

Mateusz Pławewski, Edward Rówiński
 Uniwersytet Śląski, Instytut Nauki o Materiałach
 mgr inż. Łukasz Płatkowski
 Konsorcjum Paliwowo-Energetyczne
 prof. KPE dr Błażej Bzowski

Optymalizacja ustawień panelu fotowoltaicznego amorficznego w Katowicach

Optimization of an amorphous PV panel positioning in Katowice

Podstawą działania paneli fotowoltaicznych (PV, ang. *photovoltaic*) jest zjawisko fotowoltaiczne – przetwarzania energii słoneczną w energię elektryczną [1-7]. W tym przypadku Słońce jest strumieniem fotonów (kwantów), z których każdy niesie energię kinetyczną. Fotony o energii nie mniejszej niż 0,6 eV zderzając się z elektronami pasma walencyjnego przekazują im całą niesioną przez siebie energię, w wyniku czego elektron przeskakuje (skoki kwantowe) do pasma przewodnictwa. Kąt padania promieni słonecznych zmienia się w zależności od pory roku oraz szerokości geograficznej. W ciągu roku szerokość geograficzna, w której Słońce góruje w zenicie, zmienia się. Podstawą wyznaczenia dat zmian astronomicznych pór roku jest górowanie Słońca w zenicie nad równikiem bądź zwrotnikami. Ich występowaniu towarzyszą zmiany długości trwania dnia i nocy. W klimacie umiarkowanym wyróżnia się cztery pory roku: wiosnę, lato, jesień i zimę.

Przedmiotem badań było przeprowadzenie obliczeń teoretycznych dotyczących optymalnych ustawień paneli PV wykonanych z krzemu amorficznego. Natomiast głównym celem niniejszego artykułu jest ustalenie optymalnych kątów nachylenia paneli względem poziomu dla trzech okresów czasowych, tj. najniższe, pośrednie oraz najwyższe górowanie Słońca w mieście Katowice.

Wyniki

Całkowita dobową (dzienną) średnią energią słoneczną padającą na panel nachylony pod kątem s wyliczana jest ze wzoru [1-8]:

$$H_0(n) = \frac{24}{\pi} \cdot I_0 \cdot \left[1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right] \cdot \left[\cos \delta \cdot \cos(\phi - s) \cdot \cos \omega_x + \left(\frac{\pi \cdot \omega_x}{180}\right) \cdot \sin \delta \cdot \sin(\phi - s) \right], \quad \text{K J/dobe} \quad (1)$$

z

$$\omega_x = \begin{cases} \arccos \frac{a_1 a_3 - a_2 \sqrt{a_1^2 - a_3^2 + a_2^2}}{a_1^2 + a_2^2} \\ \arccos \frac{a_1 a_3 + a_2 \sqrt{a_1^2 - a_3^2 + a_2^2}}{a_1^2 + a_2^2} \end{cases} \quad (2)$$

$$a_1 = \cos g \cdot \sin s \cdot \sin \phi + \cos s \cos \phi \quad (3)$$

$$a_2 = \sin s \cdot \sin g \quad (4)$$

$$a_3 = -\text{tg } \delta (\cos s \cdot \sin \phi + \cos g \cdot \sin s \cdot \cos \phi) \quad (5)$$

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right) \quad (6)$$

gdzie:

- I_0 – stała słoneczna,
- ω_x – określa względny czas zachodu (pierwsza linijka) i wschodu (druga linijka) Słońca dla powierzchni nachylonej pod kątem s względem horyzontu (poziomu),
- ϕ – kąt szerokości geograficznej (północnej),
- g – długość geograficzna,
- s – kąt nachylenia panelu względem horyzontu w kierunku południowym,
- δ – kąt deklinacji Słońca wynikający z nachylenia osi Ziemi do płaszczyzny ekliptyki
- n – numer kolejnej doby w roku ($1 \leq n \leq 365$).

Najmniejszą częścią panelu jest ogniwo wykonane z amorficznego krzemu, którego wymiary wynoszą od $10 \times 10 \text{ cm}^2$ do $15 \times 15 \text{ cm}^2$. Moc elektryczna takiego ogniwa przy napięciu 0,5 – 0,6 V i natężeniu prądu elektrycznego 2,5 A kształtuje się w granicach 1-2 W. Ze względu na niedużą moc pojedynczego ogniwa łączy się je w większe struktury zwane panelami (modułami) fotowoltaicznymi. Panele wykonywane są według standardowych napięć 12, 24 i 48 V. Przy czym moc zależy od sposobu i liczby (N) połączonych ogniw. W obliczeniach teoretycznych przyjęto, że krzemowy panel fotowoltaiczny amorficzny charakteryzuje się wymiarami powierzchni $S = 1,3 \times 1,1 \cong 1,4 \text{ m}^2$, mocą $\geq 128 \text{ W}$ oraz napięciem jałowym 42,8 V i prądem zwarcia 4,18 A.

Sprawność panelu PV wynosi około 9%. Należy jednak podkreślić, że rzeczywiste warunki następczenia są zmienne i zwykle otrzymuje się niższe wartości mocy wyjściowej paneli o około 15%. Obliczenia przeprowadzono dla miasta Katowice, gdzie szerokość i długość geograficzna wynoszą odpowiednio $50,259^\circ$ i 19° , a wysokość 245-357 m nad poziomem morza.

W tabelach 1, 2 i 3 zestawiono teoretyczne wyniki obliczeń maksymalnej mocy dla zaprojektowanego panelu PV na różnych wysokościach górowania Słońca i wysokościach 0, 300 i 700 m nad poziomem morza oraz kąta nachylenia.

Tabela 1

Wyniki obliczeń maksymalnej mocy dla panelu PV wykonanego z krzemu amorficznego przy szerokości geograficznej 50° na różnych wysokościach górowania Słońca o wysokości 0 m nad poziomem morza

Data	Górowanie Słońca, $^\circ$	Kąt nachylenia panelu PV, $^\circ$	Moc maksymalna panelu PV, kW
22 grudnia	16,5	73,5	0,066
21 marca	40	50	0,106
22 czerwca	63,5	26,5	0,118
23 września	40	50	0,106
AM1,5	41,8	48,2	0,108

Tabela 2

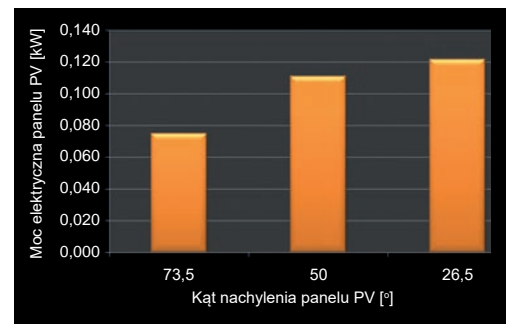
Wyniki obliczeń maksymalnej mocy dla panelu PV wykonanego z krzemu amorficznego przy szerokości geograficznej 50° na różnych wysokościach górowania Słońca oraz wysokości 300 m nad poziomem morza

Data	Górowanie Słońca, $^\circ$	Kąt nachylenia panelu PV, $^\circ$	Moc maksymalna panelu PV, kW
22 grudnia	16,5	73,5	0,070
21 marca	40	50	0,108
22 czerwca	63,5	26,5	0,119
23 września	40	50	0,108
AM1,5	41,8	48,2	0,110

Tabela 3

Wyniki obliczeń maksymalnej mocy dla panelu PV wykonanego z krzemu amorficznego przy szerokości geograficznej 50° na różnych wysokościach górowania Słońca oraz wysokości 700 m nad poziomem morza

Data	Górowanie Słońca, $^\circ$	Kąt nachylenia panelu PV, $^\circ$	Moc maksymalna panelu PV, kW
22 grudnia	16,5	73,5	0,075
21 marca	40	50	0,111
22 czerwca	63,5	26,5	0,122
23 września	40	50	0,111
AM1,5	41,8	48,2	0,112



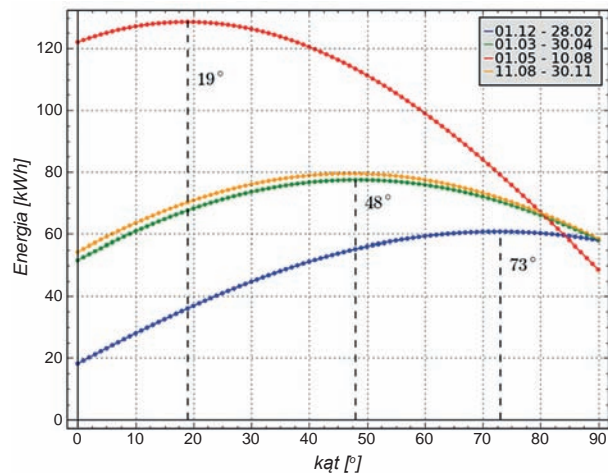
Rys. 1. Wykres słupkowy dla maksymalnych mocy elektrycznej przy różnych ustawieniach kąta nachylenia panelu PV wykonanego z amorficznego krzemu

Z obliczeń wynika, że moc elektryczna panelu zależy od wysokości jego umieszczenia. Umieszczenie panelu na wysokości 300 m (np. teren wyżynny, Katowice) i 700 m (np. teren górski) zwiększa moc od 1% do 5% i zależy od kąta nachylenia panelu. Największe zmiany stwierdzono przy kącie $73,5^\circ$. Analizując wyniki zamieszczone w trzeciej i ostatniej kolumnie powyższych trzech tabel można stwierdzić, że przy kątach 50° i $26,5^\circ$ moc panelu jest porównywalna z mocą uzyskaną w standardowych warunkach STC (tj. AM = 1,5 przy 1 kW/m^2). Uzyskanie ponad 80% procent ilości mocy na poziomie standardowych warunków jest argumentem za doбором trzech optymalnych kątów do ustawienia nachylenia panelu.

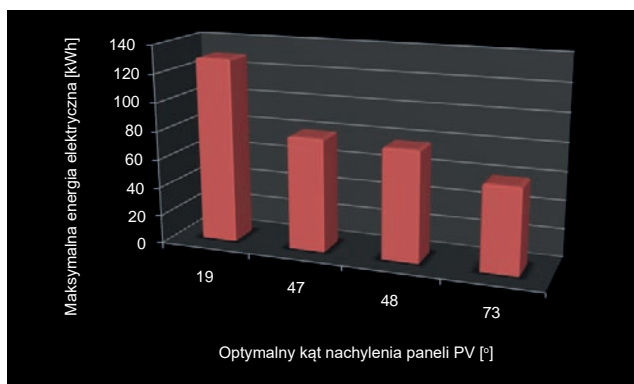
Biorąc pod uwagę szerokość geograficzną 50° otrzymano górowanie Słońca na wysokości 40° . Z tego wynika, że przy nachyleniu paneli pod kątem 50° do poziomu otrzymano moc 111 W dla równonocy. Minimalna wartość wynosi 75 W dla okresu przesilenia zimowego, a maksymalna wartość – 122 W dla przesilenia letniego (rys. 1). Z tych wstępnych wyników rodzi się koncepcja okresowego ustawienia paneli przy kątach $73,5^\circ$, 50° i $26,5^\circ$ w skali roku.

Dalsze obliczenia będą skupiały się na krzywej ilości wyprodukowanej energii elektrycznej przez panel PV, w zależności od kąta, w czterech optymalnych kolejnych okresach. Na podstawie przyjętego założenia obliczono cztery teoretyczne krzywe ilości wyprodukowanej energii elektrycznej przez panel PV, wykonany z krzemu amorficznego, w zależności od kąta w czterech kolejnych okresach (rys. 2). Każda z tych krzywych charakteryzuje się maksimum, które wyznacza optymalny kąt ustawienia nachylenia panela względem poziomu. Dla pierwszego okresu od 1 grudnia do 28 lutego optymalny kąt wynosi 73 stopnie. Drugi okres od 1 marca do 30 kwietnia i czwarty okres od 11 sierpnia do 30 listopada charakteryzują się porównywalnymi kątami 48 stopni, a trzeci okres od 1 maja do 10 września ma maksimum przy kącie 19 stopni. Maksimum wyprodukowanej energii elektrycznej w obliczonych okresach jest liniowo zależne od optymalnego kąta ustawienia panelu. Ilość ta kształtowała się na poziomach od 60 kWh do 130 kWh (rys. 3). Ponad dwukrotna różnica między skrajnymi wartościami jest korzystna przy projektowaniu fotowoltaicznych systemów zasilających urządzenia.

W przeprowadzonej analizie wykazano, że całkowita dobową (dzienną) średnia energia słoneczna, padająca na panele PV wykonane z krzemu amorficznego, nachylone pod trzema optymalnymi kątami, produkuje 37% energii elektrycznej przy kącie 19° , 23% – przy kącie 48° , a 17% w przypadku kąta 73° .



Rys. 2. Teoretyczne wartości energii elektrycznej wyprodukowanej przez panel PV wykonany z krzemu amorficznego w poszczególnych okresach: najniższe górowanie Słońca, pośrednie oraz najwyższe, w miesiącach od grudnia do maja



Rys. 3. Wykres słupkowy dla wartości maksymalnych energii elektrycznej podanych na rysunku 2

Podsumowanie

Przeprowadzone obliczenia dowiodły, że koncepcja zróżnicowanego ustawienia paneli PV wykonanych z krzemu amorficznego jest optymalna przy kątach: 19°, 48° i 73° w skali roku. Z tego względu należy zrezygnować z całorocznych ustawień stacjonarnych paneli na rzecz okresowych. Ponadto usytuowanie paneli w terenie górskim lub wyżynnym podnosi ich wydajność od 1% do 5% w zależności od kąta. Panele o orientacji południowej przetwarzają na energię elektryczną ponad kilka lub kilkanaście procent energii ze Słońca, przy czym ponad 80 procent energii pozyskiwane jest wiosną, latem i jesienią, a 17 procent w okresie zimy. Tak więc Słońce jest przez cały rok nie tylko niewyczerpalnym, ale i ekologicznym źródłem energii.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Green M.A., „Physica E” 2002, 14, 11-17.
- [2] Tivanov M., A. Patrjn A., Drozdov N., Fedotov A., Mazanik A., „Solar Energy Materials & Solar Cells” 2005, 87, 457-465.
- [3] Pławecki M., Rówiński E., Chyliński M., Bzowski B., „Energetyka” 2018, 4 (766) 230-232.
- [4] Pietruszka M., Olszewska M., Machura Ł., Rówiński E., „Scientific Reports [Nat. Pub. Group]” 2018, 8 (7875), 1-7.
- [5] Qin L., Xie S., Yang C., Cao J., „ECCE Asia Downunder (ECCE Asia) IEEE” 2013, 659-663.
- [6] Singh P., Ravindra N.M., „Emerging Materials Research” 2011, 1, 33-38.
- [7] Miloudi L., Acheli D., Chaib A., „Energy Procedia” 2013, 42, 103-112.
- [8] Bzowski B., Trycz AT., „Energetyka” 2017, 1 (751), 28-31.



World Sustainable Energy Days 2019

27 February – 1 March 2019, WELS / AUSTRIA

WWW.WSED.AT

OÖ Energiesparverband, Landstraße 45, A-4020 Linz,
T: +43-732-7720-14386, office@esv.or.at, www.esv.or.at
ZVR 171568947