

Т. Т. Оморов, чл.-корр., д-р техн. наук, зав. лабораторией, omorovtt@mail.ru,
Национальная академия наук Кыргызской Республики, г. Бишкек

Симметрирование распределенной электрической сети методом цифрового регулирования

Рассматривается проблема симметрирования распределенной трехфазной распределительной электрической сети. Фактор несимметрии фазных токов приводит к значительным потерям активной мощности в сети. Предлагается подход к синтезу цифрового регулятора, обеспечивающего снижение уровня несимметрии сети за счет минимизации тока нейтрального провода. Техническую и программную реализацию синтезированного регулятора можно осуществить на основе микропроцессорного контроллера в составе автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии.

Ключевые слова: трехфазная сеть, несимметричный режим, переключаемый элемент, синтез цифрового регулятора

Введение

Наиболее целесообразным режимом работы распределенной трехфазной распределительной электрической сети (РЭС) является симметричный режим, при котором ток в нейтральном проводе отсутствует [1, 2]. Однако в большинстве случаев из-за разбалансировки нагрузок и неравномерного их распределения по фазам РЭС функционируют, в основном, в несимметричных режимах [2, 3]. Это приводит к повышенным потерям активной мощности в сети и трансформаторных подстанциях (ТП), ухудшению качества электроэнергии, а также к выходу из строя бытовой техники и промышленных установок [4, 5]. В целях решения проблемы симметрирования трехфазных сетей предложен ряд технологий [6–8], которые не нашли широкого практического применения из-за их сложности и недостаточной эффективности. В работе [9] предложен один из возможных подходов к ее решению на основе создания цифровой системы автоматического управления процессом симметрирования сети в составе концентратора данных автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ) [10–13]. Как известно, в традиционных АИИС КУЭ концентраторы данных, в основном, реализуют функцию сбора данных с группы счетчиков электроэнергии, установленных у абонентов сети, а также выполняют вычислительные операции, связанные с коммерческим учетом электроэнергии. Рассматриваемый подход предусматривает, что на концентраторы данных возлагается дополнительная функция цифрового управления, обеспечивающего требуемое перераспределение потоков электроэнергии между фазами сети путем переключения однофазных нагрузок с более нагруженной фазы на менее нагруженную. При этом необходимо,

чтобы счетчики электроэнергии в своем составе имели переключаемые элементы (ПЭ). Создание таких ПЭ является реальной задачей, так как современные однофазные и трехфазные счетчики [10] имеют электромагнитные реле с мощными контактами до 100А, которые можно использовать для переключения электроприемников с одной фазы на другую.

Целью данной работы является развитие указанного подхода к решению проблемы симметрирования распределенных электрических сетей.

Постановка задачи

Рассмотрим трехфазную четырехпроводную распределенную сеть, к которой подключены питающая трансформаторная подстанция (ТП) и группа из n счетчиков электроэнергии $\{Сч_{vk}\}$, установленных у однофазных потребителей. Один из вариантов ее условной схемы показан на рис. 1, где k, v — индексные переменные, обозначающие соответственно номера фаз А, В, С ($k = \overline{1,3}$) и электроприемников (нагрузок) сети ($v = \overline{1,n}$); \tilde{I}_k — синусоидальный мгновенный ток

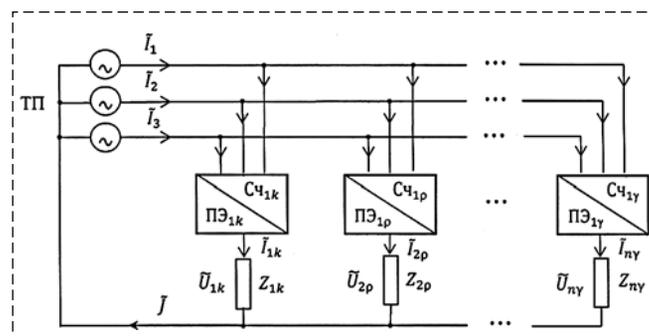


Рис. 1. Условная схема трехфазной распределительной сети

на входе k -й фазы; Z_{vk} — обозначение нагрузки с координатой (v, k) ; \tilde{I}_{vk} , \tilde{U}_{vk} — мгновенные сила тока и напряжение на нагрузке Z_{vk} ; \tilde{J} — мгновенная сила тока в нейтральном проводе; ПЭ $_{vk}$ — переключательный элемент счетчика Сч $_{vk}$.

Далее принимаются следующие предположения:

1) трехфазная сеть функционирует в условиях несимметрии фазных токов;

2) счетчики электроэнергии (Сч $_{vk}$) имеют переключательные элементы (ПЭ $_{vk}$);

3) концентратор данных периодически опрашивает счетчики электроэнергии (Сч $_{vk}$) в дискретные моменты времени $t = t_{\xi}$ ($\xi = 1, 2, \dots$) и записывает в свою базу следующие данные:

- действующие значения силы токов I_{vk} и напряжений U_{vk} на нагрузках Z_{vk} ;
- коэффициенты мощности $\cos\varphi_{vk}$.

Как известно [1], условием симметричности трехфазной четырехпроводной распределительной сети является отсутствие тока \tilde{J} в нейтральном (нулевом) проводе. В несимметричном режиме действующее значение указанного тока может достигать значительной величины из-за разбаланса фазных токов \tilde{I}_k ($k = \overline{1,3}$). При этом чем меньше значение действующего тока J , тем выше уровень симметричности сети и ниже активные потери мощности в ней. Следовательно, качество и эффективность функционирования РЭС можно оценить с помощью следующей целевой (критериальной) функции:

$$E = J^2. \quad (1)$$

Таким образом, минимизируя значение показателя качества E можно добиться оптимизации режима работы распределительной сети. Для этой цели можно использовать цифровой регулятор в составе концентратора данных. Его основная функция состоит в определении координаты такой нагрузки (электроприемника), переключение которой с одной фазы на другую обеспечивает минимизацию критериальной функции E . В результате такой процедуры формируется управляющее воздействие u на технологический объект, включающий группу электроприемников $\{Z_{vk}\}$, к которым подключены счетчики электроэнергии $\{Сч_{vk}\}$ с переключательными элементами $\{ПЭ_{vk}\}$. При этом сигнал управления u представляет собой командный цифровой код, который содержит информацию о координате электроприемника (счетчика) и паре фаз трехфазной сети, в которых необходимо осуществлять операцию переключения.

Задача заключается в синтезе цифрового регулятора, т. е. в определении его алгоритма функционирования, обеспечивающего формирование управляющего сигнала u на объект на основе минимизации критериальной функции E .

Решение задачи управления

Решение сформулированной задачи управления включает следующие основные этапы:

1. Построение модели нагрузок.

2. Идентификация пары фаз сети для переключения.

3. Прогнозирование и минимизация целевой функции E .

4. Формирование управляющего сигнала на объект для переключения нагрузки.

Построение модели нагрузок. Как известно, счетчики электроэнергии (Сч $_{vk}$) измеряют лишь действующие (среднеквадратические) значения силы токов и напряжений на нагрузках потребителей, непосредственное использование которых невозможно для оценки тока \tilde{J} в нейтральном проводе и прогнозирования значений целевой функции E . Для того чтобы корректно использовать законы Кирхгофа, необходимо, чтобы синусоидальные токи и напряжения на входах фаз и электроприемниках были представлены в комплексной форме [1, 13, 14]:

$$\begin{aligned} \dot{I}_k(\xi) &= I_k^B(\xi) + jI_k^M(\xi) = I_k e^{j\theta_k}, \quad k = \overline{1,3}; \\ \dot{I}_{vk} &= I_{vk}^B + jI_{vk}^M = I_{vk} e^{j\alpha_k}; \\ \dot{U}_{vk} &= U_{vk}^B + jU_{vk}^M = U_{vk} e^{j\psi_k}, \quad v = \overline{1,n}, \quad k = \overline{1,3}, \end{aligned} \quad (2)$$

где символы "в" и "м" обозначают вещественные и мнимые части соответствующих комплексных переменных; I_k , I_{vk} , U_{vk} , θ_k , α_k , ψ_k — модули и фазовые сдвиги этих переменных соответственно; $j = \sqrt{-1}$ — мнимое число.

Для построения модели нагрузок в форме (2) необходимо определить неизвестные фазовые сдвиги θ_k , α_k и ψ_k , так как действующие значения токов I_k , I_{vk} и напряжений U_{vk} измеряются счетчиками электроэнергии, т. е. являются известными величинами, которые хранятся в базе данных концентратора данных. Методика идентификации искомым фазовым сдвигам предложена в работе [14].

Идентификация пары фаз сети для переключения. Для этой цели введем в рассмотрение следующие разности:

$$e_k = I_k - I_0, \quad k = \overline{1,3}, \quad (3)$$

где I_k — действующее значение силы тока \tilde{I}_k ; I_0 — среднее значение силы токов на входах фаз, определяемое формулой

$$I_0 = (I_1 + I_2 + I_3)/3.$$

Отметим, что величины e_k , определяемые выражением (3), представляют собой ошибки регулирования, которые в процессе управления должны стремиться к нулю. Далее находим мак-

симальное e_{\max} и минимальное e_{\min} значения среди указанных отклонений: $e_{\max} = \max\{e_1, e_2, e_3\}$, $e_{\min} = \min\{e_1, e_2, e_3\}$. Простой анализ показывает, что эти величины однозначно определяют искомую пару фаз сети, на которых имеется необходимость выполнения требуемых переключений некоторого, пока не известного электроприемника. Очевидно, что необходимо отключать определенную нагрузку с фазы, где достигается e_{\max} , на фазу с наименьшим значением ошибки e_{\min} .

Для того чтобы ограничить (минимизировать) число переключений электроприемников, целесообразно ввести некоторое условие, которое определяет требуемый режим работы РЭС. В частности, можно считать, что требуемый уровень симметричности (квазиоптимальности) трехфазной сети достигается, если выполняется следующее условие:

$$E(\xi) \leq \delta, \quad (4)$$

где δ — положительное число, определяющее максимально допустимый уровень целевой функции $E(\xi)$ в момент времени $t = t_\xi$.

Прогнозирование и анализ целевой функции. Предположим, что в момент времени $t = t_\xi$ условие (4) не выполняется. В целях наглядности дальнейших выкладок обозначим n_a число электроприемников (Z_{vk}), подключенных к фазе А, а комплексные токи электроприемников, подключенных к фазе А, упорядочиваем, так чтобы была сквозная их нумерация с индексом m , где $m = 1, 2, \dots, n_a$. При этом обозначения этих токов оставляем прежними (\dot{I}_{m1}). Теперь в целях конкретизации решения сформулированной выше задачи далее без потери общности предположим, что

$$e_{\max} = e_1, e_{\min} = e_2,$$

т. е. для снижения уровня несимметричности сети необходимо осуществить переключение некоторой, пока не известной, нагрузки Z_{m1} с фазы А ($k = 1$) на фазу В ($k = 2$). Теперь для формирования критериальной функции $E(\xi)$ в момент времени $t = t_\xi$ на основе представления (2) запишем выражение для комплексного тока $\dot{J}(\xi)$ в нулевом проводе [1]:

$$\dot{J}(\xi) = \dot{I}_1(\xi) + \dot{I}_2(\xi) + \dot{I}_3(\xi) = J^B(\xi) + jJ^M(\xi),$$

$$v = \overline{1, n},$$

где вещественные и мнимые части равны

$$J^B(\xi) = \sum_{k=1}^3 I_k^B(\xi), \quad J^M(\xi) = \sum_{k=1}^3 I_k^M(\xi). \quad (5)$$

При этом критериальная функция $E(\xi)$, определяемая формулой (1), запишется в виде

$$E(\xi) = [J^B(\xi)]^2 + [J^M(\xi)]^2, \quad (6)$$

где оценки функций $J^B(\xi)$ и $J^M(\xi)$ определяются по формулам (5).

Теперь предположим, что в качестве претендента на переключение рассматривается нагрузка Z_{m1} , подключенная к первой фазе (фазе А). Задача состоит в определении прогнозной оценки целевой функции $E(\xi + 1)$ в предположении, что нагрузка Z_{m1} в следующий момент времени $t = t_{\xi+1}$ будет переключаться на вторую фазу (фазу В). Соответствующий комплексный ток \dot{I}_{m1} до переключения имеет вид

$$\dot{I}_{m1}(\xi) = I_{m1}^B(\xi) + jI_{m1}^M(\xi). \quad (7)$$

Обозначим \dot{I}_{m2} комплексный ток нагрузки Z_{m1} в предположении, что эта нагрузка будет подключена на фазу В. Тогда прогнозные значения этого тока в момент времени $t = t_{\xi+1}$ можно представить в виде

$$\dot{I}_{m2}(\xi + 1) = I_{m2}^B(\xi + 1) + jI_{m2}^M(\xi + 1). \quad (8)$$

Вещественные и мнимые части, входящие в выражения (7) и (8), определяются на основе методики, изложенной в работе [12]. В целях повышения точности расчетов при их вычислении можно использовать комплексные представления напряжений (\dot{U}_{vk}) на соответствующих нагрузках с учетом новой координаты электроприемника Z_{m1} в контуре фазы В. В результате выполнения операции переключения в последующий момент времени $t = t_{\xi+1}$ токи на входах соответствующих фаз изменяются. При этом на основе первого закона Кирхгофа выражения для этих токов с учетом (7) и (8) имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{I}_1(\xi + 1) &= \dot{I}_1(\xi) - \dot{I}_{m1}(\xi) = I_1^B(\xi + 1) + jI_1^M(\xi + 1); \\ \dot{I}_2(\xi + 1) &= \dot{I}_2(\xi) + \dot{I}_{m2}(\xi + 1) = I_2^B(\xi + 1) + jI_2^M(\xi + 1); \\ \dot{I}_3(\xi + 1) &= \dot{I}_3(\xi) = I_3^B(\xi) + jI_3^M(\xi), \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} I_1^B(\xi + 1) &= I_1^B(\xi) - I_{m1}^B(\xi); \\ I_2^B(\xi + 1) &= I_2^B(\xi) + I_{m2}^B(\xi + 1); \\ I_1^M(\xi + 1) &= I_1^M(\xi) - I_{m1}^M(\xi); \\ I_2^M(\xi + 1) &= I_2^M(\xi) + I_{m2}^M(\xi + 1). \end{aligned} \quad (10)$$

При этом с учетом соотношений (9) прогнозные значения комплексного тока $\dot{J}(\xi + 1)$ в нейтральном проводе определяется выражением

$$\begin{aligned} \dot{J}(\xi + 1) &= \dot{I}_1(\xi + 1) + \dot{I}_2(\xi + 1) + \dot{I}_3(\xi + 1) = \\ &= J^B(\xi + 1) + jJ^M(\xi + 1), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} J^B(\xi + 1) &= I_1^B(\xi + 1) + I_2^B(\xi + 1) + I_3^B(\xi); \\ J^M(\xi + 1) &= I_1^M(\xi + 1) + I_2^M(\xi + 1) + I_3^M(\xi). \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, в результате переключения нагрузки Z_{m1} с фазы А на фазу В прогнозное значение целевой функции принимает вид

$$E(\xi + 1) = [J^B(\xi + 1)]^2 + [J^M(\xi + 1)]^2, \quad (12)$$

где вещественные $J^B(\xi + 1)$ и мнимые $J^M(\xi + 1)$ части функции определяются по формулам, аналогичным выражениям (5).

Введем в рассмотрение вектор параметров

$$\mathbf{q}_m = [q_{m1}, q_{m2}, q_{m3}, q_{m4}] = [I_{m1}^B, I_{m1}^M, I_{m2}^B, I_{m2}^M],$$

составленный из вещественных и мнимых частей комплексных токов $\dot{I}_{m1}(\xi)$ и $\dot{I}_{m2}(\xi + 1)$, где $m = \overline{1, n_a}$. При этом прогнозное значение показателя качества $E(\xi + 1)$ является функцией от вектора параметров \mathbf{q}_m , т. е. $E(\xi + 1) = E(\mathbf{q}_m)$. В результате проблема симметрирования трехфазной сети сводится к задаче минимизации целевой функции $E(\mathbf{q}_m)$:

$$\min_{\mathbf{q}_m \in R^4} E(\mathbf{q}_m) = E(\mathbf{q}_{m^*}) = E(\mathbf{q}^*), \quad (13)$$

где R^4 — четырехмерное арифметическое пространство; $\mathbf{q}^* = \mathbf{q}_{m^*}$ — искомый вектор параметров, индекс m^* которого определяет координату электроприемника для соответствующего переключения.

Экстремальная задача (13) имеет дискретный характер, а ее решение при достаточно большом числе электроприемников (n_a) представляет определенные трудности и связано с большим объемом вычислительных операций. В связи с этим рассмотрим вопрос об упрощении ее решения. Для этой цели с учетом выражений (10) и (11) критериальную функцию $E(\xi + 1)$, определяемую формулой (12), можно записать в виде

$$\begin{aligned} E(\xi + 1) &= [J^B(\xi) + I_{m2}^B(\xi + 1) - I_{m1}^B(\xi)]^2 + \\ &+ [J^M(\xi) + I_{m2}^M(\xi + 1) - I_{m1}^M(\xi)]^2, \end{aligned}$$

где вещественные $I_{m1}^B(\xi), I_{m2}^B(\xi + 1)$ и мнимые $I_{m1}^M(\xi), I_{m2}^M(\xi + 1)$ части определяются по формулам (10). После несложных преобразований получаем, что

$$\begin{aligned} E(\xi + 1) &= E(\xi) + [I_{m2}^B(\xi + 1) - I_{m1}^B(\xi)]^2 + \\ &+ [I_{m2}^M(\xi + 1) - I_{m1}^M(\xi)]^2 + \Delta E(\xi + 1), \end{aligned} \quad (14)$$

где $E(\xi)$ — начальное значение целевой функции, определяемое формулой (6);

$$\begin{aligned} \Delta E(\xi + 1) &= 2J^B(\xi)[I_{m2}^B(\xi + 1) - I_{m1}^B(\xi)] + \\ &+ 2J^M(\xi)[I_{m2}^M(\xi + 1) - I_{m1}^M(\xi)]. \end{aligned}$$

Очевидно, что для несимметричной трехфазной сети значение целевой функции $E(\xi) > 0$. Тогда из соотношения (14) видно, что первые три составляющие выражения для $E(\xi + 1)$ являются положительными величинами. В результате можно сформулировать следующее утверждение.

Утверждение. Для того чтобы обеспечить уменьшение прогнозного значения целевой функции $E(\xi + 1)$, достаточно выполнения условия

$$\Delta E(\xi + 1) < 0. \quad (15)$$

Отсюда следует, что чем больше величина $|\Delta E|$, тем меньше значение показателя качества E . Полученный результат позволяет вместо целевой функции $E(\mathbf{q}_m)$ использовать функцию $\Delta E(\xi + 1) = \Delta E(\mathbf{q}_m)$ при оптимизации режима работы РЭС. Теперь в целях целенаправленного поиска координаты искомого электроприемника введем допустимое подмножество Q для вектора параметров \mathbf{q}_m , определяемое следующим соотношением:

$$Q = \{\mathbf{q}_m \in R^4 : I_{ml} < e_{\max}, m = \overline{1, n_a}, l = 1, 2\},$$

где $e_{\max} = e_1$; I_{ml} — модуль комплексного тока \dot{I}_{ml} .

При этом функция $\Delta E(\xi + 1) = \Delta E(\mathbf{q}_m)$ будет определена на подмножестве Q , и круг возможных вариантов значительно сужается. В результате вместо решения экстремальной задачи (13) можно решить следующую задачу:

$$\min_{\mathbf{q}_m \in Q} \Delta E(\mathbf{q}_m) = \Delta E(\mathbf{q}_{m^*}), \quad (16)$$

где \mathbf{q}_{m^*} — решение задачи оптимизации; m^* — индекс (номер) электроприемника для соответствующего переключения.

Анализ показывает, что введение допустимого подмножества Q и минимизация функции $\Delta E(\mathbf{q}_m)$ на этом подмножестве позволяет значительно уменьшить число вычислительных операций, необходимых для формирования управляющих воздействий на объект. В отдельных случаях процесс симметрирования сети можно свести лишь к анализу соотношения (15).

Полученные результаты позволяют определить обобщенную структуру системы управления процессом симметрирования фазных токов, которая показана на рис. 2. Распределительная сеть рассматривается как многомерный объект, а ее текущее состояние определяется набором векторов \mathbf{I} , \mathbf{I}_z и \mathbf{U}_z , компоненты которых состо-

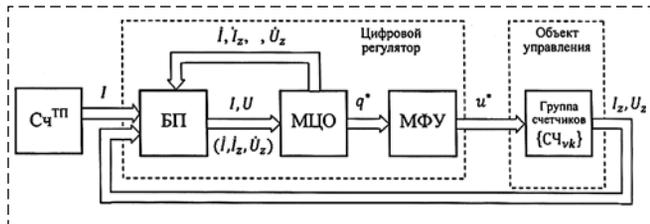


Рис. 2. Структура цифровой системы управления

ят из соответствующих модулей (действующих значений) комплексных переменных (токов, направлений) на входах фаз и нагрузках сети, определяемых формулой (3), с большой частотой измеряются счетчиками электроэнергии ($\{СЧ_{vk}\}$, $СЧ^{ТП}$), установленными у абонентов сети и в трансформаторной подстанции, и подаются на вход цифрового регулятора. Последний включает блок памяти (БП), программные модули цифровой обработки и оптимизации (МЦО) и формирования управляющих сигналов (МФУ). В БП хранятся данные, полученные со счетчиков электроэнергии, а также составляющие комплексных переменных, описывающих состояния электроприемников и выходов ТП. МЦО обеспечивает выполнение следующих основных функций: построение моделей нагрузок; определение пары фаз для переключения нагрузок; формирование целевой функции $E(\mathbf{q}_m)$; анализ соотношения (15); решение экстремальной задачи (16).

На основе полученных результатов МФУ формирует управляющий сигнал u^* , который передается по каналам связи на соответствующий счетчик электроэнергии ($СЧ_{m^*k}$) выбранного электроприемника и через его переключающий элемент ($ПЭ_{m^*k}$) реализует соответствующую операцию переключения. При этом, по существу, будет обеспечиваться квазиоптимальность режима работы РЭС. Построенную таким образом систему управления можно рассматривать как систему с переменной структурой, так как при этом будет обеспечиваться адаптация распределенной трехфазной сети к условиям, которые возникают при неконтролируемых случайных изменениях ее нагрузок путем автоматической самонастройки структуры РЭС в режиме реального времени. Техническая и программная реализация синтезированного цифрового регулятора осуществляется на основе микропроцессорного контроллера в составе концентратора данных.

Заключение

Предложен подход к решению задачи симметрирования распределенной трехфазной распределительной сети, что эквивалентно оптимизации режима ее работы. Разработана процедура синтеза цифрового регулятора, обеспечивающе-

го снижение уровня несимметрии фазных токов на основе управления потоками электроэнергии между фазами сети в режиме реального времени, что осуществляется путем переключения однофазных электроприемников с более нагруженной фазы на менее нагруженную. Качество процессов регулирования оценивается целевой функцией, характеризующей потери активной мощности в распределенной сети из-за фактора несимметричности. Получено условие, выполнение которого гарантированным образом обеспечивает уменьшение значения выбранного показателя эффективности системы. Процедура синтеза регулятора основана на идентификации модели нагрузок и минимизации критериальной функции. Использование результатов синтеза регулятора дает возможность вместо традиционных АИИС КУЭ, относящихся к классу информационно-измерительных систем, построить информационно-управляющие системы, ориентированные на повышение эффективности распределительных сетей, а также технико-экономических показателей распределительных компаний.

Список литературы

1. Демирчян К. С., Нейман Л. Р., Коровкин А. В. Теоретические основы электротехники. Т. 1. СПб.: Питер, 2009. 512 с.
2. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.
3. Пономаренко О. И., Холидинов И. Х. Влияние несимметричных режимов на потери мощности в электрических сетях распределенных систем электроснабжения // Энергетик. 2015. № 12. С. 6–8.
4. Авербух М. А., Жилин Е. В. О потерях электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства // Энергетик. 2016. № 6. С. 54–56.
5. Косоухов Ф. Д., Васильев Н. В., Филиппов А. О. Снижение потерь от несимметрии токов и повышение качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками // Электротехника. 2014. № 6. С. 8–12.
6. Патент № 2548656 (РФ). Самокиш В. В. Способ симметрирования фазных токов трехфазной четырехпроводной линии и устройство для его осуществления // Бюлл. № 11. 27.12.2013.
7. Патент № 2249286 (РФ). Г. А. Большанин. Способ автоматизированного активного контроля уровня несимметрии напряжений и токов // Бюлл. № 9. 27.03.2005.
8. Патент № 2490768 (РФ). И. В. Наумов, Д. А. Иванов, С. В. Подьячих, Гантулга Дамдинсүрэн. Симметрирующее устройство для трехфазных сетей с нулевым проводом // Бюлл. № 23. 20.08.2013.
9. Оморев Т. Т., Такырбашев Б. К. К проблеме оптимизации несимметричных режимов работы распределительных сетей // Приборы и системы: управление, контроль, диагностика. 2016. № 6. С. 11–15.
10. URL: www.ackye.ru/activities/schetchiki-elektroenergii-askue/
11. Оморев Т. Т., Такырбашев Б. К. Идентификация состояния распределительной электрической сети в системах автома-

тизации учета и управления энергопотреблением // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. № 10. С. 651—656.

12. Солдатов А. А. Система контроля и диагностики обслуживания подстанционных информационно-измерительных комплексов учета электроэнергии. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2016. № 6. С. 1—7.

13. Оморов Т. Т., Такырбашев Б. К., Осмонова Р. Ч. Диагностика состояний электрических линий распределитель-

ных сетей в составе АСКУЭ // Контроль. Диагностика. 2017. № 5. С. 44—48.

14. Оморов Т. Т., Такырбашев Б. К., Осмонова Р. Ч. К проблеме моделирования несимметричных распределительных электрических сетей в составе АСКУЭ // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. "Энергетика". 2017. № 1. С. 21—28.

Balancing of the Distributed Electrical Network by Method of Digital Regulation

T. T. Omorov, omorovtt@mail.ru,

National Academy of Science of the Kyrgyz Republic, Bishkek, 720071, Kyrgyzstan,

Corresponding author: Omorov T. T., corresponding-member of the NAS KR doctor of technical Sciences, Head of the laboratory of the NAS KR, Bishkek, 720071, Kyrgyzstan, e-mail: omorovtt@mail.ru

Accepted on November 17, 2017

A three-phase distribution electrical network operating in an asymmetric mode is considered. As is known, the factor of asymmetry of phase currents leads to significant losses of active power in the network and transformer substations, as well as to the failure of household appliances and industrial installations. For the symmetry of distributed networks, a number of technologies have been proposed that have not found wide practical application because of their complexity and insufficient efficiency. In the traditional automated information and measuring systems of commercial electricity metering, the functions of data collection from a group of electricity meters installed at the network subscribers are realized, and, in general, the tasks of commercial metering of electricity are being solved. At the same time, in these systems, the optimization of the operating modes of distribution networks is not carried out. One of the possible approaches to solving the problem of balancing a three-phase network based on controlling the flow of electricity between the phases of the network is by switching single-phase electric receivers from a more loaded phase to a less loaded one. The implementation of this approach is implemented by introducing into the structure of the existing automated informative electric power accounting system an additional control subsystem — a digital controller that performs the functions of generating the appropriate control signals for switching electronic meters of electricity connected to the loads of the distribution network. The quality of control processes is evaluated by the objective (criterial) function, which characterizes the loss of active power in the network due to the asymmetry factor. A condition is obtained, the fulfillment of which guarantees the reduction of the value of the chosen indicator of system efficiency in a guaranteed way. A procedure for synthesizing a digital regulator has been developed that provides a reduction in the level of unbalance of phase currents based on the identification of the network load model and minimization of the selected criterial function. The obtained results make it possible to build information and control systems in place of the traditional automated informative electric power accounting systems, which are related to the class of information and measurement systems, which allow increasing the technical and economic performance of distribution companies.

Keywords: three-phase network, unbalanced mode, switching element, synthesis of a digital controller

For citation:

Omorov T. T. Balancing of the distributed electrical network by method of digital regulation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 3, pp. 194—200.

DOI: 10.17587/mau.19.194-200

References

1. Demirchjan K. S., Nejman L. R., Korovkin A. V. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki* (Theoretical foundations of electrical engineering), vol. 1. SPb., Piter, 2009, 512 p. (in Russian).

2. Zhelezko Ju. S. *Poteri jelektrojenergii. Reaktivnaya moshhnost'. Kachestvo elektroenergii* (Power loss. Reactive power'. Power quality), Moscow, JeNAS, 2009, 456 p. (in Russian).

3. Ponomarenko O. I., Holiddinov I. H. *Vliyanie nesimmetrichnykh rezhimov na poteri moshchnosti v elektricheskikh setyah raspredelennykh sistem ehlektrosnabzheniya* (Influence of the asymmetrical modes on losses of power in electrical networks of the distributed systems of power supply), *Energetik*, 2015, no. 12, pp. 6—8 (in Russian).

4. Averbuh M. A., Zhilin E. V. *O poteryah elektroenergii v sistemah ehlektrosnabzheniya individual'nogo zhilishchnogo stroitel'stva* (About losses of the electric power in systems of power

supply of individual housing construction), *Energetik*, 2016, no. 6, pp. 54—57 (in Russian).

5. Kosouhov F. D., Vasil'ev N. V., Filippov A. O. *Snizhenie poter' ot nesimmetrii tokov i povyshenie kachestva elektricheskoy energii v setyah 0,38 kV s kommunal'no-bytovymi nagruzkami* (Decrease in losses from asymmetry of currents and improvement of quality of electric energy in networks of 0,38 kV with household loadings), *Elektrotehnika*, 2014, no. 6, pp. 8—12 (in Russian).

6. Pat. № 2548656 (RF). Samokish V. V. *Sposob simmetrirovaniya faznykh tokov trekhfaznoj chetyrekhprovodnoj linii i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya* (Way of balancing of phase currents of the three-phase four-wire line and the device for his implementation), Byull. № 11, 27.12.2013 (in Russian).

7. Pat. № 2249286 (RF). G. A. Bol'shanin. *Sposob avtomatizirovannogo aktivnogo kontrolya urovnya nesimmetrii napryazheniy i tokov* (Way of the automated active control of level of asymmetry of tension and currents), Byull. № 9, 27.03.2005 (in Russian).

8. Pat. № 2490768 (RF). I. V. Naumov, D. A. Ivanov, S. V. Pod'yachih, Gantulga Damdinsurehn. *Simmetriruyushchee ustrojstvo dlya trekhfaznykh setey s nulevym provodom* (The symmetrizing device for three-phase networks with a zero wire), Byull. № 23, 20.08.2013 (in Russian).

9. Omorov T. T., Takyrbashev B. K. To a problem of optimization of asymmetrical working hours of distributive networks, *Devices and systems: Management, Control, Diagnostics*, 2016, no. 6, pp. 11—15.

10. Available at: www.ackye.ru/activities/schetchiki-elektroenergii-askue/

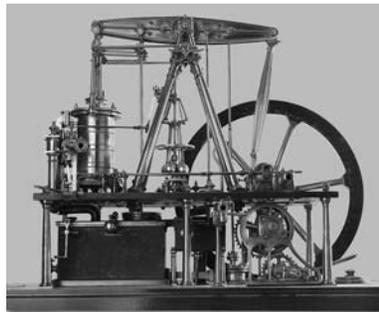
11. **Omorov T. T., Takyrbashev B. K.** *Identifikatsiya sostoyaniya raspredelitel'noi elektricheskoi seti v sistemakh avtomatizatsii ucheta i upravleniya energopotrebleniem* (Identification of the State of the Distributive Electrical Network in the Automated Systems of Accounting and Management of the Power Consumption), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, no. 10, pp. 651—656 (in Russian).

12. **Soldatov A.** *Sistema kontrolya i diagnostiki oborudovaniya podstantsionnykh informatsionno-izmeritelnykh kompleksov ucheta elektroenergii* (The system of control and diagnostics of the equipment of substation information-measuring complexes of the account

of the electric power), *Devices and systems: Management, control, diagnostics*, 2016, no. 1, pp. 1—7 (in Russian).

13. **Omorov T. T., Osmonova R. Ch., Takyrbashev B. K.** *Diagnostika sostoyaniy ehlektricheskikh linij raspreditel'nykh setej v sostave ASKUEH* (Diagnostics of conditions of distributive networks electric lines as a part of ACSKAE), *Kontrol. Diagnostika*, 2017, no. 5, pp. 44—48 (in Russian).

14. **Omorov T. T., Takyrbashev B. K., Osmonova R. Ch.** *K probleme modelirovaniya nesimmetrichnykh raspreditel'nykh elektricheskikh setej v sostave ASKUE* (On modelling unbalanced distributive networks incorporated in ASCAE), *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya Energetika*, 2017, no. 1, pp. 21—28 (in Russian).



Ежегодная специализированная выставка оборудования и технологий для АСУ ТП и встраиваемых систем

17—17 октября 2018 г.

Москва, ЦВК "Экспоцентр", Павильон ФОРУМ

XVIII МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА "ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ. ПТА-2018"

ОСНОВНАЯ ТЕМАТИКА ВЫСТАВКИ

Автоматизация промышленного предприятия

- Системы автоматизации предприятия верхнего уровня
- Анализ и управление финансово-хозяйственной деятельностью предприятия
- Управление снабжением и сбытом, автоматизация промышленного склада
- Системы связи и телекоммуникаций для промышленных объектов

Автоматизация технологических процессов

- SCADA-системы (диспетчерское управление и сбор данных)
- Системы автоматизированного проектирования и разработки
- Автоматизация технологических линий
- Программируемые логические контроллеры и распределенные системы управления
- Тренажеры операторов автоматизированных систем управления
- Средства операторского интерфейса

Измерительные технологии и метрологическое обеспечение

- Контрольно-измерительные приборы и автоматика
- Оборудование для испытаний, диагностики и неразрушающего контроля
- Аналитическое и лабораторное оборудование

Робототехника и мехатроника

- Автоматизация добычи нефти и газа
- Автоматизация на транспорте
- Решения для интеллектуальных зданий
- IT-консалтинг
- Информационно-аналитические системы

Подробную информацию о выставке ПТА-2011 см. на сайте
<http://www.pta-expo.ru/moscow/tematika.htm>