

ON-LINE ДИАГНОСТИКА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Л.В. Богдашева, В.Е. Качесов, С.С. Шевченко

(Новосибирский государственный технический университет)

В.П. Михеев, А.В. Орлянский, О.Н. Остапенко

(ГУП «УЭВ СО РАН», Новосибирск)

Дементьев Е.Н. (ИЯФ СО РАН, Новосибирск)

Постановка проблемы

Распределительные сети 6-35 кВ имеют сложную древовидную структуру, поэтому диагностика их состояния представляет сложную в техническом плане задачу. В отличие от сетей высокого и сверхвысокого напряжений, где нарушение любой изоляции – междуфазной и фазной сопровождается сверхтоками и приводит к отключению линии, в распределительных сетях дефекты фазной изоляции не приводят к ухудшению условий электроснабжения потребителя, но существующий дефект требует его устранения, поскольку изоляция находится под повышенным напряжением, особенно, в случае неустойчивого дугового замыкания, когда перенапряжения значительны, продолжительны и представляют опасность для ослабленной изоляции неповрежденных фаз.

Задача on-line диагностики состоит в определении текущего состояния сети. В силу ее сложной конфигурации необходимо ответить на вопросы: ЧТО?, ГДЕ?, КОГДА?, ПРИ КАКИХ УСЛОВИЯХ? В [1] показана и описана общая структура задачи мониторинга, включающая подзадачи *распознавания, выделения поврежденного фидера, локации*. Эти три подзадачи отвечают на первые два выше перечисленных вопроса, а выполнение непрерывного мониторинга аварийных событий с достаточно высокой частотой дискретизации отвечает на два последних. Совокупность ответов на все отмеченные вопросы дает информацию для решения задачи координации изоляции и целенаправленной ее профилактики.

Реализация мониторинга сети представляется аппаратно-программной задачей и в техническом плане не является достаточно сложной (см., например, [2,3]), поскольку на современном рынке представлены соответствующие аппаратные (измерительные) средства. Остальные подзадачи более сложны в теоретическом плане, но имеют к настоящему времени достаточно глубоко проработанные решения.

Диагностика сети с компенсацией емкостных токов замыкания на землю

Наиболее остро задача диагностики стоит в сильно разветвленных и протяженных сетях; выделение поврежденного фидера и локация поврежденной зоны в такой сети осложнены. Эти сети характеризуются большими емкостными токами замыкания на землю (ЕТЗ), которые компенсируются с помощью дугогасящих реакторов (ДГР), одновременно эффективно снижающих перенапряжения при дуговых замыканиях.

Наличие ДГР в нейтрали питающего трансформатора позволяет надежно решить задачу распознавания однофазного дугового замыкания (ОДЗ), поскольку напряжение на поврежденной фазе после погасания дуги восстанавливается в виде биения колебаний. Даже при удовлетворительной настройке ДГР оно восстанавливается плавно, поэтому отношение (K) действующих значений напряжений на неповрежденных фазах к напряжению поврежденной фазы (определенных на относительно малом интервале времени) велико (см. рис.1). Этот параметр является критерием распознавания ОДЗ [4].

Для выделения фидера с ОДЗ могут использоваться различные способы, но их применимость к сетям с компенсацией емкостных токов замыкания ограничена, кроме того, достоверность селекции их использования довольно низка [5]. Последнее отталкивает предприятия электрических сетей от их широкого внедрения. В разработанной системе

выделения фидера с ОДЗ реализован принцип, основанный на известном свойстве противоположности полярностей первых полуволн высокочастотных составляющих токов нулевой последовательности в поврежденном и неповрежденном фидерах (предложенный еще в начале 20-го века Бергероном Л. [6]). Благодаря выделению из сигнала только его полярности исключается влияние разброса параметров трансформаторов тока нулевой последовательности. Для повышения надежности селекции и исключения случаев ложного срабатывания выделение происходит только при наличии факта ОДЗ [7], что осуществляется модулем распознавания.

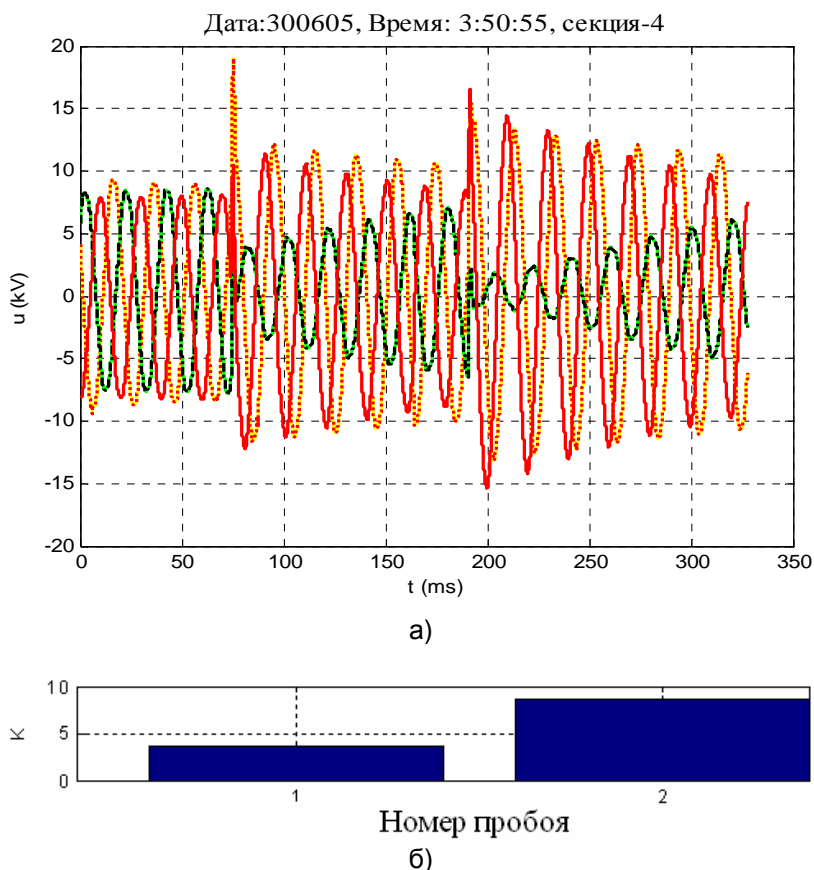


Рис.1. Фазные напряжения при ОДЗ в сети 10 кВ с компенсацией ЕТЗЗ (а), коэффициент отношения (К) минимального действующего напряжения одной из неповрежденных фаз к напряжению поврежденной фазы (б)

Блок выделения фидера (БВФ) с ОДЗ выполнен в виде отдельного устройства, реализованного на микроконтроллере. Информация с этого устройства, устанавливаемого на каждой секции шин, поступает в персональный компьютер и обрабатывается при установлении факта ОДЗ. Структура системы мониторинга и диагностики воздушно-кабельной распределительной сети 10 кВ, питаемой от ГПП «Академическая» (г. Новосибирск), представлена на рис.3.

Локация повреждений

Наибольшие трудности при диагностике сети представляет задача локации мест замыкания (мест со значительной поперечной фазной проводимостью). Локационные методы мало пригодны к распределительным сетям в силу многократных отражений в линиях и, как следствие, невозможности анализа рефлектограмм. Применение параметрических методов локации замыканий в таких сетях [8-11], осложняется динамикой изменения параметров сети и, значит, ее свойств. Учет изменения топологии и нагрузки сети можно реализовать двумя

подходами: а) - путем расчета частотных ($I_3 = \varphi(f_2)$) или дифференциальных ($I_3 = \xi(\frac{du^*}{dt})$) характеристик присоединений в режиме замыкания на землю для всех наиболее вероятных схемных режимов с последующей интерполяцией значений в промежуточных точках, б) - путем получения характеристик, несущих информацию о месте замыкания, в темпе измерительного процесса.



Рис.2. Устройство выделения фидера с ОДЗ

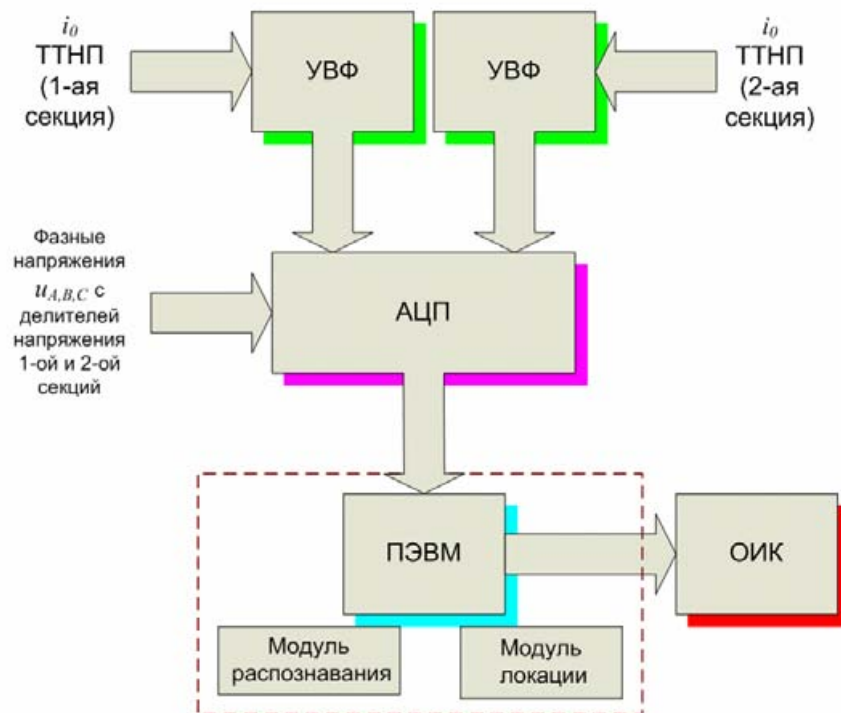


Рис.3. Структура системы мониторинга и диагностики
(АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ОИК – оперативно-измерительный комплекс)

В последнем случае точность локации (теоретически) будет максимальна, но сложность полной электрической схемы питания, содержащей, как правило, сотни узлов, ограничивает применение этого способа. Практически представляется возможным снимать расчетные характеристики и в полной схеме сети, но для этого требуются достаточно сложные пакеты программ моделирования стационарных и переходных процессов, а также

программы постпроцессирования расчетных данных. Однако, количество свободных частот, участвующих в формировании образа переходного процесса замыкания на землю, ограничено, что позволяет применять методику редуцирования порядка расчетной схемы без потери точности расчетов в эквивалентной схеме и использовать более простую расчетную модель.

Существуют высокоточные методики эквивалентирования схем, базирующиеся на аппроксимации частотной характеристики цепи (сети), например, - векторная аппроксимация [12]. Но такие методики сложны в практической (алгоритмической и программной) реализации, поэтому разработана несложная методика, которая ориентирована, главным образом, на радиальные распределительные сети и обеспечивает требуемую точность.

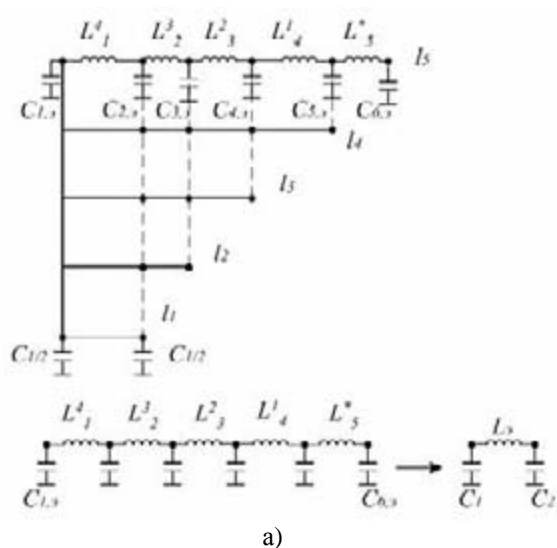
Основа методики редуцирования схемы сети состоит в поэтапном эквивалентировании различных ее участков с целью приведения сложной древовидной схемы распределительной сети, имеющей очень высокий порядок системы дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в ней, к наиболее простому виду, содержащему только параллельно соединенные эквивалентные участки [13].

В общем случае методика редуцирования может быть разделена на три составляющие, направленные на различные конфигурации участков сети, а именно:

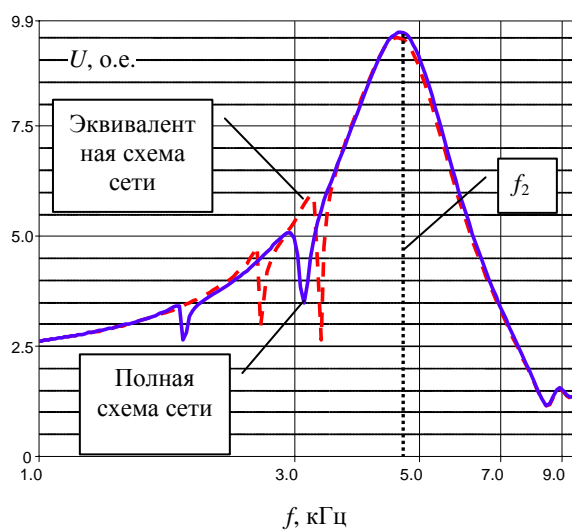
- метод эквивалентирования однородных линий (однородная линия - линия, удельные первичные параметры которой постоянны по всей длине);
- метод эквивалентирования участков сети, содержащих как кабельные, так и воздушные линии электропередачи;
- метод эквивалентирования неоднородных линий.

Метод эквивалентирования однородных линий. В случае, когда в структуре сети содержится значительное число распределительных подстанций (РП) с большим количеством отходящих присоединений, схема может быть упрощена при помощи алгоритма, приведенного далее, до схемы цепочного вида, а затем до П-схемы, используя правило моментов (рис.4).

В качестве исходных параметров используются векторы-строки удельных емкостей и индуктивностей, а также длины каждого присоединения. В месте окончания каждого присоединения формируется «фиктивный» узел и полагается, что все присоединения в этом узле включены параллельно.



а)



б)

Рис.4. Преобразование участка расчетной схемы для случая однородных линий а), частотные характеристики в полной схеме сети и в эквивалентной схеме, где все фидеры (включая головной) одной РП заменены П-схемой (б)

Алгоритм эквивалентирования индуктивностей и емкостей для схемы, представленной на рис.4 а), изложен ниже:

$$L_{i(i=1)}^k = \frac{L_{k+i} l_i L_i^{k-1}}{L_{k+i} l_i + L_i^{k-1}}; L_{i(i=2..n-2)}^k = \frac{L_{k+i} (l_i - l_{i-1}) L_i^{k-1}}{L_{k+i} l_i + L_i^{k-1}}; L_{i(i=n-1)}^* = L_i (l_i - l_{i-1}), k = 1..(n-i)$$

$$C_{\text{э},1} = l_1 \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{2}; C_{\text{э},k(k=2..n)} = (l_{k-1} - l_{k-2}) \sum_{i=k-1}^n \frac{C_i}{2} + (l_k - l_{k-1}) \sum_{i=k}^n \frac{C_i}{2}; C_{\text{э},n+1} = (l_2 - l_1) \sum_{k=1}^n \frac{C_i}{2},$$

где n – количество отходящих присоединений.

Метод эквивалентирования участков сети, содержащих как кабельные, так и воздушные линии электропередачи. В распределительных сетях 6-35 кВ нередко встречаются смешанные участки сети, где воздушные линии электропередачи (ВЛЭП) чередуются с кабельными линиями. Воздушные вставки (ВЛЭП) обладают значительно большей (погонной) индуктивностью по сравнению с кабельными линиями и поэтому при редуцировании схемы могут быть представлены сосредоточенной индуктивностью. Результаты расчетов показывают, что в этом случае амплитудно-частотная характеристика исходного участка сети практически не претерпевает значительных изменений в частотном диапазоне, подлежащем анализу [8,10].

Метод эквивалентирования неоднородных линий. Особый интерес представляет собой эквивалентирование участков сети, представленных, например, отходящим от ГПП питающим фидером (линия с распределенными параметрами) и РП, представленной П-схемой (уже после некоторого этапа эквивалентирования).

На первом этапе редуцирования происходит преобразование участка сети с распределенными параметрами в П-схему, затем с использованием упомянутого выше метода эквивалентирования однородных линий выполняется приведение к схеме цепочечного вида и дальнейшее ее преобразование в эквивалентную П-схему при помощи правила моментов.

Представленные методы были опробованы в реальной радиальной распределительной (преимущественно) кабельной сети 10 кВ. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), полученные для полной схемы сети отличаются от эквивалентных схем лишь на единицы процентов. На рис.4,б в качестве примера приведены АЧХ полной схемы сети и сети, в которой одна РП (с отходящими протяженными ВЛЭП, чередующимися КЛ) заменена эквивалентной П - схемой. Погрешность в отклонении второй частоты свободных колебаний составляет менее 2%.

Таким образом, исходные полные расчетные схемы сетей могут быть многократно редуцированы без потери точности локации с целью получения характеристик, несущих информацию о месте замыкания, в темпе измерительного процесса.

Выводы

Для радиальных распределительных сетей разработана методика контроля состояния их изоляции в реальном времени, на примере реальной сети 10 кВ показаны принципы ее практической реализации. Небольшими партиями система может поставляться в предприятия электрических сетей. Использование системы on-line диагностики позволяет контролировать правильность работы средств защиты от перенапряжений, состояние изоляции, формировать карту аварийности сети, целенаправленно выполнять своевременные профилактические и ремонтные работы.

Литература

1. Bogdasheva L.V., Kachesov V.E. Parametric On-line Fault Location Methods for Distribution MV Networks. - Proc. IEEE PowerTech'05, St.-Petersburg, 27-30 June, 2005, paper 159.
2. Качесов В.Е., Ларионов В.Н., Овсянников А.Г. О результатах мониторинга перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю в распределительных кабельных сетях. - Электрические станции, №8, 2002.
3. Качесов В.Е., Шевченко С.С., Борисов С.А. Перенапряжения при коммутации вакуумными выключателями двигательной нагрузки и их мониторинг. - Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ; Труды третьей Всероссийской научн.-техн. конф.- Новосибирск, 2004.
4. Патент РФ № 2232456 (от 11.10.2002). Способ распознавания однофазного дугового замыкания на землю и поврежденной фазы в распределительных сетях с резонансно-заземленной нейтралью// Качесов В.Е., БИ № 19, 2004.
5. Борухман В.А. Об эксплуатации селективных защит от замыканий на землю в сетях 6-10 кВ и мероприятиях по их совершенствованию. - Энергетик, №1, 2000.
6. Бержерон Л. От гидравлического удара в трубах до разряда в электрической цепи. - М.: Машгиз, 1962, 465 с.
7. Патент РФ № 2254586 (от 24.12.2003). Способ определения фидера с однофазным дуговым замыканием на землю в радиальных распределительных кабельных сетях// Качесов В.Е., БИ № 17, 2005.
8. Патент РФ № 2216749 (от 27.03.2001). Способ определения расстояния до места однофазного замыкания на землю в распределительных сетях// Качесов В.Е., БИ №32, 2003.
9. Патент РФ № 2222026 (от 11.01.2002). Способ определения расстояния до места однофазного замыкания на землю в распределительных сетях// Качесов В.Е., БИ №2, 2004.
10. Качесов В.Е., Лавров В.Ю., Черепанов А.Б. Параметрический способ определения мест повреждения в распределительных сетях// Электрические станции, №8, 2003.
11. Качесов В.Е. Метод определения зоны однофазного замыкания в распределительных сетях под рабочим напряжением// Электричество, №6, 2005.
12. V. Gustavsen and A. Semlyen. Rational approximation of frequency domain responses by Vector Fitting. - IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no. 3, pp. 1052-1061, July 1999.
13. Богдасхева Л.В. Редукция порядка расчетных схем в параметрических методах локации однофазных дуговых замыканий/ Труды 8-го всероссийского студенческого научно-технического семинара «ЭНЕРГЕТИКА: ЭКОЛОГИЯ, НАДЕЖНОСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ», ТГУ, Томск, 20-22 апреля, 2006.