

## ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З РОЗОСЕРЕДЖЕНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Лежнюк П.Д. \*, Ковальчук О.А. \*\*, Кулик В.В. \*

\* Вінницький національний технічний університет

\*\* ТОВ «ЕНЕРГОІНВЕСТ»

lpd@inbox.ru

В роботі розглядаються питання дослідження впливу розосереджених джерел електроенергії (РДЕ) на якість функціонування електричних мереж (ЕМ), зокрема на режими їх роботи та втрати електроенергії від її адресного постачання такими джерелами. Для підвищення ефективності функціонування ЕМ запропоновано математичні моделі та методи оптимального керування РДЕ в умовах балансувального ринку.

**Вступ.** Стабільне, якісне постачання електроенергією промисловості і населення є однією з необхідних умов економічного розвитку країни. На сьогодні спостерігається прогресуюче старіння основного обладнання електричних станцій та мереж, особливо розподільних. Зокрема, за останні 15 років, протягом яких процеси їх відновлення та модернізації відстали від фізичного старіння, коефіцієнт дефектності електромереж України досяг 13 % [1], сформувалися передумови для істотного зниження ненадійності електропостачання та погіршення якості електроенергії. Додатковим фактором, що негативно відбивається на режимах роботи розподільних електричних мереж (ЕМ) є тенденція до впровадження в комунально-побутовому та промисловому секторах засобів індивідуального електроопалення, а також локальних засобів підвищення якості електроенергії (зокрема, стабілізаторів напруги) [2]. Це підвищує завантаження ЕМ і, отже, для забезпечення необхідної якості електроенергії та надійності електропостачання стає необхідною реконструкція ЕМ, з будівництвом нових ліній електропередачі (ЛЕП) та розвитком джерел електроенергії, альтернативних централізованому електропостачанню від крупних електричних станцій (ЕС), як це показано на рис. 1а.

Розвиток паралельно з реконструкцією ЕМ розосередженого електрогенерування, як це показано на рис. 1б, є актуальним не тільки для нас. Наприклад, в країнах Євросоюзу розглядається можливість доведення частки РДЕ 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, встановленою потужністю близько 14 ГВт, з забезпеченням щорічної генерації до 55 ТВт·год. Такий підхід має ряд переваг в контексті експлуатації ЕМ, серед яких можливість підвищення якості електроенергії та надійності електропостачання споживачів ЕМ за рахунок менших обсягів модернізації основного обладнання та подовження термінів реконструкції ЕМ. Крім того, часто є можливість, коригуючи схеми приєднання РДЕ залежно від типу та потужності останніх, підвищувати техніко-економічні показники експлуатації ЕМ без залучення додаткового фінансування.

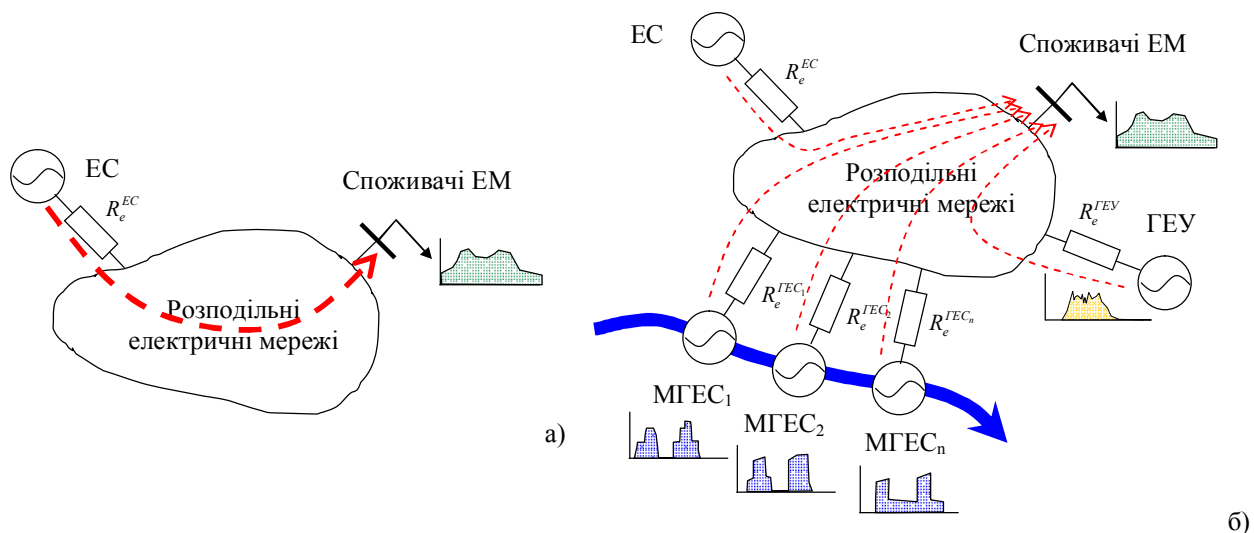


Рис. 1. Розподільні електричні мережі з розосередженими джерелами енергії

В даній роботі досліджуються окремі аспекти функціонування розподільних електричних мереж в умовах зростання навантаження споживачів та збільшення частки децентралізованого генерування за рахунок відновлюваних джерел енергії (рис. 1), таких як малі гідроелектростанції та їх каскади, а також геліоенергетичні установки (ГЕУ). З метою підвищення ефективності експлуатації ЕМ пропонуються методи та засоби формування умов оптимальності їх режимів за рахунок раціональних схем приєднання РДЕ, а також оперативного керування останніми.

**Задачі оптимізації електричних мереж з РДЕ.** Для забезпечення рентабельності функціонування, зокрема малих ГЕС, особливо актуальними виявляються питання організації планування і оперативного керування режимами їх роботи з метою отримання максимального прибутку від їх експлуатації. Для малих ГЕС та їх каскадів, що працюють у складі водогосподарської системи (ВГС), вимоги останньої часто обмежують участь МГЕС у добовому графіку навантаження [4], а отже можливості коригування режимів роботи ЕМ, якими здійснюється транспортування електроенергії РДЕ. Останнє приводить до необхідності вирішення в контексті оптимізації функціонування ЕМ з використанням РДЕ нових завдань, відмінних від суто енергетичних.

Слід також враховувати, що коригування режимів РДЕ під час їх експлуатації підпорядковане, розв'язанню головної задачі отримання максимального прибутку від реалізації виробленої електроенергії, особливо після введення «зеленого» тарифу. Задачі ж підвищення ефективності експлуатації ЕМ для РДЕ є вторинними і будуть розв'язуватися з їх використанням тільки тоді, коли їх поєднати з головною задачею умовами функціонування таких джерел.

В залежності від організації експлуатації РДЕ для підвищення її ефективності розв'язують такі задачі [5]:

1) оптимізація режиму РДЕ з метою мінімізації витрат на закупівлю електроенергії на енергоринку для забезпечення нею заданої групи споживачів (рис. 1, б) з урахуванням багатоступеневого тарифу;

2) оптимізація добового режиму РДЕ за відомого їх сумарного графіку роботи (заданих перепусків у каскаді для малих ГЕС за вимогами ВГС), тобто реалізація такого режиму окремих РДЕ, який би забезпечив покриття заданого графіка їх сумарного навантаження за обмежень на первинні енергоресурси за заданих характеристик РДЕ та обмежень їх режимів;

3) 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  $c(t)$  («зеленого» тарифу) та технічних обмежень з боку окремих РДЕ (з урахуванням гідротехнічних зв'язків між малими ГЕС) (рис. 2):

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

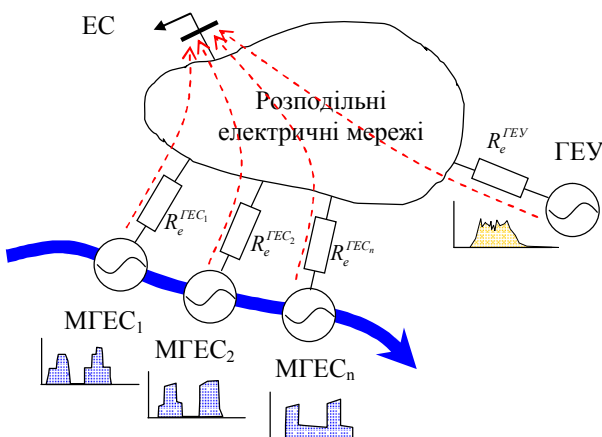


Рис. 2. Щодо задачі оптимізації функціонування РДЕ в розподільних електричних мережах

Перша задача з наведеного переліку була розв'язана в [5], отримані умови оптимальності функціонування малих ГЕС, що у подальшому покладені в основу законів керування каскадом ГЕС. Однак після введення «зеленого» тарифу, вона стала менш актуальною. Друга задача оптимізації характерна для функціонування РДЕ у полі жорстких зовнішніх обмежень, наприклад обмежень ВГС для МГЕС, коли задача оптимізації зводиться до питань життєздатності розосередженої генерації. Вона актуальна протягом короткого часу (маловодні та паводкові періоди для МГЕС) і не може бути поєднана з задачею підвищення ефективності функціонування ЕМ, тому не є предметом розгляду даної роботи.

Найбільш актуальною на даний час є остання задача з наведеного переліку (рис. 2). Разом з тим, вона може розглядатися у контексті підвищення якості функціонування ЕМ, якщо цільову функцію (2) подати у такому вигляді:

$$\int_{t_0}^{t_k} c(t) \left[ \sum_{i=1}^n P_i(t) - k_{\Pi}(t) \cdot \Delta P_{\text{РДЕ}}(t) \right] dt \rightarrow \max$$

(3)

де  $k_{\Pi}(t)$  – ваговий коефіцієнт, що визначається співвідношенням відпускнуго тарифу для РДЕ  $c(t)$  та вартості втрат потужності для даної розподільної мережі  $c_0$  й залежить від умов договору на транспортування електроенергії (якщо договором передбачено компенсацію втрат на транспортування у натуральному вигляді, то  $k_{\Pi} = 1$ , інакше  $k_{\Pi}(t) = c_0 / c(t)$  (в умовах «зеленого» тарифу можна прийняти  $k_{\Pi}(t) = 1/k_{\text{зт}} = \text{const}$ ,  $k_{\text{зт}}$  – коефіцієнт збільшення відпускнуго тарифу для РДЕ, по відношенню до середньозваженого);  $\Delta P_{\text{РДЕ}}(t)$  – складова втрат потужності в розподільних ЕМ, зумовлена функціонуванням РДЕ.

З виразу (3) видно, що у випадку зазначення у договорі на транспортування електроенергії (між ЕМ та власником РДЕ) постійної ставки відрахувань на компенсацію втрат (наприклад 10-15% від виробленої електроенергії), задачі оптимізації функціонування ЕМ та РДЕ відокремлюються і технічний ефект для ЕМ зменшується, а задача оптимізації практично зводиться до задачі (2):

$$\int_{t_0}^{t_k} c(t) k_{\text{ТР}} \sum_{i=1}^n P_i(t) dt \rightarrow \max, \quad (4)$$

де  $k_{\text{ТР}}$  – коефіцієнт, що враховує зменшення прибутку для РДЕ за рахунок компенсації втрат на транспортування електроенергії мережами.

Таким чином, найбільш актуальною з огляду на забезпечення ефективності сумісної експлуатації електричних мереж та РДЕ є задача забезпечення максимального прибутку від реалізації електроенергії у постановці (3). Враховуючи динамічність процесу генерування та споживання електроенергії в ЕМ, а також просторову розподіленість об'єкта керування (групи РДЕ, що мають єдиного власника, наприклад, каскаду ГЕС) узгодженість їх функціонування для виконання спільної задачі без застосування засобів автоматичного керування є ускладненим і малоефективним [5], а організація системи автоматизованого керування вимагає попереднього встановлення умов оптимальності процесів та законів керування ними.

**Формування умов оптимальності функціонування каскаду МГЕС та ГЕУ.** Виходячи з наведених задач оптимального керування режимами МГЕС, формування єдиного критерію та умов оптимальності для їх розв'язання є ускладненим. Виходячи з цього, зупинимося на останній задачі (3), оскільки, як показано вище, вона є найбільш актуальною. Математично вказана задача може бути представлена так.

Задано сукупність з  $n$  МГЕС і  $m$  геліоенергетичних установок, сумарна потужність яких становить  $P_{\text{ГЕУ}}(t)$ . В якості змінних керування прийнято потужності ГЕС, оскільки вони найменш залежні від випадкових факторів навколишнього середовища, вплив яких переважно може бути передбачений з прийнятною точністю. Втрати від перетоків потужності ГЕУ та МГЕС у розподільній мережі є функціями від потужностей генерування і становлять від 5 до 20 % від сумарного генерування, а отже мають враховуватися у цільовій функції. Ними можна знехтувати лише у випадку, коли вони визначаються як 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 максимальний прибуток від реалізації електроенергії МГЕС та ГЕУ на енергоринку:

$$\int_{t_0}^{t_k} c(t) \left[ \sum_{i=1}^n P_i(t) + P_{\text{ГЕУ}}(t) - k_{\text{ц}}(t) \cdot \Delta P_{\text{РДЕ}}(t) \right] dt \rightarrow \max, \quad (5)$$

за заданого стоку на кожній 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  $dW$  додатковий 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.

Залежність втрат потужності в ЕМ  $\Delta P(t)$  від потужностей окремих РДЕ приймаємо неперервною і диференційованою на проміжку можливих значень потужностей МГЕС  $P_i(t)$  та сукупних потужностей ГЕУ  $P_{\text{ГЕУ}}(t)$ . Тоді складова цих втрат, зумовлена функціонуванням РДЕ може бути подана таким чином:

$$\Delta P_{\text{РДЕ}}(t) = \Delta P_{\text{РДЕ}}(t_0) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \Delta P(t_0)}{\partial P_i(t_0)} (P_i(t) - P_i(t_0)) + \frac{\partial \Delta P(t_0)}{\partial P_{\text{ГЕУ}}(t_0)} (P_{\text{ГЕУ}}(t) - P_{\text{ГЕУ}}(t_0)), \quad (6)$$

Припустимо, що всі залежності, які використовуються в розрахунках, включаючи  $P_{\text{ГЕУ}}(t)$  та  $c(t)$ , неперервні й двічі диференційовані. Тоді поставлена задача може бути віднесена до граничних варіаційних з обмеженнями типу нерівностей. У цьому випадку екстремум (5) досягається тими ж функціями  $P_i(t)$ , що й екстремум наступного виразу:

$$\Phi = \int_{t_0}^{t_k} \left[ -c(t) \left[ \sum_{i=1}^n P_i(t) + P_{\text{ГЕУ}}(t) - k_{\text{ц}} \cdot \Delta P_{\text{РДЕ}}(t) \right] + \right. \\ \left. + \lambda_i \sum_{i=1}^n Q_i(t) + \sum_{i=1}^n \Pi_i^P(t) + \sum_{i=1}^n \Pi_i^H(t) \right] dt = \int_{t_0}^{t_k} F(t) dt \Rightarrow \min, \quad (7)$$

де  $\lambda_i$  – невизначені 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 (5) буде мати місце, якщо для  $P_i(t)$  виконуватися необхідна умова екстремуму функціоналу (5) (рівняння Ейлера)

$$F_{P_i} - \frac{d}{dt} F_{\dot{P}_i} = 0, i = 1, 2, \dots, n, \text{ де } F_{P_i} = \frac{\partial F}{\partial P_i}; F_{\dot{P}_i} = \frac{\partial F}{\partial \dot{P}_i}; \dot{P}_i = \frac{dP_i}{dt}. \quad (8)$$

Розкривши рівняння (8), маємо:

$$F_{P_i} - \frac{d}{dt} F_{\dot{P}_i} = \left( \frac{d\psi(t)}{dt} - \psi(t) \right) \left( 1 - k_{\psi} \left[ \frac{\partial \Delta P_{PDE}(t)}{\partial P_i(t)} - \frac{d}{dt} \frac{\partial \Delta P_{PDE}(t)}{\partial P_i(t)} \right] \right) + \lambda_i \left( \frac{\partial Q_i}{\partial P_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial Q_i}{\partial P_i} \right) + \frac{\partial \Pi_i^P}{\partial P_i} + \frac{\partial \Pi_i^H}{\partial P_i} = 0, i = 1, 2, \dots, n. \quad (9)$$

Якщо система, утворена рівняннями (9) не є виродженою, а обмеження не є суперечними, то необхідні умови оптимального розподілу активного навантаження між малими ГЕС в електричних мережах з урахуванням впливу ГЕУ можуть бути представлені в аналітичному виді таким чином:

$$z_{EP}^* (t) = \frac{\lambda_1 q_1^* (t) + q_1^{\text{III}}}{1 - \sigma_1^* (t)} = \frac{\lambda_2 q_2^* (t) + q_2^{\text{III}}}{1 - \sigma_2^* (t)} = \dots = \frac{\lambda_n q_n^* (t) + q_n^{\text{III}}}{1 - \sigma_n^* (t)}, \quad (10)$$

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

$$\begin{cases} z_{EP} = -\psi; z'_{EP} = \frac{d\psi}{dt}, \\ q_i = \frac{\partial Q_i}{\partial P_i}; q'_i = -\frac{d}{dt} \frac{\partial Q_i}{\partial P_i}; q_i^{\text{III}} = \frac{\partial \Pi_i^P}{\partial P_i} + \frac{\partial \Pi_i^H}{\partial P_i}; \sigma_i = k_{\psi} \frac{\partial \Delta P_{PDE}}{\partial P_i}; \sigma'_i = -k_{\psi} \frac{d}{dt} \frac{\partial \Delta P_{PDE}}{\partial P_i}. \end{cases} \quad (11)$$

Якщо прийняти всі процеси в ЕМ умовно сталими у межах деякого періоду часу, наприклад  $\Delta t = 0,5$  год., то умова оптимальності (10) набуде виду:

$$z_{EP}(t) = \frac{\lambda_1 q_1(t) + q_1^{\text{III}}}{1 - \sigma_1(t)} = \frac{\lambda_2 q_2(t) + q_2^{\text{III}}}{1 - \sigma_2(t)} = \dots = \frac{\lambda_n q_n(t) + q_n^{\text{III}}}{1 - \sigma_n(t)}, \quad (12)$$

Величина  $\lambda_i$  у визначається ітераційним шляхом так, щоб забезпечити виконання умов реалізації заданого стоку  $W_i$ . З (12) фізичний зміст  $\lambda_i$  – прибуткова ефективність витрат води на окремій МГЕС, тобто вона показує, наскільки зростає вартість електроенергії відпущеної заданою групою РДЕ при збільшенні витрат води на  $i$ -й МГЕС на  $1 \text{ м}^3/\text{с}$ :

$$\lambda_i = \frac{z_{EP}(1 - \sigma_i)}{q_i} = -\psi \left[ \frac{\partial P_i}{\partial Q_i} - k_{\psi} \frac{\partial \Delta P_{PDE}}{\partial Q_i} \right] \approx -\psi \left[ \frac{\partial P_i}{\partial Q_i} - k_{\psi} \frac{\partial \Delta P}{\partial Q_i} \right]. \quad (13)$$

Здійснюючи оптимальне керування каскадом малих ГЕС для отримання максимального прибутку згідно умов оптимальності (13), зменшуються втрати в ЕМ. Враховуючи, що втрати у мережах пов'язані з рівнями напруги у вузлах, таке регулювання каскаду буде позитивно впливати і на якість електроенергії.

**Висновки.** Запропоновано умови оптимальності функціонування РДЕ з урахуванням їх впливу на режими роботи розподільних ЕМ та гідравлічних взаємозв'язків між малими ГЕС. Показано, що задачі оптимізації функціонування РДЕ та електричних мереж є взаємопов'язаними і мають розв'язуватися комплексно. Необхідною умовою для цього є врахування в договорах на транспортування електроенергії особливостей впливу РДЕ на режими ЕМ. Враховуючи складність, динамічність та просторову розгалуженість РДЕ як об'єкту керування, реалізація оптимального керування ними неможлива без застосування систем автоматизованого керування на базі локальних систем автоматичного керування.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Надійне та безпечне електропостачання, розвиток електромереж - під контролем Держенергонагляду [Електронний ресурс] 12 липня 2007.  
Режим доступу: [http://www.ukrenergo.energy.gov.ua/ukrenergo/control/uk/article?art\\_id=54905&cat\\_id=35981](http://www.ukrenergo.energy.gov.ua/ukrenergo/control/uk/article?art_id=54905&cat_id=35981)
2. Ключко В. П. К вопросу о разработке схем развития распределительных электрических сетей энергоснабжающих компаний / В. П. Ключко // Новини енергетики. – 2008. – № 6. – С. 28 – 33.
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. Задача координации работы каскада ГЭС для покрытия пиковых нагрузок Энергосистемы / И.Н. Голованов, Н.В. Николаевская // Відновлювана енергетика. – №3. – 2006. – С. 35-39.
5. Нікіторович О.В. Оптимізація функціонування каскадів малих ГЕС з застосуванням засобів автоматичного керування / О.В. Нікіторович, П.Д. Лежнюк, В.В. Кулик // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика», випуск 8 (140). – 2008. – С. 171-174.
6. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. – К.: Техника, 1977. – 768 с.