

ТОКООГРАНИЧИТЕЛИ НА ОСНОВЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ КОММУТАТОРОВ. ОПЫТ СОЗДАНИЯ ТОКООГРАНИЧИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА НАПРЯЖЕНИЕ 220 КВ

АВТОРЫ:

ШУРУПОВ А. В.,
К. Ф.-М. Н.,
ЧЛ.-КОРР. АЭН
ОИВТ РАН

КОЗЛОВ А. В.
ОИВТ РАН

ФОРТОВ В. Е.,
АКАДЕМИК РАН
ОИВТ РАН

БЕРДНИКОВ Р. Н.
ОАО «ФСК ЕЭС»

ШАКАРЯН Ю. Г.,
Д. Т. Н.
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

СОН Э. Е.,
ЧЛ.-КОРР. РАН
ОИВТ РАН

Проблема токов короткого замыкания – одна из ключевых проблем, прежде всего для мегаполисов

Развитие электроэнергетики тесно связано с общим развитием экономики страны и характеризуется ростом электрических нагрузок, увеличением генерирующих мощностей, созданием крупных объединенных энергосистем. Неизбежным следствием этого является рост токов

короткого замыкания (КЗ), прежде всего в регионах с высокой плотностью потребления электроэнергии, таких как мегаполисы. Увеличение токов короткого замыкания приводит к росту повреждений трансформаторов, обмоток генераторов, компенсаторов, реакторов и иных электрических аппаратов и устройств.



В ряде случаев при превышении тока КЗ отключающей способности современных выключателей, обеспечивающих локализацию и ликвидацию аварий в системе, возрастает масштаб потерь, в том числе и за счет пожаров на электроэнергообъектах. Максимальный уровень тока КЗ становится технико-экономическим параметром, определяющим целесообразность его ограничения или замену на новое оборудование, в том числе выключателей более высокого класса по отключающей способности, что связано со значительными затратами. Поэтому основные пути решения проблемы связаны с применением различных способов и методов по ограничению токов КЗ. В сетях напряжением до 35 кВ и в ряде случаев 110 кВ ограничение токов КЗ достигается применением токоограничивающих реакторов. В сетях 110 кВ и выше пока основными являются схемно-технические решения, прежде всего секционирование сети, а в некоторых ситуациях организуется автоматическое деление сети при возникновении аварийных ситуаций. Таким образом, ограничение токов КЗ достигается увеличением реактивного сопротивления сети, что приводит к увеличению потерь в сети, снижению качества напряжения на шинах и, в конечном итоге, надежности электроснабжения потребителей.

Проблемой ограничения токов КЗ занимаются практически все крупные электротехнические компании, международные организации, такие как CIGRE, научно-исследовательские организации во многих странах, в том числе и в России. Наиболее остро эта проблема проявляется в сетях 110–220 кВ.

Общие технические требования, предъявляемые к современным ТОУ, могут быть сформулированы следующим образом:

- иметь быстродействие (время перехода в режим ограничения тока с момента возникновения тока КЗ) не более 2–3 мс;
- обеспечить ограничение ударного и установившегося тока до допустимых значений или заданного уровня;
- не вносить существенных нелинейных искажений в параметры сети, прежде всего в нормальном режиме ее работы;
- не оказывать существенного влияния на нормальный режим работы сети, особенно при нормальном режиме ее работы;
- иметь достаточно стабильные характеристики при изменении схемы сети;
- не оказывать отрицательного влияния на функционирование других элементов сети и систем защиты;
- иметь автоматическое срабатывание и восстановление после устранения тока КЗ.

Удовлетворить этим требованиям могут ТОУ, построенные на ряде физических принципов. В частности, ТОУ на основе явления сверхпроводимости, нового поколения полупроводников и высоковольтных коммутаторов взрывного типа принципиально могут обеспечить ограничение и быстродействующее отключение тока КЗ за время не более полупериода частоты питающей сети. Из зарубежной практики известно, что в схемах электроснабжения 2,8–38 кВ различных отраслей промышленности, а также в схемах электростанций можно встретить достаточно широко коммутационные ограничители тока КЗ на основе коммутаторов взрывного типа. Примером могут служить коммутацион-

ИНФОРМАЦИЯ

РОСТ ТОКОВ КЗ

Рост токов короткого замыкания в электрических сетях является общемировой тенденцией. Это связано с ростом энергопотребления, увеличением мощности генерирующих станций и числа параллельно работающих линий электропередачи и подстанций.

Для энергообъектов последствия короткого замыкания могут быть крайне опасными: резкое возрастание силы тока способно вызвать повреждение электро сетевого оборудования и даже пожар. Страдают и потребители. Особенно чувствительны в этом плане крупные предприятия, для которых даже кратковременное падение питающего напряжения означает остановку электродвигателей и сбой технологического процесса. Но самым опасным последствием КЗ может стать нарушение нормального функционирования энергосистемы, которое может привести к веерным отключениям энергообъектов, предприятий, жилых домов.

Источник:
<http://www.energo-info.ru>

ные ограничители тока КЗ типа CLiP производства фирмы G&W Electric Co. (США) [1] и Is-Limiter производства фирмы ABB (Швейцария) [2]. Рынок коммутационных ограничителей тока КЗ в годовом исчислении превышает 1 млрд долларов

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ТОКООГРАНИЧИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КОММУТАТОРОВ ВЗРЫВНОГО ТИПА

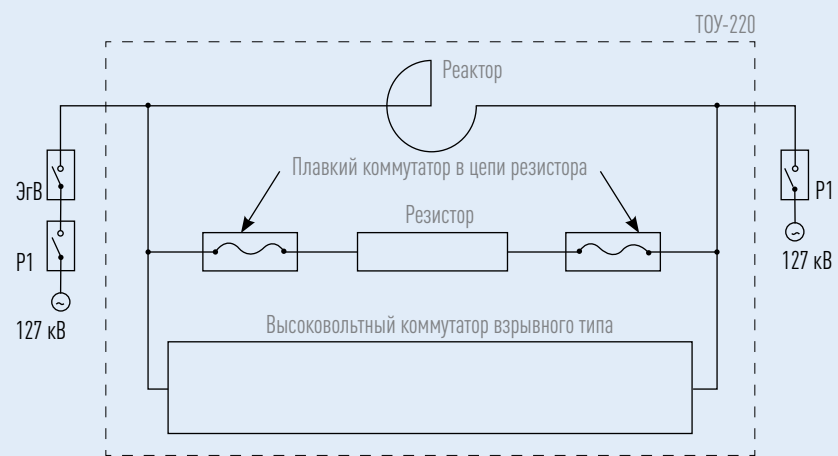


Рис. 1

США. Подобные устройства разрабатывались в 1980-е годы и в СССР, но их внедрение ограничивалось только опытными образцами для работы в сетях напряжением 6 кВ. Расширение сферы применения ТОУ на основе быстродействующих коммутаторов взрывного типа, равно как и ТОУ индуктивного типа на основе сверхпроводимости и на полупроводниках, для решения задачи ограничения токов КЗ в сетях напряжением 110 кВ и выше связано с необходимостью ограничения уровня коммутационного напряжения (сотни кВ) и гашения значительной (десятки МДж) энергии сети. В коммутаторах типа CLiP и Is-Limiter более низкого класса напряжения эта проблема решается за счет плавкого коммутатора с требуемой токово-резистивной характеристикой. Данный технический прием недостаточен для быстродействующих ТОУ, работающих в сетях напряжением 110 кВ и выше. Нужны иные решения.

ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА НА НАПРЯЖЕНИЕ 110 КВ И ВЫШЕ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КОММУТАТОРОВ ВЗРЫВНОГО ТИПА

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ТОКООГРАНИЧИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КОММУТАТОРОВ ВЗРЫВНОГО ТИПА ДЛЯ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 110 КВ И ВЫШЕ

В отличие от обычных выключателей, которые отключают ток КЗ за время около 60 мс, т. е. за три

периода, и практически всегда в нуле тока, токоограничивающим устройствам, обеспечивающим выполнение вышеизложенных условий, и прежде всего ограничение ударного тока в первом периоде с момента возникновения КЗ, необходимо отключать (переключать) ток при значительных амплитудах, достигающих десятков кА. При больших (порядка 10–20 мГн) монтажных индуктивностях линий электропередачи высоких классов напряжения и малых (порядка 0,001 с (1 мс)) временах коммутации тока неизбежно возникают высокие коммутационные напряжения, достигающие без принятия соответствующих мер уровня 1 МВ и выше. С учетом этого обстоятельства и имея высоковольтный взрывной коммутатор с общим временем отключения ударных токов порядка 0,002 с (2 мс), ШФ ОИВТ РАН была разработана представленная на рис. 1 схема токоограничивающего устройства, состоящего из:

- высоковольтного коммутатора взрывного типа с двумя системами управления;
- безындукционного резистора;
- плавких коммутаторов в цепи резистора;
- специального реактора.

Разработка данной схемы стала возможной прежде всего благодаря:

- созданию нового поколения высоковольтных быстродействующих коммутаторов взрывного типа;
- решению проблемы перенапряжения при быстродействующих коммутациях высоковольтных цепей при значительных токах и монтажных индуктивностях.

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ КОММУТАТОР ВЗРЫВНОГО ТИПА

При разработке токоограничивающего устройства на напряжение 220 кВ на основе специального реактора и коммутаторов взрывного типа мы исходили из условия, что для его работы будет необходимо решить ряд технических проблем. Прежде всего был необходим быстродействующий коммутатор взрывного типа с высоким восстанавливающим напряжением (не менее 450 кВ). Создание такого коммутатора дает возможность применить его непосредственно в сетях напряжением 220 кВ без использования понижающих напряжение устройств типа магнитосвязанного реактора. Идея с применением магнитосвязанного (управляемого) реактора, т. е. трансформатора с коммутатором (взрывного, полупроводникового, на основе сверхпроводимости и т. п.), во вторичной низковольтной цепи при меньших действующих напряжениях присутствует в ряде схем и предложений. Однако от этой схемы пришлось отказаться, поскольку проблема высокого восстанавливающего напряжения на коммутаторе, по сути, заменяется проблемой отключения больших токов. Да и магнитосвязанный реактор представляет собой громоздкое сооружение, существенно удорожающее устройство в целом.

Коммутаторы взрывного типа применяются в специальной высоковольтной технике достаточно широко. В определенных областях техники, например при отключении тока мегаамперного уровня за несколько микросекунд, практически нет решений, альтернативных взрывным коммутаторам. Например, в работе для питания плазменного ускорителя [3] был применен взрывомагнитный генератор с входным током на уровне 3 МА. Фронт тока в нагрузке формировался с использованием взрывного коммутатора, способного отключать ток 3 МА

за время не более 4 микросекунд, при этом восстанавливающее напряжение на коммутаторе было выше 120 кВ. Как видим, параметры весьма высокие, но достигнуты они для импульсных токовых режимов. Применить непосредственно опыт создания таких коммутаторов для работы в сетях промышленной частоты не представлялось возможным. Из литературы известны решения по коммутаторам взрывного типа, имеющие восстанавливающее напряжение на уровне 100 кВ, что открыло перспективы их использования в сетях напряжением до 38 кВ [1, 2]. Поэтому на первом этапе был разработан принципиально новый тип взрывного коммутатора (размыкателя). Было достаточно очевидным обстоятельство, что достичь необходимого уровня восстанавливающего напряжения (не менее 450 кВ) в коммутаторе с одним разрывом не представляется возможным, в том числе при применении дугогасящих сред, таких как масло или элегаз. Решение лежало в создании коммутатора со многими разрывами. Количество необходимых разрывов определяется электрической прочностью одиночного разрыва и условиями достижения необходимого уровня восстанавливающего напряжения при каскадировании единичных взрывных коммутаторов. В разработанном ШФ ОИВТ РАН взрывном коммутаторе единичный разрыв в открытом состоянии удерживает напряжение не менее 70 кВ. Для применения в сети с напряжением 220 кВ был разработан восьмисекционный коммутатор. Токпровод коммутатора выполнен в виде трубы. Сечение трубы выбрано из условия плотности тока не более 2 А/мм², что при номинальном токе 2000 А (сопротивление шины порядка 80 мкОм) в замкнутом корпусе приводит к нагреву проводника не более чем на 20 °С по сравнению с окружающей средой. По оси трубы в центре каждого разрыва размещается пиропатрон.

ИНФОРМАЦИЯ

ПРОБЛЕМА ТОКОВ КЗ

В нашей стране решить проблему КЗ пытались еще в 1980-е годы. Тогда советские ученые начали внедрять принцип токоограничения, основанный на быстродействующих взрывных коммутаторах, с помощью которых производится разрыв цепи. Первые опытные взрывные коммутаторы были разработаны и установлены в сетях 6 и 10 кВ. В 1990-е эстафету приняли на Западе, но здесь ученым не удалось по имеющейся технологии создать ТОУ на напряжение выше 35 кВ. При срабатывании устройств в сети происходил десятикратный скачок напряжения. В итоге к решению проблемы ближе всех оказались российские ученые и энергетики. В начале 2010 года ФСК совместно с ОИВТ РАН и НТЦ ФСК приступили к созданию быстродействующего токоограничивающего устройства на напряжение 220 кВ. Прототипом нового устройства стал опытный образец ТОУ 20 кВ, ранее разработанный ОИВТ РАН и испытанный на базе НТЦ ФСК. Ученым была поставлена задача создать ТОУ для сети 220 кВ с переходом в режим токоограничения за время не более 5 мс.

Источник: <http://www.energo-info.ru>

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО КОММУТАТОРА ВЗРЫВНОГО ТИПА

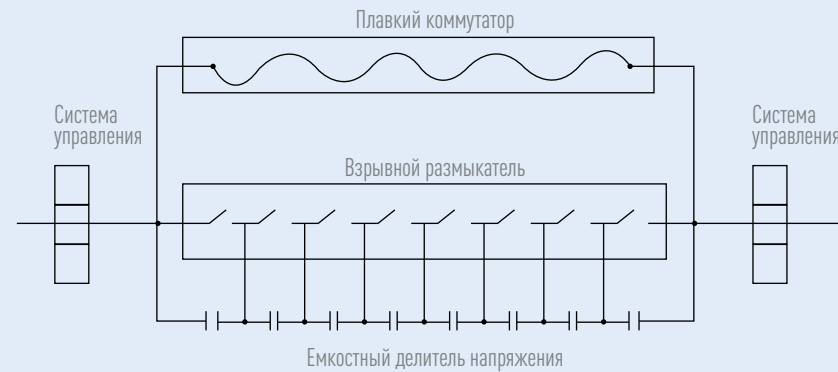


Рис. 2

Параметры пиропатрона обеспечивают разрушение проводника и развод электродов для достижения электрической прочности уровня 70 кВ за время около 700 мкс. Передача инициирующего импульса производится от одного пиропатрона к другому посредством шнура. Задержка времени срабатывания отдельных разрывов не более 50 мкс, что обеспечивает полное отключение взрывного коммутатора за время около 0,001 с (1 мс). Для выравнивания восстанавливающих напряжений между разрывами применен емкостный делитель напряжения. Высоковольтный взрывной коммутатор снабжен двумя системами управления, обеспечивающими гарантированное инициирование пиропатронов. Системы управления независимы, настраиваются на одинаковое мгновенное значение тока срабатывания и размещаются симметрично с торцов коммутатора. Конструктивно системы управления коммутатором выполнены без внешних источников питания на аналоговых устройствах, что исключает несанкционированное срабатывание. Необходимо отметить, что сигнал на отключение подается только тогда, когда мгновенное значение тока КЗ достигает заданной величины (с определенной времен-

ной задержкой, зависящей от конкретных условий и составляющей в среднем 100 мкс, для устранения ложного срабатывания при временных бросках тока). Следует отметить, что для обеспечения безопасности взрыв происходит в прочном корпусе, сдерживающем выброс газов наружу.

Производить разрыв шины токопровода взрывного коммутатора при токе порядка 10–40 кА нельзя. Это неизбежно приводит к возникновению электрической дуги. Поэтому параллельно взрывному коммутатору установлен плавкий коммутатор (предохранитель). В нормальных режимах работы через плавкий коммутатор течет не более 0,1% общего тока. Параметры плавкого коммутатора (индуктивность, сопротивление) обеспечивают быстрое переключение тока из взрывного коммутатора в цепь плавкого коммутатора. Процесс коммутации (разрыв шины и переход тока в плавкий коммутатор) занимает порядка 20 мкс. После завершения процесса коммутации ток полностью переходит в плавкий коммутатор. Вследствие практически малого времени горения дуги на взрывном коммутаторе (разрывах), а поэтому и малого уровня ионизации восстановление

электрической прочности разрывов занимает примерно 50 мкс. Важным обстоятельством является то, что плавкий коммутатор делается общим для всех разрывов взрывного коммутатора, а не отдельно для каждого. Простое каскадирование взрывных коммутаторов не позволяет обеспечить высокий уровень восстанавливающих напряжений.

Плавкий коммутатор представляет собой токоограничивающий предохранитель с проводником, выполненным из алюминиевой ленты и располагаемой в кварцевом песке определенной фракции. Интеграл действия выбирается из условия, что отключение тока в плавком коммутаторе начинается не ранее, чем взрывной коммутатор достигнет заданного уровня восстанавливающего напряжения (электрической прочности). Профилированием ленты достигается ее плавный переход в плазменное состояние с последующим отключением тока. Однако этого решения недостаточно для ограничения уровней перенапряжения, которые могут неизбежно возникнуть при работе ТОУ в сетях напряжением 110 кВ и выше.

БЕЗЫНДУКЦИОННЫЙ РЕЗИСТОР

Резистор в составе ТОУ должен обладать рядом свойств. Прежде всего, резистор должен быть оптимальным по омическому сопротивлению и иметь минимальную собственную индуктивность, т. е. быть практически безындукционным. Выполненные расчеты показали, что функцию ограничителя напряжения резистор будет выполнять при собственной индуктивности не более 100 мкГн при сопротивлении не более 10 Ом. Энергия, рассеиваемая в резисторе, зависит от параметров сети, амплитудного значения тока в момент подключения цепи резистора и его сопротивления. С точки зрения гашения напряжения необходимо использовать резистор с меньшим

значением сопротивления, например 2–3 Ома. Однако это приводит к значительному увеличению амплитуды тока и, как следствие, энергии, рассеиваемой в нем при его подключении. Максимальная энергия, которая может быть поглощена в резисторе, определяется в основном массой его проводниковой части и максимально допустимой температурой нагрева. За время работы резистора (десятки мс) практически никакого отвода тепла от проводниковой части не происходит. Для применения в составе ТОУ резисторы известных производителей не подходят, поэтому была предложена оригинальная конструкция безындукционного резистора. Решение защищено патентом РФ [4]. В основе решения лежит многослойная конструкция со встречной намоткой провода с переменным шагом, что обеспечивает эффективную компенсацию индуктивности слоев. Для изготовления безындукционного резистора должен быть применен провод из материалов с относительно низкой проводимостью (нержавеющая сталь, нихром, фехраль и пр.) с высокотемпературной изоляцией (не менее 180 °С) требуемой электрической прочности. Количество слоев, материал, общий вес и иные характеристики выбираются из параметров сети и условий работы ТОУ.

Резистор необходим прежде всего для ограничения уровня напряжения и поглощения энергии сети в момент подключения токоограничивающего реактора. Процесс подключения токоограничивающего реактора растягивается примерно на полпериода. Именно в этот момент возможны высокие напряжения, которые гасятся безындукционным резистором. В дальнейшем в режиме токоограничения роль резистора может быть сведена к нулю. Желательно резистор вовсе отключить. Это многократно снизит объем рассеиваемой в нем энергии и, как следствие, его массу. Для

отключения может быть применен также плавкий коммутатор с необходимым интегралом действия.

ПЛАВКИЙ КОММУТАТОР В ЦЕПИ РЕЗИСТОРА

Интеграл действия плавкого коммутатора в цепи резистора выбирается из условия, что отключение тока в плавком коммутаторе начинается не ранее, чем плавкий коммутатор в составе высоковольтного взрывного коммутатора начнет отключать автоматически, когда сопротивление высоковольтного взрывного коммутатора будет близким или выше сопротивления резистора. Профилированием проводника в плавком коммутаторе также достигается его плавный переход в плазменное состояние с последующим отключением тока. Интеграл действия для плавкого коммутатора в цепи резистора выбирается таким, чтобы цепь резистора была отключена к концу первого перехода тока через ноль.

СПЕЦИАЛЬНЫЙ РЕАКТОР

В практических схемах реализации в составе ТОУ может быть применен в качестве основного токоограничивающего элемента серийно производящийся промышленностью токоограничивающий реактор соответствующего класса напряжения. В сетях 110 кВ токоограничивающие реакторы применяются достаточно широко. В сетях более высокого класса напряжения в последние годы также появились предложения по поставкам токоограничивающих реакторов индуктивным сопротивлением до 4 Ом. Однако реальной практики их применения в сетях, например, напряжением 220 кВ с номинальным током 2000 А и выше пока нет. Ряд требований к токоограничивающему реактору в составе ТОУ могут быть снижены или быть несколько иными по сравнению

ИНФОРМАЦИЯ

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТОУ-220

В настоящее время разработаны технические решения, обеспечивающие существенное снижение строительного объема токоограничителя на высоковольтных коммутаторах взрывного типа примерно до 2,5–3,0 м³ на фазу, что даст возможность реализовать его многократное включение, т. е. реализовать режим АПВ.

По совокупности параметров токоограничителя типа ТОУ-220 на основе быстродействующих коммутаторов взрывного типа могут быть наиболее перспективными для применения при глубоком токоограничении в сетях всех классов напряжения.

Во-первых, это практически единственное решение, вообще не имеющее потерь электроэнергии и не оказывающее никакого влияния на сеть в нормальных условиях работы.

Во-вторых, решение обеспечивает практически любой коэффициент токоограничения (1,5–15), в отличие от обычного токоограничивающего реактора.

В-третьих, стоимость существенно ниже решений на СП и ПП и конкурентна со стоимостью обычного токоограничивающего реактора.

УПРОЩЕННАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ПС «КАСКАДНАЯ» С ПРИМЕНЕНИЕМ ТОУ-220

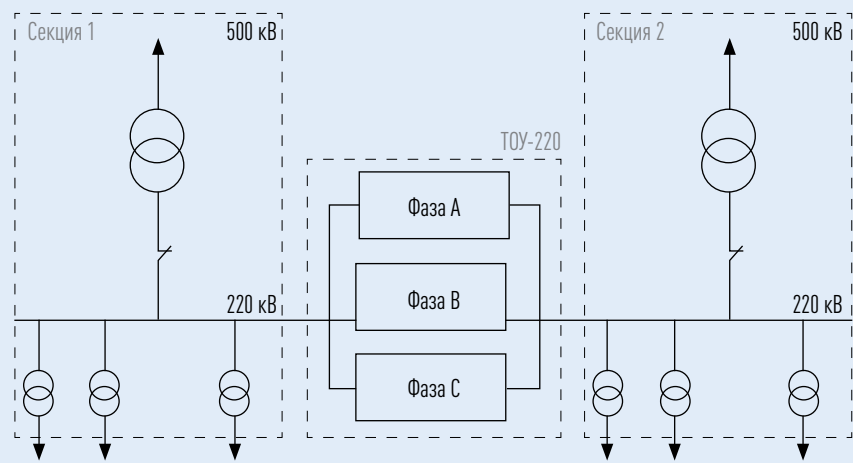


Рис. 3

с токоограничивающим реактором, постоянно включенным в сеть. Как правило, индуктивное сопротивление сетевого токоограничивающего реактора не превышает 4 Ом, что обеспечивает весьма умеренные (не более 1,5–2) коэффициенты глубины токоограничения. Иначе он оказывает существенное влияние на параметры сети, прежде всего, снижает действующее напряжение сети.

ТОУ на основе реакторов и высоковольтных коммутаторов взрывного типа могут быть в принципе установлены на любых участках сети, где требуется глубокий коэффициент токоограничения. Для этих целей может быть применен токоограничивающий реактор с большим коэффициентом токоограничения, но рассчитанный на ограниченное время работы в сети. Это время может определяться предельным временем срабатывания штатных защитных устройств, отключающих сеть уже при уменьшенных значениях тока КЗ. Например, при установке ТОУ для объединения

секций шин подстанции с целью повышения надежности электроснабжения потребителей требуются устройства с токоограничивающим реактором с большим коэффициентом токоограничения, не менее 6–8. Следовательно, реактивное сопротивление реактора должно быть не менее 10 Ом. Предельное время его включения в цепь не превысит 1 с. При таком времени работы можно применить токоограничивающий реактор в составе ТОУ практически с любым коэффициентом токоограничения без учета проблемы теплоотвода. Главным образом токоограничивающий реактор должен удерживать ударные токи и напряжения при его подключении в сеть. Реактор может быть выполнен в виде однослойной или многослойной катушки. В этом случае при проектировании ТОУ необходимо учесть сильные магнитные поля от реактора, которые способны оказать существенное влияние на электронные устройства. Влияние магнитных полей исключается при применении реактора, изготовленного в виде тора или бублика [5].

ОПЫТ СОЗДАНИЯ ТОКООГРАНИЧИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА НАПРЯЖЕНИЕ 220 КВ ДЛЯ ПС 500 КВ «КАСКАДНАЯ» МЭС ЦЕНТРА

ОАО «ФСК ЕЭС» в последние годы поддерживало практически все технические решения, предлагаемые российскими разработчиками, по развитию технологий и устройств токоограничения для сетей напряжением 220 кВ. Одним из решений по ТОУ стал проект, предложенный ОИВТ РАН, по созданию токоограничивающего устройства напряжением 220 кВ на основе специального реактора и быстродействующих коммутаторов взрывного типа. Более того, в рамках проекта специалисты ОИВТ РАН взяли на себя смелость разработать и изготовить опытный образец ТОУ-220 в варианте, готовом к пилотному внедрению на одной из подстанций Московского региона. Действительно, в Московском регионе для снижения уровня токов КЗ более чем в 40 точках имеется деление сети напряжением 220 кВ и более чем в 100 точках – в сети 110 кВ. По предложению генерального директора МЭС Центра Седунова В. Н. для пилотного внедрения была выбрана подстанция «Каскадная» 500 кВ МЭС Центра. Это новая строящаяся подстанция, предназначенная для электроснабжения восточных районов г. Москвы. Согласно расчетам, выполненным ОАО «Энергосетьпроект», в перспективе до 2020 г. токи КЗ на данной ПС могут достигать значений свыше 73 кА. Поэтому в первоначальном проекте для снижения токов КЗ до приемлемого уровня применено решение с секционированием шин на напряжение 220 кВ, при этом токи КЗ по каждой секции не пре-



Рис. 4. Фотография ТОУ-220 в трехфазном исполнении (без реакторов)

вышают 52 кА. Для сохранения уровня надежности электроснабжения потребителей при секционировании в проект закладывались решения закольцовки по сетям 220 кВ с другими ПС, что непременно вызовет удорожание проекта ПС «Каскадная» в целом. То, что ПС «Каскадная» находится в стадии проектирования и строительства, предоставило возможность внести изменения в общую электрическую схему и объединить секции шин 220 кВ посредством токоограничивающего устройства (рис. 3).

Для выработки требований к ТОУ-220, объединяющему секции шин 220 кВ, были проведены необходимые расчеты. В расчетах использовалась однолинейная схема с эквивалентными параметрами сети. Расчеты проведены как для номинальных токов удаленных КЗ, так и для предельных случаев, когда КЗ возникает близко к секциям шин или на них непосредственно. На основании расчетов были разработаны требования к ТОУ-220, пре-

жде всего по мгновенному значению тока включения (срабатывания) 8 кА и глубины токоограничения 10 кА (реактивное сопротивление реактора 12,7 Ом). Время перехода в режим токоограничения не более 3 мс с момента подачи команды на включение. В разработке технических требований к ТОУ-220 принимали участие специалисты ОАО «ФСК ЕЭС», ОИВТ РАН, ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», ЗАО «СЭТ», ОАО «Энергосетьпроект». Головным разработчиком проекта ТОУ-220 выступил ШФ ОИВТ РАН. Проектом было предусмотрено пофазное исполнение ТОУ-220. ТОУ для каждой фазы имеет в своем составе две независимые автономные системы управления процессом включения. Это обеспечивает работу ТОУ только в тех фазах, в которых возникли токи КЗ, превышающие уставку срабатывания. На рис. 4 представлено фото ТОУ-220 в трехфазном исполнении без реакторов.

ТОУ-220 в трехфазном исполнении изготовлено фирмой ЗАО «СЭТ» со-

ИНФОРМАЦИЯ

ПС 500 КВ «КАСКАДНАЯ»

Подстанция 500 кВ «Каскадная» станет восьмой подстанцией 500 кВ Московского энергокольца. Строительство подстанции 500/220/110/10 кВ «Каскадная» ведется в промзоне Руднево Восточного административного округа г. Москвы, на границе с Люберецким районом Московской области.

Общая трансформаторная мощность 1900 МВА с заходами линий электропередачи 500, 220, 110 кВ.

Окончательный ввод ПС в эксплуатацию намечен на декабрь 2013 г.

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕГРАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТОУ-220 С АСУ ТП ПОДСТАНЦИИ

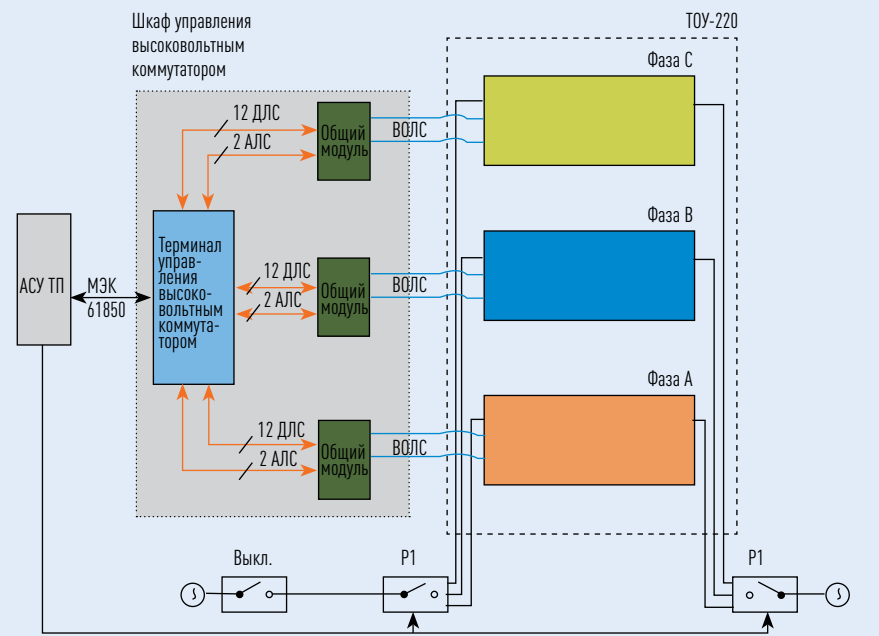


Рис. 5

вместно с ШФ ОИВТ РАН. В работах по созданию ТОУ принимали участие специалисты ИПХФ РАН. Методические вопросы применения ТОУ разрабатывались ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС».

Системы управления запуском (иницированием пиропатронов) высоковольтных коммутаторов взрывного типа, построенные на аналоговых устройствах, имеют повышенную на-



Рис. 6. Посещение специалистами ОАО «ФСК ЕЭС» площадки по испытаниям ТОУ-220 в ШФ ОИВТ РАН

дежность (0,999). Микропроцессорные устройства в составе системы управления ТОУ-220 выполняют вспомогательную функцию, а именно, записывают параметры работы ТОУ-220 (ток включения, время включения, ток в режиме токоограничения и пр.). Эта информация по оптике через общий модуль управления может быть передана в АСУ ТП. Разработчиками ТОУ-220 было предложено формирование системой управления ТОУ-220 управленческого сигнала, передаваемого по оптической линии непосредственно на терминал управления разъединительным выключателем. Идеология интеграции системы управления ТОУ-220 и АСУ ТП и РЗА представлена на рис. 5. При разработке системы интеграции исходили из условия, что быстродействие системы управления коммутаторами на порядок выше, чем быстродействие АСУ ТП. Следовательно, АСУ ТП и РЗА не могут быть командными устройствами для ТОУ-220.

Важными моментами создания ТОУ-220 были экспериментальные работы по подтверждению функционала и технических характеристик, заложенных в проект. ШФ ОИВТ РАН и ЗАО «СЭТ» был проведен комплекс заводских испытаний с применением высоковольтного импульсного источника с выходным напряжением до 400 кВ и источником тока промышленной частоты, с действующим значением до 25 кА. На основе двух источников была создана синтетическая схема, на которой отработаны в основном коммутаторы и определены их характеристики.

СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТОУ-220

Стендовые испытания ТОУ-220 выполнены в Центре по испытаниям и сертификации ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС». Источником энергии были два ударных генератора типа ТИ-100. К сожалению, возможности Центра позволили обеспечить для испытаний

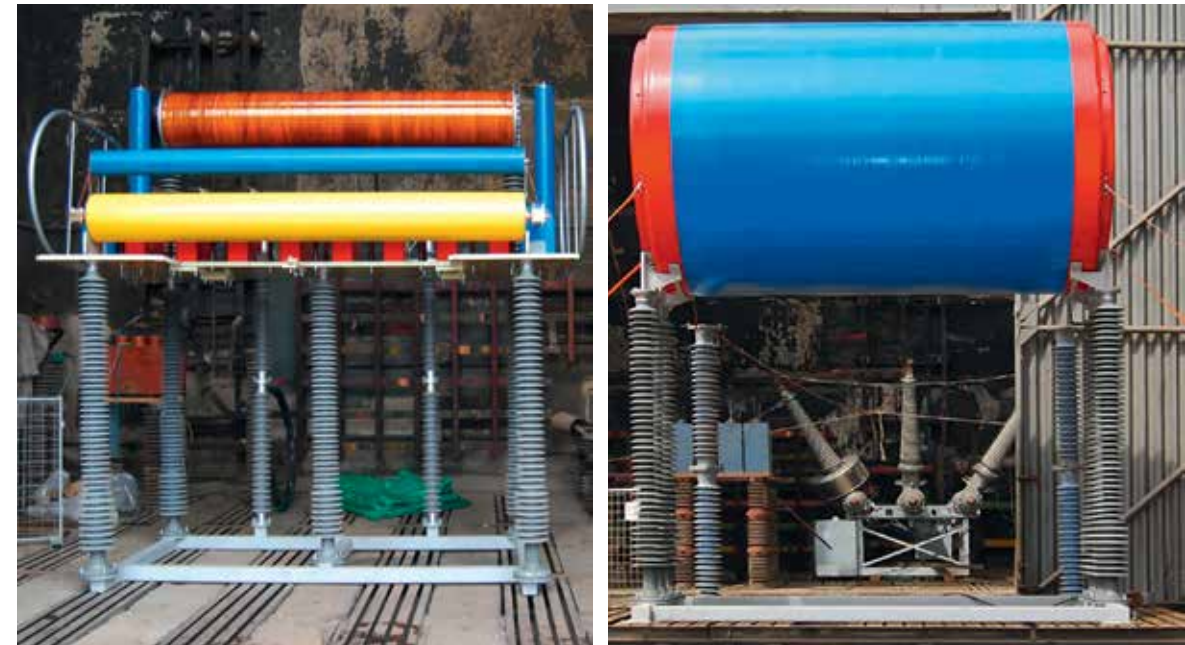


Рис. 7. ТОУ-220 в однофазном исполнении перед стендовыми испытаниями в Центре по испытаниям и сертификации ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

ТОУ-220 однофазный источник с действующим напряжением 45 кВ и током до 60 кА с полной апериодической составляющей. На рис. 7 представлена фотография ТОУ-220 в однофазном исполнении в испытательной камере № 7 Центра по испытаниям и сертификации ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС».

При испытаниях был полностью подтвержден функционал работы ТОУ-220. На рис. 8 представлены экспериментальные осциллограммы зарегистрированных токов и напряжения.

Из осциллограмм видно, что ТОУ-220 перешло в режим токоограничения за время не более 0,002 с (2 мс). Глубина токоограничения соответствует расчетным значениям. Отличительной особенностью испытаний было то, что в испытаниях применен укороченный вариант высоковольтного взрывного коммутатора, что обеспечивало на нем уровень восстанавливающих напряжений, равный значениям, ожидаемым при работе на ПС «Каскадная». Разработанная система управления высоковольтным взрывным

коммутатором работала всегда устойчиво и штатно, без сбоев. Поэлементно все узлы и устройства ТОУ-220 подвергались испытаниям на воздействие предельных токов и напряжений, которые могут возникнуть при работе ТОУ-220 на ПС «Каскадная». В частности,

в Центре по испытаниям и сертификации ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» был испытан безындукционный резистор на термическую стойкость в течение 1 с. Энергия, поглощенная в резисторе, составила 23 МДж, температура резистора повысилась до 58 °С при максималь-

ФУНКЦИОНАЛ РАБОТЫ ТОУ-220 (ОСЦИЛЛОГРАММЫ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ)

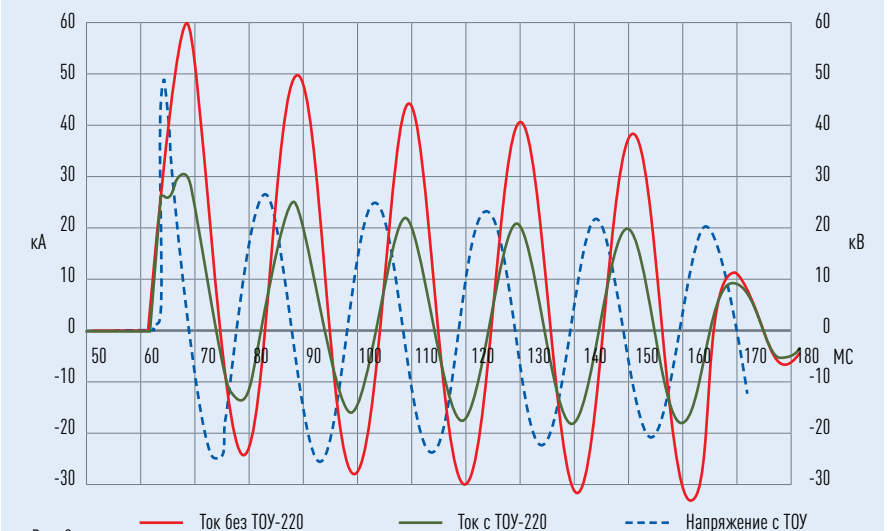


Рис. 8



Рис. 9.
Фотография стенда
при поэлементных
испытаниях ТОУ-220
в ТРИНИТИ

ной рабочей температуре 90 °С. Токоограничивающий реактор (рис. 7) был подвержен испытаниям током 10 кА (действующее значение) в течение 1 с.

ПОЭЛЕМЕНТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТОУ-220

Возможности стенда в Центре по испытаниям и сертификации ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» не позволили определить некоторые предельные параметры элементов ТОУ-220. Поэтому были проведены испытания на электрическую прочность и динамическую стойкость токоограничивающего реактора и электрическую прочность быстродействующего коммутатора взрывного типа с привлечением технических возможностей испытательной базы ФГУП ГНЦ РФ ТРИНИТИ.

Источником тока в этих испытаниях являлся ударный генератор ТКД-200. Была разработана оригинальная схема испытаний, в которой токоограничивающий реактор ТОУ-220 выступал в роли индуктивного накопителя энергии, а высоковольтный взрывной коммутатор переключал ток из реактора в резистор, собранный из штатных

резисторов ТОУ-220 общим сопротивлением от 7,5 Ом до 22,5 Ом. Это обеспечивало при токе реактора 11,5 кА напряжение на реакторе, резисторе и взрывном коммутаторе до 240 кВ. Динамические испытания реактора заключались в зарядке его током 21 кА за 0,44 с и последующем быстром переключении тока с помощью высоковольтного взрывного коммутатора и кроубара в цепь резистора. Быстрое затухание тока за время порядка 0,005 с (5 мс) создавало динамический удар на реактор.

Комплексные испытания ТОУ-220 в НИЦ ВВА и ФГУП ГНЦ РФ ТРИНИТИ были успешными и подтвердили функционал работы ТОУ-220 и все его основные характеристики, во всяком случае поэлементно. Последнее обстоятельство делает сетевые испытания ТОУ-220 при пилотном внедрении на ПС «Каскадная» 500 кВ МЭС Центра чрезвычайно ответственными. Полагаем при сетевых испытаниях возможным проведение контролируемых КЗ. Место и параметры таких КЗ необходимо дополнительно определить расчетом. В настоящее время ОАО «ФСК ЕЭС» издан приказ

№ 712 от 20.11.2012 г. «Об организации и проведении мероприятий по обеспечению пилотного внедрения инновационного оборудования по титулу «Установка токоограничивающего устройства ТОУ 220 кВ на ПС 500 кВ «Каскадная» филиала ОАО «ФСК ЕЭС» – МЭС Центра». На рис. 10 представлен плановый вариант размещения ТОУ-220 на ПС «Каскадная» 500 кВ.

Токоограничивающие реакторы предлагается вынести за контур здания, в котором будет располагаться ТОУ-220. Проектом размещения будет предусмотрена возможность повышения маневренности ТОУ с целью создания и пилотного внедрения на тех же площадях ТОУ-220 с функцией АПВ.

О ПЕРСПЕКТИВАХ РАЗВИТИЯ ТОКОГРАНИЧИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ КОММУТАТОРОВ ВЗРЫВНОГО ТИПА

Эффективность применения в сетях токоограничителей, построенных, в частности, по схеме ТОУ-220, определяется следующими факторами:

- снижением затрат на коммутационное оборудование на вновь строящихся объектах;
- сохранением существующего коммутационного оборудования на ПС при подключении дополнительных мощностей;
- отказом от секционирования электрических сетей 110–550 кВ, обеспечивающим повышение надежности работы системы;
- повышением качества электроэнергии за счет уменьшения эквивалентного индуктивного сопротивления сети;
- повышением надежности работы электрооборудования за счет снижения электродинамических и тепловых воздействий при ограничениях ударных и установившихся токов КЗ;
- уменьшением потерь электроэнергии и напряжения за счет замены традиционных ТО-реакторов или их шунтирования;
- в ряде случаев упрощением схем электроснабжения за счет возможности организации распределения электроэнергии с шин генераторного напряжения.

ТОУ-220, предназначенное для установки на ПС «Каскадная» 500 кВ МЭС Центра, имеет строительный объем около 30 м³ на фазу, без учета реактора всего 14 м³ на фазу. В настоящее время ШФ ОИВТ РАН и ЗАО «СЭТ» разработаны технические решения, обеспечивающие существенное снижение строительного объема токоограничителя на высоковольтных коммутаторах взрывного типа примерно до 2,5–3,0 м³ на фазу, что даст возможность реализовать

СХЕМА РАЗМЕЩЕНИЯ ТОУ-220 НА ПС «КАСКАДНАЯ»

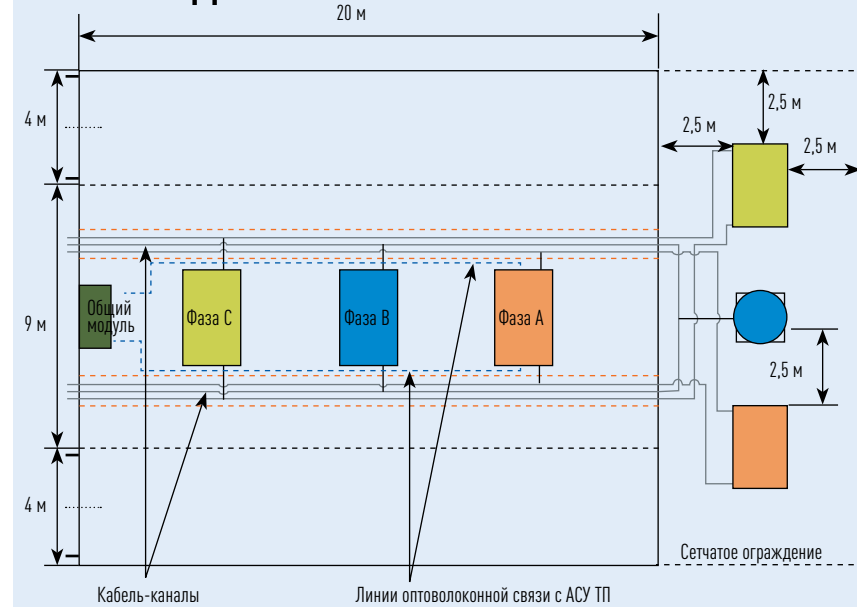


Рис. 10

его многократное включение, т. е. реализовать режим АПВ. По совокупности параметров токоограничители типа ТОУ-220 на основе быстродействующих коммутаторов взрывного типа могут быть наиболее перспективными для применения при глубоком токоограничении в сетях всех классов напряжения.

Во-первых, это практически единственное решение, вообще не имеющее потерь электроэнергии и не оказывающее никакого влияния на сеть в нормальных условиях работы.

Во-вторых, решение обеспечивает практически любой коэффициент токоограничения (1,5–15), в отличие от обычного токоограничивающего реактора.

В-третьих, стоимость существенно ниже решений на СП и ПП и конкурентна со стоимостью обычного токоограничивающего реактора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Елагин П.В., Малышев А.В., Дементьев Ю.А. Коммутационные ограничители тока для сетей 6–27 кВ // Электрические станции, 2008, №8, с. 53–59.
2. I_s-Limiter. The world fastest limiting and switching device. <http://www.abb.com/metiuvoltage>.
3. Шурупов А.В., Житлухин А.М., Козлов А.В., Фортвов В.Е. и др. Взрывомагнитный генератор как источник электропитания импульсных плазменных ускорителей // ТВТ, 2010, т. 48, №1, с. 1–6.
4. Шурупов А.В., Козлов А.В., Гусев А.Н., Бердников Р.Н., Фортвов В.Е., Чулков А.Н., Сон Э.Е., Горюшин Ю.А., Дементьев Ю.А. Малоиндуктивный резистор для гашения коммутационных перенапряжений. Патент на полезную модель RU111343U1 от 25.08.2011 г.
5. Шурупов А.В., Козлов А.В., Гусев А.Н., Бердников Р.Н., Фортвов В.Е., Чулков А.Н., Сон Э.Е., Горюшин Ю.А., Дементьев Ю.А., Полищук В.П., Смирнов И.А. Токоограничивающий реактор. Патент на полезную модель RU112498U1 от 25.08.2011 г.