

Artur BUGAŁA\*  
Grażyna FRYDRYCHOWICZ-JASTRZĘBSKA\*

## BILANS ENERGETYCZNY UKŁADÓW NADAŻNYCH W FOTOWOLTAICE DLA LOKALNYCH WARUNKÓW MIEJSKICH- CZEŚĆ II

W pracy przeprowadzono rozważania, dotyczące produkcji energii elektrycznej z konwersji fotowoltaicznej w przypadku stacjonarnego i nadążnego umiejscowienia modułów tej samej mocy i technologii produkcji. Na podstawie wyników pomiarów dokonano oszacowania rocznej produkcji energii elektrycznej dla obu konfiguracji. Z wykorzystaniem pomiarów własnych pochodzących z dobowego monitoringu pracy systemu fotowoltaicznego porównano dokładność wyników analitycznych z wartościami rzeczywiście zmierzonymi. Przedstawiono zależność opisującą spodziewaną wielkość produkcji energii elektrycznej w układzie nadążnym dwuosiowym, na podstawie nasłonecznienia na płaszczyźnie horyzontalnej i zmiennopozycyjnej.

SŁOWA KLUCZOWE: zysk energii, układ nadążny, konwersja fotowoltaiczna, nasłonecznienie

### 1. WSTĘP

Wielkość energii elektrycznej produkowanej przez układ fotowoltaiczny jest funkcją wielu parametrów, między innymi miesięcznego nasłonecznienia, liczby dni słonecznych w ciągu roku, technologii produkcji zastosowanych modułów fotowoltaicznych oraz ich parametrów elektrycznych, jak również ich lokalizacji względem stron świata [1].

W celu wyznaczenia ilości energii elektrycznej możliwej do wyprodukowania przez układy składowe należy uwzględnić dane nasłonecznienia. Wyznaczenie tej wartości dla układu zainstalowanego stacjonarnie jest możliwe z uwzględnieniem współczynników korekcyjnych miesięcznych sum nasłonecznienia dla płaszczyzny horyzontalnej [2]. Są to jednak współczynniki uogólnione, 10- i 15-stopniowe. Zależność sprawności modułu od jego powierzchni jak również nasłonecznienia przedstawiono w następujący sposób [3]:

$$E_{t, fixed} = ET_{\beta, \gamma}(37^\circ, 180^\circ) \cdot S_m \cdot \eta \quad (1)$$

Sprawność modułu fotowoltaicznego dla gęstości mocy promieniowania słonecznego w warunkach standardowych [4]:

---

\* Politechnika Poznańska.

$$\eta = \frac{P_m}{S_m \cdot E_{STC}} \quad (2)$$

Podstawiając zależność (2) do (1) otrzymano wartość energii [kWh]:

$$E_{t, fixed} = \frac{ET_{\beta, \gamma}(37^\circ, 180^\circ) \cdot S_m \cdot P_m}{S_m \cdot E_{STC}} \quad (3)$$

Wartość energii elektrycznej możliwej do wyprodukowania z uwzględnieniem poziomu strat:

$$E_{rz, fixed} = \frac{ET_{\beta, \gamma}(37^\circ, 180^\circ) \cdot S_m \cdot P_m}{S_m \cdot E_{STC}} \cdot (1 - P_s) \quad (4)$$

$$E_{rz, fixed} = \frac{ET_{\beta, \gamma}(37^\circ, 180^\circ) \cdot P_m}{E_{STC}} \cdot (1 - P_s) \quad (5)$$

## 2. STRATY W UKŁADZIE FOTOWOLTAICZNYM

Straty występujące w układzie fotowoltaicznym mogą mieć różną naturę. Ważnym aspektem jest dobór odpowiedniej jakości przewodów i ich przekrojów, co wpływa na wielkość strat. Przekrój (w mm<sup>2</sup>) można wyznaczyć korzystając z zależności [3, 5]:

$$S = \frac{P \cdot I}{k \cdot 0,01 \cdot U^2} \quad (6)$$

Wyznaczona wartość przekroju przewodów na podstawie mocy układu P, długości obwodu I, napięcia systemu U oraz przewodności właściwej miedzi k wynosi 0,83 mm<sup>2</sup>. Na podstawie znormalizowanego szeregu przekrojów do instalacji PV wybrano przewód 2,5 mm<sup>2</sup>. Procentowe straty mocy (PL%) opisano za pomocą zależności:

$$PL\% = \frac{P \cdot I}{k \cdot S \cdot U^2} \cdot 100\% \quad (7)$$

Wyznaczona wartość strat mocy, dla zadanych parametrów, wynosi 0,33 %. Na podstawie danych katalogowych modułu fotowoltaicznego określono jego straty na skutek wzrostu temperatury na poziomie 3 %. Sprawność falownika firmy Enecsys model SMI-240W-60-UL, na podstawie danych katalogowych, wynosi 93,5 %. Poziom strat do dalszych rozważań przyjęto 6,5 %.

Poziom strat wywołanych skutkami zacienienia ogniów oraz zanieczyszczeniem, na podstawie danych literaturowych, wynosi 1 %-3 %. Ze względu na znaczną wysokość n.p.m. miejsca instalacji, wpływ obiektów otoczenia na zacienienie ograniczono do minimum. Układ jest również regularnie czyszczony. Przyjęta wartość strat wynosi 1 %.

Dla większej powierzchni generatora PV, ze względu na różnorodność modułów fotowoltaicznych w instalacji, należałoby uwzględnić również straty

wywołane niedopasowaniem prądowym modułów. Dla sprawnych modułów nie przekraczają one 1 %.

Całkowity poziom strat w układzie wynosi 10,83 %.

### 3. PRODUKCJA ENERGII ELEKTRYCZNEJ - OBLICZENIA ANALITYCZNE A WARTOŚCI POMIAROWE

W celu wyznaczenia rocznej produkcji energii elektrycznej przez układ stacjonarny o kącie pochylenia  $\beta \neq 0$  płaszczyzny odbiornika do podłoża należy wyznaczyć wartość nasłonecznienia na podstawie jego modyfikacji dla płaszczyzny horyzontalnej. W tym celu wprowadzono współczynniki korekcyjne. Ich wartości zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Współczynniki korekcyjne nasłonecznienia  $k$  uzyskane na podstawie pomiarów gęstości mocy promieniowania słonecznego w czasie dla płaszczyzny stacjonarnej ( $E_{fixed}$ ) i horyzontalnej ( $E_{hor}$ )

miesiąc	$E_{fixed}$	$E_{hor}$	$k$	$\bar{k}$	$\sigma$
-	Wh/m <sup>2</sup> /m-c		-	-	-
1	37139,89	33557,4	1,106757	1,13	0,03
2	55879,4	50390,4	1,108929		
3	101435,2	91573,6	1,10769		
4	111779	100392,5	1,11342		
5	168565	143902,3	1,171385		
6	23020,11	19421,5	1,18529		
7	189578,3	160458,9	1,181476		
8	172295,6	145980,9	1,180261		
9	75636,6	66340,6	1,140125		
10	97073,12	86623,5	1,120633		
11	25945,63	23397	1,10893		
12	26101	23883	1,092869		

Wartość rocznego nasłonecznienia dla płaszczyzny horyzontalnej, dla typowego roku meteorologicznego, wynosi 960,83 kWh/m<sup>2</sup>/rok. Dla instalacji stacjonarnej, na podstawie [6], roczna wartość nasłonecznienia, [kWh/m<sup>2</sup>/rok] wynosi:

$$ET_{\beta,\gamma}(37^\circ, 180^\circ) = E_{TH} \cdot 1,13 \quad (8)$$

$$ET_{\beta,\gamma}(37^\circ, 180^\circ) = 1085,7 \quad (9)$$

Postać współczynników dla zmiennego ustawienia przedstawiono w postaci:

$$k_i = \frac{E_{track,wt,i}}{\frac{E_{fixed,wt,i}}{L_{\beta,\gamma}}} \quad (10)$$

Dla ustawienia stacjonarnego  $\beta, \gamma$  odpowiednio  $37^\circ$ ,  $180^\circ$  równanie (10) przedstawiono następująco:

$$k_i = \frac{E_{track,wt,i}}{\frac{E_{fixed,wt,i}}{1,13}} \quad (11)$$

Wartość energii elektrycznej dla układu nadążnego z uwzględnieniem współczynników korekcyjnych:

$$E_{rz.track} = (E_{TH1} \cdot k_1 + E_{TH2} \cdot k_2 + E_{TH3} \cdot k_3 + E_{TH4} \cdot k_4 + E_{TH5} \cdot k_5 + E_{TH6} \cdot k_6 + E_{TH7} \cdot k_7 + E_{TH8} \cdot k_8 + E_{TH9} \cdot k_9 + E_{TH10} \cdot k_{10} + E_{TH11} \cdot k_{11} + E_{TH12} \cdot k_{12}) \cdot P_m \cdot (1 - P_s) \quad (12)$$

Po uwzględnieniu strat energii elektrycznej uzyskano:

$$E_{rz.track} = (E_{TH1} \cdot k_1 + E_{TH2} \cdot k_2 + E_{TH3} \cdot k_3 + E_{TH4} \cdot k_4 + E_{TH5} \cdot k_5 + E_{TH6} \cdot k_6 + E_{TH7} \cdot k_7 + E_{TH8} \cdot k_8 + E_{TH9} \cdot k_9 + E_{TH10} \cdot k_{10} + E_{TH11} \cdot k_{11} + E_{TH12} \cdot k_{12}) \cdot P_m \cdot (1 - \frac{1}{100}(PL\% + P_t\% + P_f\% + P_e\% + P_d\% + P_{cc\%})) \quad (13)$$

$$E_{rz.track} = [(E_{TH1} \cdot \frac{E_{track,wt1}}{E_{fixed,wt1}}) + (E_{TH2} \cdot \frac{E_{track,wt2}}{E_{fixed,wt2}}) + (E_{TH3} \cdot \frac{E_{track,wt3}}{E_{fixed,wt3}}) + (E_{TH4} \cdot \frac{E_{track,wt4}}{E_{fixed,wt4}}) + (E_{TH5} \cdot \frac{E_{track,wt5}}{E_{fixed,wt5}}) + (E_{TH6} \cdot \frac{E_{track,wt6}}{E_{fixed,wt6}}) + (E_{TH7} \cdot \frac{E_{track,wt7}}{E_{fixed,wt7}}) + (E_{TH8} \cdot \frac{E_{track,wt8}}{E_{fixed,wt8}}) + (E_{TH9} \cdot \frac{E_{track,wt9}}{E_{fixed,wt9}}) + (E_{TH10} \cdot \frac{E_{track,wt10}}{E_{fixed,wt10}}) + (E_{TH11} \cdot \frac{E_{track,wt11}}{E_{fixed,wt11}}) + (E_{TH12} \cdot \frac{E_{track,wt12}}{E_{fixed,wt12}})] \cdot P_m \cdot (1 - \frac{1}{100}(PL\% + P_t\% + P_f\% + P_e\% + P_d\% + P_{cc\%})) \quad (14)$$

$$E_{rz.track} = \left( \sum_{i=1}^{12} E_{THi} k_i \right) \cdot P_m \cdot (1 - P_s) \quad (15)$$

Sprawdzenia dokładności obliczeń, na podstawie przedstawionych zależności, dokonano dla okresu półrocznego. Ewentualne rozbieżności opisano współczynnikiem procentowym  $d_p$ .

Ilość energii elektrycznej [kWh], wyprodukowanej w okresie 15.06.2013 roku do 31.12.2013 roku, na podstawie danych nasłonecznienia dla typowego roku kalendarzowego, określono na podstawie:

$$E_{rz.fixed} = [1,13 \cdot (0,5 \cdot 149279 + 141631 + 116520 + 81621 + 45552 + 26381 + 18375)] \cdot P_m \cdot (1 - P_s) \quad (16)$$

Łączna wartość dla badanego okresu wynosi 106,79 kWh.

Ilość energii elektrycznej wyprodukowanej przez moduł PV zainstalowany stacjonarnie, w analogicznym czasie, na podstawie monitoringu:

$$E_{mon.,fixed} (37^\circ, 180^\circ) = 101,8 kWh \quad (17)$$

Procentowy współczynnik rozbieżności na drodze obliczeń analitycznych i pomiarów w warunkach rzeczywistych:

$$d_p = \frac{E_{rz.fixed}}{E_{mon.,fixed}} \cdot 100\% \quad (18)$$

Rozbieżność obliczeń modelowych i wartości rzeczywistych dla układu stacjonarnego wynosi 4,9 %.

Ilość energii elektrycznej wyprodukowanej w analizowanym przedziale czasu, na podstawie danych nasłonecznienia dla typowego roku meteorologicznego dla układu nadążnego:

$$E_{rz.track} = (97329,91 + 195025,89 + 153223,80 + 93047,94 + 51929,28 + 31129,58 + 22417,50) \cdot 0,210 \cdot (1 - 0,1084) \quad (19)$$

Łącznie uzyskano 120,6 kWh energii elektrycznej.

Ilość energii elektrycznej wyprodukowanej przez moduł PV zainstalowany nadążnie, na podstawie monitoringu odpowiednio:

$$E_{mon.,track} = 140,8 kWh \quad (20)$$

Zużycie energii na potrzeby własne sterowania  $E_u$  wynosi 22,40 kWh dla analizowanego okresu. Energię netto określono na podstawie zależności:

$$E_{netto} = E_{mon.,track} - E_u \quad (21)$$

Procentowy współczynnik rozbieżności wielkości energii elektrycznej na drodze obliczeń analitycznych i pomiarów w warunkach rzeczywistych:

$$d_p = \frac{E_{rz.track}}{E_{netto}} \cdot 100\% \quad (22)$$

Różnica oszacowania produkcji energii elektrycznej na podstawie obliczeń analitycznych i wartości rzeczywistych dla układu nadążnego wynosi 1,8 %.

Ilość energii elektrycznej wyprodukowanej przez układ stacjonarny w cyklu rocznym, na podstawie obliczeń analitycznych wynosi 203,28 kWh.

Ilość energii elektrycznej wyprodukowanej przez układ nadążny w tym samym okresie, na podstawie obliczeń analitycznych wynosi 248,9 kWh.

#### 4. PODSUMOWANIE

- Na podstawie pomiarów własnych prowadzonych w 24 godzinnym trybie ciągłym stwierdzono, że największa produkcja energii elektrycznej, zarówno w konfiguracji stacjonarnej jak i nadążnej, została zarejestrowana dla miesiąca sierpnia, mimo nieznacznie mniejszej wartości nasłonecznienia dla tego okresu. Wyjaśnienia tego zjawiska należałoby szukać w temperaturze pracy zainstalowanych modułów fotowoltaicznych. Jej wzrost powyżej 25°C powoduje spadek napięcia obwodu otwartego oraz wzrost prądu zwarcia [7]. Ze względu na dynamikę zmian obu parametrów elektrycznych wartość mocy elektrycznej ulega zmniejszeniu. Produkcja energii elektrycznej dla miesiąca sierpnia, dla układu nadążnego dwuosioowego i stacjonarnego, wynosi odpowiednio 35,88 kWh oraz 26,62 kWh. Zysk „brutto”, wynikający z zastosowania sterowania wynosi 35 %. Miesięczne zużycie energii, celem realizacji procesów sterowania dwóch siłowników wynosi 2,5 kWh. Ograniczenia tej wartości należy poszukiwać w optymalnym doborze czasu załączania siłowników. Zysk „netto”, uwzględniający straty sterowania, wynosi 26 %.
- Ważnym aspektem wpływającym na bilans energetyczny systemu PV jest dopasowanie mocy falownika do mocy maksymalnej modułów fotowoltaicznych. Należy również zapewnić odpowiednie warunki chłodzenia. Wzrost temperatury pracy powyżej temperatury dopuszczalnej może być przyczyną awarii falownika [8].
- Wykazano, że zaproponowana zależność, opisująca produkcję energii elektrycznej przez układ nadążny i układ stacjonarny, na podstawie znajomości miesięcznego nasłonecznienia, umożliwia z wystarczającą dokładnością określenie procentowego zysku wynikającego z orientowania w dwóch osiach położenia modułów PV. Brak w literaturze współczynników korekcyjnych umożliwiających przeliczenie wartości nasłonecznienia z płaszczyzny horyzontalnej do nadążnej sprawia, że należało dokonać całorocznego pomiaru rozkładu gęstości mocy promieniowania słonecznego dla obu płaszczyzn.

## LITERATURA

- [1] Jastrzębska G., Bugała A.: Comparison of the efficiency of solar modules operating with a two-axis follow-up system and with a fixed mount system, *Przegląd Elektrotechniczny*, 1, 2014, s. 63-65.
- [2] [www.solar-systems.pl/](http://www.solar-systems.pl/) (dostęp: 10.01.2014r.)
- [3] Szymański B.: Instalacje fotowoltaiczne, Globenergia, wydanie II, Kraków, 2013.
- [4] Jastrzębska G.: Ogniwia słoneczne. Budowa, technologia i zastosowanie, WKŁ, Warszawa, 2013.
- [5] <http://energia.nexun.pl/?p=768> (dostęp: 12.01.2014r.)
- [6] Jastrzębska G., Bugała A.: The influence of parameters of spatial orientation of a solar power receiver on energetic gain, *Poznan University of Technology ACADEMIC JOURNALS*, 2012, s. 181-188.
- [7] Yilmaz S., Yilmaz A., Gunes M., Ozcalik H.: Two-diode model performance analysis of photovoltaic panels, *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 7, 2013, s. 2890-2895.
- [8] Jastrzębska G., Bugała A.: Power generation by a photovoltaic installation during standard operation as well as malfunction of micro power inverters, *Elektronika-konstrukcje-technologie-zastosowania*, 9, 2013, s. 156-159.

### ENERGY BALANCE FOR TRACKING SYSTEMS IN PHOTOVOLTAICS FOR LOCAL URBAN CONDITIONS-PART II

Work presents considerations for the production of electricity from photovoltaic conversion in the case of stationary and tracking placement of modules of the same power and technology. Basing on the measurement results an estimation of annual electricity production for both configurations was carried out. Using own measurements from monitoring, accuracy of analytical results was compared with the values actually measured. Dependence of expected energy production on insolation on horizontal and tracking plane was shown.