

Авторы:

Убасева М.В.¹,
к.т.н. Петров В.С.^{1,2},
к.т.н. Наумов В.А.^{1,2},
д.т.н. Антонов В.И.^{1,2},
Федоров А.О.¹,

¹ООО НПП «ЭКРА»,
²ЧГУ им. И.Н. Ульянова,
г. Чебоксары, Россия.

Ubaseva M.V.¹,
Ph.D. Petrov V.S.^{1,2},
Ph.D. Naumov V.A.^{1,2},
D.Sc. Antonov V.I.^{1,2},
Fedorov A.O.¹,

¹EKRA Research and
Production Enterprise
LTD,
²Chuvash State University,
Cheboksary, Russia.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТ ДВОЙНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

DETERMINING LOCATIONS OF A DOUBLE GROUND FAULT IN NETWORKS WITH ISOLATED NEUTRAL

Аннотация: задача определения мест двойных замыканий в сетях с изолированной нейтралью значительно усложняется из-за топографической разнесенности мест замыканий. Необходимый уровень совершенства способов определения мест таких повреждений обеспечивается благодаря использованию множества алгоритмических моделей сети. В предлагаемом в статье способе общая алгоритмическая модель сети используется для оценки напряжения в месте предполагаемого повреждения. В то же время алгоритмические модели неповрежденной сети и модели сети чисто аварийного режима позволяют разграничить электрические величины, связанные только с измерениями в месте установки устройства, от электрических величин, всецело определяемых токами замыканий на землю. Такое свойство моделей позволяет алгоритму иметь точность определения мест двойного замыкания, теоретически независимую от величин переходных сопротивлений в местах замыканий. Важную роль в определении мест замыканий играет гипотеза о резистивности цепи замыкания на землю. Предлагаемый способ использует для определения места повреждения на линии целевую функцию, представляющую собой меру передаваемой реактивной мощности в поперечной цепи между фазой и землей. Устойчивость и точность работы алгоритма не зависят от удаленности замыканий друг от друга.

Ключевые слова: определение места повреждения, сеть с изолированной нейтралью, двойное замыкание на землю, алгоритмические модели неповрежденного участка, алгоритмические модели чисто аварийного режима сети.

Abstract: the determining locations of a double ground fault in networks with isolated neutral is much more complicated due to a topographic remoteness of faults places. The necessary level of perfection of methods for determining locations of such faults is ensured through the use of many algorithmic network models. In the proposed method the general algorithmic model of the network is used to calculate the voltage at the supposed

Введение

Еще недавно для определения мест двойных замыканий на землю широко применялись топографические устройства определения места повреждения (ОМП) [1, 2]. К сожалению, применение таких устройств требует совершения обхода ремонтной бригадой поврежденной линии электропередачи (ЛЭП), и все это время, пока осуществляется поиск мест повреждения, линия находится в отключенном состоянии. Поэтому в настоящее время с целью повышения надежности электроснабжения в сетях с изолированной нейтралью применяются преимущественно односторонние способы ОМП, основанные на измерении параметров аварийного режима. Практически все подобные способы используют множество алгоритмических моделей защища-

емой сети и энергетический критерий [3, 4]. Разница в алгоритмах проявляется лишь в методе определения тока замыкания. Например, в работе [5] для этого предлагается использовать модель локального режима.

В настоящей статье рассматриваются основы одностороннего определения мест двойного замыкания на землю, использующего модель сети чисто аварийного режима.

Общий принцип определения места замыкания

Используются измерения фазных напряжений и токов в месте установки устройства. Расстояния до мест замыканий отсчитываются от места измерения, следовательно, координата места расположения устройства $x = 0$. Поэтому все измеряе-

мые устройством электрические величины – фазные напряжения $\underline{U}_v(0)$ и токи $\underline{I}_v(0)$ – имеют нулевой аргумент ($v = A, B, C$). По этим правилам все рассчитываемые величины далее снабжаются аргументом x , означающим, 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 методе используется алгоритмическая модель сети. Ее 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 определенности 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 заменить соответствующими источниками электродвижущей силы (ЭДС). Тогда алгоритмическая модель сети будет иметь вид, представленный на рис. 1.

Подразумевается, что сопротивление цепи замыкания имеет резистивный характер [3]. 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 расчетная реактивная мощность будет равна нулю.

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

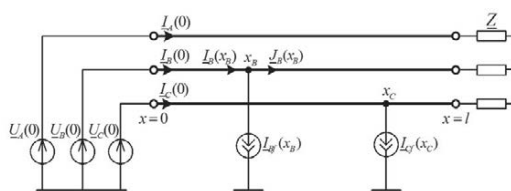


Рис. 1. Алгоритмическая модель сети при двойном замыкании на контролируемой ЛЭП. Известны измеренные величины – фазные напряжения $\underline{U}_v(0)$ и токи фаз $\underline{I}_v(0)$, а также величина нагрузки Z . Неизвестны местоположения источников $\underline{I}_{Bf}(x)$ и $\underline{I}_{Cf}(x)$, их расположение в сети условно

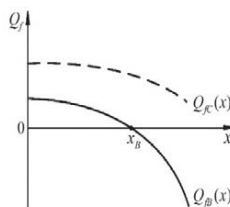


Рис. 2. Изменение целевых функций фаз B и C в зависимости от предполагаемой координаты расположения первого места повреждения. Видно, что ближайшее к месту установки замыкание расположено на фазе B на расстоянии x_B

линии, в которой целевая функция (в нашем случае – реактивная мощность) переходит через нуль (рис. 2).

Определение первого места замыкания

Для определения первого места замыкания устройство ОМП сначала преобразует – с помощью алгоритмической модели сети (рис. 1) – 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 ее входах измеренных фазных напряжений (рис. 3) и модели сети чисто аварийного ре-

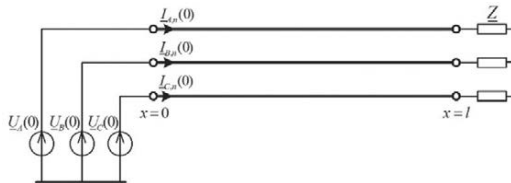


Рис. 3. Алгоритмическая модель неповрежденной сети для контролируемого участка при действии на ее входах измеренных фазных напряжений. Определяются токи $\underline{I}_{v,n}(0)$ на входе модели ($v = A, B, C$)

place of a fault. At the same time algorithmic models of an undamaged network and models, of a pure fault regime allow distinguishing electrical quantities, associated only with the measurements at the device installation location, from electrical quantities, entirely determined by earth fault currents. Such property of models allows the algorithm to have accuracy in double-ground fault location theoretically independent of short circuit resistances. An important role in fault locations is played by the hypothesis of the resistivity of the ground fault circuit. Following this idea, the purposed method uses an objective function to fault location on the line, which is a measure of the transmitted reactive power in the transverse circuit between phase and ground. The stability and accuracy of the algorithm do not depend on the remoteness of fault places from each other one.

Keywords: fault location, network with isolated neutral, double-ground fault, algorithmic models of an undamaged section, algorithmic models of a pure fault regime of network.



Убасева Мария Витальевна
 В 2021 г. в ЧГУ им. И.Н. Ульянова получила степень магистра по направлению «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Электроэнергетические системы, сети электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность». Инженер-исследователь 3 категории департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА».



Петров Владимир Сергеевич
 В 2010 г. в ЧГУ им. И.Н. Ульянова получил степень магистра по направлению «Электроэнергетика» по профилю «Электроэнергетические системы, сети электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность». В 2015 г. в ЧГУ им. И.Н. Ульянова защитил кандидатскую диссертацию на тему «Цифровая система автоматического ограничения повышения напряжений сетей 110-750 кВ». Доцент кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем им. А.А. Федорова ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Руководитель группы департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА».

жима контролируемого участка (рис. 4) при действии источников тока $\underline{I}_{Bf}(x)$ и $\underline{I}_{Cf}(x)$.

Чисто аварийные токи в сети можно выразить как сумму токов от источников тока (рис. 4), в связи с чем токи источников тока определяются следующим образом:

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

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

где $\underline{k}_{d,nz}(x)$ – коэффициент связи между безнулевыми составляющими тока источника тока $\underline{I}_{Bf,nz}(x)$ и тока фазы справа от него $2\underline{I}''_{B,0}(x)$ (рис. 5);

$\underline{k}_{d,0}(x)$ – коэффициент связи между составляющими нулевой последовательности тока источника тока $\underline{I}_{Bf,0}(x)$ и тока фазы справа от него $2\underline{I}''_{B,0}(x)$ (рис. 6);

$\underline{I}_{v,pf}(x) = \underline{I}_v(x) - \underline{I}_{v,n}(x)$ – чисто аварийные токи фаз;

$\underline{I}_{v,n}(x)$ – токи фаз в модели неповрежденной сети (рис. 3).

Коэффициент связи $\underline{k}_{d,nz}(x)$ определяется из модели для безнулевых составляющих (рис. 5):

$$\underline{k}_{d,nz}(x) = \frac{\underline{Z}_L(x)}{\underline{Z}_L(x) + \underline{Z}_R(x)},$$

где

$$\underline{Z}_R(x) = \underline{Z}_{C1} \frac{\underline{Z} + \underline{Z}_{C1} \operatorname{th}[\gamma_1(l-x)]}{\underline{Z}_{C1} + \underline{Z} \operatorname{th}[\gamma_1(l-x)]}$$

и

$$\underline{Z}_L(x) = \underline{Z}_{C1} \operatorname{th}[\gamma_1 x]$$

– сопротивления справа и слева от источника тока $\underline{I}_{Bf,nz}(x)$ соответственно;

$\underline{Z}_{C1} = \sqrt{\underline{z}_1/y_1}$ и $\gamma_1 = \sqrt{\underline{z}_1 y_1}$ – характеристическое сопротивление и коэффициент распространения прямой (обратной) последовательности контролируемой ЛЭП;

\underline{z}_1 – удельное сопротивление прямой (обратной) последовательности контролируемой ЛЭП;

y_1 – удельная проводимость прямой (обратной) последовательности контролируемой ЛЭП;

l – длина контролируемой ЛЭП.

Коэффициент связи $\underline{k}_{d,0}(x)$ определяется из модели для составляющих нулевой последовательности (рис. 6):

$$\underline{k}_{d,0}(x) = \frac{\operatorname{th}[\gamma_0 x] \operatorname{th}[\gamma_0(l-x)]}{1 + \operatorname{th}[\gamma_0 x] \operatorname{th}[\gamma_0(l-x)]},$$

где $\gamma_0 = \sqrt{\underline{z}_0 y_0}$ – коэффициент распространения нулевой последовательности контролируемой ЛЭП;

\underline{z}_0 – удельное сопротивление нулевой последовательности контролируемой ЛЭП;

y_0 – удельная проводимость нулевой последовательности контролируемой ЛЭП.

Для линий с малыми емкостными токами используют модель с сосредоточенными

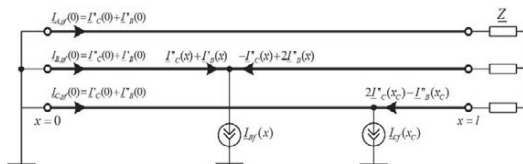


Рис. 4. Алгоритмическая модель сети чисто аварийного режима контролируемого участка. \underline{I}'_B и \underline{I}'_C – токи, протекающие по поврежденным фазам, \underline{I}'_B и \underline{I}'_C – токи, протекающие по неповрежденной фазе от источников тока в фазах B и C соответственно

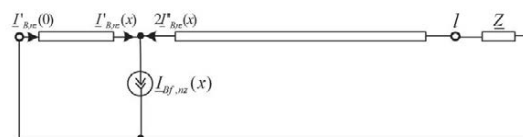


Рис. 5. Алгоритмическая модель сети чисто аварийного режима контролируемого участка для безнулевых составляющих при действии в ней только ближайшего к месту измерения источника тока

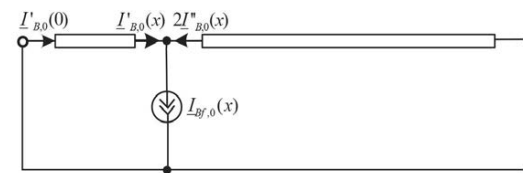


Рис. 6. Алгоритмическая модель сети чисто аварийного режима контролируемого участка для составляющих нулевой последовательности при действии в ней только ближайшего к месту измерения источника тока

ми параметрами без учета емкостной проводимости. В этом случае токи источников тока в предполагаемом месте замыкания на ЛЭП примут вид:

$$\underline{I}_{Bf}(x) = \frac{\underline{I}_{A,pf}(0) - \underline{I}_{B,pf}(0)}{\underline{k}_{d,nz}(x) - 1},$$

$$\underline{I}_{Cf}(x) = \frac{\underline{I}_{A,pf}(0) - \underline{I}_{C,pf}(0)}{\underline{k}_{d,nz}(x) - 1}.$$

Причем коэффициент связи между безнулевыми составляющими тока источника тока $\underline{I}_{Bf,nz}(x)$ и тока фазы справа от него $2\underline{I}_{B,nz}(x)$ определяется по следующей формуле:

$$\underline{k}_{d,nz}(x) = \frac{\underline{z}_1 x}{\underline{z}_1 l + \underline{Z}}.$$

Далее, согласно общему принципу, устройство формирует целевые функции для поврежденных фаз. Первому месту замыкания x_1 будет соответствовать точка на одной из поврежденных фаз $\eta = B, C$, в которой целевая функция переходит через нуль и координата которой ближе к месту измерения (рис. 2).

Определение второго места замыкания

Координата второго места замыкания определяется на основе новой алгоритмической модели сети, построенной для контролируемого участка справа от первого места замыкания (рис. 7).

Снова, как и при поиске первого места замыкания, новую алгоритмическую модель (рис. 7) можно представить в виде модели неповрежденной сети для контролируемого участка справа от первого места замыкания при действии на ее входах фазных напряжений первого места замыкания (рис. 8), и модели сети чисто аварийного режима для контролируемого участка справа от первого места замыкания (рис. 9) 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.

Для вычисления целевой функции по уже рассчитанным линейным токам $\underline{I}_v(x_B)$ справа от первого места замыкания и на-

пряжениям в первом месте замыкания $\underline{U}_v(x_B)$ определяется напряжение $U_c(x)$ на источнике тока в новой алгоритмической модели сети (рис. 7).

Ток второго места замыкания $\underline{I}_{Cf}(x_C)$ можно определить или из модели для безнулевых составляющих (рис. 10), или из модели для составляющих нулевой после-

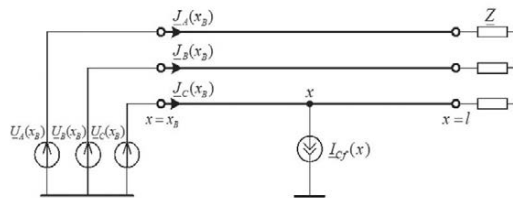


Рис. 7. Новая алгоритмическая модель сети для контролируемого участка справа от первого места замыкания: $\underline{J}_v(x_B)$ – линейные токи справа от первого места замыкания

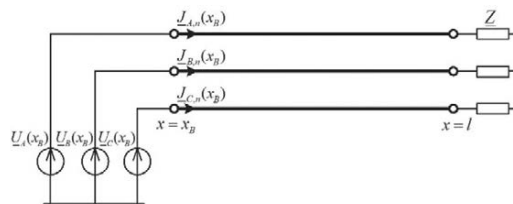


Рис. 8. Модель неповрежденной сети для контролируемого участка справа от первого места замыкания при действии на ее входах фазных напряжений первого места замыкания

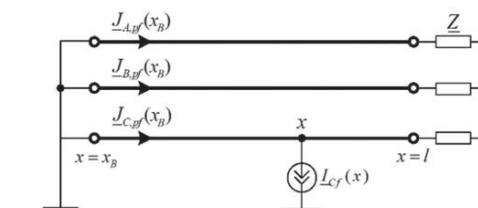


Рис. 9. Модель сети чисто аварийного режима для контролируемого участка справа от первого места замыкания

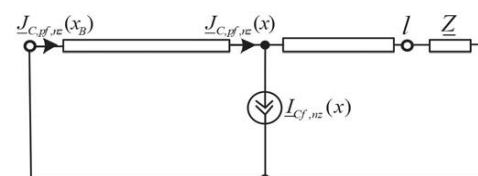


Рис. 10. Модель сети чисто аварийного режима для контролируемого участка справа от первого места замыкания для безнулевых составляющих



Наумов

Владимир Александрович

В 2001 г. окончил электроэнергетический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 2002 г. защитил магистерскую диссертацию. В 2005 г. во ВНИИЭ защитил кандидатскую диссертацию на тему «Анализ и совершенствование продольных дифференциальных защит генераторов и блоков генератор-трансформатор». Заместитель генерального директора - технический директор ООО НПП «ЭКРА».



Ангонов

Владислав Иванович

Получил диплом инженера-электрика в 1978 г. на факультете электрификации и автоматизации промышленности ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 2018 г. в ЧГУ им. И.Н. Ульянова защитил докторскую диссертацию на тему «Теория и приложения адаптивного структурного анализа сигналов в интеллектуальной электроэнергетике». Профессор кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматизации ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Главный специалист департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА».



Федоров

Алексей Олегович

В 2020 г. в ЧГУ им.

И.Н. Ульянова получил

степень магистра по направлению «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Электроэнергетические системы, сети электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность».

Инженер-исследователь

3 категории департамента

автоматизации энергосистем

ООО НПП «ЭКРА».

довательности (рис. 11). Для определения чисто аварийных составляющих дополнительно используется новая модель неповрежденной сети для контролируемого участка (рис. 8).

Из модели сети чисто аварийного режима для безнулевых составляющих (рис. 10), с учетом связи

$$\underline{I}_{Cf}(x) = \frac{3}{2} \underline{I}_{Cf,nz}(x),$$

ТОК ИСТОЧНИКА ТОКА

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

где

$$\underline{k}_{d,nz}(x) = \frac{\underline{Z}_R(x)}{\underline{Z}_L(x) + \underline{Z}_R(x)}$$

– коэффициент связи между безнулевыми составляющими тока источника тока и тока фазы слева от него, определяемый для координаты предполагаемого замыкания x . Здесь

$$\underline{Z}_R(x) = \underline{Z}_{C1} \frac{\underline{Z} + \underline{Z}_{C1} \text{th}[\gamma_1(l-x)]}{\underline{Z}_{C1} + \underline{Z} \text{th}[\gamma_1(l-x)]}$$

и

$$\underline{Z}_L(x) = \underline{Z}_{C1} \text{th}[\gamma_1(x-x_B)]$$

– сопротивления справа и слева от источника тока $\underline{I}_{Cf,nz}(x)$ соответственно.

Аналогично можно выразить ток источника тока $\underline{I}_{Cf}(x_C)$ второго места замыкания на контролируемой ЛЭП из модели для составляющих нулевой последовательности (рис. 11):

$$\underline{I}_{Cf}(x) = 3 \frac{\underline{J}_{pf,0}(x_B) \text{ch}(x-x_B)}{\underline{k}_{d,0}(x)},$$

где

$$\underline{k}_{d,0}(x) = \frac{1}{1 + \text{th}[\gamma_0(x-x_B)] \text{th}[\gamma_0(l-x)]}$$

– коэффициент связи между составляющими нулевой последовательности тока источника тока $\underline{I}_{Cf,0}(x)$ и тока фазы слева от него $\underline{J}_{pf,0}(x)$.

Для линий с малыми емкостными токами определение тока второго места замыкания $\underline{I}_{Cf}(x_C)$ будет проще. В этом случае его можно принять равным току первого места замыкания с противоположным знаком

$$\underline{I}_{Cf}(x_C) = -\underline{I}_{Bf}(x_B).$$

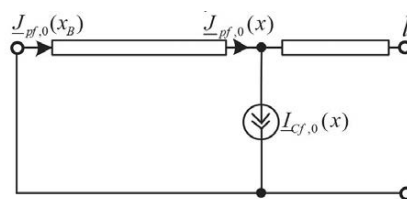


Рис. 11. Модель сети чисто аварийного режима для контролируемого участка справа от первого места замыкания для составляющих нулевой последовательности

Тогда расстояние от первого места замыкания до второго места замыкания будет определяться как:

$$x_C - x_B = \frac{|\underline{U}_C(x_B)| \sin \alpha}{|\Delta \underline{U}_C^0| \sin \beta}, \quad (1)$$

где

$$\Delta \underline{U}_C^0 = [\underline{z}_1 \underline{J}_{C,nz}(x_B) + \underline{z}_0 \underline{J}_0(x_B)]$$

– падение напряжения на участке единичной длины линии электропередачи, расположенной между замыканиями;

$$\beta = \arg[\underline{I}_{Cf}(x_C)] - \arg[-\Delta \underline{U}_C^0]$$

– разность фаз тока второго замыкания и падения напряжения на участке единичной длины линии;

$$\alpha = \arg[\underline{U}_C(x_B)] - \arg[\underline{I}_{Cf}(x_C)]$$

– разность фаз напряжения второй поврежденной фазы в первом месте замыкания и тока второго замыкания.

Выражению (1) соответствует векторная диаграмма, изображенная на рис. 12.

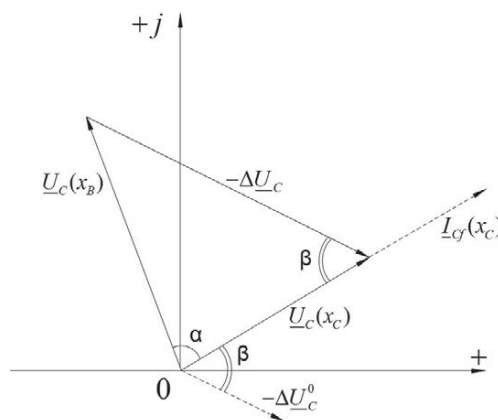


Рис. 12. Векторная диаграмма электрических величин между первым и вторым местом замыкания

Цифровая обработка сигналов

Новый алгоритм использует сигналы разных режимов работы сети. По электрическим величинам предшествующего режима алгоритм рассчитывает величину нагрузки контролируемой ЛЭП. Сигналы аварийного режима используются в алгоритмических моделях неповрежденной сети и чисто аварийного режима. Поэтому программный модуль цифровой обработки сигналов устройства должен разделять сигнал на соответствующие участки с учетом особенностей процессов, возникающих при двойном замыкании на землю.

На рис. 13 изображен отрезок сигнала, включающий в себя сигналы предшествующего и аварийного режимов (для упрощения изложения рассматривается условный сигнал). Сигнал предшествующего режима обычно синусоидален, на рис. 13 он представлен отрезком сигнала длительностью t_p . Сигнал аварийного режима может включать в себя быстропротекающие свободные составляющие, они появляются сразу после замыкания и располагаются между отрезком предшествующего установившегося режима и отрезком сигнала аварийного процесса. Для предлагаемого алгоритма нет смысла принимать в расчет составляющие быстропротекающего свободного процесса. Поэтому для анализа сигналов аварийного процесса используется отрезок сигнала длительностью t_f , взятый с учетом отступа на время $t_{f,g}$ от момента возникновения короткого замыкания вправо, что позволяет исключить из рассмотрения отсчеты сигнала, содержащие быстрозатухающие и высокочастотные составляющие переходного процесса [6].

Оценки комплексных действующих значений сигналов предшествующего и аварийного режимов на фоне возможных составляющих свободного процесса производятся методом адаптивного структурного анализа [7, 8].

Основопологающая идея адаптивного структурного анализа заключается в применении для представления сигнала электрической сети в общем случае гибридной модели, являющейся составной частью гибридного фильтра

$$e(k) = \hat{c} \cos(k\omega T_s) - \hat{s} \sin(k\omega T_s) + \sum_{m=0}^M a_m x(k - mv),$$

неадаптивная часть которого (\hat{c} и \hat{s} – коэффициенты неадаптивного оператора – оценки ортосоставляющих основной гармоники, ω – частота основной гармоники) формирует оценку гармонических составляющих сигнала, а адаптивная часть (a_m – коэффициенты адаптивного оператора, M – порядок адаптивной части фильтра) – оценку составляющих свободного процесса в сети. Здесь T_s – период дискретизации, k – номер отсчета, v – коэффициент внутримодельной децимации (разрежения) отсчетов входного сигнала, $e(k)$ – отсчеты выходного сигнала фильтра (невязка).

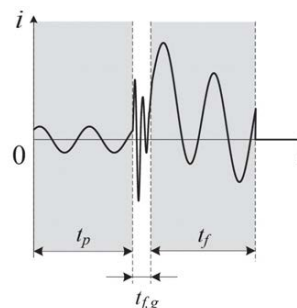


Рис. 13. Сигналы предшествующего и аварийного режимов

С целью уменьшения требований к вычислительным ресурсам устройства, настройка фильтра ведется методом наложения [9]. Он реализует решение задачи приближения модели к сигналу по методу наименьших квадратов и использует нормальные уравнения (здесь $M = 2$):

$$\sum_{l=k-N+1}^k e(l) \begin{cases} \cos(l\omega T_s) \\ -\sin(l\omega T_s) \\ x(l-1) \\ x(l-2) \end{cases} = 0,$$

где N – ширина окна данных.

После настройки фильтра необходимо устранить влияние адаптивной части на оценки параметров неадаптивной части модели путем замены переменных:

$$\hat{c}' + j\hat{s}' = \frac{\hat{c} + j\hat{s}}{H(j\omega T_s)}.$$

Комплексные значения сигналов предшествующего и аварийного режимов вычисляются относительно момента начала предшествующего режима. Поэтому комплексное значение составляющей основной гармоники \underline{X}_{t_f} электрического сигнала аварийного режима, определенное на своем отрезке, должно быть синхронизировано с комплексным значением сигнала предшествующего режима путем введения фазового сдвига $\Delta\psi = \omega\Delta t$, соответствующего разнице во времени $\Delta t = t_p + t_{f,g}$ между началом предшествующего и аварийного режимов:

$$\underline{X}_f = \underline{X}_{t_f} e^{-j\Delta\psi},$$

здесь \underline{X}_f – комплексное действующее значение электрической величины аварийного режима, синхронизированное с электрической величиной предшествующего режима.

Выводы

Совершенство предлагаемого способа определения мест двойного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью обеспечивается путем использования множества алгоритмических моделей сети,

проигрывающих различные режимы работы сети в алгоритмических сценариях поиска мест замыканий. Общая алгоритмическая модель сети предназначена для вычисления напряжения в месте предполагаемого повреждения. Она учитывает важную закономерность, что все электрические величины до места повреждения могут быть рассчитаны по измерениям в месте установки устройства, т.е. алгоритмическая модель на данном участке полностью адекватна модели самой сети. Введение в рассмотрение алгоритмических моделей неповрежденной сети и модели сети чисто аварийного режима позволяет разделить электрические величины на составляющие, связанные только с измеряемыми напряжениями на месте установки устройства, и на составляющие, полностью определяемые токами замыканий. Такое свойство моделей позволяет алгоритму быть теоретически независимым от величин сопротивлений замыканий.

Важную роль в определении мест замыканий играет гипотеза о резистивности цепи замыкания на землю. Следуя этой идее, новый алгоритм применяет для ОМП на линии целевую функцию, представляющую собой меру передаваемой реактивной мощности в поперечной цепи между фазой и землей. В каждом случае, когда целевая функция меняет знак, предлагаемый

алгоритм фиксирует координату места повреждения на линии. Устойчивость и точность работы алгоритма не зависит от удаленности замыканий друг от друга.

Литература:

1. М. Kyrychenko, А. Akulov, «Method of improving reliability of distribution network 6-35 kV», Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems: International Forum on Energy Efficiency, CRC Press, 2013, pp. 125–131.
2. Арцишевский Я.Л. Определение мест повреждений линий электропередачи в сетях с изолированной нейтралью. - М.: Высш. шк., 1989. - 87 с.
3. Лямец Ю.Я., Антонов В.И., Ефремов В.А., Нудельман Г.С., Подшивалин Н.В. Диагностика линии электропередачи // Электротехнические микропроцессорные устройства и системы. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1992. – С. 9–32
4. М. Ubaseva, V. Petrov and V. Antonov, «The Novel Method for Determining Locations of a Double Ground Fault in Networks with Isolated Neutral,» 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2020, pp. 394-399, DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216306.
5. Пат. 2586082 Рос. Федерация: МПК G01R 31/08. Способ определения мест замыканий на землю в разных фазах фидера
6. Антонов В.И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике / В.И. Антонов. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2018. – 334 с.
7. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория для инженера / В.И. Антонов, В.А. Наумов, М.Н. Кудряшова [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 2(35). – С. 18-27.
8. Antonov V.I., Il'in A.A., Lazareva N.M., «Adaptive structural models of input signals to relay protection and automation», Russian Electrical Engineering, 2012, vol. 83, no. 1, pp. 51-53, DOI: 10.3103/S1068371212010026.
9. Антонов В.И., Лазарева Н.М. Решетчатый адаптивный фильтр с контролем достоверности результата для распознавания сигналов РАН. // Энергетика. - 1997 г. - №6. - С.63-69.

РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ



150 ₺



150 ₺



500 ₺



1000 ₺

428003, Россия, Чувашская Республика,
г. Чебоксары, пр-кт И. Яковлева, д. 3

ТЕЛ.: +7 (8352) 226-394

ADV@SRZAU-RIC.RU