

УДК 621.316.7

М. И. Бурбело, д. т. н., проф.; А. В. Бабенко; О. М. Музыка, М. В. Никитенко
СИММЕТРИРОВАНИЕ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ УЗЛОВ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КОМПЕНСАЦИОННЫХ УСТАНОВОК ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ
ИСТОЧНИКЕ ПИТАНИЯ

Рассмотрено симметрирование токов и напряжений узлов электрических сетей, предложено критерий симметрирования при условии несимметрического источника питания и закон управления, соответствующий ему.

Ключевые слова: симметрирование, несимметрия источника

Суть проблемы

Обеспечение качества электроэнергии на достаточном уровне – одна из главных задач электроэнергетики Украины. Среди показателей качества важное место занимает уровень несимметрии напряжений электрических сетей. Несимметрия напряжений оказывает негативное влияние на работу потребителей, поскольку приводит к снижению надежности и экономичности работы электроприемников (асинхронных двигателей, систем освещения, конденсаторных установок, устройств автоматики и др.), к увеличению потерь мощности в линиях электропередач и трансформаторах, а также к уменьшению их пропускной способности [1].

Для симметрирования нагрузок при симметричном источнике напряжения используют критерий:

$$\underline{Y}_{21} = 0, \quad (1)$$

где $\underline{Y}_{12} = -(\underline{Y}_{BC} + a^2 \underline{Y}_{CA} + a \underline{Y}_{AB})$ – комплексная проводимость обратной последовательности нагрузки; \underline{Y}_{BC} , \underline{Y}_{CA} , \underline{Y}_{AB} – комплексные проводимости фаз нагрузки; $a = e^{j120^\circ}$ – оператор поворота трехфазной системы. В этом случае напряжение и ток обратной последовательности в узле нагрузки будут равны нулю ($U_2 = 0$, $I_2 = 0$).

При несимметричном источнике электродвижущей силы (ЭДС) в случае применения критерия (1) происходит неполное симметрирование и остаточные напряжение и ток обратной последовательности в узле присоединения нагрузки соответственно будут:

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{E}_2}{1 + \underline{Y}_{22} \underline{Z}}; \quad \dot{I}_2 = \dot{U}_2 \underline{Y}_{22},$$

где \dot{E}_2 – ЭДС обратной последовательности источника; \underline{Z} – комплексное сопротивление линии электропередачи; $\underline{Y}_{22} = k_{21}(\underline{Y}_{BC} + \underline{Y}_{CA} + \underline{Y}_{AB})$ – комплексная проводимость обратной последовательности нагрузки; k_{21} – коэффициент, характеризующий соотношение проводимостей обратной и прямой последовательности.

В [2] получен критерий симметрирования напряжения с использованием компенсационных симметрирующих установок (СУ) при несимметричном источнике питания:

$$\underline{Y}_{21} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1} \left(\underline{Y}_{11} + \frac{1}{\underline{Z}} \right),$$

где \dot{E}_1 – ЭДС прямой последовательности источника; $\underline{Y}_{11} = \underline{Y}_{BC} + \underline{Y}_{CA} + \underline{Y}_{AB}$ – комплексная проводимость прямой последовательности нагрузки.

Недостатком использования данного критерия является возникновение значительных дополнительных потерь активной мощности в линии электропередачи, которые обусловлены увеличением тока обратной последовательности в результате симметрирования напряжения.

Целью данной работы является анализ возможности применения критериев симметрирования для управления компенсационными симметрирующими установками при несимметричном источнике питания.

Обоснование результатов

Уменьшение потерь в линиях после симметрирования напряжения с использованием компенсационных СУ возможно при использовании критерия:

$$\underline{Y}_{21} = k \frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1} \left(\underline{Y}_{11} + \frac{1}{\underline{Z}} \right), \quad (2)$$

где k – действительный коэффициент, значение которого задается в зависимости от существующего уровня несимметрии напряжений до регулирования и допустимого уровня несимметрии напряжений после регулирования. Коэффициент k определяется согласно условию:

$$k = 1 - \frac{\dot{U}_{2\text{доп}}}{\dot{E}_2}, \quad (3)$$

где $\dot{U}_{2\text{доп}}$ – допустимое значение напряжения обратной последовательности в узле электрической сети.

После подстановки (2) в выражения для напряжения и тока обратной последовательности в узле присоединения несимметричной нагрузки [3]:

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{E}_2 [1 + \underline{Y}_{11} \underline{Z}] - \dot{E}_1 \underline{Y}_{21} \underline{Z}}{[1 + \underline{Y}_{22} \underline{Z}][1 + \underline{Y}_{11} \underline{Z}] - \underline{Z}^2 \underline{Y}_{21} \underline{Y}_{12}};$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_1 \underline{Y}_{21} + \dot{E}_2 \underline{Y}_{22} + \dot{E}_2 \underline{Z} (\underline{Y}_{22} \underline{Y}_{11} - \underline{Y}_{12} \underline{Y}_{21})}{[1 + \underline{Y}_{22} \underline{Z}][1 + \underline{Y}_{11} \underline{Z}] - \underline{Z}^2 \underline{Y}_{21} \underline{Y}_{12}},$$

где \underline{Y}_{21} , \underline{Y}_{12} , \underline{Y}_{22} – проводимости несимметричной нагрузки, можно получить формулы для определения напряжения и тока обратной последовательности, которые возникают в результате симметрирования согласно критерию (2), в виде:

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{E}_2 (1 - k)}{1 + \underline{Y}_{22} \underline{Z} - \underline{Y}_{12} \underline{Z}}; \quad \dot{I}_2 = k \frac{\dot{E}_2}{\underline{Z}} + \dot{U}_2 \underline{Y}_{22}.$$

Ток обратной последовательности вызывает дополнительные потери мощности в линиях электропередач, которые обусловлены несимметрией нагрузки.

Во время регулирования необходимо задать коэффициент k , для выбора которого с учетом (3) предлагается применять такой алгоритм:

$$k = \begin{cases} 0 & \text{при } k_{2E} < 2\%; \\ 1 - \frac{\dot{U}_{2\text{доп}}}{\dot{E}_2} & \text{при } k_{2E} \geq 2\%, \end{cases}$$

где k_{2E} – коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности источника питания. При коэффициенте несимметрии напряжения по обратной последовательности источника питания $k_{2E} \leq 4\%$ и необходимости обеспечения допустимого значения напряжения обратной последовательности в узле нагрузки (2% от

напряжения прямой последовательности), коэффициент k необходимо принять равным 0,5.

Закон управления компенсационной СУ, соответствующий критерию (1), имеет вид [1]:

$$\begin{aligned} b_{BC} &= \frac{1}{3}[b_{11} - b_{ex} - 2b_{21}]; \\ b_{CA} &= \frac{1}{3}[b_{11} - b_{ex} + b_{21} + \sqrt{3}g_{21}]; \\ b_{AB} &= \frac{1}{3}[b_{11} - b_{ex} + b_{21} - \sqrt{3}g_{21}]. \end{aligned} \quad (4)$$

Закон управления компенсационной СУ, соответствующий критерию (2), имеет такой вид [4]:

$$\begin{aligned} b_{BC} &= \frac{1}{3}[(b_{11} - b_{ex})(1 - 2k \cdot k'_{2E}) - 2b_{21} + \\ &+ 2k \cdot k'_{2E}(b_{11} + b_n) + 2k \cdot k''_{2E}(g_{11} + g_n)]; \\ b_{CA} &= \frac{1}{3}[(b_{11} - b_{ex})(1 + k \cdot k'_{2E} - \sqrt{3}k \cdot k''_{2E}) + b_{21} + \sqrt{3}g_{21} - \\ &- k(k'_{2E} - \sqrt{3}k''_{2E})(b_{11} + b_n) - k(k''_{2E} + \sqrt{3}k'_{2E})(g_{11} + g_n)]; \\ b_{AB} &= \frac{1}{3}[(b_{11} - b_{ex})(1 + k \cdot k'_{2E} + \sqrt{3}k \cdot k''_{2E}) + b_{21} - \sqrt{3}g_{21} - \\ &- k(k'_{2E} + \sqrt{3}k''_{2E})(b_{11} + b_n) - k(k''_{2E} - \sqrt{3}k'_{2E})(g_{11} + g_n)], \end{aligned} \quad (5)$$

где $k'_{2E} = \operatorname{Re}\left(\frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1}\right)$, $k''_{2E} = \operatorname{Im}\left(\frac{\dot{E}_2}{\dot{E}_1}\right)$ – соответственно действительная и мнимая составляющие коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности; $g_n = \operatorname{Re}(\underline{Z}^{-1})$, $b_n = \operatorname{Im}(\underline{Z}^{-1})$ – соответственно действительная и мнимая составляющие полной проводимости линии электропередачи.

На рис. 1 показаны результаты проведенного моделирования симметрирования нагрузки с использованием законов (4) и (5), в которых как информативные параметры вместо \underline{Y}_{11} , \underline{Y}_{21} использованы действительные и мнимые составляющие проводимостей $\underline{Y}_1 = \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1}$ и $\underline{Y}_2 = \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1}$, соответственно g_1 , b_1 и g_2 , b_2 , что значительно упрощает процесс измерения и не приводит к существенному увеличению ошибок симметрирования.

Моделирование проводилось при несимметричной нагрузке фаз: $S_{AB} = 100$ кВА, $S_{BC} = 1100$ кВА, $S_{CA} = 1100$ кВА; коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi = 0,8$; напряжение питающей сети 10 кВ; линия электропередачи имеет длину 1 км и характеризуется комплексным сопротивлением $\underline{Z} = 0.428 + j0.354$ Ом.

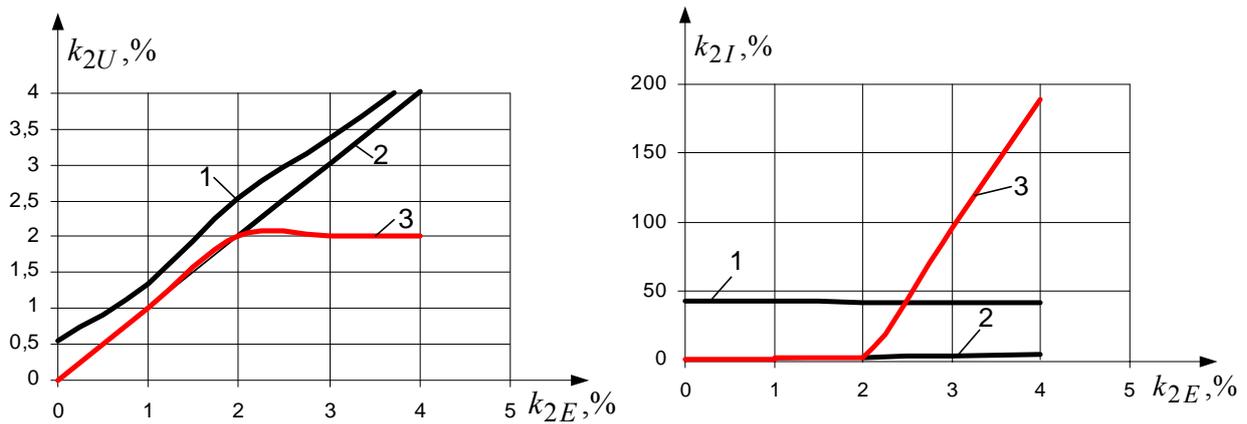


Рис. 1. Зависимости коэффициентов обратной последовательности напряжения и тока от коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности

Изображенные на рис. 2 зависимости характеризуют такие режимы: 1 – нерегулированный режим; 2 – режим симметрирования с использованием закона (4); 3 – режим симметрирования с использованием закона (5).

Характер зависимостей 1 и 2 (рис. 1а) позволяет утверждать, что отсутствие регулирования и использование закона управления (4) вызывает недопустимые значения коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности. Зависимость 3 (рис. 1б) показывает, что при использовании закона управления (5) потери активной мощности в линии электропередачи резко возрастают при увеличении несимметрии напряжения источника.

Для большей иллюстративности проанализируем зависимость стоимости дополнительных потерь электрической энергии в линии электропередачи (рис. 2), которые обусловлены несимметрией токов. Рассмотрен случай, когда несимметрия токов наблюдается на протяжении трех тысяч часов в год, что соответствует двухсменной работе предприятия, а стоимость электроэнергии составляет 0,3 грн/кВт·час (зависимости стоимости годовых потерь построены для приведенного выше примера).

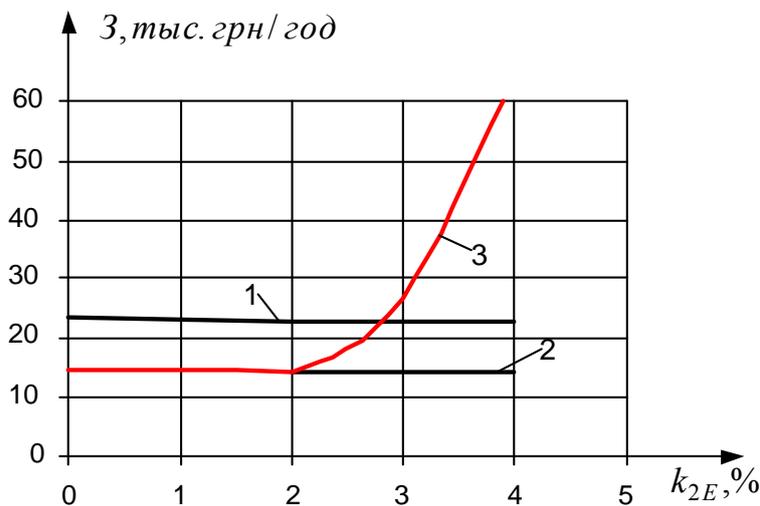


Рис. 2. Зависимости стоимости годовых потерь активной энергии в линии электропередачи от коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности

Как видно из рис. 2, при несимметричном источнике, коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности которого не превышает допустимого значения, для симметрирования нагрузки целесообразно использовать закон управления (4), поскольку

он проще в реализации по сравнению с законом (5). При несимметрии напряжения источника, превышающей 2%, когда возможным является использование лишь закона симметрирования (5), стоимость потерь активной мощности растет и значительно превышает стоимость потерь при нерегулированном режиме и при режиме симметрирования с использованием закона (4). Однако эти режимы при несимметрии напряжения, превышающей допустимую ГОСТом 13109-97 норму (2%), приводят к значительному ущербу из-за уменьшения надежности электроприемников, в частности электроприводов, которые могут существенно превышать ущерб от потерь мощности. Поэтому в таком случае использование закона управления (5) может быть экономически выгодным.

Выводы

При несимметричном источнике, значение коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности которого превышает допустимую ГОСТ 13109-97 норму (2%), эффективнее всего для симметрирования напряжения с помощью компенсационной симметрирующей установки использовать критерий, учитывающий несимметрию напряжения источника питания. Его использование позволяет обеспечить существенное уменьшение несимметрии нагрузок при несимметричном источнике питания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов В. Г. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях / В. Г. Кузнецов, А. С. Григорьев, В. Б. Данилюк. – К.: Наукова думка, 1992. – 240 с.
2. Бурбело М. Й., Бабенко О. В. Формування математичних моделей вимірювальних систем установок симетрування // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 6. – С. 242 – 251.
3. Кузнецов В. Г. Компенсация реактивной мощности в электрических сетях с несимметричными нагрузками // Электричество. – 1983. – № 2. – С. 64 – 67.
4. Бабенко О. В. Квазірівноважені вимірювальні канали для установок симетрування навантажень вузлів електричних мереж: Автореф. дис. ... кандидата техн. наук / ВНТУ. – Вінниця, 2007. – 20 с.

Бурбело Михаил Иосифович – заведующий кафедрой электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента;

Бабенко Алексей Викторович – ассистент кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента;

Музыка Оксана Михайловна – студент института электроэнергетики и электромеханики;

Никитенко Максим Васильевич – студент института электроэнергетики и электромеханики.

Винницкий национальный технический университет.