

Компенсация реактивной мощности

однофазных нагрузок низковольтных систем электроснабжения

Принято считать, что из-за относительно коротких фидеров и небольшой (единицы–десятки кВА) присоединенной мощности многочисленных потребителей проблемы компенсации реактивной мощности (PM) для городских низковольтных распределительных сетей не существует. Однако интенсивный рост потребления электроэнергии в жилищном секторе, вызвавший повышение среднестатистической мощности силовых трансформаторов инфраструктуры городских сетей при существенном (до 2–2,5 крат) сезонном колебании загрузки, ставит под сомнение это утверждение. Наличие значительной, постоянно меняющейся по величине однофазной нагрузки, нарушающей симметричный (идентичный для всех фаз) режим работы городских сетей, затрудняет применение в них установок компенсации реактивной мощности (УКРМ) без соответствующей конструктивной адаптации.

Сергей Шишкин, к. т. н.

shishkin53@mail.ru

Появление в неуравновешенных системах электроснабжения (СЭС) комплексно-сопряженного результирующего вектора пульсирующей мощности — N_{Σ} [1] приводит к дополнительным потерям электроэнергии, снижению срока службы и технических характеристик электрооборудования [1, 2]. Дисбаланс напряжений сети — k_U можно приблизительно оценить по соотношению [1]:

$$k_U = \frac{|N_{\Sigma}|}{S_{K3}}, \quad (1)$$

где S_{K3} — мощность симметричного КЗ в точке общего присоединения. Более корректный порядок измерения и статистического усреднения неуравновешенности напряжений СЭС через коэффициенты несимметрии по обратной — k_{2U} и нулевой — k_{0U} последовательности приведен в [3]. Относительно низкие значения S_{K3} (1) низковольтных СЭС и вероятность появления напряжения нулевой последовательности — $U_{0(1)}$ [3], обусловленного концентрации в них основного числа однофазных электроприемников, создает предпосылки к разбалансу фазных напряжений четырехпроводных сетей (системы TN-C, TN-S, TN-C-S) при сохранении симметрии междуфазных напряжений. Как известно [1, 2], обеспечение максимальной эффективности работы симметрирующих устройств, возможной при коэффициенте мощности нагрузки ($\cos \varphi$), равно единице, предусматривает параллельное подключение к ним конденсаторных батарей (КБ) компенсации PM. Одновременно эти КБ могут использоваться и как

средство симметрирования [4], но в обоих случаях генерация PM отдельными ветвями КБ должна быть дифференцированной.

Согласно приведенным в ряде источников данным, значение средневзвешенного $\cos \varphi$ в некомпенсированных городских сетях 0,4 кВ находится в пределах 0,84–0,95. Обработка графиков, снятых на ТП городской сети (мощность трансформатора 400 кВА, схема соединения обмоток — Y/Y_{Δ} , коэффициент загрузки — 32% в часы максимума и 11% в часы минимума проведения измерений, электроприемники преимущественно однофазные), показала: при изменении в течение суток средневзвешенного $\cos \varphi$ от 0,65 до 0,97 его пофазные значения (L1, L2, L3 — рис. 1) менялись в более широком диапазоне. Соответственно, суточное потребление активной и реактивной электроэнергии составило 1666,46 кВт·ч и 740,17 квар·ч при существенном (в 2,25 и 2,8 раза) разбросе по фазам. Учитывая высокую плотность (кВА/км²) городской коммунально-бытовой нагрузки, постоянное наличие в перетоках мощности СЭС реактивной составляющей приводит к значительным потерям электроэнергии и необходимости их возмещения за счет дополнительных источников генерации, но неравномерность потребления активной и реактивной мощности по отдельным фазам затрудняет применение в городских распределительных сетях традиционных для промышленных сетей УКРМ на базе однофазных регуляторов (контроллеров) PM и соединенных «треугольником» трехфазных КБ.

Следует отметить, что при появлении несимметрии из-за разницы приложенного к зажимам напря-

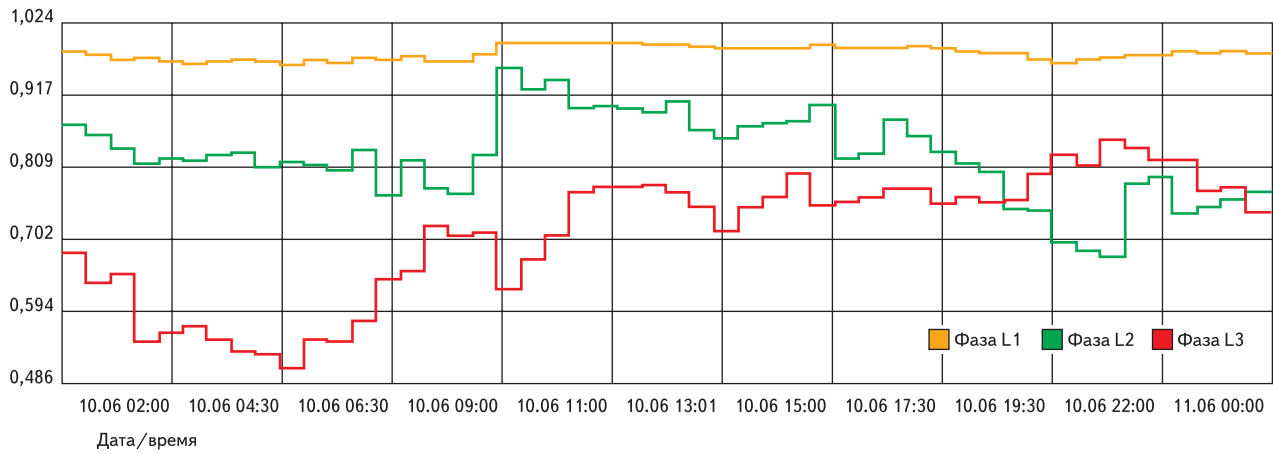


Рис. 1. График суточного пофазного изменения коэффициента мощности $\cos \varphi$ на низковольтных шинах городской ТП 6/0,4 кВ

жения номинальная РМ — $Q_{ном}$, отдельных, симметричных по емкости ветвей КБ меняется на величину [2]

$$\Delta Q = Q_{ном} \cdot \frac{U_{ном}^2 - U_{I(1)}^2 (1 + k_U)}{U_{ном}^2}, \quad (2)$$

где $U_{I(1)}$ — действующее значение напряжения прямой последовательности основной частоты [4]; $U_{ном}$ — номинальное напряжение КБ. Отклонение $U_{ном}$ линейных напряжений отдельных фаз сети происходит как в сторону увеличения, так и уменьшения [1, 2, 4], поэто-

му генерация РМ ветвями КБ будет неравномерной.

Программируемый алгоритм переключения КБ однофазным регулятором РМ достигается путем их последовательного набора по командам, соответствующим входному параметру управления — $\cos \varphi$ только одной (L1, L2, L3 — рис. 1) фазы компенсируемой сети [4]. В рассматриваемом случае (рис. 1–3) подобная схема контроля $\cos \varphi$ приведет к некорректной работе УКРМ, так как равномерное или случайное (2) распределение РМ ветвей КБ способно вызвать избыточность или недостаточность величины тока компенсации в неконтролируе-

мых фазах, снизить пропускную способность сети и увеличить уже присутствующий дисбаланс трехфазной системы напряжений [5]. На рис. 2 представлены измеренные значения k_{2U} и k_{0U} при одинаковом изменении нагрузки СЭС. Отметим, что, в отличие от трехпроводной (система IT), четырехпроводная сеть располагает большими вариантами выбора схем питания нагрузки, но наличие между нейтральными точками Y-соединений контура протекания токов нулевой последовательности делает возможным ее равновесие — $N_N = 0$ только при равенстве фазных активно-реактивных проводимостей [1]. Неуравновешенность рас-

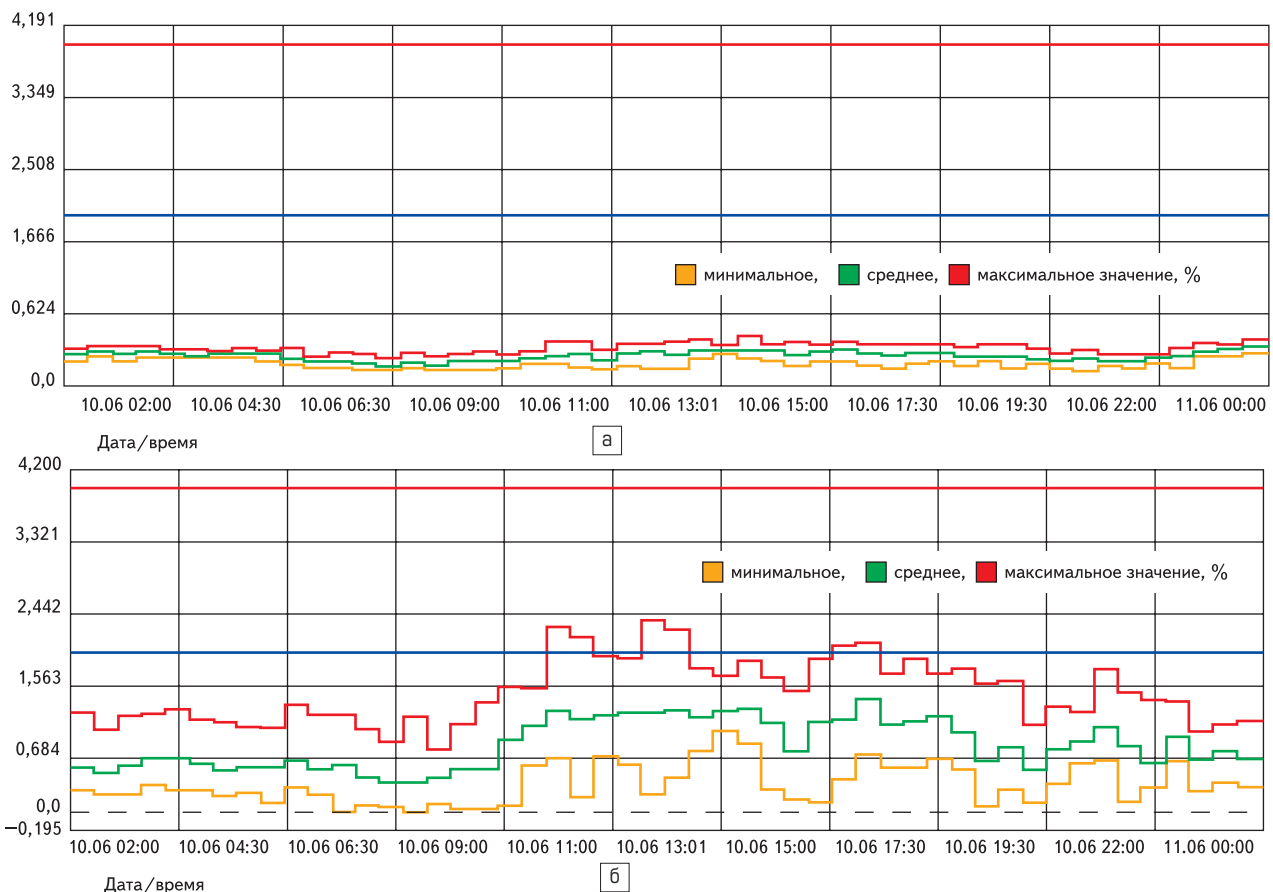


Рис. 2. Измеренные значения коэффициента несимметрии по обратной — k_{2U} (а) и нулевой — k_{0U} (б) последовательности. Синяя горизонтальная черта соответствует допустимому, а красная — предельно допустимому значению коэффициентов [3]

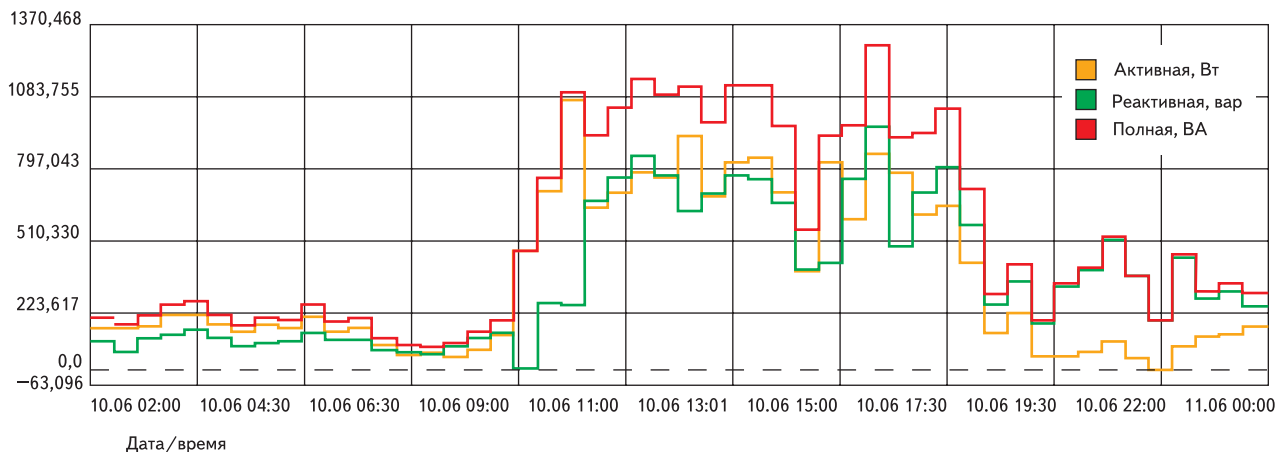


Рис. 3. Измеренные значения мощности нулевой последовательности

смаатриваемой низковольтной СЭС в основном определяет несбалансированность однофазных нагрузок (см. соотношение значений k_{2U} и k_{0U} — рис. 2).

Принципиальные отличия технических характеристик трехстержневых трансформаторов 6–10/0,4 кВ с разными схемами соединения обмоток ($Y/Y_H, \Delta/Y_H, Y/Z_H$) во многом определяет их реакция на несимметричный режим нагрузки. Экспериментальные данные показывают, что для наиболее распространенных в электрических сетях 10(6)–0,4 кВ Российской Федерации трансформаторов Y/Y_H значение сопротивления нулевой последовательности — $z_0 = r_2 + jx_{22}$, где r_2 — активное сопротивление вторичной обмотки, а x_{22} — реактивное сопротивление, характеризующее однофазный магнитный поток рассеяния, сцепляющийся с формирующей его вторичной обмоткой по воздуху, гораздо больше их сопротивления прямой последовательности — z_1 [6]. В обмотках трансформатора Y/Y_H индуцируются совпадающие по фазе ЭДС, которые с учетом увеличения z_0 за счет сопротивления линии [6], вызовут рост дисбаланса фазных напряжений сети, особенно интенсивный при большой загрузке трансформатора и низком $\cos \phi$ нагрузки. Кроме того, магнитные потоки, вызванные протеканием неуравновешенного тока нулевой последовательности — $I_{0(1)}$, замы-

каясь через поверхность бака, дно и крышку трансформатора, нагревают его корпус, ухудшая охлаждение активной части [3]. Как установлено при исследовании промышленных сетей [6], максимально допустимая неуравновешенная однофазная нагрузка составляет лишь 2...5% от номинальной мощности питающего трансформатора с группой соединения обмоток Y/Y_H-12 , что приблизительно в 10 раз меньше, чем в случае включения эквивалентной по мощности нагрузки на его междуфазное напряжение (несимметрией по обратной последовательности). Снизить несимметрию СЭС до допустимого значения k_{0U} [3] можно за счет полной или частичной компенсации составляющей РМ обратной последовательности (рис. 3) путем комбинаций переключения емкостных элементов на различные линейные напряжения четырехпроводной сети [5].

Практическая реализация подобных схем возможна с помощью специальных автоматических регуляторов РМ (например, BLR-СМ 3phase [7]) или структурного объединения в единую технологическую цепь трех серийных однофазных контроллеров. Для СЭС с разбалансированной (несимметричной) нагрузкой компания EPCOS AG предлагает версию трехканального управления автоматическими микропроцессорными контроллерами BR6000 однофазными ступенями УКРМ

(рис. 4), функция регулирования которых равнозначна системе уравнений [4]:

$$\begin{cases} Q_{L1} = K \times I_{L1} \times U_{L1} \times \sin \phi_{L1} \\ Q_{L2} = K \times I_{L2} \times U_{L2} \times \sin \phi_{L2} \\ Q_{L3} = K \times I_{L3} \times U_{L3} \times \sin \phi_{L3} \end{cases} \quad (3)$$

где: Q_{L1}, Q_{L2}, Q_{L3} — РМ соответствующей фазы; K — коэффициент трансформации трансформаторов тока; $\phi_{L1}, \phi_{L2}, \phi_{L3}$ — сдвиг фаз между линейными (I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}) токами и одноименными фазными (U_{L1}, U_{L2}, U_{L3}) напряжениями компенсируемой сети.

Независимо друг от друга однофазные измерительные системы контроллеров тестируют мгновенные значения фазных напряжений и линейных токов (рис. 4), вычисляют их сдвиг во всех четырех квадрантах комплексной плоскости, формируя на выходе сигналы, пропорциональные по величине и направлению РМ каждой фазы (3). Далее результаты измерения сравниваются с предварительно заданной (одинаковой для 3 контроллеров) уставкой $\cos \phi$, соразмерной углу ϕ . Если отклонение превысит границы зоны чувствительности, контроллер выдаст команду на поочередную автономную коммутацию шести параллельно включенных секций однофазных конденсаторов одной из 3-емкостных ветвей КБ. Поскольку

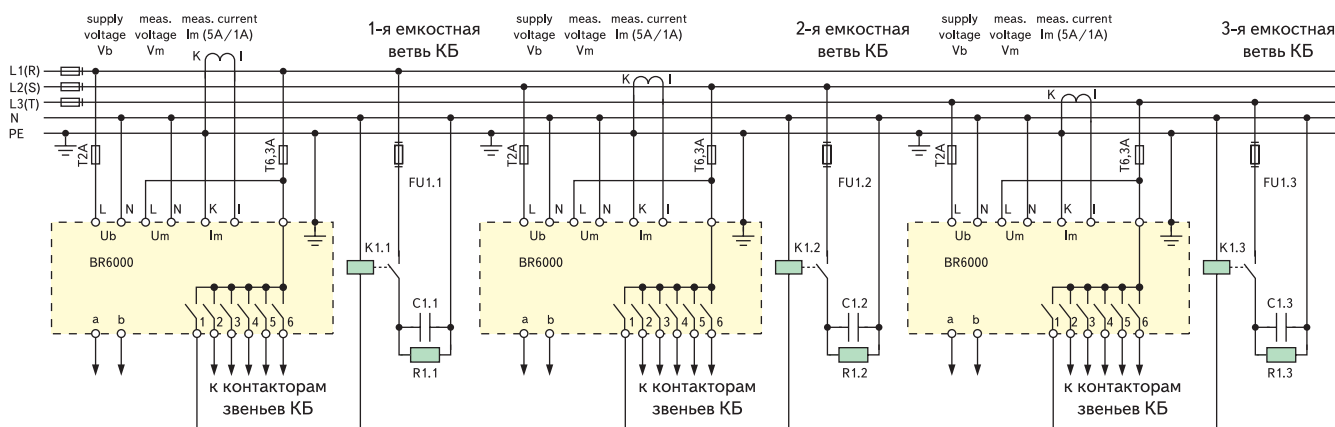


Рис. 4. Схема компенсации РМ несимметричной низковольтной нагрузки: $C1.1-C1.3$ — секции однофазных косинусных конденсаторов; $K1.1-K1.3$ — контакторы емкостных ветвей, соединенных «звездой» КБ; U_m — напряжение управления контроллера, соответствующее фазе включения измерительного трансформатора тока (I_m); U_b — напряжение питания контроллера; $a-b$ — выход аварийного контакта контроллера

ку в существующем программном обеспечении контроллера BR6000 входные параметры вычисляются и отображаются как трехфазные величины, РМ шага компенсации установочного меню должна в три раза превышать фактическое значение (например при однофазном шаге 10 квар следует ввести 30 квар). Модуль пульсирующей мощности, генерируемой в сеть несимметричной КБ, направленный встречно $\underline{N}_S(1)$, приблизительно будет равен удвоенной разности между РМ наибольшей и наименьшей ветви [4].

Дискретное подключение ветвей КБ (рис. 4) позволит снизить напряжение нулевой последовательности эквивалента однофазной нагрузки — $U_{0(1)} = I_{0(1)} \times z_0/3$, численно равное модулю вектора сдвига нулевой точки трехфазной системы напряжений [4], и откорректировать $\cos \varphi$ [5], обеспечив эксплуатацион-

ную пропускную способность сети. Таким образом, обеспечивается условие ввода дополнительной емкостной проводимости [1], компенсирующей дисбаланс линейных напряжений СЭС путем дифференцированного регулирования РМ-секций, соединенных «звездой» ветвей симметричных трехфазных КБ. ■

Литература

1. Шидловский А. К., Борисов Б. П. Симметрирование однофазных и двухплечевых электротехнологических установок. Киев: Наукова думка, 1977.
2. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергия, 1974.
3. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабже-
4. Шидловский А. К., Борисов Б. П. Симметрирование и компенсация реактивной мощности несимметричных низковольтных нагрузок с помощью конденсаторных батарей // Электротехника, 2006. № 8.
5. Патент РФ на изобретение 2229766 H02J3/18 / Устройство для симметрирования и компенсации реактивной мощности / Шишкин С. А. (RU) — № 2002126525. Заявл. 07.10.02, опубл. 27.05.04. Бюлл. № 15.
6. Гамазин С. И., Зеленская М. А. Расчетно-экспериментальные исследования области допустимых несимметричных режимов в системе электроснабжения до 1000 В // Электротехника, 2003. № 3.
7. Power factor control relay BLR-CM 3phase. [ht tp://w ww.beluk.de](http://www.beluk.de)