiczny do sieci w rozpatrywanych dniach.



Rys. 7. Dobowa zmienność mocy elektrycznej P oddawanej przez system fotowoltaiczny do sieci dnia 20.03.2014, 17.03.2015 oraz 20.03.2015 w Rzeszowie

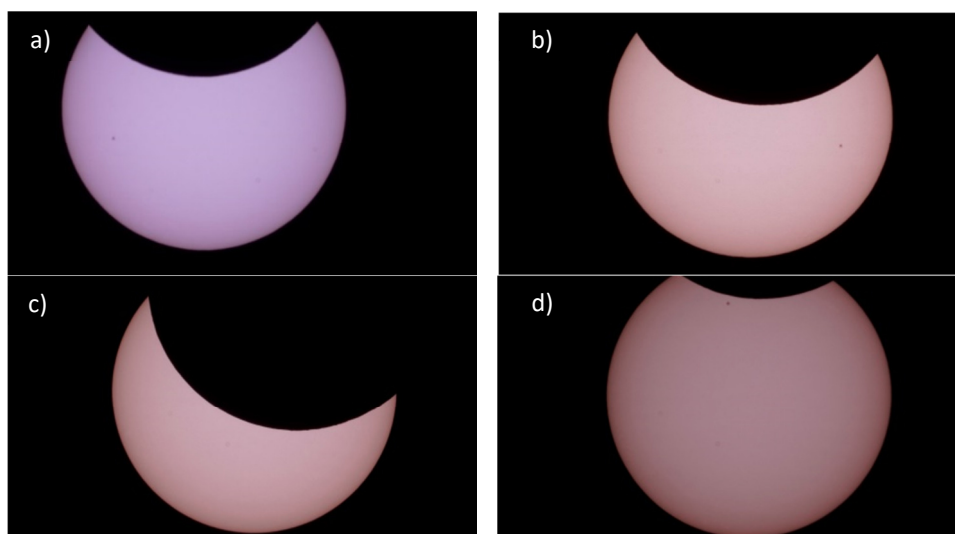
Fig. 7. Daily variability of electrical power P output by the photovoltaic system to the grid 03.20.2014, 17.03.2015 and 03.20.2015 in Rzeszow



Rys. 8. Symulacja zaćmienia Słońca z dnia 20.03.2015 w Rzeszowie, program Stellarium: a) początek zaćmienia 09:46, b) zaćmienie maksymalne 10:56, c) koniec zaćmienia 12:06

Fig. 8. Simulation of the solar eclipse of 20.03.2015 in Rzeszow, the Stellarium program: a) beginning of the eclipse 9:46, b) the maximum eclipse 10:56, c) the end of the eclipse 12:06

Na rys. 9 zaprezentowano zdjęcia z zaćmienia Słońca w Rzeszowie dla czterech chwil czasowych. Prezentowana orientacja przestrzenna materiału przedstawionego na zdjęciach odbiega nieco od uwidocznionego na symulacji z programu Stellarium, z uwagi na fakt, że ruch aparatu odbywał się w równikowym układzie współrzędnych [8], co wynika z zastosowania montażu paralaktycznego, natomiast symulacja z rys. 8 pokazuje przebieg zjawiska w układzie azymutalnym, topocentrycznym [8].



Rys. 9. Zdjęcia zaćmienia Słońca z dnia 20.03.2015 w Rzeszowie, a) godzina 10:17, b) godzina 10:22, c) godzina 11:11, d) godzina 11:53

Fig. 9 Photos of solar eclipse of 03.20.2015 in Rzeszow, a) time 10:17 b) time 10:22, c) time 11:11 d) time 11:53

5. Podsumowanie

Zaćmienie Słońca powoduje znaczący spadek mocy elektrycznej produkowanej przez system fotowoltaiczny.

Dla rozpatrywanych dni odczytano wartości całkowitego natężenia promieniowania słonecznego padającego na powierzchnie poziomą G , oraz moc elektryczną netto oddawaną do sieci elektrycznej P_{AC} , następnie zgodnie z wzorem (1) obliczono dzienną energię elektryczną oddaną do sieci oraz zgodnie z wzorem (2) dziennie nasłonecznienie. Wyniki zaprezentowano w tabeli 1.

Tabela 1. Porównanie parametrów elektrycznych i energetycznych podczas zaćmienia Słońca oraz w bezchmurny dzień

Table 1. Comparison of electrical parameters and energy during an eclipse of the sun and cloudless day

| | 20.03.2014 | 17.03.2014 | 20.03.2015 |
|-------------------------------|------------|------------|---------------|
| $P_{AC 10:56}$ [W] | 184 | 184 | 75 (-59,2%) |
| E_{AC} [kWh/dzień] | 1,33 | 1,35 | 1,16 (-13,4%) |
| $G_{ 10:56}$ [W/m^2] | 651 | 633 | 235 (-63,3%) |
| E_{SUN} [$kWh/m^2/dzień$] | 4,58 | 4,57 | 4,10 (-10,4%) |

Podczas maksymalnego zaćmienia Słońca w dniu 20.03.2015 moc systemu fotowoltaicznego zmalała o 59,2% w stosunku bezchmurnego dnia 17.03.2015. Ze względu na zaćmienie Słońca dzienna wyprodukowana energia elektryczna była niższa o 13,4%. Maksymalne przysłonięcie tarczy Słońca wynosiło 60,6%. Mniejszy spadek produkcji energii niż wynikałoby to z przysłonięcia tarczy słonecznej jest najprawdopodobniej skutkiem oddziaływania promieniowania rozproszonego. Porównując wyniki z dnia 20.03.2014r. i 17.03.2015 widzimy całkowitą zbieżność pomiędzy wynikami uzyskanymi w tych dniach. Wynika to stąd, że różnica w azymucie i wysokości Słońca o godzinie 10:56 w dniach 17 i 20 marca była nieznaczna i wynosiła odpowiednio $+0^{\circ}02'$ i $+1^{\circ}12'$. Tak więc dane z dnia 17 marca 2015r. mogą być wykorzystane dla celów porównawczych z dniem zaćmienia.

Literatura

- [1] Anon.: Report: Solar eclipse march 2015. The Successful Stress Test of Europe's Power Grid – more ahead. Policy Brief, 15 July 2015.
- [2] Anon.: Report: Solar eclipse 2015: Impact analysis European Network of Transmission System Operators for Electricity, February 2015.
- [3] Gil P., Szewczyk M.: Roczne badania eksploatacyjne parametrów monokrystalicznych modułów fotowoltaicznych w Rzeszowie. INSTAL nr 4, 2015, s. 22-27.
- [4] Gil P.: Roczne wyniki pomiaru sprawności amorficznych kolektorów fotowoltaicznych w Rzeszowie. Rynek Energii nr 4, 2015 s. 75-83.
- [5] <http://portalkomunalny.pl/> RWE AGH Solar Lab {dostęp 01.02.2015 r.}.

- [6] Substyk M. Zaćmienie Słońca, Urania Postępy Astronomii, s. 118-119, 2015.
- [7] Pluta Z., Podstawy teoretyczne fototermicznej konwersji energii słonecznej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
- [8] Mietelski J.: Astronomia w geografii, WN-PWN, Warszawa 2009.

THE INFLUENCE OF SOLAR ECLIPSE ON THE PRODUCTION OF ELECTRICITY BY PHOTOVOLTAIC SYSTEM

Summary

The paper presents the impact of solar eclipse of 20.03.2015 on power and electricity produced changes by the PV system compared to the cloudless day 03.17.2015 and on 20.03.2014. The system uses photovoltaic monocrystalline silicon modules and solar inverter Soladin 600 connected to the electricity grid. Peak power system is 330W. Installation works in Rzeszow ($\varphi = 50^{\circ}02'N$ $\lambda = 22^{\circ}17'E$). PV modules are mounted on the frame at a constant angle of 30° relative to the horizon. The measuring system comprised the measurement of voltage and DC current before an inverter, voltage, AC current, power and frequency at the output of the inverter. Also presented measurements of total and direct solar radiation and the scattered radiation in the day of a solar eclipse 03.20.2015 and on 03.17.2015 and 20.03.2014 falling on a horizontal plane. All parameters were measured every 10 seconds and averaged to 1 minute values. Also made visual observations of the sun using a camera Sony DSLR A-57 and Maksutov-Cassegrain telescope with a focal length $f = 1500\text{mm}$, 127mm aperture. Maximum aperture telescope is $F 1: 11.8$. Set was mounted on an equatorial mount HEQ-5 SynScan. The results show that the maximum eclipse in Rzeszow, which occurred at 10:56 instantaneous power photovoltaic system decreased by 60%, while the daily electricity decreased by -13.4% compared to cloudless day.

Keywords: solar eclipse, a photovoltaic system, total solar radiation, the effect of the eclipse to change the intensity of radiation, electrical energy production

Przesłano do redakcji: 15.02.2016 r.

Przyjęto do druku: 31.03.2017 r.