

0,2 А. На шинах подстанции фазные напряжения достигли номинальных значений, приборы контроля изоляции нарушение нормального режима не фиксировали.

После окончания опыта измеренное сопротивление заземления опоры превысило 10 000 Ом·м.

Резюмируя результаты экспериментальных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. При токах ЗНЗ менее 10 А возможны протекания необратимых процессов деструктивных преобразований железобетонных опор.

2. По напряжению поврежденной фазы при ЗНЗ можно судить о целостности подземной части железобетонной опоры.

3. Математический расчет критической продолжительности ЗНЗ, при котором наступают необратимые процессы деструктивных преобразований железобетонных опор, произведен правильно. Расхождения вычисленного результата (21,3 ч) с опытным (22 ч) обусловлено следующими причинами:

- температура в опыте 6 измерялась не на теле опоры, а на расстоянии 5...7 см от тела опоры, это обусловлено техническими проблемами при погружении штыря с датчиками температуры. Поэтому существовала погрешность, связанная с отставанием нагрева измерителей температуры;

- в расчетном выражении (1) ввиду отсутствия исходных данных о температурах почвы за начальную температуру принималась температура окружающего воздуха, что не совсем точно, поскольку на глубине 50...60 см температура будет ниже.

Список литературы

1. Шерстобитов, Р.М. Показатели надежности и затраты на восстановления элементов сети ВЛ 10 кВ при однофазных замыканиях на землю / Р.М. Шерстобитов, М.А. Юндин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. — 2011. — № 1. — С. 17–18.
2. Забелло, Е.П. Однофазные замыкания на землю в воздушных линиях 10 кВ на железобетонных опорах / Е.П. Забелло, М.П. Кондратьев // Электричество. — 1983. — № 1. — С. 51–54.
4. Бернацкий, А.Ф. Электрические свойства бетона / А.Ф. Бернацкий, Ю.В. Целебровский, В.А. Чунчин. — М.: Энергия, 1980. — С. 68–69.
3. Юндин, М.А. Определение характера и места однофазных повреждений в сельских электрических сетях 10 кВ: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / М.А. Юндин. — М., 1984. — С. 169.
5. Рюденберг, Р. Переходные процессы в электроэнергетических системах / Р. Рюденберг. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1955. — С. 714.
6. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок РД 153–34.0–03.150–00. — М.: НЦ ЭНАС, 2001. — С. 209.

УДК 621.314

М.В. Коломьцев

Санкт-Петербургский государственный аграрный университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКИ В СЕЛЬСКИХ СЕТЯХ 0,38 КВ

Сельские электрические сети 0,38 кВ с коммунально-бытовыми нагрузками имеют значительную несимметрию токов из-за неравномерного распределения однофазных нагрузок между фазами трехфазных линий. В результате этого токи отдельных фаз отличаются по величине в три и более раз, а ток в нулевом проводе достигает 50 % и более.

В сельских электросетях широкое применение получили трансформаторы потребительских ТП со схемой соединения обмоток Y/Y_n, которые обладают большим сопротивлением нулевой последовательности, примерно в 10 раз превышающее сопротивление прямой последовательности. Поэтому при несимметричной нагрузке фаз в этих трансформаторах возникает значительное напряжение нулевой последовательности, вызывающее несимметрию фазных напряжений на выходе трансформатора.

Технологические потери электроэнергии в сельских сетях за последнее десятилетие выросли почти в 3 раза и достигают 30 %. При этом отклонение напряжения у потребителей вместо $\pm 5\%$ по ГОСТ составляет 30...+20 % [1]. Причиной этого является возрастание в сетях 0,38 кВ доли однофазной нагрузки по сравнению с трехфазной симметричной нагрузкой. Этому способствовало, в частности, применение в коттеджном строительстве мощных (до 50 кВт и выше) однофазных стабилизаторов напряжения [2].

4 июня 2008 г. Президент Российской Федерации подписал указ № 889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики». Согласно этому указу, в целях снижения энергоемкости валового внутреннего продукта Российской Федерации, обеспечения рационального и экологически ответ-

ственного использования энергии и энергетических ресурсов энергоёмкость российской экономики к 2020 г. должна быть снижена на 40 % по сравнению с 2007 г.

Данный указ Президента РФ является руководящим документом для всех электросетевых компаний России на ближайшие годы (до 2020), в течение которых предстоит повысить эффективность транспорта и распределения электроэнергии до уровня промышленно развитых стран [3]. Ориентировочно предельные относительные технологические потери электроэнергии в сетях 0,38 кВ должны быть не более 10...14 % по отношению к отпуску электроэнергии в сеть [4].

Для получения достоверной информации о показателях несимметрии токов и напряжений и о потерях мощности и электроэнергии в сетях предлагается определять параметры несимметричной нагрузки по статистическим характеристикам несимметрии токов в сельских сетях 0,38 кВ.

В связи с не всегда постоянной коммунально-бытовой нагрузкой сельских сетей 0,38 кВ показатели несимметрии токов и напряжений, а также потери носят случайный характер. Поэтому расчет потерь напряжения и электроэнергии в сетях 0,38 кВ с коммунально-бытовой и смешанной нагрузками может быть произведен вероятностными методами, или при детерминированном представлении нагрузок путем использования в этих расчетах статистических характеристик несимметрии токов, а также статистических моделей сельских сетей [5].

При расчете указанных потерь, например, в часы максимальной нагрузки автор статьи предлагает учитывать уровень несимметрии токов в сети по статистическим характеристикам несимметрии токов. С этой целью по результатам статистической обработки данных, полученных в процессе измерения токов в действующих сетях 0,38 кВ, определяются следующие величины:

относительное значение тока в средненагруженной фазе

$$\nu = \frac{I_{\text{ср}}}{I_{\text{max}}}; \quad (1)$$

относительное значение тока в наименее нагруженной фазе

$$w = \frac{I_{\text{min}}}{I_{\text{max}}}, \quad (2)$$

где
$$I_{\text{ср}} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}; \quad (3)$$

I_{min} — ток в наименее нагруженной фазе; I_{max} — ток в наиболее нагруженной фазе.

С учетом коэффициентов (1), (2) определяют соотношение токов в отдельных фазах трехфазной сети, приняв $I_A = I_{\text{max}}$, $I_C = I_{\text{min}}$.

Разделив левую и правую части выражения (3) на I_{max} , получаем

$$\begin{aligned} \frac{I_{\text{ср}}}{I_{\text{max}}} &= \frac{1}{3} \left(\frac{I_A}{I_{\text{max}}} + \frac{I_B}{I_{\text{max}}} + \frac{I_C}{I_{\text{max}}} \right) = \\ &= \frac{1}{3} \left(1 + \frac{I_B}{I_{\text{max}}} + w \right) = \nu, \end{aligned} \quad (4)$$

откуда
$$\frac{I_B}{I_{\text{max}}} = 3\nu - w - 1.$$

Таким образом,

$$\frac{I_A}{I_{\text{max}}} = 1, 0; \frac{I_B}{I_{\text{max}}} = 3\nu - w - 1; \frac{I_C}{I_{\text{max}}} = w. \quad (5)$$

Учитывая соотношения токов в сети с несимметричной нагрузкой (5), определяют полные мощности отдельных фаз S_A, S_B, S_C трехфазной несимметричной нагрузки по заданной величине ее расчетной мощности $S_p = 3S_{\text{ср}}$:

$$S_{\text{ср}} = \frac{S_A + S_B + S_C}{3} = \frac{U_{\phi}(I_A + I_B + I_C)}{3} = \frac{S_p}{3},$$

или
$$S_{\text{ср}} = \frac{1}{3} \left[U_{\phi} I_{\text{max}} \left(\frac{I_A}{I_{\text{max}}} + \frac{I_B}{I_{\text{max}}} + \frac{I_C}{I_{\text{max}}} \right) \right]. \quad (6)$$

Обозначив $U_{\phi} I_{\text{max}} = S_{\text{max}} = S_A$ и разделив левую и правую части выражения (6) на S_{max} , получаем

$$\frac{S_{\text{ср}}}{S_{\text{max}}} = \frac{1}{3} \left(\frac{I_A}{I_{\text{max}}} + \frac{I_B}{I_{\text{max}}} + \frac{I_C}{I_{\text{max}}} \right) = \nu. \quad (7)$$

На основании выражений (5) и (7) определяют полные мощности фаз трехфазной несимметричной нагрузки:

$$\left. \begin{aligned} S_A &= \frac{S_{\text{ср}}}{\nu}; \\ S_B &= (3\nu - w - 1) S_A = \frac{3\nu - w - 1}{\nu} S_{\text{ср}}; \\ S_C &= w S_A = \frac{w}{\nu} S_{\text{ср}}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Зная полные мощности отдельных фаз, находят комплексы сопротивлений трехфазной несимметричной нагрузки:

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_A &= \frac{U_{\text{фном}}^2 e^{j\varphi_a}}{S_A}; \\ \underline{Z}_B &= \frac{U_{\text{фном}}^2 e^{j\varphi_b}}{S_B}; \\ \underline{Z}_C &= \frac{U_{\text{фном}}^2 e^{j\varphi_c}}{S_C}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

В руководящих материалах по проектированию электроснабжения сельского хозяйства [5] приведены статистические характеристики не-

симметрии токов в сельских сетях 0,38 кВ, на основании которых могут быть определены полные мощности однофазных нагрузок по формулам (8), а затем вычислены комплексы сопротивлений несимметричной нагрузки по формулам (9).

Потери мощности, обусловленные несимметрией токов, в линии 0,38 кВ или в трансформаторе потребительской ТП характеризуются коэффициентом потерь мощности K_p , определяемым по формуле [6]:

$$K_p = 1 + K_{2i}^2 + K_{0i}^2 K_R. \quad (10)$$

Этот коэффициент зависит от показателей несимметрии токов на рассматриваемом участке сети и активных сопротивлений нулевой R_0 и прямой R_1

последовательностей этого участка: $K_R = \frac{R_0}{R_1}$. По-

этому для определения коэффициента потерь мощности вследствие несимметрии токов, прежде всего, необходимо рассчитать коэффициенты обратной K_{2i} и нулевой K_{0i} последовательностей системы токов на участке сети [6].

Фазные коэффициенты $\delta_A, \delta_B, \delta_C$, характеризующие потери напряжения на участке сети, определяются по формулам [6]:

$$\left. \begin{aligned} \delta_A &= 1 + \underline{K}_{2i} + \underline{K}_{0i} \underline{K}_Z; \\ \delta_B &= \underline{a}^2 + \underline{a} \underline{K}_{2i} + \underline{K}_{0i} \underline{K}_Z; \\ \delta_C &= \underline{a} + \underline{a}^2 \underline{K}_{2i} + \underline{K}_{0i} \underline{K}_Z, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где $\underline{K}_{2i}, \underline{K}_{0i}$ — коэффициенты обратной и нулевой последовательностей системы токов в комплексной форме; $\underline{K}_Z = \frac{\underline{Z}_0}{\underline{Z}_1}$ — комплексный коэффициент полного сопро-

тивления, равный отношению комплексов сопротивлений нулевой \underline{Z}_0 и прямой \underline{Z}_1 последовательностей участка сети.

Для расчета показателей несимметрии токов и напряжений и потерь мощности и напряжения необходимы следующие исходные данные:

1. Паспортные данные трансформатора потребительской ТП, по которым определяется его комплексное сопротивление прямой последовательности $\underline{Z}_{T1} = \underline{Z}_{T2}$.

Значения сопротивлений нулевой последовательности \underline{Z}_{T0} для наиболее распространенных в сельских сетях трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Y_n приведены в [7].

2. Марка, сечение проводов и длина линии 0,38 кВ. По этим данным определяются сопротив-

ления прямой $\underline{Z}_{л1} = \underline{Z}_{л2}$ и нулевой $\underline{Z}_{л0}$ последовательностей линии 0,38 кВ. Метод расчета этих сопротивлений изложен в [6].

3. Суммарные активная P'_n и реактивная Q'_n мощности или полная мощность S'_n и угол сдвига фаз φ'_n трехфазной симметричной нагрузки.

Методы расчета сопротивлений прямой \underline{Z}'_1 и обратной \underline{Z}'_2 последовательностей симметричной нагрузки изложены в [6].

4. Фазные полные мощности S_a, S_b, S_c и угол сдвига фаз $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ несимметричной нагрузки. Чаще несимметричная нагрузка задается в виде расчетной полной мощности $S_p = 3S_{cp}$ и угла сдвига фаз $\varphi_n = \varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$. Для распределения этой мощности по фазам необходимы статистические характеристики несимметрии токов u, w в сельских сетях 0,38 кВ. Расчет сопротивлений несимметричной нагрузки $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c$ по статистическим характеристикам несимметрии токов выполняется по формулам (9).

Расчет показателей несимметрии токов и напряжений и потерь мощности, обусловленных несимметрией токов, в трансформаторе потребительской ТП и линии 0,38 кВ с сосредоточенной в конце ее нагрузкой изложен в [6].

Список литературы

1. Бородин, И.Ф. Потери электроэнергии в сельских сетях и пути их снижения / И.Ф. Бородин, А.П. Сердешнов // Техника в сельском хозяйстве. — 2002. — № 1. — С. 23–26.
2. Однофазные стабилизаторы напряжения [Электронный ресурс] // Интернет-магазин «Стабитек». — Режим доступа: <http://www.energoportal.ru/catalog/kondensatory> (дата обращения: 02.02.2012).
3. Добрусин, Л.А. Проблема качества электроэнергии и электросбережения в России / Л.А. Добрусин // Энергоэксперт. — 2008. — № 4. — С. 30–35.
4. Воротницкий, В.Э. Нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях: результаты, проблемы, пути решения / В.Э. Воротницкий // Энергоэксперт. — 2007. — № 3. — С. 10–19.
5. Рожавский, С.М. Статистические характеристики несимметрии токов и напряжений в сельских сетях 0,4/0,23 кВ: руковод. материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства / С.М. Рожавский, Ю.Ф. Свергун. — М.: Сельэнергопроект, 1971. — Вып. 9. — С. 53–62.
6. Косоухов, Ф.Д. Несимметрия напряжений и токов в сельских распределительных сетях / Ф.Д. Косоухов, И.В. Наумов. — Иркутск: ИРГСХА, 2003. — 260 с.
7. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С.А. Ульянов. — М.: Энергия, 1970. — 520 с.