

Krzysztof Oprzędkiewicz*, Janusz Teneta*

Problemy sterowania optymalnego zespołem orientowanych ogniw fotowoltaicznych

1. Uwagi wstępne

W pracy przedstawiono problemy sterowania optymalnego zespołem orientowanych ogniw fotowoltaicznych. Sterowanie ma być realizowane w dwupoziomowym, hierarchicznym systemie sterowania. Zadaniem rozważanego zespołu ogniw jest wyprodukowanie jak największej ilości energii elektrycznej przy jak najmniejszym zużyciu wyprodukowanej „samodzielnie” energii na sterowanie zespołu.

W pracy przedstawiono następujące zagadnienia:

- Opis rozważanego złożonego obiektu regulacji.
- Uwagi o algorytmach sterowania na obu poziomach systemu.
- Funkcja kosztu dla obiektu.
- Uwagi końcowe.

2. Obiekt regulacji

Rozważany w niniejszej pracy obiekt regulacji jest przykładem obiektu złożonego, którego podstawowym elementem jest pojedyncze orientowane ogniwo słoneczne, przedstawione na fotografii (rys. 1). Zespół takich ogniw sterowanych przez stopień nadrzędny, pokazany w uproszczeniu na rysunku 2 jest traktowany jako cały obiekt regulacji rozważany w niniejszej pracy.

Głównymi elementami hierarchicznego systemu pokazanego na rysunku 2 są:

- stopień bezpośredni, w skład którego wchodzi orientowane ogniwa słoneczne z własnymi, lokalnymi systemami sterowania;
- stopień nadrzędny zawierający system SCADA, którego platformą sprzętową jest panel wielofunkcyjny SIEMENS MP 370 TOUCH;

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, Katedra Automatyki

- opcjonalnie podczas konfiguracji, uruchamiania i testów dodatkowym elementem jest komputer z oprogramowaniem konfiguracyjnym i diagnostycznym dla pozostałych elementów systemu.

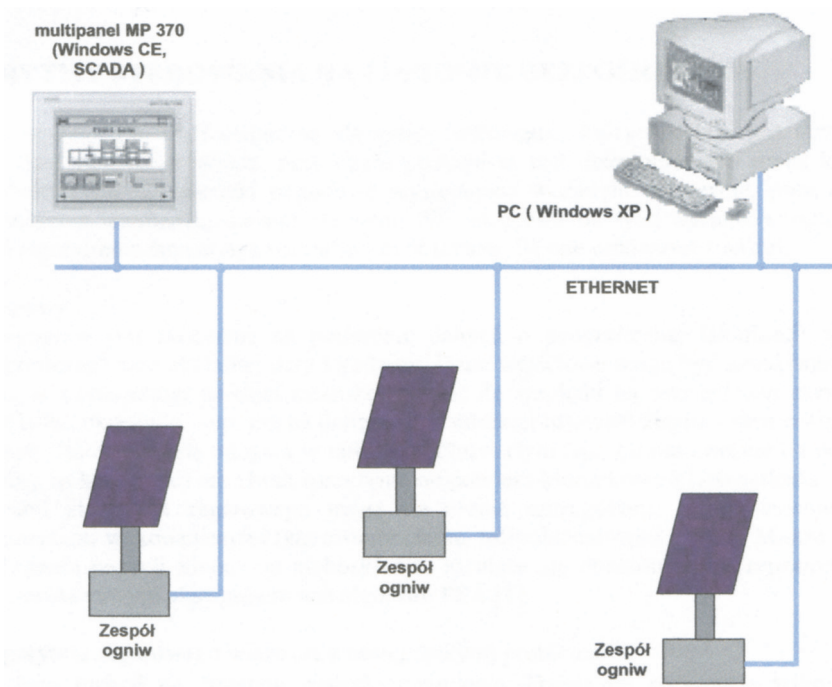


Rys. 1. Orientowane ogniwo słoneczne

Poszczególne elementy systemu są połączone z wykorzystaniem sieci ETHERNET. Dodatkowym, niepokazanym na schemacie (rys. 2) elementem systemu jest stacja pogodowa (czujnik prędkości wiatru i czujnik oświetlenia), która umożliwia „złożenie” wszystkich ogniw do pozycji poziomej w przypadku, gdy siła wiatru zagraża ich konstrukcji mechanicznej lub w przypadku całkowitego długotrwałego zachmurzenia.

Podstawowym elementem rozważanego systemu jest pojedyncze orientowane ogniwo słoneczne wraz z lokalnym systemem sterowania. Położenie ogniwa jest sterowane z wykorzystaniem silników elektrycznych z przekładniami, położenie ogniwa względem słońca odczytywane jest z wykorzystaniem czujnika kierunkowego, położenie elementów mechanicznych jest odczytywane z wykorzystaniem enkoderów. Sygnałami sterującymi są sygnały podawane na silniki wykonawcze. Na tym poziomie bezpośrednim są realizowane algorytmy regulacji nadążnej, których zadaniem jest utrzymanie zadanego położenia ogniwa względem Słońca podczas jego pozornego ruchu po niebie.

Na poziomie nadrzędnym są realizowane sterowania typu decyzyjnego bazujące na systemie ekspertowym oraz pomiarach ze stacji pogodowej. Sterowania te to zlecenia realizacji określonych algorytmów przez sterowniki poszczególnych ogniw.



Rys. 2. System sterowania zespołem ogniw

3. Uwagi o algorytmach sterowania rozważanym obiektem

W przypadku przedstawionego powyżej złożonego systemu sterowania na obu stopniach: bezpośrednim i nadrzędnym są realizowane nieco inne zadania i algorytmy sterowania. Zostaną one omówione poniżej.

3.1. Algorytmy sterowania na poziomie bezpośrednim

Na poziomie bezpośrednim realizowane są algorytmy sterowania, których celem jest utrzymanie ogniwa w pozycji optymalnej względem słońca, przy czym pozycja ta jest determinowana przez kilka czynników, z których najważniejszymi są: warunki pogodowe występujące w danym momencie, pora roku oraz warunki związane z konkretną lokalizacją danego elementu. W zależności od tych warunków można stosować kilka podstawowych algorytmów sterowania rozważanym obiektem. Są one omówione poniżej.

Algorytm zegarowy

Ustawienie fotoogniw jest zadawane na podstawie danych o geograficznej lokalizacji systemu (długości szerokość geograficzna) oraz aktualnej daty i godziny. Dane wejściowe

mogą być uzyskiwane z systemu GPS i zapamiętywane w wewnętrznej pamięci mikrokontrolera. Ze względu na oszczędność energii odbiornik GPS należy włączać tylko okresowo – np. raz na dobę w celu korekcji ustawień zegara czasu rzeczywistego (RTC) w mikrokontrolerze. Sterowanie się odbywa w układzie półotwartym (sprężenie zwrotne od położenia fotoogniw poprzez enkodery na każdej osi) oraz braku sprężenia od pomiaru kierunkowości oświetlenia. Metody realizacji algorytmu zegarowego mogą się różnić szczegółami: można stosować różne sposoby sterowania elementami wykonawczymi (sterowanie ciągłe, trójpołożeniowe i PWM). Można też stosować różne algorytmy obliczania pozycji słońca na nieboskłonie, różniące się dokładnością i zapotrzebowaniem na moc obliczeniową. Podstawowym algorytmem jest algorytm PSA [1].

Stosowanie algorytmu zegarowego wiąże się z następującymi problemami:

- Brak jego reakcji na zmienne warunki pogodowe. Działa on poprawnie tylko przy słonecznej i bezchmurnej pogodzie i nie zapewnia „ominięcia” chmur przy częściowym zachmurzeniu, ponadto energia jest zużywana niepotrzebnie na reorientację ogniw przy zachmurzeniu całkowitym, gdy najlepszą pozycją dla ogniwa jest ustawienie go nieruchomo w pozycji poziomej.
- Innym problemem podczas stosowania algorytmu zegarowego jest niedokładność pozycjonowania ogniwa związana z niedokładnością zegara odmierzającego czas oraz niedokładnością lokalizacji ogniwa wynikającą ze skończonej dokładności działania urządzeń GPS stosowanych do tego celu.

Algorytm czujnikowy

Algorytm czujnikowy umożliwia realizację sterowania w układzie zamkniętym ze sprzężeniem zwrotnym od kierunkowego czujnika oświetlenia. Przykładowe rozwiązanie takiego czujnika pokazane jest na fotografii (rys. 1). Można też stosować inne czujniki cechujące się większą dokładnością wskazań.

Głównymi problemami podczas stosowania tego algorytmu jest eliminacja zakłóceń, do których zaliczamy przykładowo:

- przypadkowe odbicia światła od budynków, padające tylko na czujnik, a niepadające na ogniwo,
- miejscowe „wędrujące” przejaśnienia w chmurach, powodujące śledzenie tych przejaśnień i zbędne zużycie energii.

W przypadku algorytmów czujnikowych niezwykle istotnym problemem jest też dobór odpowiedniej częstotliwości wykonywania pomiarów z uwzględnieniem mocy elektrycznej zużywanej przez tor pomiarowy. Ponieważ jednym z głównych kryteriów optymalizacyjnych jest energia zużywana przez układy sterujące, należy rozważyć użycie prostego regulatora proporcjonalno całkującego (PI), realizowanego na mikrokontrolerze. Algorytm powinien być uruchamiany z wykorzystaniem układu przerywania sprzętowego wyprowadzającego mikrokontroler ze stanu uśpienia.

Algorytm hybrydowy

Połączenie algorytmu zegarowego i czujnikowego. Pozwala eliminować błędy powstające w każdym z tych dwóch algorytmów przez wykorzystanie zalet drugiego algorytmu. Główna idea jego działania polega na tym, że ogniwo jest doprowadzane w pobliże położenia optymalnego z wykorzystaniem algorytmu zegarowego, natomiast dokładne pozycjonowanie wykonywane jest z użyciem czujników, przy czym maksymalne odchylenie od położenia wyznaczonego przez zegar nie może być przekroczone. To ograniczenie pozwala na uniknięcie zbędnego „śledzenia” przerw w chmurach.

Algorytm awaryjny

Jest on najprostszy ze wszystkich i polega na ustawieniu ogniwa nieruchomo w położeniu poziomym. Jest on stosowany w dwóch sytuacjach, zdeterminowanych przez warunki atmosferyczne:

- podczas silnego wiatru, który może uszkodzić konstrukcję mechaniczną ogniwa;
- w warunkach całkowitego zachmurzenia; w tej sytuacji nieruchome ustawienie poziomu zapewnia maksymalną produkcję energii ze światła rozproszonego przy jednoczesnym minimalnym zużyciu energii na sterowanie.

Platformą sprzętowo-programową do realizacji wszystkich algorytmów sterowania bezpośredniego jest specjalizowany sterownik bazujący na mikrokontrolerze. Konstrukcja i oprogramowanie sterownika są optymalizowane pod względem zużycia energii, podobnie jak realizowane przez sterowniki algorytmy sterowania. Każdy z tych algorytmów jest na etapie projektowania optymalizowany pod względem zużycia energii oraz jednocześnie czasu regulacji rozumianego jako czas przejścia z poprzedniego położenia do kolejnego.

Bazą teoretyczną do opracowania algorytmów sterowania na poziomie bezpośrednim jest problem LQ. Przykładowy algorytm energooszczędnego, dyskretnego sterowania zegarowego pojedynczym ogniwem jest omówiony w pracy [7], a przykład realizacji energooszczędnego algorytmu czujnikowego z wykorzystaniem regulatora P jest omówiony w pracy [8].

3.2. Algorytmy sterowania na poziomie nadrzędnym

Na poziomie nadrzędnym realizowane są algorytmy sterowania typu decyzyjnego, przy czym do ich realizacji są stosowane reguły eksperckie, wypracowane z wykorzystaniem danych pomiarowych zbieranych od kilku lat w Laboratorium Automatyki, Robotyki i Systemów Fotowoltaicznych w Katedrze Automatyki na Wydziale EAIiE AGH. Decyzje sterujące wypracowywane na tym poziomie obejmują:

- Wybór algorytmu sterowania zarówno pojedynczymi ogniwami, jak i całym zespołem. Do wyboru są wszystkie trzy typowe algorytmy pracy: zegarowy, czujnikowy i hybrydowy.

- Wybór momentu uruchomienia sterowania w celu dyslokacji ogniwa. Dyslokacja zbyt częsta powoduje zbędne zużycie energii, a zbyt rzadka powoduje, że ogniwo nie jest optymalnie ustawione względem słońca.
- Decyzję o realizacji algorytmu awaryjnego, która jest zlecana dla wszystkich elementów zespołu na podstawie danych z lokalnej stacji pogodowej, mierzącej zachmurzenie oraz prędkość wiatru oraz ewentualnie na podstawie danych kalendarzowych.

Dodatkowo stopień nadrzędny realizuje inne typowe funkcje do jakich zaliczamy:

- Monitorowanie i nadzór pracy całego systemu obejmujące przykładowo okresowe testy poprawności działania wszystkich elementów, raportowanie o zdarzeniach w systemie, archiwizację danych, monitorowanie pracy poszczególnych ogniw i ich sterowników itp.
- Prowadzenie bilansów energii wyprodukowanej przez poszczególne ogniwa i cały zespół.
- Zmiany wartości zadanych i parametrów dla algorytmów sterowania realizowanych przez poszczególne sterowniki.

Platformą sprzętowo-programową dla stopnia nadrzędnego jest przemysłowy panel operatorski z systemem SCADA, zrealizowany z użyciem typowych elementów przemysłowych. W przypadku stopnia nadrzędnego nie ma konieczności optymalizacji zużycia energii, gdyż stopień ten jest zasilany z sieci i nie musi być autonomiczny energetycznie.

4. Funkcja kosztu dla rozważanego złożonego obiektu regulacji

Funkcja kosztu dla rozważanego w pracy złożonego systemu sterowania powinna opisywać zużycie energii potrzebnej do sterowania systemem wyłącznie na poziomie bezpośrednim. Sumaryczne zużycie energii I przez złożony obiekt sterowania przedstawiony w poprzednim rozdziale może być przedstawione jako suma energii zużytej przez wszystkie systemy sterowania pojedynczych ogniw w przedziale czasu $[t_p; t_k]$:

$$I(t_p, t_k) = \sum_{k=1}^N I_k(t_p, t_k) \quad (1)$$

W (1) I_s oznacza sumaryczną energię zużyta na sterowanie wszystkich ogniw w danym przedziale czasu, I_k oznacza energię zużyta przez k -te ogniwo, a N oznacza ilość ogniw, które rozpatrujemy.

Z kolei energia zużyta przez k -te ogniwo w przedziale czasu $[t_p; t_k]$ może być przedstawiona jako suma energii zużytej na: sterowanie, czuwanie oraz komunikację ze stopniem nadrzędnym:

$$I_k(t_p, t_k) = I_k^c(t_p, t_k) + I_k^s(t_p, t_k) + I_k^{de}(t_p, t_k) \quad (2)$$

W (2) I_k^c oznacza zużycie energii na sterowanie, I_k^s oznacza zużycie energii na czuwanie w chwilach nieaktywności systemu sterowania a I_k^{de} oznacza zużycie energii na wymianę danych ze stopniem nadrzędnym.

Zauważmy, że funkcja kosztu opisana przez (1) i (2) jest niestacjonarna i losowa, gdyż jej wartość jest zdeterminowana przez czynniki atmosferyczne o charakterze zarówno losowym, jak i zależnym np. od pory roku. Jedyne składnik, który może być dokładnie oszacowany, to składnik związany z wymianą danych pomiędzy sterownikiem ogniwa i stopniem nadrzędnym, gdyż ilość wymienianych danych oraz konfiguracja komunikacji mogą być uznane za stałe podczas pracy systemu w rozważanym przedziale czasu.

Dodatkowo, można zauważyć, że funkcja (1) opisująca zużycie energii w układzie może być uznana za funkcję zdefiniowaną na skalach czasowych, z których jedna związana jest ze stanem pracy systemu sterowania, druga jest związana z okresem czuwania, a trzecia – związana z przejściem od czuwania do aktywności. Pojęcie skali czasowej oraz podstawowe narzędzia do analizy teoretycznej systemów na skalach czasowych są omówione np. w pracy [10].

5. Uwagi końcowe

Uwagi końcowe do pracy mogą być sformułowane następująco:

- Realizacja zadań sterowania optymalnego w rozważanym systemie wymaga rozwiązania kilku istotnych problemów z dziedziny Teorii Sterowania, sterowania cyfrowego, systemów wbudowanych i systemów ekspertowych.
- Przedmiotem dalszych badań praktyczno-aplikacyjnych w ramach tematyki prezentowanej w niniejszej pracy będzie konstrukcja poszczególnych elementów systemu sterowania (sterowniki ogniw, sieć komputerowa oraz oprogramowanie stopnia nadrzędnego) oraz optymalizacja pracy całego systemu w sensie funkcji kosztu opisanej w niniejszej pracy. W następnej kolejności przewiduje się doświadczalną weryfikację wyników teoretycznych i symulacyjnych.
- Charakter pracy rozważanego systemu sterowania pozwala na sformułowanie wniosku, że może on być interpretowany jako system dynamiczny na skalach czasowych i z tego względu jako jeden z kierunków dalszych badań można także wskazać budowę modelu matematycznego rozważanego systemu sterowania z wykorzystaniem tego podejścia.

Praca została sfinansowana ze środków NCN, umowa nr 6693/B/T02/2011/40.

Literatura

- [1] Blanco-Muriel M., *Computing The Solar Vector*. Solar Energy, vol. 70, No. 5, 2001, pp. 431441.
- [2] Chylaszek D., *Orientowany system fotowoltaiczny sterowany autonomicznym sterownikiem*. Praca dyplomowa magisterska zrealizowana w Katedrze Automatyki AGH pod kierunkiem J. Tenety w 2006 r.

- [3] Dubil Z., Dyrduł R., *Cyfrowe systemy sterowania nadążnym układem fotowoltaicznym*. Praca dyplomowa magisterska zrealizowana w Katedrze Automatyki AGH pod kierunkiem J. Chojnackiego i J. Tenety w roku 2007.
- [4] Lasnier F., Ang G., *Photovoltaic Engineering Handbook*. Adam Hilger Publishers, Bristol, UK, 1990.
- [5] Loque A., Hegedus S., *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Wiley & Sons Ltd, West Sussex, England, 2003.
- [6] Markvart T., Castaner L., *Practical Handbook of Photovoltaics. Fundamentals and Applications*. Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, 2003.
- [7] Mitkowski W., Oprzędkiewicz K., *Dyskretne sterowanie minimalno energetyczne obiektem II rzędu o niepewnych parametrach*. Praca zatwierdzona na XVII Krajową Konferencję Automatyki – KKA'2011, 19–22.06.2011 Kielce-Cedzyna (w druku).
- [8] Mitkowski W., Oprzędkiewicz K., *Regulator minimalnoenergetyczny dla obiektu II rzędu o niepewnych parametrach*. Automatyka (półrocznik AGH), t. 15, z. 2, 2011.
- [9] Robak S., *Analiza charakterystyk prądowo-napięciowych modułów fotowoltaicznych*. Praca dyplomowa magisterska zrealizowana w Katedrze Automatyki AGH pod kierunkiem J. Tenety w 2010 r.
- [10] Pawłuszewicz E., *Sterowalność, obserwowalności realizowalność systemów dynamicznych na skalach czasowych*. Wyd. Pol. Białostockiej, 2011 (w druku).
- [11] Teneta J., *Algorytmy sterowania orientowanymi systemami fotowoltaicznymi*. Rozprawa Doktorska, Katedra Automatyki Wydział EAIiE AGH, Kraków 2003.