

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ, ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УСТРОЙСТВАХ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6-10 КВ СЕТЕВЫХ РАЙОНОВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

### Введение

Сети напряжением 6-10 кВ подстанций сетевых районов имеют, как правило, смешанный характер и значительную разветвленность. Согласно [1] сети такого напряжения работают либо с изолированной нейтралью, либо с заземленной через настроенную индуктивность. Как показывают исследования проведенные в [2], наиболее распространенным видом повреждений таких сетей является однофазное замыкание на землю (ОЗЗ). Для борьбы с данным видом повреждений используется двухступенчатая система защиты с действием на сигнал. Первая ступень – токовая или направленная защита поврежденного присоединения, вторая ступень – защита установленная на подстанции и действующая сигнал.

### Анализ последних достижений и публикаций

Режим нейтрали зависит от значений емкостного тока всей гальванически связанной сети. В зависимости от режима нейтрали изменяются параметры сети, на которые настроены устройства защиты. Емкостные токи отходящих присоединений часто бывают ниже рабочих токов. В таком случае обеспечить селективность ступеней срабатывания особенно сложно. Преобладание однофазных замыканий на землю в рассматриваемых сетях над другими видами повреждений, неявновыраженный аварийный характер работы сети при таком повреждении, а также значительный диапазон изменения параметров нулевой последовательности, привели к разработке большого количества весьма разнообразных устройств защиты от ОЗЗ, которые можно классифицировать по принципу их действия на четыре основные группы [3]:

1) защитные устройства, реагирующие на параметры установившегося режима замыкания;

2) защитные устройства, реагирующие на параметры переходного процесса при замыканиях на землю;

3) защитные устройства, реагирующие на наложенные на сеть токи непромышленной частоты;

4) комбинированные устройства защиты.

Следует отметить, что ни одно из защитных устройств не может гарантировать благополучного исхода при прикосновении человека к токоведущим частям в сетях с любым режимом нейтрали при напряжении 6 кВ и выше. Поэтому основным назначением устройств защиты от замыканий на землю следует считать обеспечение электробезопасности при действии напряжения прикосновения, надежности электрообеспечения и недопущение дальнейшего развития аварий. Исходя из этого, основными требованиями, предъявляемыми к устройствам защиты распределительных сетей от несимметричных повреждений являются:

1) чувствительность к параметрам контролируемых величин; 2) селективность (избирательность) действий; 3) высокая функциональная и аппаратная надежность; 4) работоспособность в широком диапазоне изменения входных сигналов.

Научный и практический интерес представляют исследования работоспособности известных средств защиты при возможных видах режима работы нейтрали распределительных сетей.

К устройствам защиты, реагирующих на параметры установившегося режима однофазного замыкания на землю в распределительных сетях напряжением 6-10 кВ следует отнести:

– устройства, реагирующие на ток нулевой последовательности (максимальные токовые защиты нулевой последовательности);

– устройства, реагирующие на напряжение нулевой последовательности;

– устройства, реагирующие на ток и напряжение нулевой последовательности и угол между этими величинами (направленные устройства защиты).

Широкое применение токовых защит ограничивается относительно низкой чувствительностью, которая связана с необходимостью выбора тока срабатывания, исходя из условия от-

стройки от собственного емкостного тока защищаемого присоединения и, как правило, с учетом переходного процесса. В общем случае ток срабатывания простой токовой защиты определяется выражением:

$$I_{c3} = K_{\delta} I_{oc} \quad (1)$$

где  $K_{\delta}$  – коэффициент надежности, вводимый для отстройки от бросков собственного емкостного тока при переходном процессе, принимается  $K_{\delta} = 4 \div 5$ ;  $I_{oc}$  – собственный емкостной ток защищаемого присоединения.

Рекомендуемый коэффициент чувствительности простой токовой защиты должен быть:

$$K_{ч} = \frac{I_3}{I_{c3}} \geq 1.25 \dots 1.5$$

Выражение для коэффициента чувствительности можно записать в иной форме:

$$K_{ч} = \frac{I_3^{(1)}}{K_{\delta} I_{oc}} = \frac{3 U_{\phi} \omega C}{K_{\delta} 3 U_{\phi} \omega C_1} = \frac{C}{K_{\delta} C_1} \geq 1.25 \dots 1.5 \quad (2)$$

где  $I_3^{(1)} = 3 U_{\phi} \omega C$  и  $I_{oc} = 3 U_{\phi} \omega C_1$  – соответственно полный емкостной ток сети и собственный емкостной ток защищаемой линии при металлическом замыкании на землю, определяемый без учета активной составляющей проводимости изоляции сети.

Из выражения (2) с учетом  $K_{\delta}$  можно получить:

$$C \leq \frac{C}{(4 \dots 5)(1.25 \dots 1.5)} = \frac{C}{5 \dots 7.5} \quad (3)$$

Последнее выражение является условием применимости токовой защиты, то есть применение простой токовой защиты оправдано по условиям чувствительности при емкости защищаемой линии меньше в  $5 \div 7.5$  раз емкости всей электрически связанной сети. При несоблюдении указанного условия селективность работы нарушается. Необходимость выполнения условия (3) значительно ограничивает область применения токовых защит, тем более, если учитывать, что в процессе эксплуатации емкость всей сети, а также отдельных линий значительно меняется.

Достоинством простых токовых защит, реагирующих на ток нулевой последовательности, следует считать то, что такие защиты в отличие, от направленных устройств, реагируют на сравнительно более опасные двойные замыкания на землю.

Устройства направленной защиты от однофазных замыканий на землю, реагирующие на

параметры установившегося режима замыкания, работают на основе сравнения по фазе тока и напряжения нулевой последовательности. Указанные устройства рекомендованы только для сетей с полностью изолированной нейтралью.

Для реализации защиты направленного действия используется защита от ОЗЗ типа РДЗ-2М. Основными элементами первой ступени этих защит являются реле направленного действия типа РЗД и трансформатор тока нулевой последовательности типа ТЗЛ или ТНП-1М. Реле РЗД реагирует на направление мощности нулевой последовательности и может быть использовано как при полностью изолированной нейтрали сети, так и при заземлении нейтрали через резистор. В последнем случае возникает дополнительная активная составляющая тока замыкания на землю, значение которой необходимо выбирать с учетом возможных фазовых искажений и обеспечения работоспособности направленной защиты.

Основными причинами неудовлетворительной работы направленных устройств защиты в сетях с изолированной нейтралью следует считать наличие переходных процессов, сопровождающих как возникновение замыкания фазы на землю, так и отключение поврежденного присоединения. К причинам, вызывающим ложную работу существующих устройств направленной защиты, следует отнести также несовершенство схемных решений. Из этой группы причин следует выделить следующие:

- недостаточную отстройку устройств по каналам тока и напряжения нулевой последовательности от высших гармонических составляющих, уровень которых может быть значительным, особенно при замыканиях через перемежающуюся дугу;

- широкая угловая зона срабатывания, которая составляет примерно  $180 \div 210^\circ$ , что приводит к совпадению во времени сравниваемых сигналов за счет их фазовых искажений, обусловленных угловыми погрешностями трансформаторов тока и напряжения, фазовыми сдвигами сигналов непосредственно в схеме устройства и т.п.

Дуговые замыкания на землю появляются вследствие нескольких импульсных перекрытий в течение периода и сопровождаются также переходными процессами с последующим установлением тока дугового замыкания промышленной частоты. Длительность горения электрической дуги и интервалы, через которые она повторяется, определяются быстродействи-

ем и режимом настройки дугогасящего реактора в компенсированных сетях, а также временными характеристиками.

### Формулирование целей и постановка задачи

Исходя из рассмотренных недостатков, существующих принципов построения защит от ОЗЗ, построение системы контроля параметров изоляции распределительной сети и разработка метода защиты от ОЗЗ является актуальной научной задачей.

### Изложение основного материала

В процессе эксплуатации систем электроснабжения по ряду причин и в первую очередь с целью прогнозирования уровня электробезопасности и надежности электрических сетей и установок необходимо знать состояние их изоляции. Надежность и безопасность работы систем электроснабжения во многом зависит от значений активного и реактивного сопротивлений изоляции электрической сети относительно земли. Для получения более достоверной информации о состоянии изоляции фаз сети относительно земли и косвенной оценки эксплуатационных характеристик систем электроснабжения необходимо производить желательный непрерывный мониторинг параметров изоляции и режима настройки дугогасящих реакторов под рабочим напряжением. Это позволит в упреждающем режиме отслеживать появление опасных состояний системы и, при имеющейся технической возможности, вводить опережающие управляющие команды, позволяющие минимизировать возможный ущерб.

Для целей автоматического и селективного контроля параметров изоляции (активного, реактивного и при необходимости полного сопротивлений относительно земли) в распределительных сетях предлагается использовать метод непрерывного измерения значений составляющих сопротивления изоляции сети относительно земли под рабочим напряжением, основанный на использовании наложенных на сеть оперативных токов промышленной частоты (рис.1). Суть предложенного метода непрерывного и оперативного контроля параметров изоляции относительно земли электрической сети и ее элементов состоит в том, что на электрическую сеть одновременно накладываются два оперативных синусоидальных сигнала (источники ИОС-1 и ИОС-2), частоты которых не равны между собой и отличается от промышленной.

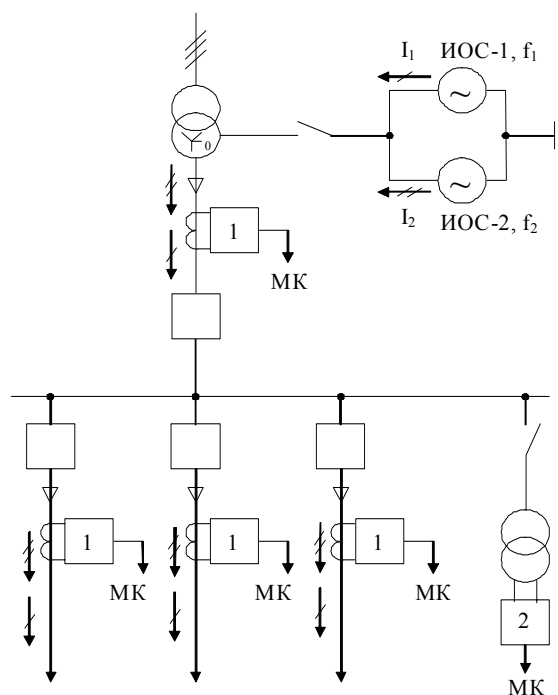


Рис. 1 - Схема, поясняющая метод непрерывного контроля параметров изоляции распределительной сети: 1 – устройство выделения и обработки оперативных токов; 2 – устройство выделения и обработки оперативных напряжений

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 МК, где используются для вычисления и передачи по заданному адресу непрерывно (регулярно) обновляемых значений параметров изоляции.

Для оперативных накладываемых на сеть сигналов рекомендуется использовать частоты 100 и 200 Гц. Этот выбор обусловлен практически полным отсутствием в системах электроснабжения четных гармоник, что резко снижает погрешность измерения от влияния помех, и относительно малым влиянием емкости присоединений и сети в целом на загрузку оперативного источника [3].

В общем случае значение накладываемого на распределительную сеть оперативного синусоидального тока определяется значениями напряжения оперативного источника  $U$  и проводимости относительно земли всей распре-

лительной сети (или, при необходимости, контролируемого участка):

$$\underline{I} = \underline{U} \underline{Y}, \quad (4)$$

где  $\underline{Y} = \frac{1}{R} + j\omega_{\text{оп}} C$ , или  $\underline{Y} = \frac{1 + j\omega_{\text{н}} CR}{R}$

комплексную проводимость изоляции сети или участка для оперативной частоты  $\omega_{\text{оп}}$ ;  $R$  и  $C$  – соответственно значения активного сопротивления и емкости относительно земли изоляции трех фаз контролируемого участка или сети, при этом

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C}, \text{ и}$$

$$C = C_A + C_B + C_C.$$

Комплексное сопротивление оперативному току определится выражением:

$$\underline{z} = \frac{1}{\underline{Y}} = \frac{R}{1 + j\omega_{\text{оп}} CR} = \frac{R(1 - j\omega_{\text{оп}} CR)}{1 + \omega_{\text{оп}}^2 C^2 R^2}, \quad (5)$$

а ток через приведенное сопротивление будет равен

$$\underline{I} = \frac{U}{R}(1 + j\omega_{\text{оп}} CR), \quad (6)$$

или его действующие значения:

$$I = \frac{U}{R} \sqrt{1 + \omega_{\text{оп}}^2 C^2 R^2}. \quad (7)$$

Если на электрическую сеть накладываются одновременно два оперативных сигнала с разными частотами (рис 3), то тогда от каждого оперативного источника будем иметь токи:

$$I_1 = \frac{U_1 \sqrt{1 + \omega_1^2 C^2 R^2}}{R},$$

$$I_2 = \frac{U_2 \sqrt{1 + \omega_2^2 C^2 R^2}}{R}, \quad (8)$$

где  $I_1$ ,  $U_1$ ,  $\omega_1$  – ток, напряжение и частота первого оперативного источника;  $I_2$ ,  $U_2$ ,  $\omega_2$  – ток, напряжение и частота от второго оперативного источника.

Решив уравнения (8) относительно  $R$  получим:

$$R_1 = \sqrt{\frac{U_1^2}{I_1^2 - U_1^2 \omega_1^2 C^2}},$$

$$R_2 = \sqrt{\frac{U_2^2}{I_2^2 - U_2^2 \omega_2^2 C^2}}. \quad (9)$$

Предположим, что значение активного сопротивления изоляции контролируемого участ-

ка (сети) не изменяется за время измерения, т.е.  $R = const$ , приравняем и правые части выражений (6)

$$\frac{U_1^2}{I_1^2 - U_1^2 \omega_1^2 C^2} = \frac{U_2^2}{I_2^2 - U_2^2 \omega_2^2 C^2},$$

и решив новое уравнение относительно  $C$ , получим выражение для суммарной емкости трех фаз всей сети или соответствующего контролируемого участка (присоединения) относительно земли:

$$C = \frac{1}{U_1 U_2} \sqrt{\frac{U_2^2 I_1^2 - U_1^2 I_2^2}{(\omega_1^2 - \omega_2^2)}}. \quad (10)$$

Аналогичным образом, предположив, что значение емкости относительно земли контролируемого участка или сети не изменяется ( $C = const$ ), проведя необходимые преобразования, получим выражение для активного сопротивления изоляции относительно земли трех фаз всей сети или соответствующего контролируемого участка (присоединения):

$$R = U_1 U_2 \sqrt{\frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{U_2^2 I_1^2 \omega_2^2 - U_1^2 I_2^2 \omega_1^2}}. \quad (11)$$

## Выводы

Рассмотренный алгоритм работы метода контроля параметров изоляции относительно земли может быть использован при проектировании новых устройств избирательной сигнализации или защиты от замыканий на землю защиты в системах электроснабжения независимо от конфигурации и режима работы нейтрали сети.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Правила устройства электроустановок. [Текст] – X.: Издательство «ИНДУСТРИЯ», 2007. – 416 с.
2. Сирота, И.М. Режимы нейтрали электрических сетей. [Текст] И.М. Сирота, С.И. Кисленко, А.М. Михайлов – Киев. Наукова думка, 1985.
3. Пивняк Г.Г., Шкрабец Ф.П. Несимметричные повреждения в электрических сетях карьеров: Справочное пособие. [Текст] – М.: Недра, 1993. – 192 с.
4. Черников А.А. Компенсация емкостных токов в сетях с незаземленной нейтралью. [Текст] Черников А.А. – М.: Энергия, 1974. – 174 с.