

УДК 621.316.1

Кулик В.В.

Вінницький національний технічний університет

Пірняк В. М.

ТОВ «Подільський енергоконсалтинг»

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІЩЕННЯ ДЖЕРЕЛ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ З УРАХУВАННЯМ АКТИВНИХ ОБМЕЖЕНЬ

У статті розв'язується задача оптимізації розміщення джерел реактивної потужності (ДРП) у розподільних електричних мережах (ЕМ) за економічним критерієм із забезпеченням допустимості відхилень напруги. Екстремальні значення потужностей ДРП визначаються згідно з принципом Гамільтона. Для врахування обмежень за напругою в ЕМ розв'язується додаткова оптимізаційна задача, яку вдалося звести до лінійної завдяки використанню коефіцієнтів розподілу втрат та матриці чутливості Якобі. Економічні аспекти задачі враховуються фіктивними економічними опорами. Застосування такого підходу скорочує тривалість розрахунків та дає змогу отримати розв'язок, мінімально віддалений від глобального екстремуму цільової функції.

Ключові слова: електрична мережа, перетікання реактивної енергії, оптимізація, джерело реактивної потужності, «ідеальний» режим, економічний опір, відхилення напруги

Постановка проблеми. Забезпечення економічної ефективності функціонування енергопостачальних компаній в Україні нині стоїть особливо гостро [1]. Останнім часом у планах перспективного розвитку розподільних електромереж (ЕМ) передбачається проведення заходів із реконструкції, що супроводжується значними капіталовкладеннями. Виходячи з цього постає проблема формування технічних рішень, які б, крім прийнятної економічної ефективності у перспективі, забезпечували виконання функціональних та технічних обмежень ЕМ. Крім реновації основного обладнання, необхідно створити умови для усунення причин надлишкових втрат електроенергії в мережах, впроваджуючи проектні рішення, що отримані на підставі системних теоретичних досліджень [2].

Вказана проблема суттєво ускладнюється через практично безсистемну розбудову розосереджених джерел енергії (РДЕ) в електричних мережах. Вже нині подекуди це призвело до ускладнень із регулюванням напруги, що можуть бути усунені шляхом оптимізації перетікань реактивної енергії у цих мережах [3–6], зокрема, шляхом використання наявних та додаткових джерел реактивної потужності (ДРП). Максимального ефекту тут можна досягти, оптимізуючи розміщення та параметри ДРП з урахуванням зміни характеру електроспоживання, а також режимів РДЕ.

Таким чином, у сучасних умовах змінюється постановка оптимізаційних задач, пов'язаних

із розподілом реактивної енергії, а також їх розмірність, що може призводити до неефективності класичних підходів. З огляду на це, в роботі для оптимізації перетікань реактивної енергії використано екстремальний принцип Гамільтона [3] та запропоновано вдосконалення означеного підходу, що проявляється у врахуванні обмежень на відхилення напруги в ЕМ. Це дає змогу отримувати оптимальні рішення щодо розміщення ДРП, які можна реалізувати без додаткової адаптації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Особливістю оптимізації реактивних перетікань в сучасних розподільних ЕМ України і світу є те [3; 4; 6], що, крім традиційних джерел та споживачів реактивної енергії, широко впроваджуються РДЕ. Їх функціонування істотно залежить від впливу навколишнього середовища й недостатньо обмежується нормативною базою експлуатації електричних мереж. Використовуючи синхронні й асинхронні генератори, а також інверторні перетворювачі, означені джерела можуть генерувати або споживати реактивну енергію залежно від режиму їх роботи. Внаслідок цього періодично виникають реверсивні перетікання, які впливають на ефективність транспортування електроенергії.

Так, показано, що лише координована видача реактивної потужності РДЕ може полегшити обмін реактивної енергією між розподільними й магістральними мережами та забезпечити допустимі відхилення напруги в системі [5]. Вироблення електроенергії РДЕ може викликати недопустимі

підвищення рівнів напруги у розподільних мережах, зокрема через те, що мережеве обладнання, необхідне для підключення РДЕ, генерує додаткову реактивну потужність. Використовуючи керування реактивною потужністю РДЕ, оператори розподільних мереж можуть вирішувати вказані проблеми. Однак для цього розосереджені джерела мають конструктивно забезпечувати таку можливість.

Для розв'язання задач, пов'язаних з оптимізацією рівнів компенсації реактивної потужності в електричних мережах за комплексним критерієм, традиційно знайшли застосування методи декомпозиції, лінійного та нелінійного програмування [7]. Однак такі методи через використання припущень та спрощень можуть скеровувати процес розв'язку до локальних екстремумів. Останнє призводить до зниження економічної ефективності технічних рішень.

Останнім часом для розв'язання задач планування та оптимізації перетікань реактивної енергії, особливо в енергосистемах зі значною часткою розосередженого генерування, активно застосовують елементи штучного інтелекту [8], зокрема штучні нейронні мережі, експертні системи, генетичні алгоритми та еволюційне програмування. Проте надмірні витрати часу в еволюційних та генетичних алгоритмах пошуку оптимальних розв'язків обмежують їх застосування в електричних мережах [8].

Постановка завдання. Підвищення ефективності розв'язання задач оптимізації перетікань електроенергії в електричних мережах із РДЕ можна отримати шляхом застосування комплексного підходу, що базується на використанні принципу Гамільтона [2; 3].

Із праці В.Г. Холмського [9] відомо, що задача оптимізації розподілу навантаження між джерелами енергії в ЕМ за критерієм мінімуму втрат електроенергії може бути зведена до розрахунку «ідеального», або економічного струморозподілу з використанням заступної г-схеми.

Аналогічний підхід застосовано науковцями [3] для визначення потужностей ДРП Q_i , встановлення яких на заданих підстанціях забезпечує максимум рентабельності капіталовкладень без урахування обмежень на потужності ДРП та режимні параметри ЕМ.

Для зведення задачі пошуку максимуму рентабельності капіталовкладень до задачі пошуку мінімуму втрат в ЕМ у заступну г-схему вводяться додаткові дисипативні елементи (економічні опори) [3]:

$$R_{ci}^0 = \frac{U_i^2}{Q_i} \left[\alpha_{втр} + \left(K_{li} + \frac{K_{oi}}{Q_i} \right) \frac{(\alpha_e + \alpha_p)(1 - \alpha_n) + (\alpha_{кр} + \alpha_p)}{\tau c (1 - \alpha_n)} \right], \quad (1)$$

де Q_i , U_i – встановлена потужність і-го ДРП та розрахункова напруга у вузлі його приєднання; $\alpha_{втр}$ – питомі втрати електроенергії в ДРП; K_{oi} , K_{li} – постійні та змінні капіталовкладення для впровадження ДРП; α_e , α_p – питомі річні видатки на експлуатацію ДРП та амортизаційні відрахування на реновацію; α_n , $\alpha_{кр}$ – податок на прибуток та річні витрати на обслуговування кредиту; τ , c – час максимальних втрат та вартість втрат електроенергії.

Введення встановлених потужностей ДРП Q_i до переліку залежних параметрів режиму дає змогу розрахувати їх екстремальні значення. Співвідношення (1) для визначення економічних опорів R_{ci}^0 містить оптимізовані змінні Q_i та залежні параметри U_i оптимізаційної задачі. Отже, ці опори не є постійними й потребують уточнення на кожній ітерації [3]. Зі зростанням розрахункової встановленої потужності ДРП Q_i значення R_{ci}^0 зменшуються. Крім того, зменшується чутливість економічних опорів до відхилень напруги, що сприяє нарощуванню встановлених потужностей ДРП та зменшенню кількості встановлених пристроїв. Останнє забезпечує скорочення капітальних витрат та експлуатаційних видатків. Таким чином, ітеративні розрахунки струморозподілу в заступній г-схемі ЕМ з уточненням економічних опорів ДРП дають змогу визначити екстремальні потужності джерел.

Застосування означеного підходу усуває проблему надійності та швидкодії процесу пошуку розв'язків, що досягається зміною напрямку пошуку. Однак ключовим моментом для практичної реалізації є перехід від екстремального до оптимального розв'язку, що виконується накладанням обмежень на оптимізовані змінні частини та режимні параметри ЕМ [3]. Для сучасних електромереж реалізація означеної процедури виявляється нетривіальною та потребує додаткових досліджень.

Виклад основного матеріалу дослідження. Постановка задачі оптимізації розміщення ДРП в електромережах може бути подана так:

$$R(Q_i) = \frac{\Pi_p(Q_i) + A_p(Q_i)}{K(Q_i)} \rightarrow \max, \quad i \in [1..n_q], \quad (2)$$

за умов балансу реактивної потужності в системі

$$G = \sum_{i=1}^{n_q} Q_i - \sum Q_n - \Delta Q(Q_i) = 0, \quad i \in [1..n_q], \quad (3)$$

та обмежень на параметри:

$$Q_{i_max} \geq Q_i \geq Q_{i_min}, \quad i \in [1..n_q]; \quad (4)$$

$$U_{j_max} \geq U_j \geq U_{j_min}, \quad j \in [1..n], \quad (5)$$

де n , n_q – відповідно, кількість вузлів ЕМ, для яких діють обмеження за напругою та кількість

потенційних місць встановлення ДРП; $P_p(Q_i)$ – поточний річний прибуток; $A_p(Q_i)$ – додаткові річні амортизаційні відрахування на реновацію; $K(Q_i)$ – капіталовкладення для впровадження ДРП; ΣQ_H – сумарне навантаження, значення якого є заданим; $\Delta Q(Q_i)$ – втрати реактивної потужності в елементах ЕМ; Q_{i_max}, Q_{i_min} – відповідно, максимальне та мінімальне значення потужності ДРП у i -му вузлі ЕМ $U_j, U_{j_max}, U_{j_min}$ – відповідно, розрахункове значення напруги у j -му вузлі ЕМ, а також її максимальне та мінімальне допустимі значення.

Вище описано розв’язання задачі оптимізації перетікань реактивної потужності у постановці (2)–(3). Однак для практичної реалізації оптимальні значення потужностей ДРП потребують уточнення з урахуванням обмежень на параметри (4), (5). Обмеження (4) враховуються доволі просто. Розрахункові потужності Q_i заокруглюються до найближчих стандартних значень із подальшим перерахунком економічних опорів, «ідеального» режиму ЕМ та уточненням потужностей решти ДРП.

Однак зі зростанням встановленої потужності ДРП локально зростають рівні напруги у вузлах їх приєднання та суміжних вузлах. Останнє може призводити до порушення обмежень за напругою (6), що робить отриманий розв’язок практично непридатним для реалізації.

Для зменшення рівнів напруги переважно використовують вторинні засоби регулювання, наприклад регулювальні трансформатори, що додатково ускладнює врахування обмежень за напругою.

Наявність засобів автоматичного керування в сучасних ДРП сприяє вирішенню вказаного завдання. Однак порушення обмежень за напругою не дає змоги вказаним пристроям працювати на встановленій потужності, що знижує економічний ефект від їх впровадження. Тому задача оптимізації розміщення ДРП (2)–(5) має розв’язуватися у такій послідовності.

Після визначення місць встановлення та потужностей ДРП, які забезпечують максимальну рентабельність капіталовкладень з урахуванням обмежень (4), на кожній ітерації необхідно перевірити виконання обмежень (5). Якщо останні виконуються, то отриманий розв’язок вважається оптимальним.

У разі порушення обмежень необхідно визначити множину вузлів M_b , для яких перевищено допустимі рівні напруги. Імітуючи функціонування регулювальних пристроїв силових трансформаторів, необхідно виконати регулювання

напруги у ЕМ без коригування потужностей ДРП. Це дасть змогу забезпечити нормативні відхилення для більшості вузлів, суміжних із вузлами встановлення ДРП. Якщо порушення обмежень (5) не було усунуто, необхідно виконати відповідне коригування розрахункових потужностей ДРП, що отримані на попередньому етапі. Таке коригування, очевидно, призводить до зниження рентабельності встановлення ДРП через примусове відхилення їх потужностей від екстремальних. Отже, поправки ΔQ_i до розрахункових потужностей ДРП необхідно визначати таким чином, щоб виконання обмежень за напругою (5) спричинило мінімальне зниження рентабельності (2):

$$\begin{cases} \Delta R(\Delta Q_i) \rightarrow \min, i \in [1..n_q]; \\ \mathbf{J}_\phi^{-1} \Delta \mathbf{Q} = \Delta \mathbf{U}, \end{cases} \quad (6)$$

де \mathbf{J}_ϕ^{-1} – фрагмент оберненої матриці Якобі розмірністю $n_n \times n_q$, що пов’язує відхилення реактивної потужності у вузлах з ДРП ΔQ_i та відхилення напруги у вузлах, де порушено обмеження (5); $\Delta \mathbf{Q}$ – вектор стовпець розмірністю n_q із відхиленнями реактивної потужності у вузлах із ДРП ΔQ_i ; $\Delta \mathbf{U}$ – вектор стовпець розмірністю n_n , кожен елемент якого ΔU_i визначається як різниця між розрахунковим U_j та граничним U_{j_max} значеннями напруги у j -му вузлі, для якого обмеження порушено.

Задачу пошуку максимуму рентабельності (2) з певними припущеннями можна замінити задачею мінімізації еквівалентних втрат потужності [3]:

$$V_{Q_{екв}} = V_Q + \alpha_{втр} \sum_{i=1}^{n_q} Q_i + \sum_{i=1}^{n_q} (K_{i,Q_i} + K_{Q_i}) \frac{(\alpha_c + \alpha_p)(1 - \alpha_n) + (\alpha_{кр} + \alpha_p)}{\tau c (1 - \alpha_n)}, \quad (7)$$

в яких враховано втрати V_Q після встановлення пристроїв компенсації Q_i , а також економічні чинники, що визначають рентабельність проекту та описані вище. З огляду на це, для спрощення постановки задачі (6) було запропоновано перейти до мінімізації приросту еквівалентних втрат:

$$\Delta V_{Q_{екв}}(\Delta Q_i) = \sum_{i=1}^{n_q} \left(\frac{\partial V_Q}{\partial Q_i} + \alpha_{K_i} + \alpha_{втр} \right) \Delta Q_i \rightarrow \min, \quad (8)$$

де $\alpha_{K_i} = K_{i,Q_i} \frac{(\alpha_c + \alpha_p)(1 - \alpha_n) + (\alpha_{кр} + \alpha_p)}{\tau c (1 - \alpha_n)}$ – коефіцієнт, що враховує зменшення капіталовкладень та експлуатаційних видатків через коригування потужності ДРП.

Цільову функцію (8), використовуючи коефіцієнти розподілу втрат потужності, що отримані у [10], було зведено до лінійної. Це дозволило для розв’язання задачі пошук оптимальних відхилень потужностей ДРП:

$$\begin{cases} \Delta V_{Q_{екв}}(\Delta Q_i) = \sum_{i=1}^{n_q} (T_{Q_i} + \alpha_{K_i} + \alpha_{втр}) \Delta Q_i \rightarrow \min; \\ \mathbf{J}_\phi^{-1} \Delta \mathbf{Q} = \Delta \mathbf{U} \end{cases} \quad (9)$$

застосувати симплекс-метод. Коефіцієнти розподілу втрат T_{Q_i} [15] визначаються так:

$$T_{Q_i} = \sum_{j \in M_i} (-\text{Im}(T_{ji})), \quad (10)$$

де M_i – множина віток ЕМ, якими здійснюється транспортування реактивної потужності до i -го вузла; T_{ji} – елемент матриці коефіцієнтів розподілу втрат потужності в ЕМ, що чисельно дорівнює відносному приросту втрат потужності у i -ій вітці $\partial V_{Q_i} / \partial Q_i$ [10], $\mathbf{T}_j = (\mathbf{U}_i \mathbf{M}_{sj}) \hat{\mathbf{C}}_j \mathbf{U}_d^{-1}$ – вектор коефіцієнтів розподілу втрат для j -ої вітки від потужностей вузлів ЕМ; \mathbf{U}_i , \mathbf{U}_d – відповідно, транспонований та діагоналізований вектори напруг у вузлах, включаючи базисний; \mathbf{M}_{skr} – транспонована матриця зв'язків віток у вузлах; \mathbf{C} – матриця струморозподілу в ЕМ.

Зважаючи на постановку задачі (9), кількість оптимізованих змінних n_q переважно виявляється більшою за кількість порушених обмежень за напругою n_n . У виключних випадках, коли $n_n > n_q$, для вирішення задачі (9) з переліку вузлів із порушенням обмежень за напругою необхідно відібрати $n'_n = n_q - 1$, для яких перевищення напруги виявляється найбільшими. Застосування такого підходу дає змогу з переліку оптимізованих змінних ΔQ_i вибрати сукупність базових змінних, коригування яких забезпечить виконання обмежень щодо відхилення напруги у вузлах ЕМ та матиме найменший вплив на функцію мети (2). З огляду на це накладання обмежень (5) призводить до найменшого відхилення від глобального екстремуму.

Для підтвердження ефективності запропонованого підходу з оптимізації розміщення ДРП в електричних мережах виконано розрахунки та натурні дослідження на прикладі розподільних ЕМ 110/35/10 кВ ПАТ «Вінницяобленерго».

Для розміщення було використано конденсаторні установки номінальною напругою 10 кВ та встановленою потужністю від 0.9 Мвар до 9.9 Мвар. Результати розрахунків з оптимізації розміщення конденсаторних установок за критерієм максимальної рентабельності подано у табл. 1. Розрахунки виконано за допомогою авторського програмного комплексу «ВТРАТИ». Укрупнені економічні показники проекту наведено у табл. 2.

За результатами розрахунків встановлено, що врахування обмежень за відхиленням напруги в ЕМ має значний вплив на оптимальний розв'язок задачі розміщення ДРП, незважаючи на добру оснащеність мереж засобами вторинного регулювання напруги. Якщо вузли приєднання ДРП та їх оптимальні потужності визначати без урахування обмежень за напругою (5), то реалізація такого розв'язку дала б змогу забезпечити зменшення втрат майже на 5,8 млн кВт•год на рік, однак погіршила б якість електроенергії в ЕМ. Забезпечення якості електроенергії на стадії експлуатації мереж призвело б до необхідності обмеження потужностей генерування вже встановлених ДРП, а отже, до зменшення коефіцієнту їх використання та ефекту від впровадження.

Врахування обмежень за напругою призвело до зменшення встановленої потужності ДРП (табл. 1), обсягів капіталовкладень та експлуатаційних витрат. Однак імовірний ефект зменшення втрат виявився значно меншим: 4,5 млн кВт•год на рік. Через це такий розв'язок має нижчу рентабельність (табл. 2), що підтверджує подані вище теоретичні міркування.

Таким чином, експериментально показано, що реалізація розробленого методу та алгоритмів вра-

Таблиця 1

Варіанти розміщення ДРП в електричних мережах

| Умови проведення оптимізаційного розрахунку | Без обмеження напруги | | З обмеженням напруги | | Коригування потужності ДРП |
|---|-----------------------|------------|----------------------|------------|----------------------------|
| | $Q_{дрп}$, Мвар | U_i , кВ | $Q_{дрп}$, Мвар | U_i , кВ | ΔQ , Мвар |
| 1С-ПС 110 кВ Південна | 9,9 | 10,5 | 9,9 | 10,5 | - |
| 2С-ПС 110 кВ Південна | 8,1 | 10,6 | 8,1 | 10,6 | - |
| 1С-ПС 110 кВ Бершадь | 8,1 | 11,2 | 5,4 | 10,7 | 2,7 |
| 2С-ПС 110 кВ Бершадь | 1,8 | 11,0 | 1,35 | 10,7 | 0,45 |
| 2С-ПС 110 кВ Крижопіль | 7,2 | 11,1 | 5,85 | 10,6 | 1,35 |
| 1С-ПС 110 кВ Крижопіль | 1,8 | 11,0 | 1,35 | 10,7 | 0,45 |
| 2С-ПС 110 кВ Нова | 4,5 | 10,6 | 4,5 | 10,6 | - |
| 1С-ПС 110 кВ Нова | 4,5 | 10,5 | 4,5 | 10,4 | - |
| 1С-ПС 110 кВ Західна | 3,6 | 10,4 | 3,6 | 10,4 | - |
| 2С-ПС 110 кВ Західна | 2,7 | 10,6 | 2,7 | 10,6 | - |
| 2С-ПС 110 кВ Промислова | 2,7 | 10,7 | 2,7 | 10,6 | - |
| 1С-ПС 110 кВ Промислова | 2,7 | 10,6 | 2,7 | 10,6 | - |
| 2С-ПС 35 кВ Центральна | 4,5 | 10,4 | 4,5 | 10,4 | - |

Техніко-економічні показники впровадження ДРП в електричних мережах

| Техніко-економічний показник | Без обмеження напруги | З обмеженням напруги | Зміна показника |
|--|-----------------------|----------------------|-----------------|
| Втрати енергії до встановлення ДРП, млн кВт год | 149,4 | 149,4 | - |
| Втрати енергії після встановлення ДРП, млн кВт год | 143,6 | 144,9 | 1,3 |
| Втрати енергії в ДРП, млн кВт год | 0,53 | 0,49 | -0,04 |
| Зменшення втрат, млн кВт год | 5,27 | 4,01 | -1,26 |
| Надходження від зменшення втрат, тис грн | 6767,0 | 5151,2 | -1615,8 |
| Сумарна потужність ДРП, Мвар | 62,1 | 57,15 | -4,95 |
| Сумарні капіталовкладення в ДРП, тис грн | 27755,8 | 22991,0 | -4764,8 |
| Річні експлуатаційні видатки, тис грн | 1332,3 | 1103,6 | -228,7 |
| Річні амортизаційні відрахування, тис грн | 2775,6 | 2299,1 | -476,5 |
| Поточний річний чистий прибуток, тис. грн | 2233,7 | 1468,8 | -764,9 |
| Рентабельність капіталовкладень, % | 18,0 | 16,4 | -1,6 |
| Очікуваний термін окупності капіталовкладень, рік | 5,5 | 6,1 | 0,6 |

хування активних обмежень на параметри забезпечує розв'язання задачі оптимізації розміщення ДРП у більш загальній постановці. Збільшення переліку потенційних місць встановлення ДРП не призводить до суттєвого підвищення складності й погіршення збіжності процесу розрахунку. Останнє досягається завдяки застосуванню алгоритму пошуку розв'язку від «ідеального» режиму функціонування, за принципом Гамільтона, до оптимального, з урахуванням активних обмежень на параметри.

Висновки. Для розв'язання задачі оптимізації розміщення додаткових джерел реактивної потужності в електромережах, як і для широкого кола інших технічних задач, доцільно застосовувати підхід, що базується на імітації «ідеальних» режимів за принципом Гамільтона [2]. Він дає змогу спростити задачу оптимізації конструктивних параметрів ЕМ, звівши її до розрахунку пара-

метрів режимів деякої фіктивної мережі. Завдяки особливостям побудови заступної схеми мережі [3], розраховані параметри виявляються «ідеальними» з огляду на заданий критерій оптимальності.

Слабким місцем підходу є врахування активних обмежень, зокрема обмежень на відхилення напруги в ЕМ. Для їх врахування запропоновано метод коригування оптимальних потужностей ДРП за результатами розв'язання допоміжної оптимізаційної задачі. Завдяки використанню коефіцієнтів розподілу втрат потужності останню вдалося звести до задачі лінійного програмування, що підвищило надійність та швидкодію її розв'язання. Вдосконалення підходу, що базується на імітації «ідеальних» режимів ЕМ за Гамільтоном, дало змогу розширити область його застосування та підвищити ефективність проектних рішень.

Список літератури:

1. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їх технологічне забезпечення. Технічна електродинаміка. 2015. № 6. С. 44–50.
2. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Нетребський В.В., Тептя В.В. Принцип найменшої дії в електротехніці та електроенергетиці: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2014. 212 с.
3. Kulyk V., Burykin O., Pirnyak V. Optimization of the placement of reactive power sources in the electric grid based on modeling of its ideal modes. Technology audit and production reserves. 2018. № 2(40). vol. 1. P. 59–65.
4. Кулик В.В., Грицюк І.В., Грицюк Ю.В. Оптимальне керування потоками реактивної потужності в розподільних електромережах із розосередженим генеруванням. Праці Інституту електродинаміки НАНУ. Збірник наукових праць. Спеціальний випуск. 2013. С. 151–158.
5. Hinz F., Moest D. Techno-economic Evaluation of 110 kV Grid Reactive Power Support for the Transmission Grid. IEEE Transactions on Power Systems. 2018. № 99.
6. Kaloudas C., Shaw R. Long-term forecasting of reactive power demand in distribution networks. CIRED – Open Access Proceedings Journal. 2017. № 1. P. 2406–2410.
7. Narayan S. Rau. Optimization Principles: Practical Applications to the Operation and Markets of the Electric Power Industry. Solved Nonlinear Optimization Problems. Wiley-IEEE Press, 2003. P. 245–295.

8. Jizhong Zhu. Optimization of Power System Operation. Reactive Power Optimization. Wiley-IEEE Press, 2009. P. 409–454.

9. Холмский В.Г. Оптимизация потокораспределения в замкнутых электрических сетях с высокой степенью неоднородности. Электричество. 1965. № 9. С. 16–21.

10. Бурикін О.Б., Лежнюк П.Д., Кулик В.В. Взаємовплив електричних мереж і систем в процесі оптимального керування їх режимами: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2008. 123 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С УЧЕТОМ АКТИВНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

В статье решается задача оптимизации размещения источников реактивной мощности (ИРМ) в распределительных электрических сетях (РЭС) по экономическому критерию с обеспечением допустимости отклонений напряжения. Экстремальные значения мощностей ИРМ определяются согласно принципу Гамильтона. Для учета ограничений по напряжению в РЭС решается дополнительная оптимизационная задача, которую удалось свести к линейной благодаря использованию коэффициентов распределения потерь и матрицы чувствительности Якоби. Экономические аспекты задачи учитываются фиктивными экономическими сопротивлениями. Применение такого подхода сокращает продолжительность расчетов и позволяет получить решение, минимально удаленное от глобального экстремума целевой функции.

Ключевые слова: электрическая сеть, потоки реактивной энергии, оптимизация, источник реактивной мощности, «идеальный» режим, экономическое сопротивление, отклонение напряжения.

OPTIMIZING THE PLACEMENT OF REACTIVE POWER SOURCES IN THE ELECTRIC NETWORK, TAKING INTO ACCOUNT THE ACTIVE LIMITATIONS

The problem of optimization of the location of reactive power sources (RPS) in distributed electrical networks (DEN) is solved in the article according to the economic criterion to ensure the tolerance of voltage deviations. Extreme values of RPS capacities are determined in accordance with the Hamiltonian principle. To account for voltage deviation in DEN, an additional optimization problem is solved, which was reduced to linear due to the use of loss distribution coefficients and Jacobi sensitivity matrix. Economic aspects of the task are taken into account by fictitious economic resistance. The application of this approach reduces the duration of the calculations and allows for a solution that is minimally distant from the global extremum of the target function.

Key words: electric network, reactive energy flow, optimization, source of reactive power, “ideal” mode, economic resistance, voltage deviation.