

Ćwiczenie 11M Poszukiwanie punktu mocy maksymalnej modułu fotowoltaicznego

wer. 1.2.2, 2016

opracowanie: Łukasz Starzak

Politechnika Łódzka, Katedra Mikroelektroniki i Technik Informatycznych

A. Układ pomiarowy

Elementy układu pomiarowego

Układ śledzenia punktu mocy maksymalnej (MPPT) posiada opisane wejście (*Input* – moduł fotowoltaiczny), wyjście (*Load* – odbiornik), zaciski zasilania 12 V oraz złącze interfejsu szeregowego (RS-232). Na wyświetlaczu podawane są informacje zgodnie z rys. 1. Przez interfejs RS-232 układ przesyła dane o kolejnych punktach pracy w następującej kolejności:

- numer kolejny punktu,
- moc wejściowa P_{pv} ,
- prąd wejściowy I_{pv} ,
- napięcie wejściowe U_{pv} ,
- napięcie wyjściowe U_L ,
- współczynnik wypełnienia D .

moc wejściowa P_{pv}	napięcie wejściowe U_{pv}
prąd wejściowy I_{pv}	napięcie wyjściowe U_L

Rys. 1. Układ informacji na wyświetlaczu układu MPPT

W ćwiczeniu moduł będzie obciążony odbiornikiem o charakterze:

- rezystancji (R) 75 Ω (ze zmianą na wartość alternatywną 50 Ω) – obciążenie elektroniczne pracujące w trybie CR;
- źródła napięcia (E – jak np. akumulator) 13,5 V (ze zmianą na wartość alternatywną 12 V) o rezystancji wewnętrznej $R_{int} = 0,47 \Omega$ – fizyczny model akumulatora ERCD lub obciążenie elektroniczne pracujące w trybie CV z szeregowo połączonym opornikiem.

Obciążenie elektroniczne posłuży również za emulator metody ułamka napięcia rozwarcia.

Obciążenie elektroniczne składa się z modułu głównego (skrajny po prawej, bez zacisków mocujących) i dwóch modułów kanałów (z zaciskami mocującymi na dole). Kanały numerowane są od lewej zgodnie z kolejnością pojedynczych slotów. W niniejszym ćwiczeniu należy wykorzystać kanał o wyższym zakresie napięciowym.

Moduł fotowoltaiczny (PV) posiada po dwa wyprowadzenia biegunu dodatniego i ujemnego. Służą one do pomiaru prądu i napięcia w układzie Kelvina, tj.:

- do krótszej pary przewodów (wyprowadzeń napięciowych) może być przyłączony wyłącznie woltomierz;
- natomiast wszelkie obciążenia wraz z amperomierzem należy przyłączać poprzez dłuższą parę przewodów (wyprowadzenia prądowe).

Moduł fotowoltaiczny i układ MPPT

1. Odczytać i zanotować nominalne napięcie rozwarcia modułu PV.
2. Umieścić moduł PV w naświetlarce.
3. Do wyprowadzeń napięciowych z modułu PV przyłączyć woltomierz.
4. Włączyć lampy ustawiając moc na 290 W.
5. Poprzez interfejs szeregowy przyłączyć układ MPPT do jednego z portów COM komputera.
6. Uruchomić program HyperTerminal i utworzyć nowe połączenie poprzez użyty port, z prędkością transmisji 9600 bd, bez kontroli transmisji (sterowania przepływem) i z domyślnymi pozostałymi parametrami.
7. W programie HyperTerminal wybrać *File* ▶ *Properties* ▶ *Settings* i upewnić się, że ustawiony jest maksymalny możliwy rozmiar bufora (*Backscroll buffer lines*) – 500 linii.
8. Do zacisków 12 V układu MPPT doprowadzić zasilanie z zasilacza napięcia stałego. Załączenie zasilacza powinno spowodować wyświetlenie nagłówka na terminalu.

Obciążenie

9. Skonfigurować obciążenie elektroniczne:
 - a) załączyć jego zasilanie;
 - b) na module głównym przyciskiem *Chan* wybrać numer wykorzystywanego kanału;
 - c) wcisnąć *Mode* i strzałkami $\downarrow\uparrow$ wybrać tryb stałej rezystancji *CRL*, zatwierdzić przyciskiem *Enter*;
 - d) wpisać podane wyżej rezystancje: jako *CRL1* – wartość podstawową, jako *CRL2* – wartość alternatywną;
 - e) na panelu używanego kanału przyciskiem *A/B* wybrać rezystancję podstawową *CRL1*, tj. opcję A, o czym świadczy świecenie kontrolki przycisku *A/B*.
10. Połączyć obwód prądowy:
 - a) przyłączyć obciążenie elektroniczne do wyjścia układu MPPT, zwracając uwagę na polaryzację w przypadku obciążenia elektronicznego;
 - b) ujemne wyprowadzenie prądowe modułu PV (zgodnie z polaryzacją wskazywaną przez woltomierz) połączyć z zaciskiem „-” wejścia układu MPPT;
 - c) dodatnie wyprowadzenie prądowe modułu PV połączyć z amperomierzem;
 - d) przygotować połączenie amperomierza z zaciskiem „+” wejścia układu MPPT, jednak na razie nie dokonywać tego połączenia, tak aby moduł pracował w stanie rozwarcia.
11. W przypadku korzystania z fizycznego modelu akumulatora, zestawić (nie podłączać do układu pomiarowego) odpowiedni układ z zasilacza prądu stałego, diody dużej mocy na radiatorze, kondensatora 100...1000 μF i opornika o podanej wyżej wartości.

B. Pomiary dla odbiornika o charakterze rezystancyjnym

Metoda wspinania

1. Zaczekać na ustabilizowanie się temperatury modułu, o czym świadczyć będzie stabilizacja jego napięcia rozwarcia mierzonego obecnie woltomierzem.
2. Uaktywnić obciążenie elektroniczne przyciskiem *Load* na panelu wykorzystywanego kanału.
3. Przyłączyć biegun dodatni modułu PV przez amperomierz do zacisku „+” wejścia układu MPPT. Przy

odłączaniu należy postępować w odwrotnej kolejności (tj. najpierw odłączyć moduł, potem dezaktywować wyjście obciążenia elektronicznego); w przeciwnym razie na wyjściu układu MPPT niepotrzebnie pojawi się dość wysokie napięcie (~50 V).

4. Dokonać pomiarów zmieniając moc lamp od 290 W do 520 W i z powrotem (przed wykonaniem niniejszego punktu należy najpierw przeczytać wszystkie podpunkty):
 - a) w każdym punkcie (mocy lamp):
 - mierząc zgrubnie czas, poczekać na względne ustabilizowanie punktu pracy układu MPPT w maksimum mocy (najlepiej obserwować w tym celu terminal – moc przez dłuższy czas nie powinna zmieniać się w górę);
 - zapisać z terminala dane U_{pv} , I_{pv} , U_L w punkcie o maksymalnej mocy P_{pv} ;
 - przejść do następnego punktu pomiarowego, zachowując w przybliżeniu jednakowy odstęp czasowy, tak aby grzanie modułu postępowało regularnie (nie jest natomiast wymagana stabilizacja jego temperatury);
 - b) dla maksymalnej mocy lamp:
 - przełączyć się na alternatywną rezystancję odbiornika *CRL2* (opcja B na obciążeniu elektronicznym),
 - powtórzyć ppkt a (wyłącznie dla podanej wyżej mocy lamp, tj. maksymalnej),
 - powrócić do podstawowej rezystancji odbiornika *CRL1* (opcja A),
 - ponownie poczekać na względne ustabilizowanie punktu pracy układu MPPT na wartości maksymalnej,
 - zapisać dłuższy czas naświetlania modułu w tym przypadku;
 - c) jeżeli grozi przepełnienie terminala (patrz część A pkt 7) – zapisać zawartość (patrz pkt 5).
5. Zapisać zawartość terminala – skopiować do schowka (menu *Edit* ▶ *Select All*, *Edit* ▶ *Copy*), a następnie wkleić do programu Notatnik.
6. Moc lamp pozostawić na wartości 290 W.
7. Odłączyć przewody od wejścia układu MPPT, a następnie odłączyć obciążenie elektroniczne od wyjścia tego układu.
8. Zdezaktywować wykorzystywany kanał obciążenia elektronicznego przyciskiem *Load*.

Metoda ułamka napięcia rozwarcia

9. Przekonfigurować obciążenie elektroniczne do roli układ MPPT pracującego na zasadzie ułamka napięcia rozwarcia:
 - a) wykorzystywany kanał przestawić w tryb stałonapięciowy CV (na module głównym przyciskiem *Chan* wybrać numer kanału, następnie wcisnąć *Mode*);
 - b) ustawić napięcie *CV1* na 0,75 nominalnego napięcia rozwarcia modułu PV (upewnić się, że wynik jest mniejszy od rzeczywistego napięcia rozwarcia wskazywanego na woltomierzu – w przeciwnym razie należy przyjąć współczynnik odpowiednio mniejszy od 0,75);
 - c) upewnić się, że na panelu używanego kanału wybrane jest napięcie *CV1*, tj. opcja A.
10. Zwracając uwagę na polaryzację napięcia, przyłączyć moduł PV poprzez amperomierz do wejścia obciążenia elektronicznego.
11. Obserwując wskazanie woltomierza, poczekać na zgrubną stabilizację temperatury modułu.
12. Uaktywnić obciążenie elektroniczne przyciskiem *Load* na panelu wykorzystywanego kanału.

13. Wykonać serię pomiarów dla tych samych wartości mocy lamp co w pkt. 4 (tj. od 290 W do 520 W i z powrotem):
 - zapisać dane U_{pv} , I_{pv} z mierników zewnętrznych (wskazania mierników obciążenia elektronicznego mogą być zbyt niestabilne);
 - przejść do następnego punktu pomiarowego, odczekawszy zgrubnie taki sam odstęp czasowy (w tym dłuższy dla maksymalnej mocy lamp), jak w przypadku metody wspinania, tak by uzyskać zbliżone warunki temperaturowe;
 - pominąć zmianę rezystancji odbiornika na alternatywną, natomiast uwzględnić odpowiednio dłuższy czas pomiaru zanotowany w pkt. 4.b.
14. Dezaktywować wyjście obciążenia elektronicznego. Moc lamp pozostawić na wartości 290 W.

Bez poszukiwania punktu maksymalnej mocy

15. Przekonfigurować obciążenie elektroniczne z powrotem do roli odbiornika rezystancyjnego o rezystancji podstawowej *CRL1* (patrz część A pkt 9.c–e).
16. Wykonać serię pomiarów powtarzając pkt. 11–14.

C. Pomiary dla odbiornika o charakterze źródła napięcia

Metoda wspinania

1. Odłączyć wejście obciążenia elektronicznego od modułu PV. Zwracając uwagę na polaryzację, wejście to lub fizyczny model akumulatora połączyć z wyjściem układu MPPT poprzez opornik szeregowy o podanej wyżej wartości rezystancji szeregowej akumulatora.
2. Jeżeli w roli odbiornika E wykorzystywane jest obciążenie elektroniczne:
 - a) wykorzystywany kanał obciążenia przestawić w tryb stałonapięciowy CV (na module głównym przyciskiem *Chan* wybrać numer kanału, następnie wcisnąć *Mode*);
 - b) wpisać podane wyżej (w części A) napięcia symulowanego akumulatora: jako *CV1* – wartość podstawową, jako *CV2* – wartość alternatywną;
 - c) upewnić się, że na panelu używanego kanału wybrane jest napięcie podstawowe *CV1*, tj. opcja A;
 - d) uaktywnić wyjście obciążenia przyciskiem *Load* na panelu wykorzystywanego kanału.
3. Jeżeli w roli odbiornika E wykorzystywany jest model fizyczny: na zasilaczu ustawić napięcie akumulatora podane wyżej.
4. Zacisk ujemny modułu PV połączyć z zaciskiem „-” wejścia układu MPPT lub fizycznego modelu akumulatora. W przypadku modelu fizycznego, odłączyć jego zacisk „+” od zasilacza.
5. Powtórzyć pomiary jak w pkt. 1–8 z części B, stosując odstępy czasowe jak dotychczas, przy czym:
 - w przypadku fizycznego modelu akumulatora, zamiast aktywacji/dezaktywacji wyjścia przyciskiem *Load*, należy przyłączyć/odłączyć model do/od zacisku „+” zasilacza;
 - jeżeli pkt 4.b (z części B) został już wykonany dla odbiornika rezystancyjnego, należy go pominąć; w przeciwnym razie należy go wykonać, przełączając się odpowiednio na napięcie alternatywne *CV2* (opcja B).

Bez poszukiwania punktu maksymalnej mocy

6. Zwracając uwagę na polaryzację napięcia, przyłączyć moduł PV poprzez amperomierz do wejścia obciążenia elektronicznego (pozostawiając w obwodzie także szeregowy opornik odzwierciedlający rezystancję szeregową akumulatora) lub do zacisków modelu fizycznego.

- Wykonać serię pomiarów powtarzając pkt. 11–14 z części B (w przypadku fizycznego modelu akumulatora stosując się do uwagi zamieszczonej w pkt. 5 powyżej).

Zakończenie pomiarów

- Odłączyć od układu odbiornik.
- Wyłączyć lampy.
- Wyłączyć zasilanie poszczególnych urządzeń i rozłączyć układ.

D. Opracowanie wyników

- Przeanalizować działanie układu poszukiwania punktu mocy maksymalnej według metody wspinania:
 - na podstawie zapisanej zawartości terminala dla odbiornika rezystancyjnego i metody wspinania, wykreślić (w razie potrzeby należy ograniczyć przedział czasu):
 - moc modułu P_{pv} i współczynnik wypełnienia D w funkcji czasu (kolejne próbki z terminala);
 - trajektorię punktu pracy modułu fotowoltaicznego (U_{pv} , I_{pv}) na tle wcześniej zmierzonych nieizotermicznych charakterystyk modułu $I_{pv} = f(U_{pv})$ dla różnych mocy lamp naświetlających;
 - trajektorię punktu pracy modułu fotowoltaicznego (U_{pv} , P_{pv}) na tle nieizotermicznych charakterystyk modułu $P_{pv} = f(U_{pv})$ dla różnych mocy lamp naświetlających (gdzie P_{pv} należy obliczyć jako $U_{pv} \cdot I_{pv}$);
 - przeanalizować uzyskane wykresy, w szczególności pod kątem:
 - działania zgodnego z zaimplementowaną metodą;
 - jakości działania w sensie bliskości ustalonego punktu pracy do punktu mocy maksymalnej (wziąć pod uwagę, że możliwe jest wystąpienie rozbieżności wskutek odmiennej temperatury modułu);
 - zachowania układu w pobliżu ustalonego punktu pracy;
 - działania układu po zmianie obciążenia (rezystancji lub napięcia w zależności od charakteru odbiornika).
- Dokonać analizy uzysku energetycznego dla poszczególnych przypadków odbiorników i metod poszukiwania punktu maksymalnej mocy:
 - na podstawie zanotowanych wyników U_{pv} , I_{pv} dla różnych mocy lamp naświetlających, dla każdego przypadku odbiornika i każdej metody MPPT (w tym braku MPPT) obliczyć moc modułu P_{pv} ;
 - na nieizotermiczne charakterystyki modułu $I_{pv} = f(U_{pv})$ dla różnych mocy lamp naświetlających, nanieść:
 - prostą pracy odbiornika rezystancyjnego (którą należy najpierw w tym celu obliczyć),
 - punkty pracy modułu (U_{pv} , I_{pv}) dla kolejnych mocy lamp naświetlających, dla tego odbiornika, dla 3 przypadków MPPT (metoda wspinania, metoda ułamka napięcia rozwarcia);
 - utworzyć tabelę z wartościami mocy oświetlenia i mocy modułów P_{pv} dla 3 przypadków MPPT, a następnie:
 - kolejnym wartościom mocy oświetlenia (rosnącym a następnie malejącym) należy przyporządkować określony, realny przedział godzin w ciągu dnia (o długości np. 1^h, 2^h);
 - obliczyć energię W_{pv} , jaka byłaby pozyskana z modułu dla każdego z przypadków MPPT w kolejnych przedziałach godzinowych, gdyby w całym przedziale odbierana była stała moc P_{pv} ;
 - obliczyć sumaryczną energię W_a , jaka zostałaby pozyskana z modułu w ciągu całego dnia dla każdego z przypadków MPPT;

- d) przeanalizować otrzymane wartości W_d w związku z tabelą i wykresem, porównując poszczególne przypadki MPPT pod względem uzysku energetycznego całkowitego i w poszczególnych przedziałach godzinowych (m.in. jak w ciągu dnia zmienia się rozbieżność między mocą odbieraną a mocą maksymalną dla danej mocy oświetlenia);
- e) powtórzyć pkt. b–d dla odbiornika o charakterze źródła napięcia (dla 2 przypadków MPPT);
- f) porównać skuteczność obu metod MPPT w obu przypadkach odbiorników.
3. Przeanalizować wpływ temperatury na uzysk energetyczny:
- a) wykreślić ponownie nieizotermiczne charakterystyki modułu $P_{pv} = f(U_{pv})$ dla różnych mocy oświetlenia;
- b) nanieść punkty pracy (U_{pv}, P_{pv}) dla odbiornika rezystancyjnego i metody wspinania;
- c) strzałkami zaznaczyć drogę punktu pracy w ciągu dnia;
- d) stwierdzić, w jaki sposób temperatura wpływa na moc odbieraną z modułu – uwzględniając, że podczas nagrzewania temperatura ta była niższa niż podczas chłodzenia dla tych samych mocy oświetlenia.
4. Dokonać analizy działania układu MPPT z metodą wspinania na poziomie bloku systemu fotowoltaicznego:
- a) na podstawie zanotowanych wyników w punkcie mocy maksymalnej dla odbiornika rezystancyjnego: U_{pv} , I_{pv} i U_L oraz znanej rezystancji odbiornika R_L , obliczyć moc wejściową P_{pv} , moc wyjściową P_L i sprawność układu η_{MPPT} ;
- b) wykreślić i opisać sprawność η_{MPPT} w funkcji mocy modułu P_{pv} ;
- c) ponownie wykreślić nieizotermiczne charakterystyki modułu $I_{pv} = f(U_{pv})$ i dla każdej mocy oświetlenia nanieść na nie:
- punkt pracy modułu (U_{pv}, I_{pv}) ,
 - hiperbolę $I \cdot U = P_{pv} = U_{pv} I_{pv}$, w którym to celu należy obliczyć odpowiedni zbiór punktów (U, I) ,
 - punkty pracy odbiornika (U_L, I_L) , do czego niezbędne będzie obliczenie prądu I_L ;
- d) na podstawie uzyskanego wykresu wykazać zgodność działania układu z ogólną zasadą działania układów MPPT (uwzględnić, że mogą wystąpić rozbieżności wynikające z wcześniej wyznaczonej sprawności przetwornicy).