



Авторы:

д.т.н. Булычев А.В.,
к.т.н. Бычков Ю.В.,
ООО «НПП Бреслер»,
г. Чебоксары, Россия.

Грибков М.А.,
ПАО «Россети Москов-
ский регион»,
г. Москва, Россия.

**D.Sc. Bulychev A.V.,
Ph.D. Bychkov Y.V.,**
«NPP Bresler» LLC,
Cheboksary, Russia.
Gribkov M.A.,
PJSC «Rosseti Moscow
Region», Moscow, Russia.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

IMPROVEMENT OF DIGITAL DISTANCE PROTECTION FOR ELECTRICAL DISTRIBUTION SYSTEM

Аннотация: текущее состояние методов определения места повреждения позволяет реализовать дистанционный принцип в явном и наглядном виде. В статье рассмотрена дистанционная защита для распределительных сетей, в которой данный подход осуществлён, и приведены основные условия выбора её параметров срабатывания.

Ключевые слова: распределительная сеть, дистанционная защита, определение места повреждения, выбор параметров срабатывания.

Abstract: current fault location methods can be used to simplify distance protection and make its principle more obvious. This paper shows such protection in the context of distribution system and contains general requirements for protection settings calculation.

Keywords: distribution system, distance protection, fault location, protection settings calculation.

Введение

Распределительные электрические сети занимают особенно значимое место в общей структуре электроэнергетических систем (ЭЭС). Через них передается практически вся электрическая энергия ЭЭС к конечным потребителям и преобразователям электрической энергии. Таким образом, они во многом определяют надежность электроснабжения в целом.

Стремление повысить надежность и экономичность электроснабжения отдельных потребителей привело к появлению малой распределенной генерации в этих сетях и, как частное следствие, кольцевых сетей 6-35 кВ.

Традиционные токовые и направленные токовые защиты в этих условиях не могут действовать селективно. Кроме этого, своеобразие режимов современных распределительных сетей не позволяет получить селективное в полной мере действие даже традиционных дистанционных защит (ДЗ), которые широко применяются в сетях с напряжением 110 кВ и выше. Особенности режимов обусловлены, прежде всего, тем, что мощности крупных динамичных нагрузок (например, электродвигателей) соизмеримы с мощностями основных элементов этих сетей (например, трансформаторов). В этой связи, параметры максимальных рабочих режимов (пусков и самозапусков электродвигательных нагрузок) оказываются

близкими к параметрам, характеризующим короткие замыкания (КЗ). Отстройка ДЗ, построенной на основе реле сопротивления, от рабочих режимов в таких сетях является очень сложной, а порой невыполнимой задачей [1]. В качестве способов решения описанной выше проблемы можно отметить [2, 3].

Важнейшей особенностью цифровой техники является способность запоминать сигналы и воспроизводить их в последующем. Своеобразие цифровой техники, безусловно, целесообразно использовать для улучшения свойств релейной защиты.

В этой связи, в рамках договора на выполнение научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы (НИОКР) между ООО «НПП Бреслер» и ПАО «Россети Московский регион» разработана новая, более совершенная ДЗ. Улучшение основных характеристик защиты достигнуто за счет возможностей, присущих цифровой элементной базе, путем регистрации процесса КЗ и измерения удаленности точки КЗ с помощью более точной модели контролируемой защитой линии.

Принцип работы

На рис. 1 показана структурная схема ДЗ применительно к цифровой реализации.

При возникновении КЗ в произвольной точке линии электропередачи (ЛЭП) блок регистрации выявляет начало переход-



Булывчев Александр Витальевич

Год рождения: 1956. Окончил в 1980 г. Вологодский политехнический институт по специальности «ЭлектроСнабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства», инженер-электрик. В 1984 г. закончил аспирантуру и защитил кандидатскую диссертацию по разработке и исследованию отдельных узлов комплексной (микроэлектронной) системы защиты турбогенераторов. В 1998 г. закончил докторантуру и защитил докторскую диссертацию на тему «Совершенствование защит блоков генератор-трансформатор и электродвигателей». Технический директор ООО «НПП Бреслер», профессор.



Бычков Юрий Владимирович

Год рождения: 1983. Окончил ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 2007 г., кафедра «ТОЭ и РЗА». В 2012 г. в ЧГУ им. И.Н. Ульянова защитил кандидатскую диссертацию «Развитие и приложения дистанционного метода определения места повреждения линий электропередачи». Заведующий сектором основных защит линий ООО «НПП Бреслер».

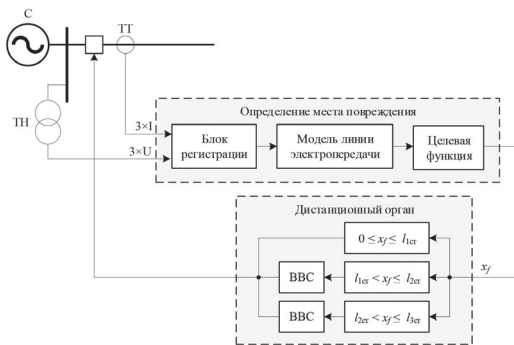


Рис. 1. Структурная схема ДЗ

ного процесса и на основании имеющейся информации об измеренных величинах формирует два набора значений токов и напряжений, которые соответствуют предшествующему (доаварийному) и текущему аварийные составляющие, которые, согласно принципу наложения [4], определяются, главным образом, видом и местом повреждения. Их использование позволяет отстроиться от влияния нагрузочного режима при расчете места повреждения.

Далее запускается итерационный процесс, в ходе которого полученные наборы токов и напряжений преобразовываются моделью ЛЭП в ток предполагаемой ветви повреждения и напряжение в предполагаемой точке повреждения [5]. На основе полученных величин рассчитывается целевая функция – реактивная мощность цепи КЗ. Предположив, что сопротивление в месте повреждения имеет активный (резистивный) характер [6], за место повреждения принимается точка, в которой реактивная мощность равна нулю.

Полученная координата дистанционным органом сравнивается с длинами зон отдельных ступеней. В зависимости от результата сравнения формируется сигнал срабатывания конкретной ступени, и через соответствующую выдержку времени на срабатывание (ВВС) формируется команда управления выключателем.

Кроме этого, полученная координата места повреждения (удаленность точки короткого замыкания) отображается на экране устройства, что позволяет быстро и эффективно организовать ремонтно-восстановительные работы.

В качестве примера рассмотрим схему, изображенную на рис. 2. На ней указаны ДЗ

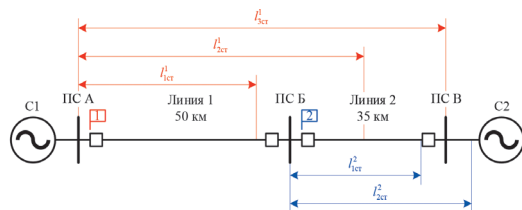


Рис. 2. Пример электрической сети

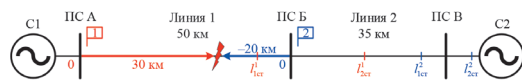


Рис. 3. Работа защит при замыкании на линии 1

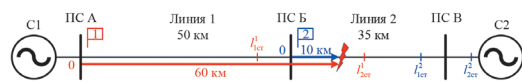


Рис. 4. Работа защит при замыкании на линии 2

линий 1 и 2 и зоны срабатывания их ступеней.

При замыкании в 30 км от подстанции (ПС) А (рис. 3) ДЗ линии 1 в ходе расчетов получит координату повреждения x_f^1 , равную 30 км. При сравнении с зонами ступеней будет выполняться условие:

$$0 \leq x_f^1 \leq l_{1ст}^1$$

что означает срабатывание первой ступени защиты 1 без выдержки времени.

Координата повреждения x_f^2 , рассчитанная защитой линии 2 при этом же повреждении, будет равна -20 км, что является признаком внешнего КЗ, поэтому защита 2 не сработает.

При замыкании в 10 км от ПС Б (рис. 4) координата повреждения защиты линии 1 будет равна 60 км. Это соответствует условию срабатывания второй ступени:

$$l_{1ст}^1 < x_f^1 \leq l_{2ст}^1$$

В результате защита 1 сформирует команду на отключение своей ЛЭП через выдержку времени.

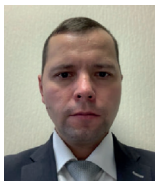
Координата повреждения x_f^2 , рассчитанная защитой линии 2, равна 10 км, будет выполнять условие срабатывания первой ступени:

$$0 \leq x_f^2 \leq l_{1ст}^2$$

а дистанционная защита 2 сработает без выдержки времени.

Выбор параметров срабатывания

При выборе параметров срабатывания разработанной в рамках НИОКР ДЗ следует руководствоваться двумя правилами. Во-первых, ступень задается зоной сраба-



Грибов

Максим Александрович

Год рождения: 1980.

В 2005 г. окончил Московский энергетический институт (ТУ) по специальности инженер по «Релейной защите и автоматизации электроэнергетических систем».

Директор департамента

релейной защиты и режимной автоматики электрических сетей ПАО «Россети Московский регион».

тывания, выражающейся непосредственно в километрах. Данный параметр характеризует максимально удаленное КЗ, которое ступень должна чувствовать. Таким образом, отпадает необходимость проверки чувствительности ДЗ. Во-вторых, каждая из ступеней, исходя из назначения, должна отстраиваться от зон срабатывания защит различных энергообъектов (линий, трансформаторов), с которыми она пересекается.

Первая ступень предназначена для защиты без выдержки времени большей части ЛЭП и не должна входить в зону действия защит трансформаторов ответвлений, питаемых этой линией. Это выражается в следующей формуле:

$$l_{1ст} = k_{отс1} \cdot \min(L_{отв i}; L),$$

где L – длина защищаемой линии, км; $L_{отв i}$ – расстояние от места установки защиты до ПС i -го ответвления, км.

В качестве длины защищаемой линии рекомендуется брать расстояние от места установки устройства до участка, оснащенного выключателем и собственной защитой, или максимальное из всех $L_{отв i}$. Например, для схем, изображенных на рис. 5, величина L будет складываться следующим образом:

- а) из длин участков 1, 2 и 3;
- б) из длин участков 1 и 2;
- в) из длин участков 1, 2 и 5.

Вторая ступень предназначена для защиты всей линии. Она должна согласовываться с первой ступенью защиты следующей линии:

$$l_{2ст} = L + k_{отс2} \cdot l_{1ст сл}$$

где $l_{1ст сл}$ – зона срабатывания первой ступени защиты следующей линии, км.

Значения коэффициентов отстройки $k_{отс1}$ и $k_{отс2}$ определяются погрешностью определения места повреждения (ОМП), которая, в свою очередь, зависит от адекватности используемой модели ЛЭП, и в лучшем случае могут приниматься равными 0,95.

Третья ступень осуществляет резервирование защиты следующей линии. Ее зона

срабатывания берется равной сумме длин защищаемой и следующей линий с учетом компенсации погрешности ОМП, а также возможного удлинения, обусловленного дополнительной подпиткой со стороны ответвлений:

$$l_{3ст} = k_{удл} \cdot (L + L_{сл} + \Delta x),$$

где $L_{сл}$ – длина следующей линии, км; Δx – величина коррекции ошибки ОМП, км; $k_{удл}$ – коэффициент удлинения, о.е.

Времена срабатывания отдельных ступеней выбираются по тем же условиям, что и в традиционной ДЗ. Первая ступень выполняется без выдержки времени, однако из-за того, что величины аварийного режима фиксируются только по факту завершения переходного процесса, сигнал на срабатывание формируется через 30÷50 мс после возникновения аварии. Вторая и третья ступени должны согласовываться по времени с защитами следующих участков. Например, время срабатывания второй ступени будет определяться следующим образом:

$$t_{2ст} = t_{1ст} + \Delta t,$$

где $t_{1ст}$ – время срабатывания первой ступени защиты следующей линии, мс; Δt – ступень селективности, мс.

Дополнительно ступень должна быть согласована по времени с защитами трансформаторов ответвлений, попадающих в зону ее действия:

$$t_{ст} = \max(t_{тр i}) + \Delta t,$$

где $t_{тр i}$ – время срабатывания защиты трансформатора i -го ответвления, для которого выполняется условие $L_{отв i} \leq l_{ст}$, мс.

Из полученных значений должно выбираться максимальное.

Согласование с традиционными защитами

Препятствием для широкого внедрения защиты на новом принципе является отсут-

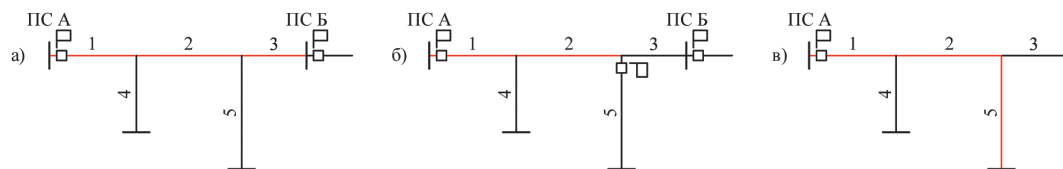


Рис. 5. К определению длины защищаемой линии

ствие методики ее согласования с традиционными защитами. В случае ДЗ, в основе которой лежит реле сопротивления, зону ступени можно легко вычислить по следующей формуле:

$$I_{ст} = \frac{X_{уст}}{X_{уд}}$$

где $X_{уст}$ – реактивное сопротивление срабатывания реле сопротивления с полигональной характеристикой, Ом; $X_{уд}$ – реактивное удельные сопротивления линии, Ом/км, а коэффициенты отстройки $k_{отс1}$ и $k_{отс2}$ принимаются равными 0,85.

Определить зону срабатывания токовых защит можно графическим способом (рис. 6). Для этого на кривой зависимости тока КЗ от места замыкания $I_{КЗ}(l)$, построенной для минимального режима, отмечается точка с ординатой, равной порогу срабатывания ступени защиты следующей линии $I_{ст.сл}$. Абсцисса этой точки будет соответствовать искомой величине $l_{ст.сл}$.

Защита трансформаторов мощностью 630 кВА и менее чаще всего выполняется с помощью плавких предохранителей, устанавливаемых на стороне высшего напряжения (ВН). Время их срабатывания можно определить графическим способом (рис. 7) по характеристике, представляющей собой зависимость времени плавки от протекающего через предохранитель тока.

У предохранителей с номинальным напряжением выше 1 кВ для любого времени срабатывания отклонение значения тока срабатывания не должно превышать $\pm 20\%$ [7], поэтому на характеристике, смещенной на 20% вправо, откладывается точка, абсцисса которой равна току междуфазного КЗ на шинах ВН ответвления в минимальном режиме. Ордината этой точки будет соответствовать искомой величине $t_{тр}$.

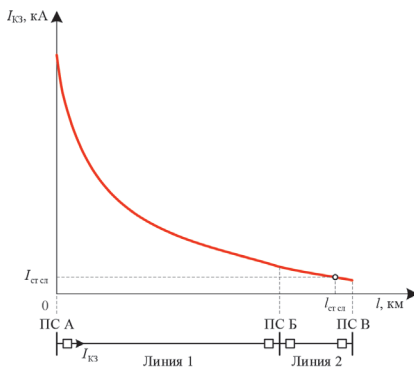


Рис. 6. Графический способ определения зоны срабатывания токовой защиты

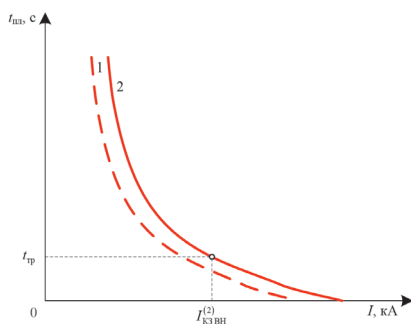


Рис. 7. Графический способ определения времени срабатывания предохранителя: 1 – характеристика завода изготовителя; 2 – характеристика, смещенная на 20% вправо

Выводы

1. Создана ДЗ с улучшенными показателями по точности и селективности, реализуемая с использованием своеобразия цифровой элементной базы и совместимая с цифровыми системами управления ПС и сетями. В основу построения защиты положены методы ОМП на ЛЭП. Это позволило улучшить основные характеристики защиты за счет возможностей, присущих цифровой элементной базе, путем регистрации процесса короткого замыкания и итерационного измерения удаленности точки КЗ с помощью более точной модели контролируемой защитой линии.

2. Разработанная ДЗ на основе методов определения расстояния до точки КЗ обеспечивает не только селективное отключение поврежденной линии, но и формирует сообщение о месте повреждения. При этом повышается точность измерения удаленности точки КЗ, снижается трудоемкость выбора параметров срабатывания защит, повышается эффективность аварийно-восстановительных работ и, тем самым, повышается надежность электроснабжения в целом.

3. Создан опытный образец разработанной ДЗ. Проведены лабораторные и заводские испытания. Результаты проведенных экспериментальных исследований позволили подтвердить правомерность методов построения защиты, допущений и ограничений, принятых при разработке защиты.

4. Разработана и апробирована методика выбора параметров срабатывания представленной ДЗ, учитывающая особенности цифровой технологии определения удаленности места КЗ. Учтены все основные ограничения и допущения, позволяющие обеспечить селективную работу защиты в реальных распределительных сетях.

Литература:

1. Чернобровов Н.В. Релейная защита. – М.: Энергия. – 1974.
2. Ефремов В.А., Мартынов М.В., Буров А.В., Гайдаш А.А. Адаптивная дистанционная защита линии электропередачи // Релейная защита и автоматизация. – 2015. – №4 (21). – С. 26-30.
3. Булычев А.В., Бычков Ю.В., Грибков М.А. Способ селективного отключения поврежденной линии по данным цифровой системы определения места повреждения // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XII Всерос. научн.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2020. – С. 228-232.
4. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей: Учеб. для вузов. 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат. – 1989.
5. Бычков Ю.В., Васильев Д.С., Павлов А.О. Алгоритмические модели в релейной защите // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 1 (06). – С. 26-31.
6. Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. – М.: Энергоатомиздат. – 2003.
7. Беркович М.А., Молчанов В.В., Семенов В.А. Основы техники релейной защиты. 6-е изд. – М.: Энергоатомиздат. – 1984.