

Частина I. ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ

УДК 621.316.7

М. Й. Бурбело, д-р.техн.наук, Ю. П. Войтюк
(Україна, Вінницький національний технічний університет)

ОПТИМАЛЬНЕ ЗА ШВИДКОДІЄЮ КЕРУВАННЯ КОМПЕНСАЦІЙНИМИ СИМЕТРУВАЛЬНИМИ ПРИСТРОЯМИ

Розгляд проблеми

Компенсаційні симетрувальні пристрої (СП) знаходять все більше застосовуються в розподільних мережах енергопостачальних компаній, оскільки забезпечують одночасно компенсацію реактивних навантажень, зменшення відхилень напруги, а також напруги та струму зворотної послідовності у вузлі приєднання споживача та в електричній мережі [1].

Оптимізацію процесу керування несиметричного режиму звичайно виконують за такими умовами [2]:

$$\begin{aligned} I_2(\mathbf{x}) &\rightarrow \min; \\ U_2(\mathbf{x}) &\leq bU_1(\mathbf{x}); \\ U_1(\mathbf{x}) &\geq U_{\min \text{ доп}}, \\ \mathbf{x} &\geq 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де $I_2(\mathbf{x})$ – діюче значення струму зворотної послідовності у вузлі навантаження як функції вектора керованих змінних; $U_1(\mathbf{x}), U_2(\mathbf{x})$ – діючі значення напруг прямої та зворотної послідовностей у вузлі навантаження як функції вектора керованих змінних; b – наперед прийняте порогове значення коефіцієнта напруги зворотної послідовності K_{2U} ; $U_{\min \text{ доп}}$ – мінімально допустиме значення напруги; \mathbf{x} – вектор керованих змінних (параметри СП, виконаного за схемою несиметричного трикутника реактивних елементів).

Водночас питанням оптимального за швидкодією керування компенсаційними СП приділено недостатньо уваги.

Обґрунтування результатів

Процес оптимального за швидкодією керування буде полягати в пошуку інформативного параметра, який забезпечить досягнення оптимуму за мінімальної кількості перемикачів секцій СП.

Для порівняння швидкодії симетрування навантажень розглянемо інформативні параметри, які широко використовуються під час керування компенсаційними СП: спряжену умовну потужність, струм та умовну провідність зворотної послідовності.

Вектор провідностей фаз СП, наприклад, у разі використання спряженої умовної потужності зворотної послідовності, $\underline{S}_2 = 3U_1 \underline{Y}_2$ формується у такому вигляді:

$$\begin{aligned} b_{BC} &= \frac{k_1}{U_{\text{ном}}^2} \left[(Q_n - Q_{\text{ex}}) + 2 \operatorname{Im} \underline{S}_2 \right]; \\ b_{CA} &= \frac{k_1}{U_{\text{ном}}^2} \left[(Q_n - Q_{\text{ex}}) - \operatorname{Im} \underline{S}_2 - \sqrt{3} \operatorname{Re} \underline{S}_2 \right]; \\ b_{AB} &= \frac{k_1}{U_{\text{ном}}^2} \left[(Q_n - Q_{\text{ex}}) - \operatorname{Im} \underline{S}_2 + \sqrt{3} \operatorname{Re} \underline{S}_2 \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

де k_1 – коефіцієнт корегування потужності СП за значенням напруги; $Q_{\text{ex}} = P_n \operatorname{tg} \varphi_{\text{ex}}$ – задане значення вхідної реактивної потужності після симетрування; $\operatorname{tg} \varphi_{\text{ex}}$ – задане значення коефіцієнта реактивної потужності; P_n, Q_n – активна та реактивна потужності навантаження.

У разі використання як інформативного параметра струму зворотної послідовності вектор провідностей фаз компенсаційних СП формується за виразами:

$$\begin{aligned} b_{BC} &= \frac{k_1}{\sqrt{3}U_{ном}} \left[(Im \underline{I}_1 - Im \underline{I}_{1ex}) - 2 Im \underline{I}_2 \right]; \\ b_{CA} &= \frac{k_1}{\sqrt{3}U_{ном}} \left[(Im \underline{I}_1 - Im \underline{I}_{1ex}) + Im \underline{I}_2 - \sqrt{3} Re \underline{I}_2 \right]; \\ b_{AB} &= \frac{k_1}{\sqrt{3}U_{ном}} \left[(Im \underline{I}_1 - Im \underline{I}_{1ex}) + Im \underline{I}_2 + \sqrt{3} Re \underline{I}_2 \right], \end{aligned} \quad (3)$$

де $Im \underline{I}_{1ex}$ – задане значення вхідного реактивного струму після симетрування; $\underline{I}_1, \underline{I}_2$ – комплексні струми відповідно прямої та зворотної послідовностей навантаження.

У разі використання як інформативного параметра умовної провідності зворотної послідовності вектор провідностей фаз компенсаційних СП має такий вигляд:

$$\begin{aligned} b_{BC} &= \frac{k_1}{3} [(b_1 - b_{ex}) - 2b_2]; \\ b_{BC} &= \frac{k_1}{3} [(b_1 - b_{ex}) + b_2 - \sqrt{3}g_2]; \\ b_{BC} &= \frac{k_1}{3} [(b_1 - b_{ex}) + b_2 + \sqrt{3}g_2], \end{aligned} \quad (4)$$

де $b_{ex} = g_1 tg \varphi_{ex}$ – задане значення вхідної реактивної провідності після симетрування; $g_1 = Re(\underline{Y}_1)$, $b_1 = -Im(\underline{Y}_1)$ – активна та реактивна провідності прямої послідовності навантаження $\underline{Y}_1 = \underline{I}_1 / \underline{U}_1$; $g_2 = Re(\underline{Y}_2)$, $b_2 = -Im(\underline{Y}_2)$ – активна та реактивна умовні провідності зворотної послідовності навантаження $\underline{Y}_2 = \underline{I}_2 / \underline{U}_1$.

Оцінимо оптимальні рішення на числовому прикладі: трифазне симетричне навантаження $\underline{S}_m = 1,0 + j0,9$ МВА та однофазне $\underline{S}_o = 0,25 + j0,1$ МВА (однофазне навантаження приєднано до фаз В і С) живляться повітряною лінією напругою 10 кВ від трансформаторної підстанції 35/10 кВ. Комплексний опір електропередачі $\underline{Z} = 3,78 + j9,96$ Ом.

Оптимальність прийнятих рішень будемо характеризувати відхиленням напруги прямої послідовності від номінального значення, яке не повинно перевищувати 5 %, та коефіцієнтом несиметрії напруг за зворотною послідовністю K_{2U} , прийнявши діапазон його зміни до 0,5 %.

Статичні характеристики навантажень будуть описані такими виразами [3]:

$$\begin{aligned} S_{BC}(k_p, k_Q) &= P_{BC} \left(\frac{U_{BC}}{U_{ном}} \right)^{k_p} + jQ_{BC} \left(\frac{U_{BC}}{U_{ном}} \right)^{k_Q}; \\ S_{CA}(k_p, k_Q) &= P_{CA} \left(\frac{U_{CA}}{U_{ном}} \right)^{k_p} + jQ_{CA} \left(\frac{U_{CA}}{U_{ном}} \right)^{k_Q}; \\ S_{AB}(k_p, k_Q) &= P_{AB} \left(\frac{U_{AB}}{U_{ном}} \right)^{k_p} + jQ_{AB} \left(\frac{U_{AB}}{U_{ном}} \right)^{k_Q}, \end{aligned} \quad (5)$$

де $P_{BC}, Q_{BC}, P_{CA}, Q_{CA}, P_{AB}, Q_{AB}$ – відповідно активні та реактивні потужності навантажень фаз BC, CA, AB; U_{BC}, U_{CA}, U_{AB} – фактичне значення лінійних напруг BC, CA, AB у вузлі навантажень; $U_{ном}$ – номінальне значення напруги мережі; k_p, k_Q – характеристичні коефіцієнти, що визначають залежності потужностей навантаження від напруги (діапазон їх зміни знаходиться в таких межах: $k_p=0\dots2$, $k_Q=0\dots4$) [4, 5].

У разі ввімкнення узагальненого навантаження, характеристичні коефіцієнти якого $k_p=0,6$, $k_Q=2,3$, значення струмів фаз на стороні 10 кВ будуть такими: $\underline{I}_A = 79,9e^{-j52,9^\circ}$ А; $\underline{I}_B = 99,1e^{-j162,7^\circ}$ А; $\underline{I}_C = 104,1e^{j63,5^\circ}$ А ($I_2 = 14,3$ А). Коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю

$K_{2U} = 2,98\%$. Відхилення напруги $\delta U = -11,3\%$.

Припустимо, що на першому етапі відбувається ввімкнення симетричної частини СП потужністю $\{0,3; 0,3; 0,3\}$ Мвар, а на другому етапі здійснюється симетрування. Після ввімкнення СП потужністю $\{0,3; 0,3; 0,3\}$ Мвар значення струмів фаз на стороні 10 кВ будуть такими: $\mathcal{I}_A = 53,4e^{-j6,5^\circ}$ А; $\mathcal{I}_B = 80,7e^{-j127,2^\circ}$ А; $\mathcal{I}_C = 70,4e^{j93,5^\circ}$ А ($I_2 = 15,7$ А). Коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю $K_{2U} = 2,95\%$. Відхилення напруги $\delta U = -1,5\%$.

Після ввімкнення СП потужністю $\{0,417; 0,413; 0,202\}$ Мвар, які формуються на другому етапі керування за умовами (2) при $k_1=1$, коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю зменшується ($K_{2U} = 0,58\%$). Відхилення напруги практично дорівнює нулю ($\delta U = 0,1\%$). При цьому за напругою зворотної послідовності умови (1) не буде виконана.

У разі керування за умовами (3) при $k_1=1$ потужності фаз СП $\{0,428; 0,435; 0,180\}$ Мвар, коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю зменшується ($K_{2U} = 0,26\%$). Відхилення напруги те ж практично дорівнює нулю ($\delta U = 0,2\%$). Використання умов (3) у даному випадку буде ефективним.

Припустимо, що на першому етапі одночасно здійснюється компенсація реактивної потужності та симетрування. У разі керування за умовами (2) при $k_1=1$ відбувається недокомпенсація реактивної потужності внаслідок увімкнення СП потужністю $\{0,368; 0,385; 0,201\}$ Мвар. Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю $K_{2U} = 0,94\%$. Відхилення напруги $\delta U = -0,8\%$.

Корегування k_1 у випадку використання умов (2) можна здійснювати за формулою $k_1 = U_{ном}/U_1$, де U_1 – фактичне значення напруги прямої послідовності. У разі керування за умовами (2) з корегуванням значення k_1 коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю $K_{2U} = 0,53\%$.

Як і раніше, найкращим є використання умов (3). При $k_1=1$ формується вектор керування СП: $\{0,455; 0,462; 0,214\}$ Мвар. Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю $K_{2U} = 0,28\%$. Відхилення напруги $\delta U = 1,3\%$.

Зазначимо, що у разі використання умов (4) при $k_1=1$ на першому етапі керування відбувається істотна перекомпенсація реактивної потужності внаслідок формування вектора потужностей фаз СП з такими значеннями: $\{0,56; 0,55; 0,23\}$ Мвар. Для виключення перекомпенсації в умовах істотного зниження напруги у вузлі приєднання споживача на першому етапі керування для симетричної частини СП необхідно задавати $k_1 < 1$. Наприклад, у разі керування за умовами (4) при $k_1 = U_1/U_{ном}$ вектор потужностей фаз СП: $\{0,474; 0,469; 0,191\}$ Мвар. Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю $K_{2U} = 0,53\%$. Відхилення напруги $\delta U = 1,3\%$.

Кращим є керування за умовами (4) при $k_1 = (U_1/U_{ном})^2$. Вектор керування у цьому випадку $\{0,401; 0,396; 0,162\}$ Мвар. Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю $K_{2U} = 0,41\%$. Відхилення напруги $\delta U = -0,8\%$.

Висновки

Показано, що оптимальне за швидкістю керування компенсаційними СП доцільно здійснювати шляхом одночасного регулювання симетричної та несиметричної частин СП з використанням як інформаційного параметра керування спряженої умовної потужності, струму або умовної провідності зворотної послідовності та корегуванням отриманих потужностей за напругою.

Список літератури

1. Кузнецов, В. Г. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях [Текст] / В. Г. Кузнецов, А. С. Григорьев, В. Б. Данилюк – К.: Наук. думка, 1992. – 240 с.
2. Зорин, В. В. Параметрический синтез корректирующих устройств для оптимизации несимметричного режима и регулирования напряжения в узле нагрузки [Текст] / В. В. Зорин, А. М. Волоцкий // Электрические сети и системы. – 1984. – Вып. 20. – С.44–50.
3. Зорин, В. В. Оцінка взаємовпливу статичних характеристик вузла навантажень і оптимальних розв'язків математичних моделей зменшення несиметрії та відхилень напруг [Текст] / В. В. Зорин, М. Й. Бурбело, А. М. Волоцький // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 1. – С. 35–37.
4. Жданов, П. С. Вопросы устойчивости электрических систем [Текст] / П. С. Жданов; под ред. Л. А. Жукова. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.
5. Гуревич, Ю. Е. Устойчивость нагрузки электрических систем [Текст] / Ю. Е. Гуревич, Л. Е. Либова, Э. А. Хачатрян – М.: Энергоиздат, 1981. – 209с.

Рекомендовано до друку: проф. Випанасенко С.І.