

ОПТИМІЗАЦІЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ КАСКАДІВ МАЛИХ ГЕС З ЗАСТОСУВАННЯМ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Нікіторович О.В.
Вінницький національний технічний університет
Зовнішньоекономічна асоціація «НОВОСВІТ»
lpd@inbox.ru

In work questions of formation an optimality functioning conditions for Small Hydro Power (SHP) cascades taking into account hydraulic communications are considered, and also ways of their maintenance with use the automatic control means are offered. The block diagramme of the automated control system by the SHP cascade on the basis of local automatic systems is offered. Control laws of the last are formed with use the criteria method. The results may be used at designing of control systems by SHP, and also in the course of their operation control with necessary power efficiency.

Вступ. Використання нетрадиційних джерел енергії в електричних системах є тим резервом, що за певних умов може забезпечити суттєву економію енергоресурсів [1-2]. Виходячи з цього, в останні десятиліття у світі спостерігається стійкий інтерес до проблеми використання поновлюваних джерел енергії. Це викликано, у першу чергу, бажанням знизити негативний вплив енергетики на навколишнє середовище. В енергобалансі всіх розвинених країн світу зростає частка відновлювальних джерел електроенергії. Наприклад, в країнах Євросоюзу розглядається можливість доведення цієї частки в 2020 р. до 20%. Значна роль тут відводиться ГЕС, зокрема малим ГЕС (МГЕС). Так [3], до 2020 року планується введення біля 17000 малих ГЕС, встановлено потужністю близько 14 ГВт, з забезпеченням щорічної генерації до 55 ТВт-год. При цьому найбільший гідропотенціал зосереджений в Італії (21 %), Франції (17 %), Іспанії (16 %), а також Норвегії та Швейцарії.

За результатами аналізу економічно доцільного гідропотенціалу країни Інститутом відновлюваної енергетики НАН України встановлено [2], що річне вироблення електроенергії на малих ГЕС може бути доведено до 1.1-1.3 ТВт-год, для чого необхідно збудувати або відновити біля 600 МГЕС. Але одною з головних перешкод для даного процесу є недослідженість технічних аспектів експлуатації малих ГЕС у сучасних умовах і, за рахунок цього, фактична відсутність нормативів та методик забезпечення оптимальних техніко-економічних показників МГЕС під час їх проектування та експлуатації.

Малі ГЕС, як джерела електроенергії, мають ряд особливостей, таких як невелика одинична потужність ГЕС (від 100 кВт до 20 МВт) та, часто, низький коефіцієнт використання встановленої потужності протягом доби; істотна залежність їх продуктивності від складно прогнозованого впливу навколишнього середовища; неузгодженість норм і правил експлуатації водних ресурсів, що накладає штучні обмеження в задачах оптимізації роботи МГЕС.

В даній статті розглядаються можливості оптимізації функціонування каскадів малих ГЕС з застосуванням засобів автоматичного керування.

Постановка задачі. Для забезпечення рентабельності малих ГЕС особливо актуальними виявляються питання організації планування і оперативного керування режимами їх роботи з метою отримання максимального прибутку від реалізації електроенергії. Однак, для малих ГЕС та їх каскадів, що працюють у складі водогосподарської системи (ВГС), вимоги останньої можуть багато в чому визначати можливості регулювання каскадом електричного навантаження, що обмежує регульовальний діапазон участі МГЕС у добовому графіку навантаження [4]. Останнє приводить до необхідності вирішення нових завдань, відмінних від суто енергетичних, що в залежності від організації експлуатації МГЕС можуть бути наступними:

– оптимізація добового режиму групи МГЕС за відомого їх сумарного графіку роботи або заданих перепусків у каскаді за вимогами ВГС, тобто реалізація такого режиму кожної МГЕС $P_i(t)$, який би забезпечив покриття заданого графіка їх сумарного навантаження $P_{\text{МГЕС}}(t)$

$$P_{\text{МГЕС}}(t) - \sum_{i=1}^n P_i(t) = 0, \quad (1)$$

за відомого притоку, заданих характеристик МГЕС і обмежень їх режимів;

– оптимізація добового режиму групи ГЕС $P_i(t)$, $i=1,2,\dots,n$ для забезпечення максимальних надходжень від реалізації їх електроенергії за умов багатоступеневого тарифу енергоринку $\varphi(t)$:

$$\int_{t_0}^{t_k} \varphi(t) \sum_{i=1}^n P_i(t) dt \rightarrow \max, \quad (2)$$

технічних обмежень з боку окремих МГЕС та з урахуванням гідротехнічних зв'язків між ними;

– оптимізація режиму групи ГЕС $P_i(t)$, $i=1,2,\dots,n$ з метою мінімізації витрат на закупівлю електроенергії на енергоринку для забезпечення нею заданої групи споживачів $P_{\text{наб}}(t)$ з урахуванням багатоступеневого тарифу енергоринку $\varphi(t)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{t_0}^{t_k} c(t)P_{EP}(t)dt \rightarrow \min \\ P_{EP}(t) + \sum_{i=1}^n P_i(t) - P_{нав}(t) = 0 \end{array} \right. , \quad (3)$$

технічних обмежень та гідротехнічних зв'язків між окремими МГЕС.

Враховуючи наведені вище особливості, а також просторову розподіленість об'єкту керування (групи малих ГЕС без гідротехнічних зв'язків, або каскаду МГЕС) узгодженість їх функціонування для виконання спільної задачі без застосування засобів автоматичного керування є ускладненим і малоефективним [5]. Однак, для організації системи автоматизованого керування вимагає встановлення сутності взаємозв'язків між об'єктами та умов оптимальності процесів, що відбуваються у межах керованої системи.

Формування умов оптимальності функціонування каскаду МГЕС. Виходячи з наведеного переліку задач оптимального керування режимами МГЕС, формування єдиного критерію та умов оптимальності для їх розв'язання є ускладненим. Виходячи з цього, зупинимось на останній задачі (3), оскільки вона є найбільш загальною. Математично вказана задача може бути представлено в такий спосіб.

Задано локально електричну систему з n гребельними МГЕС і рядом споживачів, сукупна потужність яких становить $P_{нав}(t)$. Втратами від перетоків потужності МГЕС у розподільній мережі можна знехтувати оскільки вони визначаються як задана частка від корисного відпуску і не впливають на характер узагальнень. Склад увімкненого обладнання МГЕС протягом доби і його енергетичні характеристики є сталими. Для МГЕС також задані енергетичні характеристики, побудовані без урахування пускових втрат води та незмінному протягом доби напорі на агрегатах. Необхідно знайти такі режими МГЕС $P_i(t)$ протягом доби, які забезпечили б мінімальні витрати на закупівлю електроенергії на енергоринку:

$$\int_{t_0}^{t_k} c(t)P_{EP}(t)dt \rightarrow \min , \quad (4)$$

за умови балансу активних потужностей $\varphi(t) = P_{нав}(t) - P_{EP}(t) - \sum_{i=1}^n P_i(t) = 0$, та заданого стоку на кож-

ній МГЕС за добу $W_i - \int_{t_0}^{t_k} Q_i(t)dt = 0$, а також балансу стоків у каскаді $W_i = W_{i-1} + dW$, де величина dW до-

датковий стік, що визначається стохастичними процесами притоку води на ділянці ріки між $i-1$ -ою та i -ю МГЕС. Обов'язковим є також урахування обмежень по потужності МГЕС $P_i^{min} \leq P_i(t) \leq P_i^{max}$, а також по напору $H_i^{min} \leq H_i(t) \leq H_i^{max}$, що визначаються умовами роботи у ВГС. При цьому відомими вважаються режими МГЕС на початок (t_0) і кінець (t_k) доби, що розглядається.

Припустимо, що всі залежності, які використовуються в розрахунках, включаючи $P_{нав}(t)$ та $c(t)$, неперервні й двічі диференційовані. Тоді поставлена задача може бути віднесена до граничних варіаційних з ізопериметричними умовами (реалізація заданого стоку) за наявності неголономних рівнянь зв'язку (баланс активних потужностей) і обмежень типу нерівностей.

У цьому випадку можна сказати, що екстремум (4) досягається на тих же екстремалях, що й екстремум наступного виразу:

$$\Phi = \int_{t_0}^{t_k} \left[c(t)P_{EP}(t) + \lambda(t)\varphi(t) + \lambda_i \sum_{i=1}^n Q_i(t) + \sum_{i=1}^n \Pi_i^P(t) + \sum_{i=1}^n \Pi_i^H(t) \right] dt = \int_{t_0}^{t_k} F(t)dt \Rightarrow \min , \quad (5)$$

де $\lambda(t)$, λ_i – невизначені нетривіальні множники Лагранжа; $\Pi_i^P(t)$, $\Pi_i^H(t)$ – штрафні функції, введені в цільову функцію $F(t)$ для урахування обмежень типу нерівностей по потужності та напору окремих МГЕС.

Відомо [6], що мінімум (4) буде мати місце, якщо $P_{ГЕСj}(t)$ є екстремалями, тобто вздовж них буде виконуватися відоме рівняння Ейлера – необхідна умова екстремуму функціоналу (5):

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{P_{EP}} - \frac{d}{dt} F_{\dot{P}_{EP}} = 0 \\ F_{P_i} - \frac{d}{dt} F_{\dot{P}_i} = 0, i = 1, 2, \dots, n \end{array} \right. , \text{ де } \left\{ \begin{array}{l} F_{P_{EP}} = \frac{\partial F}{\partial P_{EP}}; F_{\dot{P}_{EP}} = \frac{\partial F}{\partial \dot{P}_{EP}}; \dot{P}_{EP} = \frac{dP_{EP}}{dt}, \\ F_{P_i} = \frac{\partial F}{\partial P_i}; F_{\dot{P}_i} = \frac{\partial F}{\partial \dot{P}_i}; \dot{P}_i = \frac{dP_i}{dt}. \end{array} \right. \quad (6)$$

Розкривши рівняння (6), маємо:

$$\begin{cases} F_{P_{EP}} - \frac{d}{dt} F_{P_{EP}} = \psi(t) + \lambda(t) - \frac{d\psi(t)}{dt} = 0; \\ F_{P_i} - \frac{d}{dt} F_{P_i} = \lambda_i \left(\frac{\partial Q_i}{\partial P_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial Q_i}{\partial P_i} \right) + \lambda(t) + \frac{\partial \Pi_i^P}{\partial P_i} + \frac{\partial \Pi_i^H}{\partial P_i}, i = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (7)$$

Іншими словами, якщо розглянуті рівняння несумісні, а обмеження не є суперечними, то рішення задачі може бути знайдено. Виходячи з цього, необхідні умови оптимального розподілу активного навантаження між малими ГЕС можуть бути представлені в аналітичному виді таким чином:

$$z_{EP}^*(t) = \lambda_1 q_1^*(t) = \lambda_2 q_2^*(t) = \dots = \lambda_n q_n^*(t) = \lambda(t), \quad (8)$$

де $z_{EP}^* = z_{EP} + z'_{EP}$, а $q_i^* = q_i + q'_i + q_i^{\text{III}}$, за умови, що

$$\begin{cases} z_{EP} = \psi; \quad z'_{EP} = \frac{d\psi}{dt}, \\ q_i = \frac{\partial Q_i}{\partial P_i}; \quad q'_i = -\frac{d}{dt} \frac{\partial Q_i}{\partial P_i}; \quad q_i^{\text{III}} = \frac{\partial \Pi_i^P}{\partial P_i} + \frac{\partial \Pi_i^H}{\partial P_i}. \end{cases} \quad (9)$$

Якщо прийняти всі процеси в енергосистемі умовно сталими у межах деякого періоду часу, наприклад $\Delta t = 1$ год., то умова оптимальності (8) набуде виду:

$$z_{EP}(t) = \lambda_1 q_1(t) = \lambda_2 q_2(t) = \dots = \lambda_n q_n(t) = \lambda(t), \quad (10)$$

або

$$\left. \begin{aligned} z_{EP}(t) - \lambda_1 q_1(t) &= 0; \\ \lambda_1 q_1(t) - \lambda_i q_i(t) &= 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

де q_1 – відносний приріст першої МГЕС, яка визначає стік води у каскаді.

Величина λ_i у розрахунках зазвичай визначається ітераційним шляхом так, щоб забезпечити виконання умов реалізації заданого стоку W_i . Чим більше W_i за добу, тим менше λ_i , відповідно, більшу кількість електроенергії доцільно виробляти на даній ГЕС. З (11) фізичний зміст λ_i можна визначити як «цінову» ефективність кожної одиниці витрати води на окремій МГЕС, тобто вона показує, наскільки зменшиться вартість електроенергії в енергоринку для локальної енергосистеми при збільшенні витрати води на i -ій МГЕС на $1 \text{ м}^3/\text{с}$, за умови дотримання балансу потужності системи:

$$\lambda_i = \frac{z_{EP}}{q_i} = \frac{\psi dP_i}{dQ_i}.$$

Завдання оптимізації добового режиму каскаду МГЕС значно ускладнюється за малих значень часу доби-гання $\tau_{\text{доб}}$ між створами. Для такого каскаду необхідно під час визначення λ_i та q_i враховувати гідравлічний зв'язок між режимами суміжних МГЕС (підпір і $\tau_{\text{доб}}$, між створами). Будь-яка зміна витрати даної МГЕС буде позначатися на зміні підпору на $(i-1)$ -ій МГЕС через $\tau_{\text{доб}, i-1}$ і на режимі нижче розташованої $(i+1)$ -ї станції через $\tau_{\text{доб}, i}$. Наявність гідравлічного зв'язку в каскаді вимагає зміни розрахункових змінних. Необхідні умови оптимальності режимів МГЕС у системі будуть аналогічні (8), (10), де q_i за умови сталості витрат всіх інших МГЕС у каскаді й відомих $\tau_{\text{доб}, i-1}$ і $\tau_{\text{доб}, i}$ можна визначити за формулою

$$q_i = \frac{\partial P_{\text{каскад}}}{\partial Q_i} = \frac{\partial P_{i-1}}{\partial Q_i} + \frac{\partial P_i}{\partial Q_i} + \frac{\partial P_{i+1}}{\partial Q_i}.$$

Вплив зміни режиму МГЕС на показники цінової ефективності електропостачання заданих локальних споживачів буде зменшуватися з урахуванням обмежень з боку водогосподарчої системи, а також за умов зменшення обсягів води, що проходить через турбіни МГЕС. Зазначені обмеження необхідно враховувати під час формування рекомендацій по веденню режиму окремих МГЕС, а також для формування законів керування пристроїв локальної автоматизації.

Автоматизована система керування каскадом малих ГЕС. Виходячи з наведеного вище формування оптимальних режимів роботи малих ГЕС у каскаді є складною розрахунковою задачею, що вимагає врахування не тільки локальних параметрів окремих ГЕС, але й взаємозв'язків між ними. При цьому для формування завдань для окремих МГЕС щодо оптимального ведення режиму постає окрема, достатньо складна задача – прогнозування стоку W_i для окремих станцій, що вимагає врахування імовірнісного характеру впливу навколишнього середовища. Виходячи з цього автоматизована система керування каскадом МГЕС має будуватися за ієрархічним принципом [4, 5]. Ієрархічне керування має ряд переваг [5, 7]. Воно дозволяє підвищити рівень інтеграції керування введеними елементами більш високого рівня, запобігти дублюванню, розділити складні задачі на підзадачі, що розв'язуються за обмежених технічних можливостей кожного ієрархічного рівня. Це полегшує програмування виділених підзадач автоматизованих систем керування (АСК) перетворення енергії на МГЕС.

Враховуючи наведене вище для розв'язання задачі оптимізації режимів роботи ГЕС у каскаді з використанням отриманих умов оптимальності (8), (10) необхідною умовою є забезпечення можливості централізованого керування об'єктом у реальному часі. Разом з тим, вказана умова не може бути забезпечена через просторову розгалуженість об'єктів та відсутність надійних каналів зв'язку між ними та диспетчерським центром. Виходячи з цього АСК з заданим переліком функцій (рис. 1) може бути побудована як централізована система оперативного керування з децентралізацією функцій реального часу за рахунок застосування локальних (у перспективі адаптивних) систем автоматичного керування (САК).

Враховуючи структурну та апаратну складність даної системи керування, а також вимоги щодо мінімізації капітальних та експлуатаційних витрат АСК має будуватися спираючись на результати детального техніко-економічного аналізу. В наслідок останнього розроблено концепцію автоматизації малих ГЕС, головними принципами якої є:

- обґрунтована послідовність розробки та впровадження АСК передбачає черговість реалізації задач автоматизованої системи керування;

- реалізація трирівневої ієрархічної структури з виділенням двох рівнів об'єктів керування (МГЕС) – об'єктів нижчого рівня та "опорних" об'єктів (головних станцій у каскаді) – зменшує капітальні витрати на апаратну та програмну реалізацію АСК;

- повна автономність МГЕС усіх рівнів у нормальних (планових) режимах їх роботи до-

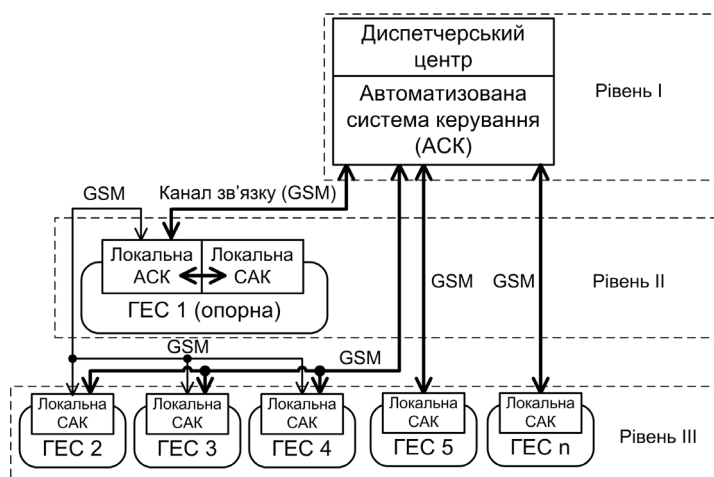


Рисунок 1- Структурна схема АСК каскадом МГЕС

зволяє забезпечити керування об'єктів та виконання ними заданих функцій протягом певного періоду часу (до доби) навіть у разі відмови каналів зв'язку з верхнім ієрархічним рівнем.

Для реалізації останнього необхідною умовою є оснащення верхнього рівня комплексом спеціалізованих програмних засобів, призначених для формування законів керування локальних САК МГЕС нижчих рівнів та їх адаптації. Для розв'язання даної задачі доцільно використовувати критеріальний метод, оскільки він має суттєві переваги з огляду на забезпечення адаптованості законів керування та формування налагоджувальних параметрів САК з використанням аналізу їх чутливості [8].

Висновки.

1. Для оптимального керування режимами каскаду малих ГЕС запропоновано критерії і сформовано умови оптимальності з урахуванням електричних та гідравлічних взаємозв'язків. Показано, що практична реалізація умов оптимальності у вигляді диспетчерських графіків по веденню режиму окремих МГЕС або законів керування локальних САК вимагає значної кількості прогнозних та імітаційних розрахунків з урахуванням зв'язків між ГЕС, що робить необхідним організацію керування за ієрархічним принципом.

2. Враховуючи складність, динамічність та просторову розгалуженість об'єкту керування запропоновано структурну схему АСК каскадом ГЕС, що побудована за ієрархічним принципом на базі локальних систем автоматичного керування окремими ГЕС. Для формування законів функціонування останніх доцільно застосувати критеріальний метод, що має ряд суттєвих переваг над іншими методами ідентифікації.

ЛИТЕРАТУРА

1. Celso Penche. Layman's Handbook On How To Develop A Small Hydro Site (Second Edition). – DG XVII European Commission 200 rue de la Loi B-1049 Bruselas Belgica. – 1998. – 266 p.
2. Нікіторович О.В. Мала гідроенергетика в Україні: перспективи і проблеми її розвитку. Енергоефективність, екологія та безпека // Гідроенергетика України. – 2003. – №1. – 40-44.
3. Communication from the Commission ENERGY FOR THE FUTURE: RENEWABLE SOURCES OF ENERGY, White Paper for a Community Strategy and Action Plan, COM(97) 599 final (26/11/1997).
4. Голованов И.Н., Николаевская Н.В. Задача координации работы каскада ГЭС для покрытия пиковых нагрузок Энергосистемы // Відроджена енергетика. – №3. – 2006. – С. 35-39.
5. Лежнюк П.Д., Нікіторович О.В., Кулик В.В. Підвищення ефективності експлуатації малих ГЕС засобами автоматичного керування // Гідроенергетика України. – 2007. – №3. – С.38-41
6. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. – К.: Техника, 1977. – 768 с.
7. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А.Красовского. – М.: Наука. – 1987. – 712 с.
8. Астахов Ю.М., Лежнюк П.Д. Применение критеріального метода в электроэнергетике. Учебное пособие. – Киев: УМК ВО. – 1989. – 140 с.

Рекомендовано д.т.н. Рогозіним Г.Г.