

РАСПОЗНАВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ДУГОВОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ И ПОВРЕЖДЕННОЙ ФАЗЫ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Качесов В.Е., Квирвишвили Л.В. (Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск)

Одна из подзадач on-line диагностики распределительных сетей [1,2] – распознавание замыкания на землю из всего потока переходных процессов, сопровождающих изменение состояния сети при скачкообразном изменении ее параметров. Надежное распознавание замыкания на землю и поврежденной фазы в сетях с резонансно-заземленной нейтралью выполняется на основе свойства медленного восстановления напряжения на отключенной фазе [3,4]. Однако это свойство не присуще сетям с изолированной нейтралью, в которых восстановление напряжения происходит с большой скоростью, поэтому оно не может применяться для рассматриваемых сетей.

Воздушные распределительные сети могут иметь значительную суммарную длину без компенсации емкостного тока замыкания на землю (ЕТЗЗ) в силу его малого удельного значения, поэтому задача диагностики, заключающаяся в поиске дефекта и определении причин его возникновения, так же, как в протяженных сетях с компенсацией ЕТЗЗ, достаточно сложна.

В настоящее время известен подход к распознаванию однофазного замыкания на землю, основанный на измерении параметров режима сети – фазных напряжений и последующей математической обработке измерительной информации в цифровом виде на ЭВМ с помощью математического аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС) [5].

Для его реализации предварительно разрабатывают некоторую математическую модель – искусственную нейронную сеть и обучают ее на основе экспериментального или полученного в результате численного моделирования материала. После этого на входы системы распознавания подают сигналы – фазные напряжения в цифровой форме, а по комбинации выходных сигналов (например, в бинарном виде) определяют тип повреждения в электрической сети и поврежденную фазу.

Технология обучения ИНС сложна, поскольку для этого необходимо подобрать метод ее обучения (выбор которого не всегда прост и очевиден), минимизирующий ошибку распознавания. Обучение сети необходимо проводить на значительном объеме экспериментального или полученного в результате численного моделирования материала, что труднодоступно и трудоемко. При неоптимальном методе обучения ИНС или недостаточном объеме экспериментального материала метод может приводить к ложному (недостовверному) распознаванию ОДЗ.

В сетях с изолированной нейтралью имеет место определенный характер поведения напряжения на нейтрали сети – оно изменяется крайне медленно после погасания заземляющей дуги. На основе этого свойства разработан метод распознавания замыкания.

Способ осуществляется следующим образом. На шинах главного питающего пункта (ГПП) 1 (рис.1), к которому через линии электропередачи 2,3,4,5 подключены трансформаторные подстанции (ТП - 6,7,8,9), постоянно регистрируют фазные напряжения $u_\gamma(t)$, $\gamma=\{A,B,C\}$ в цифровой форме (например, выполняя непрерывный мониторинг [6]). В случае возникновения замыкания на землю на одной из отходящих линий 2,3,4,5 и при превышении любым из фазных напряжений порогового уровня, определяют производные

фазных напряжений $\frac{du_\gamma(t)}{dt}$,

которые представляются конечными разностями первого порядка, т.е.

$$\frac{du_\gamma(t)}{dt} \cong \frac{u_{\gamma,k+1} - u_{\gamma,k}}{t_{k+1} - t_k}, k = \overline{1, N},$$

где N – количество измерительных точек.

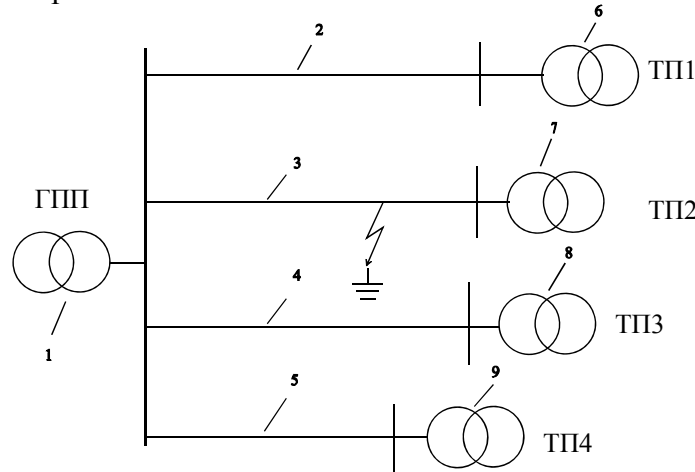


Рис. 1. Пример радиальной распределительной сети

В момент пробоя фазной изоляции знаки всех производных совпадают, т.е. выполняется условие

$$\text{sign}\left(\frac{du_\gamma}{dt}\right) = \text{const}.$$

При совпадении всех знаков производных напряжений и превышении их модулями уставки U'_y

$$\left|\frac{du_\gamma}{dt}\right| > U'_y, \gamma = \{A, B, C\}$$

отстают от момента времени t_0 превышения последней производной уставки U'_y по оси времени на величину t_y (рис.2). За время успокоения t_y колебания в контуре прямой последовательности затухают, и устанавливается напряжение на нейтрали, которое в дальнейшем слабо изменяется: стекание заряда и уменьшение напряжения нулевой последовательности (НП) $u_0(t)$ происходит только за счет постепенного насыщения трансформаторов напряжения контроля изоляции и незначительных утечек в изоляции.

Уставка U'_y может приниматься равной удвоенному значению производной наибольшего рабочего линейного напряжения сети ($\sqrt{3}U_{\text{фм н.р.}}$)

$$U'_y = 2\omega_0 \sqrt{3}U_{\text{фм н.р.}},$$

где ω_0 – промышленная угловая частота.

Время успокоения t_y зависит от добротности колебательного контура прямой последовательности фаз, образованного нагрузкой, эквивалентным источником и емкостно-индуктивными параметрами сети, а также от номера полупериода высокочастотной составляющей тока замыкания, на котором происходит гашение заземляющей дуги. Оно определяется по выражению

$$t_y = 2T_1 = \frac{1}{\pi\sqrt{L_{\text{н}}C_1}},$$

где T_1 – период собственных колебаний сети в контуре прямой последовательности фаз, $L_{\text{и}}$, C_1 – соответственно индуктивность эквивалентного источника и емкость сети.

Индуктивность определяется по выражению $L_{\text{и}} = U_{\text{к}} \frac{U^2}{S}$ ($U_{\text{к}}$, U - напряжение короткого замыкания и номинальное напряжение трансформатора, установленного на ГПП, S – его мощность).

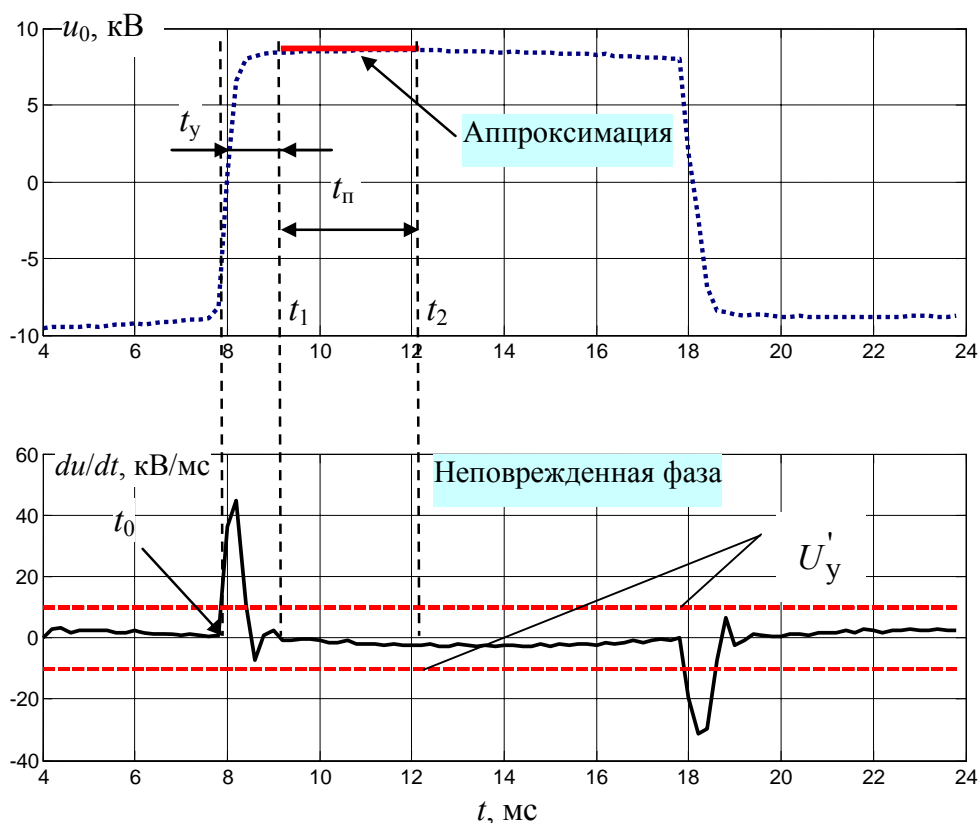


Рис.2. Напряжение нулевой последовательности и производная напряжения на поврежденной фазе

Критерием однофазного замыкания (при гашении заземляющей дуги при переходе высокочастотной составляющей тока через нулевое значение) выступает малая (по модулю) скорость изменения напряжения на нейтрали между повторными пробоями, которая измеряется в соответствии с ниже описываемым алгоритмом.

На пологом участке напряжения нулевой последовательности длительностью $t_{\text{п}}$ (которому соответствует отрезок времени $t \in [t_1; t_2]$, $t_1 = t_0 + t_y$; $t_2 = t_1 + t_{\text{п}}$ – рис.2) выполняют его квадратичную аппроксимацию. Для этого применяют любой известный способ, например, метод Лагранжа [7]. Аппроксимирующая функция (аппроксимирующий полином) записывается в соответствии с выражением

$$\tilde{u}_0(\tau)_{\tau \in [0, t_{\text{п}}]} = a\tau^2 + b\tau + c.$$

Длительность $t_{\text{п}}$ на основе обработки экспериментальных данных, полученных посредством мониторинга переходных процессов в действующих электрических сетях, принимают равной 3 мс.

В начале участка аппроксимации (момент времени $t = t_1$, в аппроксимирующей функции $\tau = 0$) определяют напряжение НП, которое равно коэффициенту квадратичного

полинома c , и скорость изменения напряжения НП $\frac{d\tilde{u}_0(\tau)}{d\tau}$, равную коэффициенту полинома b . Если модуль производной напряжения НП меньше $0,1U_{\text{фм}}/\text{мс}$ (т.е. $|b| < 0,1U_{\text{фм}}/\text{мс}$) и модуль напряжения НП превышает $0,1U_{\text{фм}}$ (т.е. $|c| > 0,1U_{\text{фм}}$), то устанавливается факт однофазного замыкания на землю.

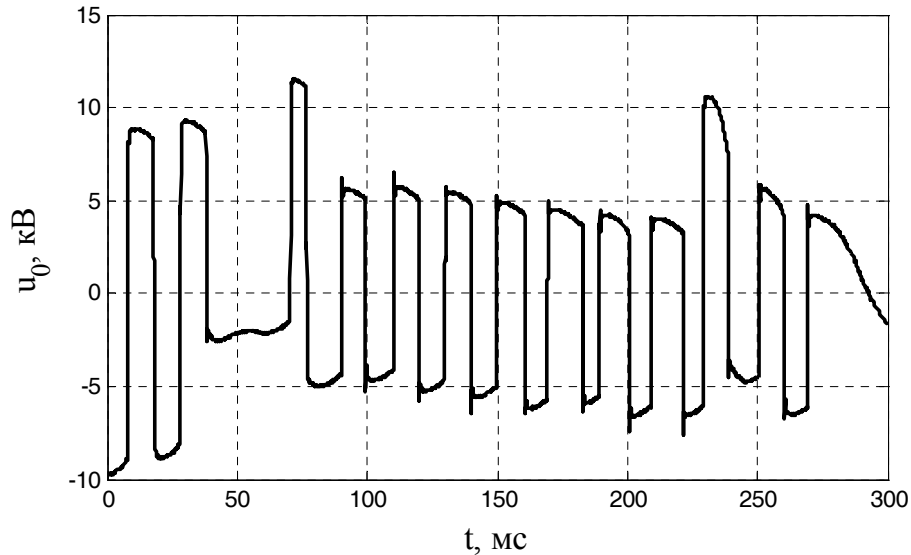


Рис.3. Напряжение нулевой последовательности при ОДЗ в кабельной сети

На рис.3 показано напряжение нулевой последовательности в действующей кабельной сети (заимствовано из [6]). Анализ (обработка) этого напряжения изложенным способом показывает, что при всех замыканиях выполняются условия распознавания ОДЗ, т.е. модуль напряжения на нейтрали после погасания заземляющей дуги больше $0,1U_{\text{фм}}$ и его производная по модулю меньше $0,1U_{\text{фм}}/\text{мс}$ (рис.4).

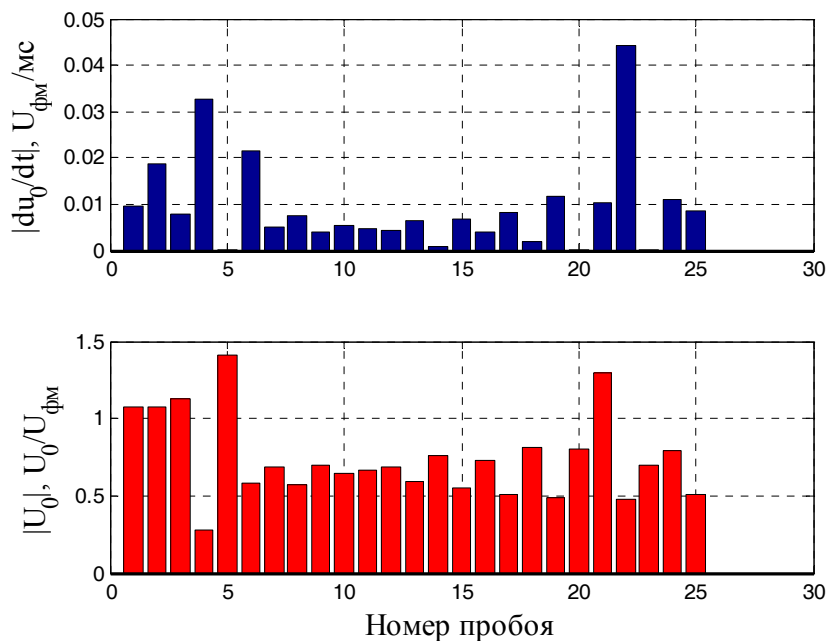


Рис.4. Значения модулей напряжения нулевой последовательности в начале участков аппроксимации и расчетных скоростей его изменения (производных напряжения нулевой последовательности)

Надежно распознается также поврежденная фаза – при всех пробоях изоляции максимальная производная напряжения на поврежденной фазе превысила производные на неповрежденных фазах: например, при пробое в момент времени $t=8$ мс (рис.2), значение производной фазного напряжения на поврежденной фазе равно 59 кВ/мс, на неповрежденных фазах - около 46 кВ/мс.

Таким образом, распознавание ОДЗ в сети выполняется путем регистрации (измерения) фазных напряжений и выполнения простых операций по их обработке: сопоставления напряжений с пороговым уровнем, нахождения производных фазных напряжений, проверке совпадения их знаков, вычисления полинома второго порядка, определения напряжения и скорости его изменения в начале участка аппроксимации, при сопоставлении которых с соответствующими уставками, устанавливается факт существования ОДЗ. Распознавание поврежденной фазы выполняется по максимуму производной фазных напряжений. Разработанный способ не требует никакой дополнительной информации кроме измерительной, значительных объемов вычислений или создания сложных алгоритмов обработки измерительных сигналов, поэтому прост и нетрудоемок.

Проверка пригодности метода для распознавания ОДЗ, путем обработки зарегистрированных переходных процессов в действующей кабельной сети 10 кВ, показала высокую достоверность метода. Следует заметить, что при незначительной модификации данный метод может использоваться для распознавания дугового замыкания в сети с высокоомным заземлением нейтрали.

Литература

1. Bogdasheva L.V., Kachesov V.E. Parametric On-line Fault Location Methods for Distribution MV Networks. / IEEE PowerTech'05: proceedings, St.-Petersburg, 27-30 June. 2005, paper 159.
2. ON-LINE диагностика распределительных сетей / Богдашева Л.В., Качесов В.Е., Шевченко С.С., Михеев В.П. Орлянский А.В., Остапенко О.Н., Дементьев Е.Н. // Ограничение перенапряжения. Режимы заземления нейтрали. Электрооборудование сетей 6-35 кВ: Труды Четвертой Всероссийской научн.-техн. конф., Новосибирск, 2006.
3. Monitoring overvoltages in underground HV cable distribution networks / V. Dikoy, V. Kachesov, A.Ovsiyannikov, V. Larionov. // CIGRE: proceedings, Paris, 39th Session, 2002, 21-103.
4. Патент РФ № 2232456 (от 11.10.02). Способ распознавания однофазного дугового замыкания на землю и поврежденной фазы в распределительных сетях с резонансно-заземленной нейтралью // Качесов В.Е., БИ № 19, 2004.
5. Whei-Min Lin, Chin-Der Yang, Jia-Hong, Ming-Tong Tsaj. A Fault Classification Method by RBF Neural Network With OLS Learning Procedure / IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 16, No.4, Oct., 2001, pp. 473-477.
6. 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.
7. Хемминг Р.В. Численные методы для научных работников и инженеров, - М: «Наука», 1972.