

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА ПОВРЕЖДЕНИЯ И ПОВРЕЖДЕННЫХ ФАЗ

ЛЮБАРСКИЙ Д.Р., канд. техн. наук, МИСРИХАНОВ М.Ш., САУХАТАС А.С., доктора техн. наук

Ключевые слова: релейная защита, высоковольтные линии электропередач, короткое замыкание.

FAULT TYPE AND FAULTED PHASE DETERMINATION

D.R. Lyubarskiy, Ph.D., M.Sh. Misrikhanov, Ph.D., A.S. Saukhatas, Ph.D.

Key words: relay protection, high-voltage transmission lines, short-circuit.

При реализации ряда важных функций релейной защиты и автоматики высоковольтных линий электропередачи встает задача определения вида повреждения и поврежденных фаз (ВППФ). К такого рода функциям относятся:

– дистанционная защита, у которой алгоритмы вычисления сопротивления до места повреждения организуются в зависимости от ВППФ [1];

– автоматическое повторное и однофазное автоматическое повторное включение, функционирование которых (выбор вида повторного включения и коммутируемой фазы) производится в соответствии с результатом определения ВППФ [2];

– определение расстояния до места повреждения [3] (алгоритмы вычисления расстояния зависят от ВППФ, а при организации осмотра и ремонта линии желательно знание поврежденных фаз).

Избирательные органы (ИО), реагирующие на превышение фазных токов заданного значения, имеют ограниченную область применения. Причиной этого является необходимость выбирать ток срабатывания ИО с учетом надежной их отстройки от токов в неповрежденных фазах, значение которых определяется нагрузочным режимом, качаниями. Токи в поврежденных фазах, особенно на сильно нагруженных ВЛ большой протяженности, могут быть соизмеримы с токами неповрежденных фаз. Поэтому основным недостатком весьма простых по исполнению ИО максимального тока является недостаточная чувствительность.

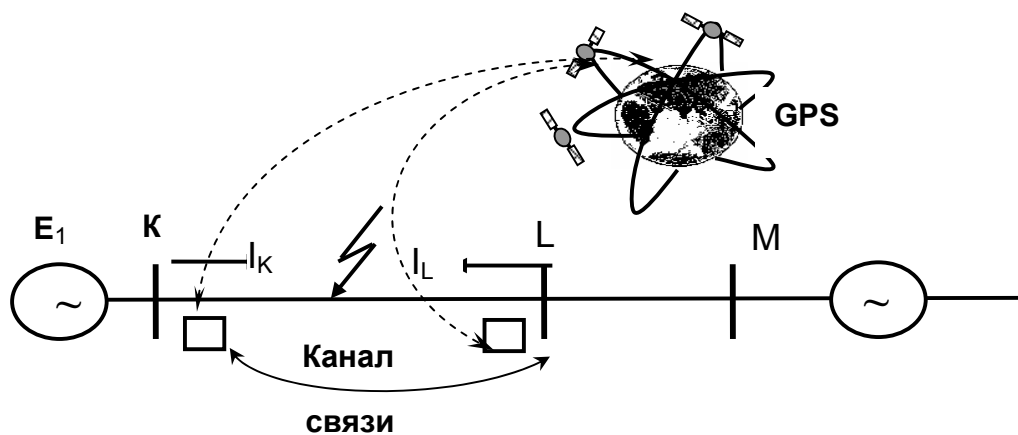
Известно, что в зависимости от ВППФ существенно меняются соотношения между векторами фазных напряжений и токов или их симметричными составляющими [4]. Контроль этих соотношений, как правило, яв-

ляется определяющим при организации алгоритмов ВППФ [1]. Однако соотношения между векторами токов и напряжений в линиях электропередачи определяются не только видом повреждения, но и токами доаварийного режима. Последнее обстоятельство в ряде случаев вызывает существенные трудности при решении рассматриваемой задачи, например, при удаленных коротких замыканий через переходное сопротивление на сильно нагруженных линиях электропередачи.

Распространение получил способ решения задачи определения ВППФ, основанный на дистанционном принципе [5]. Однако в этом случае сильное влияние оказывает переходное сопротивление в месте короткого замыкания и при значительных сопротивлениях такой способ оказывается неработоспособным.

Новые возможности решения задачи определения ВППФ связаны с использованием в энергосистемах оптико-волоконных каналов связи большой пропускной способности.

Рассмотрим схему энергосистемы, состоящую из двух эквивалентных генераторов и связывающих их линий электропередачи KL и LM (см. рисунок). Допустим также, что рассматривается релейная защита и автоматика линии KL, реализуемая двумя терминалами, связанными каналом связи и осуществляющими синхронные измерения. Синхронизация измерений может осуществляться путем передачи синхронизирующих импульсов по каналам связи либо на основе использования системы единого времени.



Эквивалентная схема энергосистемы

При коротком замыкании на линии KL

$$I_{K3} = I_K + I_L, \quad (1)$$

где I_{K3} – вектор фазных или симметричных составляющих токов в месте повреждения; I_K и I_L – векторы токов, оценки которых получают, соответственно, на подстанциях K и L.

Следовательно, при внутренних коротких замыканиях элементарная математическая операция позволяет определить токи в месте повреждения и полностью исключить влияние токов нагрузки (доаварийного режима). Следует иметь в виду, что рассматриваемая операция является сложной с точки зрения технической реализации. Она может осуществляться, например, на основе использования GPS, которая включает десятки искусственных спутников и сложнейшую систему управления ими.

Кроме того, используя граничные, не зависящие от сопротивлений в месте повреждения уравнения, связывающие токи симметричных составляющих в месте повреждения, можно получить уравнения (см. таблицу), которые могут служить основой определения ВППФ.

Представленные в виде неравенств условия идентификации вида повреждения (см. таблицу) основаны на контроле амплитудных и фазных соотношений между токами симметричных составляющих. При этом распознавание вида повреждения осуществляется на основе следующих признаков:

1. Для трехфазного замыкания – отсутствие несимметрии токов (при отсутствии ошибок измерений).

2. Для двухфазного замыкания без земли – возникновение значительных составляющих обратной последовательности при одновременном отсутствии токов нулевой последовательности (в таблице представлены условия определения вида повреждения и поврежденных фаз, допускающие фазовые погрешности оценки разности углов до 60 эл. градусов).

3. Для множества замыканий на землю (однофазных и двухфазных) – наличие тока нулевой последовательности. Условия идентификации поврежденных фаз могут быть получены на базе использования двух подходов, основанных:

- на различии фазовых соотношений токов симметричных составляющих;
- различии векторных соотношений токов симметричных составляющих.

Все представленные неравенства (см. таблицу) имеют одинаковую структуру и форму, что удобно и полезно при программной реализации и проверке работоспособности алгоритмов.

В случае использования фазовых соотношений условия идентификации основаны на использовании двух неравенств. Первое из них определяет условие идентификации особой фазы (поврежденной при однофазном замыкании и неповрежденной при двухфазном замыкании [1]). Второе условие определяет поврежденные фазу или фазы. Отметим, что и в этом случае допускаются значительные фазовые погрешности. При однофазном коротком замыкании, например фазы A, в месте повреждения справедливы [4] соотношения

$$I_{1A} = I_{2A} = I_0, \quad (2)$$

в это же время для неповрежденных фаз фазовые соотношения между токами симметричных составляющих существенно отличаются:

$$\left. \begin{aligned} \arg(I_{2C} / I_0) &= 120^\circ \\ \arg(I_{2B} / I_0) &= 240^\circ \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Соотношения токов при различных видах повреждений

№	Вид повреждения	Граничные уравнения	Условия идентификации вида повреждения (фазовые соотношения)
1	ABC	$I_0 = 0, I_2 = 0$	$ I_1 > K_1 I_2 + K_2 I_0 $
2	AB	$I_0 = 0, I_{2C} = -I_{1C}$	$ I_2 > K I_0 ,$ $-60^\circ < \arg(I_{2C} / I_{1C}) < 60^\circ$
3	BC	$I_0 = 0, I_{2A} = -I_{1A}$	$ I_2 > K I_0 ,$ $-60^\circ < \arg(I_{2A} / I_{1A}) < 60^\circ$
4	CA	$I_0 = 0, I_{2B} = -I_{1B}$	$ I_2 > K I_0 ,$ $-60^\circ < \arg(I_{2B} / I_{1B}) < 60^\circ$
5	ABO	$I_0 \neq 0, I_{1C} + I_{2C} + I_0 = 0, I_{2C} \neq 0$	$K I_0 > I_2 ,$ $-15^\circ < \arg(I_{2C} / I_0) < 105^\circ$ $+90^\circ < \arg(I_{1C} / I_{2C}) < 270^\circ$
6	BCO	$I_0 \neq 0, I_{1A} + I_{2A} + I_0 = 0, I_{2A} \neq 0$	$K I_0 > I_2 ,$ $-15^\circ < \arg(I_{2A} / I_0) < 105^\circ,$ $+90^\circ < \arg(I_{1A} / I_{2A}) < 270^\circ$
7	CAO	$I_0 \neq 0, I_{1B} + I_{2B} + I_0 = 0, I_{2B} \neq 0$	$K I_0 > I_2 ,$ $-15^\circ < \arg(I_{2B} / I_0) < 105^\circ,$ $+90^\circ < \arg(I_{1B} / I_{2B}) < 270^\circ$
8	AO	$I_0 \neq 0, I_{1A} = I_{2A} = I_0, I_{2A} \neq 0$	$K I_0 > I_2 ,$ $-15^\circ < \arg(I_2 / I_0) < 105^\circ,$ $-90^\circ < \arg(I_{1A} / I_{2A}) < 90^\circ$
9	BO	$I_0 \neq 0, I_{1B} = I_{2B} = I_0, I_{2B} \neq 0$	$K I_0 > I_2 ,$ $-15^\circ < \arg(I_2 / I_0) < 105^\circ,$ $-90^\circ < \arg(I_{1B} / I_{2B}) < 90^\circ$
10	CO	$I_0 \neq 0, I_{1C} = I_{2C} = I_0, I_{2C} \neq 0$	$K I_0 > I_2 ,$ $-15^\circ < \arg(I_2 / I_0) < 105^\circ,$ $-90^\circ < \arg(I_{1C} / I_{2C}) < 90^\circ$

При двухфазном коротком замыкании на землю, допустим фаз B и C (особая фаза в этом случае – фаза A), имеем

$$I_{1A} + I_{2A} + I_0 = 0, \quad (4)$$

При этом

$$I_{2A} + I_{2E} = I_0 Z_{oE}, \quad (5)$$

где Z_{2E} и Z_{oE} – эквивалентные сопротивления обратной и нулевой последовательностей.

Сопротивление Z_{oE} содержит активное переходное сопротивление в месте повреждения, следовательно, между токами I_{2A} и I_0 может возникнуть сдвиг фаз, который в пределе при чисто активном

$Z_{0\Sigma}$ (при переходном сопротивлении в месте повреждения $R_F \rightarrow \infty$) и индуктивном Z_{2E} равен

$$\arg(I_{2A} / I_0) = 90^\circ \quad (6)$$

$R_F \rightarrow \infty$

Следовательно, пределы существования угла между токами обратной и нулевой последовательностей могут быть определены неравенством

$$0 < \arg(I_{2A} / I_0) < 90^\circ \quad (7)$$

Различие условий (7) и (3) может быть положено в основу определения особой фазы. При этом с учетом возможных погрешностей измерений для надежного распознавания особой фазы можно принять

$$-15^\circ < \arg(I_{2A} / I_0) < 105^\circ \quad (8)$$

Выявив особую фазу, можно определить вид повреждения и поврежденные фазы. Для этого достаточно воспользоваться различием фазовых соотношений между токами прямой и обратной последовательностей. Действительно, при однофазном замыкании (по-прежнему принимаем, что особая фаза – A)

$$\arg I_{1A} = \arg I_{2A}, \quad (9)$$

при двухфазном замыкании фаз B и C на землю

$$\arg I_{1A} \approx -\arg I_{2A}, \quad (10)$$

так как значения эквивалентных сопротивлений прямой и обратной последовательностей в энергосистемах близки друг к другу [4]. Следовательно, выполнение неравенства

$$-90^\circ < \arg I_{1A} / I_{2A} < 90^\circ \quad (11)$$

соответствует поврежденной фазе A и, соответственно, невыполнение – поврежденным фазам B и C на землю.

При двухфазном коротком замыкании на землю уравнение (4) выполняется только для одной фазы. Однако при однофазном замыкании уравнение этого вида выполняется для обеих неповрежденных фаз. С учетом сказанного алгоритм определения поврежденных фаз можно представить в виде трехкратной проверки условия вида

$$|I_{1K} + I_{2K} + I_0| < S \max(|I_{1K}|, |I_{2K}|, |I_0|), \quad (12)$$

Мисриханов Мисрихан Шапиевич,
МЭС Центра – филиал ОАО «ФСК ЕЭС»,
генеральный директор, доктор технических наук, профессор,
телефон (495) 963-47-17,
e-mail: mmsh@mes-centra.ru

Любарский Дмитрий Романович,
ОАО «Энергосетьпроект» (г. Москва),
доктор технических наук, зам. генерального директора по научной работе,
телефон (4932) 26-99-05,
e-mail: mmsh@mes-centra.ru

Саухатас Антанас Самюэлио,
Латвийский государственный технический университет (г. Рига),
доктор технических наук, профессор,
e-mail: mmsh@mes-centra.ru

где S – коэффициент, значение которого должно быть достаточно малым и выбирается исходя из условий отстройки от небаланса.

Очевидно, что однократное выполнение (12) соответствует двухфазному короткому замыканию на землю, а двухкратное выполнение – однофазному. Аналогично, но без использования в (12) токов нулевой последовательности можно определить поврежденные фазы при двухфазном коротком замыкании.

Описанный алгоритм реализован совместно с продольной дифференциальной защитой. Для этого использованы два связанных оптико-волоконным кабелем терминала. Синхронизация измерений осуществляется при помощи синхронизирующих команд, передаваемых по каналу связи. Экспериментальная проверка подтвердила работоспособность описанного алгоритма.

Заключение

Использование современных программно-технических средств, позволяющих осуществлять синхронные измерения на обоих концах поврежденного участка линии электропередачи, обеспечивает эффективное решение задачи определения ВППФ. Рассмотренный алгоритм удобен для его программной реализации и экспериментальной проверки.

Список литературы

1. **Фабрикант В.Л.** Дистанционная защита. – М.: Высш. шк., 1978.
2. **Беркович М.А., Семенов В.А.** Основы автоматизации энергосистем. – М.: Энергия, 1968.
3. **Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш.** Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / Под ред. В.А. Шуина. – М.: Энергоатомиздат, 2003.
4. **Ульянов С.А.** Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1964.
5. **Аржанников Е.А.** Дистанционный принцип в релейной защите и автоматике линий при замыканиях на землю. – М.: Энергоатомиздат, 1985.