

УДК 621.316

*М. Й. Бурбело, д-р техн. наук, М. В. Кузьменко
(Україна, Вінницький національний технічний університет)*

УМОВИ КЕРУВАННЯ ДВОФАЗНИМИ СИМЕТРУВАЛЬНИМИ УСТАНОВКАМИ

Розгляд проблеми

Несиметричним режимом трифазної електричної мережі називають такий режим, за якого умови роботи однієї або всіх фаз є неоднаковими [1-3]. Найбільш частою причиною виникнення несиметричного режиму є нерівність струмів навантажень фаз. При цьому розрізняють два види несиметрії: систематичну та випадкову. Характерний випадок систематичної несиметрії постійне перевантаження однієї з фаз. У цьому випадку здійснюють вирівнювання навантажень фаз шляхом їх перемикавання з перевантаженої на недовантажену фазу. Випадкова несиметрія характеризується почерговим перевантаженням то однієї, то іншої фази. У цьому випадку необхідним є застосування симетрувальних установок (СУ) з автоматичним їх керуванням.

Несиметрія напруг в мережах характеризується коефіцієнтом зворотної послідовності напруг [4]

$$K_{2U} = U_2 / U_{ном}, \quad (1)$$

де U_2 – діюче значення напруги зворотної послідовності; $U_{ном}$ – діюче значення номінальної напруги.

Несиметрія напруг та струмів призводить [5] до збільшення втрат потужності в лініях електропередачі і трансформаторах, а також до зменшення пропускної здатності останніх. Негативного впливу зазнають і синхронні генератори, в яких несиметричні струми спричиняють додатковий нагрів як статора, так і ротора. Несиметрія напруг призводить до зниження надійності електроприймачів. Так, в асинхронних двигунах унаслідок протікання струмів зворотної послідовності, викликаних несиметрією напруги живлення, відбувається зниження корисного моменту на валу, що призводить до їх перегрівання і швидкого старіння ізоляції [6]. Це, в свою чергу, прискорює їх вихід з ладу. Тривалість експлуатації номінальне навантаженого асинхронного двигуна, що приєднаний до джерела живлення з коефіцієнтом зворотної послідовності напруг $k_{2U} = 4\%$, скорочується вдвічі. Неприпустимі відхилення напруги, які можуть виникати внаслідок несиметрії, викликають зниження ефективності

роботи однофазних споживачів: люмінесцентних ламп, ламп розжарювання (занижений рівень напруги викликає зменшення світлового потоку, завищений – скорочення строку служби), та надійності роботи пристроїв автоматики, релейного захисту тощо.

Тому згідно з ГОСТ 13109-97 [4] допустимий коефіцієнт зворотної послідовності напруг приймають 2 %. При $K_{2U} \geq 2\%$ рекомендується для вибору засобів компенсації реактивної потужності використовувати симетрувальні або фільтросиметрувальні пристрої [7].

Симетрувальні установки можуть бути трифазними з трьома ємнісними елементами, з двома ємнісними та одним індуктивним елементом або двома індуктивними та одним ємнісним елементами, а також двофазними з двома ємнісними елементами, з індуктивним та ємнісним елементами або з двома індуктивними елементами. Найкращим варіантом є двофазна СУ з двома ємнісними елементами, оскільки вона є найбільш дешевою і забезпечує водночас компенсацію реактивної потужності.

Обґрунтування результатів

Основним інформативним параметром вимірювальних систем установок симетрування є комплексний коефіцієнт зворотної послідовності напруг в точці електричної мережі підприємства, що розглядається. Він може бути розрахований за формулою [7]

$$\underline{K}_{2U} \approx -\frac{(1 + dU)\underline{N}_2}{S_K^*}, \quad (2)$$

де $\delta U = (U_1 - U_{ном})/U_{ном}$ – відхилення напруги прямої послідовності від номінального фазного значення; U_1 – модуль напруги прямої послідовності; S_K^* – спряжений комплекс потужності короткого замикання мережі;

$\underline{N}_2 = 3\dot{U}_1 \dot{I}_2 = -(S_{BC}^* + a S_{CA}^* + a^2 S_{AB}^*)$ – пульсуюча потужність зворотної послідовності; \dot{I}_2 – комплексне значення струму зворотної послідовності; S_{BC}^* , S_{CA}^* , S_{AB}^* – спряжені комплекси сумарних потужностей однофазних навантажень; $a = e^{j120^\circ}$ – фазовий оператор, а дійсну та уявну складом і пульсуючої потужності можна визначити за потужностями навантаження таким чином:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} \underline{N}_2 &= P_{BC} - \frac{1}{2}(P_{AB} + P_{CA}) + \frac{\sqrt{3}}{2}(Q_{AB} - Q_{CA}); \\ \operatorname{Im} \underline{N}_2 &= Q_{BC} - \frac{1}{2}(Q_{AB} + Q_{CA}) + \frac{\sqrt{3}}{2}(P_{AB} - P_{CA}), \end{aligned}$$

де $P_{BC}, P_{CA}, P_{AB}, Q_{BC}, Q_{CA}, Q_{AB}$ – активні та реактивні потужності відповідних однофазних навантажень.

Для забезпечення симетрування навантажень як інформативні параметри необхідно використовувати реактивну та пульсуючу потужності навантаження, за якими вибирають реактивні потужності фаз СУ:

$$\begin{aligned} Q_{BC} &= \frac{1}{3}[(Q_n - Q_{ex}) + 2\text{Im} \underline{N}_2]; \\ Q_{CA} &= \frac{1}{3}[(Q_n - Q_{ex}) + \text{Im} \underline{N}_2 - \sqrt{3} \text{Re} \underline{N}_2]; \\ Q_{AB} &= \frac{1}{3}[(Q_n - Q_{ex}) + \text{Im} \underline{N}_2 + \sqrt{3} \text{Re} \underline{N}_2], \end{aligned} \quad (3)$$

де $Q_{ex} = P_n \text{tg} \varphi_{ex}$ – задане значення вхідної реактивної провідності після симетрування; $\text{tg} \varphi_{ex}$ – задане значення коефіцієнта реактивної потужності після симетрування; P_n, Q_n – активна та реактивна потужності навантаження.

Симетрувальна установка у даному випадку повинна містити три реактивних елементи. Якщо задача компенсації реактивної потужності не вирішується, то доцільним є використання СУ з двома реактивними елементами, які забезпечують мінімум капітальних вкладень. Прирівнявши до нуля провідність однієї з фаз СУ, умови (3) можна записати в одному із таких виглядів:

$$Q_{BC} = 0; Q_{CA} = -\left[\text{Im} \underline{N}_2 + \frac{\sqrt{3}}{3} \text{Re} \underline{N}_2 \right]; Q_{AB} = -\left[\text{Im} \underline{N}_2 - \frac{\sqrt{3}}{3} \text{Re} \underline{N}_2 \right]; \quad (4)$$

$$Q_{BC} = -\left[\text{Im} \underline{N}_2 + \frac{\sqrt{3}}{3} \text{Re} \underline{N}_2 \right]; Q_{CA} = 0; Q_{AB} = \frac{2\sqrt{3}}{3} \text{Re} \underline{N}_2; \quad (5)$$

$$Q_{BC} = -\left[\text{Im} \underline{N}_2 - \frac{\sqrt{3}}{3} \text{Re} \underline{N}_2 \right]; Q_{CA} = -\frac{2\sqrt{3}}{3} \text{Re} \underline{N}_2; Q_{AB} = 0, \quad (6)$$

вибір яких залежить від того, в яку фазу ємнісний елемент не вмикається.

Оскільки для визначення трьох потужностей фаз СУ за формулами (4)-(6) необхідна інформація про три величини, а саме: $\frac{2\sqrt{3}}{3} \text{Re} \underline{N}_2$,

$\left[\text{Im} \underline{N}_2 - \frac{\sqrt{3}}{3} \text{Re} \underline{N}_2 \right]$ та $\left[\text{Im} \underline{N}_2 + \frac{\sqrt{3}}{3} \text{Re} \underline{N}_2 \right]$, то прийняття рішення, в які фази

необхідно увімкнути ємнісні елементи СУ, є однозначним. За знаком цих величин або за аргументом комплексної пульсуючої потужності зворотної послідовності можна чітко визначити, в які фази потрібно увімкнути ємнісні елементи.

Комплексну площину \underline{N}_2 ці величини поділяють на три сектори з кутом 120 ел. градусів. Рівняння (4) використовують тоді, коли аргумент комплексної умовної потужності зворотної послідовності \underline{N}_2 знаходять в межах $-150\dots-30$ ел. градусів, (5) – коли в межах $-30\dots+90$ ел. градусів, а (6) – якщо в $+90\dots-150$ ел. градусів. Наприклад, у разі живлення несиметричного навантаження $S_{BC} = 700\text{кВА}$; $S_{CA} = 450\text{кВА}$; $S_{AB} = 450\text{кВА}$ при коефіцієнтах потужності фаз відповідно $\cos\varphi_{BC}=0,8$; $\cos\varphi_{CA}=0,75$; $\cos\varphi_{AB}=0,75$ по лінії електропередач напругою 10 кВ, що характеризується комплексним опором

$$Z = 0,428 + j0,354 \text{ Ом},$$

будуть протікати такі струми фаз:

$$\dot{I}_A = 72,4e^{-j41,7^\circ} \text{ А}; \dot{I}_B = 89,5e^{-j152,5^\circ} \text{ А}; \dot{I}_C = 93,0e^{-j74,2^\circ} \text{ А}.$$

Струм зворотної послідовності $\dot{I}_2 = 12,3e^{-j150,2^\circ} \text{ А}$ (коефіцієнт несиметрії струмів за зворотною послідовністю $K_{2I}=14,6\%$, коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю $K_{2U}=1,3\%$). Для повного симетрування навантажень необхідно увімкнути СУ з такими параметрами: $Q_{BC} = 251\text{квар}$, $Q_{CA} = 257\text{квар}$ ($Q_{AB} = 0$).

У разі недоцільності або неможливості повного симетрування навантажень можна використовувати часткове симетрування. При цьому спостерігається лінійна залежність між фактичними та розрахунковими потужностями фаз СУ. Увімкнення СУ з параметрами $Q_{BC} = 200\text{квар}$, $Q_{CA} = 200\text{квар}$ приводить до зменшення струму зворотної послідовності приблизно у п'ять разів до величини $\dot{I}_2 = 12,3e^{-j150,2^\circ} \text{ А}$ [8].

Умови (3), (4)–(6) є інваріантними відносно до несиметрії напруги джерела живлення та опору ліній електропередачі, тобто несиметричність напруги джерела та значення опору ліній електропередачі не впливають на оптимальні величини потужностей фаз СУ. Однак увімкнення СУ може викликати як збільшення, так і зменшення коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю у вузлі навантаження залежно від характеру несиметрії джерела та навантаження. Збільшення коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю спостерігається тоді, коли початкові фази струму та напруги зворотної послідовності у вузлі несиметричного навантаження до увімкнення СУ збігаються, а зменшення, навпаки, тоді, коли струм та напруга зворотної послідовності знаходяться в протифазі. При куті зсуву фаз між напругою та струмом зворотної послідовності, що становить близько 90 ел. градусів, увімкнення СУ практично не впливає на несиметрію напруги за зворотною послідовністю. Таким чином, за кутом зсуву фаз між напругою та струмом

зворотної послідовності можна визначати доцільність повного чи часткового симетрування навантаження за умови несиметричності напруги джерела живлення.

Висновки

Обґрунтовано умови керування двофазними симетрувальними установками, в основу яких покладено використання поняття пульсуюче потужності. Використання запропонованих умов забезпечує підвищення швидкодії СУ завдяки відокремленості контурів керування.

Список літератури

1. Схемы симметрирования однофазных нагрузок в трехфазных цепях / А.Н. Милях, А.К. Шидловский, В. Г. Кузнецов.– К.: Наук. думка, 1973. – 219 с.
2. Повышение качества энергии в электрических сетях / А.К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – К.: Наук. думка, 1985. – 268 с.
3. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях / В.Г. Кузнецов, А.С. Григорьев, В.Б. Данилюк. – К.: Наук. думка, 1992. – 240 с.
4. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введен в Украине с 01.01.2000 г.
5. Железко Ю.С. Влияние потребителей на качество электроэнергии в сети и технические условия на его присоединение // Пром. энергетика. – 1991. – №8. – С. 39 – 41.
6. Жежеленко И.В. Влияние отклонения и несимметрии напряжений питающей сети на работу асинхронных электродвигателей // Энергетика. – 1990. – № 5. С. 32–38.
7. Инструктивные материалы Главгосэнергонадзора / Минэнерго СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 352 с.
8. Симетрування навантажень вузлів електричних мереж з використанням двофазних симетрувальних установок / Л. М. Бурбело., М.В. Кузьменко., О.О. Бірюков., О.М. Кінзерська // Вісн. ВПІ. – 2008. – № 5. – С. 35–38.