УДК 621.316.125

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ДИСТАНЦИОННОГО ВЫЯВЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОГО УЧАСТКА ПРИ ОДНОФАЗНОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ В ГОРОДСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Канд. техн. наук, доц. ДЬЯЧЕНКО М. Д., инж. МИРОНОВ А. С., аспиранты БУРЛАКА В. В., ПОДНЕБЕННАЯ С. К.

Приазовский государственный технический университет

В городских распределительных сетях электроснабжения 6–10 кВ для потребителей третьей категории широко применяется петлевая схема электроснабжения. В этой схеме от распределительной подстанции (РП) питается цепочка последовательно соединенных трансформаторных подстанций (ТП), вторым концом присоединенная ко второй секции шин этой же или к другой РП. В нормальном режиме петля должна быть разомкнута для обеспечения селективности действий РЗА и глубокого секционирования сети. Городская сеть представляет собой ряд цепочек последовательно соединенных нагрузок, иногда с небольшими ответвлениями. Это дает возможность отключения любого участка без нарушения электроснабжения потребителей, но усложняет процесс выявления однофазных замыканий.

В работе представлен метод выявления однофазного замыкания на землю (ОЗЗ), позволяющий дистанционно определять поврежденный участок, что дает возможность селективного отключения поврежденного участка сети.

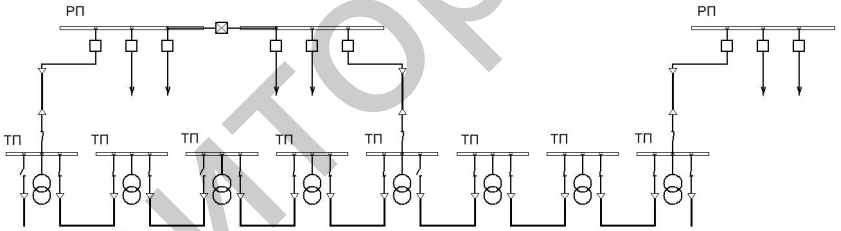

Рис. 1. Структура петлевой схемы электроснабжения

Известно множество способов выявления поврежденного присоединения при ОЗЗ [1, 2]. В сетях с изолированной нейтралью для селективного отключения или сигнализации может быть использована токовая отсечка или максимальная токовая защита (МТЗ) по току нулевой последовательности. Для сетей с компенсированной нейтралью более эффективно применение направленных и поперечно-дифференциальных защит нулевой последовательности [3].

Дистанционное определение повреждения производится путем измерения сопротивления линии от РП до точки замыкания. Отличительной особенностью представленной методики является использование тока нагрузки для увеличения точности измерения сопротивления, так как падение напряжения в линии, созданное током ОЗЗ, достаточно мало и определить его с необходимой точностью проблематично.

Репозиторий БНТУ

Рассмотрим принцип определения сопротивления линии между РП и местом ОЗЗ.

Считаем ОЗЗ металлическим и пренебрегаем падением напряжения на переходном сопротивлении замыкания, броне кабеля и земле. Тогда напряжение поврежденной фазы относительно земли $\dot{U}_{ф}$ в точке замыкания

$$\dot{U}_{ф} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0, \tag{1}$$

где $\dot{U}_1,\ \dot{U}_2,\ \dot{U}_0$ – напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей в точке замыкания. Запишем аналогичное выражение для измеряемой величины напряжения $\dot{U}'_{ф}$ на шинах РП

$$\dot{U}'_{ф} = \dot{U}'_1 + \dot{U}'_2 + \dot{U}'_0 \neq 0, \tag{2}$$

где $\dot{U}'_1,\ \dot{U}'_2,\ \dot{U}'_0$ – напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей в точке измерения.

Измеряемое напряжение поврежденной фазы относительно земли:

$$\dot{U}'_{ф} = (\dot{U}'_1 - \dot{U}_1\ ) + (\dot{U}'_2 - \dot{U}_2) + (\dot{U}'_0 - \dot{U}_0); \tag{3}$$

$$\dot{U}'_{ф} = \Delta\dot{U}_1 + \Delta\dot{U}_2 + \Delta\dot{U}_0; \tag{4}$$

$$\dot{U}'_{ф} = I_1 Z_1 + I_2 Z_2 + I_0 Z_0. \tag{5}$$

Неравенство (2) обусловлено падением напряжения в линии. Величины $\dot{U}'_1,\ \dot{U}'_2,\ \dot{U}'_0$ отличаются от соответствующих значений в точке замыкания на падение напряжений в линии от протекания токов $\dot{I}_1,\ \dot{I}_2,\ \dot{I}_0$ через сопротивления линии данной последовательности.

Сопротивление линии для обратной последовательности обычно равно сопротивлению для прямой последовательности, поэтому удобно использовать суммарное напряжение и суммарный ток прямой и обратной последовательностей для поврежденной фазы.

Ток нулевой последовательности намного меньше тока нагрузки и направлен встречно току прямой последовательности – от места повреждения к РП. Хотя сопротивление линии току нулевой последовательности выше сопротивления току прямой последовательности в силу малости тока замыкания, а также незначительности взаимоиндукции в кабельных линиях, можно принять:

$$\dot{U}'_{ф} = (I_1 + I_2 + I_0)\overline{Z}_1; \tag{6}$$

$$\dot{U}'_{ф} = I_{ф}\overline{Z}_1. \tag{7}$$

Таким образом, напряжение поврежденной фазы относительно земли обусловлено протеканием тока нагрузки фазы. Тогда возможно определить

Репозиторий БНТУ

точку замыкания по длине линии, зная $\dot{U}'_{\text{ф}}$, ток поврежденной фазы $\dot{I}_{\text{ф}}$ и погонное сопротивление линии $\overline{Z}_{\text{пог}}$.

$$l = \frac{\dot{U}'_{\text{ф}}}{\dot{I}_{\text{ф}} \overline{Z}_{\text{пог}}}. \tag{8}$$

Измеряемой величиной является напряжение $\dot{U}'_{\text{ф}}$ поврежденной фазы относительно земли, единственное неискаженное напряжение вследствие насыщения трансформатора напряжения при ОЗЗ.

Приведенные выше выкладки справедливы для металлического замыкания на землю. В действительности разность напряжений будет значительно выше расчетной из-за падения напряжения от протекания тока нулевой последовательности в переходном сопротивлении замыкания, броне кабеля и земле. Для корректного измерения сопротивления линии необходимо отстроиться от этой величины. Механизм отстройки показан на векторной диаграмме, приведенной на рис. 2.

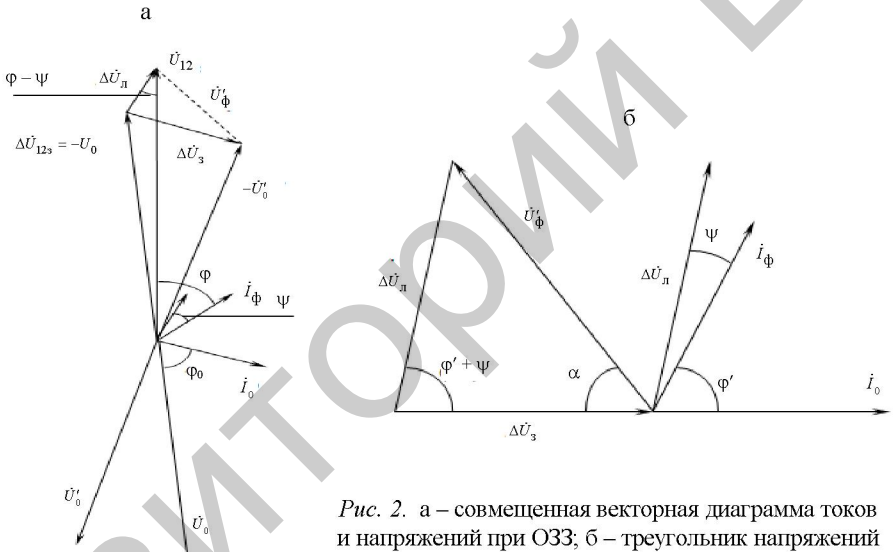

Рис. 2. а – совмещенная векторная диаграмма токов и напряжений при ОЗЗ; б – треугольник напряжений линии

За начало отсчета принимаем сумму векторов напряжения прямой и обратной последовательностей $\dot{U}_{12}$. Ток линии $\dot{I}_{\text{ф}}$ носит активно-индуктивный характер и отстает от вектора $\dot{U}_{12}$ на угол нагрузки φ. От протекания тока нагрузки напряжение падает на $\Delta\dot{U}_{\text{л}} = \dot{I}_{\text{ф}} \overline{Z}_{\text{л}}$ и в точке замыкания $\dot{U}_{12\text{з}} = \dot{U}_{12} - \Delta\dot{U}_{\text{л}}$:

$$\Delta\dot{U}_{\text{л}} = \dot{I}_{\text{ф}} \overline{Z}_{\text{л}} = \dot{I}_{\text{ф}} Z_{\text{ф}} Z_{\text{л}} e^{j\Psi}; \tag{9}$$

$$\Psi = \text{arctg} \frac{X_{\text{пог}}}{R_{\text{пог}}}, \tag{10}$$

где $Z_{\text{л}} e^{j\Psi}$ – комплексное сопротивление линии; $X_{\text{пог}}$, $R_{\text{пог}}$ – погонные параметры линии.

Репозиторий БНТУ

Ток $\dot{I}_0$ носит активно-емкостный характер и опережает напряжение $\dot{U}'_0$ на угол φ_0. В точке замыкания находится источник напряжения нулевой последовательности с ЭДС $\dot{U}'_0 = -\dot{U}_{1_3}$. Но это напряжение не равно измеряемому на шинах напряжению нулевой последовательности $\dot{U}'_0$, так как существует падение напряжения нулевой последовательности на переходном сопротивлении либо дуге, в броне кабеля и грунте. Их можно считать активными и синфазными по отношению к току замыкания $\dot{I}_0$

$$\Delta\dot{U}_з = 3\dot{I}_0\left(R_{\text{перех}} + R_{\text{тр.}}\right). \tag{11}$$

При дуговом замыкании нелинейность дуги вносит некоторые искажения, связанные с гашением и зажиганием дуги при переходе тока через нуль, поэтому для повышения точности необходимо использовать значения измеряемых величин по первой гармонике, выделяемой методами цифровой фильтрации. Дуговое замыкание, как правило, быстро переходит в металлическое после наплавления металлического мостика между жилой и оболочкой, оставляя линейное переходное сопротивление.

Не вызывает затруднений определить реальное падение напряжения в линии $\Delta\dot{U}'_л$ по измеренному напряжению $\dot{U}'_ф$, току поврежденной фазы $\dot{I}_ф$ и току нулевой последовательности $\dot{I}_0$ из треугольника напряжений (рис. 2б).

За начало отсчета принимаем ось вектора тока нулевой последовательности $\dot{I}_0$. Измеряемое напряжение $\dot{U}'_ф$ опережает его на угол α.

Ток нагрузки опережает $\dot{I}_0$ на угол φ'. Вектор $\Delta\dot{U}'_л$ опережает вектор $\dot{I}_ф$ на угол линии ψ. Проведем прямую из конца вектора $\dot{U}'_ф$ под углом ψ к $\dot{I}_ф$. Полученная прямая является геометрическим местом вектора $\Delta\dot{U}'_л$. Проведя прямую из конца начала $\dot{U}'_ф$ параллельно $\dot{I}_0$ до пересечения с прямой вектора $\Delta\dot{U}'_л$, получим искомый вектор. Алгебраически можно определить $\Delta\dot{U}'_л$ и расстояние до замыкания l, пользуясь теоремой синусов:

$$\Delta U_л = U'_ф \frac{\sin\alpha}{\sin\left(\varphi' + \psi\right)}; \tag{12}$$

$$l = \frac{U'_ф}{I_ф Z_{\text{пог}}} \frac{\sin\alpha}{\sin\left(\varphi' + \psi\right)}. \tag{13}$$

Таким образом, можно отстроиться от переходного сопротивления в месте замыкания и определить падение напряжения в линии $\Delta\dot{U}'_л$. Пренебрегать углом ψ в кабельных линиях нежелательно, так как, например, для линии 6 кВ сечением 95 мм^2 ψ = 13,5° и это пренебрежение заметно скажется на точности расчета. Для наиболее часто используемых сечений угол ψ находится в пределах 8–20°. Большинство петлевых кабельных сетей выполнены одним и тем же сечением, так что погрешности от неоднородности ψ невелики.

Репозиторий БНТУ

Для петлевой схемы (рис. 1) ток линии не будет однородным, поскольку существуют отборы мощности вдоль линии. Если токораспределение вдоль линии известно, то поврежденный участок можно определить по графику (рис. 3).

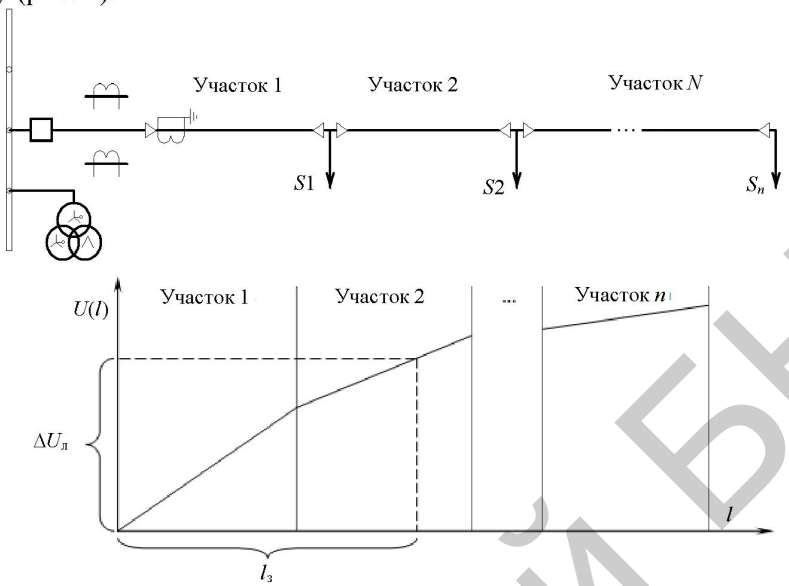

Рис. 3. Диаграмма падения напряжений вдоль линии с отборами мощности при простом однофазном замыкании

Для построения графика необходимо учитывать ряд факторов, в том числе и схему сети на данный момент времени. Информация обо всех изменениях конфигурации сети должна вноситься диспетчером в систему дистанционного мониторинга. Также необходимо знать длину и сечение проводников, токи каждого участка. Данные о токах возможно получать из системы АСКУЭ по стороне 0,4 кВ.

В городских сетях технический учет мощности ТП отсутствует, но, поскольку характер нагрузки статистический и нагрузка зависит от времени суток, температуры воздуха практически равномерны для всех присоединений, о величине тока каждого ТП можно судить на основании общего тока всего присоединения РП, текущей схемы сети и номинальных мощностей трансформаторов ТП.

В общем случае может быть *n* участков. Ток каждой нагрузки считаем пропорциональным току в начале цепочки и номинальной мощности трансформатора. Ток на *k*-м участке можно приближенно определить через отборы мощности *j*-го участка S_j и суммарный ток I_Σ

$$\dot{I}_k = \dot{I}_\Sigma \frac{\sum_{j=kS_j}^{n}}{\sum_{j=1S_j}^{n}}. \qquad (14)$$

Падение напряжения $\Delta\dot{U}'_л$ на расстоянии *l* определяется по формуле

$$\Delta\dot{U}_л(l) = \int_0^l \dot{I}(l)\bar{Z}_л(l)dl, \qquad (15)$$

где $\bar{Z}_л$ – удельное сопротивление линии на расстоянии *l*.

Репозиторий БНТУ

Численное моделирование предложенного принципа показало, что даже при отключении одного из трансформаторов цепочки погрешность приближенного метода не превышает четверти суммарной длины цепочки. На первом участке погрешность от нерасчетности распределения нагрузки отсутствует, поскольку по нему протекает полный ток нагрузки, по мере удаления погрешность нарастает. Максимальная погрешность может быть при замыкании на предпоследнем участке, поскольку на последнем участке вступает в силу логическое ограничение на длину цепочки. Небольшие отклонения в токораспределении практически не влияют на правильность определения поврежденного участка. Практически можно сказать, что подобный метод позволяет определять повреждение с точностью до одного, реже – двух участков, поскольку при замыкании вблизи соседнего участка невозможно определить, на каком из них произошло замыкание.

Предложенная методика определения расстояния до места повреждения требует разработки комплекса дистанционного мониторинга распределенных устройств со специализированной SCADA системой. Именно на автоматизированном рабочем месте (АРМ) оператора будет происходить определение места повреждения с использованием данных о текущей конфигурации сети, длинах и сечениях кабелей, номинальных мощностях трансформаторов. При этом кроме определения места ОЗЗ разрабатываемая система может иметь дополнительные функции, такие как дистанционная настройка и мониторинг защит.

Возможно использование предложенной методики для дистанционного определения локального дефекта изоляции при снижении сопротивления изоляции. Дефект изоляции может быть представлен замыканием через большое переходное сопротивление. При этом потребуется обеспечить высокую точность измерения тока нулевой последовательности.

При использовании методики исключительно для определения места замыкания на землю целесообразно применять его для защиты линий с изоляцией из сшитого полиэтилена и пофазной прокладкой, поскольку замыкание на землю для данного типа линий является преобладающим и возможно длительно удерживать сеть в работе без развития межфазного повреждения.

ВЫВОД

Разработана методика дистанционного определения места замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью для кабельных линий с распределенными нагрузками с использованием параметров аварийного режима.

На основании предложенной методики разработан алгоритм автоматического выявления ОЗЗ в городских кабельных распределительных сетях с указанием места повреждения. Предложенная методика может быть использована для дистанционного выявления деградационного нарушения изоляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей: учеб. пособие для вузов / А. М. Федосеев. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 486 с.

2. Гельфанд, Я. С. Релейная защита распределительных сетей / Я. С. Гельфанд. – М.: Энергия, 1975. – 356 с.

3. Исследование принципов действия селективной защиты от однофазных замыканий на землю в многокабельной линии сети 6 кВ с изолированной нейтралью / М. Д. Дьяченко [и др.] // Вестник Приазовського державного техничного університету. – 2008. – № 18. – С. 149–152.

Репозиторий БНТУ

4. Ш а л и н, А. И. Замыкания на землю в линиях электропередачи 6–35 кВ. Направленные защиты. Особенности применения / А. И. Шалин // Новости электротехники. – 2005. – № 6 (36).

Представлена кафедрой электрификации
промышленных предприятий

Поступила 19.11.2009

Репозиторий БНТУ