

Напомним, уставка по сопротивлению для алгоритмической модели промежуточного отбора мощности в АЛАР определяется по формуле (2) с учетом уставок (8) и (9). Отметим, что минимальная мощность промежуточного отбора может быть равна нулю, т.е. $S_{b,\min} = 0$.

Формулы (8) и (9) определяют оптимальные параметры промежуточного отбора мощности для всех γ . Выбор $S_{b,\text{set}}(Z_{b,\text{set}})$ не обеспечивает полного исключения погрешности АЛАР, а лишь определяет условие минимальности угловой погрешности.

Литература

1. Беркович М.А. Основы автоматики энергосистем / М.А. Беркович. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 432 с.

2. Никитина А.Н. Способ ликвидации асинхронного режима при электрическом центре качания в месте установки устройства / А.Н. Никитина, В.С. Петров // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 348–350.

3. Елкин С.В. Применение векторных измерений для определения параметров АЛАР / С.В. Елкин, Е.Н. Колобродов, Т.Г. Климова // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 2. – С. 28–31.

4. Принципиальные схемы устройств автоматического прекращающего асинхронного хода. Типовые материалы для проектирования № 407-0-174.88 / Институт «Энергосетьпроект», 1988.

5. Гоник Я.Е. Автоматика ликвидации асинхронного режима / Я.Е. Гоник, Я.Е. Иглицкий. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 112 с.

М.В. Убасева, В.С. Петров, В.А. Наумов, В.И. Антонов
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТ ДВОЙНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

В сетях с изолированной нейтралью однофазное замыкание на землю часто переходит в двойное замыкание [1, 2, 3], которое требует немедленного отключения поврежденной линии электропере-

дачи устройствами релейной защиты. Известно, что задача определения мест повреждения таких замыканий значительно усложняется из-за разнесённости мест замыканий. Кроме того, при разработке устройств определения мест повреждения нужно учитывать особенность распределительных сетей, заключающуюся в их разветвленности и многочисленности. Поэтому с целью повышения рентабельности устройств в электрических системах применяются преимущественно односторонние способы определения мест повреждения на основе параметров аварийного режима [4]. Устройства двустороннего определения мест повреждения не получили широкого применения из-за их дороговизны и необходимости использования оборудования связи и синхронизации устройств.

В настоящем докладе развиваются методы одностороннего определения мест двойного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью, основанные на применении алгоритмических моделей защищаемой сети и энергетического критерия для определения мест замыкания [4].

Основные предпосылки. Используются измерения фазных напряжений и линейных токов в месте установки устройства. Расстояния до мест замыканий отсчитываются от места измерения, следовательно, координата места расположения устройства $x = 0$, и все измеряемые устройством электрические величины – фазные напряжения $\underline{U}_v(0)$ и линейные токи $\underline{I}_v(0)$ – имеют нулевой аргумент ($v = A, B, C$). Следуя этим правилам, все рассчитываемые величины далее снабжаются аргументом x , означаящим, что величины рассчитываются на удалении x от места установки устройства; фазное напряжение и ток фазы будут обозначаться как $\underline{U}_v(x)$ и $\underline{I}_v(x)$ соответственно.

В устройстве используется алгоритмическая модель сети. Её отличие от модели сети заключается в представлении ветвей с переходными сопротивлениями в предполагаемых местах замыканий на землю источниками тока, равными токам замыканий соответствующих фаз на землю. Для определённости примем, что замыкания произошли в фазах B и C , тогда это будут источники с токами $\underline{I}_{Bf}(x)$ и $\underline{I}_{Cf}(x)$.

Согласно принципу компенсации в месте измерений (установки устройства) известные напряжения $\underline{U}_v(0)$ можно заме-

нить соответствующими источниками ЭДС. Тогда алгоритмическая модель сети будет иметь вид, представленный на рис. 1.

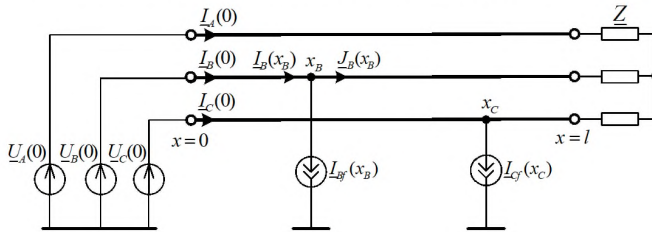


Рис. 1. Алгоритмическая модель сети при двойном замыкании на контролируемой линии электропередачи; известны измеренные величины – фазные напряжения $\underline{U}_v(0)$ и токи фаз $\underline{I}_v(0)$, а также значение нагрузки \underline{Z} ; неизвестны местоположения источников

$\underline{I}_{Bf}(x)$ и $\underline{I}_{Cf}(x)$, их расположение в сети условно

Общий принцип определения места замыкания. Предполагается, что сопротивление цепи замыкания имеет резистивный характер [4]. Это важное предположение о характере замыкания физически вполне обоснованно и важно по той причине, что позволяет организовать процесс поиска мест замыканий на основе ясных положений, одно из которых заключается в понимании, что поперечный поток энергии в месте замыкания, направленный от фазного провода к земле, носит чисто диссипативный характер. Другими словами, в месте замыкания мощность в поперечной цепи замыкания носит чисто активный характер, и чтобы определить место замыкания, достаточно найти на поврежденной фазе линии точку, в которой расчётная реактивная мощность будет равна нулю.

На деле это будет выглядеть следующим образом. Устройство, используя измерения напряжений $\underline{U}_v(0)$ и токов фаз $\underline{I}_v(0)$ в алгоритмической модели (рис. 1) для каждой точки линии с координатой x определяет токи источников тока $\underline{I}_{Bf}(x)$, $\underline{I}_{Cf}(x)$ и напряжения $\underline{U}_B(x)$, $\underline{U}_C(x)$ и вычисляет реактивную мощность источников. Следуя общему принципу, за место замыкания на землю на поврежденной фазе принимается точка на линии, в которой целевая функция (в нашем случае реактивная мощность) переходит через нуль (рис. 2).

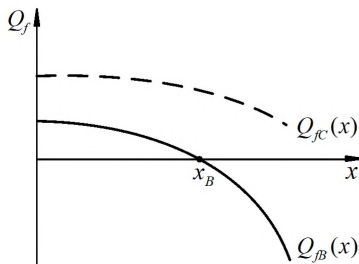


Рис. 2. Изменение целевых функций фаз *B* и *C* в зависимости от предполагаемой координаты расположения первого места повреждения; видно, что ближайшее к месту установки замыкания расположено на фазе *B* на расстоянии x_B

Метод определения первого места замыкания на линии. Для определения первого места замыкания устройство ОМП сначала с помощью алгоритмической модели сети (рис. 1) преобразует измеренные величины $\underline{U}_v(0)$ и $\underline{I}_v(0)$ в фазные напряжения $\underline{U}_v(x)$ и линейные токи $\underline{I}_v(x)$ места предполагаемого повреждения. Затем на их основе формируются токи источников тока $\underline{I}_{Bf}(x)$ и $\underline{I}_{Cf}(x)$. В соответствии с методом наложения алгоритмическая модель сети (рис. 1)

может быть представлена в виде двух моделей: модели неповрежденной сети для контролируемого участка при действии на её входах измеренных фазных напряжений (рис. 3) и модели сети чисто аварийного режима контролируемого участка (рис. 4) при действии источников тока $\underline{I}_{Bf}(x)$ и $\underline{I}_{Cf}(x)$.

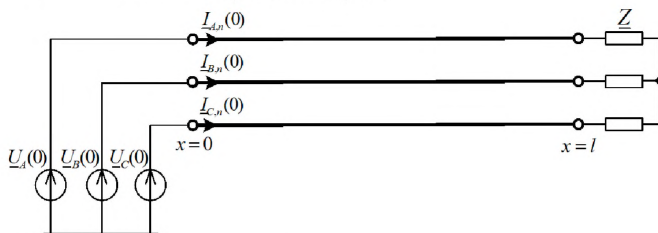


Рис. 3. Модель неповрежденной сети для контролируемого участка при действии на её входах измеренных фазных напряжений; определяются токи $\underline{I}_{v,n}(0)$ на входе модели

В связи с тем, что чисто аварийные токи можно выразить как сумму токов от источников тока (рис. 4), токи источников тока определяются как

$$\underline{I}_{Bf}(x) = \frac{\underline{I}_{A,pf}(x) - \underline{I}_{B,pf}(x)}{\left[\underline{k}_{d,nz}(x) + \frac{\underline{k}_{d,0}(x)}{2} \right] - 1}, \quad \underline{I}_{Cf}(x) = \frac{\underline{I}_{A,pf}(x) - \underline{I}_{C,pf}(x)}{\left[\underline{k}_{d,nz}(x) + \frac{\underline{k}_{d,0}(x)}{2} \right] - 1},$$

где $\underline{k}_{d,nz}(x)$ – коэффициент связи между ненулевыми составляющими тока источника тока и тока фазы справа от него; $\underline{k}_{d,0}(x)$ – коэффициент связи между составляющими нулевой последовательности тока источника тока и тока фазы справа от него; $\underline{I}_{v,pf}(x) = \underline{I}_v(x) - \underline{I}_{v,n}(x)$ – чисто аварийные токи фаз; $\underline{I}_{v,n}(x)$ – токи фаз в модели неповрежденной сети (рис. 3).

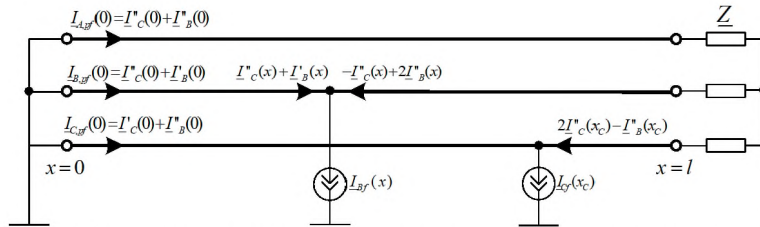


Рис. 4. Модель сети чисто аварийного режима контролируемого участка;

\underline{I}'_B – ток, протекающий по фазе B от источника тока в фазе B ;
 \underline{I}'_C – ток, протекающий по фазе C от источника тока в фазе C ;
 \underline{I}''_B и \underline{I}''_C – токи, протекающие по неповрежденной фазе от источников тока в фазах B и C соответственно

Далее, согласно общему принципу, устройство формирует целевые функции для поврежденных фаз. Первому месту замыкания x_η будет соответствовать точка на одной из поврежденных фаз $\eta = \overline{B, C}$, в которой целевая функция переходит через нуль и координата которой ближе к месту измерения (рис. 2).

Метод определения второго места замыкания на линии. Координата второго места замыкания определяется на основе новой алгоритмической модели сети для контролируемого участка справа от первого места замыкания (рис. 5).

Снова, как и при поиске первого места замыкания, новую алгоритмическую модель (рис. 5) можно представить в виде модели неповрежденной сети для контролируемого участка справа от первого места замыкания при действии на её входах фазных напряжений первого места замыкания (рис. 6), и модели сети чисто аварийного режима для контролируемого участка справа от первого

места замыкания (рис. 7) при действии источника тока $\underline{I}_{cf}(x)$. Поскольку фазные напряжения $\underline{U}_v(x_B)$ в первом месте замыкания рассчитаны, то согласно принципу компенсации, вместо них можно включить соответствующие источники ЭДС.

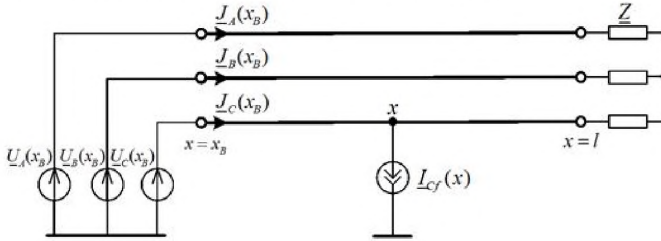


Рис. 5. Новая алгоритмическая модель сети для контролируемого участка справа от первого места замыкания; $\underline{J}_\lambda(x_B)$ – линейные токи справа от первого места замыкания

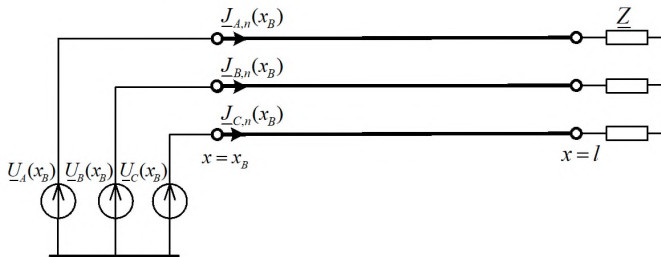


Рис. 6. Модель неповрежденной сети для контролируемого участка справа от первого места замыкания при действии на её входах фазных напряжений первого места замыкания

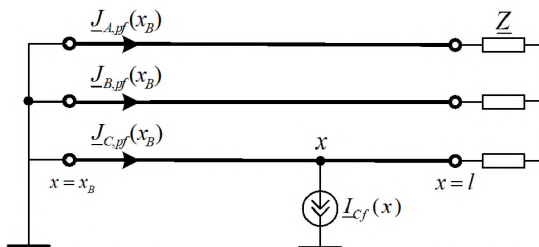


Рис. 7. Модель сети чисто аварийного режима для контролируемого участка справа от первого места замыкания

Для вычисления целевой функции по уже рассчитанным линейным токам $\underline{J}_v(x_B)$ справа от первого места замыкания и напряжениям в первом месте замыкания $\underline{U}_v(x_B)$ определяется напряжение $\underline{U}_C(x)$ на источнике тока в новой алгоритмической модели сети (рис. 5). Затем из модели сети чисто аварийного режима (рис. 7) рассчитывается ток источника тока

$$\underline{I}_{Cf}(x) = \frac{3\underline{J}_{C,pf,nz}(x)}{2\underline{k}_{d,nz}(x)},$$

где $\underline{k}_{d,nz}(x)$ – коэффициент связи между безнулевыми составляющими тока источника тока и тока фазы слева от него, определяемый для координаты предполагаемого замыкания x , $\underline{J}_{C,pf,nz}(x)$ – безнулевая составляющая чисто аварийного тока второй поврежденной фазы в предполагаемом месте замыкания. Для определения аварийных составляющих дополнительно используется новая модель неповрежденной сети для контролируемого участка (рис. 6).

За второе место замыкания принимается точка, в которой целевая функция также переходит через нуль.

Таким образом, предлагаемый способ позволяет определить два топографически разнесенных места замыкания из модели сети чисто аварийного режима с использованием целевых функций.

Литература

1. *Чернобровов Н.В.* Релейная защита: учеб. пособие для техникумов / Н.В. Чернобровов. – М.: Энергия, 1971. – 624 с.
2. *Хакимзянов Э.Ф.* Поведение измерительных органов сопротивления при двойных замыканиях на землю в распределительных сетях 6-35 кВ / Э.Ф. Хакимзянов, Р.Г. Исаков // Релейная защита и автоматизация. – 2014. – № 1 (14). – С. 18–21.
3. *Хакимзянов Э.Ф.* Измерительный орган сопротивления, выявляющий двойное замыкание на землю в распределительных сетях 6–35 кВ / Э.Ф. Хакимзянов, Р.Г. Исаков, Р.Г. Мустафин // Релейная защита и автоматизация. – 2014. – № 3 (16). – С. 29–35.
4. *Лямец Ю.Я.* Диагностика линии электропередачи / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, В.А. Ефремов и др. // Электротехнические микропроцессорные устройства и системы. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1992. – С. 9–32.