

WOJCIECH INDIK

ELŻBIETA KANIA-KISIEL

ANDRZEJ POTOCKI

HENRYK SŁOTA

INSTYTUT INŻYNIERII I GOSPODARKI WODNEJ

POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

### KONCEPCJA WSPÓŁPRACY ELEKTROWNI WODNYCH Z SYSTEMEM ENERGETYCZNYM

Streszczenie: Dotychczasowe zasady pracy elektrowni wodnych podporządkowane są interesom Państwowej Dyspozycji Mocy. Racjonalnym wydaje się konieczność znalezienia rozwiązania kompromisowego, uwzględniającego także politykę energetyczną na zbiorniku, który jest elementem systemu energetycznego, przy zachowaniu nadrzędności celów realizowanych przez PDM. Zaproponowano pewną koncepcję podejścia do tego zagadnienia.

#### 1. Wprowadzenie

Energia elektryczna produkowana przez elektrownie wodne stanowi niewielki procent energii produkowanej w polskim systemie energetycznym. Przykładowo, w 1975 roku elektrownie wodne wraz z pompowymi wyprodukowały 2,4 TWh energii elektrycznej na ogólną ilość 97,2 TWh produkcji energii w Polsce [1]. Wynika stąd wniosek, że energia produkowana przez elektrownie wodne stanowi około 3% energii brutto. Zaznaczyć trzeba jednak, że możliwość natchmiestowego włączenia tego typu elektrowni do systemu powoduje wykorzystanie ich w szczycie zapotrzebowania i wówczas produkowana energia, choć procentowo niewielka, stanowi istotną wartość dla systemu. Ponadto dzięki możliwościom pracy w trybie nakazowo-interwencyjnym elektrownie wodne pełnią także rolę czynnika regulacyjnego częstotliwości w systemie, niwelując chwilowe wahania mocy pociągające za sobą spadek lub zwyżkę częstotliwości w sieci.

Niebagatelną zaletą elektrowni wodnych jest także fakt wykorzystania w nich naturalnego nośnika energii, jakim jest woda, nie powodującego zanieczyszczenia środowiska. Niestety, jak dotąd wykorzystano jedynie około 20% zasobów energii wodnej w Polsce [2].

Obecnie tryb pracy elektrowni wodnych ustalany jest nakazowo przez Państwową Dyspozycję Mocy /PDM/ dysponującą informacjami o potrzebach energe-

tycznych kraju w oparciu jedynie o stan wypełnienia danego zbiornika energetycznego w danym dniu. Zakładając, że problem maksymalizacji zaspokojenia potrzeb energetycznych Polski jest istotny, proponuje się optymalizację pracy osobno każdej elektrowni wodnej, stanowiącej element systemu energetycznego, ze względu na maksimum produkowanej energii w dłuższym horyzoncie czasu [4], [5]. Optymalne, proponowane ilości energii produkowanej przez daną elektrownię, wyznaczane na bazie prognozowanego dopływu do zbiornika, powinny stanowić dla PDM dodatkową informację o możliwościach energetycznych systemu. W oparciu o informacje o potrzebach energetycznych i potencjalnych możliwościach produkcji energii przez elektrownie wodne w dłuższym horyzoncie czasu PDM winna podejmować ostateczną decyzję o rozdziale obciążeń w systemie energetycznym.

Propozycja ta wiąże się z koniecznością wprowadzenia pewnych zmian dotyczących sposobów rozliczania elektrowni wodnych z efektów ich pracy. Obecnie podstawą ekonomicznego rozliczania elektrowni jest jej moc dyspozycyjna oraz moc szczytowa.

Moc dyspozycyjna jest to średnia moc osiągnięta przez elektrownię w miesiącu. Na obniżenie tej wielkości wpływają jedynie remonty i awarie technicznych urządzeń obiektu. Planowanie czasu pracy obiektu obejmuje horyzont dobowy i oparte jest na prognozie dopływu do zbiornika. Propozycje czasu pracy przestrzegane są dość ściśle przez PDM, która podejmuje jedynie decyzje co do umiejscowienia w dobie okresu w jakim elektrownia będzie pracować.

Drugą jednostką rozliczeniową jest moc szczytowa określana jako potencjalna możliwość pracy obiektu w godzinach szczytu. Wielkość ta nie decyduje wprawdzie o podstawowych zyskach, natomiast rzutuje na dodatkowe wynagrodzenie załogi elektrowni z tytułu premii. Każda awaria uniemożliwiająca pracę elektrowni w godzinach szczytu musi być zgłaszana do PDM i wtedy moc szczytowa elektrowni jest zerowa. Oczywiście, okres rozliczeniowy za tę moc jest zmienny i zależy od czasu trwania szczytu w dobie. Awaria powstała i usunięta poza tymi godzinami nie ma wpływu na wielkość mocy szczytowej. Tak więc, ponieważ moc szczytowa zależy w głównej mierze od stanu wody w zbiorniku, kierownictwo elektrowni zainteresowane jest w utrzymywaniu go na najwyższym poziomie wynikającym z ograniczeń rezerwy przeciwpowodziowej.

W przypadku mocy dyspozycyjnej elektrownia wodna nie traci finansowo z tytułu strat na poziomie wody, co jest rozwiązaniem rozsądnym, ponieważ niezależnie dochód przedsiębiorstwa od warunków hydrometeorologicznych. Jednocześnie fakt, że dyspozycyjność zależy od sprawności urządzeń mobilizuje załogę do dbałości o stan techniczny wyposażenia elektrowni.

Określony powyżej sposób rozliczania ekonomicznego zakładu, który wg zasad reformy gospodarczej jest jednostką samodzielną, jest słuszny z punktu widzenia samej elektrowni. Istnieje jednak obawa, że takie podejście doprowadzić może do ograniczenia pracy elektrowni do minimum i spracowywania jedynie tej ilości wody, jaka jest wymagana przez jej użytkowników poniżej zbiornika. Takie założenie oznacza zwiększoną pracę elektrowni ciepłych, a więc wzrost kosztów produkcji energii brutto, wynikający chociażby ze zwiększonego zużycia węgla. Podczas pracy elektrowni wodnych istnieją takie przedziały czasu, w których elektrownia wodna może dostarczać energię elektryczną do systemu w okresach dłuższych niż wynikałoby to z nakazowo-interwencyjnego charakteru jej pracy. Wiąże się to zazwyczaj z unikaniem zrzucającego ze zbiornika, który zawsze kojarzy się ze stratami energii potencjalnej zgromadzonej w danej objętości wody.

Biorąc pod uwagę, że elektrownie wodne stanowią najtańsze źródło energii, oczywistym jest, że udział energii przez nie produkowanej powinien być jak największy. Z punktu widzenia kosztów społecznych i ochrony środowiska/ ocenianych w kontekście globalnej ilości wyprodukowanej energii w Polsce wydaje się celowym zaproponowanie, aby każda elektrownia wodna była oceniana także poprzez sumaryczną ilość wyprodukowanej energii.

W zasadzie obydwie oceny pracy elektrowni wodnych /aktualna i proponowana/ doprowadzają, w okresie normalnych dopływów do zbiornika, do tej samej optymalnej strategii sterowania. Konfliktowość tych strategii występuje w momencie zwiększonych dopływów do zbiornika, gdzie w strategii aktualnej nie opłaca się spracowywać zbiornika przygotowując go na prognozowany dopływ.

Niniejsza praca przedstawia pewną koncepcję wypracowywania decyzji PDM dotyczących pracy i optymalnego wykorzystania elektrowni wodnych: w systemie energetycznym.

## 2. Dyskusja kryteriów oceny systemu energetycznego

Jak już wspomniano we wprowadzeniu decyzje PDM winny uwzględniać zdolności produkcyjne elektrowni wodnych w późniejszych okresach czasu. Okazuje się bowiem, że wyprodukowanie zbyt dużej ilości energii elektrycznej w jednym okresie czasu może zmniejszyć w sposób istotny zdolności produkcyjne elektrowni wodnej w późniejszym okresie. Znajomość tych skutków powinna być wykorzystana przez PDM przy ustalaniu na bieżąco najkorzystniejszego podziału obciążenia między wszystkie elektrownie systemu energetycznego, w tym ciepłe.

Formułując zadanie operacyjnego sterowania systemem energetycznym należy w pierwszej kolejności sprecyzować cele tego sterowania realizowanego

przez PDM. Istnieją tutaj dwie możliwości:

- 1 - celem sterowania jest maksymalizacja stopnia zaspokojenia potrzeb energetycznych, z równoczesną /ale podrzędną/ minimalizacją kosztów wytwarzania energii,
- 2 - celem sterowania jest racjonalne zaspokojenie potrzeb energetycznych poprzez minimalizację sumy kosztów wytwarzania energii oraz strat ponoszonych przez odbiorców na skutek deficytu mocy.

W przypadku pierwszym traktuje się energetykę jako usługową względem odbiorców energii, realizującą swoje zadania /wynikające z potrzeb/ w sposób optymalny z punktu widzenia kosztów własnych. W tak ujętym problemie nie wnikamy w relacje zachodzące między kosztami wytwarzania energii a stratami ponoszonymi na skutek jej braku. W przypadku drugim bierzemy pod uwagę tzw. koszty społeczne, czyli zarówno koszty wytwarzania energii jak i straty wynikające z jej braku. Zadanie pierwsze jest o wiele łatwiejsze od drugiego, dlatego też na nim skupimy uwagę.

Przyjmując, że celem sterowania systemem energetycznym jest przede wszystkim maksymalizacja stopnia zaspokojenia potrzeb odbiorców energii, można ograniczyć się do poszukiwania trajektorii mocy wytworzonej w przedziale czasu  $[t_0, T]$  minimalizującej funkcję celu w postaci:

$$K = \int_{t_0}^T r[P(t) - W(t)] dt, \quad /1/$$

gdzie:

$P(t)$  - przewidywane zapotrzebowanie mocy,

$W(t) = \sum_j w_j(t)$  - sumaryczna moc wytwarzana przez wszystkie elektrownie systemu,

$f(\cdot)$  - funkcja kary za niespełnienie potrzeb energetycznych /gdy

$P(t) \leq W(t)$  to  $r[P(t) - W(t)] = 0$  /.

$[t_0, T]$  - przedział czasu dla którego poszukuje się trajektorii mocy wytwarzanej,

$j=1, \dots, k$  - indeks elektrowni systemu.

Zbiór rozwiązań dopuszczalnych jest wyznaczony przez następujący układ warunków ograniczających:

$$0 \leq w_j(t) \leq w_j^{\max}(t)$$

$$\sum_j w_j(t) - P(t) \leq K$$

$$\int_{t_0}^T w_j(t) dt \leq E_j^{\text{pr}}, \quad /2/$$

gdzie:

$w_j^{\max}(t)$  - maksymalna moc chwilowa j-tej elektrowni,

$N$  - dopuszczalna nadwyżka mocy,

$E_j^T$  - maksymalna ilość energii możliwa do wyprodukowania przez j-tą elektrownię w przedziale czasu  $[t_0, T]$ ,

$j=1, \dots, k$ .

W tak sformułowanym zadaniu nie bierze się pod uwagę ścisłej zależności zachodzącej pomiędzy ilością energii wyprodukowanej przez elektrownię wodną w przedziale czasu  $[t_0, T]$  a stratami w produkcji energii w okresie późniejszym, tzn. dla  $t > T$ . Wielkość tych strat zależy od poziomu wody w zbiorniku energetycznym w chwili  $T$ , czyli:

$$S_{ew} = s[r_{zb}(T)],$$

gdzie:

$r_{zb}(t)$  - poziom wody w zbiorniku w chwili  $t$ , wynikający między innymi z trajektorii mocy wytwarzanej w czasie  $[t_0, t]$  przez elektrownię wodną,

$s(\cdot)$  - straty w produkcji energii w czasie  $t > T$  na skutek nieosiągnięcia optymalnego poziomu napełnienia zbiornika, wynikającego z najkorzystniejszej gospodarki wodnej na zbiorniku w dłuższym horyzoncie czasu; dla  $r_{zb}(T) = r_{zb}^{opt}(T)$   $s[r_{zb}(T)] = 0$

Chcąc uwzględnić powyższe straty energii w rachunku optymalizacyjnym należy brać pod uwagę kryterium<sup>1/</sup>:

$$K = \min_{w(t)} \left\{ \int_{t_0}^T [P(t) - w(t)] dt + s[r_{zb}(T)] \right\} \quad /4/$$

W przypadku przyjęcia innego systemu wag pomiędzy deficytem energii w przedziale czasu  $[t_0, T]$  a stratami w produkcji energii elektrowni wodnej w czasie  $t > T$  należy poszczególne człony tej funkcji celu pomnożyć przez odpowiednie współczynniki wagowe /we wzorze /4/ przyjęto relację 1:1/.

Przy tak sformułowanym zadaniu mogą zaistnieć przypadki, w których istnieje wiele rozwiązań optymalnych z punktu widzenia funkcji celu /4/, czyli dla których:

$$\int_{t_0}^T [P(t) - w(t)] dt + s[r_{zb}(T)] = K_{\min} \quad /5/$$

<sup>1/</sup> dla uproszczenia przyjęto, iż w sytemie energetycznym jest tylko jedna elektrownia wodna

gdzie:

$K_{\min}$  - minimalna wartość funkcji kryterialnej /4/.

Przypadki takie będą występować gdy zdolności produkcyjne elektrowni pozwalają na pełne zaspokojenie potrzeb energetycznych w pewnych przedziałach czasu. W takich sytuacjach należałoby dokonać powtórnej optymalizacji celem wyboru trajektorii  $w_j(t)$  dla  $j=1, \dots, k$ , najkorzystniejszych z punktu widzenia kosztów, a więc spełniających kryterium:

$$K' = \min_{w_j(t)} \int_{t_0}^T \sum_j k_j [w_j(t)] dt, \quad /6/$$

gdzie:

$k_j(\cdot)$  - funkcja kosztów wytwarzania mocy w  $j$ -tej elektrowni.

Zbiór rozwiązań dopuszczalnych tego zadania wyraża układ warunków /2/ uzupełniony równaniem /5/.

Obydwa powyższe zadania można rozwiązać w jednym modelu optymalizacyjnym z funkcją kryterialną:

$$K'' = \min_{w_j(t)} \left\{ A \left[ \int_{t_0}^T f[P(t) - W(t)] dt + s[r_{zb}(T)] \right] + \int_{t_0}^T \sum_j k_j [w_j(t)] dt \right\}, \quad /7/$$

w której współczynnik  $A$  powinien mieć wystarczająco dużą wartość, gwarantującą wybór rozwiązania optymalnego bliskiego uzyskiwanemu w optymalizacji dwustopniowej.

Łatwo zauważyć, iż ostatnia funkcja kryterialna /7/ może być również wykorzystana do rozwiązywania problemu sterowania systemem energetycznym, przed którym stawia się bardziej złożone cele, mianowicie racjonalne zaspokojenie potrzeb energetycznych poprzez minimalizację kosztów wytwarzania energii oraz strat ponoszonych przez jej odbiorców na skutek deficytu mocy. W takim przypadku rola współczynnika  $A$  będzie inna, gdyż wyrażać on będzie przyjętą proporcję między deficytem energii a kosztami jej wytwarzania.

Przedstawione koncepcje sterowania elektrowniami systemu energetycznego dotyczą etapu programowania prac elektrowni na pewien horyzont czasu  $[t_0, T]$ . Nie uwzględniają one więc problematyki bieżącego sterowania systemem energetycznym, realizowanego w czasie rzeczywistym w sposób on-line.

### 3. Literatura

- [1] Kopecki K. - "Jutro energetyczne Polski" WP, Warszawa 1981.
- [2] Kulikowski R. - "Analiza systemowa i jej zastosowanie" FWN, Warszawa 1977.
- [3] Łaski A. - "Elektrownie wodne, rozwiązania i dobór parametrów" WNT, Warszawa 1971.
- [4] Skota H. i zespół - "Opracowanie bądź uaktualnienie zasad i algorytmów sterowania zespołem zbiorników Rożnów-Czchów na Dunajcu przy uwzględnieniu zespołu zbiornikowego Czorsztyn-Sromowce" PR-7.08.03.03, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej PK, Kraków 1981.
- [5] Skota H. i zespół - "Opracowanie zasad i algorytmów sterowania zbiornikami wodnymi w dorzeczu Raby i Dunajca" PR-7.05.08.01, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej PK, Kraków 1982.

#### A CONCEPT OF WATER POWER PLANTS COOPERATION WITH AN ENERGY SYSTEM

Up to the present the rules of water power plants work has been submitted to the interest of the Power Authority. It seems reasonable to find a compromising solution which can also take into account energy policy on the reservoir which is an element of energy network, with keeping priority of the aims realised by the Power Authority. In this paper a certain approach to such a problem was presented.

#### ИДЕЯ СОТРУДНИЧЕСТВА ВОДНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Существующие до сих пор принципы работы водных электростанций подчиняются интересам РДМ. Рациональной кажется необходимость найти компромиссное, учитывающее тоже энергетическую политику на резервуаре, который становится элементом энергетической системы, при сохранении доминирующих целей осуществляемых РДМ. Предлагается определенную идею подхода к этому вопросу.