

УДК 621.311.1

**В.В. Гніліцький, к.т.н., доц.  
О.А. Поліщук, аспір.**

*Житомирський державний технологічний університет*

### КЕРУВАННЯ УСТАНОВКАМИ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ЗА КРИТЕРІЄМ ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В РАДІАЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

*Розглянуто моделі керування установками компенсації реактивної потужності (УКРП) в радіальних мережах, а також вимоги, на основі яких сформульовано принципи керування. Запропоновано варіант моделі керування УКРП за критерієм зменшення втрат потужності в радіальних мережах з ефектом симетрування навантаження.*

**Постановка проблеми.** Останнім часом, із переходом до балансуєчого енергоринку, оснований на двосторонніх контрактах, загострюється питання втрат електроенергії, що зумовлено перетоками активної та реактивної складових. У сучасних умовах існують специфічні методи розв'язання даної проблеми, які внаслідок відсутності механізмів державного регулювання, полягають у прийнятті рішень суб'єктом господарювання виключно з точки зору власних інтересів. У [3–5] розроблено математичні моделі для визначення та розподілення навантажувальних втрат потужності між споживачами у мережах будь-якої конфігурації й запропоновано моделі керування УКРП за критерієм зменшення втрат [7].

З [7] неважко зробити висновок, що компенсація реактивної потужності (КРП) переслідує три мети:

- 1) корекція коефіцієнта потужності;
- 2) регулювання напруги;
- 3) симетрування навантаження.

Критерій зменшення втрат при КРП сформувався лише завдяки сучасним умовам існування енергоринку, проте ні в одній із математичних моделей керування УКРП за цим критерієм не враховується ефект симетрування навантаження.

**Аналіз літературних джерел та останніх досліджень.** Для багатофазних кіл миттєва потужність визначається як сума потужностей  $m$  фаз [2]:

$$p(t) = \sum_{i=1}^m p_i(t), \quad (1)$$

де  $p_i(t)$  – миттєва потужність  $i$ -ої фази.

У свою чергу для  $k$ -го усталеного режиму активна потужність  $P$  знайдеться, як середнє значення миттєвої потужності за період  $T$ :

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_k}^{t_k+T} \left[ \sum_{i=1}^m p_i(t) \right] dt, \quad (2)$$

де  $t_k$  – час початку  $k$ -го усталеного режиму.

У реальних умовах потужність 1-ої гармоніки значно перевищує сумарну потужність вищих гармонічних складових, тому активну потужність можна знайти через діючі значення 1-их гармонічних складових фазної напруги і струму та кут зсуву фаз між ними:

$$P \approx \sum_{i=1}^m U_i^1 I_i^1 \cos \varphi_i^1, \quad (3)$$

де  $U_i^1$  – діюче значення напруги 1-ої гармоніки  $i$ -ої фази, В;  $I_i^1$  – діюче значення струму 1-ої гармоніки  $i$ -ої фази, А;  $\varphi_i^1$  – зсув фаз між напругою і струмом 1-ої гармоніки  $i$ -ої фази.

Основну властивість ідеального компенсатора в  $k$ -му усталеному режимі за умовою нульових перетоків можна подати у вигляді [2]:

$$P_S(k) = P_L(k), \quad P_C(k) = 0, \quad t > 0, \quad (4)$$

де  $P_S(k)$  – активна потужність, генерована джерелом (рис. 1), Вт;  $P_L(k)$  – активна потужність, спожита навантаженням, Вт;  $P_C(k)$  – активна потужність, спожита компенсатором, Вт.

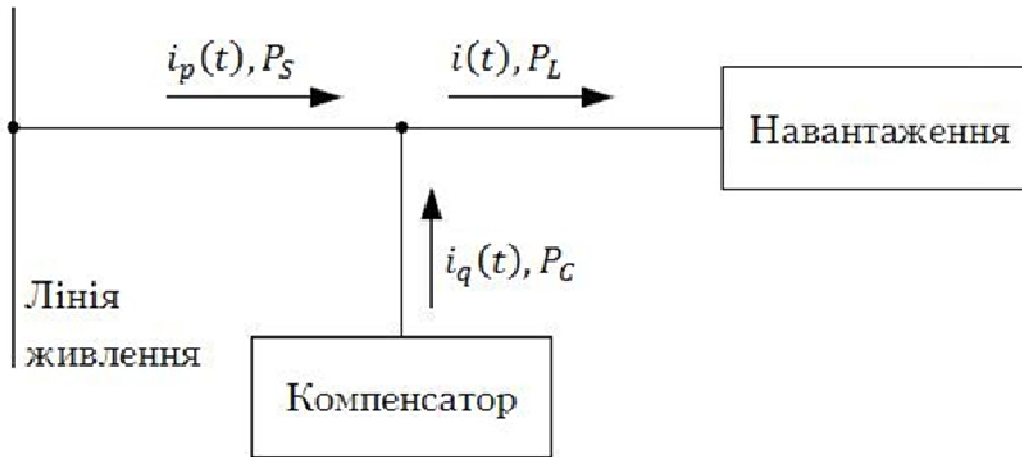


Рис. 1. Конфігурація КРП

За ідеєю Фризе [2] для однофазного споживача активний і реактивний струми для  $k$ -го усталеного режиму вираховуються так:

$$i_p(t) = \frac{P(k)}{U_p^2(k)} u_p(t); \tag{5}$$

$$i_q(t) = i(t) - i_p(t), \tag{6}$$

де  $i_p(t), i_q(t), i(t)$  – активний, реактивний, повний струми відповідно (рис. 1);  $u_p(t)$  – опорна напруга;

$U_p(k) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_k}^{t_k+T} u_p^2(t) dt}$  – діюче значення напруги в  $k$ -му усталеному режимі.

За розширенням ідеї Фризе [2] для трифазних кіл вирази (5) і (6) запишуться таким чином:

$$\bar{i}_p(t) = \frac{P(k)}{u_1^2(t) + u_2^2(t) + u_3^2(t)} \bar{u}_p(t), \tag{7}$$

$$\bar{i}_q(t) = \bar{i}(t) - \bar{i}_p(t), \tag{8}$$

де  $\bar{u}_p(t) = [u_1(t), u_2(t), u_3(t)]^T$ ;  $u_i(t)$  – опорна напруга  $i$ -ої фази, за котру приймають симетричні складові фазних напруг [2],  $i = 1, 2, 3$ ;  $\bar{i}_p(t) = [i_{p1}(t), i_{p2}(t), i_{p3}(t)]^T$ ,  $\bar{i}_q(t) = [i_{q1}(t), i_{q2}(t), i_{q3}(t)]^T$ ,  $\bar{i}(t) = [i_1(t), i_2(t), i_3(t)]^T$ ;  $i_{pi}(t), i_{qi}(t), i_i(t)$  – активний, реактивний, повний струми відповідно  $i$ -ої фази,  $i = 1, 2, 3$ .

Функція зменшення втрат потужності для кожної фази  $i$ -го вузла радіальної мережі (рис. 2) визначається як [1]:

$$\delta(\Delta P)_{i\phi} = \frac{1}{U_\phi^2} [(2Q_{ci\phi} Q_{\Sigma\phi} - Q_{ci\phi}^2)R + (2Q_{ci\phi} Q_{i\phi} - Q_{ci\phi}^2)R_i], \tag{9}$$

де  $U_\phi$  – номінальна фазна напруга мережі, В;  $Q_{i\phi}$  – реактивне фазне навантаження  $i$ -го вузла, вар;  $Q_{ci\phi}$  – фазна потужність компенсатора, встановленого в  $i$ -му вузлі, вар;  $Q_{\Sigma\phi}$  – фазне сумарне реактивне навантаження мережі, вар;  $R$  – активний опір живлячої лінії, Ом;  $R_i$  – активний опір лінії, що живить  $i$ -ий вузол.

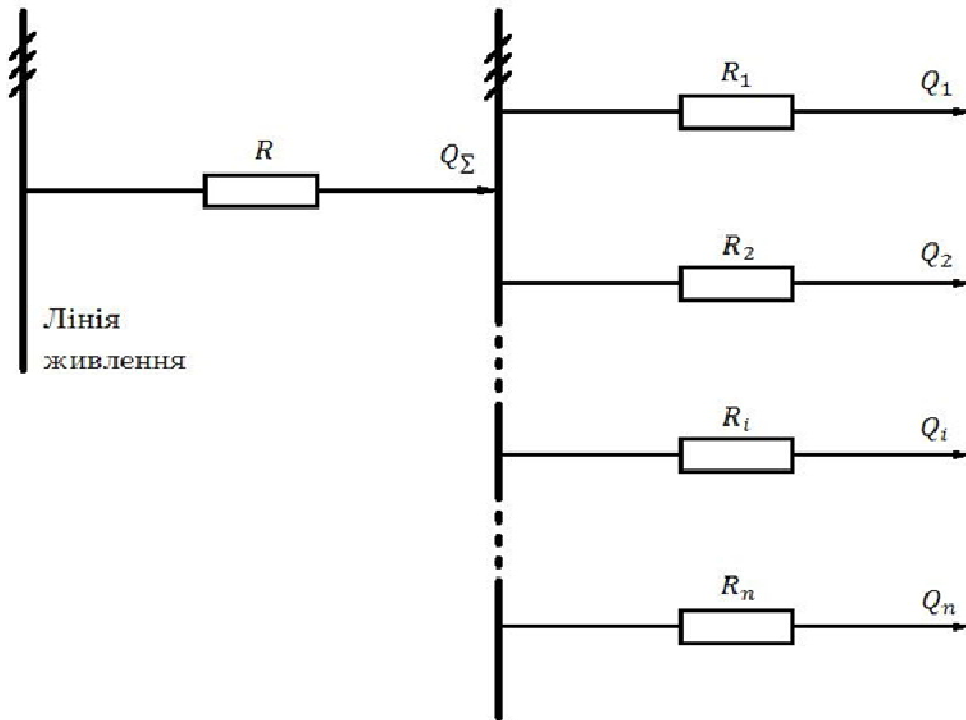


Рис. 2. Радіальна електромережа

**Мета роботи** – запропонувати варіант моделі керування УКРП за критерієм зменшення втрат потужності в радіальних мережах з ефектом симетрування навантаження.

**Викладення основного матеріалу.** Розглянемо модель керування УКРП, запропоновану в [1], коли керування відбувається за трифазною функцією зменшення втрат (10):

$$\delta(\Delta P)_i = \frac{1}{U^2} [(2Q_{ci}Q_{\Sigma} - Q_{ci}^2)R + (2Q_{ci}Q_i - Q_{ci}^2)R_i], \quad (10)$$

де  $U$  – номінальна лінійна напруга мережі, В;  $Q_i$  – реактивне навантаження  $i$ -го вузла, вар;  $Q_{ci}$  – потужність компенсатора, встановленого в  $i$ -му вузлі, вар;  $Q_{\Sigma}$  – сумарне реактивне навантаження мережі, вар.

Вираз (10) є справедливим, якщо припустити, що навантаження у будь-якому вузлі є симетричним. Припустимо, що симетрія в  $i$ -му вузлі порушена. Тоді для КРП за критерієм зменшення втрат по кожній фазі треба користуватись виразом (9), що надасть максимальне зменшення втрат, проте порушення симетрії навантаження залишиться.

Розглянемо функцію зменшення втрат потужності (9). При усталеному режимі реактивні навантаження вузлів залишаються незмінними до настання наступного усталеного режиму, тобто ми маємо справу з функцією однієї змінної ( $Q_{ci\delta}$ ). Визначимо оптимальне значення  $Q_{ci\delta\_opt}$  за критерієм максимального зменшення втрат. Продиференціювавши (9) по  $Q_{ci\delta}$ , отримаємо максимум зменшення втрат:

$$Q_{ci\delta\_opt} = \frac{Q_{\Sigma\delta}R + Q_{i\delta}R_i}{R + R_i}. \quad (11)$$

З (11) неважко зробити висновок, що для КРП за критерієм мінімальних втрат потрібно здійснити перекомпенсацію на величину  $\Delta Q_{\delta}$ , яка знайдеться за співвідношенням:

$$\Delta Q_{\delta} = \frac{R(Q_{\Sigma\delta} - Q_{i\delta})}{R + R_i} = \frac{R}{R + R_i} \sum_{i \neq j} Q_{j\delta}. \quad (12)$$

Оскільки навантаження в  $j$ -их вузлах при  $i \neq j$  вважаємо практично симетричним, то (12) можна подати у вигляді:

$$\Delta Q_{\delta} = \frac{R(Q_{\Sigma} - Q_i)}{3(R + R_i)} = \frac{R}{3(R + R_i)} \sum_{i \neq j} Q_j. \quad (13)$$

Отже спробуємо поєднати розширення ідеї Фризе, що дозволить здійснити симетрування при КРП за умовою нульових перетоків, та наслідків із функції зменшення втрат.

Для симетричних складових фазних напруг  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$ ,  $u_3(t)$  неважко довести таку тотожність:

$$u_1^2(t) + u_2^2(t) + u_3^2(t) = \frac{3}{2} U_m^2, \quad (14)$$

де  $U_m = U_{1m} = U_{2m} = U_{3m}$  – амплітуда симетричних складових фазних напруг, В.

Врахувавши (14) і здійснивши кроки (7) та (8), отримаємо:

$$\bar{i}_q(t) = \bar{i}(t) - \frac{2P(k)}{3U_m^2} \bar{u}_p(t). \quad (15)$$

Щоб здійснити КРП за умовою нульових перетоків, потрібно знайти потужність компенсатора (рис. 3) [2]:

$$|Q_C| = \bar{I}_C \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \quad (16)$$

де  $\bar{I}_C = [I_{q1}, I_{q2}, I_{q3}]^T$ ;  $|Q_C| = [|Q_{C1}|, |Q_{C2}|, |Q_{C3}|]^T$ .

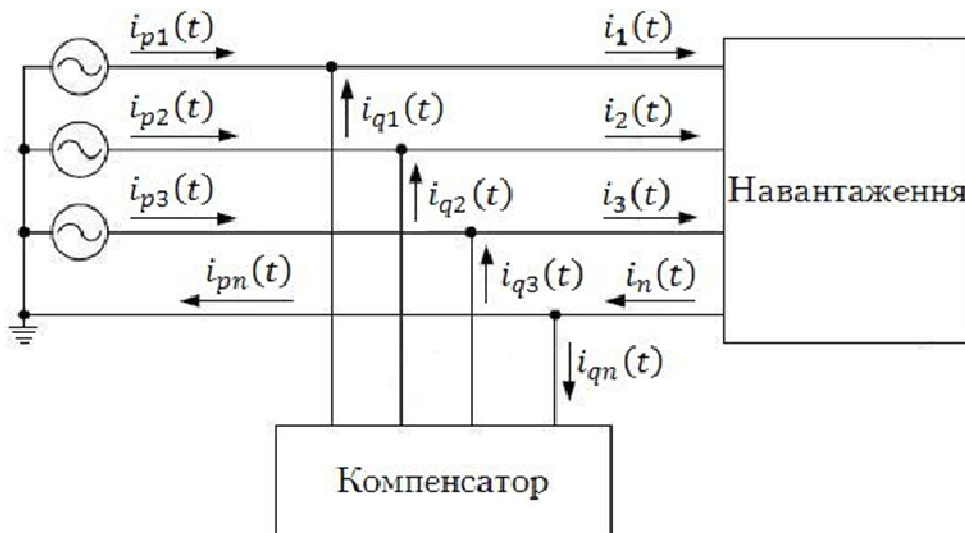


Рис. 3. КРП у трифазній мережі

Тоді КРП за максимальним зменшенням втрат можна поділити на 2 етапи:

1. КРП за умовою нульових перетоків.
2. Перекомпенсація на  $\Delta Q_{\delta}$  (12).

Виходячи з викладеного, врахувавши знак при потужності компенсатора за умовою нульових перетоків, отримуємо результуюче співвідношення:

$$\bar{Q}_C = \bar{I}_C \frac{U_m}{\sqrt{2}} + \frac{1}{3} [\Delta Q_{\delta}, \Delta Q_{\delta}, \Delta Q_{\delta}]^T, \quad (17)$$

тут  $\bar{I}_C = [I_{q1} \text{sign}(\varphi_{I1} - \varphi_{U1}), I_{q2} \text{sign}(\varphi_{I2} - \varphi_{U2}), I_{q3} \text{sign}(\varphi_{I3} - \varphi_{U3})]^T$ ;  $\varphi_{Ii}, \varphi_{Ui}$  – зсуви по фазі струму та напруги  $i$ -ої фази відповідно,  $i = 1, 2, 3$ ;  $\bar{Q}_C = [Q_{C1}, Q_{C2}, Q_{C3}]^T$ .

**Висновки.** Існуючі математичні моделі керування УКРП за мінімальними втратами потужності не враховують ефект симетрування навантаження. У запропонованій моделі ефект симетрування навантаження враховано.

**ЛІТЕРАТУРА:**

1. (А. с. СРСР № 1446612. МКИ С05Р1/70, «Автоматический регулятор конденсаторных батарей». Бюл. № 47, 1988)
2. *Fang Z. Peng* Compensation of non-active current in power systems / *Fang Z. Peng, Leon M. Tolbert* // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2002. – Vol. 45, № 1. – Pp. 293–297.
3. *Рогальський Б.С.* Визначення та розподілення втрат електричної енергії між споживачами / *Б.С. Рогальський, Л.М. Мельничук* // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2004. – № 1. – С. 38–41.
4. *Мельничук Л.М.* Визначення та розподілення втрат електричної енергії між споживачами з урахуванням їх графіків навантажень / *Л.М. Мельничук* // Енергетика та електрифікація. – 2006. – № 5. – С. 19–21.
5. *Бурбело М.Й.* Стимулювання зменшення втрат в електричних мережах : монографія / *М.Й. Бурбело, Л.М. Мельничук*. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2008. – 110 с.
6. *Fryze S.* Active and Apparent power in non-sinusoidal systems / *S.Fryze* // Przegląd Elektrot. – № 7. – 1931. – Pp. 193–203 (In Polish).
7. *Рогальський Б.С.* Компенсація реактивної потужності. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління. II частина / *Б.С. Рогальський*. – Вінниця : ВДТУ, 2006. – 104 с.

ГНІЛЦЬКИЙ Віталій Васильович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизованого керування в технічних системах Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- цифрова обробка сигналів;
- інформаційні системи;
- мікропроцесорні пристрої в енергозбереженні.

Тел.: 8(0412)37–84–82.

E-mail: [gnil@ztu.edu.ua](mailto:gnil@ztu.edu.ua)

ПОЛЩУК Олександр Анатолійович – аспірант Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- мікропроцесорні пристрої в енергозбереженні.

Подано 03.08.2011