

Авторы:

В.А. Горюнов,
А.И. Ширковец,
В.С. Петров,
ООО «Болд»,
г. Новосибирск,
ООО «НПП Бреслер»,
г. Чебоксары, Россия.

V.A. Goryunov,
A.I. Shirkovets,
V.S. Petrov,
LLC Bolid, Novosibirsk,
LLC Bresler, Cheboksary,
Russia.

Ключевые слова:

релейная защита, замыкание на землю, токовые защиты от замыканий на землю, режим заземления нейтрали.

Annotation: the ample quantity of earth fault relay protections on Russian electrotechnical market make a hard in finding optimal solution for organization of earth fault protection system. In the paper the main peculiarities of relay protections — from the simple current protections to terminals with a number of functions — are reviewed, and their reliability are analyzed. Also there are considered the methods of enforcement in relay selectivity depending on a neutral grounding condition and an earth fault mode.

Keywords: relay protection, earth fault, earth-fault current protection, neutral grounding condition

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ЗАЩИТ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

УДК 621.316

THE MEANS OF EFFECTIVENESS INCREASE FOR THE MODERN EARTH FAULT RELAY PROTECTIONS

Аннотация: большое количество видов защит от замыканий на землю, представленных на российском электротехническом рынке, вызывает затруднения в выборе оптимального устройства для организации селективной системы защиты. В статье представлены основные особенности и проанализирована надежность различных видов защит от замыканий на землю, от простых токовых защит до терминалов с комплексом функций. Рассмотрены пути обеспечения их селективности в зависимости от режима заземления нейтрали сети и характера замыкания на землю.

до сих пор является достаточно распространенным, хотя его недостатки очевидны: во-первых, принудительное изменение конфигурации схемы сводит на нет преимущества компенсации емкостного тока при заблокированной автоматике управления дугогасящим реактором (ДГР); во-вторых, изменение условий существования однофазного замыкания в предельных случаях может привести к его развитию в короткое; в-третьих – при относительно большом количестве отходящих присоединений и соответствующем времени поиска длительность воздействия перенапряжений и степень разрушения изоляции в месте повреждения существенно повышаются.

К преимуществам устройств неселективной сигнализации можно отнести работоспособность при любом режиме заземления нейтрали и при большинстве видов замыканий на землю. При перемежающихся замыканиях на землю напряжение нулевой последовательности спадает достаточно медленно, в течение одного периода, что позволяет защите почувствовать его и сработать с заданной выдержкой времени (рис. 1). Как часть системы защиты от ОЗЗ, реле максимального напряжения с выдержкой времени должны применяться в качестве резервной защиты шин и трансформатора питающей подстанции.

В целом все защиты, реагирующие на протекающий в контуре нулевой последовательности (контуре НР) ток и к числу которых неселективная сигнализация от ОЗЗ, строго говоря, не относится, можно разделить на пять основных видов:

В настоящее время существует более 15 производителей защит, выпускающих либо отдельные устройства, либо защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в составе терминалов и шкафов защиты и управления. Очевидно, такое количество предложений усложняет выбор конкретного типа защит и в большинстве случаев диктуется только предпочтениями заказчика и ценовой политикой производителя и поставщика. Как показывает опыт эксплуатации, обеспечить селективность конкретных защит от замыканий на землю в сети с изолированной нейтралью или компенсацией емкостных токов не всегда удается даже при использовании дорогих устройств. Поэтому задача определения оптимального режима нейтрали и выбора соответствующего типа защит от ОЗЗ требует комплексного анализа.

Наиболее простым устройством индикации замыкания на землю является неселективная сигнализация по напряжению нулевой последовательности (НР), как правило, на основе реле максимального напряжения (код ANSI 59N). Формально такое устройство нельзя назвать релейной защитой, поскольку поиск поврежденного элемента производит оперативный персонал путем поочередного отключения присоединений на секции шин с зафиксированным однофазным повреждением. К сожалению, такой метод определения поврежденного присоединения

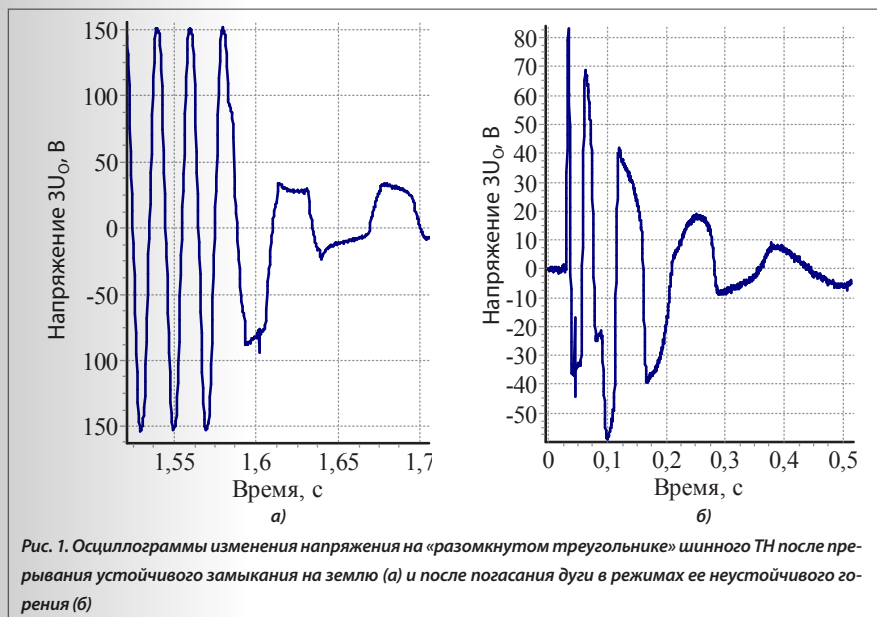


Рис. 1. Осциллограммы изменения напряжения на «разомкнутом треугольнике» шинного ТН после прерывания устойчивого замыкания на землю (а) и после погасания дуги в режимах ее неустойчивого горения (б)

- ненаправленные токовые защиты НП;
- направленные токовые защиты НП;
- защиты, реагирующие на высшие гармоники в токе НП;
- защиты, основанные на использовании переходных составляющих токов и напряжений НП;
- защиты на наложенном токе.

Отметим, что некоторые современные защиты от ОЗЗ комбинируют в своем составе несколько различных принципов выявления поврежденного фидера и, при правильной настройке, являются наиболее надежными устройствами определения присоединения с замыканием на землю. К таким защитам относится, например, терминал «Бреслер 0107.080».

Рассмотрим основные особенности представленных видов защит и обратим внимание на возможность обеспечения их селективности в зависимости от режима нейтрали сети и характера замыкания на землю.

Ненаправленные токовые защиты НП

Наибольшее распространение в сетях 6-35 кВ имеют разнообразные токовые защиты нулевой последовательности (код ANSI 50/51N). Применение таких защит оправдано в сетях с боль-

шими токами замыкания на землю при отсутствии компенсации ёмкостных токов или в сетях с большим числом присоединений. Это связано с тем, что только в таких особенных случаях чувствительность токовых защит оказывается достаточной. При этом отношение минимального суммарного тока замыкания на землю к собственному ёмкостному току защищаемого присоединения должно быть не менее трех. А для защит устаревших моделей, построенных на реле РТ-40, РТЗ-51 и других, это отношение должно быть еще больше, потому что на ток срабатывания этих реле оказывают влияние высшие гармоники и переходные токи в моменты замыкания. Известно, что горение устойчивой дуги при замыкании на землю сопровождается появлением высокочастотных составляющих в напряжении и токе НП, причем в ряде случаев это может привести к излишнему срабатыванию защит неповрежденных линий.

Для исключения негативного влияния этих факторов и выделения тока основной гармоники в современных цифровых защитах широко применяется фильтрация сигнала $3I_0$.

В сетях с воздушными линиями электропередачи большая часть замыканий происходит через переходное

сопротивление. Последнее обусловлено в основном суммарным сопротивлением цепи протекания «обратного» тока ОЗЗ по земле от места замыкания до нейтрали источника питания, включая сопротивление заземления опоры (повреждение линейного изолятора) и удельное сопротивление грунта (обрыв и падение провода на землю). При замыканиях через большие переходные сопротивления, которые в зависимости от сезона и состояния грунта могут превышать $R_{пер} = 2-3$ кОм, также возможен отказ в срабатывании токовых защит [1]. Напряжения и токи при этом оказываются связаны простой зависимостью, и их отношение не зависит от переходного сопротивления:

$$\dot{U}_0 = -jX_0 \cdot \dot{I}_0 = jX_{сз} \cdot \dot{I}_{д1} = \frac{jX_{сз} \cdot \dot{E}_d}{3R_d + j(X'_1 + X'_2 + X'_0)} = \frac{jX_{сз} \cdot \dot{E}_d}{3R_d - jX_{сз}}$$

X'_1, X'_2, X'_0 – сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей, R_d – сопротивление дуги, $X_{сз}$ – результирующее ёмкостное сопротивление нулевой последовательности всех элементов, электрически связанных с точкой замыкания.

Доказано, что при замыканиях на землю через переходное сопротивление ситуацию может исправить корректировка тока срабатывания с учетом напряжения НП. Однако в большинстве отдельных устройств защиты и защитах в составе терминалов присоединения такая корректировка отсутствует. Такого недостатка нет у централизованных защит, которые одновременно сравнивают все токи НП всех присоединений и выделяют поврежденное присоединение по максимальному току.

Обеспечить работу простых токовых защит НП возможно с помощью применения резистивного заземления нейтрали. Активный ток резистора не влияет на ток срабатывания защиты, но при этом повышает коэффициент чувствительности при замыканиях на защищаемом присоединении.

Поэтому при выборе номинала резистора по условию обеспечения селективной работы релейной защиты возможно создание эффективной системы защиты от ОЗЗ в сетях с заземлением нейтрали через резистор, как отдельно,

так и параллельно с дугогасящим реактором. В том числе и по этой причине в большинстве европейских стран применяется резистивное или комбинированное заземление нейтрали.

Последнее за рубежом реализуется путем кратковременного включения маломощного резистора во вторичной обмотке дугогасящего реактора и является по сути узконаправленным решением задачи защиты оборудования. Это связано с тем, что задача ограничения перенапряжений в режимах расстройки реактора свыше 5% до относительно безопасного уровня $(2,4-2,6)U_{ф\max}$ не решается. В России комбинированное заземление нейтрали реализовано в полноценном варианте, когда мощный резистор постоянно, через отдельный разъединитель, подключен в нейтраль трансформатора параллельно ДГР [2]. Это решение является технически обоснованным, нормативно закрепленным в ряде стандартов организаций и позволяет в большинстве случаев обеспечить требуемую селективность релейных защит от ОЗЗ на токовом или фазном принципе.

Отметим, что согласно исследованиям [3] при определенных соотношениях активного тока от сопротивления резистора в нейтрали I_R и емкостного тока сети I_C дуга теряет перемежающийся характер и становится устойчивой, для этого необходимо лишь выполнение соотношения $I_R \geq (3,5-4,0)I_C$, независимо от конструктивного исполнения сети. Этот критерий в ряде случаев можно считать определяющим при выборе номинала резистора и определении уставок защит от ОЗЗ с действием на отключение.

Для действующей кабельной сети 10 кВ, эксплуатируемой в составе системы электроснабжения ферросплавного завода, экспериментально было показано, что при выборе высокоомного резистора перевода перемежающейся дуги в устойчивую при определенных условиях можно добиться уже при $I_R \geq (1,8-2,5)I_C$ (рис. 2), что благоприятно с позиций снижения последствий термического действия дуги в точке замыкания.

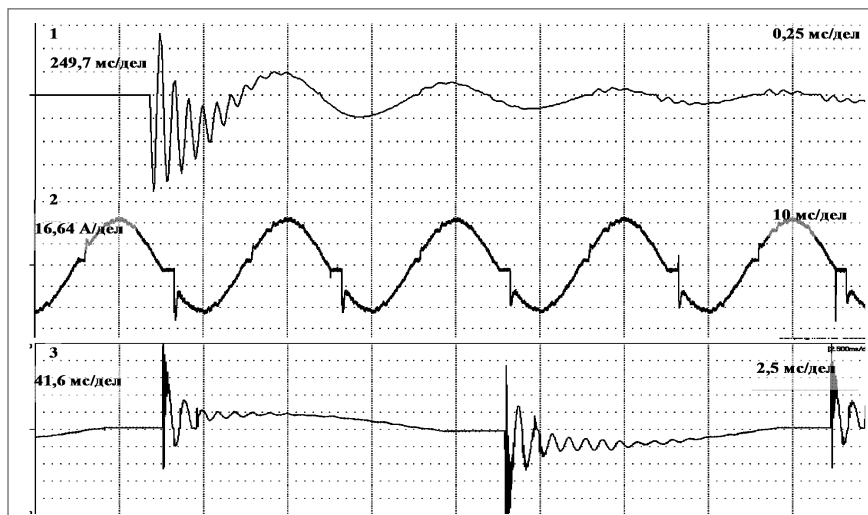


Рис. 2. Экспериментальные осциллограммы тока дуги в сети 10 кВ при $I_R = 2,5I_C$ для режима перемежающейся (1, 3) и устойчиво горящей (2) дуги

Направленные токовые защиты НП

При недостаточной чувствительности простых токовых защит НП один из возможных вариантов реализации защиты от замыканий на землю – использование направленных токовых защит НП (код ANSI 67N). Отстройка от замыканий происходит по направлению, что позволяет не отстраивать реле от собственных ёмкостных токов, что дает значительное повышение чувствительности направленных защит по сравнению с ненаправленными токовыми за-

щитами. Однако при перемежающихся дуговых замыканиях на землю (рис. 3), число которых в кабельных сетях составляет до 27% [4], возможны неселективные действия и отказ в срабатывании защиты.

Причина такого отказа достаточно проста – разности фаз между током и напряжением высокой частоты в переходном процессе не существует, поскольку такой сдвиг определяется только для двух гармонических колебаний одной частоты. Как видно из осциллограммы

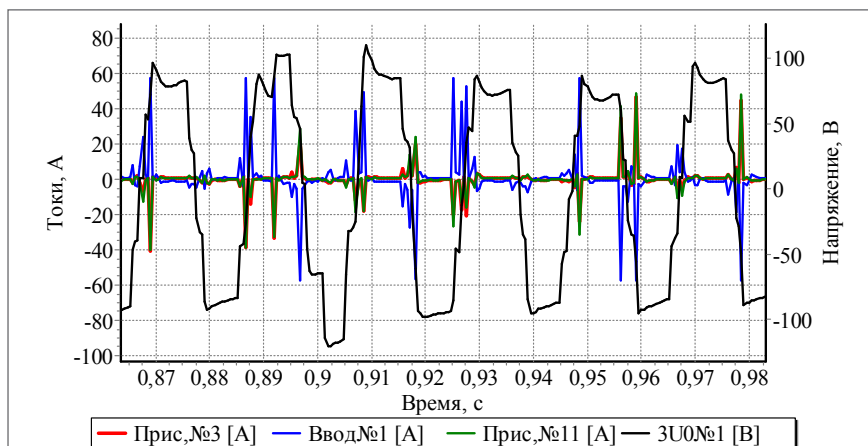


Рис. 3. Токи и напряжение нулевой последовательности при дуговом замыкании на землю в сети с изолированной нейтралью

(рис. 2) и подтверждено в ходе многочисленных натурных экспериментов, ток дуги не имеет составляющей основной гармоники, а его характеристики – амплитуда при каждом пробое, количество пробоев носят случайный характер. Как поведет себя та или иная защита в таких условиях, определить сложно, и даже на работу направленных защит от замыканий на землю в таких условиях зачастую возникают нарекания.

Защиты, реагирующие на высшие гармоники

В сетях с компенсацией ёмкостных токов использование токовых защит от ОЗЗ оказывается неэффективно, это связано с тем, что токи нулевой последовательности в поврежденном присоединении, в зависимости от степени расстройки компенсации, весьма малы и имеют произвольное направление, определяемое текущей величиной индуктивного тока ДГР. В то же время в неповрежденных присоединениях полные токи НП могут оказаться достаточными для ложной работы защит. Для таких сетей разработаны защиты, реагирующие на высшие гармоники. Эти защиты хорошо зарекомендовали себя при установке (например, на фидерах центров питания) в разветвленных сетях с ёмкостными токами, составляющими десятки ампер, но зачастую оказываются неработоспособными в сетях с токами замыкания до 10-15 А. Значения высших гармоник в токе нулевой последовательности в сети постоянно изменяются, что приводит к значительному усложнению селективной настройки таких защит. Производители защит, реаги-

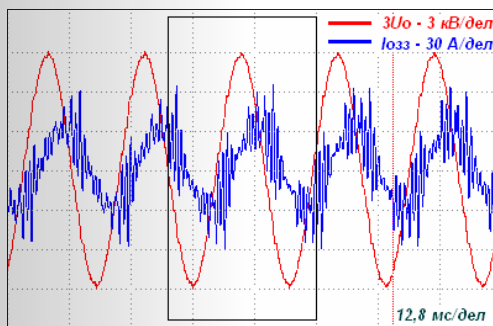
рующих на токи высших гармоник, для их настройки рекомендуют загружать уставку защиты в ходе эксплуатации, «подстраивая» таким образом защиту под условия конкретной сети. Это может приводить к отказам в срабатывании при ОЗЗ на защищаемом присоединении. Что показательно, ни одна из зарубежных компаний-производителей не имеет в своём ряде защит функцию защиты, реагирующей на высшие гармоники тока НП, а те, что представлены на отечественном рынке – например, SPAC 801.013 (ABB) – разработаны исключительно для России.

Анализ высших гармоник в токе замыкания на землю и их влияния на работу защит от ОЗЗ проводится обычно с позиций определения значимости их вклада в сигнал тока НП для оценки работоспособности защиты не только в «сложных» случаях – например, при горении перемежающейся дуги [1], но и при устойчивых замыканиях, в том числе «металлических». Как показывают многочисленные эксперименты с осциллографированием тока в опытах искусственных ОЗЗ, этот ток всегда содержит широкий спектр гармоник, уровень которых в общем случае колеблется от (0,1-0,2)% до значений, кратно превышающих действующее значение тока НП промышленной частоты [5]. Для иллюстрации этого положения на рис. 4 приведены экспериментальные осциллограммы тока однофазного замыкания на землю в сети 6 кВ, где форму сигнала наиболее заметно искажают 13, 19, 23 и 25 гармоники, составляющие 3,1 А; 6,2 А; 6,6 А и 4,2 А соответственно, т.е. до 30% относительно составляющей 50 Гц. Ино-

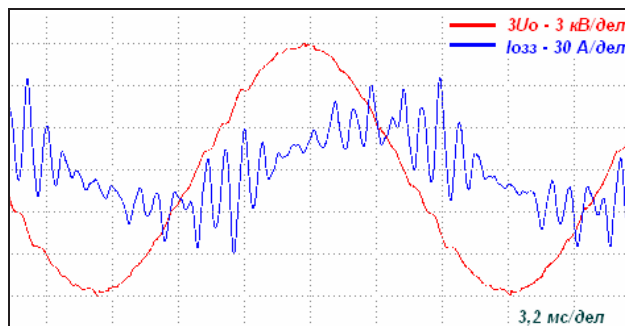
гда наблюдается резонансный рост и даже биения тока ОЗЗ.

С точки зрения эффективности защит от ОЗЗ на высших гармониках можно однозначно утверждать, что более надежно они будут работать в сетях электроснабжения промышленных предприятий с нелинейной и резкопеременной нагрузкой и большим количеством силовых и измерительных трансформаторов. Однако при выборе логики работы защиты – на сигнал или на отключение – следует в этом случае сопоставить выгоду от поддержания режима ОЗЗ (как правило, до 2-х часов), уровень электробезопасности персонала и степень вероятного повреждения высоковольтной изоляции кабелей за счет ее прожигания токами высших гармоник и ускоренное старение диэлектрика при приложении искаженного несинусоидального напряжения. Поэтому на наш взгляд, независимо от конструктивного исполнения сети, оптимальным вариантом является снижение времени существования замыкания за счет выявления поврежденного фидера селективными защитами или его отключение с минимальной выдержкой времени. В рамках решения этой задачи хорошим средством повышения надежности работы сети при ОЗЗ за счет резервирования является внедрение устройств быстродействующего АВР с временем срабатывания до 100 мс.

В качестве индивидуальной защиты с функцией замера высших гармоник можно использовать терминалы Сириус 2-МП (ЗАО «Радиус Автоматика»), БЭМП 1-01, БЭМП РУ-ЛТ (ЧЭАЗ) и ряд других.



а)



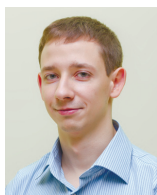
б)

Рис. 4. Экспериментальные осциллограммы $3U_0$ и тока ОЗЗ в сети 6 кВ электроснабжения целлюлозно-бумажного комбината:
а) исходная осциллограмма,
б) растянутая часть



Горюнов Вячеслав Александрович.

Дата рождения: 02.02.1985 г., окончил в 2007 г. Новосибирский государственный технический университет, кафедра «Электрические станции», ведущий инженер отдела интеллектуальных электрических сетей ООО «Болид».



Ширковец Андрей Игоревич.

Дата рождения: 06.09.1983 г., окончил в 2006 г. Новосибирский государственный технический университет, кафедра «Техника и электрофизика высоких напряжений», ведущий инженер научно-исследовательского отдела ООО «Болид».

Что показательно, централизованные защиты, основанные на сравнении токов высших гармоник во всех присоединениях одновременно, не требуют отстройки от собственных токов высших гармоник и работают при любых изменениях гармонического состава в сети. Например, таковой является защита МКЗЗП-К (ЗАО НОЦ «ЭСТРА»).

Защиты, основанные на использовании переходных составляющих токов и напряжений нулевой последовательности и на наложенном токе

Характер начального переходного процесса при разных видах замыканий на землю практически одинаков и по основным параметрам (бросок емкостного тока, уровень $3U_0$, скорость перехода через нуль высокочастотных составляющих тока) не зависит от вида заземления нейтрали. Защиты подобного рода предлагают как отечественные, так и зарубежные производители. Отечественные производители предполагают использование подобных защит в самостоятельном исполнении, но за рубежом применяют подобные защиты в комплексе с токовыми направленными защитами, и сигнал на отключение поступает только при одновременном срабатывании обоих типов защит.

Пример зарубежных защит, основанных на замере составляющих переходного процесса – RE615 (ABB) и 7SN600 (Siemens). Из отечественных наиболее распространенной является защита ПЗЗМ-1М (ООО «ВП НТБЭ»), основанная на фиксации полярностей первых полуволн высокочастотных составляющих тока и напряжения нулевой последовательности. Однако к недостаткам этой защиты можно отнести ограничение по минимальному времени срабатывания, равному 0,6 секунды, сброс при пропадании сигнала напряжения нулевой последовательности. При перемежающихся замыканиях на землю такая защита может отказать в функционировании.

Защиты, основанные на использовании наложенного тока, применяющиеся в основном в сетях генераторного напряжения, требуют отдельного устройства контрольного тока, усложняющего и удорожающего устройство защиты. Подобные защиты, например, РЗГ-100, реагирующие на сигнал наложенного тока частотой 25 Гц, разработаны в Томском политехническом университете. Однако в случае перемежающихся ОЗЗ контрольный ток частично пропадает, что не позволяет защитами корректно работать при таком сложном виде замыкания. При замыкании

через переходное сопротивление уровень контрольного сигнала снижается пропорционально значению $R_{пер}$, что в некоторых случаях может привести к отказу в срабатывании при ОЗЗ на защищаемом присоединении.

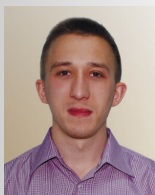
Индивидуальные защиты с наложением контрольного тока 25 Гц реализованы в составе комплекса микропроцессорной защиты генератора в шкафах ШЭ1110 - ШЭ1113 производства НПП «ЭКРА». К централизованным защитами с наложенным током следует отнести терминал БРЕСЛЕР-0107.080 (ООО НПП «Бреслер»). Единственным недостатком этого терминала является минимальное время срабатывания 1 секунда, что вызвано необходимостью отстройки защиты при перемежающихся дуговых замыканиях на землю.

Система защиты от ОЗЗ

Зарубежный опыт показывает, что для построения надежной системы защиты от ОЗЗ необходимо применение режима заземления нейтрали через резистор. Это дает дополнительный признак для устройств релейной защиты – активный ток. Тогда при низкоомном резистивном заземлении (условно от 10 до 300 Ом) хорошей селективности можно добиться, используя простейшие токовые защиты или, что очевидно, направленные защиты от ОЗЗ. В классе индивидуальных защит присоединений к ним относятся терминалы Сириус/Орион (ЗАО «Радиус Автоматика»), ТЭМП (ИЦ «Бреслер»), ЗЗН/БЭМП (ОАО «ЧЭАЗ»), УЦЗ-05 (НИИЭ ЮРГТУ), БЭ2502 (НПП «Экра»), УЗА-10 (ЗАО «Энергомашвин»), ЗЕРО (ООО Компания «Объединенная энергия»), REF54X/RE615/REJ603 (ABB), MiCOM P14X, P54X (Alstom, концерн AREVA), P122/Sepam 20, 40 (Schneider Electric), 7SJ60X, 7SN600, 7SR11 (Siemens) и прочие.

Не все из представленных типов защит будут обеспечивать селективность выделения фидера с замыканием при высокоомном (условно от 300 Ом до 12 кОм) или комбинированном заземлении нейтрали. При таких режимах нейтрали целесообразно предусмотреть комплектацию релейных отсеков ячеек защитами Сириус (ЗАО «Радиус Автоматика»), TOP200 (ИЦ «Бреслер»), УЗА-10 (ЗАО «Энергомашвин»), RE615 (ABB), MiCOM P14X, P54X (концерн AREVA), 7SN600 (Siemens).

При высокоомном (комбинированном) заземлении нейтрали целесообразно применять также упомянутые выше централизованные устройства защиты производства НПП «Брес-



**Петров Владимир
Святославович.**

Дата рождения:
23.05.1986 г., окончил
в 2008 г. Чувашский
государственный
университет им. И.Н.
Ульянова, кафедра
«Электроснабжение
промышленных
предприятий», инженер
ООО «НПП Бреслер»,
аспирант Чувашского
государственного
университета им. И.Н.
Ульянова.

лер» и НИИЭ ЮРГТУ. Весьма надежной и селективно функционирующей при всех видах замыканий на землю является централизованная защита МКЗЗП-ВЗ (ЗАО НОЦ «ЭСТРА» НГТУ), разработанная на принципе измерения активной мощности нулевой последовательности.

Для селективного определения поврежденного присоединения в разветвленных сетях при наличии резервирования и, соответственно, автоматического включения резерва возможно построение системы защиты от ОЗЗ с отключением поврежденного присоединения без нарушения работы потребителей. Согласование комплектов защит на разных подстанциях обеспечивается увеличением времени срабатывания защит по мере приближения к питающей подстанции. Таким образом, каждая из подстанций, питающих другие ПС и РП нижнего уровня, обеспечивает защиты шин подстанции от замыканий на землю, а также всех присоединений, на которых не установлена защита от замыканий на землю. Для головной питающей подстанции резервирование обеспечивается неселективной защитой по максимальному напряжению нулевой последовательности, выдержка времени которой устанавливается на ступень селективности больше, по отношению к защитами от ОЗЗ подстанций нижнего уровня.

Достаточность намеченных защит от ОЗЗ проверяется и сопровождается расчетом уставок, определением выдержек времени и проверкой чувствительности защит с формированием карты селективности.

В качестве простого типового решения по организации системы защиты от ОЗЗ для разветвленной кабельной сети 6-10 кВ промышленного предприятия и, с некоторыми оговорками, городской кабельной сети, можно предложить следующее:

- а) на головной подстанции устанавливается ДГР с терминалом управления и ОПФ; параллельно ДГР подключается высокоомный резистор; в случае отсутствия необходимости компенсации на головной подстанции необходимо установить токовые защиты НП с функцией 67N или 67N(s) по коду ANSI;
- б) на проходных РТП, РП и ПС устанавливаются токовые защиты НП с функцией 67N или 67N(s);
- с) на тупиковых РТП, РП и ПС в большинстве случаев достаточно простых токовых защит НП с функцией 50N/51N или 50N(s)/51N(s).

Подобная система в настоящее время реализуется в рамках рабочего проекта сети 10 кВ

крупного нефтехимического предприятия, выполненной кабелями с изоляцией из этиленпропиленовой резины.

Выбор нечувствительной (N) или чувствительной (N(s)) защиты обычно определяется для конкретных присоединений по уровню первичного тока $I_{\text{перв}}$ и соответствующему диапазону токов срабатывания $I_{\text{сз}}$ в зависимости от коэффициента ТТП. В частности, Alstom (защиты MiCOM) для $I_{\text{перв}} = 5$ А задает диапазон $I_{\text{сз}} = (0,08-4,0)I_{\text{перв}}$ в защитах с индексом N и $I_{\text{сз}} = (0,005-0,1)I_{\text{перв}}$ в защитах с индексом N(s) или SEF.

Выводы:

1. В сети среднего напряжения, даже в рамках одной сетевой организации, как правило, эксплуатируется значительное количество защит от замыканий на землю разных производителей и принципов функционирования. Большинство используемых защит от замыканий на землю зачастую либо отказывают в функционировании, либо работают неселективно.

2. Основными причинами этого являются: во-первых, отсутствие четких методик организации полноценной системы релейной защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), во-вторых – несоответствие выбранных устройств релейной защиты режиму заземления нейтрали, в-третьих – низкий уровень обслуживания защит, ввиду их частых неселективных действий и работы защит только сигнал.

3. Современный подход к выбору типов релейных защит и терминалов в сочетании с резисторами для заземления нейтрали, устанавливаемыми самостоятельно либо параллельно ДГР, позволяют создать эффективную систему защиты от ОЗЗ в сетях среднего напряжения.

Литература:

1. Шалин А.И. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. Влияние электрической дуги на направленные защиты. //Новости ЭлектроТехники. – 2006. – №1(37).
2. Емельянов Н.И., Ширковец А.И. Актуальные вопросы применения резистивного и комбинированного заземления нейтрали в электрических сетях 6-35 кВ. // Энергоэксперт. – 2010. – № 2. – с. 44-50.
3. Беляков Н.Н. Перенапряжения от заземляющих дуг в сетях с активным сопротивлением в нейтрали. // Труды ВНИИЭ. – 1961. – Вып. 11. – с. 84-101.
4. Беляков Н.Н. Анализ повреждений от замыканий на землю в кабельных сетях. // Электрические станции. – 1952. – №6. – с. 40-43.
5. Иванов А.В., Сарин Л.И., Ширковец А.И. Исследования параметров тока однофазного замыкания на землю в сети 6 кВ Оренбургского ГПЗ. // Газовая промышленность. – 2008. – №12 (625). – с. 79-81.