

М. Й. Бурбело, д-р. техн. наук, проф.; Ю. П. Войтюк

ОПТИМАЛЬНЕ ЗА ШВИДКОДІЄЮ КЕРУВАННЯ КОМПЕНСУВАЛЬНИМИ ПРИБОРАМИ ЗА РІЗКОГО ЗНИЖЕННЯ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ

Обґрунтовано інформативні параметри для оптимального за швидкодією керування компенсувальними пристроями, які рекомендуються за умови істотного зниження напруги у вузлі приєднання споживача.

Вступ

Керування компенсувальними пристроями на базі батарей статичних конденсаторів (БСК) переважно здійснюється за відхиленням фактичного значення реактивної потужності від її заданого значення на вході мережі. Інформативними параметрами, які використовуються під час керування БСК, можуть бути також реактивний струм або реактивна провідність навантаження. Процес керування за відхиленням має ітераційний характер. Питанням оптимального за швидкодією керування БСК не приділено достатньої уваги. Під час вибору оптимального алгоритму керування в першу чергу необхідно звернути увагу на інформативний параметр, який контролюється на вході мережі. Крім того, важливим є врахування статичних характеристик вузлів навантажень.

Мета роботи полягає в обґрунтуванні інформативного параметра для керування БСК у разі різкого зниження напруги живлення за різних статичних характеристик навантаження [1].

Обґрунтування результатів

У разі використання як інформативного параметра реактивної потужності навантаження ітераційний процес керування здійснюється за значенням провідності фази БСК, наприклад b_C ,

$$b_{BC} = \frac{k_1}{U_{\text{ном}}^2} (Q_{\text{н}} - Q_{\text{вх}}) + b_{BC}^{(0)}, \quad (1)$$

де k_1 — коефіцієнт корегування провідності фази БСК за значенням напруги; $Q_{\text{вх}} = P_{\text{н}} \operatorname{tg} \phi_{\text{вх}}$ — задане значення вхідної реактивної потужності після компенсації реактивної потужності, $\operatorname{tg} \phi_{\text{вх}}$ — задане значення коефіцієнта реактивної потужності; $P_{\text{н}}$, $Q_{\text{н}}$ — активна та реактивна потужності навантаження; $b_{BC}^{(0)}$ — початкове значення провідності фази БСК на кроці ітераційного процесу керування.

Використовуючи як інформативний параметр реактивний струм навантаження, провідність фази БСК

$$b_{BC} = \frac{k_1}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}} (\operatorname{Im} \dot{I}_1 - \operatorname{Im} \dot{I}_{1\text{вх}}) + b_{BC}^{(0)}, \quad (2)$$

де \dot{I}_1 — комплексний струм прямої послідовності навантаження; $\operatorname{Im} \dot{I}_{1\text{вх}}$ — задане значення вхідного реактивного струму прямої послідовності після компенсації реактивної потужності.

У разі використання як інформативного параметра реактивної провідності навантаження провідність фази БСК визначається за формулою

$$b_{BC} = \frac{k_1}{3} (b_1 - b_{\text{вх}}) + b_{BC}^{(0)}, \quad (3)$$

де $b_{\text{вх}} = g_1 \operatorname{tg} \phi_{\text{вх}}$ — задане значення вхідної реактивної провідності після компенсації реактивної потужності, $g_1 = \operatorname{Re}(Y_1)$; $b_1 = -\operatorname{Im}(Y_1) \sqrt{a^2 + b^2}$ — активна та реактивна провідності пря-

мої послідовності навантаження $\underline{Y}_1 = \underline{I}_1 / \underline{U}_1$.

Застосування будь-якої з умов (1), (2) або (3) під час ітераційного процесу приводить до повної компенсації реактивної потужності. Однак збіжність ітераційного процесу залежить від вибору інформативного параметра.

Статичні характеристики навантаження можуть бути описані степеневим виразом [2, 3], наприклад для фази BC ,

$$S_{BC}(k_P, k_Q) = P_{BC} \left(\frac{U_{BC}}{U_{\text{НОМ}}} \right)^{k_P} + jQ_{BC} \left(\frac{U_{BC}}{U_{\text{НОМ}}} \right)^{k_Q}; \quad (4)$$

де P_{BC} , Q_{BC} – відповідні активні та реактивні потужності навантажень фази BC ; U_{BC} – фактичне значення лінійної напруги BC у вузлі навантажень; $U_{\text{НОМ}}$ – номінальне значення напруги мережі; k_P , k_Q – характеристичні коефіцієнти, що визначають залежності потужностей навантаження від напруги (діапазон їх зміни знаходиться в таких межах: $k_P = 0 \dots 2$, $k_Q = 0 \dots 4$).

Статичні характеристики БСК мають квадратичну залежність від напруги

$$Q = Q_K \left(\frac{U}{U_K} \right)^2, \quad (5)$$

де Q – значення реактивної потужності, що генерується БСК за напруги U ; Q_K – номінальне значення реактивної потужності, що генерується БСК за напруги U_K , за якої відбувається визначення потужності БСК.

Якщо в якості інформативного параметра використовується реактивний струм, то

$$I_P = \frac{Q}{U} = \frac{Q_K \left(\frac{U^2}{U_K^2} \right)}{U} = Q_K \left(\frac{1}{U} \right) = I_{PK} \left(\frac{U_K}{U} \right), \quad (6)$$

де I_P – значення реактивного струму, що генерується БСК за напруги U ; I_{PK} – номінальне значення реактивного струму, що генерується БСК за напруги U_K .

Якщо в якості інформативного параметра використовується реактивна провідність, то

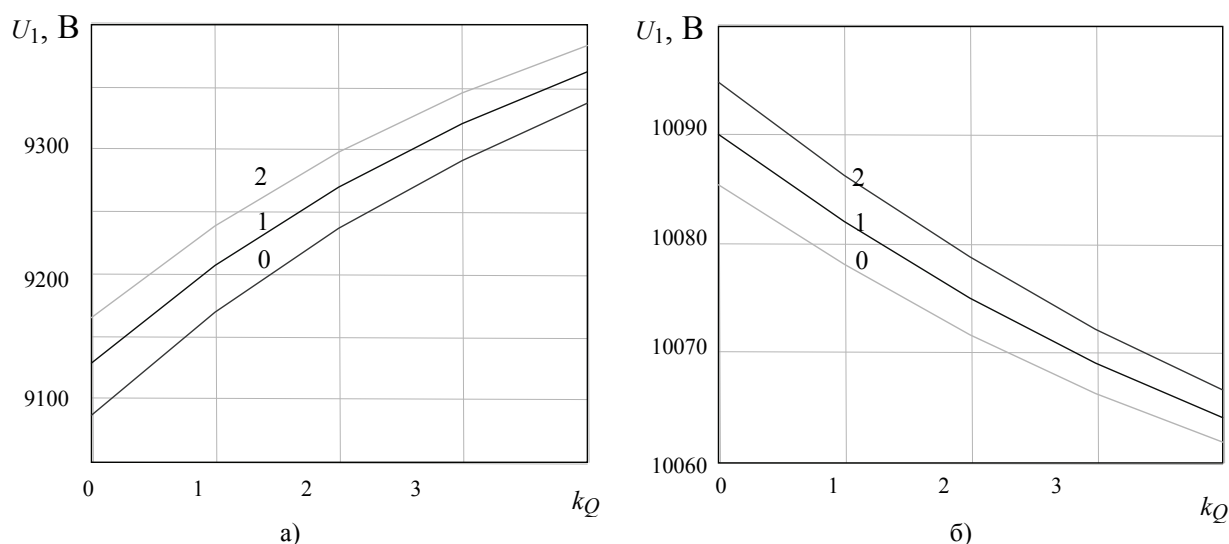
$$b = \frac{Q}{U^2} = \frac{Q_K \left(\frac{U^2}{U_K^2} \right)}{U^2} = Q_K \left(\frac{1}{U^2} \right) = b_K \left(\frac{U_K^2}{U^2} \right), \quad (7)$$

де b – значення реактивної провідності БСК за напруги U ; b_K – номінальне значення реактивної провідності БСК за напруги U_K .

Оптимальність прийнятих рішень доцільно характеризувати відхиленням ступеня компенсації реактивної потужності від одиниці $\delta\alpha = (Q_K - Q_H) / Q_H$ та відхиленням напруги прямої послідовності від номінального значення δU .

Оцінювання оптимальності рішень проаналізуємо на числовому прикладі: трифазне симетричне навантаження $\underline{S}_H = 1,0 + j0,9$ МВА живиться повітряною лінією напругою 10 кВ від трансформаторної підстанції 35/10 кВ. Комплексний опір електропередачі $\underline{Z} = 3,78 + j9,96$ Ом.

Вплив статичних характеристик навантаження на відхилення напруги до і після ввімкнення БСК потужністю 3×300 квар ($\delta\alpha = 0$) відображений на рисунку. Залежності U_1 побудовано як функції характеристичних коефіцієнтів k_P , k_Q (цифрою 0 на графіках позначено залежності для $k_P = 0$; 1 – для $k_P = 1$; 2 – для $k_P = 2$).



Вплив статичних характеристик вузла навантажень на відхилення напруги:
а — до і ввімкнення БСК; б — після ввімкнення БСК

З рисунку випливає, що характер статичних характеристик істотно впливає на значення напруги у вузлі навантаження до ввімкнення БСК і практично не впливає на значення напруги у вузлі навантаження після ввімкнення БСК.

Розглянемо ефективність використання інформативних параметрів за різних статичних характеристик навантаження. Для статичних характеристик реактивної потужності навантаження нульового степеня найкращим є використання реактивної потужності як інформативного параметра. Наприклад, у разі ввімкнення навантаження, характеристичні коефіцієнти якого $k_p = 0$; $k_Q = 0$, значення струму фази А на стороні 10 кВ буде $\dot{I}_A = 85e^{-j46^\circ}$. Відхилення напруги $\delta U = -9\%$. Після ввімкнення БСК потужністю 3×300 квар, яке формується на першому кроці процесу керування за умовами (1), якщо $k_1 = 1$, значення струму фази А на стороні 10 кВ приблизно буде $\dot{I}_A = 57e^{-j5^\circ}$ А, відхилення напруги $\delta U = 0,9\%$.

Отже, у разі керування за умови (1), якщо $k_1 = 1$, за статичних характеристик реактивної потужності навантаження нульового степеня швидкодія компенсації реактивної потужності буде найвищою, оскільки уже на першому кроці керування забезпечується $\delta\alpha = 0$. Використання умов (2) та (3), коли $k_1 = 1$, для такого навантаження приводить на першому кроці керування до перекомпенсації реактивної потужності, оскільки потужності БСК відповідно будуть: 3×300 квар та 3×360 квар. Умови (2) і (3) теж можна використати для керування БСК, якщо скоректувати коефіцієнт k_1 . Коректування k_1 у випадку використання умови (2) з метою отримання оптимального значення компенсації реактивної потужності необхідно здійснювати за формулою: $k_1 = U_1/U_{\text{ном}}$, а у разі керування за умовою (3) — за формулою $k_1 = (U_1/U_{\text{ном}})^2$, де U_1 — фактичне значення напруги прямої послідовності.

Умову (2) доцільно використовувати, якщо статичні характеристики реактивної потужності навантаження першого степеня. Наприклад, у разі ввімкнення навантаження, характеристичні коефіцієнти якого $k_p = 0,6$; $k_Q = 1$, значення струму фази А на стороні 10 кВ буде $\dot{I}_A = 79e^{-j45^\circ}$. Відхилення напруги $\delta U = -8\%$. Керування за умовами (2), якщо $k_1 = 1$, приводить до ввімкнення БСК потужністю 3×300 квар. Отже, у разі керування за умовами (2), якщо $k_1 = 1$, за інших статичних характеристик, швидкодія компенсації реактивної потужності є найвищою, оскільки уже на першому кроці керування $\delta\alpha = 0$.

Умову (3), якщо $k_1 = 1$ доцільно використовувати для квадратичних статичних характеристик реактивної потужності навантаження. У разі ввімкнення навантаження, характеристичні коефі-

цієнти якого $k_p = 1,0$; $k_Q = 2,0$ або $k_p = 1,5$; $k_Q = 2,0$, значення струму фази A на стороні 10 кВ відповідно буде $\dot{I}_A = 75e^{-j44^\circ}$ та $\dot{I}_A = 74e^{-j45^\circ}$ А. Відхилення напруги $\delta U = -7\%$. Після ввімкнення БСК потужністю 3×300 квар, яке формується на першому кроці керування за умовами (3), якщо $k_1 = 1$, значення струму фази A на стороні 10 кВ буде $\dot{I}_A = 58e^{-j5^\circ}$ А, відхилення напруги $\delta U = 0,7\%$. Отже, за квадратичних статичних характеристик навантаження швидкодія керування за умовами (3) є найвищою, оскільки уже на першому кроці керування $\delta\alpha = 0$.

У цьому випадку навпаки, використання (1) та (2), якщо $k_1 = 1$, приводить до ввімкнення БСК потужністю відповідно 3×260 квар та 3×280 квар, відхилення ступеня компенсації реактивної потужності відповідно буде $\delta\alpha = -13\%$ та -7% . Умови (1) і (2) можна використати для керування БСК, якщо скоректувати коефіцієнт k_1 . Коректування k_1 у випадку використання умови (1) з метою отримання оптимального значення компенсації реактивної потужності необхідно здійснювати за формулою $k_1 = (U_{\text{ном}}/U_1)^2$, а у разі керування за умовою (2) – за формулою $k_1 = U_{\text{ном}}/U_1$.

Якщо статичні характеристики реактивної потужності навантаження відмінні від квадратичних, то на першому кроці керування за умовою (3) досягнути необхідну точність не вдається. Наприклад, у разі ввімкнення навантаження, характеристичні коефіцієнти якого $k_p = 0,6$; $k_Q = 2,3$ використання умови (3) для $k_1 = 1$ приводить на першому кроці до ввімкнення БСК потужністю 3×290 квар, а у разі ввімкнення навантаження, характеристичні коефіцієнти якого $k_p = 0,6$; $k_Q = 1,5$, використання умови (3), якщо $k_1 = 1$, приводить на першому кроці до ввімкнення БСК потужністю 3×310 квар.

Зазначимо, що у першому випадку використання умови (2), якщо $k_1 = 1$, на першому кроці приводить до ввімкнення БСК потужністю 3×270 квар, а використання умови (1), якщо $k_1 = 1$, приводить на першому кроці до ввімкнення БСК потужністю 3×250 квар, у другому випадку використання умови (2), якщо $k_1 = 1$, приводить на першому кроці до ввімкнення БСК потужністю 3×290 квар, а використання умови (1), якщо $k_1 = 1$, приводить на першому кроці до ввімкнення БСК потужністю 3×270 квар.

Висновки

Для керування БСК можна використовувати реактивну потужність, реактивний струм або реактивну провідність навантаження, відповідно, якщо статичні характеристики реактивної потужності навантаження мають характеристичний коефіцієнт нульового, першого або другого степеня.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Зорін В. В. Оцінка взаємовпливу статичних характеристик вузла навантажень і оптимальних розв'язків математичних моделей зменшення несиметрії та відхилень напруг / В. В. Зорін, М. Й. Бурбело, А. М. Волоцький // Технічна електродинаміка. — 2009. — № 1. — С. 35—37.
2. Жданов П. С. Вопросы устойчивости электрических систем / П. С. Жданов; под ред. Л. А. Жукова. — М.: Энергия, 1979. — 456 с.
3. Гуревич Ю. Е. Устойчивость нагрузки электрических систем / Ю. Е. Гуревич, Л. Е. Либова, Э. А. Хачатрян. — М.: Энергоиздат, 1981. — 209 с.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

Стаття надійшла до редакції 16.02.12
Рекомендована до друку 1.06.12

Бурбело Михайло Йосипович — професор, **Войтюк Юрій Петрович** — інженер.

Кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, Вінниця