ной жидкости и прогнозировать возможности интенсификации процесса за счет изменения технологических режимов работы мембранного аппарата.

Литература

1. Воронцов, Е.Г. Теплообмен в жидкостных пленках. / Е.Г. Воронцов, Ю.М. Тананайко. – К.:«Техника», 1972. – 194 с.
2. Исаченко, В.П. Теплопередача. / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел.– М.: Энергия, 1981. – 417 с.

Запропонована модель компенсації реактивної потужності (КРП) та симетрування навантаження у трипровідних мережах на основі теорії Фризе

Ключові слова: компенсація реактивної потужності, симетрування навантаження, теорія Фризе

Предложена модель компенсации реактивной мощности и симметрирования нагрузки в трехпроводных сетях на основе теории Фризе

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, симметрирование нагрузки, теория Фризе

The model to reactive power compensation and balancing load in three-wire networks on base of the theories Fryze is offered

Key words: reactive power compensation, balancing load, theories Fryze

УДК 621.316

РОЗРАХУНОК КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА СИМЕТРУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ У ТРИПРОВІДНИХ МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ФРИЗЕ

В.В. Гніліцький
Кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедрою*
Контактний тел.: (0412) 37-84-82
E-mail: gnil@ztu.edu.ua

О.А. Поліщук
Аспірант
*Кафедра автоматики та управління в технічних системах
Житомирський державний технологічний університет
вул. Черняховського, 103, м. Житомир, Україна, 10005
E-mail: alex_zdtu@ukr.net

1. Вступ

Під несиметричним режимом трифазної електричної мережі розуміють такий режим, при котрому умови роботи всіх чи однієї фази є неоднаковими [3].

Несиметрія напруг та струмів призводить до виникнення додаткових втрат активної потужності в електричних мережах, зниження їх пропускної здатності, а також до зменшення терміну експлуатації електрообладнання [3].

2. Аналіз літературних джерел та останніх досліджень.

Розглянемо два підходи до КРП з симетруванням навантаження.

Перший підхід [2,3] базується на введенні такої величини, як пульсуюча потужність зворотної послідовності:

$$N_2 = 3\mathring{U}_1\mathring{I}_2, \qquad (1)$$

де $\mathring{I}_2$ – комплексне значення струму зворотної симетричної послідовності [6]; $\mathring{U}_1$ – комплексне значення напруги прямої послідовності. Причому міжфазні реактивні потужності (РП) симетрувальних установок знайдуться за слідуючими співвідношеннями:

$$Q_{bc} = \frac{1}{3}\left((Q_{НОМ} - Q_{ВХ}) + 2\mathrm{Im}(N_2)\right), \qquad (2)$$

$$Q_{ca} = \frac{1}{3}\left((Q_{НОМ} - Q_{ВХ}) - \mathrm{Im}(N_2) - \sqrt{3}\,\mathrm{Re}(N_2)\right), \qquad (3)$$

$$Q_{ab} = \frac{1}{3}\left((Q_{НОМ} - Q_{ВХ}) - \mathrm{Im}(N_2) + \sqrt{3}\,\mathrm{Re}(N_2)\right), \qquad (4)$$

де $Q_{вх}$ – задане значення вхідної реактивної потуж-

ності (ВРП), очікуване після симетрування; $Q_{ном}$ – сумарна реактивна потужність навантаження.

Засновниками другого підходу є Fang Z. Peng та Leon M. Tolbert, які у своїх працях [5] з теорії Фризе [4] виводять наслідки, котрі дають змогу отримати КРП з симетруванням навантаження.

Відповідно до [4], активний і реактивний струми для однофазного споживача знаходяться за слідуючими співвідношеннями:

$$i_p(t) = \frac{P}{U^2} \cdot u(t), \qquad (5)$$

$$i_q(t) = i(t) - i_p(t), \qquad (6)$$

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

$u(t)$ – напруга у вузлі мережі, для котрого проводяться розрахунки;

$U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2(t)dt}$ – діюче значення напруги, В;

P – активна потужність, Вт.

Основну властивість ідеального компенсатора за умовою нульових перетоків [5] можна подати у вигляді:

$$P_S = P_L, \quad P_C = 0, \quad t > 0 \qquad (7)$$

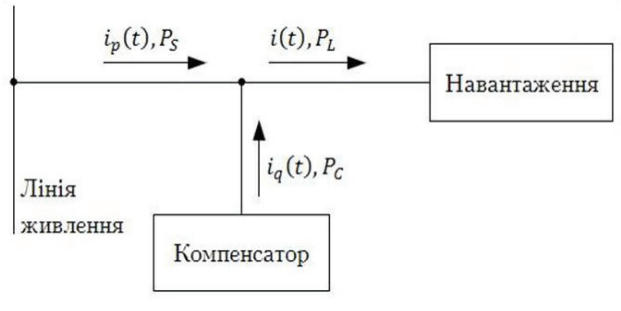

Рис. 1. Конфігурація КРП: P_S – активна потужність, генерована джерелом , Вт; P_L – активна потужність, спожита навантаженням, Вт; P_C – активна потужність, спожита компенсатором, Вт

За розширенням ідеї Фризе для трифазних кіл у [4] вперше вводиться поняття векторів фазних напруг і струмів. Так для трифазного кола співвідношення (5) і (6) запишуться таким чином [4]:

$$\overline{i_p}(t) = \frac{P}{u_1^2(t) + u_2^2(t) + u_3^2(t)} \cdot \overline{u_p}(t), \qquad (8)$$

$$\overline{i_q}(t) = \overline{i}(t) - \overline{i_p}(t), \qquad (9)$$

де $\overline{u_p}(t) = \left[u_1(t), u_2(t), u_3(t)\right]^T$;

$u_i(t)$ – фазні напруги i-ої фази, i=1, 2, 3;

P – сумарна трифазна активна потужність, Вт;

$$\overline{i_p}(t) = \left[i_{p1}(t), i_{p2}(t), i_{p3}(t)\right]^T,$$

$$\overline{i_q}(t) = \left[i_{q1}(t), i_{q2}(t), i_{q3}(t)\right]^T,$$

$$\overline{i}(t) = \left[i_1(t), i_2(t), i_3(t)\right]^T;$$

$i_{pi}(t), i_{qi}(t), i_i(t)$ – активний, реактивний, повний - струми відповідно i-ої фази, i=1,2,3.

Відмітимо, що у виразах (8) і (9) фазні напруги вважаються практично симетричними; в іншому випадку їх потрібно замінити прямими симетричними складовими Фортеск'ю [6]. Вважаючи фазні напруги симетричними, неважко довести наступну тотожність:

$$u_1^2(t) + u_2^2(t) + u_3^2(t) = 3 \cdot U^2, \qquad (10)$$

де $U = U_1 = U_2 = U_3$ – діюче значення фазної напруги, В.

В результаті вираз (8) для трифазних кіл з симетричною фазною напругою запишиться таким чином:

$$\overline{i_p}(t) = \frac{P}{3 \cdot U^2} \cdot \overline{u_p}(t). \qquad (11)$$

Тоді, врахувавши (11), отримаємо з (9) вираз для вектора фазних реактивних струмів:

$$\overline{i_q}(t) = \overline{i}(t) - \frac{P}{3 \cdot U^2} \cdot \overline{u_p}(t). \qquad (12)$$

Недоліками розширеної ідеї Фризе за [5] є її обмежене застосування (лише для умови нульових перетоків РП) та непристосованість до розрахунку потужностей трикутника-компенсатора.

3. Викладення основного матеріалу

Мета роботи – довести, що розширена ідея Фризе може бути застосована при КРП з симетруванням струмів у трипровідних мережах.

Розглянемо трифазну електромережу як сукупність трьох однофазних. Перепишимо (5) у комплексах діючих значень величин. Отримаємо:

$$\overset{\circ}{I}_{p\Phi} = \frac{P}{3U_\Phi^2} \overset{\circ}{U}_\Phi, \qquad (13)$$

де P – трифазна сумарна активна потужність, Вт;

$\overset{\circ}{U}_\Phi$ – комплекс фазної напруги;

$\overset{\circ}{I}_{p\Phi}$ – комплекс активного струму фази.

Помітимо, що співвідношення (13), котре витікає з ідеї Фризе, неважко здобути іншим шляхом, за допомогою наступних міркувань:

1) оскільки після КРП з симетруванням на вводі схеми рис.1 у кожній фазі встановиться активна потужність $P_ф$, причому $P_ф = \frac{1}{3}P$, то справедливе співвідношення:

$$P_ф = \dot{U}_ф \dot{I}^*_{рф} = \dot{U}^*_ф \dot{I}_{рф}; \quad (14)$$

2) зі співвідношення (14), врахувавши, що

$$\frac{\dot{U}_ф}{U^2_ф} = \frac{U_ф \cdot e^{j\arg(U_ф)}}{U^2_ф} = \frac{1}{U_ф \cdot e^{-j\arg(U_ф)}} = \frac{1}{\dot{U}^*_ф}$$, здобуваємо

співвідношення (13), котре раніше було знайдене іншим шляхом.

Нехай нам потрібна лише часткова КРП з симетруванням. Тоді на вводі схеми рис.1 струм, крім активної складової, матиме ще й реактивну (на практиці, як правило,–індуктивну), від реактивної потужності $Q_{вх}$. Розрахувати її можливо таким чином:

1) врахуємо, що фазна реактивна потужність

$Q_ф = \mathrm{Im}(\dot{U}_ф \dot{I}^*_{qф})$ або $j \cdot Q_ф = \dot{U}_ф \dot{I}^*_{qф}$, так як активна

частина в $\dot{U}_ф \dot{I}^*_{qф}$ відсутня.

2) врахувавши, що $Q_ф = \frac{1}{3} \cdot Q_{вх}$, остаточно отримуємо:

$$\dot{I}_{qФ} = \frac{-j \cdot Q_{ВХ}}{3U^2_Ф} \cdot \dot{U}_Ф = \frac{-j \cdot Q_{ВХ}}{3\dot{U}^*_Ф}. \quad (15)$$

Вхідний фазний струм тоді дорівнюватиме:

$$\dot{I}_{вх_ф} = \frac{P}{3U^2_ф}\dot{U}_ф - \frac{j \cdot Q_{вх}}{3U^2_ф} \cdot \dot{U}_ф = \left(P - j \cdot Q_{вх}\right) \cdot \frac{\dot{U}_ф}{3U^2_ф}. \quad (16)$$

Переходячи до векторів-стовпців, тотожність (16) перетвориться у (17) таким чином:

$$\bar{I}_{вх} = \frac{P - j \cdot Q_{вх}}{3U^2} \cdot \bar{U}, \quad (17)$$

де $\bar{U} = \left[\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3\right]^T$;

$\dot{U}_i$ – комплекс діючого значення фазної напруги i-ої фази, i=1, 2, 3;

$$\bar{I}_{вх} = \left[\dot{I}_{вх_1}, \dot{I}_{вх_2}, \dot{I}_{вх_3}\right]^T;$$

$\dot{I}_{вх_ө}$– комплекс діючого значення вхідного струму i-ої фази, i=1, 2, 3.

Розглянемо трикутник-компенсатор рис. 2.

Для нього справедливі наступні співвідношення:

$$\dot{I}_{c_A} = \dot{I}_{c_CA} - \dot{I}_{c_AB}, \quad (18)$$

$$\dot{I}_{c_B} = \dot{I}_{c_AB} - \dot{I}_{c_BC}, \quad (19)$$

$$\dot{I}_{c_C} = \dot{I}_{c_BC} - \dot{I}_{c_CA}, \quad (20)$$

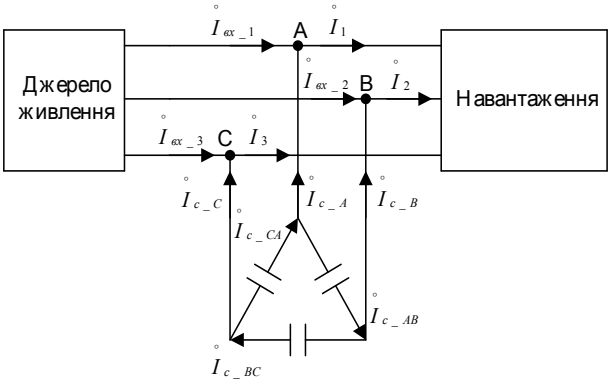

Рис. 2. Компенсатор

Розглянувши три векторних трикутника відповідно до співвідношень (18)—(20) і скориставшись теоремою синусів, отримаємо наступні рівняння:

$$\frac{\dot{I}_{c_CA}}{\sin(\dot{I}_{c_A} \hat{} \dot{I}_{c_AB})} = \frac{\dot{I}_{c_AB}}{\sin(\dot{I}_{c_A} \hat{} \dot{I}_{c_CA})} = \frac{\dot{I}_{c_A}}{\sin(\dot{I}_{c_AB} \hat{} \dot{I}_{c_CA})} \quad (21)$$

$$\frac{\dot{I}_{c_B}}{\sin(\dot{I}_{c_BC} \hat{} \dot{I}_{c_AB})} = \frac{\dot{I}_{c_BC}}{\sin(\dot{I}_{c_B} \hat{} \dot{I}_{c_AB})} = \frac{\dot{I}_{c_AB}}{\sin(\dot{I}_{c_B} \hat{} \dot{I}_{c_BC})} \quad (22)$$

$$\frac{\dot{I}_{c_C}}{\sin(\dot{I}_{c_CA} \hat{} \dot{I}_{c_BC})} = \frac{\dot{I}_{c_CA}}{\sin(\dot{I}_{c_C} \hat{} \dot{I}_{c_BC})} = \frac{\dot{I}_{c_BC}}{\sin(\dot{I}_{c_C} \hat{} \dot{I}_{c_CA})} \quad (23)$$

Спрощуючи (21) і (22) з урахуванням того, що ємнісний струм випереджає напругу на $\frac{\pi}{2}$, для міжфазних реактивних потужностей отримуємо:

$$Q_{ab} = 2U_Ф I_{c_A} \cdot \cos\left(\arg(\dot{I}_{c_A}) + \frac{\pi}{6}\right), \quad (24)$$

$$Q_{bc} = -2U_Ф I_{c_B} \cdot \cos\left(\arg(\dot{I}_{c_B}) - \frac{\pi}{6}\right), \quad (25)$$

$$Q_{ca} = -2U_Ф I_{c_A} \cdot \cos\left(\arg(\dot{I}_{c_A}) - \frac{\pi}{6}\right). \quad (26)$$

Отже, для того, щоб отримати повну або часткову КРП з симетруванням струмів за теорією Фризе, потрібно:

1) знайти вектор струмів компенсатора:

$$\bar{I}_{вх} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{c_A} \\ \dot{I}_{c_B} \\ \dot{I}_{c_C} \end{bmatrix} = \bar{I} - \bar{I} = \bar{I} - \frac{P - j \cdot Q_{вх}}{3U^2} \cdot \bar{U}, \quad (27)$$

де $\bar{\dot{I}} = \left[\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3\right]^T$;

$\dot{I}_i$ – комплекс повного струму і-ої фази, і=1, 2, 3;

$\bar{I}_{вх}$ – знаходиться за співвідношенням (17).

2) знайти міжфазні реактивні потужності компенсатора за формулами (24) – (26).

Також для КРП з симетруванням струмів кроки (27), (24)-(26) можна здійснити іншим шляхом, з метою отримання результатів без дій над комплексними величинами ($\arg\dot{I}_1$ та $\arg\dot{I}_2$ можна виміряти фазометрами):

1) знайти величини A_1, B_1, A_2, B_2 :

$$A_1 = I_1 \cdot \cos\left(\arg\dot{I}_1\right) - \frac{P}{3U_ф}, \quad (28)$$

$$B_1 = I_1 \cdot \sin\left(\arg\dot{I}_1\right) + \frac{Q_{вх}}{3U_ф}, \quad (29)$$

$$A_2 = I_2 \cdot \cos\left(\arg\dot{I}_2\right) + \frac{S_{вх}}{3U_ф} \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{P}{S_{вх}}\right) + \frac{\pi}{6}\right), \quad (30)$$

$$B_2 = I_2 \cdot \sin\left(\arg\dot{I}_2\right) - \frac{S_{вх}}{3U_ф} \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{P}{S_{вх}}\right) - \frac{\pi}{3}\right), \quad (31)$$

де $S_{вх} = \sqrt{P^2 + Q_{вх}^2}$

2) Знайти $\arg(\dot{I}_{c_A})$ та $\arg(\dot{I}_{c_B})$:

$$\arg(\dot{I}_{c_B}) = \begin{cases} \operatorname{arctg}\left(\frac{B_2}{A_2}\right) \\ A_2 > 0 \\ \pi + \operatorname{arctg}\left(\frac{B_2}{A_2}\right) \\ A_2 < 0 \end{cases}, \quad (32)$$

$$\arg(\dot{I}_{в_}) = \begin{cases} \operatorname{arctg}\left(\frac{B_2}{A_2}\right) \\ A_2 > 0 \\ \pi + \operatorname{arctg}\left(\frac{B_2}{A_2}\right) \\ A_2 < 0 \end{cases}. \quad (33)$$

3) розрахувати міжфазні потужності компенсатора:

$$Q_{ab} = 2U_Ф \cdot \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \cdot \cos\left(\arg(\dot{I}_{c_A}) + \frac{\pi}{6}\right), \quad (34)$$

$$Q_{bc} = -2U_Ф \cdot \sqrt{A_2^2 + B_2^2} \cdot \cos\left(\arg(\dot{I}_{c_B}) - \frac{\pi}{6}\right), \quad (35)$$

$$Q_{ca} = -2U_Ф \cdot \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \cdot \cos\left(\arg(\dot{I}_{c_A}) - \frac{\pi}{6}\right). \quad (36)$$

Висновки

Розширення ідеї Фризе [5] дійсно може бути застосоване при КРП з симетруванням струмів у трипровідних мережах. Очевидно, що найліпшим прикладом її застосування може бути КРП параметричними джерелами струму, оскільки співвідношення (27) одразу дозволяє знайти потрібну ін'єкцію струму компенсатора в електромережу. Також за співвідношеннями (28) – (36), котрі витікають із розширення ідеї Фризе, може бути розрахована КРП з симетруванням навантаження без застосування дій над комплексними величинами.

Література

1. Рогальський Б.С. Компенсація реактивної потужності. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління. ІІ частина. – Вінниця; ВДТУ, 2006. – 104 с.
2. Аналіз умов симетрування навантажень з використанням компенсаційних симетруванльних установок / М.Й.Бурбело, М.В.Кузьменко// Енергетика та електрифікація. – 2009. – №5. – С. 3–6.
3. Умови керування двофазними симетрувальними установками / М.Й.Бурбело, М.В.Кузьменко// Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 82. – С. 3–7.
4. S. Fryze. Active and Apparent power in non-sinusoidal systems. Przeglad Elektrot., no 7, 1931, p.p. 193-203 (In Polish).
5. Fang Z. Peng, Leon M. Tolbert. Compensation of non-active current in power systems. IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.45, no 1, pp. 293-297, 2002.
6. С.М. Аполлонский, В.В. Леонтьев. Электротехника и электроника. Трехфазные электрические цепи.—Санкт Петербург, 2002.
7. E. Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara, T.J.E. Miller. Power electronic control in electrical systems. / Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP //A division of Reed Educational and Professional Publishing Ltd.
8. Ильяшов В.П. Конденсаторные установки. – 2-е изд., перераб. и доп. "Энергоатомиздат", 1983 г. – 152 с.
9. Жемеров Г. Г., д.т.н., проф., Ильина О.В. Теория мощности Фризе и современные теории мощности. // Електротехніка і електромеханіка. Розд. «Теоретична електротехніка».— 2007.— №6.—с. 63-65.