

## ПАРАМЕТРЫ ИЗОЛЯЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ: КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ

*У статті викладені принципи непрямого дискретного контролю параметрів ізоляції на основі штучного зсуву нейтралі і безперервного селективного контролю на основі накладення бі-частотних оперативних сигналів в розподільних мережах напругою 6-10 кВ. Вказані основні шляхи управління активним, реактивним опорами і добротністю ізоляції мережі в аварійному режимі.*

*В статті изложены принципы косвенного дискретного контроля параметров изоляции на основе искусственного смещения нейтрали и непрерывного селективного контроля на основе наложения би-частотных оперативных сигналов в распределительных сетях напряжением 6-10 кВ. Указаны основные пути управления активным, реактивным сопротивлениями и добротностью изоляции сетей в аварийном режиме.*

### ВВЕДЕНИЕ

В общем случае знание состояния изоляции электроустановок напряжением выше 1000 В, эксплуатирующихся в различных условиях горного производства является важным составным элементом решения задачи по обеспечению безопасности и безаварийности систем электроснабжения.

Все известные в настоящее время методы определения параметров изоляции электроустановок и сетей с изолированной нейтралью можно классифицировать следующим образом:

- использующие в качестве измерительного рабочего напряжение электроустановки;
- использующие в качестве измерительного напряжение постороннего источника промышленной частоты;
- использующие в качестве измерительного напряжение постороннего источника не промышленной частоты;
- использующие в качестве измерительного напряжение постороннего источника постоянного тока.

Для контроля изоляции на практике пользуются косвенными методами, а именно, по значению тока однофазного замыкания на землю вычисляют полное сопротивление изоляции определенной сети относительно земли. Различные методы измерения токов однофазного замыкания на землю можно условно разделить на методы прямого и косвенного измерения.

Прямой метод измерения при металлическом замыкании фазы на землю позволяет непосредственно оценить все необходимые значения, но обладает недостатком, резко ограничивающим его применение. В сетях с изолированной нейтралью металлические однофазные замыкания на землю сопровождаются появлением на здоровых и поврежденной фазах кратковременных перенапряжений, превышающих фазное напряжение в 3,5 – 4 раза. Указанные перенапряжения являются причиной пробоя изоляции в других местах, в результате чего могут возникнуть двойные замыкания на землю, которые представляют опасность для обслуживающего персонала и оборудования [1, 2].

Учитывая изложенное, более широко рекомендуется применять косвенные методы измерения токов замыкания, наиболее простым из которых для сетей с изолированной нейтралью, является замыкание фазы на землю через эталонное сопротивление [1]. Основное преимущество метода заключается в простоте опыта и практически исключается (при величине эталонного сопротивления несколько сотен Ом) возмож-

ность повреждения изоляции сети относительно земли в других точках карьерной сети, так как при замыкании на землю через активное сопротивление резко снижается уровень перенапряжений.

### ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Определение уровня полной проводимости изоляции относительно земли и ее составляющих (активной и емкостной) в трехфазной симметричной электрической сети с изолированной нейтралью напряжением выше 1000 В без снятия рабочего напряжения предлагается осуществлять способом, основанном на искусственном получении напряжения нулевой последовательности путем включения дополнительной активной проводимости в одну из фаз электрической сети [3].

В основу указанного способа положены известные соотношения величины напряжения нулевой последовательности и величины напряжения фазы относительно земли через проводимости изоляции (рис. 1):

$$U_0 = U_\phi \cdot \frac{Y_A + a^2 \cdot Y_B + a \cdot Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_N}, \quad (1)$$

где  $U_\phi$  – напряжение фазы относительно земли, соответствующее нормальному симметричному режиму работы сети;  $U_0$  – напряжения нулевой последовательности (смещения нейтрали);  $Y_A, Y_B, Y_C$  – полные проводимости изоляции фаз относительно земли;  $Y_N$  – полная проводимость изоляции между нейтралью и землей;  $a = (-1/2 + j \cdot \sqrt{3}/2)$  – операторный множитель.

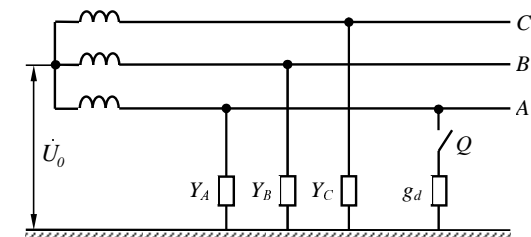


Рис.1. Схема замещения сети для пояснения способа косвенного определения параметров изоляции

Трехфазную электрическую сеть, где определяются параметры изоляции фаз сети относительно земли, принимаем симметричной; при этом значение напряжения нулевой последовательности равно нулю, а значения напряжений фаз сети относительно земли равны между собой:  $Y_A = Y_B = Y_C = U_\phi$ , тогда  $Y_A = Y_B = Y_C = Y = g + j \cdot \epsilon$ , где  $Y, g, \epsilon$  – соответственно полная, активная и емкостная проводимости изоляции фаз сети относительно земли.

Для определения параметров изоляции по предложенному способу в одну из фаз (например, фазу А), электроустановки вводим дополнительную активную проводимость  $g_d$ , тогда  $Y_A' = g + g_d + j \cdot \epsilon$ .

В основу указанного способа положены известные соотношения величины напряжения нулевой последовательности и величины напряжения фазы относительно земли через проводимости изоляции. Подставив это значение в (1), после преобразования получим:

$$U_0 = U_\Phi \cdot \left( \frac{g_d}{3 \cdot Y + g_d} \right) = U_\Phi \cdot \left( \frac{g_d}{G + j \cdot B + g_d} \right), \quad (2)$$

где  $G = 3 \cdot g$ ,  $B = 3 \cdot \epsilon$  – соответственно полная, активная и емкостная проводимости всей электрически связанной сети относительно земли.

Действующее значение напряжения нулевой последовательности при подключении к одной из фаз дополнительной проводимости равно:

$$U_0 = \sqrt{U_{0a}^2 + U_{0p}^2} = \frac{U_\Phi \cdot g_d}{\sqrt{(G + g_d)^2 + B^2}}. \quad (3)$$

Принимая во внимание, что для реальных параметров распределительных сетей напряжением 6-35 кВ при полностью изолированной нейтрали, векторы напряжений  $U_\Phi$ ,  $U_{\Phi 0}$ ,  $U_0$  образуют прямоугольный треугольник (рис. 2), а также учитывая соотношения  $U_0 = U_\Phi \cdot \cos \alpha$ ;  $U_{\Phi 0} = U_\Phi \cdot \sin \alpha$ ;  $U_{\Phi 0 \alpha} = U_\Phi \cdot \sin \alpha$ ;  $U = U_{0a} + U_{\Phi 0 \alpha}$  определяем:

- активную проводимость изоляции всей и одной фазы электрически связанной сети относительно земли:

$$G = \frac{U_\Phi^2 + \sqrt{U_\Phi^4 - 4 \cdot U_0^2 \cdot U_{\Phi 0}^2}}{2 \cdot U_0^2} \cdot g_d - g_d; \quad (4)$$

$$g = \frac{U_\Phi^2 + \sqrt{U_\Phi^4 - 4 \cdot U_0^2 \cdot U_{\Phi 0}^2}}{6 \cdot U_0^2} \cdot g_d - \frac{1}{3} \cdot g_d;$$

- емкостную проводимость изоляции всей и одной фазы сети относительно земли, а также емкость одной фазы относительно земли:

$$B = \frac{U_{\Phi 0}}{U_0} \cdot g_d; \quad \epsilon = \frac{1}{3} \cdot \frac{U_{\Phi 0}}{U_0} \cdot g_d; \quad (5)$$

$$C = \frac{\epsilon}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{1}{6} \cdot \frac{g_d \cdot U_{\Phi 0}}{\pi \cdot f \cdot U_0}.$$

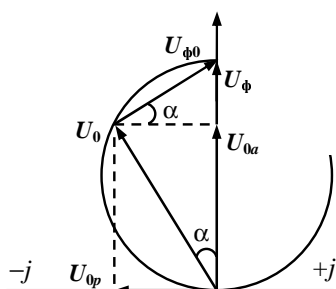


Рис. 2. Положения векторов напряжений  $U_\Phi$ ,  $U_{\Phi 0}$ ,  $U_0$  при подключении дополнительной проводимости

Для реальных параметров распределительных сетей и рекомендованных значений подключаемой дополнительной проводимости значением подкоренного выражения в (4) можно пренебречь, тогда получим упрощенные, но пригодные для инженерных расчетов, выражения для соответствующих активных про-

водимостей изоляции:

$$G = \frac{U_\Phi^2}{2 \cdot U_0^2} \cdot g_d - g_d; \quad g = \frac{U_\Phi^2}{6 \cdot U_0^2} \cdot g_d - \frac{1}{3} \cdot g_d. \quad (6)$$

По геометрической сумме активной и емкостной проводимостей определяем полную проводимость изоляции фаз электрической сети относительно земли:

$$Y = \sqrt{g^2 + \epsilon^2} =$$

$$= g_d \cdot \frac{\sqrt{U_\Phi^2 \cdot (U_\Phi^2 - 2 \cdot U_0^2)^2 + (2 \cdot U_{\Phi 0} \cdot U_0^2)^2}}{6 \cdot U_0^2 \cdot U_\Phi}. \quad (7)$$

Уравнения (4) – (6) положены в основу фазочувствительного способа определения параметров изоляции относительно земли электрической сетей напряжением выше 1000 В, находящийся под рабочим напряжением. Способ позволяет осуществлять как периодический оценочный расчет параметров изоляции, так и реализовать возможный непрерывный контроль состояния изоляции. К основному недостатку этого способа контроля параметров изоляции можно отнести то, что он пригоден для электрических сетей с симметричной (в нормальном режиме) изоляцией фаз относительно земли. При несимметрии системы до 3%, случайная относительная среднеквадратичная погрешность определения активной, емкостной и полной проводимости изоляции относительно земли электрической сети будет находиться в пределах 10 %.

Определение полных проводимостей изоляции фаз и их составляющих (активных и реактивных проводимостей) относительно земли в трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью при значительной несимметрии изоляции можно осуществлять способом, основанном на искусственном изменении величины напряжения нулевой последовательности путем включения дополнительной активной проводимости во все три фазы электроустановки в заданной последовательности, что, естественно, значительно усложняет процесс контроля.

Если произвести три последовательных измерения напряжений  $U_0$ ,  $U_A$ ,  $U_B$  и  $U_C$  при различных вариантах включения дополнительных проводимостей, то можно получить систему трех уравнений с тремя неизвестными ( $Y_A = g_A + j \cdot \epsilon_A$ ;  $Y_B = g_B + j \cdot \epsilon_B$ ;  $Y_C = g_C + j \cdot \epsilon_C$ ). При этом измеренные значения  $U_0$ ,  $U_A$ ,  $U_B$  и  $U_C$  следует представить в комплексной форме записи, для чего необходимо определить положения векторов названных напряжений на комплексной плоскости, т.е. предварительно определить значения углов между вектором соответствующего напряжения и действительной осью. Практическое применение указанной методики определения параметров проводимости фазной изоляции сети относительно земли значительно упрощается при использовании микро-ЭВМ или персонального компьютера.

Более перспективным является непрерывный и автоматический контроль значений составляющих изоляции электрической сети (активного и емкостного сопротивлений изоляции фаз сети относительно земли), который бы позволил оперативно прогнозировать появление опасных состояний системы и, при имеющейся технической возможности, вводить опережающие управляющие команды, позволяющие минимизировать возможный ущерб. Для указанных це-

лей предложено использовать наложение на сеть оперативных токов непромышленной частоты. Суть предложенного метода состоит в том, что на электрическую сеть одновременно накладываются два оперативных синусоидальных сигнала, частоты которых не равны между собой и отличается от промышленной. На контролируемых участках (линии или присоединении), а также в месте подключения оперативного источника устанавливаются устройства, назначением которых является снятие параметров оперативных сигналов и их соответствующая обработка с целью определения в указанных точках значений оперативных токов и напряжений. Зафиксированные (с заданной скважностью сканирования) параметры оперативных сигналов в цифровом виде подаются на входы микроконтроллера или компьютера, где используются для вычисления и передачи по заданному адресу обновляемых значений параметров изоляции:

$$R = U_1 \cdot U_2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{U_2^2 \cdot I_1^2 \cdot \omega_2^2 - U_1^2 \cdot I_2^2 \cdot \omega_1^2}}; \quad (7)$$

$$C = \frac{1}{U_1 \cdot U_2} \cdot \sqrt{\frac{U_2^2 \cdot I_1^2 - U_1^2 \cdot I_2^2}{(\omega_1^2 - \omega_2^2)}}$$

где  $U, I, \omega$  – значения соответственно напряжения, тока и угловой частоты накладываемых оперативных синусоидальных сигналов частотой  $f_1$  и  $f_2$ .

Метод одновременного наложения на сеть двух оперативных сигналов может также использоваться в сетях с компенсированной нейтралью для оперативного измерения значения индуктивности дугогасящего реактора (компенсирующего устройства) с целью автоматической его настройки в резонанс с емкостью распределительной сети.

### ВЫВОДЫ

Параметры изоляции электрических сетей непосредственно связаны со значениями аварийных токов и характером переходных процессов при самых распространенных повреждениях – однофазных замыканиях на землю. В этой связи можно утверждать, что управление параметрами изоляции связано с процессами:

- локализации (отключения) мест с ослабленной (поврежденной) изоляцией – управление общим активным сопротивлением изоляции распределительной сети;
- минимизация (компенсация емкостной составляющей тока замыкания на землю и управление настройкой компенсирующего устройства) значений аварийного тока – управление общим реактивным сопротивлением изоляции распределительной сети;
- оптимизации режима нейтрали сети – управление добротностью распределительной сети с целью подавления переходных и феррорезонансных процессов, сопровождающих аварийные режимы.

Локализации (отключения) мест с ослабленной (поврежденной) изоляцией обеспечивается применением защиты от однофазных замыканий на землю, которая в системах электроснабжения горных предприятий выполняется двухступенчатой и в соответствии с отраслевыми требованиями действует на отключение.

Режим работы нейтрали (полностью изолированная нейтраль, компенсированная нейтраль, с резистором в нейтрали) электрических сетей напряжением выше 1000 В существенно влияет не только на рабо-

тоспособность устройств защиты от замыканий на землю, но также на значение аварийных токов и на уровень внутренних перенапряжений, сопровождающих такие аварийные режимы, т.е. на повреждаемость электрических сетей и оборудования [1, 4, 5].

В распределительных сетях напряжением 6-10 кВ при применении дугогасящих реакторов, которые в большинстве случаев не оборудованы устройствами автоматической настройки режима компенсации, рекомендуется использовать комбинированный режим работы нейтрали [6]. Суть комбинированного режима заземления нейтрали состоит в том, что кроме создания индуктивной составляющей тока однофазного замыкания на землю, предлагается также одновременно накладывать на ток замыкания и активную составляющую. Значение накладываемой на сеть активной составляющей тока замыкания на землю должно быть на уровне 30-50 % от емкостной составляющей, что обеспечивает эксплуатационные показатели адекватные сетям с резистором в нейтрали даже при расстройках дугогасящего реактора до 50 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пивняк Г.Г., Шкрабец Ф.П. Несимметричные повреждения в электрических сетях карьеров: Справочное пособие. – М.: Недра, 1993. – 192 с.
2. Самойлович И.С. Режимы нейтрали электрических сетей карьеров. – М.: Недра, 1976. – 175 с.
3. Шкрабец Ф.П., Скосярев В.Г. Теоретическое обоснование способа определения параметров изоляции электрических сетей // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Інститут геотехнічної механіки НАН України, – Д.: 2000. – Вип. 22. – С. 13-18.
4. Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М. Режимы нейтрали электрических сетей. – К.: Наукова думка, 1985. – 264 с.
5. Шкрабец Ф.П., Шидловская Н.А., Дзюбан В.С., Вареник Е.А. Анализ параметров и процессов в шахтных электрических сетях. – Д.: НГУ, 2003. – 151 с.
6. Шкрабец Ф.П., Баласмех Ф.К., Скосярев В.Г. Комбинированный режим работы нейтрали распределительных сетей напряжением 6-35 кВ // Гірнич електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2000. – Вип. 65. – С. 46-51.

Поступила 03.09.2009

*Шкрабец Федор Павлович*, д.т.н., проф.,  
*Цыпленков Дмитрий Владимирович*, к.т.н., доц.,  
*Кириченко Марина Сергеевна*, аспирант  
 Национальный горный университет (НГУ)  
 Украина, 49005, Днепропетровск, пр. Карла Маркса 19, НГУ  
 кафедра "Электрические машины"  
 тел./факс (056) 370-13-92, e-mail: nmu.em@ua.fm,  
 ShkrabetsF@nmu.org.ua

*Ковалев Александр Иванович*, главный энергетик  
 ОАО "Южный горно-обогатительный комбинат"  
 Украина, 50034, Днепропетровская область, Кривой Рог

### *F.P. Shkrabets, D.V. Tsyplenkov, A.I. Kovalev, M.S. Kirichenko* **Insulation parameters of distribution mains: monitoring and control**

Principles of indirect discrete monitoring of insulation parameters are expounded on the basis of artificial displacement of the neutral and continuous selective control based on bi-frequency operative signals overlapping in distributive mains of 6-10 kV. The basic ways of control of active, reactive resistances and insulation good quality of the mains under emergency conditions are shown.

**Key words** – **insulation parameters monitoring, displacement of neutral, operative signal**