

УДК 621.311.031

Б. С. Рогальський, д. т. н., проф.; Ю. В. Грицюк; І. П. Сосенко
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ КОМПЕНСАЦІЇ
РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Проаналізовано відомий метод розрахунку компенсації реактивної потужності. Запропоновано удосконалення, які дозволяють обґрунтовувати більш високі рівні компенсації реактивної потужності і, відповідно, підвищити її енергоефективність.

Ключові слова: компенсація реактивної потужності.

Постановка проблеми і аналіз останніх досліджень і публікацій

В [1] наведені функції затрат на КРП:
у мережах підприємства

$$Z = Z_{П.Г} \cdot Q_M (1 - \psi) + Z_{ПП1} \cdot Q_M \cdot \psi + \frac{Z_{ПП2} \cdot Q_M^2 \cdot \psi^2}{K_0}, \quad (1)$$

у мережах підсистеми

$$Z = \dot{Q}_n \cdot \dot{D} \cdot (1 - \Psi) + \dot{Q}_n \cdot \dot{P} \cdot R \cdot \dot{C} \cdot \left(\dot{Q}_n \cdot \dot{P} \right)^t \cdot \Psi, \quad (2)$$

де $Z_{П.Г}$ – середньозважені питомі затрати на генерацію реактивної потужності всіма КУ (компенсувальними установками), тис. грн. / МВАр; $Z_{ПП1}$ – питомі затрати споживача на реактивну потужність і енергію, що споживається з мережі ЕС, тис. грн. / МВАр; $Z_{ПП2}$ – питомі витрати на передавання реактивної потужності через мережу, тис. грн. / МВАр²; Q_M – максимум реактивної потужності на вводі мереж споживача, МВАр; ψ – вхідна реактивна потужність у відносних одиницях ($\psi = Q_e/Q_M$, Q_e – вхідна реактивна потужність в абсолютних одиницях, МВАр; величина ψ – є змінною оптимізації функції (1)); K_0 – коефіцієнт відхилення фактичного поточкорозподілу реактивної потужності від оптимального значення, при якому втрати в мережі мінімально можливі (при $K_0=1$), у відносних одиницях; $Z_{ПП2} \cdot Q_M^2 \cdot \psi^2$ – затрати на передавання реактивної потужності через мережу під час фактичного поточкорозподілу (до компенсації) при тому чи іншому значенні Ψ , тис. грн; $\frac{Z_{ПП2} \cdot Q_M^2 \cdot \psi^2}{K_0}$ – мінімально можливі витрати на передавання реактивної потужності через мережу (після компенсації) за умови, що КУ у вузлах мережі розміщені оптимально (за критерієм мінімальних втрат) при розв'язанні балансової задачі КРП, тис. грн; $Z_{ПП1} \cdot Q_M \cdot \Psi$ – витрати споживача на реактивну потужність і енергію, що споживаються з мережі енергосистеми, тис. грн. $\dot{Q}_n = (Q_{n1} \dots Q_{nn})$ – вектор-рядок реактивних навантажень вузлів підсистеми, МВАр; $\dot{D} = (Z_{n21} \dots Z_{n2n})^t$ – вектор питомих витрат на генерацію реактивної потужності її джерелами у вузлах мереж підсистеми, тис. грн. / МВАр; \dot{P} – матриця шляхів; R – діагональна матриця активного опору гілок схеми заміщення мереж підсистеми, Ом; \dot{C} – діагональна матриця коефіцієнтів C_i ($i=1..n$) [1].

Із рівнянь (1) і (2) видно, що цільова функція (1) має складову, яка відображає витрати споживача на споживання ним реактивної потужності й енергії з мережі енергосистеми, а у Наукові праці ВНТУ, 2009, № 1

функції (2) така складова відсутня. Це пояснює введення для споживачів з 1998 р. оплати за реактивну енергію, а для енергопостачальних компаній такої оплати немає [2]. Виникає питання, чи доцільно зазначену вище складову враховувати при системному розрахунку КРП у мережах підсистеми, тобто в цільовій функції (2)? Якщо припустити позитивну відповідь на це запитання, то тоді, як визначити вартість втрат для мереж підсистеми, яка охоплює мережі енергопостачальної компанії і приєднаних до неї споживачів?

На стадії вирішення економічної задачі КРП оптимальний розподіл КУ і, відповідно, залишковий (недокомпенсований) розподіл реактивної потужності невідомий, але є можливість ще до вирішення економічної задачі визначити K_0 за формулою [1]:

$$K_0 = \frac{R_{e.в.}}{R_e} \geq 1, \quad (3)$$

де $R_{e.в.}$ – еквівалентний активний опір мережі, визначений за фактичними втратами (до компенсації), Ом; R_e – еквівалентний активний омичний опір мережі, визначений шляхом послідовного її еквівалентування, Ом.

Величина $R_{e.в.}$ визначається за формулою [1]:

$$R_{e.в.} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i^2 r_i}{Q_M^2}, \quad (4)$$

де Q_i, r_i – відповідно реактивне навантаження й опір і-го елемента мережі, МВАр·Ом.

За умовою $\partial Z / \partial \psi$ отримані оптимальні (за критерієм мінімальних затрат) значення вхідної реактивної потужності й сумарної потужності КУ у відносних і абсолютних одиницях:

$$\psi_0 = \frac{(3_{П.Г.} - 3_{ПМ}) \cdot K_0}{23_{ПМ2} \cdot Q_M}, \quad (5)$$

$$Q_{e.0} = \frac{(3_{П.Г.} - 3_{ПМ}) \cdot K_0}{23_{ПМ2}}, \quad (6)$$

$$a_0 = 1 - \psi_0, \quad (7)$$

$$Q_{КУ.0} = Q_M - Q_{e.0}, \quad (8)$$

де a_0 – ступінь або рівень компенсації реактивної потужності в електричній мережі, у відносних одиницях.

Рівняння (8) виникає з умови балансу реактивної потужності на вводі електричної мережі підсистеми (підприємства), а (7) – шляхом ділення рівняння (8) на величину Q_M .

Аналіз формул (5) і (6) показує, що інтенсивніше збільшення вартості засобів компенсації, порівняно з вартістю електроенергії, призводить до зменшення економічно обґрунтованого рівня КРП (a_0). І навпаки, наявність плати за реактивну енергію і збільшення вартості втрат, дозволяє обґрунтувати більш високий рівень КРП.

Мета статті запропонувати удосконалення відомого методу з метою підвищення точності розрахунку КРП і, відповідно, її енергоефективності.

Основні матеріали досліджень

В останні 10 - 15 років склався диспаритет цін на засоби компенсації (комплектні конденсаторні установки, прилади обліку електроенергії, комутаційна апаратура) та електроенергії. Ціни на електроенергію контролюються державою (НКРЕ – національною комісією з регулювання електроенергетики) і ростуть повільніше, ніж ціни на засоби

компенсації. У результаті склалася парадоксальна ситуація: найбільш ефективна енергозберігаюча технологія в електричних мережах, якою є КРП, часто виявляється економічно недоцільною. Утворилась проблема економічного обґрунтування рівнів КРП в електричних мережах. Введення в цільову функцію (1) вартості реактивної електроенергії збільшує економічно обґрунтований рівень КРП або зменшує ВРП (вхідну реактивну потужність), див. формули (5 - 8).

Визначення ВРП і рівня КРП за формулами (5) і (7) дозволяє обґрунтувати її ефективність з позиції окремого споживача і зробити уточнення в окремих випадках системного розрахунку [1]. У той же час, використання системного підходу до розрахунку КРП суттєво підвищує економічно обґрунтований рівень КРП (мережі енергопостачальної компанії та приєднані до неї споживачі розглядаються одночасно [3]). Логічно прийти до висновку, що внесення в функцію витрат на КРП для її системного розрахунку вартості реактивної енергії для споживача призведе до ще більшого підвищення економічно обґрунтованого рівня КРП. Тоді для системного розрахунку КРП пропонується застосовувати функцію (1) як більш просту при виконанні розрахунків персоналом енергосистем і споживачів.

Слід зазначити, що через недостатню ефективність діючої методики розрахунку оплати за реактивну енергію [2], Мінпаливенерго України прийняло рішення про розробку нової редакції цієї методики, в якій може бути реалізована пропозиція про взаєморозрахунки між суб'єктами оптового ринку електроенергії України. У такому випадку вартість втрат у мережах підсистеми пропонується визначати за середньозваженим тарифом за формулою:

$$T_{с.зв} = \frac{\Delta W_e \cdot T_{онт} + \Delta W_{сн} \cdot T_{роз}}{\Delta W_e + \Delta W_{сн}}, \quad (9)$$

де $\Delta W_e, \Delta W_{сн}$ – відповідно втрати електроенергії в мережах підсистеми і приєднаних до неї споживачів, кВт·год; $T_{онт}, T_{роз}$ – відповідно оптовий і роздрібний тариф на активну електроенергію.

Введення в цільову функцію (1) коефіцієнта K_0 дозволяє врахувати, ще на стадії вирішення економічної задачі, оптимізацію потоків реактивної потужності після компенсації (за допомогою оптимального розміщення КУ й управління ними). Іншими словами, враховувати оптимізацію залишкових (недокомпенсованих) перетоків реактивної потужності (K_0 введено у відповідності з вимогами [4]).

З іншого боку, введення в цільову функцію коефіцієнта K_0 призводить до збільшення вхідної реактивної потужності (ψ_0 і $Q_{e.0}$) і, відповідно, зменшення рівня КРП (a_0) і сумарної потужності КУ, які потрібно установити в електричній мережі ($Q_{КУ}$). Якщо взяти до уваги, що величина K_0 може змінюватись в основному в мережах від 1,05 до 2,0 і більше, то зменшення економічно обґрунтованого рівня КРП може бути суттєвим. У той же час зменшення вартості втрат (при наявності K_0) від залишкових (після компенсації) перетікань реактивної потужності за абсолютною величиною незначне.

Для усунення зазначеного протиріччя запропоновано коефіцієнт K_0 у цільову функцію (1) не вводити, а використовувати його при визначенні економічної та енергетичної ефективності компенсації. Із врахуванням зазначених змін математична модель для вирішення економічної задачі КРП буде виглядати так:

$$\begin{cases} Z = 3_{П.Г} \cdot Q_M (1 - \psi) + 3_{ПП1} \cdot Q_M \cdot \psi + 3_{ПП2} \cdot Q_M^2 \rightarrow \min \\ Q_M = Q_{КУ} + Q_e \\ \psi_0 \leq 1, a_0 \geq 0. \end{cases} \quad (10)$$

За умовою $\partial Z / \partial \psi = 0$ отримаємо оптимальні (за критерієм мінімальних затрат) параметри КРП для мереж підсистеми (підприємства):

$$\psi_0 = \frac{(3_{П.Г.} - 3_{ПП1})}{23_{ПП2} \cdot Q_M},$$

$$Q_{e.o.} = \frac{(3_{П.Г.} - 3_{ПП1})}{23_{ПП2}}, \quad (11)$$

$$a_0 = 1 - \psi_0,$$

$$Q_{KV,0} = Q_M - Q_{e.o.} \quad (12)$$

Значення параметра $3_{П.Г.}$ визначаються за формулою наведеною в [1]. Параметри $3_{ПП1}$ і $3_{ПП2}$ запропоновано визначати за формулами, відповідно, (тис. грн. / МВАр; тис. грн. / МВАр²):

$$3_{ПП1} = 10^{-3} \cdot \frac{П1 + П2 - П3}{Q_M}, \quad (13)$$

$$3_{ПП2} = \frac{T_{c.зв.} \cdot \tau \cdot R_{e.в.}}{U_M^2}, \quad (14)$$

де $П_1, П_2$ – основна і додаткова плати за реактивну енергію, грн.; $П_3$ – скидка з оплати за реактивну енергію, грн. [2]; τ – число годин максимальних втрат електроенергії, год.

Уточнення формул (11) і (12) зумовлені встановленням оплати за реактивну енергію і визначенням питомої вартості втрат активної електроенергії від передавання реактивної у відповідності з діючою методикою [2].

Якщо в результаті розрахунку виявиться, що $\psi \geq 1$, а $a_0 \leq 0$, то це означає, що КРП в мережах цієї підсистеми економічно недоцільна.

Підсумковим і, в той же час, важливим етапом розрахунку КРП є визначення її економічної та енергетичної ефективності. Власне за результатами цього розрахунку приймається рішення про її впровадження.

Необхідність в уточненні методу оцінювання ефективності КРП викликана змінами у вимогах нормативних документів і в підходах до її розрахунку.

У загальному випадку всі можливі джерела фінансування проектів КРП можуть бути поділені на дві групи:

а) власні кошти (прибутки, накопичення, амортизаційні відрахування та інші види активів підприємств, залучені кошти із внутрішніх і зовнішніх джерел: продаж акцій; кошти, що надходять від холдингових та акціонерних компаній, промислово-фінансових груп; з державного та місцевого бюджетів, централізованих та позабюджетних коштів);

б) позичені кошти, у тому числі кредити, що надає держава, кредити іноземних інвесторів, облігаційні позики, кредити банків та інших інвесторів – інвестиційних фондів і компаній, страхових організацій і компаній, страхових організацій та інших; іноземні інвестиції у формі фінансової та іншої участі в розробці і реалізації інновацій – прямих вкладень, а також участі в статутному фонді спільних підприємств.

Зазначимо, що капітальні вкладення в КРП реалізуються протягом одного року, тобто є одночасним, за винятком тих випадків, коли мають місце обмеження фінансових ресурсів.

У випадку джерел фінансування, які відносяться до групи "а", річний економічний ефект пропонується визначати за формулою:

$$E_p = 3_{ПП2} \cdot Q_M^2 \left(\psi_\phi^2 - \frac{\psi_0^2}{K_0} \right) + 3_{ПП1} \cdot Q_M (\psi_\phi - \psi_0) + \Delta 3 - 3_{ПГ} \cdot Q_M (1 - \psi_0), \quad (15)$$

де ψ_ϕ – вхідна реактивна потужність до компенсації (при відсутності КРП $\psi_\phi = 1$), у відносних одиницях; $3_{ПП2} \cdot Q_M^2 \cdot \psi_\phi^2$ – вартість втрат до КРП або до додаткової КРП, тис.

грн.; $3_{III2} \cdot Q_m^2 \cdot \psi_\phi^2 / K_0$ – вартість втрат після КРП або після додаткової КРП з врахуванням оптимізації залишкових потоків реактивної потужності, тис. грн.; $3_{III1} \cdot Q_m \cdot \psi_\phi$ – вартість споживання реактивної енергії з мережі енергосистеми до компенсації або до додаткової компенсації, тис. грн.; $3_{III1} \cdot Q_m \cdot \psi_0$ – вартість споживання реактивної енергії з мережі ЕС після компенсації, тис. грн.

Термін окупності капітальних вкладів:

$$T_{ок} = \frac{3_{III} \cdot Q_m (1 - \psi_0)}{E_p} \quad (16)$$

Зниження втрат:

- активної потужності (кВт)

$$\Delta P = \frac{10^{-3} \cdot R_{e.в.} \cdot Q_m^2}{U_n^2} \left(\psi_\phi^2 - \frac{\psi_0^2}{K_0} \right); \quad (17)$$

- активної електроенергії

$$\Delta W_0 = \frac{10^{-3} \cdot R_{e.в.} \cdot Q_m^2 \cdot \tau_{м.р}}{U_n^2} \left(\psi_\phi^2 - \frac{\psi_0^2}{K_0} \right). \quad (18)$$

У випадку джерел фінансування, які відносяться до групи "б", при визначенні річного економічного ефекту, враховується вартість кредиту (або інших запозичень):

$$E_p = 3_{III2} \cdot Q_m^2 \left(\psi_\phi^2 - \frac{\psi_0^2}{K_0} \right) + 3_{III1} \cdot Q_m (\psi_\phi - \psi_0) + \Delta 3 - 3_{III} \cdot (1 + p) \cdot Q_m (1 - \psi_0), \quad (19)$$

де p – банківська кредитна ставка, у відносних одиницях.

Висновки

1. Уточнення цільової функції на компенсацію, визначення питомої вартості втрат електроенергії, методу оцінки економічної та енергетичної ефективності КРП – дозволяє обґрунтувати більш високий рівень КРП в електричних мережах споживачів і ЕС, і точніше оцінити її ефективність.

2. Запропоновано однаковий метод розрахунку КРП у мережах підсистеми і окремого споживача, тим самим відпадає необхідність в розробці різного для них програмного забезпечення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рогальський Б. С. Методи поетапного розрахунку компенсації реактивної потужності в електричних мережах енергосистем і споживачів, / Б. С. Рогальський // Промислова електроенергетика та електротехніка. – 2001. – Випуск 1. – С. 22 - 39.
2. Методика розрахунку плати за перетоки реактивної електроенергії між електропостачальною організацією та її споживачами. – 1998. – Випуск 4. – С. 36 – 41.
3. Рогальський Б. С., Кузміньська С. О., Праховник А. В., Динесенко М. А., Божко В. М. Ще раз про визначення економічно доцільних обсягів споживання реактивної енергії // Промислова електроенергетика та електротехніка. Промелектро. – 2005. – №3. – С. 6 – 12.
4. Инструкция по системному расчету компенсации реактивной мощности в электрических сетях // Промышленная энергетика. – 1991. – №7. – С. 51 – 55.

Рогальський Броніслав Станіславович – д. т. н., професор кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Вінницький національний технічний університет.

Грицюк Юрій Віталійович – асистент кафедри електропостачання.

Луцький національний технічний університет.

Сосенко Ірина Петрівна – аспірант кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Вінницький національний технічний університет.