

Эксклюзивные методики в области релейной защиты, применяемые в ПАО «Магаданэнерго», неоднократно становились темами публикаций в «Новостях ЭлектроТехники» (www.news.elteh.ru).

В новой статье Виктор Дмитриевич Ластовкин и Михаил Викторович Васильченко представляют авторский метод идентификации обрыва фазы по измеренному (вычисленному) ёмкостному току, применяемый для определения мест повреждения на ВЛ.

ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ 110 кВ НА ДЕРЕВЯННЫХ ОПОРАХ

Определение места повреждения при сложных несимметриях



Виктор Ластовкин,
начальник
службы РЗАиМ

Михаил Васильченко,
начальник
лаборатории РЗА
службы РЗАиМ

ПАО «Магаданэнерго», г. Магадан

Идентификация обрыва фазы по измеренному (вычисленному) ёмкостному току применяется для определения мест повреждения (ОМП) на ВЛ 110 кВ с деревянными опорами при таком виде сложной несимметрии, как обрыв одной фазы с замыканием на землю со стороны питающей подстанции.

РАСЧЕТНАЯ (ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ) МОДЕЛЬ

Известно, что в фазах ненагруженной ВЛ 110 кВ протекают ёмкостные токи (токи смещения), обусловленные ёмкостью проводов (фаз) относительно земли C_0 и взаимной ёмкостью между проводами (фазами) $C_{мф}$ трехфазной линии. Полный ёмкостный ток в фазе симметричной линии (1) определяется ёмкостью прямой последовательности $C_1 = C_0 + 3C_{мф}$ и длиной линии электропередачи (L). Удельный ёмкостный ток для ВЛ 110 кВ составляет в среднем 0,16 А/км [1] при $U_{ном} = 110$ кВ.

При обрыве провода в одной фазе трехфазной ВЛ ёмкостный ток линии (2) в фазе с обрывом (особой фазе А) уменьшается пропорционально расстоянию до места обрыва ($l_{обр}$) и характеризуется неравенством $I_{C,A} < I_{C,L}$.

$$I_{C,L} = \omega C_1 \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} L, \quad (1)$$

$$I_{C,A} = \omega C_1 \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} l_{обр}. \quad (2)$$

На рис. 1 приведена схема замещения (расчетная модель) для особой фазы А трехфазной линии электропередачи с учетом только поперечных параметров линии применительно к рассматриваемой сложной несимметрии: обрыв одной фазы с замыканием на землю со стороны питающей подстанции. Продольными параметрами линии – индуктивным и активным сопротивлением проводов фаз линии – можно пренебречь, так как их значения на два порядка (10^{-2}) меньше значений поперечных параметров: ёмкостного сопротивления, обусловленного $C_{1,A}$, и сопротивления шунта ($R_{ш}$), равного переходному сопротивлению ($R_{л}$) провода фазы в месте обрыва с замыканием на землю.

АЛГОРИТМ ОМП

При обрыве одной фазы с замыканием на землю со стороны питающей подстанции надо рассматривать два случая замыкания на землю:

- замыкание индуктивного характера при относительно небольших $R_{л}$ в месте замыкания;

- замыкание ёмкостного характера при относительно больших $R_{л}$.

В случае замыкания индуктивного характера (продольные параметры линии и $R_{л}$ соизмеримы) фаза тока в особой фазе А будет иметь отрицательное (–) значение угла, а угол сдвига фаз – положительное (+) значение. В этом случае достоверность ОМП будет определяться значением угла сдвига фаз между током и напряжением. Данный подход к одностороннему ОМП по параметрам аварийного режима хорошо изучен и реализован в отечественных устройствах, например «Сириус-2-ОМП» [2, 3].

Обратимся к другому случаю – замыканию на землю ёмкостного характера, и в частности к обрыву с замыканием на землю ёмкостного характера.

Такое замыкание на землю будет характеризоваться отрицательным значением угла сдвига фаз между током и напряжением в особой фазе А. При этом прибор покажет некоторое фиктивное расстояние со знаком (–), что означает замыкание «за спиной».

На самом деле знак (–) обусловлен отрицательным значением $\sin \varphi_3$, что станет понятным, если использовать наглядный упрощенный подход к определению расстояния в соответствии с дистанционным принципом ОМП при однофазном замыкании на землю [2].

Итак, при однофазном замыкании на землю ёмкостного характера с обрывом или без обрыва провода фазы в соответствии с диагностической моделью на рис. 1 можно определить значение ёмкостного тока в особой фазе А:

$$I_{C,A} = I_{3,A}^{(1)} \sin |-\varphi_3|. \quad (3)$$

Наконец, по аналитическому выражению (4) вычисляется расстояние:

$$l_{обр} = \frac{I_{3,A}^{(1)} U_{ном}}{I_{C,уд} U_{раб}} \sin |-\varphi_3|, \quad (4)$$

где:

$I_{3,A}^{(1)}$ – ток однофазного замыкания в особой фазе А, А;

$I_{C,уд}$ – удельный ёмкостный ток линии, равный 0,16 А/км при $U_{ном} = 110$ кВ;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение линии, кВ;

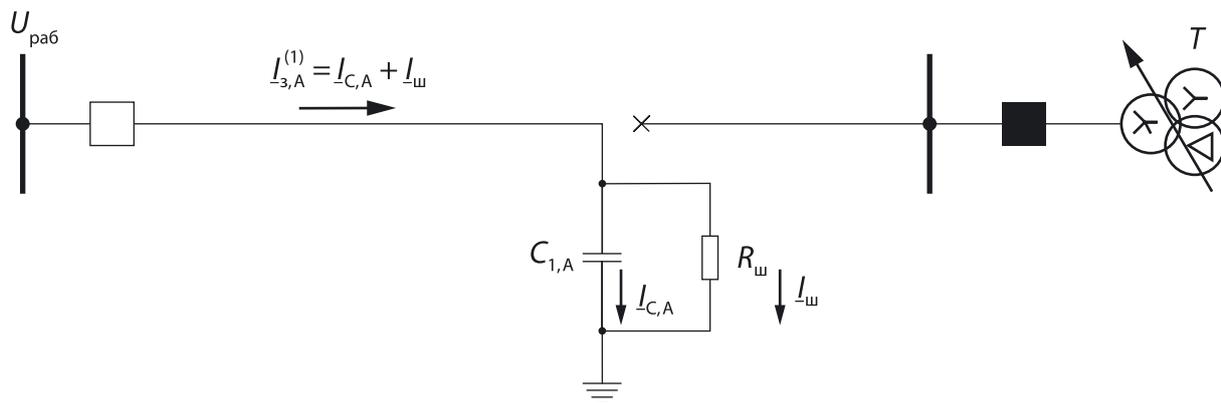
$U_{раб}$ – рабочее напряжение на шинах питающей подстанции, кВ;

φ_3 – угол сдвига фаз между $I_{3,A}^{(1)}$ и $U_{раб}$, эл. град.

Значение $I_{C,уд}$ должно быть приведено к рабочему напряжению на шинах питающей подстанции с помощью коэффициента приведения $K_U = U_{раб} / U_{ном}$.

Расчетная (диагностическая) модель обрыва фазы с замыканием на землю ёмкостного характера

Рис. 1 •



РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРЫВА ФАЗЫ С ЗАМЫКАНИЕМ НА ЗЕМЛЮ

При замыкании на землю на линиях с двухсторонним или односторонним питанием (радиальных) с токами подпитки, находящимися в зоне несрабатывания релейной защиты или срабатывания самых чувствительных ступеней ТЗНП (30–40 А), необходимо определить вид несимметрии: одно-кратная (замыкание на землю) или сложная (обрыв с замыканием на землю со стороны подпитки).

Чтобы применить адекватный подход (инструменты) для ОМП линии, следует вычислить по данным ОМП (измерений) ёмкостную составляющую тока в дефектной фазе линии при первичном замыкании или в цикле опробования ВЛ рабочим напряжением.

В любом случае, если характер (режим) замыкания ёмкостный, по ёмкостной составляющей тока однофазного замыкания в особой фазе $Im I_{3,A}^{(1)} = -jI_{C,A}$, $Re I_{3,A}^{(1)} > 0$ определяется вид повреждения (несимметрии) линии:

- при $|-jI_{C,A}| \geq I_{C,L}$ – замыкание без обрыва;
- при $|-jI_{C,A}| < I_{C,L}$ – обрыв с замыканием на землю.

Затем по отношению ёмкостного тока в особой фазе к удельному току $I_{C,A} / I_{C,уд}$ следует определить расстояние до места обрыва фазы с замыканием на землю через большое переходное сопротивление $R_{ш}$.

Значение тока $I_{C,уд} = \omega \cdot C_1 \cdot U_{ном} / \sqrt{3} = 0,16 \text{ А/км}$ должно быть приведено к рабочему напряжению линии с использованием коэффициента $K_U = U_{раб} / U_{ном}$.

Пример

10.02.2018 действием 2-й ступени ТЗНП ($I_{0,з} = 35 \text{ А}$) была аварийно отключена ВЛ 110 кВ «Балаганах–Юбилейный» (работала в режиме XX) филиала ПАО «Магаданэнерго» Западные электрические сети.

Длина линии – 95 км, усредненный пролет – 219 м.

Данные ОМП (выписка из протокола срабатывания МПУстройства ИМФ-ЗР):

$$\begin{aligned} 3I_0 &= 0,03 \text{ кА}; \underline{U}_A = 69,9 \text{ кВ } \angle 0^\circ; \\ I_A &= 0,03 \text{ кА } \angle 16^\circ; \underline{U}_B = 70,8 \text{ кВ } \angle -118^\circ; \\ I_B &= 0,01 \text{ кА } \angle -27^\circ; \underline{U}_C = 69,7 \text{ кВ } \angle 121^\circ; \\ I_C &= 0,01 \text{ кА } \angle -157^\circ. \end{aligned}$$

Анализ данных ОМП аварийного отключения показал, что в фазах В и С наблюдается ёмкостный ток, равный примерно $I_{C,В(С)} = (0,16 \cdot 70 / 63,5) \cdot L = 18 \text{ А}$.

Разрешающая способность ИМФ – 10 А при работе пусковых органов, поэтому прибор фиксирует токи, равные по модулю 10 А в фазах В и С с углом сдвига фаз между напряжением и током приблизительно $\varphi_{В(С)} \approx -90^\circ$ (ёмкостный ток).

В фазе А наблюдается однофазное замыкание на землю ёмкостного характера, так как $\varphi = \psi_u - \psi_i = -16^\circ$, где ψ – начальная фаза соответственно напряжения и тока.

Проверка версии обрыва фазы с замыканием на землю:

$$l_{обр} = \frac{I_{3,A}^{(1)} U_{ном}}{I_{C,уд} U_{раб}} \sin | -16^\circ | = 55 \text{ км},$$

где $I_{3,A}^{(1)} = 35 \text{ А}$ – значение тока, принятое равным текущему значению тока в фазе А на момент срабатывания второй ступени ТЗНП при мониторинге тока по прибору ИМФ-ЗР; $U_{раб} = 69,9 \cdot \sqrt{3} \text{ кВ}$.

Проверка достоверности определения расстояния до места обрыва фазы с замыканием на землю:

$$l_{обр} = l_{уср} \cdot N_{опоры} = 58 \text{ км},$$

где $l_{уср} = 219 \text{ м}$ – длина усредненного пролета ВЛ;

$N_{опоры}$ – номер опоры, в смежном пролете которой (269–270) обнаружен обрыв.

Погрешность определения расстояния:

$$\delta = \frac{l_{обр,расч} - l_{обр,дейст}}{L} 100\% = -3\%.$$

ВЫВОДЫ

При обрывах с замыканием на землю методы ОМП по ПАР, применяемые для ВЛ 110 кВ с деревянными опорами с односторонним или двухсторонним питанием, являются не расчетными.

На линиях с двухсторонним питанием при обрывах с замыканием на землю с двух сторон одной фазы переходные сопротивления в месте замыкания, равно как их динамика, различны для каждой питающей стороны, поэтому применить итерационный расчет или расчет по формуле по методу двухстороннего измерения параметров не представляется возможным.

Кроме того, в этом случае и в случае ВЛ с односторонним питанием применение метода одностороннего ОМП при ёмкостном характере однофазного замыкания на землю невозможно, так как алгоритм ОМП построен на определении продольных параметров ВЛ.

Описанный подход – единственно возможный и применим только к обрывам фазы с замыканием на землю ёмкостного характера. Эффективность метода определяется целиком достоверностью фиксации (измерения) параметров замыкания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110–750 кВ. М.: Энергия, 1979.
2. Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / под ред. В.А. Шуина. М.: Энергоатомиздат, 2003.
3. Устройство определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи «Сириус-2-ОМП»: Руководство по эксплуатации. М.: ЗАО «РАДИУС-Автоматика», 2010. ■