

УДК 621.311

Д. Н. Калюжный, канд. техн. наук, доцент

Харьковская национальная академия городского хозяйства, г. Харьков

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ СЧЁТЧИКОВ СОВМЕСТНО ПО ЦЕПЯМ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ С УЧЁТОМ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В статье рассмотрена задача определения схем включения двух- и трехэлементных счетчиков электроэнергии совместно по цепям тока и напряжения с учётом несимметрии параметров режима работы сети и случайного характера нагрузки.

У статті розглянута задача визначення схем включення двох- та трьохелементних лічильників електроенергії спільно по ланцюгах струму й напруги з урахуванням несиметрії параметрів режиму роботи мережі й випадкового характеру навантаження.

Введение

При эксплуатации счетчиков электрической энергии в ходе их проверок, а также пуско-наладочных работ достаточно часто встречаются случаи их неправильного включения. Это приводит к некорректному учету электрической энергии в широком диапазоне. Своевременное выявление и устранение такого рода ошибок является актуальной задачей.

Основной метод определения схем включения (ОСВ) систем учета электроэнергии заключается в анализе векторных диаграмм [1-3]. При этом предполагает проведение измерений токов, напряжений и фазовых соотношений между ними с последующим их сравнением относительно правильной схемы включения. Существенным недостатком данного подхода являются допущение о симметрии параметров режима работы сети, ограничивающее область однозначного решения. Кроме этого, возможно ошибочное решение, вызванное неточным заданием угла нагрузки $\varphi_{нагр}$ или коэффициентом мощности $\cos \varphi_{нагр}$, которые в общем случае носят случайный характер.

Несмотря на указанные недостатки, большинство современных систем учета электроэнергии имеют функциональные возможности по определению простых видов ошибок включения, связанных с обрывом или шунтированием измерительных цепей, неправильным чередованием фаз, а также отдельной полярностью токовых цепей. Более сложные ошибки, связанные с ОСВ совместно по цепям тока и напряжения при отдельном их неправильном включении, остаются неопределенными.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу определения схемы включения двух- и трехэлементных счетчиков электроэнергии совместно по цепям тока и напряжения в условиях несимметрии параметров режима работы и неизвестного угла нагрузки.

Решение

Решение поставленной задачи будем рассматривать при условии, что обрыв или шунтирование двух и более цепей тока и напряжения, а также подключение к различным входам по току и напряжению систем учета электроэнергии одноименных фаз электрических величин являются маловероятными событиями [3]. Тогда, согласно [4], для метода трех ваттметров существует 40 геометрически различных комбинаций включения цепей напряжения и 20 комбинаций – цепей тока. Воспользовавшись правилом произведения [5] можно определить количество совместных способов включения, которое составит: $40 \cdot 20 = 800$ комбинаций. Для метода двух ваттметров: $6 \cdot 8 = 48$ комбинаций. Очевидно, что задача по ОСВ при таком количестве комбинаций является затруднительной. Поэтому её решение целесообразно вести при условии предварительного ОСВ отдельно по цепям тока и напряжения с учетом их математических корректировок [6, 7]. Это позволит свести

количество различных способов включения к шести геометрически различным комбинациям для обоих методов учета электроэнергии.

Рассмотрим векторные диаграммы напряжений и токов шести геометрически различных способов включения систем учета электроэнергии совместно по цепям тока и напряжения относительно метода трех ваттметров (рис. 1). Предположим, что параметры режима работы симметричны и характер нагрузки неизменный. Как видно из данных диаграмм, аргументы векторов токов, характеризующие различные способы включения, могут быть описаны следующими диапазонами:

$$(n + \varphi_{нагр} - 30 + \Delta\varphi^H; n + \varphi_{нагр} + 30 + \Delta\varphi^K), \quad (1)$$

где $n = 0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ$ или 300° - величина, зависящая от принадлежности вектора тока к различным фазам; $\varphi_{нагр}$ - угол нагрузки, характеризующий сдвиг тока относительно напряжения; $\Delta\varphi^H$ и $\Delta\varphi^K$ углы корректировок границ диапазона (1), обеспечивающие соблюдение сдвига тока относительно напряжения в рамках $\pm 90^\circ$:

$$\Delta\varphi^H = \begin{cases} -90 - (\varphi_{нагр} - 30), & \text{если } (\varphi_{нагр} - 30) > -90; \\ 0, & \text{если } (\varphi_{нагр} - 30) \leq -90; \end{cases}$$

$$\Delta\varphi^K = \begin{cases} 90 - (\varphi_{нагр} + 30), & \text{если } (\varphi_{нагр} + 30) > 90; \\ 0, & \text{если } (\varphi_{нагр} + 30) \leq 90. \end{cases}$$

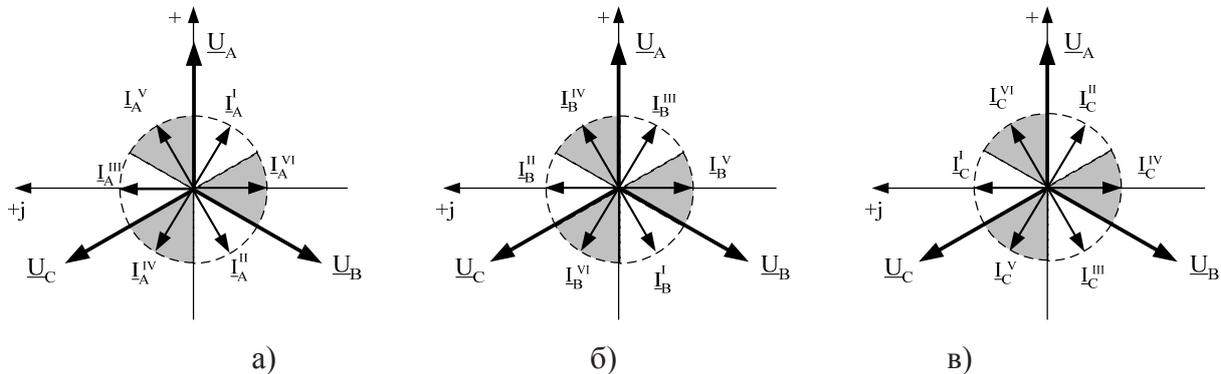


Рис. 1. Эквивалентные положения систем векторов токов и напряжений для метода трех ваттметров

В условиях измерения несимметричные составляющие токов и напряжений в общем случае являются неизвестными величинами. Поэтому, для однозначного решения задачи по ОСВ диапазоны аргументов фаз токов (1) должны быть уменьшены на величину $\Delta\varphi_{нсм}$, характеризующую неизвестную несимметрию как по напряжению, так и по току:

$$\Delta\varphi_{нсм} = \Delta\varphi_U + \Delta\varphi_I, \quad (2)$$

где $\Delta\varphi_U$ и $\Delta\varphi_I$ максимальные углы смещения напряжения и тока от симметричного положения (системы прямой последовательности), которые будут иметь место, например, для фазы А в случае совпадения фаз векторов обратной и нулевой последовательности при одновременном их перпендикулярном положении относительно вектора прямой последовательности (рис. 2).

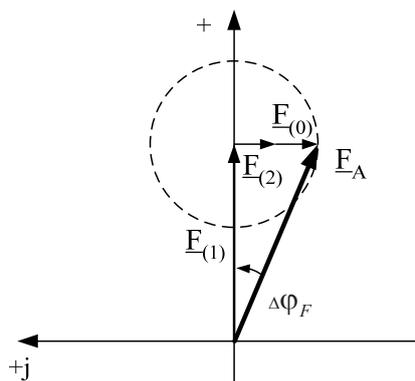


Рис. 2. Положение векторов симметричных составляющих

Согласно рис. 2 составляющие выражения (2) по напряжению и току могут быть определены следующим образом:

$$\Delta\varphi_U = \arctg\left(\frac{U_2 + U_0}{U_1}\right); \quad \Delta\varphi_I = \arctg\left(\frac{I_2 + I_0}{I_1}\right). \quad (3)$$

Если вектора обратной и нулевой последовательностей выразить через соответствующие коэффициенты несимметрии, то выражения (3) можно записать следующим образом:

$$\Delta\varphi_U = \arctg\left(K_{2U}^* + K_{0U}^*\right); \quad \Delta\varphi_I = \arctg\left(K_{2I}^* + K_{0I}^*\right), \quad (4)$$

где $K_{0U}^* = K_{0U}/100\%$ и $K_{2U}^* = K_{2U}/100\%$ – коэффициенты несимметрии напряжений по нулевой и обратной последовательностям [8], выраженные в относительных единицах; K_{0I}^* , K_{2I}^* – коэффициенты несимметрии токов по нулевой и обратной последовательностям, аналогичные коэффициентам несимметрии напряжений.

Таким образом, с учетом (4) выражение (1) может быть записано так:

$$\begin{aligned} & \left(n + \varphi_{нагр} - \left[30 - \arctg\left(K_{2U}^* + K_{0U}^*\right) - \arctg\left(K_{2I}^* + K_{0I}^*\right) \right] + \Delta\varphi^H; \right. \\ & \left. n + \varphi_{нагр} + \left[30 - \arctg\left(K_{2U}^* + K_{0U}^*\right) - \arctg\left(K_{2I}^* + K_{0I}^*\right) \right] + \Delta\varphi^K \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Учтём, что $\varphi_{нагр}$ является случайной величиной. Тогда разность в квадратных скобках выражения (5) будет определять предельное значение отклонения угла нагрузки от некоторого среднего значения $\varphi_{нагр}^{cp}$, с которым можно задавать $\varphi_{нагр}$ для получения точного и однозначного решения:

$$\Delta\varphi_{нагр} < 30 - \arctg\left(K_{2U}^* + K_{0U}^*\right) - \arctg\left(K_{2I}^* + K_{0I}^*\right). \quad (6)$$

Очевидно, что при таком задании угла нагрузки $\varphi_{нагр}$ говорить о точном решении можно с определенной вероятностью, которая будет определяться вероятностью нахождения случайной величины в интервале $P(\varphi_{нагр} - \varphi_{нагр}^{ср} | < \Delta\varphi_{нагр})$.

Оценим отклонение угла нагрузки $\Delta\varphi_{нагр}$ для трехэлементных счетчиков электроэнергии. Согласно [7, 9], для однозначного решения задачи по ОСВ трехэлементных систем учета электроэнергии отдельно по цепям напряжения и тока коэффициенты несимметрии должны удовлетворять следующим условиям: $K_{2U} < 8,6\%$, $K_{0U} < 8,6\%$, $K_{2I} < 12,9\%$ и $K_{0I} < 12,9\%$.

Подставив предельные значения коэффициентов K_{0U}^* , K_{2U}^* , K_{0I}^* и K_{2I}^* в выражение (6), получим минимальное значение отклонения угла нагрузки:

$$\Delta\varphi_{нагр}^{min} < 5,7^\circ. \tag{7}$$

Максимальное значение $\Delta\varphi_{нагр}$ будет иметь место в случае симметрии параметров режима работы сети:

$$\Delta\varphi_{нагр}^{max} < 30^\circ. \tag{8}$$

Для счетчиков, способ учета электроэнергии которых основан на методе двух ваттметров, диапазоны нахождения векторов токов относительно напряжений с учетом несимметрии параметров режима работы определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} & (n + \varphi_{нагр} - \varphi_{фл} - (30 - \Delta\varphi_U - \Delta\varphi_I) + \Delta\varphi^H); \\ & n + \varphi_{нагр} - \varphi_{фл} + (30 - \Delta\varphi_U - \Delta\varphi_I) + \Delta\varphi^K, \end{aligned} \tag{9}$$

где $\varphi_{фл} = 30^\circ$ - угол сдвига между векторами фазного и линейного напряжения прямой последовательности.

В диапазонах (9) углы корректировок $\Delta\varphi^H$ и $\Delta\varphi^K$ имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi^H &= \begin{cases} -120 - (\varphi_{нагр} - \Delta\varphi_U - \Delta\varphi_I), & \text{если } (\varphi_{нагр} - \Delta\varphi_U - \Delta\varphi_I) > -120; \\ 0, & \text{если } (\varphi_{нагр} - \Delta\varphi_U - \Delta\varphi_I) \leq -120; \end{cases} \\ \Delta\varphi^K &= \begin{cases} 60 - (\varphi_{нагр} - \Delta\varphi_U - \Delta\varphi_I), & \text{если } (\varphi_{нагр} - \varphi_{фл} + 30 - \Delta\varphi_U - \Delta\varphi_I) > 60; \\ 0, & \text{если } (\varphi_{нагр} - \Delta\varphi_U - \Delta\varphi_I) \leq 60. \end{cases} \end{aligned}$$

Условие точного и однозначного решения задачи по ОСВ двухэлементного счетчика электроэнергии совместно по цепям тока и аналогично неравенству (6) за исключением отсутствия несимметрии напряжений по нулевой последовательности:

$$\Delta\varphi_{нагр} < 30 - \arctg\left(K_{2U}^*\right) - \arctg\left(K_{2I}^* + K_{0I}^*\right). \tag{10}$$

Подставляя предельные значения коэффициентов несимметрии, ограничивающие однозначное решение задачи ОСВ двухэлементных счетчиков электроэнергии отдельно по цепям напряжения и тока [7, 9] ($K_{2U} < 25,8\%$, $K_{2I} < 12,9\%$ и $K_{0I} < 12,9\%$), в выражение (10) получим минимальную погрешность задания угла нагрузки $\varphi_{нагр}$:

$$\Delta\varphi_{\text{нагр}}^{\min} < 1^{\circ}. \quad (11)$$

Таким образом, для решения задачи ОСВ систем учета электроэнергии совместно по цепям напряжения и тока необходимо знать максимально-возможную несимметрию напряжений и токов, а также угол нагрузки с учетом его случайного характера изменения.

На основе вышеизложенного можно предложить обобщенный алгоритм решения задачи ОСВ двух- и трехэлементных систем учета электроэнергии совместно по цепям напряжения и тока (рис. 3).

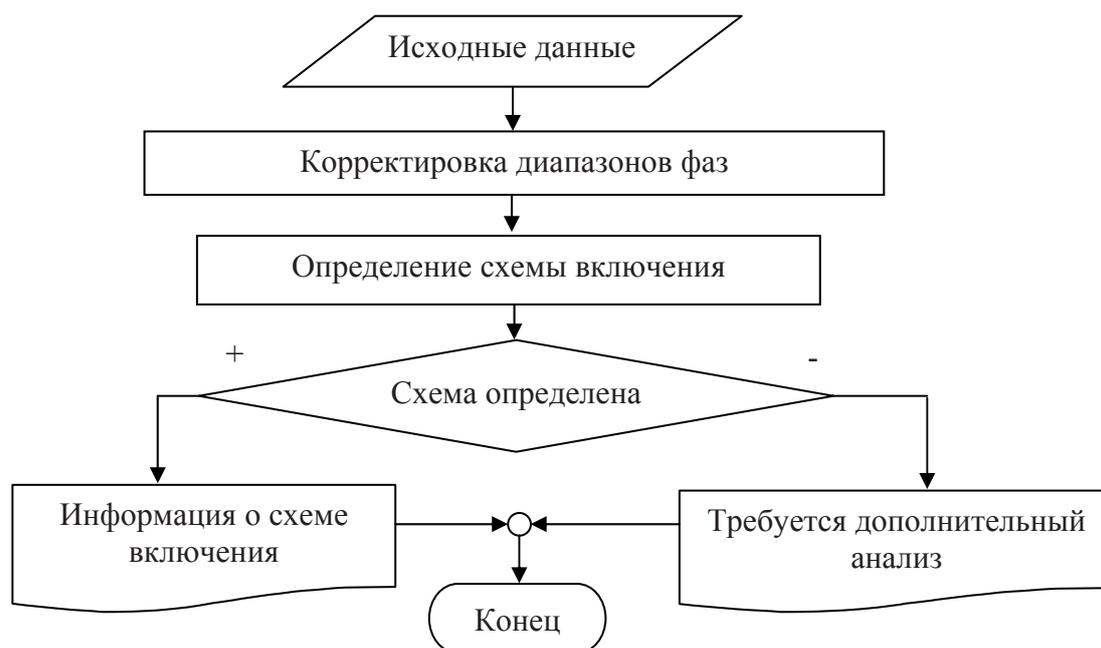


Рис. 3. Блок-схема обобщенного алгоритма ОСВ счетчиков электроэнергии совместно по цепям тока и напряжения

В качестве исходных данных рассматриваемого алгоритма выступают токи и напряжения, максимально возможные коэффициенты несимметрии напряжений и токов по обратной и нулевой последовательностям, а также величина угла нагрузки. В блоке «Корректировка диапазонов фаз» определяются диапазоны возможного нахождения фаз модулей токов относительно напряжений с учетом несимметрии параметров режима и заданного угла нагрузки. В блоке «Определение схемы включения» непосредственно производится ОСВ совместно по цепям напряжения и тока. В случае положительного решения выдается информация о схеме включения. В противном случае требуется дополнительный анализ схемы включения с привлечением квалифицированного персонала и возможно дополнительных средств измерения.

Для современных систем учета электроэнергии при положительном ОСВ в случае неправильного включения представляется возможным определить параметры режима работы, соответствующие правильному включению, без каких-либо физических переключений, т.е. производить математическую корректировку измеряемых токов и напряжений. Для этого достаточно провести математические преобразования системы токов при фиксированной системе напряжений, которые показаны в табл. 1 и табл. 2. Полученная таким образом информация может оказаться более приемлемой по сравнению с исходной.

Таблица 1
Математическая корректировка для трехэлементного счетчика электроэнергии

Комбинация	Схема включения по цепям				Математическая корректировка
	напряжения		тока		
	φ_A	φ_B	φ_C	φ_0	
1					$\underline{I}_A^{pc} = \underline{I}_A; \underline{I}_B^{pc} = \underline{I}_B; \underline{I}_C^{pc} = \underline{I}_C$
2					$\underline{I}_A^{pc} = \underline{I}_B; \underline{I}_B^{pc} = \underline{I}_C; \underline{I}_C^{pc} = \underline{I}_A$
3					$\underline{I}_A^{pc} = \underline{I}_C; \underline{I}_B^{pc} = \underline{I}_A; \underline{I}_C^{pc} = \underline{I}_B$
4	φ'_A	φ'_B	φ'_C	φ'_0	$\underline{I}_A^{pc} = -\underline{I}_A; \underline{I}_B^{pc} = -\underline{I}_B; \underline{I}_C^{pc} = -\underline{I}_C$
5					$\underline{I}_A^{pc} = -\underline{I}_B; \underline{I}_B^{pc} = -\underline{I}_C; \underline{I}_C^{pc} = -\underline{I}_A$
6					$\underline{I}_A^{pc} = -\underline{I}_C; \underline{I}_B^{pc} = -\underline{I}_A; \underline{I}_C^{pc} = -\underline{I}_B$

Таблица 2

Математическая корректировка для двухэлементного счетчика электроэнергии

Комбинация	Схема включения по цепям				Математическая корректировка
	напряжения		тока		
	φ_I	φ_{II}	φ_C	φ_0	
1					$\underline{I}_I^{pc} = \underline{I}_I; \underline{I}_{II}^{pc} = \underline{I}_{II}$
2					$\underline{I}_I^{pc} = -(\underline{I}_I + \underline{I}_{II}); \underline{I}_{II}^{pc} = \underline{I}_I$
3					$\underline{I}_I^{pc} = \underline{I}_{II}; \underline{I}_{II}^{pc} = -(\underline{I}_I + \underline{I}_{II})$
4	φ'_A	φ'_B	φ'_C		$\underline{I}_I^{pc} = -\underline{I}_I; \underline{I}_{II}^{pc} = -\underline{I}_{II}$
5					$\underline{I}_I^{pc} = \underline{I}_I + \underline{I}_{II}; \underline{I}_{II}^{pc} = -\underline{I}_I$
6					$\underline{I}_I^{pc} = -\underline{I}_{II}; \underline{I}_{II}^{pc} = \underline{I}_I + \underline{I}_{II}$

Выводы

1. Разработан метод ОСВ счетчиков электроэнергии совместного по цепям напряжения и тока, учитывающий несимметрию параметров режима работы и случайный характер изменения угла нагрузки.
2. Определены условия точного и однозначного решения задачи ОСВ систем учета электроэнергии совместно по цепям тока и напряжения в зависимости от несимметрии параметров режима работы и случайного характера изменения угла нагрузки.
3. Разработан алгоритм ОСВ счетчиков электроэнергии совместного по цепям тока и напряжения, учитывающий несимметрию параметров режима работы и случайный характер изменения угла нагрузки.
4. Предложен метод математической корректировки измеряемых счетчиком электроэнергии напряжений и токов при неправильной схеме его включения.

Список литературы

1. Схемы включения счетчиков электрической энергии: Практическое пособие / Под ред. Я. Т. Загорского. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006.
2. Труб И. И. Обслуживание индукционных счетчиков и цепей учета в электроустановках. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Вострокнутов Н. Г. Электрические счетчики и их эксплуатация. Изд. 6-е, перераб. М.–Л. Госэнергоиздат. 1959.
4. Калюжный Д. Н. Анализ схем подключения счетчиков электрической энергии // Світлотехніка та електроенергетика. – 2007. – № 3–4. – С. 58–63.
5. М. Холл Комбинаторика / Пер. с англ. – М.: Мир, 1970.
6. Калюжный Д.Н. Определение схемы включения двух- и трехэлементного счетчика электроэнергии по токовым цепям в условиях несимметрии // Энергосбережение · Энергетика · Энергоаудит. – 2008. – № 4 (50). – С. 32–36.
7. Васильченко В. И., Гриб О. Г., Гринченко А. А., Калюжный Д. Н. Методика и алгоритм определения схем включения систем учета электроэнергии по цепям напряжения с учетом качества электроэнергии // Промислова електроенергетика та електротехніка. – Київ: ВАТ Інститут “Київпромелектропроект”. – 2009. – № 5. – С. 57–62.
8. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения. Киев: Госстандарт Украины, 1999.
9. Калюжный Д. Н. Методика и алгоритм определения схемы включения систем учета электроэнергии по токовым цепям // Наукові праці Донецького Національного технічного університету. Серія “Електротехніка і енергетика”. – Донецьк: ДонНТУ. – 2009. Випуск 9 (158). – С. 11–120.

DETERMINING THE SCHEME OF SWITCHING ELECTRICITY METERS JOINTLY ON VOLTAGE AND CURRENT CIRCUITS TAKING INTO ACCOUNT POWER QUALITY

D. N. Kalyuzhniy, Cand.Tech. Sci., associate professor

The problem of determining the scheme of switching two- and three-element electricity meters jointly on voltage an current circuit taking into account asymmetry parameters of power mode of operation and random loading character has been considered in the article.

Поступила в редакцию 22. 06 2010 г.