УДК 621.316.13

Л. Б. Терешкевич, к. т. н., доц.; А. А. Хоменко

УЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПРИ СИММЕТРИРОВАНИИ НАГРУЗОК

Предложен подход к решению технической задачи симметрирования нагрузок с учетом изменения электрического режима, обоснованы критерии эффективности для принятия технических решений, создана математическая модель для расчета симметрирующего устройства с некорректируемыми параметрами и предложен метод оценки эффективности симметрирования режима, параметры которого изменяются во времени.

Ключевые слова: *симметрирование нагрузок, математическая модель симметрирования нагрузок, симметрирующее устройство с некорректируемыми параметрами.*

Введение

Среди показателей качества электроэнергии, которые во многих случаях не соответствуют требованиям ГОСТ 13109-97, есть показатели, нормирующие несимметрию режима [1, 2, 3].

При определенных условиях для симметрирования электрических режимов можно эффективно использовать симметрирующее устройство (СУ) с некорректируемыми параметрами, например, на основе статических реактивных элементов. Поскольку электрический режим изменяется, то параметры такого устройства необходимо определять с учетом этого случая.

Выполнить расчет СУ с некорректируемыми параметрами можно методами математического программирования при наличии математической модели и автоматизации расчетов.

Целью работы является математическая постановка задачи расчета параметров СУ с некорректируемыми параметрами, которая учитывает изменение параметров электрического режима несимметричных нагрузок.

Критерии эффективности для принятия технического решения

Изменение параметров несимметрии электрического режима, имеющее место в реальных условиях, является случайным процессом, который можно рассматривать как последовательность случайных величин. Особенностью режимов переменного тока является то, что их параметры описывают комплексами или векторами.

Рассмотрим вектор (комплекс) как систему случайных величин. На рис. 1, а на комплексной плоскости точками изображено некоторое множество концов векторов токов обратной последовательности $-\dot{I}_2$, полученное по результатам наблюдений. Точка *A* имеет координаты $\left[M(Re\,\dot{I}_2);\, M(Im\,\dot{I}_2)\right]$, а вектор, концом которого является точка *A,* будем считать математическим ожиданием вектора тока обратной последовательности: $M(\dot{I}_2) = M(\mathrm{Re}\,\dot{I}_2) + jM(\mathrm{Im}\,\dot{I}_2)$ [2], где

$$M(Re\,\dot{I}_2) = \frac{\sum_i Re\,\dot{I}_{2_i}}{n};$$

$$M(Im\,\dot{I}_2) = \frac{\sum_i Im\,\dot{I}_{2_i}}{n}.$$

Для случая рис. 1, а некорректируемое техническое решение, обеспечивающее полную

компенсацию вектора $M(\dot{I}_2)$, создавая вектор $\dot{I}_2^k$ ($\dot{I}_2^k = -M(\dot{I}_2)$), будет эффективно уменьшать токи обратной последовательности во всех наблюдаемых случаях.

В случае рис. 1, б эффективность симметрирования меньше, поскольку для некоторых точек (например, *i*; *i*+1) будет иметь место рост несимметрии.

На рис. 1, в приведена иллюстрация случая, когда неуправляемое техническое решение, которое улучшает состояние электрической сети, не существует $M(\dot{I}_2) = 0$.

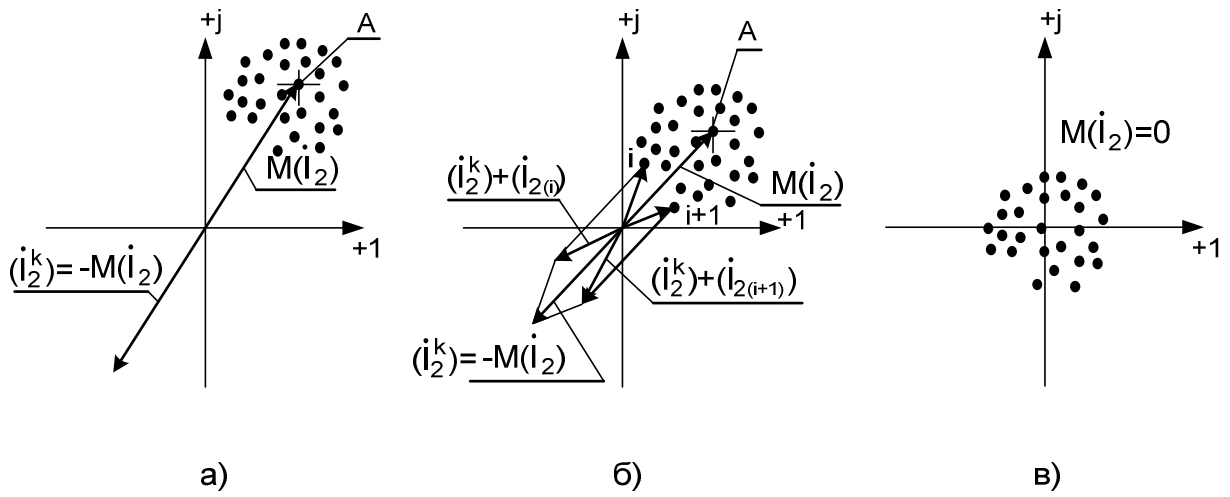

Рис. 1. Геометрическая интерпретация симметрирования динамического режима некорректируемым во времени симметрирующим воздействием:
а) случай высокой эффективности симметрирования;
б) случай, когда в целом режим улучшается, но для некоторых моментов времени имеет место усиление несимметрии;
в) случай, когда улучшить электрический режим за счет некорректируемого во времени симметрирующего воздействия нельзя

Значение $|M(\dot{I}_2)|$ характеризует потенциальный эффект процесса симметрирования за счет некорректируемого технического решения, и, компенсируя его, осуществляется влияние на несимметрию режима на всем интервале времени, для которого собран статистический материал.

Математические модели расчета СУ с некорректируемыми параметрами

Определить некорректируемые параметры СУ для симметрирования электрического режима в трехфазной сети с изолированной нейтралью с учетом его изменения можно, воспользовавшись одной из математических моделей:

$$\begin{cases} \left|M\left[\dot{I}_2^P(\boldsymbol{x})\right]\right| \to min; \\ Q^{CУ}(\boldsymbol{x}) \le Q_{доп}; \\ U^P(\boldsymbol{x}) \le U_{мах.доп}; \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} \left|M\left[\dot{I}_2^P(\boldsymbol{x})\right]\right| \to min; \\ Q^{CУ}(\boldsymbol{x}) \le Q_{доп}; \end{cases} \tag{2}$$

$$\left| M\left[\dot{I}_2^P(\boldsymbol{x})\right] \right| \to min, \tag{3}$$

где $\boldsymbol{x}$ – вектор переменных (вектор параметров некорректируемого СУ); $M\left[\dot{I}_2^P(\boldsymbol{x})\right] = M(\dot{I}_2) + M(\dot{I}_2^{СУ})$; $\dot{I}_2^{СУ}$ – ток обратной последовательности, генерируемый СУ; $Q^{СУ}$ – реактивная мощность СУ; $Q_{доп}$ – максимальная неизменная во времени составляющая мощности графика реактивных нагрузок; U^P – напряжение в узле подсоединения СУ после его присоединения; $U_{мах.доп}$ – значение напряжения, соответствующее максимально допустимому отклонению напряжения, установленному ГОСТ 13109-97.

Математическую модель (1) используют в случаях, когда параметры СУ необходимо определять при условиях, если в результате присоединения СУ возможна генерация реактивной мощности из сети потребителя в сети энергоснабжающей компании, а также возможно появление напряжения недопустимых значений.

Математическую модель (2) используют для случая, если параметры СУ следует находить в условиях возможной генерации реактивной мощности в сети питания.

Математическая модель (3) – модель локальной оптимизации для случаев, когда негативные последствия подсоединения СУ отсутствуют.

На рис. 2 приведены результаты симметрирования (зависимость 2) реального режима (зависимость 1) с помощью СУ в виде несимметричного треугольника батарей статических конденсаторов с некорректируемыми параметрами, которые рассчитаны по модели (3). По результату расчета реактивные мощности СП по фазам такие: $Q_{AB} = 116$ *квар*; $Q_{BC} = 5{,}8$ *квар*.

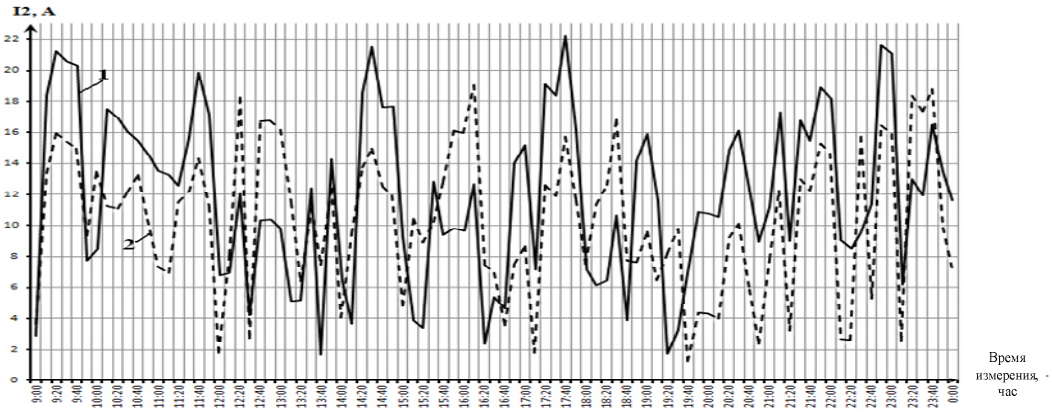

Рис. 2. Результаты симметрирования изменяющегося электрического режима с помощью СУ с некорректируемыми параметрами:
1 – исходный режим;
2 – оптимизированный режим

Приведенный на рис. 2 пример изменяющегося режима относится к случаю, когда для некоторых моментов времени имеет место усиление несимметрии. Именно для таких случаев возникает потребность делать количественную оценку эффективности СУ в целом (для всего интервала времени).

Оценка эффективности симметрирования изменяющегося режима

Поскольку СУ с некорректируемыми параметрами осуществляет целенаправленное влияние, цель которого – изменение одного из параметров состояния системы электроснабжения (что в сущности является управлением), то для оценки полученных

результатов можно воспользоваться показателем качества управления, который используют в теории оптимального управления для оценки эффективности полученных результатов на некотором интервале времени [3].

Для случая симметрирования электрического режима в качестве показателя качества управления может быть использован функционал:

$$J = \int_{t_1}^{t_2} \left[I_2^P(\boldsymbol{x}, t) \right]^2 dt , \qquad (4)$$

где t_1 – начальный момент времени; t_2 – конечный (нефиксированный) момент времени.

Физическое содержание функционала (4) – значение, пропорциональное дополнительным потерям энергии, вызванные несимметрией режима в трехпроводной сети.

Оценка полученных результатов симметрирования для рассмотренного примера по выражению (4) дает такие результаты:

– исходный режим $J_{исх} = 15594\ A^2 \cdot час$;

– оптимизированный режим $J_{опт} = 11695\ A^2 \cdot час$.

Следовательно, полученные результаты симметрирования в приведенном примере положительные.

Выводы

1. Расчет параметров некорректируемого СУ следует выполнять по критерию минимума математического ожидания модуля тока обратной последовательности, что позволит принять решение с учетом изменения параметров электрического режима.

2. При условиях, когда диапазон изменения параметров несимметричного режима небольшой, положительного результата симметрирования можно достичь, используя СУ с некорректируемыми параметрами.

3. Оценку конечного эффекта от использования СУ с некорректируемыми параметрами можно сделать, использовав показатель качества управления, физическое содержание его значения – величина, пропорциональная дополнительным потерям электрической энергии от несимметрии режима.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии / Ю. С. Железко. – М. : ЭААС, 2009. – 456 с. – ISBN 978-5-93196-958-9.

2. 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. – ISBN 5-12-002018-6.

3. Карташев И. И. Качество электрической энергии в муниципальных сетях Московской области / И. И. Карташев, И. С. Пономаренко, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов, В. В. Васильев // Промышленная энергетика. – 2002. – № 8. – С. 42 – 47.

4. Жежеленко И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, М. Л. Рабинович, В. М. Божко. – К. : Техніка, 1981. – 160 с.

5. Федоренко Р. П. Приближенное решение задач управления / Р. П. Федоренко. – М. : Наука, 1987. – 488 с.

Терешкевич Леонид Борисович – к. т. н., доцент, заведующий кафедрой электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента, e-mail: lbter@meta.ua;

Хоменко Александр Алексеевич – студент группы ЭМ-14м, e-mail: o.o.khomenko.vntu@gmail.com.

Винницкий национальный технический университет.