

ZASADY DOBORU PANELI PV DO WSPÓLPRACY Z FALOWNIKIEM

mgr inż. Julian Wiatr

W polskich warunkach klimatycznych panele fotowoltaiczne w praktyce nie osiągają mocy nominalnej wyznaczonej w warunkach STC. Typowe warunki natężenia promieniowania słonecznego w bezchmurny dzień to wartość z zakresu **(800-900) W/m²**. Jest to wartość o **(10-20)%** niższa od wartości w której badane są panele. Położenie geograficzne Polski powoduje, że większość energii dostarczanej przez słońce mieści się w zakresie niskiego natężenia, wynoszącego **(100 – 600) W/m²**. Dla uzysku energetycznego nie bez znaczenia jest kąt nachylenia paneli PV oraz kąt odchylenia od południa.

W **tabeli 1** zostały przedstawione względne wartości mocy generowanej w stosunku do mocy falownika w zależności od kąta pochylenia paneli PV.

Tabela 1: Względne wartości mocy generowanej w stosunku do mocy falownika w zależności od kąta pochylenia paneli PV [1]

Kąt nachylenia instalacji, w [°]	Względna wartość mocy generowanej do mocy znamionowej falownika, w [%]
1-60	90 - 118
70	100 - 125
80	105 - 130
90	100 - 140

W **tabeli 2** zostały przedstawione względne wartości mocy generowanej w stosunku do mocy falownika w zależności od kąta odchylenia od południa instalacji paneli PV.

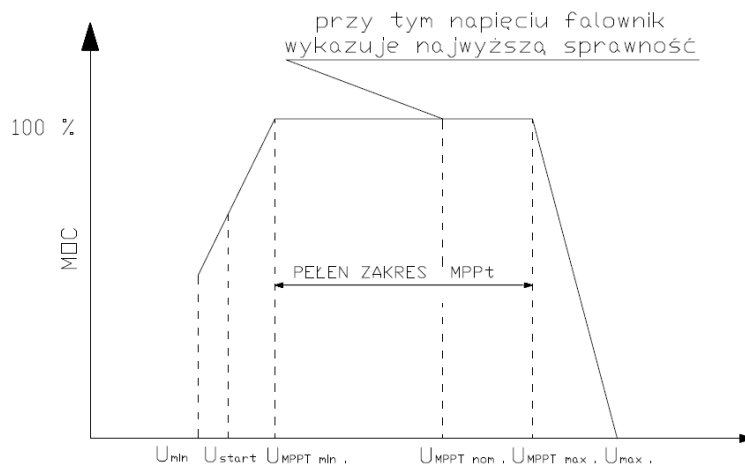
Tabela 2: Względne wartości mocy generowanej w stosunku do mocy falownika w zależności od kąta odchylenia od południa instalacji paneli PV [1]

Odchylenie od południa przy pochyleniu W zakresie kątów (30-45) ^o	Względna wartość mocy generowanej do mocy znamionowej falownika, w [%]
60	97 - 122
70	100 - 125
80	103 - 128
90 (układ wschód lub zachód)	107 - 133

W praktyce nie popełnia się błędów dobierając moc generatora mikro instalacji PV w zakresie **(0,9 – 1,18)** mocy znamionowej falownika (niektóre źródła podają wartość 0,8-1,2). Zazwyczaj łatwiej jest dobrać moc falownika niż falownika do założonej liczby paneli PV. Falowniki produkowane są z zachowaniem typoszeregu o wartości **2 kW; 3 kW; 5 kW; 7 kW; 9 kW** itd. Dobierając liczbę paneli PV korzystnie jest by stanowiła ona liczbę parzystą. Nieparzysta liczba modułów wymaga zastosowania falownika z dwoma modułami MPP.

Każdy falownik może pracować w określonym zakresie napięć dc. Na **rys. 1** został przedstawiony napięciowy zakres pracy falownika w funkcji mocy z oznaczeniem charakterystycznych wartości napięcia. Z rysunku tego wynika, że napięcie U_{start} leży powyżej napięcia U_{min} , lecz poniżej napięcia $U_{MPPT min}$. Oznacza to, że po przekroczeniu wartości U_{start} falownik zacznie szukać punktu mocy maksymalnej. Natomiast gdy wartość napięcia znajdzie się w przedziale $(U_{min}- U_{start})$, falownik załączy się lecz nie podejmie próby szukania mocy maksymalnej. Praca falownika z mocą maksymalną jest możliwa w zakresie napięć $(U_{MPPT min} - U_{MPPT max})$. W tym zakresie napięć falownik uzyskuje najwyższą

sprawność. Powyżej napięcia $U_{MPPT\ max}$ falownik będzie nadal pracował aż do uzyskania napięcia U_{max} lecz sprawność znacząco obniży się, a po uzyskaniu wartości U_{max} falownik wyłączy się.



Rysunek 1: Charakterystyka mocowo-napięciowa falownika

Dobór łańcucha paneli PV do falownika

W celu dopasowania prądowo-napięciowego łańcucha paneli PV, należy z karty katalogowej panelu PV odczytać następujące parametry:

- moc maksymalna P_{max} , w [Wp]
- prąd zwarcia I_{sc} dla warunków STC, w [A]
- napięcie obwodu otwartego U_{oc} w warunkach STC, w [V]
- prąd w punkcie mocy maksymalnej I_{mpp} w warunkach STC, w [A]
- napięcie robocze w punkcie mocy maksymalnej U_{mpp} w warunkach STC, w [V]
- temperaturowy współczynnik napięcia obwodu otwartego β , w [%/°C].

Następnie z karty katalogowej falownika, należy odczytać następujące parametry:

- moc nominalna po stronie ac, w [W]
- maksymalne napięcie wyjścia U_{max} , w [V]
- dolny zakres pracy MPPT, $U_{mppt\ min}$, w [V]
- górny zakres pracy MPPT, $U_{mppt\ max}$, w [V]
- napięcie nominalne, w [V]
- liczba niezależnych MPPT, w [-]
- maksymalny prąd zwarcia $I_{f\ max}$ dla każdego MPPT, w [A]
- maksymalny prąd roboczy dla każdego $I_{rob\ MPPT}$

W celu doboru łańcucha paneli PV do współpracy z falownikiem należy określić graniczne temperatury pracy w zależności od strefy klimatycznej, w której realizowana będzie instalacja (patrz tabela 3 oraz rys. 2).

Następnie należy wyznaczyć napięcie obwodu otwartego panelu PV w niskiej temperaturze T_{min} , przy której napięcie uzyskuje najwyższą wartość:

$$U_{oc\ max/T_{Uoc}} = U_{oc\ STC} + \left(\frac{\beta}{100} \cdot \Delta T_{oc}\right)$$

Kolejnym krokiem jest wyznaczenie napięcia w punkcie mocy maksymalnej w niskiej temperaturze oraz napięcia w punkcie mocy maksymalnej w wysokiej temperaturze:

$$U_{mpp \max/T_{\min}} = U_{mpp \text{ STC}} + \left(\frac{\beta}{100} \cdot \Delta T_{\min}\right)$$

$$U_{mpp \min/T_{\max}} = U_{oc \text{ STC}} - \left(\frac{\beta}{100} \cdot \Delta T_{\max}\right)$$

Następnie należy wyznaczyć graniczne wartości prądu roboczego oraz prądu zwarcia:

$$I_{sc \max} = 1,25 \cdot I_{sc \text{ STC}}$$

$$I_{mpp \max} = 1,15 \cdot I_{mpp \text{ STC}}$$

Na podstawie obliczonych wartości $U_{oc \max}$ lub $U_{mppt \max}$ panelu PV, posługując się napięciami U_{\max} lub $U_{mppt \max}$ falownika należy wyznaczyć maksymalną dopuszczalną liczbę paneli połączonych szeregowo, tworzących gałąź przyłączaną do pojedynczego MPPT:

$$n_{\max} = \frac{U_{\max f}}{U_{oc \max}}$$

lub

$$n_{\max} = \frac{U_{mppt \max f}}{U_{mpp \max}}$$

Podobnie należy wyznaczyć minimalną liczbę szeregowo połączonych paneli PV, tworzących pojedynczą gałąź przyłączaną do pojedynczego MPPT:

$$n_{\min} = \frac{U_{mppt \min f}}{U_{mpp \min}}$$

Należy również mieć na uwadze dopuszczalną liczbę gałęzi połączonych równolegle, którą należy wyznaczyć z następujących wzorów:

$$N_{\max} = \frac{I_{f \max}}{I_{sc \max}}$$

lub

$$N_{\max} = \frac{I_{f \text{ rob}}}{I_{mpp \max}}$$

gdzie:

$I_{f \max}$ – maksymalny prąd zwarcia dla każdego MPPT, określony w DRR producenta, w [A]

$I_{f \text{ rob}}$ – maksymalny prąd roboczy dla każdego MPPT, określony w DTR producenta, w [A]

$U_{mppt \min f}$ – dolna granica napięcia MPPT falownika, w [V]

$U_{mppt \min}$ – minimalne napięcie robocze panelu PV w punkcie mocy maksymalnej, przy $T_{\max, w}$ [V]

$U_{mppt \max f}$ – górna granica napięcia MPPT falownika, w [V]

$U_{mppt \max}$ – maksymalne napięcie robocze panelu PV w punkcie mocy maksymalnej, przy $T_{\min, w}$ [V]

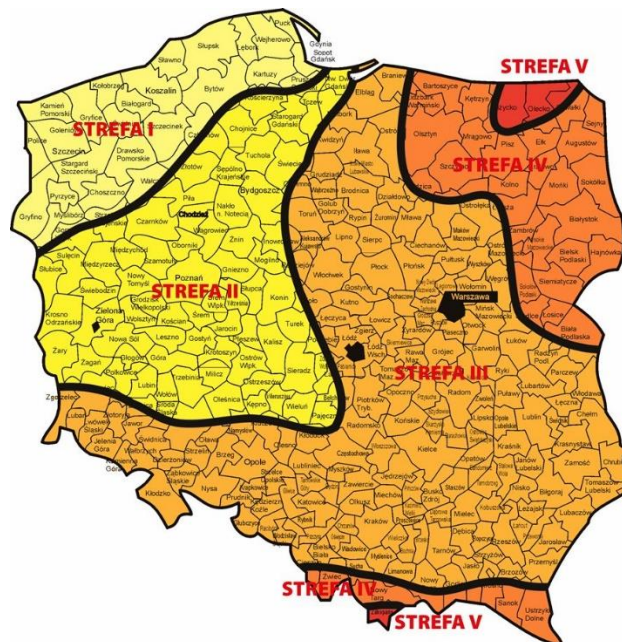
β – temperaturowy współczynnik napięcia obwodu otwartego, w [%/°C]

$\Delta T_{U_{oc}}$ – wartość bezwzględna z różnicy temperatur między +25°C, a przyjętą z tabeli 3 minimalną temperaturą obliczeniową $T_{U_{oc}}$ do obliczenia napięcia przy otwartym kolektorze U_{oc} : $\Delta T_{U_{oc}} = |25 - T_{U_{oc}}|$

ΔT_{\min} – wartość bezwzględna z różnicy temperatur między $+25^{\circ}\text{C}$, a przyjętą z tabeli 3 minimalną temperaturą obliczeniową T_{\min} do obliczenia napięcia $U_{\text{mpp max}}$ w punkcie mocy maksymalnej w niskiej temperaturze: $\Delta T_{\min} = |25 - T_{\min}|$
 ΔT_{\max} – wartość bezwzględna z różnicy temperatur między $+25^{\circ}\text{C}$, a przyjętą z tabeli 3 maksymalną temperaturą obliczeniową T_{\max} do obliczenia napięcia $U_{\text{mpp min}}$ w punkcie mocy maksymalnej w wysokiej temperaturze: $\Delta T_{\max} = |25 - T_{\max}|$

Tabela 3: Temperatuty dla stref klimatycznych w Polsce zgodnie z normą *PN-EN 12831: 2017-08 Instalacje ogrzewcze w budynkach.*
Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego

Strefa klimatyczna	Temperatura minimalna T_{Uoc} [$^{\circ}\text{C}$], do wyznaczenia U_{oc}	Temperatura minimalna T_{\min} [$^{\circ}\text{C}$], do wyznaczenia $U_{\text{mpp max}}$	Temperatura maksymalna T_{\max} [$^{\circ}\text{C}$], do wyznaczenia $U_{\text{mpp min}}$
I	-16	4	67
II	-18	2	68
III	-20	0	70
IV	-22	-2	68
V	-24	-4	65



Rys. 2. Strefy klimatyczne w Polsce zgodnie z **PN-EN 12831:2017-08**

Przykład

Dobrać falownik do współpracy z generatorem PV o mocy **1500 W**. Do budowy generatora przyjmij panele **ZX P6-60-250/P** o mocy 250 Wp. Instalacja systemu PV będzie realizowana w **III** strefie klimatycznej, w której zgodnie z normą **PN-EN 12831**, temperatury skrajne wynoszą: $T_{\max} = 70^{\circ}\text{C}$; $T_{\min} = -20^{\circ}\text{C}$ oraz $T_{\text{oc}} = 0^{\circ}\text{C}$ (tabela 3).

Wymagania zadania spełni falownik **Growatt MIC 1500 TL-X** o następujących parametrach napięciowych:

$P_f = 1500\text{ W}$
 $U_{\min} = 100\text{ V}$

$U_{nom.} = 360 \text{ V}$
 $U_{start} = 150 \text{ V}$
 $U_{mppt \text{ min.}f} = 175 \text{ V}$
 $U_{mppt \text{ max } f} = U_{max} = 450 \text{ V}$
 $I_{f \text{ max}} = 16 \text{ A}$
 $I_{f \text{ rob}} = 13 \text{ A}$
 Liczba MPPT – 1

Na podstawie karty katalogowej paneli PV ustalono:

$P_{PV} = 250 \text{ Wp}$
 $U_{mppt \text{ nom}} = 30,15 \text{ V}$
 $U_{oc} = 37,89 \text{ V}$
 $\beta = 0,3 \text{ \% / } ^\circ\text{C}$
 $I_{mpp} = 8,29 \text{ A}$
 $I_{sc} = 8,61 \text{ A}$

Zatem napięcia nominalne oraz maksymalne i minimalne wyniosą:

$$U_{mppt \text{ nom}} = 6 \cdot U_{mppt \text{ nom}} = 6 \cdot 30,15 = 180,9 \text{ V}$$

$$U_{oc \text{ max}} = U_{oc \text{ STC}} + (\beta \cdot U_{oc \text{ STC}} \cdot \Delta T_{oc}) = 37,89 + [(0,3/100) \cdot 37,89 \cdot 25] = 40,73 \text{ V}$$

$$U_{mppt (T=+70 \text{ st. C})} = U_{mppt \text{ nom}} - (U_{oc} \cdot \beta \cdot \Delta T_{max}) = 30,15 - [37,89 \cdot 0,3/100 \cdot (70-25)] = 25,03 \text{ V}$$

$$U_{mppt (T=-20 \text{ st. C})} = U_{mppt \text{ nom}} + (U_{oc} \cdot \beta \cdot \Delta_{min} T) = 30,15 - [37,89 \cdot 0,3/100 \cdot (25+20)] = 40,38 \text{ V}$$

Maksymalna oraz minimalna liczba paneli połączonych szeregowo tworzących gałąź przyłączona do falownika wynosi:

$$n_{max} = \frac{U_{max f}}{U_{oc \text{ max}}} = \frac{450}{40,73} = 11,04 \Rightarrow n_{max} = 11$$

$$n_{min} = \frac{U_{mppt \text{ min } f}}{U_{mpp \text{ min}}} = \frac{175}{40,38} = 4,33 \Rightarrow n_{min} = 4$$

W rozpatrywanym przykładzie wymagana liczba paneli PV wyniesie: $n = \frac{1500}{250} = 6 \in (4 - 11)$.

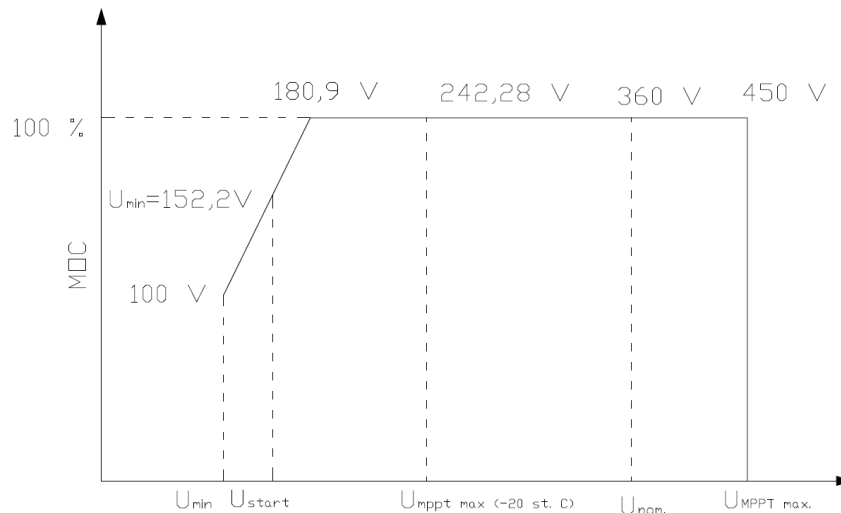
$$P_{GPV} = 1500 \text{ W} \in (0,9 - 1,18)P_f$$

Napięcia na zaciskach gałęzi tworzonej przez sześć szeregowo połączonych paneli wyniosą odpowiednio:

$$U_{mppt/n=6 (T=+70 \text{ st. C})} = 6 \cdot 25,03 \text{ V} = 150,18 \text{ V}$$

$$U_{mppt (T=-20 \text{ st. C})/n=6} = 6 \cdot 40,38 \text{ V} = 242,28 \text{ V}$$

Na **rys. 3** został przedstawiony napięciowy zakres pracy falownika **Growatt MIC 1500 TL-X** w odniesieniu do napięć łańcucha 6 paneli **ZX-P6-60-250/P**.



Rys. 3: Charakterystyka mocowo-napięciowa falownika Growatt 1500 TL z określeniem charakterystycznych napięć projektowanego generatora PV na bazie paneli **ZX P6-60-250/P**

Analiza **rys.3** oraz uzyskanych wyników obliczeń pozwala na wyciągnięcie interesujących wniosków:

$$U_{mppt\ max.} = 150,18\ V \approx U_{start} = 150\ V$$

$$U_{mppt\ min.} = 242,28\ V \ll U_{nm} = 360\ V$$

Porównanie wyników obliczeń z danymi katalogowymi falownika pozwala na wyciągnięcie wniosków, że falownik w okresie letnim nigdy nie będzie pracował z mocą optymalną. Napięciowy zakres generatora PV spowoduje pracę z obniżoną mocą oraz obniżoną sprawnością falownika. Wynika z tego, że należy przyjąć panele o mniejszej mocy np. 200 Wp i powtórzyć obliczenia w celu sprawdzenia położenia napięć generatora PV na charakterystyce mocowo-napięciowej przyjętego falownika. Ten problem pozostawiam Czytelnikom.

Literatura:

1. B. Szymański – Instalacje fotowoltaiczne – GlobEnergia, Kraków - wydanie VI - 2017 r.
2. M. T. Sarniak – Systemy fotowoltaiczne – Grupa Medium Sp. z o. o. Sp. K, Warszawa - wydanie I - 2015 r.
3. Karty katalogowe falowników oraz paneli fotowoltaicznych
4. PN-EN 12831:2017-08 Instalacje ogrzewcze w budynkach. Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego.
5. J. Wiatr; M. Orzechowski - Poradnik Projektanta Elektryka – wydanie VI 2021 (w przygotowaniu) Grupa Medium Sp. z o.o. Sp. K.