

# Oversizing the Photovoltaic Generator Power Capacity in a Micro Photovoltaic Plant

## Author

Zbigniew Lubośny

## Keywords

photovoltaic micro installations, renewable energy, power generation

## Abstract

A significant part of photovoltaic micro installations in Poland is characterized by photovoltaic generator oversizing in relation to the inverter. The idea of oversizing, however, still raises doubts among some plant owners. In the paper, the energy yield of installation with an oversized and not oversized photovoltaic generator is presented on selected examples, showing the legitimacy of oversizing.

**DOI: 10.12736/issn.2330-3022.2020103**

Received by editor: 4.05.2020

Received in revised form 5.05.2020

Accepted: 10.05.2020

Published online: 27.07.2020

## 1. Introduction

The rated power capacity of a photovoltaic power plant (PV power plant) is defined by the rated power capacity of the inverter. This is the power that a solar plant can output to the power system. At the same time, it is the connection power, i.e. the power that the distribution grid operator considers as the rated power of the energy source. However, the power capacity of a photovoltaic (PV) generator is the sum of the rated power capacities of the PV panels.

In PV power plants designed to operate at latitudes corresponding to Poland, the PV generator is usually oversized in relation to the inverter [1, 2, 6]. The power capacity of the PV generator, i.e. the sum of the rated power capacities of the PV panels, is adopted at ca. 20% over the rated power capacity of the inverter. This oversizing is intended to increase the output (here defined by the inverter's rated power capacity) of the PV plant with a given rated power capacity.

Oversizing of this type is also used in other renewable energy sources (RES). For example, wind farms with a given rated power capacity (defined by the generator's rated power capacity) intended for operation in less windy areas, are equipped with larger wind turbines, i.e. turbines with a larger diameter of the wind wheel (blade lengths) than those designed for operation

in high-wind areas. Wind turbines of these power plants are therefore oversized relative to the generator (asynchronous or synchronous).

To justify the technical efficiency of oversizing, let's consider a PV micro plant with 1200 W rated power capacity, and one micro-inverter with 1200 W rated power<sup>1</sup> [3, 4] and a PV generator consisting of 4 panels with rated powers of: 300 W<sup>2</sup> (the option hereinafter indexed with 300) [5] and 400 W<sup>3</sup> (the option indexed with 400). The first option is a PV micro plant with a not oversized PV generator, i.e. rated power of the PV generator ( $4 \times 300 = 1200$  W) equals the rated power of the inverter. In the other option, rated power of the PV generator is  $4 \times 400 = 1600$  W, which is oversized by  $1600/1200 = 1.33$ , i.e. 33%. Current-voltage (*I-V*) and power-voltage (*P-V*) curves of both PV panels are shown in Fig. 1.

The following considerations and calculations results relate to a PV power plant with a single 1200 W microinverter. These results can be extrapolated to a PV power plant with rated power equal to a multiple of 1200 W, e.g. 2400 W, 3600 W, 4800 W by multiplying them by 2, 3, 4, etc., respectively.

For the two above-defined PV micro power plant options, the results of output power calculations are presented, assuming the following irradiance variations:

<sup>1</sup> It is a microinverter with four DC inputs, i.e. one that can be connected to four PV panels.

<sup>2</sup> In this field, the rated power of a solar panel is usually denominated as Wp, which is supposed to mean the peak power. The legitimacy of this denomination may be questionable, although in electrical engineering, in descriptions of high voltage devices, the index p is also used in relation to the peak voltage (kVp). The W power unit is used in the article.

<sup>3</sup> Manufacturer of the microinverter under consideration allows the connection of PV panels with 400 W rated power.

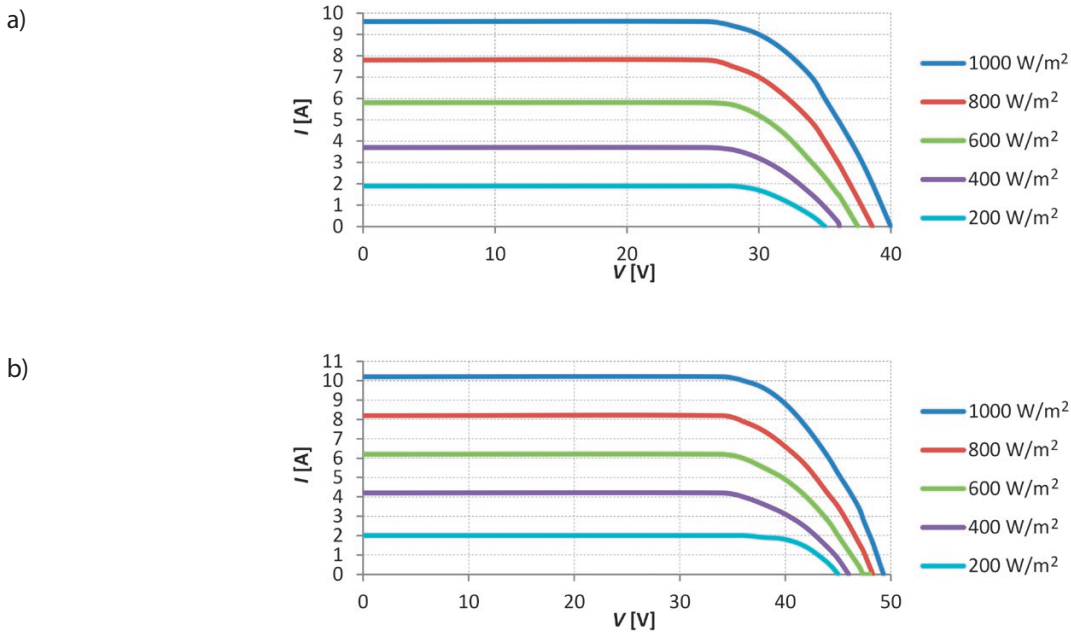


Fig. 1. I-V and P-V curves of the PV panels with rated powers: (a) 300 W, (b) 400 W

- irradiance<sup>4</sup> constant in time
- irradiance variable in time according to a curve the selected from those shown in Fig. 2.
- irradiance variable in time according to a curve the selected from those shown in Fig. 2., modified by randomly generated effect of the PV panels clouding (or shading).

The curves presented in Fig. 2 statistically correspond to the maximum irradiances. This means that in the periods shown in the figure (quarters of the year) irradiances below the curves should be expected. However, this does not mean that no irradiance higher than the curves is possible. Such a higher irradiance can be expected sporadically, i.e. for single minutes or hours in a year.

## 2. Irradiance constant in time

In the first considered case, irradiance stability over time was assumed, which is not realistic but has a didactic merit. Insolation duration of 1650 hours, i.e. Poland's average (1671 hours reported for Gdynia) is adopted.

Fig. 3 shows the power plant's output to the power system (assuming 100% inverter efficiency, which is a simplification) depending on the irradiance. For irradiance greater than 800 W/m<sup>2</sup>, the power output from a PV generator consisting of four 400 W panels, i.e. with total capacity of 1600 W (designation  $P_{400k}$ )<sup>5</sup>, is limited to the inverter's rated power, i.e. to 1200 W in a system with a PV generator consisting of four 300 W panels, i.e. with total capacity of 1200 W (designation  $P_{300}$ ), this power is not limited.

The limitation of the power output from the PV generator with 1600 W rated power suggests incomplete use of its capability

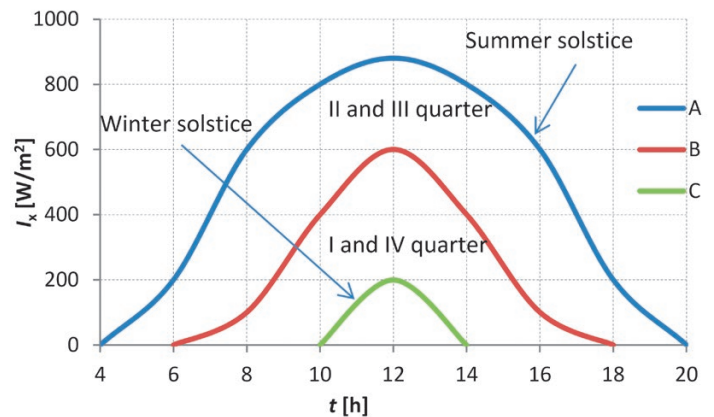


Fig. 2. Variation in solar irradiance at 52° north latitude [2]

and this is true. However, if we refer to a 1200 W micro power plant defined by the inverter's rated power, then a system with 400 W panels can generate more electricity (designation  $E_{400k}$ ) than a system with 300 W panels (designation  $E_{300}$ ), as illustrated in Fig. 4. This drawing should be read as follows: If the irradiance is constant over the assumed time (in this case for 1650 hours, which is the average insolation duration<sup>6</sup> in Poland) and equal to 600 W/m<sup>2</sup> for example, then the energy output of a power plant with four 400 W panels is 1500 kWh, and that of a power plant with four 300 W panels is lower and amounts to 1122 kWh. The advantage of the oversized power plant is visible in virtually entire irradiance range. The exception here is the point corresponding to 1000 W/m<sup>2</sup> irradiance. Such and close irradiances are extremely rare in Poland. It can therefore be

<sup>4</sup> Solar irradiance is the instantaneous power density of solar radiation falling in one second on a surface of one m<sup>2</sup>, perpendicular to the radiation direction.

<sup>5</sup> The letter k in the subscript of  $P_{400k}$  power and  $E_{400k}$  energy refers to a system in which the active power output of a PV micro plant with panels with 400 W rated power capacity is limited to the rated power capacity of the inverter, i.e. up to 1200 W.

<sup>6</sup> Insolation duration is the total time (in a day, month or year) when a specific place on the Earth's surface is exposed to radiation coming directly from the Sun.

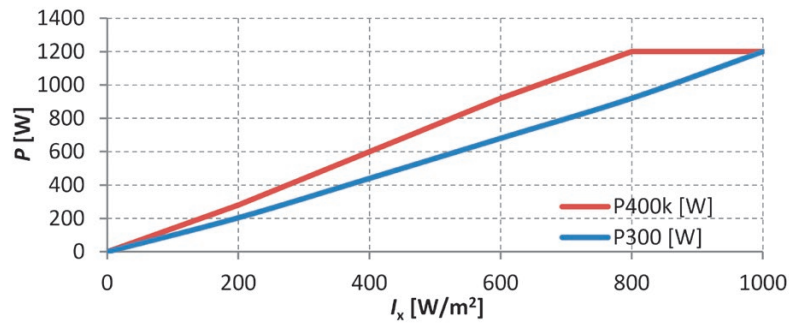


Fig. 3. The active power output of the PV micro plant with rated power capacity  $P_n = 1200$  W, as a function of constant irradiance  $I_x$

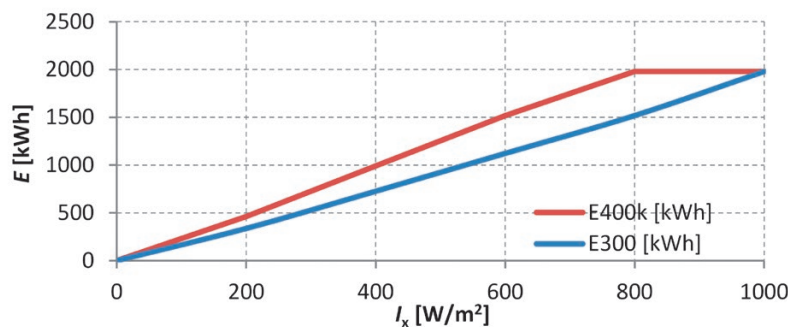


Fig. 4. Energy output of a PV micro plant with rated power capacity  $P_n = 1200$  W, as a function of constant irradiance  $I_x$ , for insolation duration 1650 h

said that a PV power plant with an oversized PV generator can produce more electricity in virtually every sunlight condition<sup>7</sup>. This effect is illustrated in Fig. 5, based on from Fig. 4, showing the surplus  $\Delta E$  of the oversized PV plant's energy output compared to the non-oversized one. It can be seen that at irradiance lower than  $800 \text{ W/m}^2$ , which is typical for most of the time in Poland, an oversized power plant can generate significantly more electricity than a non-oversized power plant.

### 3. Solar irradiance variable in time

It was assumed in this example that the irradiance variation is close to ideal, i.e. to that shown in Fig. 2. The assumed daily irradiance variation is shown in Fig. 6. The sunrise is assumed at 4 a.m. and the sunset at 8 p.m. This irradiance variation refers to a summer or spring day with a relatively high irradiance amplitude. Fig. 7a and Fig. 7b show the active power and electricity outputs of the micro plant under consideration for the daily irradiance variation as in Fig. 6. It can be seen there that around noon the output power of the system with the oversized PV generator is reduced (curve  $P_{400k}$ ). The output of the non-oversized generator ( $P_{300}$  curve) is not so reduced. The power reduction leads to a reduction in the energy output ( $E_{400k}$  curve), as shown in Fig. 7b. In addition, the figure shows the  $P_{400}$  power and  $E_{400}$  energy outputs of the 1600 W PV generator, i.e. without power limitation by the inverter. This allows to estimate the energy "loss" caused by an inverter with less power capacity than that of the PV generator.

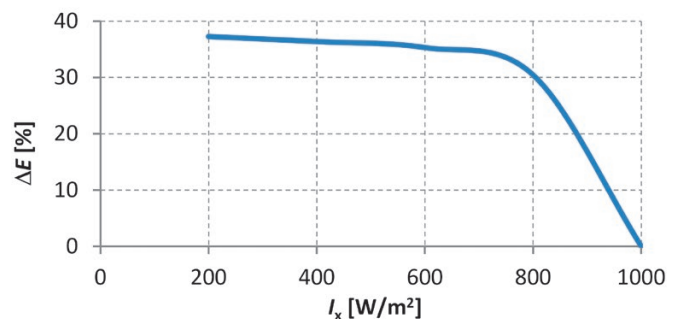


Fig. 5. Difference of the energy outputs of a PV micro plant with rated power capacity  $P_n = 1200$  W with a PV generator with power capacity  $4 \times 400$  W ( $E_{400k}$ ) and  $4 \times 300$  W ( $E_{300}$ ), as a function of constant irradiance  $I_x$ , for operation time (insolation duration) 1650 h

Total electricity output in the day under consideration amounts to:  $\Sigma E_{300} = 10.3$  kWh,  $\Sigma E_{400} = 14.2$  kWh,  $\Sigma E_{400k} = 13.4$  kWh. This means (by comparison of  $\Sigma E_{400k}$  and  $\Sigma E_{300}$ ) that a power plant with an oversized PV generator produces (in the example under consideration) 30.4% more energy than a power plant with a non-oversized PV generator. This matches the values shown in Fig. 5. However, with an inverter with a power capacity lower than that of the PV generator (comparison of  $\Sigma E_{400}$  to  $\Sigma E_{400k}$ ) the limitation of the inverter output to 1200 W reduces the energy output by 5.2%.

<sup>7</sup> In a sense, this statement is obvious.

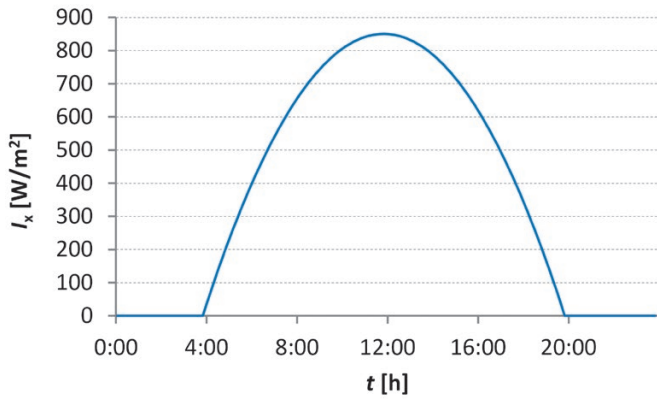


Fig. 6. The assumed daily irradiance variation

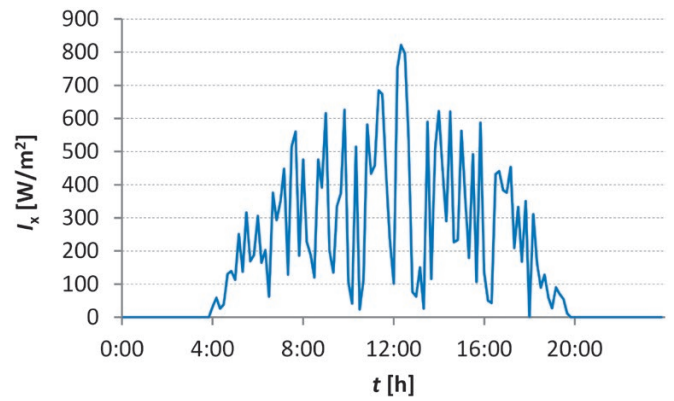


Fig. 8. The assumed stochastic daily solar irradiance variation

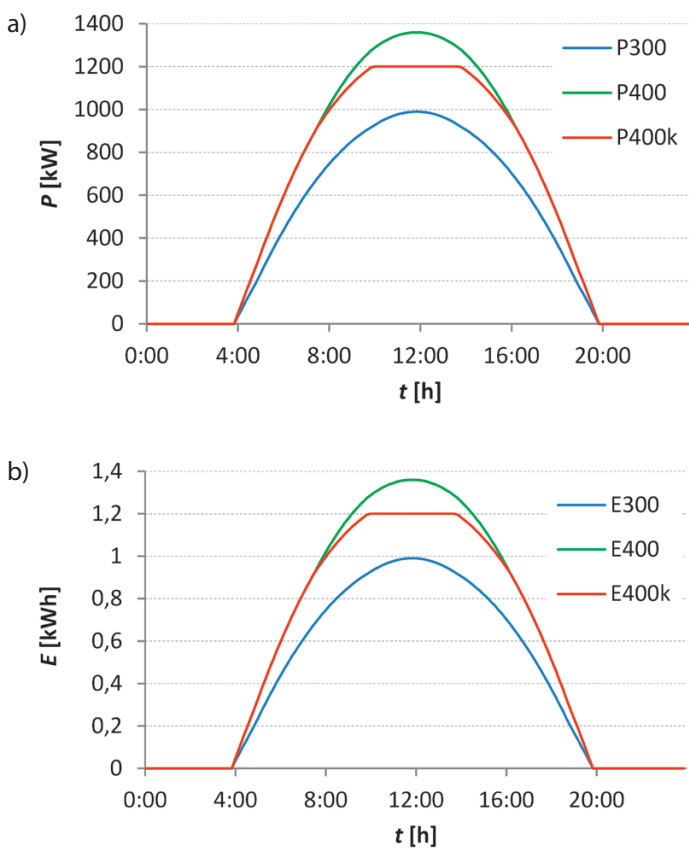


Fig. 7. The active power (a) and electricity (b) output of the PV micro plant for the irradiance variation as in Fig. 6

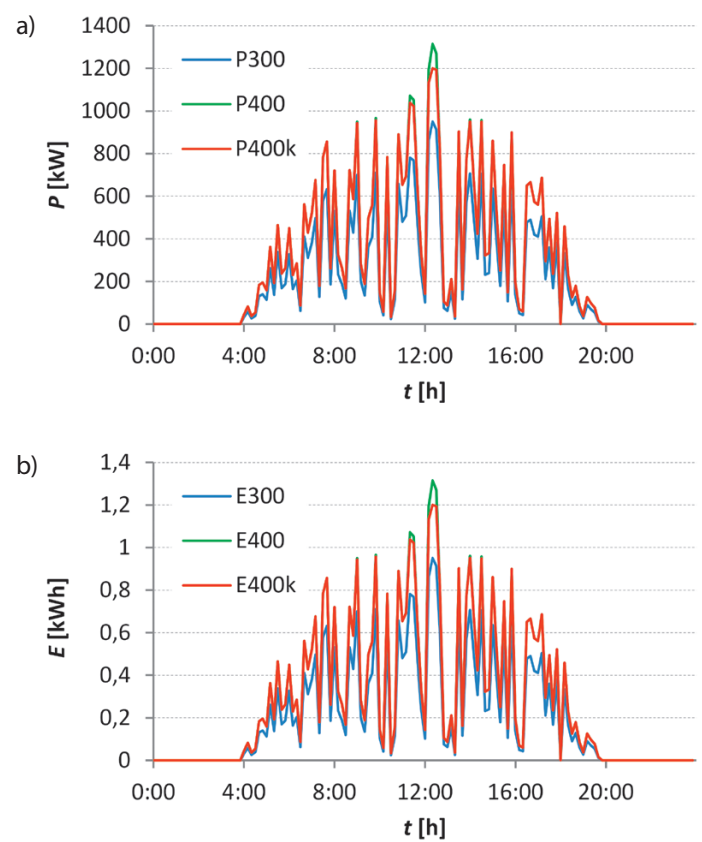


Fig. 9. Active power (a) and electricity (b) output of the PV micro plant for the irradiance variation as in Fig. 8

#### 4. Solar irradiance variable over time, with consideration of the panels' random shading

It is assumed in this case that the irradiance variability is stochastic. The near-ideal daily irradiance variation (as shown in Fig. 6) is adopted, but it is modified by a randomly generated sequence of numbers from  $<0...1>$  range with 0.5 average. This results in the daily irradiance variation potentially similar to the real one, as shown in Fig. 8.

Fig. 9a and Fig. 9b, as in the previous case, show the active power and electricity outputs of the PV micro plant under consideration for the irradiance variation as shown in Fig. 8.

The PV generator power output reduction is represented by the green sections of  $(P_{400}, E_{400})$  curves above the red  $(P_{400k}, E_{400k})$  curves. Whereas the smaller power and electricity output of the system with a non- oversized PV generator as compared to the system with a non-oversized PV generator is represented here by the blue sections of  $(P_{300}, E_{300})$  curve below the red  $(P_{400k}, E_{400k})$  curve.

Total electricity output in the day under consideration amounts to:  $\Sigma E_{300} = 4.97$  kWh,  $\Sigma E_{400} = 6.2$  kWh,  $\Sigma E_{400k} = 6.76$  kWh. The electricity outputs are two times lower than in the previous case, which results from the nature of the random function modifying the irradiance variability by the average of 0.5.

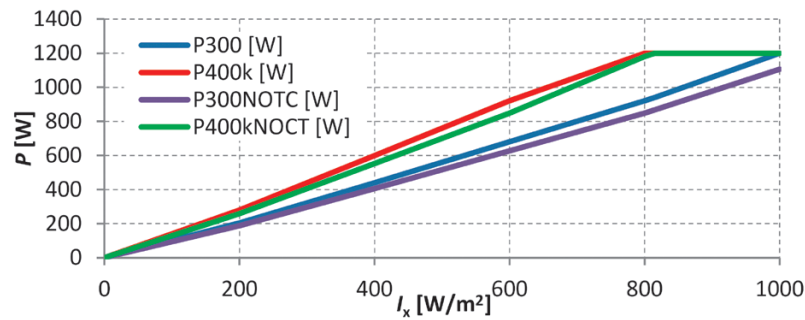


Fig. 10. The temperature impact on the active power output of the PV micro plant with rated power capacity  $P_n = 1200$  W, as a function of constant irradiance  $I_x$ , 1650 h

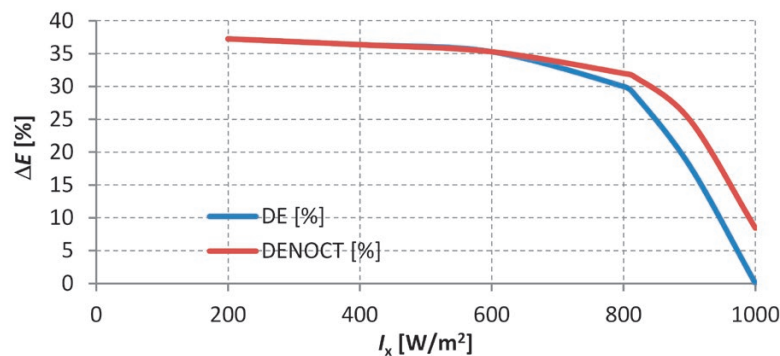


Fig. 11. Difference of the energy outputs of a PV micro plant with rated power capacity  $P_n = 1200$  W with a PV generator with power capacity  $4 \times 400$  W ( $E_{400k}$ ) and  $4 \times 300$  W ( $E_{300}$ ), as a function of constant irradiation  $I_x$ , for insolation duration 1650 h with consideration of the cells' operating temperature

In this case (by comparison of  $\Sigma E_{400k}$  and  $\Sigma E_{300}$ ) the power plant with an oversized PV generator produces 35.9% more energy than the power plant with a non-oversized PV generator. This value is similar to that obtained in the previous example. Whereas with an inverter with a power capacity lower than that of the PV generator (comparison of  $\Sigma E_{400}$  to  $\Sigma E_{400k}$ ) the energy output is reduced by 0.86%, which is less than in the previous example. This slight difference results from the averagely lower irradiances.

## 5. Temperature impact

Photovoltaic panels (cells) are sensitive to operating temperature. An increase in the cell temperature reduces the efficiency of solar energy conversion into electricity. Therefore, in the catalogue data of PV panels, temperature coefficients of the open circuit voltage  $\beta_{VOC}$ , short circuit current  $\alpha_{ISC}$  and maximum power  $\gamma$  are specified. Some manufacturers also specify PV panels' power outputs for the so-called Nominal Operating Cell Temperature (NOCT), characterized by: NOCT temperature  $45 \pm 2^\circ\text{C}$ , ambient temperature  $20^\circ\text{C}$ , wind speed 1 m/s and AMI parameter 1.5. In this case the panel output powers are lower than the so-called STC ratings specified under the Standard Test Conditions, i.e. irradiance  $1000$  W/m<sup>2</sup>, cell temperature  $25^\circ\text{C}$  and AMI 1.5.

For the panels considered here, the temperature coefficient of maximum power is  $\gamma = -0.39\%/^\circ\text{C}$ . Therefore, the panel power output at a given temperature and under a given irradiance can be approximated by the following equation:

$$P_{\max\text{NOCT}} = P_{\max\text{STC}} \left( 1 + \frac{\gamma}{100} (t_{\text{NOCT}} - t_{\text{STC}}) \right)$$

where:

$P_{\max\text{NOCT}}$  and  $P_{\max\text{STC}}$  are, respectively, the panel's output power at temperatures  $t_{\text{NOCT}} = 45^\circ\text{C}$  and  $t_{\text{STC}} = 25^\circ\text{C}$ .

From the above equation, the power output is calculated of the PV generator under consideration, i.e. a system of four 300 W and 400 W panels, depending on the irradiance. The calculations results are shown in Fig. 10. The  $P_{300}$  (blue) and  $P_{400k}$  (red) curves correspond to the curves shown in Fig. 3, i.e. represent the PV generator's output power under the standard STC conditions. The curves labelled  $P_{300\text{NOCT}}$  (purple) and  $P_{400k\text{NOCT}}$  (green) represent the output power under NOCT conditions, i.e. closer to reality<sup>8</sup>. It can be seen here that the power, and thus the energy produced by the PV generator, is lower than under standard STC conditions. It can also be seen that the PV generator with 300 W panels does not reach the rated power even at  $1000$  W/m<sup>2</sup> irradiance. Whereas the power output of

<sup>8</sup> It should be remembered that an increase in the power output over the STC rating is possible. This will occur under conditions of strong sunlight and low (e.g. negative) ambient temperatures. Low enough for the cell temperature not to exceed  $25^\circ\text{C}$ . However, this condition will be quite rare in Poland.

the oversized PV generator (with a  $4 \times 400$  W PV generator) for high irradiances (above  $800 \text{ W/m}^2$ ) is not subject to limitation. This results in an increase in the efficiency of the system with an oversized generator in relation to the non-oversized generator in the area of higher irradiances. In Fig. 11 this is illustrated by the curve labelled as  $\Delta E_{\text{NOCT}}$  (red) in relation to the curve labelled as  $\Delta E$  (blue), which is a repetition of the curve from Fig. 5. Further in this paper the power plants with an oversized and non-oversized PV generator are not compared in the same way as in chapters 3 and 4, because taking into account the cell temperature as in this chapter, i.e. without consideration of the stochastic relationship between irradiance, ambient temperature and wind speed, does not lead to different conclusions.

## 6. Consideration of the PV inverter efficiency

Another factor not yet considered is the efficiency of energy conversion in the inverter. In general, this efficiency depends on the processed power/energy. In the considered case, the inverter manufacturer specifies only the maximum efficiency of 96.7%. A single efficiency value does not allow to determine the impact of the inverter efficiency on the efficiency of the PV plant. However, it can be stated that in a fairly large power range, the efficiency of inverters is close to the maximum efficiency, which is positive. For low powers, however, the inverter efficiency may fall below 90%. However, since in a significant part of the time a PV generator operates at a relatively low solar irradiance, the inverter efficiency is important for the efficiency of the PV plant as a whole.

## 7. Summary

Summing up the above considerations, it can be stated that they justify the oversizing of a PV generator in relation to the inverter with regard to the ability to produce electricity. The electricity output of a system with the structure under consideration oversized by 33% exceeds the output of a non-oversized system by ca. 30%.

However, the above is a technical and not an economic justification. When comparing a capital expenditure project with an oversized PV generator to a project with a non-oversized PV generator, specific PV plants should be considered, including the installation cost and the economic efficiency of oversized systems.

## REFERENCES

1. Tytko R., Fotowoltaika [Photovoltaics], Wydawnictwo i Drukarnia Towarzystwa Słowaków w Polsce, Krakow 2019.
2. Luberański A. et al., Systemy fotowoltaiczne i słoneczne systemy grzewcze [Povoltaic and solar heating systems], Atum sp. z o.o., Wrocław 2016.
3. Mikroinwertery Hoymiles [online], <http://www.hoymiles.com> [access: 2.05.2020].
4. Mikroinwertery APsystems QS1 [online], <https://usa.apsystems.com/qs1> [access: 2.05.2020].
5. Panele fotowoltaiczne Ulica Solar [Ulica Solar PV panels] [online], <http://www.ulicasolar.com> [access: 2.05.2020].
6. Wendt C., Tugel A., Oversizing whitepaper. Maximum freedom when oversizing, SMA [online], [https://www.sma.de/fileadmin/content/global/specials/documents/oversizing/Whitepaper\\_Oversizing\\_EN\\_180530\\_01.pdf](https://www.sma.de/fileadmin/content/global/specials/documents/oversizing/Whitepaper_Oversizing_EN_180530_01.pdf) [dostęp: 2.05.2020].

### Zbigniew Lubośny

Gdańsk University of Technology  
 e-mail: [zbigniew.lubosny@pg.gda.pl](mailto:zbigniew.lubosny@pg.gda.pl)

Graduated from Gdańsk University of Technology. A professor of engineering since 2004. Currently a full professor at Gdańsk University of Technology. His areas of interest include mathematical modelling, power system stability, power system control, use of artificial intelligence application in power system control, and modelling and control of wind turbines. Editor in Chief of *Acta Energetica*.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 39–44. When referring to the article please refer to the original text.

PL

## Przewymiarowanie mocy generatora fotowoltaicznego w mikroelektrowni fotowoltaicznej

### Autor

Zbigniew Lubośny

### Słowa kluczowe

mikroinstalacje fotowoltaiczne, energia odnawialna, elektroenergetyka

### Streszczenie

Znaczna część mikroinstalacji fotowoltaicznych w Polsce charakteryzuje się przewymiarowaniem generatora fotowoltaicznego w stosunku do falownika (inwertera). Idea przewymiarowania budzi jednak ciągle wątpliwości wśród części właścicieli instalacji. W artykule, na wybranych przykładach przedstawiono uzysk energetyczny instalacji z przewymiarowanym i nieprzewymiarowanym generatorem fotowoltaicznym, wykazując zasadność przewymiarowywania.

Data wpływu do redakcji: 4.05.2020

Data wpływu do redakcji po recenzjach: 5.05.2020

Data akceptacji artykułu: 10.05.2020

Data publikacji online: 27.07.2020

### 1. Wstęp

Moc znamionową elektrowni fotowoltaicznej (elektrowni PV) definiuje moc znamionowa falownika. Jest to moc, którą elektrownia fotowoltaiczna może wprowadzić do systemu elektroenergetycznego. Równocześnie jest to moc przyłączeniowa, czyli moc, którą operator sieci dystrybucyjnej traktuje jako moc znamionową źródła energii. Moc generatora fotowoltaicznego (generatora PV) jest natomiast równa sumie mocy znamionowych paneli fotowoltaicznych.

W elektrowniach PV przewidzianych do pracy na szerokościach geograficznych odpowiadających Polsce zazwyczaj przewymiarowuje się generator PV w stosunku do falownika [1, 2, 6]. Moc generatora PV, równą sumie mocy znamionowych paneli fotowoltaicznych, przyjmuje się o ok. 20% większą niż moc znamionową falownika. To przewymiarowanie w założeniu ma na celu zwiększenie ilości energii elektrycznej pozyskanej przez elektrownię PV (tu definiowanej przez moc znamionową falownika) o danej mocy znamionowej. Przewymiarowanie tego typu jest również stosowane w innych odnawialnych źródłach energii (OZE).

Przykładowo elektrownie wiatrowe o danej mocy znamionowej (definiowanej mocą znamionową generatora), przewidziane do pracy w rejonach o mniejszej wietrzności, są wyposażone w większe turbiny wiatrowe, tj. turbiny o większej średnicy koła wiatrowego (długości łopat), niż te zaprojektowane do pracy w rejonach o dużej wietrzności. Turbiny wiatrowe tych elektrowni są zatem przewymiarowane w stosunku do generatora (asynchronicznego lub synchronicznego).

W celu uzasadnienia efektywności technicznej przewymiarowania rozważmy mikroelektrownię PV o mocy znamionowej 1200 W, składającej się z jednego mikroinwertera (falownika) o mocy znamionowej 1200 W<sup>1</sup> [3, 4] oraz z generatora PV składającego się z 4 paneli o mocy znamionowej: 300 W<sup>2</sup> (wariant oznaczony dalej indeksem 300) [5] oraz 400 W<sup>3</sup> (wariant oznaczony indeksem 400). Pierwszy z wariantów odpowiada mikroelektrowni PV bez przewymiarowania generatora PV, czyli moc znamionowa generatora PV ( $4 \times 300 = 1200$  W) jest równa mocy znamionowej falownika. W wariantcie drugim moc znamionowa generatora PV jest równa  $4 \times 400 = 1600$  W, co oznacza

przewymiarowanie równe  $1600/1200 = 1,33$ , tj. 33%. Charakterystyki prąd-napięcie ( $I-U$ ) oraz moc-napięcie ( $P-U$ ) obydwu paneli PV prezentuje rys. 1.

Przedstawione poniżej rozważania i wyniki obliczeń odnoszą się do elektrowni PV składającej się z jednego mikroinwertera o mocy 1200 W. Wyniki rozważań można rozszerzyć na elektrownię PV o mocy znamionowej będącej wielokrotnością 1200 W, np. 2400 W, 3600 W, 4800 W, mnożąc uzyskane wyniki odpowiednio przez 2, 3, 4, itd. Dla powyżej zdefiniowanych dwóch wariantów mikroelektrowni PV przedstawiono w dalszej części artykułu wyniki obliczeń ilości energii elektrycznej, jaką może wyprodukować elektrownia przy założeniu następującej zmienności natężenia promieniowania słonecznego:

- natężenie promieniowania<sup>4</sup> stałe w czasie
- natężenie promieniowania zmienne w czasie według wybranej krzywej z przedstawionych na rys. 2
- natężenie promieniowania zmienne w czasie według wybranej krzywej z przedstawionych na rys. 2, zmodyfikowanej o losowo generowany efekt zachmurzenia (lub zacinienia) paneli PV.

<sup>1</sup> Jest to mikroinwerter o czterech wejściach DC, tj. taki, do którego można przyłączyć do czterech paneli PV.

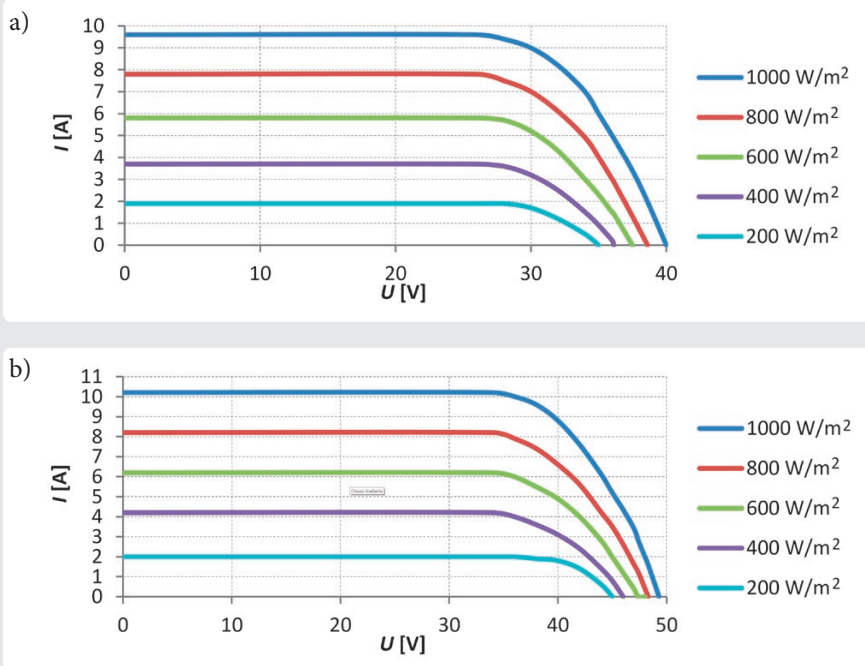
<sup>2</sup> W przedmiotowej dziedzinie moc znamionową paneli fotowoltaicznych zazwyczaj opisuje się jednostką Wp, co ma oznaczać moc szczytową. Można dyskutować nad zasadnością stosowania takiej nazwy jednostki mocy, chociaż w elektrotechnice, w opisach aparatury wysokiego napięcia również stosowany jest indeks p w odniesieniu do napięcia szczytowego (kVp). W artykule stosowana jest jednostka mocy W.

<sup>3</sup> Producent rozważanego mikroinwertera dopuszcza przyłączenie do niego paneli PV o mocy znamionowej równej 400 W.

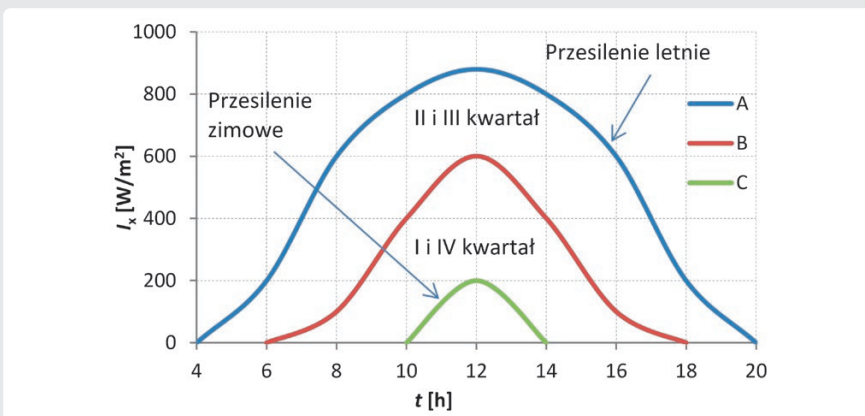
<sup>4</sup> Natężenie promieniowania słonecznego (irradiancja) to chwilowa wartość gęstości mocy promieniowania słonecznego padającego w ciągu jednej sekundy na powierzchnię 1 m<sup>2</sup>, prostopadłą do kierunku promieniowania.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 39–44. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 1. Charakterystyki I-U oraz P-U rozważanych paneli PV o mocy znamionowej: (a) 300 W, (b) 400 W



Rys. 2. Zmienność natężenia promieniowania słonecznego na szerokości geograficznej północnej 52° [2]

Krzywe przedstawione na rys. 2 odpowiadają statystycznie maksymalnym wartościom natężenia promieniowania słonecznego. Oznacza to, że w okresach wskazanych na rysunku (kwartałach roku) należy spodziewać się natężenia promieniowania o wartościach znajdujących się poniżej krzywych. Powyższe nie oznacza jednak, że niemożliwe jest wystąpienie promieniowania słonecznego o natężeniu większym niż ograniczone krzywymi. Promieniowania

słonecznego w wyższej wartości natężenia można spodziewać się sporadycznie, tj. przez pojedyncze minuty bądź godziny w roku.

## 2. Natężenie promieniowania słonecznego stałe w czasie

W pierwszym rozważanym przypadku założono stałość promieniowania w czasie, co nie jest realistyczne, ale ma charakter dydaktyczny. Przyjęto usłonecznienie równe 1650 godzin, co jest

wartością podawaną jako średnia dla Polski (dla Gdyni podaje się 1671 godz.). Na rys. 3 przedstawiono wartość mocy, jaką rozważana mikroelektrownia wprowadza do systemu elektroenergetycznego (przy założeniu 100% sprawności falownika, co jest pewnym uproszczeniem) w zależności od wartości natężenia promieniowania słonecznego. Dla natężenia promieniowania większego od 800 W/m<sup>2</sup> moc pozyskiwana z generatora PV składającego się z 4 paneli o mocy 400 W każdy, tj. o sumarycznej mocy 1600 W (oznaczenie  $P_{400k}$ )<sup>5</sup>, jest ograniczana do wartości mocy znamionowej falownika, tj. do 1200 W. W układzie z generatorem PV składającym się z 4 paneli o mocy 300 W każdy, tj. o sumarycznej mocy 1200 W (oznaczenie  $P_{300}$ ), moc ta nie jest ograniczana. Ograniczanie mocy pozyskiwanej z generatora PV o mocy znamionowej 1600 W sugeruje niepełne wykorzystanie jego możliwości i jest to prawda. Jeżeli jednak odnośmy się do mikroelektrowni o mocy 1200 W, zdefiniowanej mocą znamionową falownika, to w układzie z panelami o mocy 400 W jesteśmy w stanie wytworzyć więcej energii elektrycznej (oznaczenie  $E_{400k}$ ) niż w układzie z panelami o mocy 300 W (oznaczenie  $E_{300}$ ), co ilustruje rys. 4. Rysunek ten należy czytać następująco: Jeżeli moc promieniowania słonecznego jest stała w czasie przez założony czas (w tym przypadku przez 1650 godz., co jest średnim czasem rocznego usłonecznienia<sup>6</sup> dla Polski) i przykładowo równa 600 W/m<sup>2</sup>, to energia wytworzona przez elektrownię z panelami o mocy 4 × 400 W jest równa 1500 kWh, a wytworzona przez elektrownię z panelami o mocy 4 × 300 W jest mniejsza i równa 1122 kWh. Przewaga elektrowni przewymiarowanej widoczna jest praktycznie w całym zakresie natężenia promieniowania. Wyjątkiem jest tu punkt odpowiadający natężeniu promieniowania równemu 1000 W/m<sup>2</sup>. Takie oraz zbliżone do tej wartości promieniowania występują w Polsce skrajnie rzadko. Można zatem powiedzieć, że elektrownia PV z przewymiarowanym generatorem PV umożliwia wytworzenie większej ilości energii elektrycznej praktycznie w każdych warunkach nasłonecznienia<sup>7</sup>. Efekt ten ilustruje rys. 5, utworzony na podstawie danych z rys. 4,

<sup>5</sup> Litera k w indeksie dolnym mocy  $P_{400k}$  i energii  $E_{400k}$  odnosi się do układu, w którym moc czynna generowana przez mikroelektrownię PV z panelami o mocy znamionowej 400 W jest ograniczana do mocy znamionowej falownika, tj. do 1200 W.

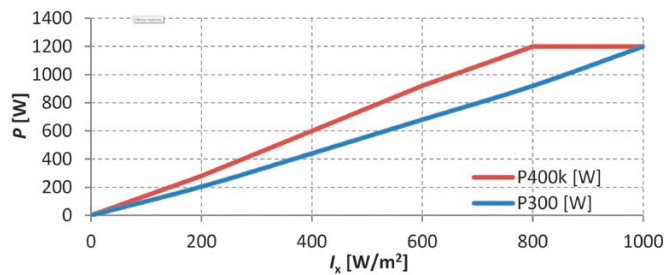
<sup>6</sup> Usłonecznienie to sumaryczny czas (w ciągu doby, miesiąca lub roku), w którym na określone miejsce na powierzchni ziemi pada promieniowanie dochodzące bezpośrednio od tarczy Słońca.

<sup>7</sup> W pewnym sensie konstatacja ta jest oczywista.

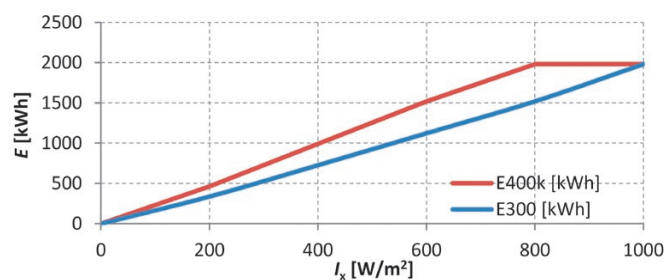


This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 39–44. When referring to the article please refer to the original text.

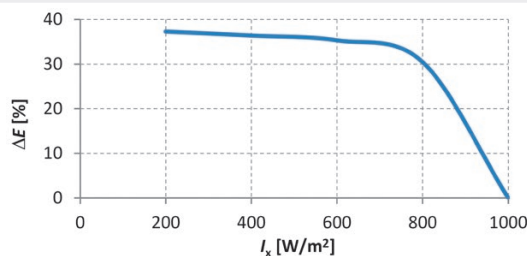
PL



Rys. 3. Moc czynna generowana przez mikroelektrownię PV o mocy znamionowej  $P_n = 1200$  W, w funkcji stałej wartości natężenia promieniowania słonecznego  $I_x$



Rys. 4. Ilość energii wyprodukowanej przez mikroelektrownię PV o mocy znamionowej  $P_n = 1200$  W, w funkcji stałego natężenia promieniowania słonecznego  $I_x$ , dla usłonecznienia równego 1650 h



Rys. 5. Różnica energii wyprodukowanej przez mikroelektrownię PV o mocy znamionowej  $P_n = 1200$  W z generatorem PV o mocy  $4 \times 400$  W ( $E_{400k}$ ) i  $4 \times 300$  W ( $E_{300}$ ), w funkcji stałego natężenia promieniowania słonecznego  $I_x$ , dla czasu pracy (usłonecznienia) równego 1650 h

pokazujący nadwyżkę energii  $\Delta E$  wytworzonej przez elektrownię PV przewymiarowaną w stosunku do nieprzewymiarowanej. Widać tu, że przy natężeniu promieniowania słonecznego mniejszego od  $800 \text{ W/m}^2$ , co jest typowe przez większą część czasu w Polsce, elektrownia przewymiarowana jest w stanie wytworzyć istotnie więcej energii elektrycznej niż elektrownia nieprzewymiarowana.

### 3. Natężenie promieniowania słonecznego zmienne w czasie

W niniejszym przykładzie założono, że zmiana natężenia promieniowania słonecznego ma charakter zbliżony do idealnego, tj. ma charakter zbliżony

do przedstawionego na rys. 2. Przyjętą do rozważań dobową zmienność natężenia promieniowania słonecznego przedstawiono na rys. 6. Założono tu wschód słońca o godz. 4 rano oraz zachód słońca o godz. 20. Ta zmienność natężenia promieniowania słonecznego odnosi się do dnia letniego lub wiosennego o stosunkowo dużej amplitudzie natężenia.

Rysunki 7a i 7b przedstawiają wartości mocy czynnej i energii elektrycznej wytwarzanej przez rozważaną mikroelektrownię dla dobowej zmienności natężenia promieniowania jak na rys. 6. Widać tu, że ok. godz. 12 w układzie z przewymiarowanym generatorem PV

następuje ograniczanie mocy generowanej (krzywa  $P_{400k}$ ). Ograniczanie to nie występuje w generatorze nieprzewymiarowanym (krzywa  $P_{300}$ ). Ograniczanie mocy prowadzi do ograniczania ilości wytwarzanej energii (krzywa  $E_{400k}$ ), co widać na rys. 7b.

Dodatkowo na rysunku tym przedstawiono wartości mocy  $P_{400}$  i energii  $E_{400}$  generowanej przez generator PV o mocy  $1600$  W, tj. w stanie bez ograniczania mocy przez inwerter. Pozwala to ocenić wielkość „straty” energii powodowanej przez falownik o mocy mniejszej niż moc generatora PV.

Sumując energię elektryczną wytworzoną w okresie rozważanej doby, uzyskuje się:  $E_{300} = 10,3$  kWh,  $\Sigma E_{400} = 14,2$  kWh,  $\Sigma E_{400k} = 13,4$  kWh. Oznacza to (porównując  $\Sigma E_{400k}$  do  $\Sigma E_{300}$ ), że elektrownia z przewymiarowanym generatorem PV wytwarza (w rozważanym przykładzie) o 30,4% więcej energii niż elektrownia z nieprzewymiarowanym generatorem PV. Wpisuje się w wartości przedstawione na rys. 5. Natomiast zastosowanie falownika o mocy mniejszej niż moc generatora PV (porównanie  $\Sigma E_{400}$  do  $\Sigma E_{400k}$ ) powoduje, że ograniczanie mocy generowanej przez falownik do poziomu  $1200$  W zmniejsza energię wytworzoną o 5,2%.

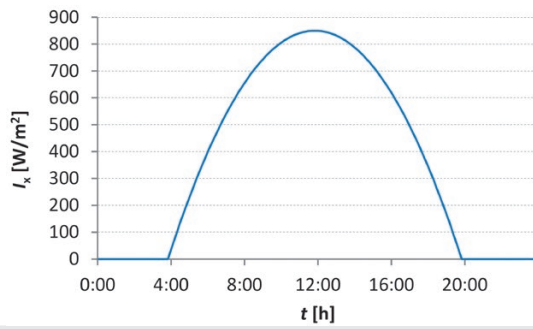
### 4. Natężenie promieniowania słonecznego zmienne w czasie, uwzględniające losowe zacielenie paneli

W niniejszym przypadku założono, że zmiana natężenia promieniowania słonecznego ma charakter stochastyczny. Przyjęto dobową zmienność natężenia zbliżoną do idealnego (jak przedstawiona na rys. 6), ale zmodyfikowano ją losowo generowanym ciągiem liczbowym o wartościach z przedziału  $\langle 0,1 \rangle$  o wartości średniej równej  $0,5$ . W efekcie uzyskano przebieg dobowej zmienności natężenia promieniowania słonecznego potencjalnie zbliżony do rzeczywistego, przedstawiony na rys. 8.

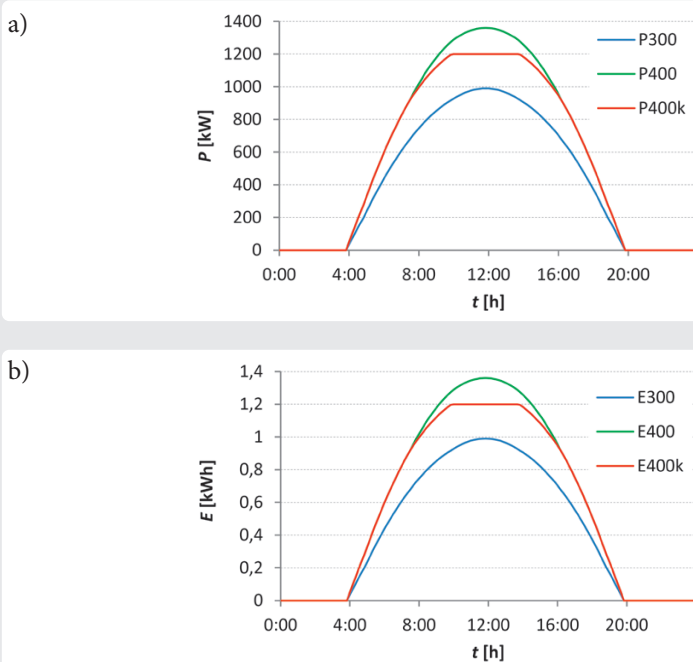
Rysunki 9a i 9b, analogicznie jak w poprzednim przypadku, przedstawiają wartości mocy czynnej i energii elektrycznej, wytworzonej przez rozważaną mikroelektrownię PV dla zmienności natężenia promieniowania jak na rys. 8. Ograniczanie mocy wytwarzanej przez generator PV reprezentują zielone fragmenty krzywych ( $P_{400}$ ,  $E_{400}$ ) widoczne nad krzywymi czerwonymi ( $P_{400k}$ ,  $E_{400k}$ ). Natomiast mniejszą generację mocy i energii elektrycznej przez

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 39–44. When referring to the article please refer to the original text.

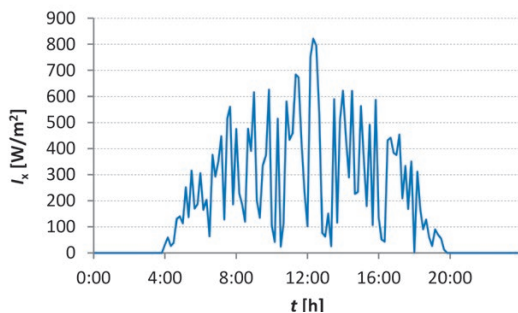
PL



Rys. 6. Założona dobowa zmienność natężenia promieniowania słonecznego



Rys. 7. Moc czynna (a) i energia elektryczna (b) wytwarzana przez mikroelektrownię PV dla zmienności natężenia promieniowania słonecznego jak na rys. 6



Rys. 8. Założona stochastyczna dobowa zmienność natężenia promieniowania słonecznego

układ z nieprzewymiarowanym generatorem PV w stosunku do układu z przewymiarowanym generatorem PV reprezentują tu fragmenty krzywej niebieskiej

( $P_{300}$ ,  $E_{300}$ ), lokujące się poniżej krzywej czerwonej ( $P_{400k}$ ,  $E_{400k}$ ). Sumując energię elektryczną wytworzoną w okresie rozważanej doby,

uzyskuje się:  $E_{300} = 4,97$  kWh,  $\Sigma E_{400} = 6,2$  kWh,  $\Sigma E_{400k} = 6,76$  kWh. Wartości wytworzonej energii elektrycznej są tu dwukrotnie niższe niż w poprzednim przypadku, co wynika z charakteru funkcji losowej, modyfikującej zmienność natężenia promieniowania słonecznego o średniej wartości równej 0,5.

W tym przypadku (porównując  $\Sigma E_{400k}$  do  $\Sigma E_{300}$ ) elektrownia z przewymiarowanym generatorem PV wytwarza o 35,9% więcej energii niż elektrownia z nieprzewymiarowanym generatorem PV. Jest to wartość zbliżona do uzyskanej w poprzednim przykładzie. Natomiast zastosowanie falownika o mocy mniejszej niż moc generatora PV (porównanie  $\Sigma E_{400}$  do  $\Sigma E_{400k}$ ) zmniejsza energię wytworzoną o 0,86%, co jest wartością mniejszą niż uzyskana w poprzednim przykładzie. Ta niewielka różnica wynika ze średnio niższych wartości natężenia promieniowania słonecznego.

## 5. Wpływ temperatury

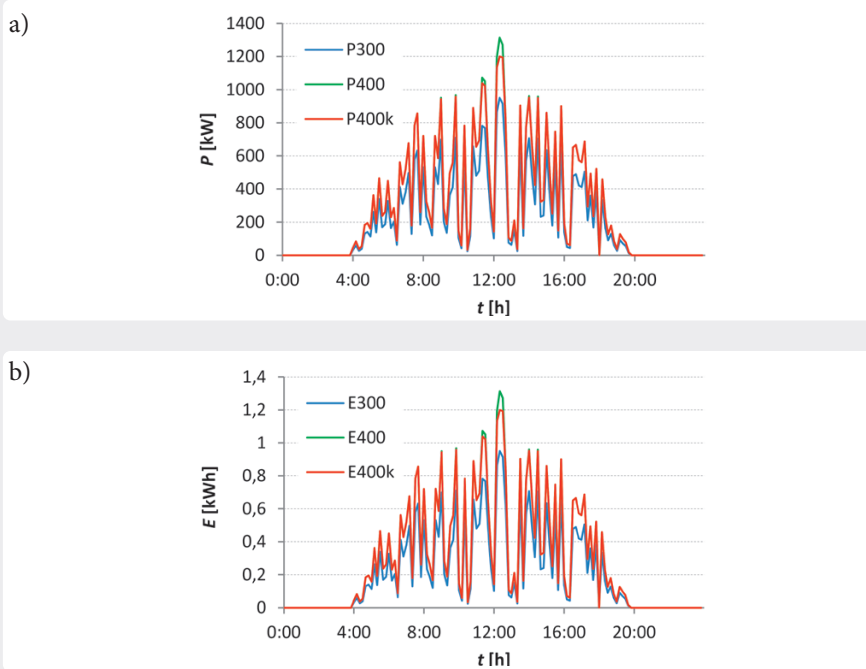
Panele (ogniwa) fotowoltaiczne są wrażliwe na temperaturę pracy. Wzrost temperatury ogniw zmniejsza efektywność przetwarzania energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną. Dlatego w danych katalogowych paneli PV podawane są współczynniki podatności temperaturowej napięcia biegu jałowego  $\beta_{VOC}$ , prądu zwarcia  $\alpha_{ISC}$  oraz mocy maksymalnej  $\gamma$ . Niektórzy producenci podają również wartości mocy generowanej przez panele PV dla tzw. nominalnej temperatury roboczej ogniwa NOCT (ang. Nominal Operating Cell Temperature), charakteryzowanych przez: temperaturę NOCT równą  $45 \pm 2^\circ\text{C}$ , temperaturę otoczenia  $20^\circ\text{C}$ , prędkość wiatru równą 1 m/s oraz parametr AMI równy 1,5. Wartości mocy generowanej przez panel w tym przypadku są niższe niż tzw. wartości znamionowe STC (ang. Standard Test Conditions), podawane dla natężenia promieniowania równego  $1000 \text{ W/m}^2$ , temperatury ogniwa równego  $25^\circ\text{C}$  i AMI równego 1,5.

Dla rozważanych tu paneli współczynnik temperaturowy mocy maksymalnej jest równy  $\gamma = -0,39 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ . Moc, jaką panel może wytworzyć w danej temperaturze dla danej wartości natężenia promieniowania słonecznego, można zatem przybliżyć następującym równaniem:

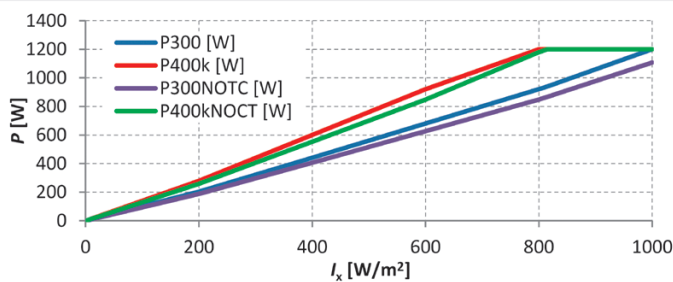
$$P_{\text{maxNOCT}} = P_{\text{maxSTC}} \left( 1 + \frac{\gamma}{100} (t_{\text{NOCT}} - t_{\text{STC}}) \right)$$

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 39–44. When referring to the article please refer to the original text.

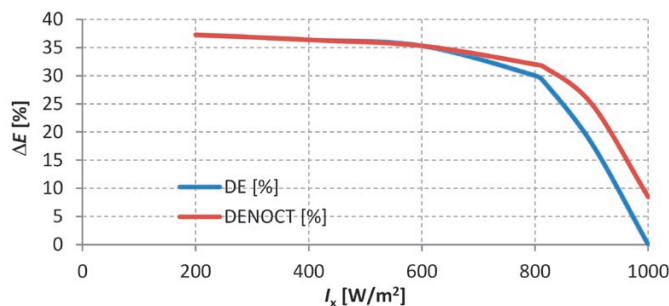
PL



Rys. 9. Moc czynna (a) i energia elektryczna (b) wytwarzana przez mikroelektrownię PV dla zmienności natężenia promieniowania słonecznego jak na rys. 8



Rys. 10. Wpływ temperatury na moc czynną, generowaną przez mikroelektrownię PV o mocy znamionowej  $P_n = 1200$  W, w funkcji stałej wartości natężenia promieniowania słonecznego  $I_x$



Rys. 11. Różnica energii wyprodukowanej przez mikroelektrownię PV o mocy znamionowej  $P_n = 1200$  W z generatorem PV o mocy  $4 \times 400$  W ( $E_{400k}$ ) i  $4 \times 300$  W ( $E_{300}$ ), w funkcji stałego natężenia promieniowania słonecznego  $I_x$ , dla czasu usłonecznienia równego 1650 h przy uwzględnieniu temperatury pracy ogniw

gdzie:  $P_{\max\text{NOCT}}$  i  $P_{\max\text{STC}}$  są odpowiednio równe mocy maksymalnej generowanej przez panel w temperaturze  $t_{\text{NOCT}} = 45^\circ\text{C}$  i  $t_{\text{STC}} = 25^\circ\text{C}$ .

Wykorzystując powyższą zależność, obliczono wartości mocy, którą rozważany generator PV, tj. układ składający się z 4 paneli o mocy 300 W i 400 W, może wytworzyć w zależności od natężenia promieniowania słonecznego. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 10. Krzywe  $P_{300}$  (niebieska) i  $P_{400k}$  (czerwona) odpowiadają krzywom przedstawionym na rys. 3, tj. przedstawiają wartości mocy generowanej przez generator PV w warunkach standardowych STC. Krzywe oznaczone jako  $P_{300\text{NOCT}}$  (fioletowa) i  $P_{400k\text{NOCT}}$  (zielona) przedstawiają wartości mocy w warunkach NOCT, tj. bliższych rzeczywistości<sup>8</sup>. Widać tu, że moc, i tym samym energia wytwarzana przez generator PV, jest niższa niż w warunkach standardowych STC. Widać również, że generator PV z panelami o mocy 300 W nie osiąga mocy znamionowej nawet przy natężeniu promieniowania na poziomie  $1000 \text{ W/m}^2$ . Natomiast moc wytwarzana przez generator PV przewymiarowany (z generatorem PV  $4 \times 400$  W) dla dużych wartości natężenia promieniowania (powyżej  $800 \text{ W/m}^2$ ) nie podlega ograniczaniu. Skutkuje to wzrostem efektywności układu z generatorem przewymiarowanym w stosunku do nieprzewymiarowanego w obszarze większych wartości natężenia promieniowania słonecznego. Na rys. 11 obrazuje to krzywa oznaczona jako  $\Delta E_{\text{NOCT}}$  (czerwona) w stosunku do krzywej oznaczonej  $\Delta E$  (niebieska), będąca powtórzeniem krzywej z rys. 5.

W dalszej części niniejszego artykułu nie rozważa się porównania elektrowni z przewymiarowanym i nieprzewymiarowanym generatorem PV w sposób analogiczny jak w rozdziałach 3 i 4, ponieważ uwzględnienie temperatury ogniw w sposób jak w niniejszym rozdziale, tj. bez uwzględnienia stochastycznego związku natężenia promieniowania słonecznego, temperatury otoczenia i prędkości wiatru, nie prowadzi do odmiennych wniosków.

## 6. Uwzględnienie sprawności falownika PV

Kolejnym nierozważanym elementem jest sprawność przetwarzania energii

<sup>8</sup> Należy pamiętać, że możliwy jest stan wzrostu generacji mocy ponad wartość znamionową STC. Będzie to występowało w warunkach silnego nasłonecznienia i niskich (np. ujemnych) temperatur otoczenia. Na tyle niskich, aby temperatura ogniw była nie większa niż  $25^\circ\text{C}$ . Stan taki w warunkach krajowych będzie jednak występował dość rzadko.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 39–44. When referring to the article please refer to the original text.

PL

w falowniku. Ogólnie rzecz biorąc, sprawność ta zależy od mocy/energii przetwarzanej. W rozważanym przypadku producent falownika podaje tylko maksymalną sprawność równą 96,7%. Pojedyncza wartość sprawności nie pozwala określić wpływu sprawności falownika na efektywność elektrowni PV.

Można natomiast stwierdzić, że w dość dużym zakresie mocy sprawność falowników jest bliska sprawności maksymalnej, co jest pozytywne. Natomiast dla małych mocy sprawność falownika może spadać poniżej 90%.

Ponieważ jednak przez znaczącą część czasu generator PV pracuje przy względnie małym natężeniu promieniowania słonecznego, sprawność falownika ma znaczenie dla efektywności elektrowni PV jako całości.

## 7. Podsumowanie

Podsumowując powyższe rozważania, można stwierdzić, że uzasadniają one przewymiarowywanie generatora PV w stosunku do falownika w zakresie zdolności pozyskiwania energii elektrycznej. Ilość energii elektrycznej, którą można wytworzyć w układzie przewymiarowanym o rozważanej strukturze i przewymiarowaniu na poziomie 33%, przewyższa ilość energii, którą można wytworzyć w układzie nieprzewymiarowanym o ok. 30%

Powyższe jest jednak uzasadnieniem technicznym, a nie ekonomicznym. Porównując inwestycję z przewymiarowanym generatorem PV do inwestycji z nieprzewymiarowanym, należałoby rozważyć konkretne elektrownie PV, a w tym koszt instalacji i efektywność ekonomiczną układów przewymiarowanych.

## Bibliografia

1. Tytko R., Fotowoltaika, Wydawnictwo i Drukarnia Towarzystwa Słowaków w Polsce, Kraków 2019.
2. Luberański A. i in., Systemy fotowoltaiczne i słoneczne systemy grzewcze, Atum sp. z o.o., Wrocław 2016.
3. Mikroinwertery Hoymiles [online], <http://www.hoymiles.com> [dostęp: 2.05.2020].
4. Mikroinwertery APsystems QS1 [online], <https://usa.apsystems.com/qs1> [dostęp: 2.05.2020].
5. Panele fotowoltaiczne Ulica Solar [online], <http://www.ulicasolar.com> [dostęp: 2.05.2020].
6. Wendt C., Tugel A., Oversizing whitepaper. Maximum freedom when oversizing, SMA [online], [https://www.sma.de/fileadmin/content/global/specials/documents/oversizing/Whitepaper\\_Oversizing\\_EN\\_180530\\_01.pdf](https://www.sma.de/fileadmin/content/global/specials/documents/oversizing/Whitepaper_Oversizing_EN_180530_01.pdf) [dostęp: 2.05.2020].

## Zbigniew Lubośny

prof. dr hab.

Politechnika Gdańska

e-mail: [zbigniew.lubosny@pg.gda.pl](mailto:zbigniew.lubosny@pg.gda.pl)

Wychowanek Politechniki Gdańskiej. Od 2004 roku jest profesorem nauk technicznych. Obecnie jest zatrudniony na swojej macierzystej uczelni na stanowisku profesora zwyczajnego. Obszar jego zainteresowań to: modelowanie matematyczne, stabilność systemu elektroenergetycznego, sterowanie systemem elektroenergetycznym, zastosowanie sztucznej inteligencji do sterowania systemem elektroenergetycznym, modelowanie i sterowanie elektrowniami wiatrowymi. Redaktor naczelny *Acta Energetica*.