

УЧЕТ АКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТРЕХФАЗНОЙ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ СИСТЕМЕ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ РЕЖИМЕ

АРУТЮНЯН А. Г.

*ЗАО «Научно-исследовательский институт энергетики»
(Республика Армения)*

В настоящее время примерно 60 % вырабатываемой электроэнергии в Армении потребляется бытовым сектором республики. В связи с этим актуальными становятся точность учета активной электроэнергии и поддержание в соответствии с требованиями [1] показателей качества электроэнергии в трехфазных четырехпроводных сетях 0,4 кВ.

Измерения, проведенные на десяти ТП-10/0,4 кВ Еревана, показали, что трехфазная четырехпроводная система 0,4 кВ из-за неравномерного распределения однофазных потребителей и неодновременного изменения нагрузки по фазам *A, B, C* работает в несимметричном режиме.

Результаты измерений на одной подстанции ТП-10/0,4 кВ $S_{т.ном} = 400$ кВ·А приведены в табл. 1. Коэффициент несимметрии по нулевой последовательности K_{0U} , рассчитанный согласно [1], для этой подстанции составил 17 %. Величина K_{0U} для трехфазных четырехпроводных сетей 0,4 кВ нормирована соответственно: нормально допустимое значение $K_{0U} = 2$ %, т. е. $U_0 = 4,4$ В, предельно допустимое значение $K_{0U} = 4$ %, т. е. $U_0 = 8,8$ В, где U_0 – напряжение нулевой последовательности, В. В предыдущем ГОСТе величина U_0 не нормировалась, а в действующем нормируется, исходя из соответствующих нормативных значений отклонения напряжения [1, 2].

Таблица 1

Данные измерения и расчета для одной ТП-10/0,4 кВ

Фаза	Полная мощность $S_{\text{ф}}$, кВ·А	Активная мощность $P_{\text{ф}}$, кВт	Реактивная мощность $Q_{\text{ф}}$, квар	Полные токи фаз $I_{\text{ф}}$, А	Линейные и фазные напряжения $U_{\text{л}}, U_{\text{ф}}$, В	Ток нейтрального провода $I_{\text{н}}$, А	Напряжение в нейтральной точке $U_{\text{н}}$, В	Расчетная полная мощность прямой последовательности $S_{\text{пр}}$, кВ·А	Дополнительные потери полной и активной мощностей в трансформаторе $\Delta S_{\text{пр}}/\Delta P_{\text{пр}}$, кВ·А/кВт	Дополнительная активная мощность в линиях 0,4 кВ $\Delta P_{\text{пр}}$, кВт	Дополнительные потери полной и активной мощностей в нейтральном проводе $S_{\text{н}}/P_{\text{н}}$, кВ·А/кВт	Расчетная потребляемая полная мощность $S'_{\text{рас.т}}$, кВ·А
<i>A</i>	36,8	35,4	10	147	427/250	144	43,5	53,68	0,55/0,19	0,7	6,43/6,4	53,13
<i>B</i>	56,6	56,4	4,5	220	431/235			53,68	0,55/0,19	0,7		53,13
<i>C</i>	66,9	66,3	9	282	423/248			53,68	0,55/0,19	0,7		53,13
	159,7	158,1	23,5					161	1,65/0,57	2,1		159,39

Согласно [3] при несимметричных режимах четырехпроводных сетей 0,4 кВ в нулевом проводе (скрытая мощность) возникают дополнительные потери, которые не учитываются трехфазным счетчиком. В нормативных документах отсутствует методика для расчета дополнительных потерь.

В [3–6] не находим ответа на вопрос: имеется ли методическая погрешность при учете активной электроэнергии трехфазным счетчиком в

несимметричном режиме сети 0,4 кВ. Выводы по этому вопросу противоречивы.

Цель данной статьи – дать ответы на изложенные выше вопросы.

Для подтверждения вывода [6] о том, что в трехфазной четырехпроводной системе 0,4 кВ трехфазный счетчик учитывает всю энергию, передаваемую через систему, включая потери активной электроэнергии в нулевом проводе, рассмотрим приведенную на рис. 1 схему трехфазной четырехпроводной системе.

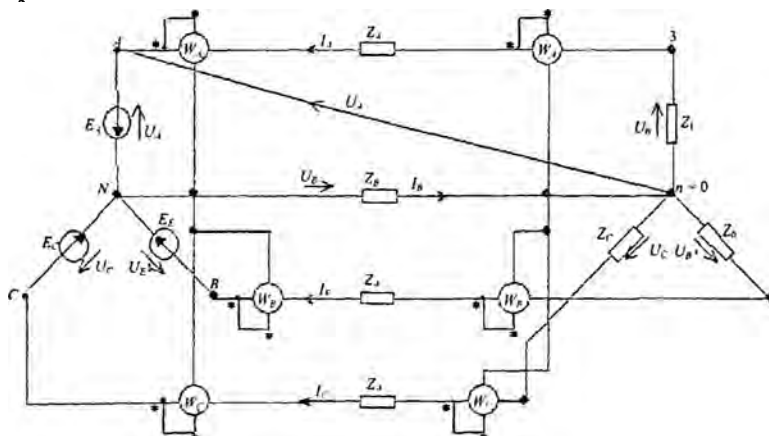


Рис. 1. Напряжения и токи в трехфазной четырехпроводной системе

Составим выражение полной мощности трехфазной цепи 0,4 кВ (рис. 1) с помощью узловых потенциалов

$$\dot{S}_{\text{сис}} = \dot{S}_A + \dot{S}_B + \dot{S}_C + \dot{S}_N = (\dot{U}_A - \dot{U}_N) \dot{I}_A^* + (\dot{U}_B - \dot{U}_N) \dot{I}_B^* + (\dot{U}_C - \dot{U}_N) \dot{I}_C^* + \dot{U}_N \dot{I}_N^*. \quad (1)$$

Открыв скобки и перегруппировав по фазным напряжениям, получим выражение

$$S_{\text{сис}} = U_A I_A^* + U_B I_B^* + U_C I_C^* - U_N (I_A^* + I_B^* + I_C^* - I_N^*) \quad (2)$$

Из [6] известно, что

$$I_A^* + I_B^* + I_C^* - I_N^* = 0, \quad (3)$$

с учетом которого (1) примет вид

$$S_{\text{сис}} = U_A I_A^* + U_B I_B^* + U_C I_C^*. \quad (4)$$

Из (4) следует, что активная энергия, передаваемая по трехфазной четырехпроводной системе 0,4 кВ, определяется выражением

$$P_{\text{сис}} T = (U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C) T, \quad (5)$$

где T – время.

В реальных условиях учета имеется определенный небаланс между показанием головного трехфазного счетчика (рис. 1) и суммой показаний

счетчиков на ответвлениях. Например, в ТП-10/0,4 кВ, где за трое суток по показанию головного счетчика (АВВ) было потреблено $W_{сч} = 11400$ кВт·ч, а по показаниям счетчиков на ответвлениях потребленная активная энергия составила $W_{\Sigma} = 6000$ кВт·ч, небаланс активной энергии равен 5400 кВт·ч.

Исследуем влияние несимметрии на величины дополнительных потерь активной мощности в трехфазной четырехпроводной системе 0,4 кВ и их небаланса.

Измеренные фазные напряжения и токи (табл.1) согласно [7] разложили на симметричные составляющие. Анализ полученных результатов показывает, что напряжение и токи обратной последовательности по величине малы, и обусловленной ими мощностью можно пренебречь. Величины полной мощности прямой последовательности $S_{рас.1}$ приведены в табл. 1.

Из-за наличия токов и напряжений нулевой последовательности возникают дополнительные потери активной мощности:

- в нулевом проводе их можно определить по формуле [8]

$$\Delta P_N = P_N^2 R_N \approx U_N I_N, \text{ кВт}, \quad (6)$$

где $I_N = 3I_0$ – ток, протекающий по нулевому проводу, А; R_N – активное сопротивление нулевого провода, Ом;

- в линейных проводах их рассчитывают по выражению

$$\Delta P_{оф} = 3I_0^2 R_{\phi}, \text{ кВт}, \quad (7)$$

где I_0 – величина тока нулевой последовательности; R_{ϕ} – активное сопротивление фазного провода.

Потери активной электроэнергии, обусловленные активными мощностями ΔP_N и $\Delta P_{оф}$, трехфазный счетчик в начале линии (рис.1) будет учитывать, а счетчики на ответвлениях учитывать не будут, т. е. величины ΔP_N и $\Delta P_{оф}$ увеличивают небаланс в показаниях счетчиков активной электроэнергии на стороне 0,4 кВ, который в нашем случае составил примерно 8,5 кВт.

Потери активной мощности во вторичных обмотках питающего трансформатора равны

$$\Delta P_{от} = 3I_0^2 R_T, \text{ кВт}, \quad (8)$$

где R_T – активное сопротивление вторичных обмоток трансформатора.

Согласно [9] в трансформаторе с группой соединения Y/Y_0 , при несимметричных ЭДС обмоток возникают поперечные магнитные поля, силовые линии которых замыкаются по стенкам бака, вызывая дополнительные потери активной мощности. В нашем примере эти потери составили $\Delta P_B = 5$ кВт. Потери активной электроэнергии, обусловленные активными мощностями ΔP от и ΔP_B , создаются из-за несимметрии в системе 0,4 кВ, но головной трехфазный счетчик эти потери не учитывает, их будет учитывать счетчик активной электроэнергии, установленный на стороне 6–10 кВ. Следовательно, между показаниями этих двух счетчиков также

возникнет небаланс, величина которого в нашем примере составляет $\Delta P = 5,6$ кВт.

Для проверки измеренной величины $S_{из}$ полной мощности (табл. 1) расчетным путем необходимо от полной мощности $S_{рас.1}$ вычесть дополнительные потери полной мощности $\Delta S_{от}$. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Погрешность расчета полной мощности с помощью метода симметричных составляющих по отношению к измеренной суммарной полной мощности составила 0,2.

Таким образом, несимметрия в трехфазной четырехпроводной системе 0,4 кВ приводит к дополнительным потерям активной электроэнергии (табл. 1), которые, в свою очередь, ведут к небалансу между показаниями счетчиков на ответвлениях и в начале линии.

Как уже было отмечено, в действующем ГОСТе степень несимметрии в системе 0,4 кВ нормируется по составляющей нулевой последовательности напряжения. Однако рекомендуемая методика определения величины K_{0U} для использования на практике эксплуатации сложна, а практическое применение затруднено.

Ниже предлагается сравнительно простой способ определения степени несимметричности в трехфазной четырехпроводной сети 0,4 кВ, основанный на измерении тока I_N в нейтральном проводе.

Согласно [7] ток в нулевом проводе можно определить по формуле

$$I_N = \frac{U_N}{R_N}, \text{ А.} \quad (9)$$

Согласно [6] $3U_0 = U_N$, с учетом этого можем найти значение U_N , соответствующее нормально и предельно допустимым значениям U_0 : $U_N = 3U_{0нор} = 13,2$ В; $U_{Nпред} = 3U_{0пред} = 26,4$ В.

Следовательно, величину тока I_N , соответствующую значениям $U_{Nнор}$ и $U_{Nпред}$, можно рассчитать следующим образом:

$$I_{Nнор} = \frac{U_{Nнор}}{R_N}; \quad I_{Nпред} = \frac{U_{Nпред}}{R_N}. \quad (10)$$

Так как в сетях 0,4 кВ сечение нулевого провода выбирается на один стандарт ниже сечения фазного провода, можем переписать (10) в виде:

$$I_{Nнор} = \frac{U_{Nнор}}{1,3R_\phi}; \quad I_{Nпред} = \frac{U_{Nпред}}{1,3R_\phi},$$

где R_ϕ – активное сопротивление фазного провода или жилы кабеля линии 0,4 кВ.

В каждом конкретном случае, зная значение R_ϕ , возможно определить нормально и предельно допустимые значения тока нулевого провода.

Пример: для подстанции, где проводились измерения, величина $R_{\phi} = 0,3$ Ом. Подставляя ее в (9), получим нормально и предельно допустимые значения тока нулевого провода: $I_{N\text{нор}} = 34$ А; $I_{N\text{пред}} = 68$ А.

ВЫВОДЫ

1. При несимметричных режимах трехфазной четырехпроводной системы 0,4 кВ возникает небаланс в показаниях счетчиков активной электроэнергии в зависимости от места установки счетчиков однофазных потребителей.

2. Для практического определения степени несимметричности трехфазных четырехпроводных сетей 0,4 кВ необходимо в действующий ГОСТ ввести дополнительную нормируемую величину тока нулевого провода.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 13109–97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 21.11.1997.
2. Федоров, А. А. Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования по электроснабжению промышленных предприятий / А. А. Федоров, Л. Е. Старкова. – М.: Электроатомиздат, 1987. – 368 с.
3. Дрехслер, Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке / Р. Дрехслер. – М., 1986. – 110 с.
4. Горюнов, П. Н. Электрические счетчики / П. Н. Горюнов, С. М. Пигин, Н. Н. Шумиловский. – М.: Госэнергоиздат, 1958. – 495 с.
5. Илюкович, А. М. Электрические счетчики / А. М. Илюкович. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1964. – 384 с.
6. Арутюнов, В. А. Электрические измерительные приборы и измерения / В. А. Арутюнов. – М.: Госэнергоиздат, 1958. – 613 с.
7. Калантаров, П. Л. Теоретические основы электротехники / П. Л. Калантаров, Л. Р. Нейман. – Л.; М.: Госэнергоиздат, 1948. – 411 с.
8. Электротехнический справочник. – Т. 1: Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. В. Г. Герасимова, П. Г. Грудинского, Л. А. Жукова и др. – М.: Энергия, 1980. – 520 с.
9. Бальшов, К. К. Конспект лекций по специальному курсу электрических машин: параметры и добавочные потери в трансформаторах и электрических машинах переменного тока / К. К. Бальшов. – М., 1969. – 141 с.

Представлена Ученым советом

Поступила 20.05.2004