

# ЯК ОБҐРУНТУВАТИ РІВНІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ЗА ВАРТІСТЮ ВТРАТ: ДО ЧИ ПІСЛЯ КОМПЕНСАЦІЇ?

---

## Аналіз останніх досягнень та публікацій

В [1] було запропоновано враховування зміни графіка електричних навантажень (ГЕН) після впровадження компенсації реактивної потужності (КРП) шляхом введення коефіцієнта  $k_{\lambda}^i$  у формулу для розрахунку економічного значення реактивної енергії, що споживається з мережі енергосистеми за місяць в години максимальних навантажень електромережі. Його подано як коефіцієнт, що враховує зменшення кількості годин використання максимуму реактивного навантаження у разі встановлення компенсувальних установок (КУ), а також наведено алгоритм для його визначення [1].

Результати розрахунку за даним методом не є досить точними, оскільки коефіцієнт  $k_{\lambda}^i$  пропонується визначати за допомогою емпіричних формул. Крім того, використовуючи значення нового ГЕН, отримаємо занижені (порівняно з тими, що були до компенсації) значення витрат на передавання реактивної потужності в електричних мережах. У подальших розрахунках КРП це призведе до завищення значень вхідних реактивних потужностей і, відповідно, до зниження обґрунтованого рівня КРП.

В [2] пропонується враховувати фактор оптимізації поточкорозподілу після КРП за допомогою коефіцієнта відхилення фактичного поточкорозподілу реактивної потужності від оптимального значення  $K_0$ , за яким втрати в мережі мінімально можливі. Зазначено, що введення в цільову функцію коефіцієнта  $K_0$  дозволяє врахувати ще на стадії вирішення економічної задачі оптимізацію потоків реактивної потужності після компенсації (за допомогою оптимального

розміщення КУ і управління ними), іншими словами – враховувати оптимізацію залишкових (недокомпенсованих) перетоків реактивної потужності в електричних мережах.

Однак зменшення вартості втрат від залишкових (після компенсації) перетікань реактивної потужності незначне за абсолютною величиною порівняно зі зменшенням економічного ефекту (за наявністю  $K_o$  у цільовій функції). Отже, виникає протиріччя, яке потребує розв'язання.

Зниженню рівня компенсації також сприяє нормативний документ [3], де проігноровано системний підхід під час проектування КРП, невідповідність цін на засоби компенсації й електроенергію, зниження активних і реактивних навантажень і т. ін.

### Постановка проблеми

Згідно з [2, 4] функція витрат на КРП в мережах підприємства має вигляд:

$$Z = Z_{\text{пр}} Q_M (1-\Psi) + Z_{\text{п.п.1}} Q_M \Psi + \frac{Z_{\text{п.п.2}} Q_M^2 \Psi^2}{K_o}, \quad (1)$$

де  $Z_{\text{пр}}$  – середньозважені питомі витрати на генерацію реактивної потужності всіма КУ тис.грн/Мвар;

$Z_{\text{п.п.1}}$  – питомі витрати споживача на реактивну потужність і енергію, що споживаються з мережі енергосистеми (ЕН) (тис.грн/МВАр);

$Z_{\text{п.п.2}}$  – питомі витрати на передавання реактивної потужності мережею (тис.грн/МВАр);

$Q_M$  – максимум реактивної потужності на ввіді мереж споживача, МВАр;

$\Psi$  – вхідна реактивна потужність у відносних одиницях ( $\Psi = Q_c / Q_M$ , де  $Q_c$  – вхідна реактивна потужність в абсолютних одиницях, МВАр);

величина  $\Psi$  – є змінною оптимізації функції (1);

$K_o$  – коефіцієнт відхилення фактичного потокорозподілу реактивної потужності від оптимального значення, при якому втрати в мережі мінімально можливі (при  $K_o=1$ ), у відн. од;

$Z_{\text{п.п.2}} Q_M^2 \Psi^2$  – витрати на передавання реактивної потужності по мережі при фактичному потокорозподілі (до компенсації) з тим чи іншим значенням  $\Psi$ , тис.грн;

$\frac{Z_{\text{п.п.2}} Q_M^2 \Psi_o^2}{K_o}$  – мінімально можливі витрати на передавання реактивної потужності по мережі

(після компенсації) за умови, що КУ по вузлах мережі розміщені оптимально (за критерієм мінімальних втрат) при розв'язанні балансової задачі КРП, тис.грн.

На стадії вирішення економічної задачі КРП  $K_o$  визначають за формулою [2]:

$$K_o = \frac{R_{\text{е.в}}}{R_e} \geq 1, \quad (2)$$

де  $R_{\text{е.в}}$  – еквівалентний активний опір мережі, визначений за фактичними втратами (до компенсації), Ом;

$R_e$  – еквівалентний активний опір мережі, визначений шляхом її послідовного еквівалентування, Ом.

Величина  $R_{\text{е.в}}$  визначається за формулою [2]:

$$R_{\text{е.в}} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i^2 r_i}{Q_M^2}, \quad (3)$$

де  $Q_i$  – фактичне реактивне навантаження в  $i$ -й вітці, МВАр;

$r_i$  – омичний опір  $i$ -тої вітки мережі, що розглядається, Ом.

Із формули (2) видно, якщо  $R_{\text{е.в}} = R_e$ , тоді  $K_o = 1$ . Це відповідає ситуації оптимального потокорозподілу та мінімальним втратам потужності й електроенергії. Але такий режим роботи без КРП неможливо забезпечити, оскільки у разі незмінних параметрів мережі реактивне навантаження змінюється в широких межах. Відповідно змінюється і величина  $K_o$  (найчастіше  $K_o > 1$ ).

За умовою  $\partial Z / \partial \Psi = 0$  маємо:

$$\Psi_o = \frac{(Z_{\text{п.г.}} - Z_{\text{п.п.1}}) K_o}{2 Z_{\text{п.п.2}} Q_M}, \quad (4)$$

$$Q_{e.o} = \frac{(3_{п.п1} - 3_{п.п2}) K_o}{23_{п.п2}}, \quad (5)$$

$$a_o = \psi_o, \quad (6)$$

$$Q_{кy.o} = Q_m - Q_{e.o}, \quad (7)$$

де  $a_o$  – ступінь або рівень компенсації реактивної потужності в електричній мережі, в.о.;  
 $Q_{кy.o}$  – оптимальне значення сумарної потужності КУ, які економічно доцільно установити в електричній мережі, МВАр.

Як зазначено вище, коефіцієнт  $K_o$  може набувати значень, більших за одиницю. Тому його наявність у формулах (4), (5) призводить до збільшення значення вхідної реактивної потужності, отже, до значного зниження рівня КРП. Якщо в результаті розрахунку виявиться, що  $\psi_o \geq 1$ , а  $a_o \leq 0$ , то це означає, що КРП в мережах цієї підсистеми економічно недоцільна.

### Задача досліджень

Необхідно вдосконалити методичне забезпечення розрахунку КРП у напрямку підвищення її енергоефективності шляхом обґрунтування більш високих рівнів КРП.

### Виклад основного матеріалу

Для розв'язання окресленої задачі використаємо дані, отримані шляхом розрахунку КРП для мереж підсистеми, що включає підстанції «Липовець» 110/35/10 кВ, «Станція Липовець» 35/10 кВ та приєднані до них мережі напругою 35 і 10 кВ (табл. 1). За результатами розрахунків за формулами (4) і (6), (табл.2), побудовано графіки  $a_o = f(K_o)$  і  $\psi_o = f(K_o)$ .

Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунків

Назва величини	Позначення	Числове значення	Одиниця вимірювання
Середньозважені питомі затрати на генерацію реактивної потужності всіма КУ	Зп.г	21,524	грн./кВАр
Питомі затрати споживача на реактивну потужність і енергію, що споживається з мережі енергопостачальної компанії	Зп.п.1	12,914	грн./кВАр
Питомі затрати на передавання реактивної потужності мережею	Зп.п.2	0,001928186	грн./кВАр
Максимум реактивної потужності на ввіді мережі споживача	Qм	4280	кВАр

Таблиця 2

Результати розрахунків для побудови залежностей  $a_o = f(K_o)$  і  $\psi_o = f(K_o)$ 

Збільшення $K_o$ , %	$K_o$	$\psi_o$ , якщо $K_o \geq 1$	$a_o$ , якщо $K_o \geq 1$	$\psi_o$ , якщо $K_o = 1$	$a_o$ , якщо $K_o = 1$
0	1	0,522	0,478	0,522	0,478
10	1,1	0,574	0,426		-
20	1,2	0,626	0,374		
30	1,3	0,678	0,322		
40	1,4	0,730	0,270		
50	1,5	0,782	0,218		
60	1,6	0,835	0,165		
70	1,7	0,887	0,113		
80	1,8	0,939	0,061		
90	1,9	0,991	0,009		
100	2	1,043	-0,043		

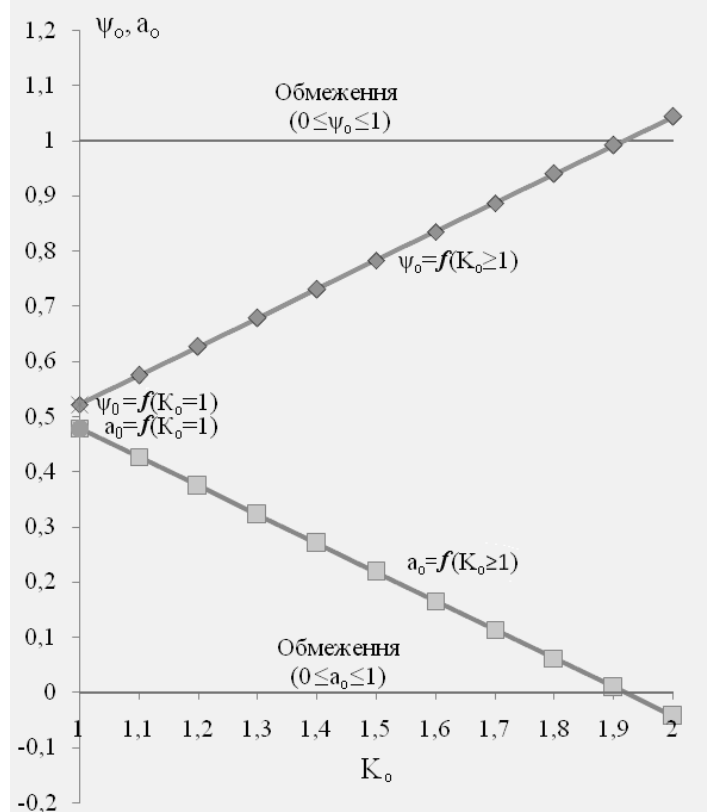


Рис.1. Графіки залежностей  $a_0 = f(K_0)$  і  $\psi_0 = f(K_0)$

З табл. 2 та рис.1 видно, що збільшення коефіцієнта  $K_0$  в цільовій функції призводить до збільшення вхідної реактивної потужності ( $\psi_0$ ) і, відповідно, до суттєвого зменшення економічно обгрунтованого рівня КРП ( $a_0$ ), а, отже, і сумарної потужності КУ, які належить установити в електричній мережі ( $Q_{ку}$ ). Якщо  $K_0 = 2$ , КРП виявилась недоцільною.

Оптимальні (за критерієм мінімальних втрат) значення вхідної реактивної потужності і рівня КРП (у відносних і абсолютних одиницях) для мереж підсистеми пропонується визначати за фактичними втратами електроенергії в цих мережах (визначених до компенсації, у випадку її відсутності, або додаткової компенсації, у разі її необхідності). Правильність такого підходу не викликає сумніву. Рівень КРП повинен визначатися з врахуванням вартості втрат електроенергії до КРП, а не їх величиною, зменшеною на  $K_0$ , що відображає зменшення втрат електроенергії за рахунок оптимізації перетоків реактивної потужності після оптимального (за критерієм мінімальних втрат) розміщення конденсаторних установок у вузлах мереж підсистеми.

Для вдосконалення методу розрахунку КРП та усунення зазначеного протиріччя запропоновано коефіцієнт  $K_0$  в цільову функцію (1) не вводити, а використовувати його під час визначення економічної та енергетичної ефективності компенсації – формули (11), (12). З врахуванням зазначених змін математична модель для вирішення економічної задачі КРП буде виглядати так:

$$\begin{cases} Z = Z_{n,z} Q_M (1-\psi) + Z_{n,n1} Q_M \psi + Z_{n,n2} Q_M^2 \psi^2 \rightarrow \min \\ Q_M = Q_{ку} + Q_e \\ \psi_0 \leq 1, a_0 \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

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

$$\psi_0 = \frac{(Z_{n,z} - Z_{n,n1})}{2Z_{n,n2} Q_M}; \quad Q_{e,o} = \frac{(Z_{n,z} - Z_{n,n1})}{2Z_{n,n2}}. \quad (9)$$

$$a_0 = 1 - \psi_0; \quad Q_{ку,o} = Q_M - Q_e. \quad (10)$$

Далі відомим методом передбачено коригування отриманого рішення при врахуванні можливого зниження потужності трансформаторів і мереж (в умовах проектування) або віддалення строків їх реконструкції (в умовах експлуатації) [2].

В той же час у випадках порівняння результатів розрахунків за різними варіантами КРП або різними методами розрахунку КРП необхідно користуватись функцією (1). В ній складник витрат визначається з врахуванням мінімізації залишкових перетоків реактивної потужності шляхом введення коефіцієнта  $K_0$ .

Під час визначення характеристик ефективності КРП (річний економічний ефект, термін окупності і т. ін.) виникає необхідність у використанні цільової функції (1). У протилежному випадку значення економічного ефекту буде занижено.

Для визначення річного економічного ефекту застосовують формули:

- а) у разі використання для фінансування власних активів підприємства, залучених коштів зі внутрішніх джерел, продажу акцій, коштів зовнішніх джерел, за користування якими не потрібно сплачувати відсотки:

$$E_p = 3_{п.п.2} Q_m^2 (\psi_\phi^2 - \frac{\psi_0^2}{K_0}) + 3_{п.п.1} Q_m (\psi_\phi - \psi_0) + \Delta 3 - 3_{п.г} Q_m (1 - \psi_0); \quad (11)$$

- б) у разі використання для фінансування позикових коштів (відсоткові кредити, іноземні інвестиції у формі фінансової та іншої участі в розробленні і реалізації інновацій – прямих вкладень, а також участі в статутному фонді спільних підприємств), під час визначення річного економічного ефекту яких враховується вартість кредиту (або інших запозичень):

$$E_p = 3_{п.п.2} Q_m^2 (\psi_\phi^2 - \frac{\psi_0^2}{K_0}) + 3_{п.п.1} Q_m (\psi_\phi - \psi_0) + \Delta 3 - 3_{п.г} (1 + p) Q_m (1 - \psi_0), \quad (12)$$

де  $3_{п.п.2} Q_m^2 \psi_0^2 / K_0$  – вартість витрат після КРП або після додаткової КРП з врахуванням оптимізації залишкових потоків реактивної потужності, тис. грн;

$\psi_\phi$  – вхідна реактивна потужність до компенсації (у разі відсутності КРП  $\psi_\phi = 1$ ), в.о.;

$3_{п.п.1} Q_m \psi_\phi$  – вартість споживання реактивної енергії з мережі енергосистеми до компенсації або додаткової компенсації, тис. грн.;

$3_{п.п.1} Q_m \psi_0$  – вартість споживання реактивної енергії з мережі ЕС після компенсації, тис. грн;

$p$  – банківська кредитна ставка, в.о.

Термін окупності капітальних вкладень визначається за формулою:

$$T_{ок} = \frac{3_{п.г} Q_m (1 - \psi_0)}{E_p}. \quad (13)$$

### Висновки

1. Результати здійснених розрахунків та графічного моделювання доводять той факт, що збільшення коефіцієнта  $K_0$  в цільовій функції призводить до збільшення вхідної реактивної потужності ( $\psi_0$ ) і, відповідно, суттєвого зменшення економічного рівня КРП ( $a_0$ ), а, отже, і сумарної потужності КУ, які потрібно встановити в електричній мережі ( $Q_{кв}$ ).
2. Уточнення застосування коефіцієнта  $K_0$  в функції витрат на КРП (1) – визначення економічно обгрунтованих величин  $\psi_0$  і  $a_0$  для мереж підсистеми здійснюється за фактичною (до КРП) вартістю витрат (з вилученням  $K_0$ ) дозволяє обгрунтувати більш високі рівні КРП і підвищити енергоефективність.
3. У разі порівняння різних методів розрахунку КРП чи варіантів її застосування в алгоритмі визначення економічних характеристик КРП застосовується функція (1), в якій необхідна точність забезпечується використанням коефіцієнта  $K_0$ .

### Література

1. Инструкция по системному расчету компенсации реактивной мощности в электрических сетях // Промышленная энергетика. – 1991. - №8. – С.51-55.
2. Рогальський Б.С. Компенсація реактивної потужності. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління. Навчальний посібник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2006. – 236 с.

3. Економічно доцільні обсяги реактивної енергії, яка перетікає між електричними мережами електропередавальної організації і споживача. Методика визначення // Промислова електроенергетика та електротехніка. (Промелектро) – 2005. - №2. – С.24 – 29.
  4. Рогальський Б.С. Методи поетапного розрахунку компенсації реактивної потужності в електричних мережах енергосистем і споживачів. // Промислова електроенергетика та електротехніка. – 2001. – №1. – С.22-39.
- 
-