



Авторы:
к.т.н. Н. А. Дони,
ООО НПП «ЭКРА»,
г. Чебоксары, Россия

д.т.н. РТУ В. Г. Гарке,

И. Ю. Иванов
КНИТУ им. А. Н. Туполева
(КАИ), Казань, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОВЕРШЕНСТВА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ 110-220 КВ

УДК 621.316.925

IMPROVING LINE DIFFERENTIAL PROTECTION VOLTAGE OF 110-220 KV

Рассматриваются недостатки дифференциальной защиты линий электропередачи. Предлагаются меры для устранения этих недостатков. Описывается алгоритм работы защиты, разработанного для микропроцессорного устройства дифференциальной защиты линий напряжением 110-220 кВ.

Ключевые слова: дифференциальная защита линии, насыщение трансформаторов тока, переходный режим, дифференциально-фазная защита, моделирование энергосистемы.

N. A. Doni,
Limited liability company
Research-and-production
enterprise «EKRA»,
Cheboksary, Russia.

V. G. Garke,

I. Y. Ivanov,
Kazan National Research
Technical University named
after A.N. Tupolev (Kazan
aviation institute), Kazan,
Russia.

Abstract:

This paper describes deficiencies of line differential protection. Made proposals to remove these deficiencies. The paper contains description of protection algorithm designed for microprocessor-based line differential protection voltage of 110-220 kV.

Keywords:

Line differential protection, saturation of current transformers, transient conditions, phase-comparison protection, power system simulation tools.

В настоящее время для реализации быстросрабатывающей защиты линий электропередачи (ЛЭП) 110-220 кВ с абсолютной селективностью всё чаще находят применение дифференциальная защита линии (ДЗЛ) [1].

Для реализации ДЗЛ информация об измеряемых токах должна передаваться на противоположные концы ЛЭП на значительные расстояния. В первых устройствах ДЗЛ передача информации выполнялась при помощи аналоговых сигналов малой мощности, при этом линейной связью являлись металлические контрольные провода. На протяжённых ЛЭП сопротивление соединительного кабеля становилось недопустимо большим. Существовала большая вероятность повреждения кабеля во вторичных цепях ДЗЛ. Кроме того, высокая стоимость работ по прокладке кабеля, ограничивали область применения ДЗЛ линиями малой протяженности (до 20 км) без отпаек [2].

Современный уровень техники позволил расширить область применения ДЗЛ за счёт использования волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) для передачи информации с одного конца ЛЭП на другой. В результате появилась возможность реализовать защиту ДЗЛ протяжённых линий, длина которых может превышать сотни километров [3].

Современные устройства ДЗЛ могут сравнивать:

- 1) мгновенные значения токов (выборки токов) по концам ЛЭП;
- 2) вектора токов по концам ЛЭП;

В первом случае производится передача

оцифрованных мгновенных значений токов на другой конец ЛЭП. Использование мгновенных величин токов позволяет иметь малые времена срабатывания ДЗЛ. Однако, это требует принятия дополнительных мер для предотвращения неправильных действий защиты при насыщении измерительных ТТ.

В устройствах ДЗЛ, основанных на сравнении векторов токов производится передача комплексных значений токов (векторов на комплексной плоскости), которые вычисляются на основании значений нескольких выборок. Вычисление векторов производится согласно дискретному преобразованию Фурье. Преимуществом второго способа реализации ДЗЛ является хорошая фильтрация апериодической составляющей тока КЗ и всех высших гармоник.

Используемые каналы связи для ДЗЛ ограничены по пропускной способности (типовая скорость 64 кбит/с), поэтому устройства ДЗЛ большинства производителей передают векторные величины токов, так как в этом случае предъявляются меньшие требования к пропускной способности канала.

В то же время существуют публикации [4], в которых описывается устройство ДЗЛ, передающие выборки токов по каналу связи с пропускной способностью 64 кбит/с. Это достигается благодаря более рациональному соотношению полезной и служебной информации в пакете передачи данных на другой конец ЛЭП.

Необходимо также отметить, что на выбор способа реализации ДЗЛ, влияют следующие параметры:



- частота выборки мгновенных значений тока (частота дискретизации) – $f_{диск}$;
 - частота формирования пакета передаваемых данных на другой конец ЛЭП – $f_{пак}$.

Некоторые производители устройств ДЗЛ сталкиваются с проблемой реализации защиты на базе мгновенных значений, если $f_{диск}$ и $f_{пак}$ не кратны друг другу. Например, в случае $f_{диск} = 1200$ Гц (24 выборки тока за период) и $f_{пак} = 250$ Гц (пакет передачи данных на другой конец ЛЭП формируется каждые 4 мс).

Для $f_{пак} = 250$ Гц подойдут следующие значения $f_{диск}$: 1000 Гц (20 выборок тока за период), 2000 Гц (40 выборок тока за период) и т.д. Более высокое значение $f_{диск}$ позволяет реализовать ДЗЛ на базе мгновенных значений с наилучшими характеристиками, однако в этом случае необходимо иметь более высокие скорости передачи информации на другой конец ЛЭП.

Современные устройства ДЗЛ имеют ряд преимуществ по сравнению с другими устройствами защит ЛЭП с абсолютной селективностью – дифференциально-фазной защитой (ДФЗ) и направленной защитой с высокочастотной блокировкой (ВЧБ):

1) пофазное сравнение токов в ДЗЛ позволяет выполнить естественный и надёжный выбор повреждённых фаз.

Как известно, при реализации ДФЗ и ВЧБ применяют комбинированные фильтры, преобразующие трёхфазную систему токов в однофазную [5], для того чтобы обеспечить защиту трёх фаз ЛЭП, используя только один ВЧ канал.

2) ДЗЛ может применяться в сетях со слабым источником питания, а также для защиты тупиковых ЛЭП 110-220 кВ. Необходимость установки быстродействующей защиты может возникнуть на тупиковых ЛЭП 110-220 кВ, питающих крупные промышленные предприятия с непрерывным производственным процессом, критичных к длительной посадке напряжения [6].

3) ДЗЛ может применяться для защиты кабельных и кабельно-воздушных ЛЭП 110-220 кВ.

Последнее преимущество является особенно важным, так как:

1) высокочастотные защиты не

всегда могут обеспечить необходимую надёжность защиты воздушной ЛЭП с кабельными вставками из-за ухудшения ВЧ канала как среды передачи информации;

2) кабельные и кабельно-воздушные ЛЭП высокого напряжения приобретают всё большую популярность при создании сетей электроснабжения городов, крупных промышленных предприятий и ряда других объектов [7].

Однако, наряду с очевидными преимуществами, ДЗЛ имеет определённые недостатки, присущие всем дифференциальным защитам.

Как известно, в дифференциальных защитах рабочий сигнал образуется посредством выделения дифференциального тока, то есть геометрической суммы токов, замеренных на границах зоны защиты, и сравнения его с постоянной величиной – током срабатывания [1]. Для отстройки от внешних коротких замыканий (КЗ) в ДЗЛ применяется торможение. В этом случае дифференциальный ток сравнивается с током срабатывания, величина которого зависит от комбинации токов плеч (тормозного тока). Принцип торможения использует то обстоятельство, что все компоненты установившегося тока небаланса пропорциональны величине тока внешнего КЗ. Согласно этому обстоятельству торможение придаёт защите свойство увеличивать ток срабатывания при увеличении тока внешнего КЗ [8].

К недостаткам ДЗЛ с торможением следует отнести тот факт, что тормозной сигнал, необходимый при неповреждённом защищаемом объекте, в режимах повреждения последнего всегда существует и может противодействовать срабатыванию защиты. При внутренних КЗ на ЛЭП с многосторонним питанием токи от различных источников могут не совпадать по фазе. В таких случаях интенсивность рабочего сигнала в ДЗЛ снижается, а тормозной сигнал возрастает, уменьшая чувствительность, что может быть причиной несрабатывания защиты. Фазовый сдвиг в этом случае между токами может быть достаточно большим с учётом разницы углов ЭДС источников питания относи-

тельно места КЗ, влияния режима нагрузки и переходного сопротивления в месте КЗ [9].

Другим недостатком ДЗЛ является возможность неселективного срабатывания ДЗЛ при КЗ вне зоны действия при насыщении электромагнитных трансформаторов тока (ТТ) на одном из концов ЛЭП [3].

Физической причиной этому является неприспособленность дифференциальных защит с торможением к работе в условиях резкого уменьшения вторичного тока при переходном процессе КЗ, которые свойственны ТТ с преимущественно активной нагрузкой при насыщении.

Аналитические исследования переходных процессов в ТТ, выполненные методом вспомогательных функций [10], показали, что в случае чисто активного сопротивления нагрузки и сопротивления вторичной обмотки ТТ, ток в плече дифзащиты после насыщения ТТ снижается практически до нуля, а в последующих периодах (после первого насыщения) ТТ будет насыщаться в начальной части полуволны первичного тока. Интервалы идеальной трансформации при значительных постоянных времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ (0,2-0,3 с) могут снижаться до 1,5-2 мс с начала полуволны.

Для того чтобы обеспечить селективность действия ДЗЛ в режиме насыщения ТТ, современные производители микропроцессорных устройств РЗА предлагают следующее [11]:

1) применение повышенных коэффициентов торможения или различных видов торможения;

2) увеличение выдержки времени дифференциальной защиты.

Однако при использовании данных мер теряются чувствительность и быстродействие данной защиты.

Таким образом, основная трудность в решении проблемы повышения технического совершенства устройств ДЗЛ заключается в противоречивости требований, предъявляемых к этим защитам. В настоящее время эти противоречия обусловлены недостаточным уровнем отстроенности от



внешних КЗ в переходных процессах. Зачастую их отстроенность достигается за счёт уменьшения быстродействия и чувствительности.

Для устранения рассмотренных недостатков в данной работе в алгоритме функционирования ДЗЛ предлагается использовать вспомогательные признаки переходных процессов, свойственные режимам внутреннего или внешнего КЗ, в дополнение к традиционному принципу действия, основанному на вычислении дифференциального и тормозного токов.

К самым информативным и простым в реализации вспомогательным признакам относятся следующие:

1) совпадение по времени полуволн одинаковой полярности токов плеч дифференциальной защиты при внутренних КЗ;

2) превышение длительности интервала времени от максимума дифференциального тока до минимума t_2 над длительностью интервала времени от момента появления дифференциального тока $I_{\text{Диф}}$ до его максимума t_1 при внешних КЗ [12];

3) отставание фронта волны дифференциального тока от фронта волны тормозного тока при внешних КЗ [1].

Первый вспомогательный признак широко используется в технике релейной защиты при реализации ДФЗ линий электропередачи [5].

Второй вспомогательный признак основан на различии свойств насыщенного и ненасыщенного ТТ и поэтому проявляется тем интенсивнее, чем больше изменяется магнитное состояние сердечника насыщенного ТТ за период. Третий вспомогательный признак позволяет быстро определить факт внешнего КЗ на интервале идеальной трансформации ТТ (до насыщения) и тем самым, предотвратить неселективную работу защиты.

Оценка алгоритма действия ДЗЛ с контролем указанных вспомогательных признаков производится на основе математической модели электроэнергетической системы (ЭЭС), заданной с помощью программного обеспечения MATLAB. Вид моделируемой ЭЭС пред-

ставлен на рис. 1.

Силовая часть ЭЭС, выполненная с помощью блоков библиотеки SimPowerSystems приложения MATLAB, состоит из источников питания C_1, C_2 ; нагрузки, подключенной через понижающие трансформаторы T_1, T_2 ; выключателей B_1, B_2 ; линии электропередачи L , трансформаторов тока $ТТ_1, ТТ_2$.

Модель, выполненная по данной схеме, позволяет исследовать поведение ДЗЛ в следующих режимах: внутреннее КЗ (K_3); внешнее КЗ (K_1 и K_2); КЗ, сопровождающиеся насыщением ТТ.

При моделировании указанных режимов вычисляются фазные токи с обеих сторон моделируемой линии i_1, i_2 затем производятся различные математические и логические операции. Для реализации алгоритма работы ДЗЛ используются стандартные блоки библиотеки Simulink приложения MATLAB.

Важной функцией математической модели является возможность осциллографирования аналоговых и дискретных сигналов в различных режимах

работы защищаемого объекта.

На рис. 2 представлены осциллограммы, необходимые для анализа алгоритма определения внутреннего КЗ по первому вспомогательному признаку, где $I_1(t), I_2(t)$ – мгновенные значения токов плеч ДЗЛ.

Алгоритм определения внутреннего КЗ по первому вспомогательному признаку следующий. При возникновении КЗ в ЭЭС:

- происходит пуск защиты;
- выделяются положительные полуволны токов плеч дифференциальной защиты $I_1+(t)$ и $I_2+(t)$;
- измеряется время совпадения положительных полуолн токов плеч дифференциальной защиты $t_{\text{СОВП}}$;
- сравнивается указанное время с заданным временем блокировки $t_{\text{БЛОК}}$.

Время блокировки $t_{\text{БЛОК}}$ задаётся в зависимости от принятого угла блокирования действия защиты на отключения β , который регулируется в диапазоне $\pm (40-65)^\circ$ (по аналогии с углом блокирования, задаваемого в защитах ДФЗ).

Рис. 2. Первый вспомогательный признак при внешних и внутренних КЗ

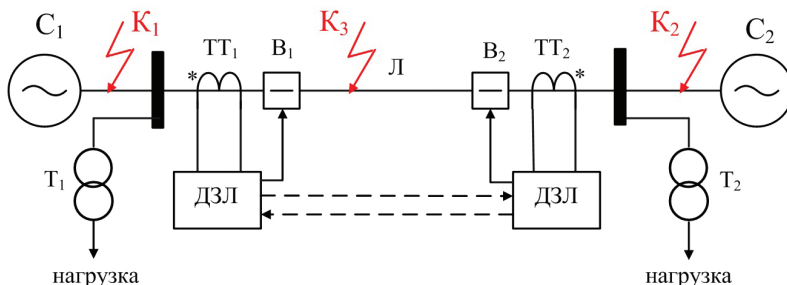
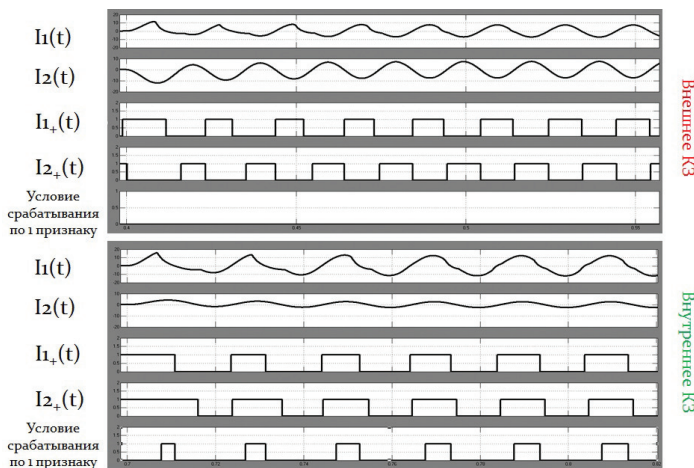


Рис. 1. Схема ЭЭС для оценки алгоритма работы защиты



По представленным осциллограммам на рис. 2 видно, что при внешнем КЗ время совпадения $t_{COBП}$ является близким к нулю, при внутреннем КЗ данное время является большой величиной (около 10 миллисекунд).

На рис. 3 представлены осциллограммы, необходимые для анализа алгоритма определения внешнего КЗ по второму вспомогательному признаку. Алгоритм работы данного блока направлен на решение обратной задачи, то есть выявления внешнего КЗ.

Алгоритм определения внешнего КЗ по второму вспомогательному признаку следующий. При возникновении КЗ в ЭЭС:

- происходит пуск защиты;
- определяются моменты наступления экстремумов дифференциального тока;
- сравниваются два интервала времени t_1 и t_2 (t_1 – интервал времени от момента появления дифференциального тока до его максимума; t_2 – интервал времени от максимума дифференциального тока до его минимума).

Для определения экстремумов измеряется величина дифференциального тока, затем берётся производная дифференциального тока по времени $dI_{ДИФ}/dt$.

По представленным осциллограммам на рис. 3 видно, что при внешних КЗ выполняется условие $t_1 < t_2$.

На рис. 4 представлены осциллограммы, необходимые для анализа алгоритма определения внешнего КЗ по третьему вспомогательному признаку.

Алгоритм определения внешнего КЗ по третьему вспомогательному признаку следующий.

- происходит пуск защиты;
- регистрируется увеличение тормозного тока;
- анализируется фронт волны дифференциального тока.

По представленным осциллограммам на рис. 4 видно, что при внешних КЗ в первый момент возникновения повреждения фронт волны дифференциального тока отстаёт от фронта волны тормозного тока.

На основании проведённых исследований на математической модели работы ДЗЛ в различных режимах была разработана структурная схема усовершенствованной защиты ДЗЛ (рис. 5).

В алгоритме работы предлагаемой ДЗЛ (рис. 5) используются мгновенные значения вторичных токов плеч i_1, i_2 (ф. А, В, С соответственно) для обеспечения корректной работы блоков, использующих вспомогательные признаки. При этом, для повышения эффективности функционирования ДЗЛ, в разработанном алгоритме используются компараторы тормозного тока,

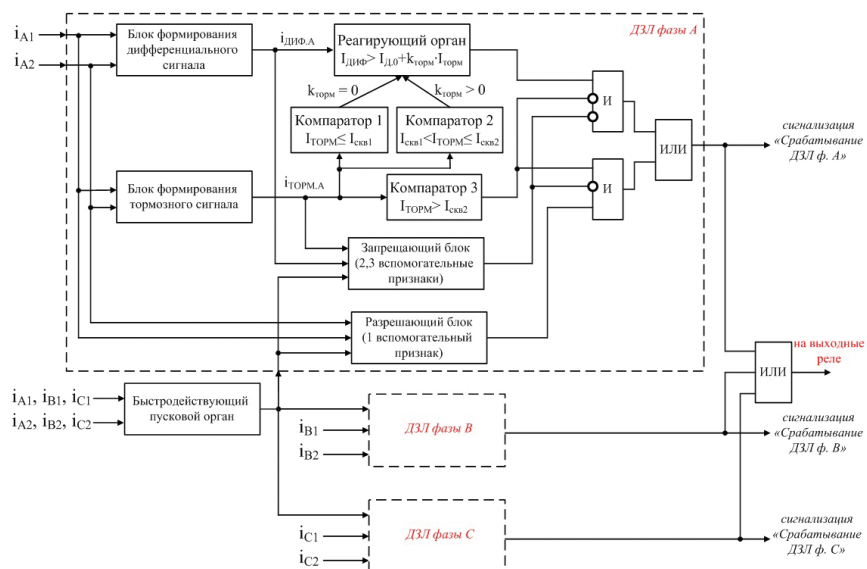


Рис. 5. Структурная схема усовершенствованной ДЗЛ

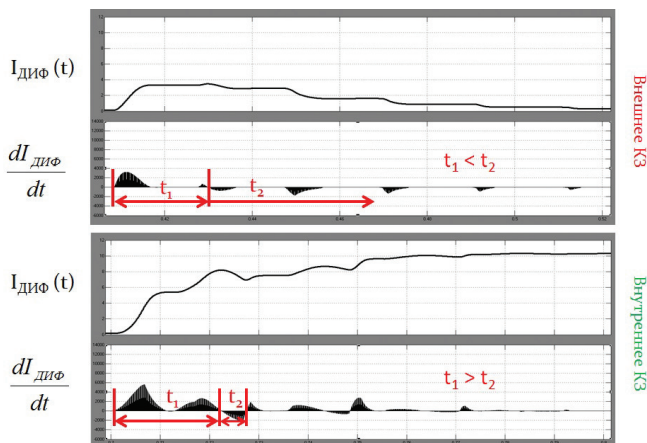


Рис. 3. Второй вспомогательный признак при внешних и внутренних КЗ

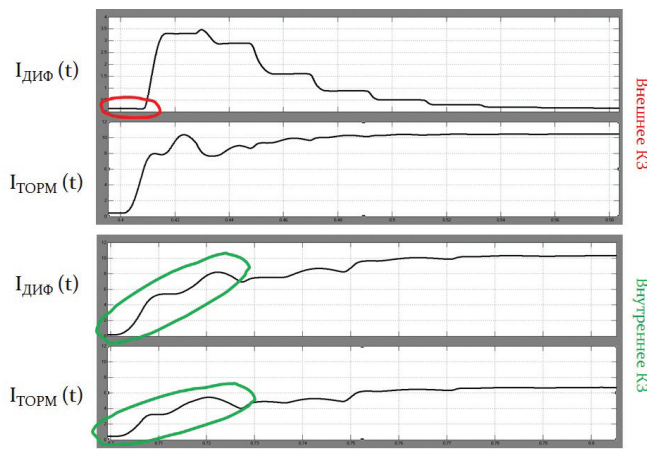


Рис. 4. Третий вспомогательный признак при внешних и внутренних КЗ



Дони Николай Анатольевич
 Дата рождения: 26.10.1946 г.
 Окончил энергетический факультет Новочеркасского политехнического института в 1969 году. В 1981 году во ВНИИЭ защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка высокочастотной защиты линий сверхвысокого напряжения». Директор по науке - заведующий отделом перспективных разработок. Имеет более 120 научных публикаций в области релейной защиты, микропроцессорной техники и цифровой обработки сигналов электроэнергетических систем.

позволяющие реализовать наиболее совершенный подход обработки сигналов, учитывающий особенности работы ТТ и защищаемой линии.

Исходя из этого, принята характеристика срабатывания защиты, вид которой показан на рис. 6, где $I_{Диф}$ – дифференциальный ток; $I_{СКВ}$ – сквозной ток КЗ; $I_{Д.0}$ – начальный порог срабатывания ДЗЛ; k_T – коэффициент торможения.

Из сравниваемых токов по концам линии i_1, i_2 формируется дифференциальный $i_{Диф}$ и тормозной токи $i_{ТОРМ}$ в каждой фазе.

На основе вспомогательных признаков, в алгоритме работы усовершенствованной ДЗЛ реализованы:

- разрешающий блок (РБ), используемый для разрешения работы ДЗЛ при выявлении КЗ в зоне действия защиты;
- запрещающий блок (ЗБ), используемый для блокирования работы ДЗЛ при выявлении КЗ вне зоны действия защиты.

Пуск (разрешение действия) РБ и ЗБ происходит при помощи быстродействующего пускового органа (БПО), на вход которого подаются токи всех фаз. БПО реагирует на появление симметричных составляющих тока короткого замыкания, а также на приращение токов симметричных составляющих.

Согласно виду принятой характеристики срабатывания защиты (рис. 6) удобно связать тормозной ток со сквозным током, при этом выделяются следующие режимы работы ДЗЛ:

1) при малых сквозных токах ($I_{ТОРМ} \leq I_{СКВ1}$);

устройство работает как традиционная дифференциальная защита без торможения ($k_{ТОРМ} = 0$). Условие срабатывания определяется следующим образом:

$$I_{Диф} > I_{Д.0}$$

В этом случае обеспечивается максимальная чувствительность защиты при внутренних коротких замыканиях.

2) при нормальных сквозных токах ($I_{СКВ1} < I_{ТОРМ} \leq I_{СКВ2}$); устройство работает как традиционная дифференциальная защита с торможением ($k_{ТОРМ} > 0$).

Условие срабатывания определяется следующим образом:

$$I_{Диф} > I_{Д.0} + k_T I_{ТОРМ}$$

В этом случае обеспечивается достаточная чувствительность при внутренних коротких замыканиях, при этом происходит отстройка от тока небаланса при внешних повреждениях, сопровождающихся небольшим насыщением ТТ.

3) при больших сквозных токах ($I_{ТОРМ} > I_{СКВ2}$): в этом случае повышается вероятность излишней работы традиционной дифференциальной защиты при внешнем КЗ вследствие насыщения ТТ, поэтому действие ДЗЛ определяется работой РБ и ЗБ, устойчивость функционирования которых при переходном процессе КЗ значительно выше, чем устойчивость функционирования реагирующего органа.

Работа РБ направлена на определение внутреннего КЗ при помощи первого вспомогательного признака.

Условие срабатывания разрешающего блока следующее:

$$t_{совп} > t_{блок}$$

где $t_{совп}$ – время совпадения полуволн одинаковой полярности токов плеч;

$t_{блок}$ – время блокирования действия защиты на отключение (время блокировки).

При этом время блокировки $t_{блок}$ задается в зависимости от принятого угла блокирования действия защиты на отключение β :

$$t_{блок} > \frac{10(мс) \cdot \beta(град)}{180(град)}$$

Физической причиной преимущества первого вспомогательного преимущества в переходном режиме КЗ (в отношении динамических характеристик защиты) является стабильность его проявления даже при сильном амплитудном искажении формы тока (рис. 2).

Работа ЗБ направлена на определе-

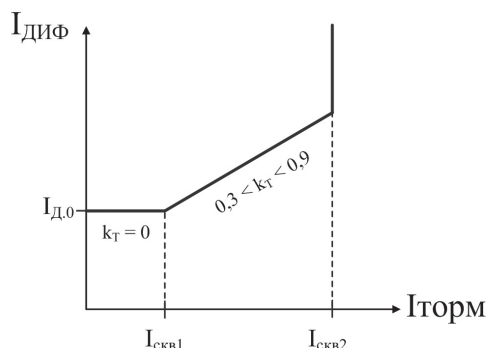


Рис. 6. Характеристика срабатывания предлагаемой ДЗЛ



Иванов

Игорь Юрьевич

Дата рождения: 23.12.1985, аспирант кафедры Электрооборудования Казанского Национального Исследовательского Технического Университета им. А.Н. Туполева; выпускник кафедры Релейной защиты и автоматики Казанского Государственного Энергетического Университета.

ние внешнего короткого замыкания при помощи второго и третьего вспомогательных признаков. При выявлении КЗ вне зоны действия ДЗЛ блокируется на время, необходимое для отключения внешнего КЗ.

Выводы

1) Привлечение дополнительной информации в виде вспомогательных отличительных признаков позволяет уменьшить влияние погрешностей электромагнитных ТТ на работу ДЗЛ в переходных режимах КЗ.

Это повышает надёжность работы ДЗЛ во время насыщения ТТ, так как традиционные признаки КЗ (дифференциальный, тормозной сигналы) недостаточно устойчивы именно в переходном режиме КЗ. Используемые вспомогательные признаки обладают существенными преимуществами перед традиционными признаками, так как они позволяют идентифицировать режим за несколько миллисекунд, главным образом, в условиях переходного режима.

2) Использование дополнительного компаратора З в алгоритме работы усовершенствованной ДЗЛ (рис. 5) позволяет реализовать более совершенный подход обработки сигналов, учитывающий особенности работы ТТ и защищаемой линии.

Благодаря этому исключается зависимость чувствительности и быстродействия защиты от уровня отстроенности при внешних коротких замыканиях.

Литература

1. Циглер Г. Цифровая дифференциальная защита. Принципы и область применения. М., Знак. 2008. – 273 с.
2. Комплекты продольной дифференциальной защиты линий электропередачи типов ДЗЛ-2 УХЛ-4 и ДЗЛ-2 04. Техническое описание и руководство по эксплуатации. – 19 с.
3. Дони А.Н., Дони Н.А. Особенности продольной дифференциальной защиты линии с цифровыми каналами связи между полуккомплектами. // Материалы конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем», 2009, С. 192-197.
4. Fischer N., Kaszteny B., Moxley R., Rzepka G. Protection System Design and Application Considerations for Advanced Line Differential Relaying. // Материалы конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем», 2011, P51 – Poster-02.
5. Будаев М.И. Высокочастотные защиты линий 110-220 кВ. М., Энергоатомиздат. 1989. – 112 с.
6. Иванов И.Ю. Практические вопросы применения микропроцессорных защит для решения задач повышения устойчивости энергосистем и надёжности электроснабжения крупных промышленных потребителей. // Материалы докладов V открытой молодёжной научно-практической конференции «Диспетчеризация в энергетике: проблемы и перспективы». Казань: КГЭУ, 2011 г., с. 25-28.
7. Шкарин Ю.П. Высокочастотные тракты каналов связи по линиям электропередачи. М., Энергопрогресс. 2001. – 72 с.
8. Ульяницкий Е.М. и др. К вопросу выполнения торможения дифференциальных реле. // Изв. вузов. – Электромеханика, 1974. - № . – С. 204-210.
9. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита, М, Энергоатомиздат. 2007. – 549 с.
10. Багинский Л.В. Переходные процессы в однофазной дифференциальной группе трансформаторов тока при глубоких насыщениях. // Электричество, 1984. - № 12. – С. 11-16.
11. Рекомендации по выбору уставок продольной дифференциальной защиты линии электропередачи типа ШЭ2607 091- 93. 2008. НПП «ЭКРА». – 16 с.
12. Багинский Л.В. Быстродействующая защита мощных трансформаторов (автотрансформаторов). // Электричество, 1989. - № 4. – С. 14-22.