

doi:10.15199/48.2023.09.051

Metody śledzenia punktu MPP modułu fotowoltaicznego

Streszczenie. W pracy przedstawiono metody śledzenia punktu mocy maksymalnej (MPPT) modułu fotowoltaicznego (PV) pracującego w warunkach zmiennego promieniowania słonecznego i temperatury otoczenia. Do wyznaczenia położenia punktu mocy maksymalnej (MPP) dla modułu PV wykorzystano metody inteligencji obliczeniowej. Aby zoptymalizować jakość śledzenia tego punktu, opracowano metodę sterowania ślizgowego przekształtnikiem DC/DC która wykorzystuje możliwość regulacji prądu przekształtnika. Opracowane metody z powodzeniem wykorzystano w badaniu symulacyjnym metod MPPT modułu PV w warunkach szybkich zmian wartości natężenia promieniowania słonecznego i temperatury modułu.

Abstract. This paper presents methods for tracking the maximum power point (MPPT) of a photovoltaic (PV) module operating under varying solar radiation and ambient temperature conditions. Computational intelligence methods were used to determine the position of the PV module's maximum power point (MPP). To optimize the quality of MPP tracking, a sliding control method for the DC/DC converter was developed that takes advantage of the converter's current control capability. The developed methods were successfully used in a simulation study of the MPPT methods of the PV module under conditions of rapid changes in the solar irradiance and temperature of the module. (**Methods for tracking the MPP point of a photovoltaic module**).

Słowa kluczowe: promieniowania słoneczne, algorytm roju PSO, przekształtnik Boost, sterowanie ślizgowe SMC.

Keywords: Solar radiation, PSO swarm algorithm, Boost converter, SMC sliding control.

Wstęp

Analizując obecne trendy i wytyczne w Unii Europejskiej, rozwiązania oparte na odnawialnych źródłach energii są naturalnym kierunkiem rozwoju energetyki. Jednym z wybieranych przez inwestorów rozwiązań jest instalacja paneli fotowoltaicznych, wykorzystywanych do produkcji energii elektrycznej ze względu na możliwość wyczerpania konwencjonalnych źródeł energii i wysokiego kosztu oraz jego negatywnych skutków dla środowiska. Nie dziwi zatem fakt, że poszukiwane są rozwiązania dążące do maksymalizacji uzyskiwanej energii oraz kontroli i zarządzania produkcją [1]. Ponieważ moc dostarczana przez układ fotowoltaiczny jest iloczynem prądu i napięcia, należy odnaleźć punkt na charakterystyce prądowo-napięciowej, w którym ilość uzyskiwanej energii elektrycznej będzie największa, tzw. punktu mocy maksymalnej (MPP). Charakterystyka prądowo-napięciowa modułu fotowoltaicznego (PV) nie jest stała, lecz zależy od ilości promieniowania słonecznego oraz temperatury. Często systemy fotowoltaiczne wykorzystuje się do zasilania pomp wody przy braku innego zasilania.

W ostatnich latach prowadzone są intensywne badania mające na celu poprawę wydajności fotowoltaicznych systemów pompowych i wyznaczenia optymalnego MPP. W pracy [2] autor bada działanie Multicellular converter MCC z przekształtnikiem Boost i regulatorem MPPT. Optymalizację hybrydowego układu PV do zasilania pompy wody przedstawiono w pracy [3]. Poprawę wydajności solarnego systemu pompowania wody przy użyciu trójpoziomowej równoległej topologii wielokomórkowej konwertera zaprezentowano w pracy [4]. Do śledzenia MPP zastosowano tam sterowanie hybrydowe oparte na sieciach Petriego. W pracy [5] autorzy porównali efektywność dwóch metod śledzenia MPP: metody przyrostowego przewodnictwa (IC) oraz metodę zaburzenia i obserwacji (P&O). Ulepszony algorytm przyrostowego przewodnictwa, który opiera się na progresywnej i liniowej zmienności wielkości kroku algorytmu, który zapewnia systemowi szybsze wyznaczenie MPP w porównaniu z algorytmem konwencjonalnym zaprezentowano w pracy [6].

Uwzględniając powyższe zagadnienia, opracowano i przedstawiono w pracy metody śledzenia punktu MPP modułu PV pracującego w warunkach zmiennego promieniowania słonecznego i temperatury otoczenia.

Jako narzędzia do wyznaczenia położenia punktu MPP wykorzystano metody inteligencji obliczeniowej, co stanowi trzon rozwiązania rozpatrywanego problemu. W celu optymalizacji jakości śledzenia punktu MPP modułu, opracowano metodę sterowania ślizgowego (SMC) przekształtnikiem DC/DC, która wykorzystuje możliwość regulacji prądu przekształtnika. W pracy porównano również metody śledzenia MPP, opartej na sterowaniu nieliniowym, z najczęściej stosowaną metodą regulacji wykorzystującą regulator proporcjonalno - całkujący PI.

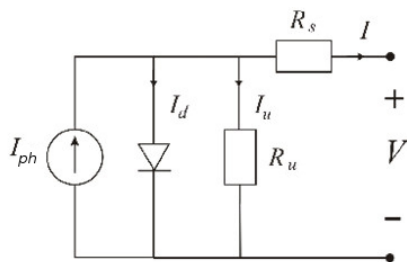
Metodologia badania symulacyjnego

Zgodnie z założeniami projektu, opracowany został program symulacyjny umożliwiający analizę porównawczą metod wyznaczenia punktu maksymalnej mocy (MPP) modułu fotowoltaicznego oraz metod sterowania parametrami pracy modułu w celu maksymalizacji uzysku energii w warunkach zmiennego nasłonecznienia oraz temperatury otoczenia. Badania zostały przeprowadzone w oparciu metodą symulacji komputerowej (MATLAB/Simulink) wykorzystującą modele matematyczne modułów fotowoltaicznych o różnym stopniu złożoności, model LTI przetwornika DC/DC typu Boost, oraz współpracujących z przetwornikiem układów sterowania.

Wykorzystane modele matematyczne modułów PV

Konstrukcja ogniwa słonecznego, określa dla danego nasłonecznienia, parę wielkości elektrycznych: prąd i napięcie. Wartość iloczynu prądu i napięcia, a więc moc generowana przez ogniwo, jest determinowana przez wartość rezystancji obciążenia. Zależności $I=f(U)$ oraz $P=f(U)$, nazwano charakterystykami ogniwa fotowoltaicznego. Optymalna wartość obciążenia dla modułu może być wyznaczana na drodze eksperymentu lub modelu matematycznego, którego podstawę stanowi schemat zastępczy przedstawiony na rysunku 1.

Przedstawiony na rysunku 1 schemat zawiera elementy modelujące strukturę wewnętrzną ogniwa. Parametrami stanowiącymi o jakości ogniwa są rezystancja szeregową R_s oraz rezystancja wewnętrzna R_u . Wartości poszczególnych rezystancji są zależne od jakości zastosowanych materiałów i są determinowane na etapie produkcji [7].



Rys.1. Jednoliniowy schemat zastępczy ogniwa fotowoltaicznego

Podstawowym zagadnieniem matematycznym w opisie modułu fotowoltaicznego jest wyznaczenie prądu wyjściowego I . Opierając się na prawie Kirchhoffa, można zapisać, że prąd wyjściowy I będzie równy fotoprądowi I_{ph} , pomniejszony o prądy upływowe na poszczególnych elementach ogniwa. W projektowaniu rozwiązań śledzenia MPP ogniwa fotowoltaicznego wykorzystano dwa modele matematyczne, służące do wyznaczania wartości prądu modułu fotowoltaicznego. Pierwszy - uproszczony, nie uwzględnia występowania rezystancji wewnętrznej R_u w module. Prąd modułu w podejściu uproszczonym, został opisany równaniem (1) [8]:

$$(1) \quad I = I_{ph} - I_r \left[\exp \left(\frac{q(V+I \cdot R_s)}{N_s \cdot k \cdot T_c} \right) - 1 \right]$$

gdzie: I_{ph} - fotoprąd, I_r - prąd nasycenia diody, V - napięcie modułu, T_c - jest temperaturą komórki modułu w [° K].

Natomiast w modelu drugim uwzględniono wpływ prądu na rezystancji wewnętrznej R_u , co uzupełnia wzór (1) o człon wyznaczający wartość upływu prądu. Zależność opisująca wartość prądu przy modelu dokładnym została przedstawiona poniżej [9]:

$$(2) \quad I = I_{ph} - I_r \left[\exp \left(\frac{q(V+I \cdot R_s)}{N_s \cdot k \cdot T_c} \right) - 1 \right] - \frac{V+R_s \cdot I}{R_u}$$

Podczas testowania metod śledzenia punktu MPP układ sterowania dysponuje modelem matematycznym modułu fotowoltaicznego. W celu odzwierciedlenia różnic między obiektem rzeczywistym, a dostępnym dla układu modelem w badaniu symulacyjnym przyjęto następujące założenia:

- układ sterowania dysponuje uproszczonym modelem matematycznym modułu PV, w którym wpływ rezystancji wewnętrznej półprzewodnika nie jest uwzględniany;
- w programie symulacyjnym obiekt rzeczywisty opisany jest modelem dokładniejszym wzorowanym na [9].

Poniżej przedstawione zostały zależności matematyczne tworzące uproszczony model fotoogniwa dostępny dla układu sterowania [9]:

$$(3) \quad I_{phT_1} = I_{scT_1} \cdot Suns$$

$$(4) \quad a = \frac{I_{scT_2} - I_{scT_1}}{I_{scT_1}} \cdot \frac{1}{T_2 - T_1}$$

$$(5) \quad I_{ph} = I_{phT_1} \cdot (1 + a \cdot (T_{aK} - T_1))$$

$$(6) \quad V_{tT_1} = \frac{k \cdot T_1}{q}$$

$$(7) \quad I_{rT_1} = \frac{I_{scT_1}}{e^{\frac{V_{ocT_1}}{A \cdot V_{tT_1}} - 1}}$$

$$(8) \quad I_{rT_2} = \frac{I_{scT_2}}{e^{\frac{V_{ocT_2}}{A \cdot V_{tT_2}} - 1}}$$

$$(9) \quad b = V_g \cdot \frac{q}{(A \cdot k)}$$

$$(10) \quad I_r = I_{rT_1} \cdot \frac{T_{aK}^3}{T_1} \cdot e^{-b \cdot \left(\frac{1}{T_{aK}} - \frac{1}{T_1} \right)}$$

$$(11) \quad X2v = \frac{I_{rT_1}}{A \cdot V_{tT_1}} \cdot e^{\frac{V_{ocT_1}}{A \cdot V_{tT_1}}}$$

$$(12) \quad dVdI_{V_{oc}} = \frac{-1.15}{2}$$

$$(13) \quad R_s = \frac{-dV dI_{V_{oc}} - 1}{X2v}$$

$$(14) \quad V_{tTa} = \frac{A \cdot k \cdot T_{aK}}{q}$$

$$(15) \quad V_c = \frac{V}{N_s}$$

$$(16) \quad I = I_{ph} - I_a - I_r \cdot \left(e^{\frac{V_c + I \cdot R_s}{V_{tTa}} - 1} \right) - \left(-1 - \left(I_r \cdot e^{\frac{V_c + I \cdot R_s}{V_{tTa}} - 1} \right) \cdot \frac{R_s}{V_{tTa}} \right)$$

gdzie: $T_{aK} = 273 + T_{ac}$, T_{ac} - temperatura robocza w [° C], $Suns$ - znormalizowane nasłonecznienie [W/m^2].

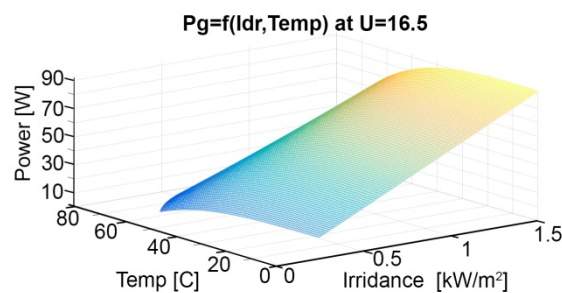
Obliczenia prądu modułu dane wzorem (16) prowadzone są rekurencyjnie.

Tabela 1. Stałe wykorzystywane w modelu modułu PV

Rodzaj	Wymiary [mm]
$k = 1,38e^{-23}$	stała Boltzmannna
$q = 1,6e^{-19}$	ładunek elementarny
$A = 1,2$	współczynnik jakości złącza
$V_g = 1,12$	szerokość pasma wzbronionego w eV
$N_s = 36$	liczba ogniw połączonych szeregowo
$T_1 = T_c + 25$	temperatura warunków STC
$V_{ocT_1} = 21,6/N_s$	V obwodu otwartego w warunkach STC przeliczone na komórkę
$I_{scT_1} = 3,80$	Prąd zwarciovowy ogniwa przy T_1
$V_{ocT_2} = 17,05/N_s$	V obwodu otwartego w przeliczeniu na komórkę przy T_2
$I_{scT_2} = 3,92$	Prąd zwarciovowy ogniwa przy T_2

Wielkością wejściową wykorzystanego modelu matematycznego jest napięcie. Za pomocą opracowanego programu, można wyznaczać wartość prądu modułu PV przy dowolnie zadawanej wartości napięcia oraz danych warunkach nasłonecznienia i temperatury. Moc wyjściowa modułu obliczana jest jako iloczyn wartości napięcia oraz odpowiadającego mu prądu. Z tego powodu opracowany model może z powodzeniem być zastosowany jako funkcja celu do realizacji zadania poszukiwania punktu MPP modułu z zastosowaniem obliczeniowych metod optymalizacji.

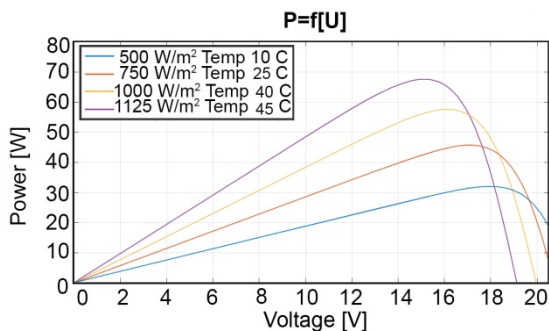
Na rysunku 2 zamieszczone zostały wyniki obliczeń mocy generowanej przez badany moduł, otrzymane na podstawie przedstawionego modelu.



Rys.2. Moc modułu w funkcji jego temperatury i promieniowania słonecznego, przy zadanym napięciu równym 16.5V

Z analizy wykresu z rysunku 2 wynika, że zastosowany model odzwierciedla znaczną nieliniowość zależności mocy generowanej od temperatury modułu. Na rysunku 3 zilustrowany został wpływ zadawanej wartości napięcia na wyniki obliczeń mocy generowanej dla wybranych wartości natężenia promieniowania słonecznego oraz temperatury.

Ocena otrzymanych wyników pozwala stwierdzić, że badany uproszczony model matematyczny modułu fotowoltaicznego spełnia stawiane mu oczekiwania i może być stosowany w dalszych badaniach symulacyjnych.



Rys.3. Wyniki obliczeń mocy generowanej w funkcji zadawanej wartości napięcia dla różnych temperatur modułu

Zastosowanie obliczeniowych metod optymalizacji do wyznaczania punktu MPP modułu fotowoltaicznego

Z punktu widzenia maksymalizacji uzysku energii elektrycznej ze źródeł PV kluczowe jest dokładne określenie położenia punktu MPP instalacji w określonych warunkach atmosferycznych. Kolejną istotną kwestią jest eliminacja oscylacji układu wokół MPP podczas ustalonych warunków nasłonecznienia i temperatury. Aby spełnić powyższe założenia, zaproponowano rozwiązanie problemu dokładnego wyznaczania położenia MPP z zastosowaniem obliczeniowych metody optymalizacji. Przetestowanych zostało kilka metod o różnym stopniu złożoności i podatności na utykanie w ekstremach lokalnych funkcji. W artykule zaprezentowano dwie metody. Jedną z nich to metoda optymalizacji rojem cząstek (PSO), mimo dużej złożoności obliczeniowej. W pracy badawczej metoda ta okazała się jednak użyteczna, z uwagi na niewielką wrażliwość na utknięcie w ekstremum lokalnym oraz możliwość uzyskania bardzo dokładnych wyników, przyjmowanych jako wartości odniesienia przy ocenie dokładności innych prób. Następnie zaprezentowano metodę Hooke-Jeeves'a [10], która zapewniła osiągnięcie wymaganej dokładności, przy znacznie niższej złożoności obliczeniowej.

Zamieszczone poniżej równania stanowią podstawę funkcjonowania algorytmu PSO [11]:

$$(17) v_{id}^{n+1} = v_{id}^n + c \cdot r_1^n (p_{id}^n - x_{id}^n) + c \cdot r_2^n (p_{gd}^n - x_{id}^n)$$

$$(18) x_{id}^{n+1} = x_{id}^n + v_{id}^{n+1}$$

gdzie: $d - 1, 2, \dots, D$, $i - 1, 2, \dots, N$, D – liczba zmiennych decyzyjnych, N – rozmiar stada, c – stała przyspieszenia, r_1 , r_2 – liczby losowe z rozkładu z przedziału $[0, 1]$, n – numer iteracji, p_i – optimum lokalne, p_g – optimum globalne.

Zaimplementowany na podstawie równań (17)-(18) algorytm PSO jako funkcja jest wykorzystywany do wyznaczania wartości napięcia modułu odpowiadającej punktowi MPP w danych warunkach nasłonecznienia i temperatury.

Do poszukiwania punktu MPP wykorzystano również metodę Hooke-Jeeves'a. Jest to metoda bezgradientowa o charakterze deterministycznym. Jej zasadniczą zaletą jest to, że funkcja celu nie musi być dana w postaci analitycznej,

wadą natomiast fakt, że metoda ta działa w sposób lokalny. Wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych wskazują, że metoda ta bardzo dobrze sprawdza tym zadaniu. Jest ona znacznie prostsza w implementacji oraz mniej wymagająca obliczeniowo niż algorytm PSO. Główną jej wadą to zbieżność lokalna, która nie wystąpiła w tych badaniach.

Model matematyczny przekształtnika DC/DC typu Boost

Zgodnie z założeniami celem projektu było opracowanie i przebadanie metod śledzenia punktu MPP instalacji fotowoltaicznej zapewniających jak najlepszą dokładność i dynamikę regulacji. W celu zbadania możliwości utrzymywania obiektu w zadanym punkcie pracy (MPPT) oraz minimalizacji oscylacji wokół niego, sporządzony został model matematyczny przekształtnika DC/DC typu Boost [12]. Zadaniem przekształtnika jest utrzymywanie wartości prądu w symulowanym układzie na zadanym poziomie. Wartość zadawana prądu odpowiada punktowi MPP modułu w danych warunkach klimatycznych i jest obliczana na podstawie jego modelu matematycznego, jedną z metod przedstawionych w poprzedniej części.

Równania modelu matematycznego przetwornicy Boost wyprowadzone zostały w oparciu o prawa Kirchhoffa. W celu uzyskania spójnego modelu klasy LTI zastosowano metodę uśredniania równań obwodów względem współczynnika wypełnienia dla tranzystora. Linearyzację otrzymanego modelu dokonano w obrębie punktu pracy odpowiadającego współczynnikowi wypełnienia równemu 0,4.

Poniżej zamieszczono otrzymane równania modelu LTI zapisane w formie macierzowej:

$$(19) \dot{x} = Ax + Bu$$

$$(20) y = Cx + Du$$

$$(21) \begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{(1-D)}{L} \\ \frac{(1-D)}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & \frac{v_o}{L} \\ 0 & \frac{1}{C} & -\frac{i_g}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_g \\ i_z \\ d \end{bmatrix}$$

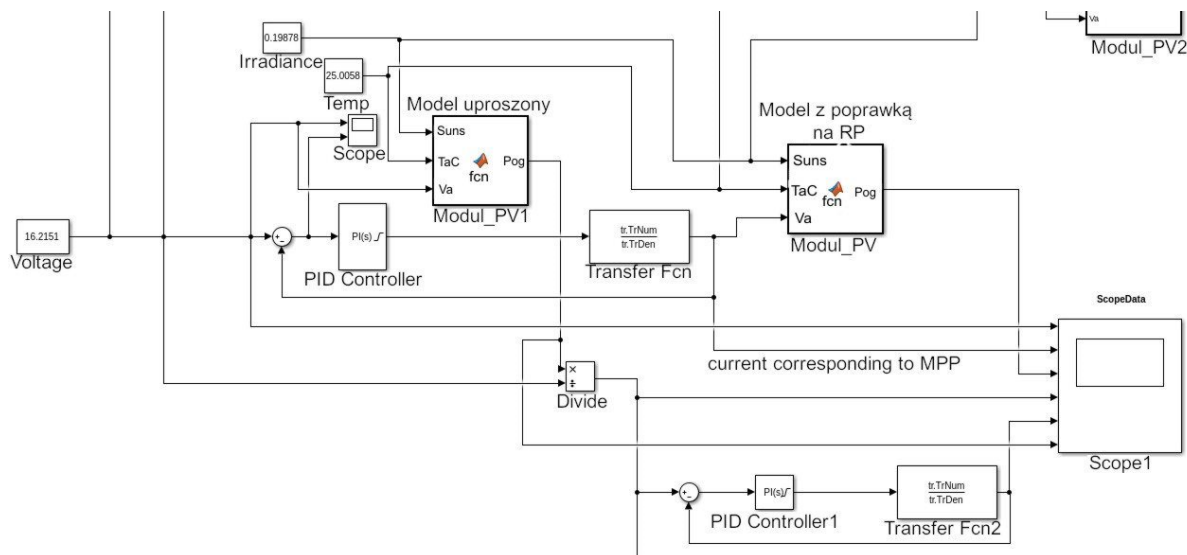
$$(22) V_c = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} + [0 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} V_g \\ i_z \\ d \end{bmatrix}$$

Na podstawie równań (19)-(22) został opracowany kod programu wyznaczającego potrzebne funkcje przejścia modelowanego przekształtnika.

Metody sterowania przekształtnika DC/DC

Do sterowania przekształtnikiem DC/DC opracowano metodę klasyczną, wykorzystującą regulator proporcjonalno-całkujący PI oraz metodę sterowania ślizgowego. W obydwoch przypadkach wartości zadawane prądu przekształtnika, odpowiadające punktowi MPP modułu fotowoltaicznego, obliczane były omówionymi wcześniej metodami, na bazie uproszczonej wersji modelu modułu. Wartość wyjściowa prądu przekształtnika obliczana jest na podstawie modelu przedstawionego w poprzedniej części. Poniżej zamieszczony został odpowiedni fragment modelu symulacyjnego przedstawiony na rysunku 4.

W badaniu symulacyjnym wykorzystane zostały dwa modele matematyczne fotogoniwa, przy czym dla układu sterowania dostępny jest wyłącznie model uproszczony. Zestawienie wyników obliczeń dla obydwóch modeli zostaną przedstawione w podsumowaniu. Układ sterowania przetwornicą DC/DC jest klasycznym układem z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego, natomiast układ sterowania mocą wyjściową modułu PV jest układem otwarto pętlowym bazującym na modelu matematycznym obiektu kontroli.



Rys.4: Fragment modelu realizujący symulację sterowania przekształtnika za pomocą regulatora PI

Sterowanie ślizgowe SMC

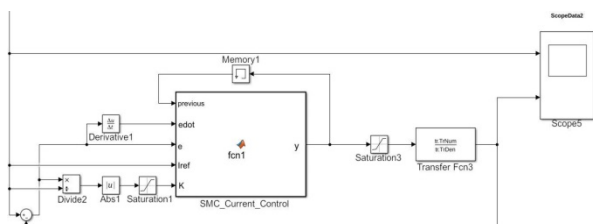
Sterowanie ślizgowe zapewnia znacznie lepsze rezultaty w zakresie utrzymywania wartości zadanej parametru regulacji [13], niż jest to możliwe w przypadku użycia klasycznego regulatora PI. Metoda ta pozwala na bardzo szybkie obniżenie wartości uchybu regulacji, do zadanego poziomu. Maksymalna dopuszczalna wartość błędu nazywana histerezą stanowi parametr regulatora i ma zasadniczy wpływ na przebieg funkcji sterującej. Bardzo istotną zaletą sterowania ślizgowego jest więc prosta zależność pomiędzy wymaganą precyzją regulacji wielkości wyjściowej układu, a zmiennością wartości funkcji sterującej.

W omawianym przypadku funkcją sterującą jest wartość współczynnika wypełnienia dla klucza tranzystorowego zawartego w przerywaczu Boost. Z tego powodu stosując metodę sterowania SMC możemy w łatwy sposób uzależnić wymaganą częstotliwość pracy klucza tranzystorowego od żądanej precyzji regulacji. Warunkiem koniecznym do tego by metoda SMC mogła być zastosowana jest by funkcje sterujące oddziaływały na wartość pochodnej z wektora stanu układu w sposób przeciwny. W omawianym przypadku spełnienie tego warunku jest całkowicie naturalne, ponieważ zwiększanie czasu przewodzenia tranzystora przerywacza wnosi skutek odwrotny dla wartości prądu na wyjściu układu, niż jego zmniejszanie. Warunek ten można zapisać w następujący sposób:

$$(23) \quad (f_1 \cdot \dot{e}) \cdot (f_2 \cdot \dot{e}) < 0$$

Jeżeli warunek (23) jest spełniony to wartość funkcji sterującej wyznaczana jest w następujący sposób:

$$(24) \quad \dot{x} = \frac{1}{f_2 \cdot \dot{e} - f_1 \cdot \dot{e}} (f_2 \cdot \dot{e} - f_1 \cdot \dot{e})$$



Rys.5. Fragment schematu modelu symulacyjnego układu regulacji wykorzystującego regulator ślizgowy SMC

W przypadku gdy uchyb regulacji mieści się w zadanym przedziale histerezy wartość funkcji sterującej (24) nie ulega zmianie. W prezentowanym podejściu skupiono się na analizie dynamiki układu w zależności od stosowanej metody kontroli, z tego powodu pominięta została warstwa fizyczna układu sterowania.

Na rysunku 5 przedstawiony został fragment modelu symulacyjnego realizujący sterowanie przekształtnikiem DC/DC metodą ślizgową.

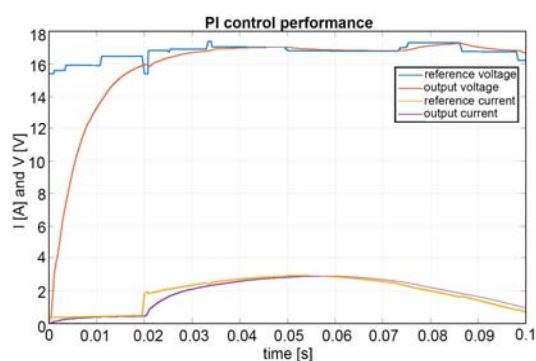
Przebieg symulacji

Celem badania symulacyjnego było porównanie efektywności śledzenia punktu MPP układu badanymi metodami sterowania. W obu przypadkach wartości zadawane prądu obciążenia modułu obliczane są metodą Hooke-Jeeves'a na podstawie omawianego wcześniej uproszczonego modelu generatora fotowoltaicznego. Z uwagi na to, że badanie symulacyjne dotyczy dynamiki przetwornika DC/DC (bardzo niska stała czasowa) do celów testowych przyjęto dużą szybkość zmienności warunków nasłonecznienia w funkcji czasu (możliwa obserwacja dynamiki układu). W trakcie trwania symulacji wartość zadawana prądu przekształtnika uaktualniana jest cyklicznie ze stałym krokiem czasowym. Ponadto wpływ wartości chwilowych nasłonecznienia na wartości chwilowe temperatury modułu został uwzględniony za pomocą liniowego modelu [14], dynamika procesu nagrzewania została pominięta ze względu na bardzo dużą stałą czasową. Badanie symulacyjne przeprowadzone zostało dla zmian wartości natężenia promieniowania słonecznego, które następują w sposób ciągły oraz w sposób skokowy.

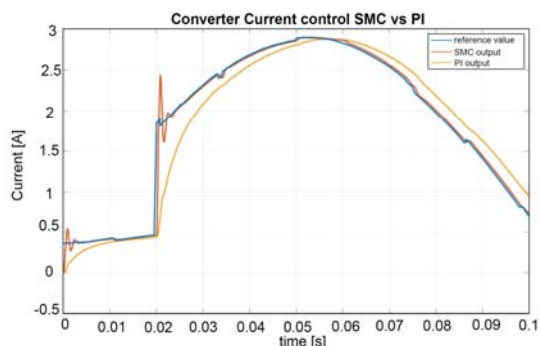
Wyniki symulacji zostały porównane z wynikami otrzymanymi przy zastosowaniu bardziej złożonego modelu modułu fotowoltaicznego. Zestawienie to pokazuje, że układ z otwartą pętlą nie jest w stanie odnaleźć dokładnej wartości prądu obciążenie rzeczywistego modułu fotowoltaicznego odpowiadającej punktowi MPP, ponieważ bazuje on na wynikach obliczeń obciążonych błędem wynikającym z przyjętych założeń upraszczających. Rozwiązaniem tego problemu może być opracowanie adaptacyjnego algorytmu obliczania poprawki wartości zadawanej prądu. Takie rozwiązanie umożliwiło by niemal całkowitą eliminację oscylacji w stanie ustalonym pracy układu.

Podsumowanie

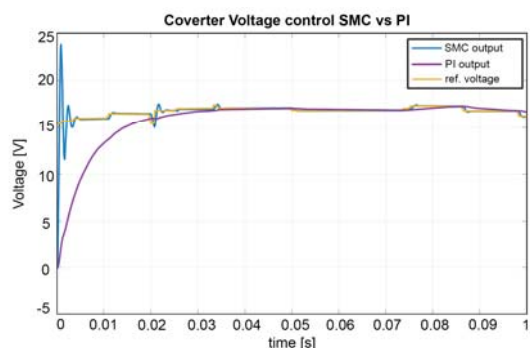
Zgodnie z założeniami projektu, opracowana została metoda kontroli punktu pracy modułu fotowoltaicznego oparta na jego modelu matematycznym. Ideą stosowania metody z otwartą pętlą jest eliminacja oscylacji wokół punktu MPP w stanie ustalonym pracy układu. Efektem pracy w tym zakresie jest postawienie problemu adaptacyjnej korekcji położenia punktu MPP wyznaczonego na bazie modelu matematycznego fotoogniwa. Opracowano i przetestowano w środowisku symulacyjnym program realizujący sterowanie przekształtnikiem DC/DC za pomocą metody ślizgowej. Program ten został następnie z wykorzystany w badaniu symulacyjnym śledzenia punktu MPP w warunkach szybkich zmian wartości natężenia promieniowania słonecznego i temperatury modułu. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunkach 6-8.



Rys.6. Porównanie przebiegu prądu oraz napięcia przy wykorzystaniu regulatora PI



Rys.7. Porównanie przebiegu prądu przy wykorzystaniu regulatora PI oraz regulatora SMC



Rys.8. Porównanie przebiegu napięcia przy wykorzystaniu regulatora PI oraz regulatora SMC

Uzyskane wyniki dowodzą, że opracowana implementacja metody ślizgowej zapewnia znacznie lepszą jakość śledzenia punktu MPP niż metoda klasyczna z regulatorem PI.

Ponadto wykazano, że widoczne na zamieszczonych wykresach duże oscylacje, występują wyłącznie w przypadku dużych skokowych zmian wartości zadawanej. W analizowanym zastosowaniu takiej sytuacji odpowiadała by skokowa zmiana wartości natężenia promieniowania słonecznego, lub temperatury modułu. W rzeczywistych warunkach jest to nie możliwe zatem stwierdzić można, że przedstawiony program sterujący spełnia założenia projektowe.

Autor: dr inż. Grzegorz Dralus, Politechnika Rzeszowska, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, ul. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, E-mail: gregor@prz.edu.pl;

LITERATURA

- [1] Dec G., Dralus G., Kwiatkowski B., Mazur D., Forecasting Models of Energy Generation by PV Panels Using Fuzzy Logic, *Energies*, (2021), 14(6), 1676
- [2] Aashoor F.A.O., Robinson F.V.P., Maximum power point tracking of photovoltaic water pumping system using fuzzy logic controller, *Power Engineering Conference (UPEC), 48th International Universities*, (2013), pp. 1–5
- [3] Belabbas B., Allaoui T., Tadjine M., Denai M., Power management and control strategies for off-grid hybrid power systems with renewable energies and storage, *Energy Systems*, (2017), pp.1–30
- [4] Miloudi K., Sellami M., Allaoui T., Boukhilif R., Denai M., Performance enhancement of a solar water pumping system using a new three level parallel multicellular converter topology, *Przegląd Elektrotechniczny*, 97 (2021), nr 12., pp. 7-13
- [5] Saidi K., Maammoun M., Bounekhla M., Comparative study of incremental conductance and perturb & observe MPPT methods for photovoltaic system, *2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS)*, Hammamet, Tunisia, (2017), pp. 1-6,
- [6] Hebchi M., Kouzou A., Choucha A., Improved Incremental conductance algorithm for MPPT in Photovoltaic System, *18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, Monastir, Tunisia, (2021), pp. 1271-1278
- [7] Koźbiał T., Generatory fotowoltaiczne w kontekście doboru elementów składowych oraz ochrony przeciwpożarowej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 96 (2020), nr 11, 208-212
- [8] Dahech K., Allouche, M., Damak T., Tadeo F. Backstepping sliding mode control for maximum power point tracking of a photovoltaic system. *Electr. Power Syst. Res.*(2017), p.182–188
- [9] Khatib T., Elmenreich W., Modeling of Photovoltaic Systems Using MATLAB: Simplified Green Codes, *Wiley*, (2016)
- [10] Zhang Y.J., Zhou W., Peng X., Hooke-jeves bat algorithm for systems of nonlinear equations, *13th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, Guilin, China, (2017), pp. 542-547
- [11] Korab R., Owczarek R., Połomski M., Optymalizacja nastaw przesuwników fazowych z wykorzystaniem algorytmu roju cząstek, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr 3, 60-64
- [12] Ibrahim H.E., Ibrahim M., Comparison Between Fuzzy and P&O Control for MPPT for Photovoltaic System Using Boost Converter, *Journal of Energy Technology Policy*, (2012), vol. 2, No. 6, pp. 1–11
- [13] Taouni A., Touati A., Majdoul M., Improved strategy of an MPPT based on the sliding mode control for a PV system, *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, June (2020), vol. 10, No.3, pp. 3074-3085
- [14] Tina G.M., Bardhi M., Grandi G., Comparison of PV Cell Temperature Estimation by Different Thermal Power Exchange Calculation Methods. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Santiago de Compostela, (2012)