

УДК 621.311

# Автоматизация поиска повреждений в воздушных распределительных электрических сетях

**Общая протяженность отдельных линий воздушных распределительных электрических сетей доходит до 50 км с большим числом ответвлений, и, помимо большой протяженности, они характеризуются также разветвленностью. Процесс поиска и локализации повреждения выполняется оперативными выездными бригадами путем осмотра и оперативных переключений в поврежденной линии, поэтому длительность прекращения электроснабжения потребителей зачастую составляет от нескольких часов до суток.**

Как свидетельствует статистика, большая часть времени (до 70 %), затрачиваемая на устранение последствий аварии, приходится на отыскание места повреждения [1]. Это связано с тем, что поиск большинства повреждений выполняется путем разделения сети на отдельные участки с последующей проверкой на наличие повреждения [2]. Оптимизация поиска повреждения на базе решения классической комбинаторной задачи в этом случае не приводит к существенному уменьшению времени поиска мест повреждений [3].

Внедрение новых методов и средств определения мест повреждений может дать значительный технико-экономи-

ческий эффект в связи с сокращением перерывов в электроснабжении, предотвращением перехода неустойчивых повреждений в устойчивые, уменьшением объема ремонтных работ, снижением транспортных расходов для выполнения оперативных переключений и осмотра трасс линий электропередачи и т. д.

Рассмотрим структуру комплексного подхода к поиску повреждений в распределительных сетях, приведенную на рис. 1.

Информационный блок 1 может быть реализован на интеллектуальных электронных устройствах (intelligent electronic device – IED), которые включают в себя первичные преобразователи и устройства обработки и передачи данных.

В связи с распространенной проблемой поиска и локализации повреждения в воздушных распределительных электрических сетях для автоматизации процесса БНТУ были разработаны решения, новизна которых защищена патентами на изобретения Республики Беларусь. В статье описывается алгоритм решения проблемы и суть изобретений.

Топология установки устройств IEDs должна исходить из обеспечения необходимой информацией информационно-измерительной системы [4]. Современные IEDs позволяют получать формы кривых тока и напряжения, их симметричные составляющие, мощность, а также накапливать измеренную информацию, реализовывать запрограммированный алгоритм действий и передавать данные в пункты и центры сбора и обработки данных.

Определение поврежденной линии (блок 2) осуществляется автоматически на основе работы релейной защиты при возникновении короткого замыкания или направленных защитами при возникновении однофазных замыканий на землю [5].

Для определения вида повреждения (блок 3) используется алгоритм, предло-

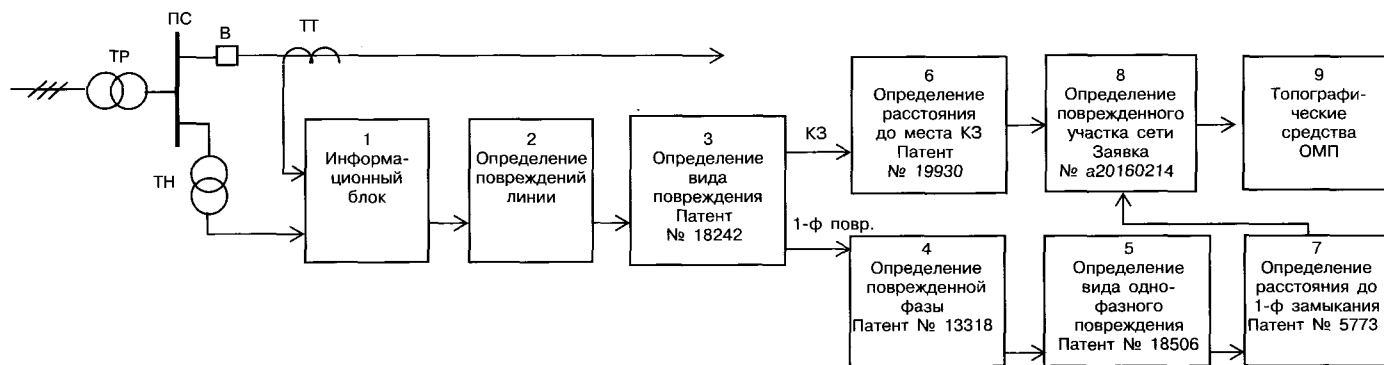


Рис. 1. Структура автоматизации поиска мест повреждения в интеллектуальных распределительных электрических сетях

женный в патенте № 18242 на изобретение Республики Беларусь [6].

Суть изобретения заключается в том, что устройство для определения вида повреждения в электрической сети с изолированной нейтралью, содержащее три входных преобразователя тока, входы которых соединены с измерительными трансформаторами тока линии, и фильтр симметричных составляющих тока, выполняет измерение фазных токов. На основе анализа токов  $I_A, I_B, I_C$  и их симметричных составляющих  $I_1, I_2$  и  $I_0$  в блоке 3 определяется шесть видов повреждений в электрических сетях:

- трехфазное КЗ на землю;
- трехфазное КЗ;
- двухфазное КЗ;
- двухфазное КЗ на землю;
- двойное КЗ;
- однофазное повреждение.

При возникновении однофазного замыкания на землю блок 4 определяет поврежденную фазу, реализуя алгоритм, предложенный в патенте № 13318 на изобретение Республики Беларусь [7].

Суть изобретения заключается в том, что в способе определения поврежденной фазы при однофазном повреждении линии электропередачи в сети с изолированной нейтралью, при котором измеряют напряжения прямой и нулевой последовательностей фаз, углы сдвига фаз между симметричными составляющими напряжений прямой и нулевой последовательностей фаз и определяют поврежденную фазу по равенству угла сдвига фаз между симметричными составляющими напряжений прямой и нулевой последовательностей  $0^\circ$  или  $180^\circ$ .

В результате работы блока 4 определяется поврежденная фаза А, или фаза В, или фаза С. На основе данной информации блок 5 определяет вид однофазного повреждения, реализующий алгоритм, предложенный в патенте № 18506 на изобретение Республики Беларусь [8].

В результате работы блока 5 определяется четыре вида однофазного повреждения в электрической сети:

- обрыв провода и касание земли со стороны потребителя;
- обрыв провода без замыкания на землю;
- замыкание на землю;
- обрыв провода и касание земли со стороны питания.

Для дистанционного определения расстояния до места короткого замыкания и возможной зоны обхода для нахождения и повреждения в электрических распределительных сетях (блок 6) используется предложенный в патенте № 19930 на изобретение Республики Беларусь способ [9].

Суть предложенного способа определения зоны и места повреждения на линиях электропередачи, основанного на измерениях мгновенных значений напряжения и тока аварийного режима на одном конце линии, заключается в том, что измерения

мгновенных значений напряжения и тока аварийного режима выполняют многократно, после чего определяют расстояние до места повреждения по выражению

$$\ell_k = (K_{\Pi} |u_{j+1}^{i_j} - u_{j+1}^{i_j}|) / (x_0 (i_j^2 + i_{j+1}^2)), \quad (1)$$

где  $K_{\Pi}$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий коэффициенты трансформации измерительных трансформаторов тока и напряжения;

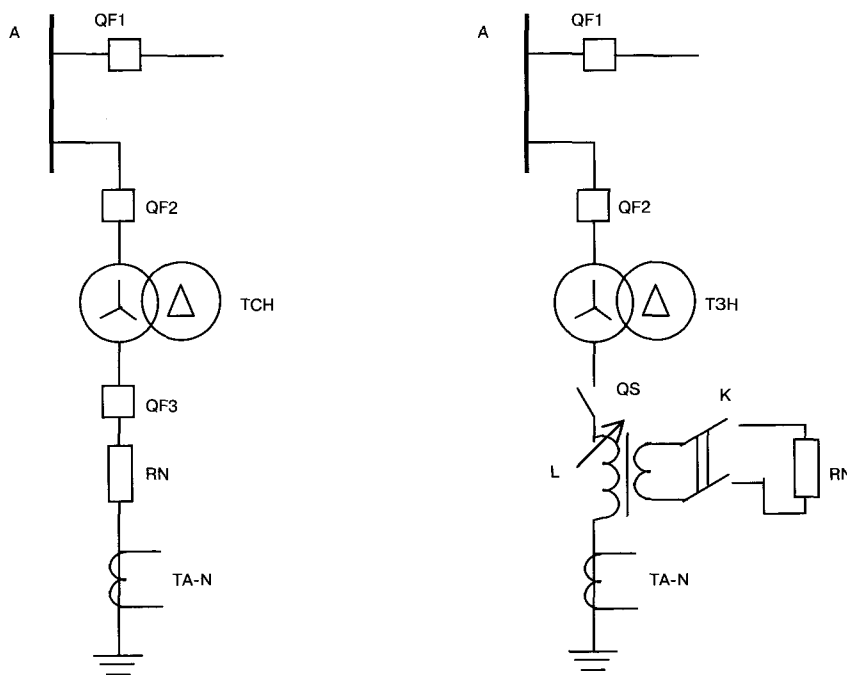
$u_j, i_j$  – значения тока и напряжения при  $j$ -м измерении,  $j = 1, 2, \dots, p-1$ ;

$p$  – количество измерений тока и напряжения;

$u_{j+1}, i_{j+1}$  – значения тока и напряжения при  $(j+1)$ -м измерении,  $j+1 = 2, 3, \dots, p$ ;

$x_0$  – удельное реактивное сопротивление линии;

$k = 1, 2, \dots, p-1$ , затем определяют наиболее вероятное место повреждения по формуле



Через трансформатор собственных нужд

Параллельно дугогасящему реактору

Рис. 2. Схемы подключения резистора

$$\bar{\ell}_k = \sum_{k=1}^{n-1} \ell_k / (n-1), \quad (2)$$

а зону повреждения определяют с заданной надежностью  $\gamma$  в виде доверительного интервала  $(\bar{\ell}_k - \ell_k^+)$ ,

где  $\bar{\ell}_k = (\bar{\ell}_k - t_\gamma \sigma_\ell / \sqrt{n-1})$ ;

$\ell_k^+ = (\bar{\ell}_k + t_\gamma \sigma_\ell / \sqrt{n-1})$ ;

$t_\gamma$  – квантиль нормального распределения;

$\sigma_\ell$  – среднее квадратичное отклонение от математического ожидания места повреждения.

Для дистанционного определения расстояния до места однофазного замыкания на землю предлагается два подхода:

1. Отключать поврежденную линию в центре питания и подключать к ней специальный высокочастотный генератор, фиксировать его режимные параметры, а искомое расстояние до места повреждения определять по аналитическому выражению [10]:

$$\ell_x = (U_r (I_c - I_r \sin \varphi_r)) / (2\pi f_r L_0 (I_r^2 \cos^2 \varphi_r + (I_c - I_r \sin \varphi_r)^2)), \quad (3)$$

где  $U_r$  – напряжение генератора;

$f_r$  – частота тока генератора;

$L_0$  – удельная индуктивность;

$I_r$  – ток генератора;

$I_c$  – емкостной ток линии;

$\varphi_r$  – угол сдвига фазы тока генератора относительно напряжения генератора.

2. Кратковременно, после возникновения повреждения, переводить распределительную электрическую сеть из режима с изолированной нейтралью в режим заземления нейтрали через резистор. Необходимость изменения режима нейтрали обусловлена тем, что при возникновении однофазного замыкания на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью токи в линиях электропередачи изменяются незначительно. Использовать методы определения места повреждения по параметрам аварийного режима практически невозможно из-за возникающих при этом больших погрешностей. Заземление нейтрали через резистор (низко- или высокоомный) приводит к значительному увеличению тока в поврежденной фазе, вплоть до срабатывания устройств релейной защиты. На рис. 2 приведены возможные схемы включения резистора в нейтраль трансформаторов.

Дальнейшей задачей определения места повреждения является выявление поврежденного участка (блок 8). Ввиду древовидности распределительной электрической сети данная задача в интеллектуальных сетях решается использованием сетевых датчиков или указателей коротких замыканий. Данные устройства, как правило, устанавливают в месте разветвления линии – на первых опорах после точки

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шалыт Г. М. Определение мест повреждения в электрических сетях. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 312 с.
2. Баркан Я. Д. Эксплуатация электрических систем. – М.: Высшая школа, 1990. – 304 с.
3. Радкевич В. Н., Ничипорович Л. В. О выборе стратегии поиска повреждения и восстановления электроснабжения в городских распределительных сетях // Изв. вузов СССР. Энергетика. – 1976. – № 9.
4. Лифшиц А. М. Роль PLC в Smart Grid или проблемы информационного обеспечения распределительных сетей среднего напряжения // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2013. – № 6.
5. Андреев В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. – М.: Высшая школа, 2006. – 639 с.
6. Устройство для определения вида повреждения в электрической сети с изолированной нейтралью: патент 18242 на изобретение Республики Беларусь / Е. В. Калентионюк.
7. Способ определения поврежденной фазы при однофазном повреждении линии электропередачи в сети с изолированной нейтралью: патент 13318 на изобретение Республики Беларусь / Е. В. Калентионюк, А. Н. Ермаков.
8. Устройство для определения вида однофазного повреждения в электрической сети с изолированной нейтралью: патент 18506 на изобретение Республики Беларусь / Е. В. Калентионюк.
9. Способ определения места и зоны повреждения на линии электропередачи: патент 19930 на изобретение Республики Беларусь / Е. В. Калентионюк, Ю. А. Мазурек.
10. Устройство для определения расстояния до места однофазного замыкания на землю в электрической сети с изолированной нейтралью: патент 5773 на изобретение Республики Беларусь / Е. В. Калентионюк, М. Ю. Лукьяненко, А. В. Сидоров, В. Г. Сидоров.
11. Кузнецов А. П. Определение мест повреждения на воздушных линиях электропередачи. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 94 с.

разветвления. Они срабатывают при возникновении тока короткого замыкания на ответвлении или участке магистрали линии за точкой установки устройства [11]. При этом можно передавать данные в информационно-измерительную систему по различным каналам: по высоковольтным проводам линии электропередачи (PLC-связь от англ. Power Line Communication), с помощью оптического кабеля, посредством сетевых технологий Ethernet/Internet и беспроводной связи (сотовая, Wi-Fi и др.).

Последней операцией определения места повреждения является нахождение топографической точки месторасположения. Для того используются топографические средства (блок 9), например топографические приборы типа «Волна» и «Зонд» [11].

Необходимость применения не менее двух методов определения мест повреждения (дистанционного и топографического) распространяется на ВЛ в основном потому, что линейному персоналу (обходчикам) без топографических средств очень трудно обнаружить следы повреждения на воздушных линиях. Даже верховые (с подъемом на опоры) осмотры не всегда позволяют найти следы перекрытия подвесных или штыревых изоляторов.

## ВЫВОДЫ

1. Для автоматизации поиска повреждений в воздушных распределительных электрических сетях Белорусским на-

циональным техническим университетом разработаны технические решения, новизна которых защищена патентами на изобретения Республики Беларусь.

2. Отличительной особенностью предложенных технических решений является применение различных методических подходов к поиску междуфазных и однофазных повреждений в распределительных электрических сетях.

3. Автоматизация поиска повреждений в воздушных распределительных сетях позволит повысить надежность электроснабжения путем уменьшения недоотпуска электроэнергии потребителям и повысить уровень электробезопасности за счет сокращения времени нахождения поврежденной линии в аварийном режиме.

**Евгений КАЛЕНТИОНОК,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
«Электрические системы» БНТУ

(Статья поступила в редакцию 10.07.2017 г.)

Modern overhead power distribution lines are characterized by large length and branching. Some power lines have the total length up to 50 km and large number of branches. Since the process of damage searching is performed by mobile teams through visual inspection and routine switching in the damaged line, the duration of power termination ranges from several hours to days.