

КОМПЛЕКСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРЕДАЧ И ВСТАВОК ПОСТОЯННОГО ТОКА

К 100-ЛЕТИЮ ВЭИ

АВТОРЫ:

Р.Н. ШУЛЬГА,
К.Т.Н.,

П.М. СТАЛЬКОВ,
К.Т.Н.,

Т.С. СМЕРНОВА,
ВЭИ — ФИЛИАЛ «РФЯЦ-
ВНИИТФ», Г. МОСКВА

Решение руководства страны о строительстве линии передачи постоянного тока 1500 кВ Экибастуз — Центр длиной порядка 2500 км вызвало в свое время бурную

дискуссию в среде энергетиков. Группа «переменщиков» в пику «постоянщикам» настаивала на разработке электротехнического оборудования переменного тока.

Ключевые слова: комплекс электротехнического оборудования; передача и вставка постоянного тока; координация и технология; многоподстанционные передачи и сети постоянного тока.



Сибирская ЛЭП

Принятое в конце 60-х гг. прошлого века решение руководства страны о начале расширенного энергетического строительства, опережающего развитие производственного базиса, в виде разработки комплекса электротехнического оборудования (КЭО) для передачи постоянного тока (далее ППТ) 1500 кВ Экибастуз — Центр длиной порядка 2500 км мощностью 6 ГВт вызвало широкую дискуссию в среде энергетиков. Значительная группа так называемых переменщиков настаивала в противовес данному проекту разрабатывать КЭО переменного тока, который был также принят и воплощен на линии электропередачи (далее ЛЭП) 1150 кВ мощностью 5 ГВт Экибастуз — Кокчетав — Челябинск. Несколько позже в 1970-х возник проект строительства крупнейшей в мире Выборгской вставки постоянного тока мощностью до 1,5 МВт. Реализация таких проектов потребовала создания уникального мощного испытательного стенда (МИС) в г. Тольятти для испытаний КЭО в условиях близких к реальной эксплуатации. Указанные уникальные энергетические объекты закрепили лидирующие позиции нашей страны в области электроэнергетики в мире вплоть до развала страны в начале 90-х гг. прошлого века, а также обеспечивали энергетический осто́в ЕЭС страны с гарантируемой надежностью. Предполагаемое удлинение ППТ до Канско-Ачинского бассейна впервые в мире должно было создать многоподстанционную передачу постоянного тока (МППТ), являющуюся предшественником многоподстанционных сетей постоянного тока (МСПТ), необходимость создания которых была обусловлена многочисленными системными авариями в разных странах мира за последние 20 лет.

Цель настоящей статьи состоит в анализе технологий разработки КЭО, координации работ и обеспечения необходимого уровня знаний, определяемых качеством исследователей, разработчиков, изготовителей

и проектировщиков проектов. Ранее полученный опыт на ППТ Волгоград — Донбасс напряжением 800 кВ длиной 473 км был явно недостаточен из-за применения ртутных вентилях, а уже к 70-м гг. прошлого века высоковольтные тиристорные вентили (ВТВ) стали вполне конкурентноспособными. Многие схемотехнические решения данной ППТ, так же как и параметры уникальной КЭО 1500 кВ, потребовали многочисленных исследований материалов, технологий, возможностей изготовления и других, в том числе и временных, кадровых и материально-технических факторов. В проекты вовлекались порядка 60 организаций и предприятий страны, причем основными были организации Минэнерго (руководитель Непорожный П.С.): Энергосетьпроект-ЭСП (Рокотян С.С.), НИИПТ (Поссе А.В.) и Минэлектротехпром (Антонов А.К., Оболенский Н.А., Никитин Ю.А.), ведущая организация ВЭИ (Фотин В.П.). Координация работ предполагала, что НИИПТ отвечает за вопросы разработки подсистем, примыкающих к преобразовательным подстанциям (ПС) со стороны переменного и постоянного токов, а ВЭИ отвечает за разработку КЭО и ПС, которые являются наиболее затратными и проблемными.

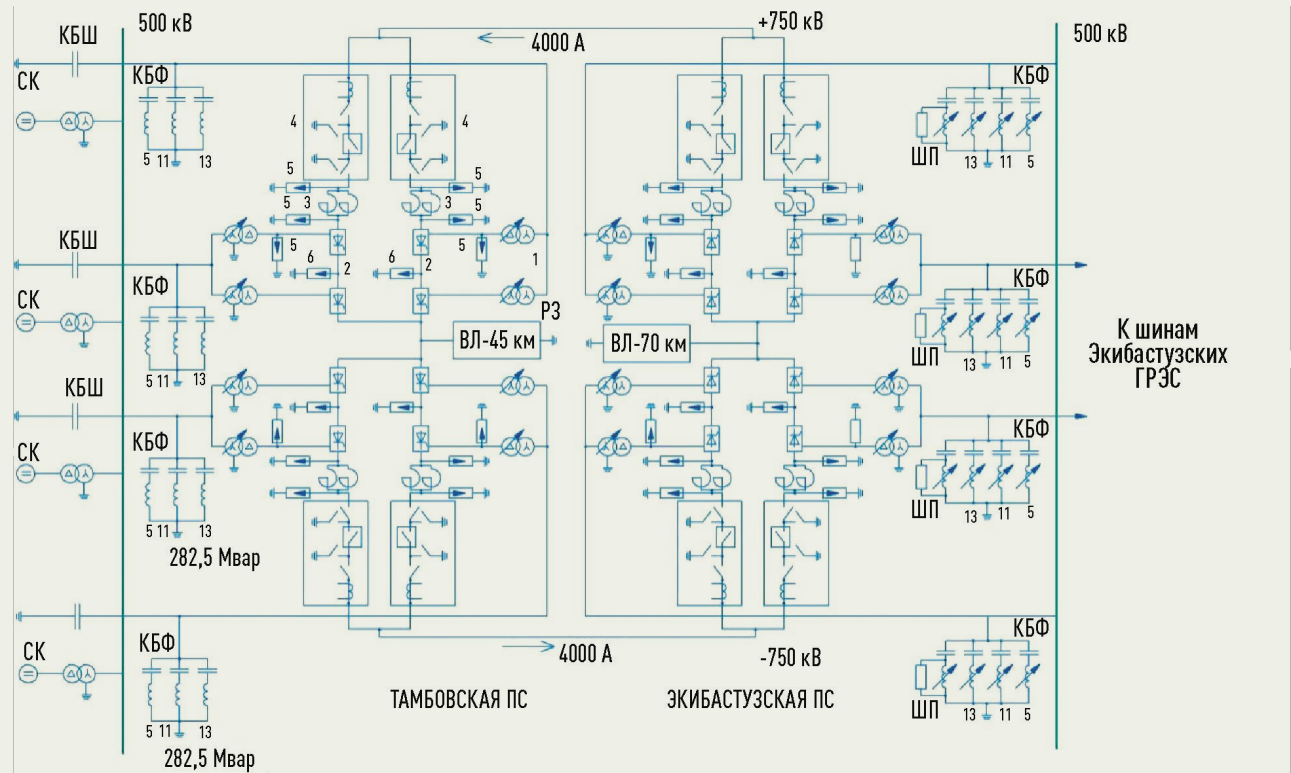
ФОРМИРОВАНИЕ В ВЭИ БАЗЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТКИ КЭО

ВЭИ организационно всегда был ориентирован на многопрофильные исследования и разработки благодаря наличию квалифицированных кадров и опережающих заделов в разных отраслях науки и производства в виде Опытного завода ВЭИ, который осваивал опытные образцы продукции. Ключевыми для ВЭИ являлись: отделение высокоих напряжений (ОВН, Остапен-

ко Е.И.), отделение коммутационной аппаратуры (ОКА, Козлов В.Б.), отделение автоматического регулирования (ОАР, Герценберг Г.Р., Ступель А.И.), но ключевым было отделение ртутных вентилях (ОРВ, Удрис Я.Я.), а затем отделение высоковольтной преобразовательной техники (ОВПТ, Таратута И.П.). Однако этих подразделений было недостаточно для организации исследований, разработки КЭО, координации с другими подразделениями, организациями и заводами. Таким отделением — фактически штабом проектов стало отделение разработки комплексов электрооборудования (ОРКРО, Соколов Н.Н., Кулаков В.П., Викулин А.Г.). В ОРКРО вошла лаборатория режимов и защиты от перенапряжений (ЛРЗП), которую создал Стукачев А.В. Им был сформирован молодежный коллектив, яркими представителями которого явились Худяков В.В., Лытаев Р.А., Баракаев Х.Ф., Лазарев Н.С. и др. Они разработали уникальную физическую модель постоянного тока, ставшую основным инструментом исследований для формирования ТТ и ТЗ на подсистемы и элементы КЭО всех ППТ, ВПТ и других объектов.

Недостатками физических моделей, в том числе и для ЛЭП (Фотин В.П.), являлась заниженная добротность элементов, что потребовало разработки новых математических моделей (вначале аналоговых, а затем цифровых), которые разрабатывали Шульга Р.Н., Болдырев Е.А., Лазарев Н.С. и др., создав программные комплексы (ПК) исследования режимов ППТ и ВПТ в виде библиотек ПК. Объединение в ОРКРО исследователей, конструкторов и проектировщиков, привлеченных из «Гидропроект», «Энергосетьпроект» и других организаций позволило ВЭИ стать лидером в принятии технических решений проектируемых энергообъектов. Разработка МИС в г. Тольятти стало первым звеном разработки

СХЕМА ППТ



Обозначения:
1 — группа однофазных трансформаторов 3×ОДЦРН–320000/400, 525/√3 ± 1 2%/320/√3 кВ для нижнего моста и напряжением подпора 800 кВ для верхнего моста;
2 — двухмостовой преобразователь 750 кВ, 2000 А;
3 — линейный реактор 4 Гн, 1000 А;
4 — выходное устройство 750 кВ (ранее КАЭ 1500 кВ);
5 — разрядник РГ-800;
6 — разрядник РГ-400;
КБФ — фильтр высших гармоник переменного тока мощностью 282,5 Мвар на Тамбовской ПС и 367 Мвар на Экибастузской ПС;
КБШ — шунтовая конденсаторная батарея 650 Мвар;
СК — синхронный компенсатор 320 Мвар;
ШП — фильтр широкой полосы

Рис. 1

и отладки КЭО ППТ, ВПТ, ЛЭП, СТК и др. Ключевую роль в создания МИС сыграли Кулаков В.П, Викулин А.Г., Таратута И.П. Из-за первоначального ограничения финансирования до 60 млн руб. испытания ВТВ проводились по круговой схеме, потребовавшей дополнительных исследований в части гармоник и воздействий на оборудование. Последующий перевод МИС на двухмостовую схему

обеспечил реализацию кольцевой схемы, соответствующей реальным условиям эксплуатации.

ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОСОБЕННОСТИ ППТ

Вплоть до 90-х гг. прошлого века ППТ 1500 кВ Экибастуз — Центр мощ-

ностью 6 ГВт являлась крупнейшей в мире и служила основой для строительства в XXI веке широкой сети аналогичных ППТ в Китае на напряжение 1600 кВ. Рассматриваемая ППТ по схеме два полюса-земля протяженностью 2470 км связывала восточные районы страны, богатые энергоресурсами, с европейской западной частью страны, где преимущественно располагались по-

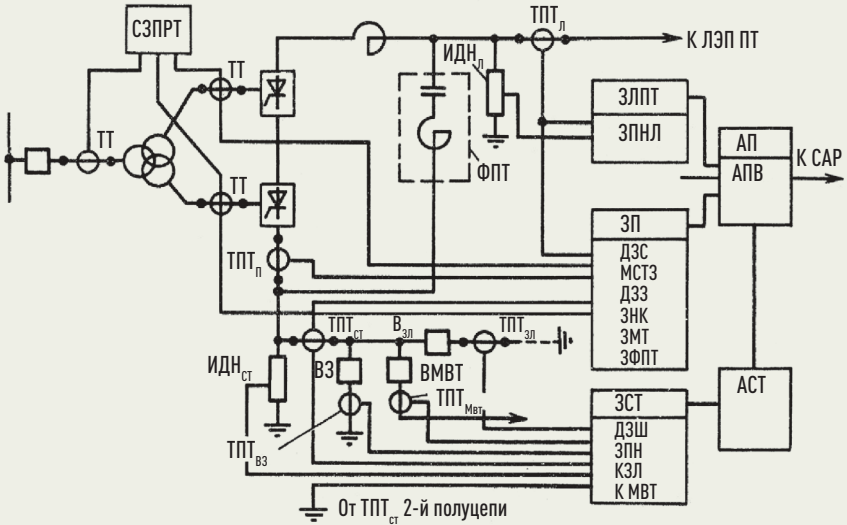
ребители. ППТ являлась основой формирования ЕЭС, участвовала в покрытии пиковых нагрузок за счет также разницы в часовых поясах востока и запада.

В районе Экибастуза на открытых карьерах добывается низкокалорийный уголь, были построены две ГРЭС из предполагаемых ранее четырех ГРЭС. Трехсотметровые трубы ГРЭС выбрасывают клубы дыма, образующие шлейфы вплоть до Алтая, видимые из космоса. Поскольку шлак от угля забивал котлы ГРЭС и снижал их производительность, пришлось построить обоганительную фабрику для производства концентратов угля.

ППТ была образована в составе: двух ПС в Экибастузе и Тамбове, связанные воздушной двухполюсной линией (ВЛ) с проводами 4×АСО 1200 в полюсе (ранее предполагалось подвешивать пять проводов). Опоры двухполюсной ППТ являлись достаточно изящными, имея габарит по высоте 41,5 м, по ширине 23 м (с оттяжками 40 м), в то время как опора трехфазной ЛЭП имеет высоту 46,5 м, а ширину 48,5 м (оттяжки на расстоянии 39 м). Тем самым ВЛ ППТ значительно экономнее ЛЭП за счет опор, фундаментов, проводов, изоляторов при большей пропускной способности (6 ГВт против 5 ГВт) и повышенной надежности, с допуском работы одним полюсом с возвратом тока через землю.

Следует учесть, что и потери в ВЛ ППТ значительно ниже, чем в ЛЭП. Так, снижение потерь на нагрев постоянным током обусловлены его протеканием по всему сечению четырех проводов полюса, в то время как переменный ток протекает лишь по поверхности восьми проводов фазы. Потери на корону ВЛ практически вдвое ниже, чем для ЛЭП, а в плохую погоду — повышаются до четырехкратных. В результате экономическая длина ППТ соответствует 600–800 км, а с учетом межсистемного эффекта — и того ниже. Из-за повышения погонной емкости кабелей

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ СЗА ПОЛЮСА ПС



Обозначения:
АП — автоматика полуцепи; АПВ — автоматическое повторное включение; АСТ — автоматика средней точки;
ВЗ — выключатель заземления; ВЗЛ — выключатель заземляющей линии; ВМВТ — выключатель металлического возврата тока; ДЗЗ — дифференциальная защита от замыканий на землю; ДЗС — дифференциальная защита от сверхтоков;
ДЗШ — дифференциальная защита шин; ЗЛ — заземляющая линия; ЗЛПТ — защита линии постоянного тока;
ЗМТ — защита минимального тока; ЗНК — защита от нарушений коммутации; ЗП — защита преобразователя;
ЗПН — защита от повышения напряжения; ЗПНЛ — защита от повышения напряжения на линии; ЗСТ — защита средней точки; ЗФПТ — защита фильтров постоянного тока; ИДН — измерительный делитель напряжения; КЗЛ — устройство контроля заземляющей линии; КМВТ — устройство контроля металлического возврата тока через землю; МСТЗ — мостовая защита от сверхтоков; СЗПРТ — система защиты преобразовательного трансформатора; СТ — средняя точка; ТПТ — трансформатор постоянного тока; ТТ — трансформатор тока; ФПТ — фильтр постоянного тока

Рис. 2

больше чем на порядок сравнительно с емкостью воздушных линий экономическая длина кабельных ППТ снижается до 30–50 км, а в случае преодоления водных преград кабельная ППТ не имеет альтернатив. Схема ППТ приведена на рис. 1.

Основное назначение ППТ — транспорт электроэнергии с востока на запад, однако предусмотрен и реверс мощности. Отправная ПС Экибастуза работает преимущественно в режиме выпрямителя с напряжением полюса 750 кВ и током в линии 4000 А, в то время как напряжение полюса ПС Тамбова — 675 кВ. Средняя точка обеих ПС глухо заземляется на выносное рабочее заземление,

отнесенное от ПС Экибастуза на 70 км, а от ПС Тамбова на 45 км. Связь средних точек обеих ПС с рабочим заземлением осуществляется ВЛ 110 кВ. В средних точках ПС соединяются обе полуцепи ППТ, что предъявляет повышенные требования к их надежности. Повышение надежности достигается дублированием оборудования распределительных устройств (РУ) и заземляющих ВЛ.

Особенностью главной схемы ПС является параллельное соединение двух ветвей преобразователей на обеих подстанциях. Это вытекает из условия использования тиристоров Т-1270 на шайбе диаметром 120 мм производства «Электровыпрямитель»,



г. Саранск. Параллельное соединение тиристоров в общем неблагоприятно с точки зрения трудности деления тока, однако благодаря наличию регуляторов тока каждой ветви удается минимизировать несимметрию токов ветвей ПС. Кроме того, надежность ПС и ППТ повышается благодаря параллельному соединению ветвей, так как авария в одной ветви сопровождается ее отключением и форсировкой тока в неповрежденной ветви. Это обстоятельство повышает надежность при-мыкающей энергосистемы, что важно для недопущения ее отключения и возникновения системной аварии. Недостаток удвоения ветвей связан практически с удвоением стоимости ПС, и на зарубежных ПС, в частности в Китае, ПС выполняются с одной ветвью преобразователей уже на шайбе тиристоров (фототиристоров) диаме-

тром 150 мм. В ближайшее время стоит ожидать появление тиристоров и фото-тиристоров на шайбе до 300 мм.

Каждая ветвь преобразователей работает в 12-фазном режиме, что позволяет существенно снизить гармоники на стороне переменного и постоянного токов, облегчить фильтры высших гармоник и повысить эффективность преобразователей. Каждая ветвь состоит из двух каскадно соединенных мостов, каждый мощностью 750 МВт, напряжением 375 кВ на ток 2000 А. Каждый мост напрямую соединен со своим преобразовательным трансформатором и представляет единичный агрегат, который коммутируется одновременно. Каждая ветвь ПС имеет автономную систему управления, регулирования, защиты, автоматики (СУРЗА), которую для упрощения да-

лее назовем системой автоматического регулирования (САР). САР каждой ветви обеспечивает независимость эксплуатации этих ветвей друг от друга. Допустимая перегрузка каждой полупеи и ветви по току достигает 30 % на 15 минут. Время работы вентилей в зарегулированном режиме составляет 1 секунду из-за предельной нагрузки и охлаждения резисторов демпфирующих цепей, что вполне достаточно для плавного включения и отключения ППТ с помощью автоматики перевода в инверторный режим (ПИР). Отключение одной полупеи при работающей другой полупеи необходимо для проведения ремонтов, что повышает надежность ППТ, однако из-за возврата тока через землю необходимо контролировать рабочее заземление. Возврат тока через землю отрицательно сказывается на заземленных трубопроводах, связи и др., так что обычно ограничивается длительностью примерно 1 час.

ВТВ имеет модульную конструкцию, световую систему управления со следящим импульсом, водяное охлаждений деионизированной водой. Следящий импульс позволяет существенно уменьшить мощность систем управления ВТВ, водяное охлаждение ограничивает температуру р-п перехода тиристоров ниже предельного значения 125 °С. Конструктивно двухвентильный блок ВТВ образует вентильную фазу или два плеча мостовой схемы. Плечо моста содержит 64 модуля, причем в каждом модуле последовательно включены четыре тиристора таблеточного типа, имеющие двустороннее охлаждение деионизированной водой. Световые импульсы поступают от САР к тиристорам по оптоволокну. Средний ток ВТВ составляет в номинальном режиме 700 А, амплитуда напряжения ВТВ — 520 кВ при мощности 263 МВт. Мощность одного тиристора на диаметре шайбы 80 мм составляет 514 кВт.

Разработанные в ВЭИ под руководством Таратуты И.П. вентили образо-

вали линейку из восьми поколений ВТВ для разных объектов и разной схемотехники. ВТВ изготавливались на СВПО «Трансформатор» (в настоящее время «Тольяттинский Трансформатор»). Сложность конструкции модулей и ВТВ обусловлена наличием демпфирующих и делительных цепей, анодных дросселей и фазных реакторов для ограничения токов КЗ, лавинных диодов и разрядников для ограничения перенапряжений. С учетом того, что при напряжении выше 25–30 кВ на элементах ВТВ возникает корона, сложность проектирования вентилей существенно усложняется. В результате приоритет ВЭИ и страны в разработке ВТВ и КЭО сохранялся почти 30 лет предыдущего века, что подтвердил всемирный электротехнический конгресс (ВЭЛК) в Москве в 1977 г.

Двухмостовой преобразователь соединен с шинами переменного тока 500 кВ через две группы однофазных преобразовательных трансформаторов 525±12%/320 кВ мощностью 320 МВА. Медленное регулирование напряжений и изменение направления потока мощности в минутном диапазоне осуществляется устройствами РПН в диапазоне ±12%. Трансформаторы и сглаживающие реакторы поставлены Запорожским трансформаторным заводом. Разработка осуществлялась ВИТ г. Запорожье в тесном сотрудничестве с ВЭИ.

Разработка разрядников РГ осуществлялась в Ереванском отделении ВЭИ (Торосян А.С.), разрядники РВТВ-400 входят в состав ВТВ и были разработаны Волькенау В.А.

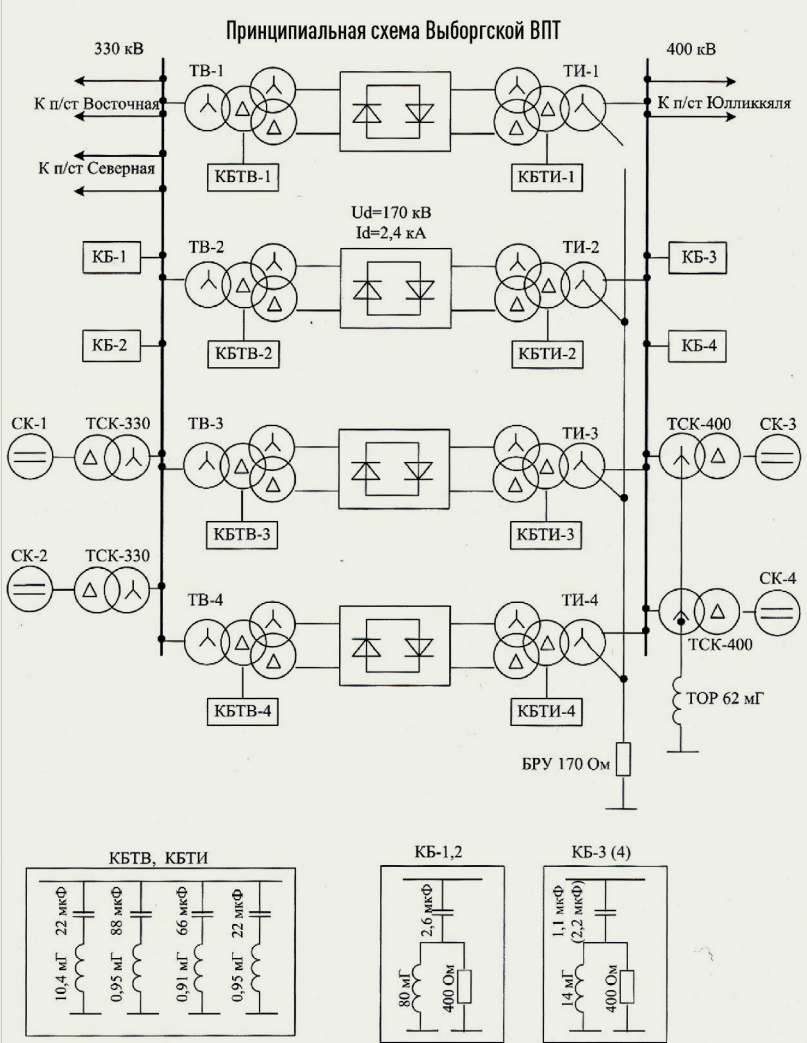
Система защиты от перенапряжений (СЗП) претерпела ряд изменений в части построения, схем и параметров разрядников, особенно важными были вопросы их уровней защиты, пропускной способности, имеется в виду разряд емкостей ВЛ в режимах КЗ. Сложность задачи подтверждается тем, что таблица и нормы

квалификационных и типовых испытаний оборудования КЭО, зависящая от СЗП, согласовывалась между НИИПТ и ВЭИ в течение двух лет. Значительную работу по КЭО выполнили сотрудники ОРКРО (Соколов

Н.Н., Кулаков В.П.). На последнем этапе сдачи ППТ ход работ курировали от НИИПТ Герцик К.А., от ВЭИ Шульга Р.Н.

САР ППТ разрабатывалась ана-

ГЛАВНАЯ СХЕМА ВПТ



логового типа как в НИИПТ, так и в ВЭИ (Ступель А.И.). Именно САР обеспечивала устойчивость работы ППТ и потребовала создания физических и математических моделей и проведения большого круга исследований. Наряду с САР и СЗП важнейшей для обеспечения надежности ППТ явилась сложная и многоступенчатая система защиты и автоматики (СЗА). На рис. 2 приведена структурная схема СЗА полюса ПС.

А разделяется на СЗА полупецей и ветвей и СЗА средней точки, причем СЗА ветвей работают независимо друг от друга. СЗА полупеци состоит из защиты линии постоянного тока (ЗЛПТ), защиты преобразователя (ЗП), системы защиты преобразовательного трансформатора (СЗПРТ), автоматики полупеци (АП) ПС.

ЗЛПТ выявляет КЗ на линии, КЗ или шунтирование инвертора и вводится в режим работы выпрямителя. Защита ЗЛПТ работает, измеряя

скорость изменения напряжения в начале линии и контролируя уровень напряжения линии. Срабатывание ЗЛПТ приводит к отключению полупеци и последующему АПВ. ЗПНЛ при снижении напряжения на линии снижает уставку регуляторов тока до значения, обеспечивающего непрерывный рабочий ток. Координация защит достигается их селективностью во времени. Наряду с указанными защитами в КЭО действуют ряд технологических защит отдельных видов оборудования.

ЗП предназначена для выявления аварий в зоне полупеци ПС, охватывающей преобразовательные мосты, линейные реакторы, фильтры постоянного тока и др. ЗП состоит из подсистем: дифференциальная защита от сверхтоков (ДЗС), мостовая защита от сверхтоков (МСТЗ), дифференциальная защита от замыканий на землю (ДЗЗ), защита от нарушений коммутации (ЗНК), защита минимального тока (ЗМТ), защита фильтров постоянного тока (ЗФПТ) и др. ДЗС выявляет КЗ и сверхтоки при перекрытиях изоляции на землю и работает в выпрямительном режиме ПС. ЗНК предназначена для защиты от нормального чередования коммутаций вентиля, которые могут быть вызваны сбоем в работе вентиля или САР, а также перекрытиями изоляции. ЗНК действует на запираание вентиля полупеци. ЗМТ предназначена для защиты вентиля от длительной работы с малыми рабочими токами для недопущения режима прерывистых токов и ее срабатывание приводит к запираанию вентиля полупеци. ЗФПТ защищает оборудование фильтров от протекания постоянного тока, например, при пробое конденсаторов. СЗПРТ использует традиционные защиты, такие как дифференциальная защита, максимальная токовая защита, защита от перегрузки и перегрева.

ЗСТ предназначена для защиты от аварий оборудования средней точки ПС и заземляющей линии, защиту от повышения напряжения (ЗПН),

устройство контроля заземляющей линии (КЗЛ), устройство контроля металлического возврата тока через землю (КМВТ). АП предназначена для выдачи сигналов, обеспечивающих оперативную и аварийную коммутацию полупеци, трансформаторов, АПВ полупеци и нормальное функционирование САР.

Для компенсации реактивной мощности, потребляемой преобразователями, на шинах 500 кВ ПС Тамбова устанавливались четыре синхронных компенсатора СК каждый мощностью 320 МВА и четыре шунтовые конденсаторные батареи КБШ каждая мощностью 650 МВА. На ПС Экибастуза компенсация реактивной мощности сети 500 кВ обеспечивалась генераторами ГРЭС. Высшие гармоники на стороне сети компенсировались фильтрами конденсаторных батарей КБФ, настроенными на 5, 11 и 13-ю гармоники частоты сети, а на ПС Экибастуза к ним дополнительно подключался фильтр широкой полосы (ШП). Трансформаторы и сглаживающие реакторы размещены снаружи здания ПС, а их вводы вентильных обмоток введены внутрь вентильного зала. Вводы трансформаторов и реакторов выполнены составными масло-элегаз-воздух.

Следует отметить, что элегаз в составе КАЭ 1500 кВ не оправдал ожиданий в части надежности из-за наличия мелких частиц, которые прилипали к изоляционным распоркам и не улавливались с помощью специальных ловушек. Аналогичные явления не позволили ввести в строй элегазовую ВПТ 100 кВ в Нью-Йорке (США). Указанные эффекты связаны со спецификой постоянного тока и в последующем устранялись герметизацией и наддувом воздуха в вентильный зал на Выборгской ВПТ, применением силиконовых покрытий изоляторов и обмывом изоляторов ВЛ под рабочим напряжением.

Сложность систем компенсации реактивной мощности и фильтрации гармоник обусловили их размещение

на значительной части территории ПС, и в дальнейшем этот недостаток был преодолен заменой преобразователей тока на тиристорах на преобразователи напряжения на приборах IGBT, по крайней мере для ППТ меньшей мощности. В дальнейшем на ППТ в Китае и за рубежом стали использоваться воздушные сглаживающие реакторы меньшей мощности и индуктивности (порядка сотен миллигенри вместо 2–4 Гн на данной ППТ) путем дополнительной установки на полюсе пассивных и активных фильтров высших гармоник, что облегчило выполнение выходных устройств. САР и СЗП ныне выполняются цифровыми на микропроцессорах с использованием искусственного интеллекта, систем мониторинга и диагностики. Повышение напряжения ППТ в Китае до 2200 кВ позволило существенно повысить пропускную способность ППТ и выйти на новый технический уровень.

МНОГОПОДСТАНЦИОННЫЕ ППТ И МНОГОПОДСТАНЦИОННЫЕ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Выполненные в 80–90-х гг. прошлого века в НИИПТ и ВЭИ исследования заложили основы реализации вначале многоподстанционных ППТ (МППТ), а затем многоподстанционных сетей постоянного тока (МСПТ), которые опередили зарубежные разработки примерно на 20–30 лет. Проблема создания МППТ возникла с необходимостью для ППТ от Экибастуза ввести промежуточные ПС, а затем продлить ППТ до Канска и Ачинска. На рис. 3 приведена схема разветвленной 4-подстанционной ППТ (МППТ), где 1–4 — ПС; 5, 6, 7 — выключатели постоянного тока; 8, 9, 10 — линии постоянного тока, где ПС предполагают изменение полярности

за счет применения быстродействующих коммутаторов (БК).

Направление тока через каждую ПС, так же как и поток мощности, могут быть любыми. Режим работы ПС также может изменяться независимо друг от друга. Баланс мощностей в системе поддерживается с помощью САР. Одна из ПС (обычно самая мощная) работает выпрямителем и поддерживает номинальное рабочее напряжение, остальные ПС могут работать в любом режиме. Токи в каждой ПС определяются уставками регулятора тока каждой ПС, исходя из баланса токов в МППТ. При аварийном отключении одной из ПС роль балансирующей принимает другая ПС с уменьшением уставки тока на величину уставки тока выходящей ПС, причем токи остальных ПС остаются неизменными. Отключение любой ПС не приводит к изменению

ВСЕСОЮЗНЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ — ИСТОРИЯ

Институт учрежден постановлением Совета Труда и Оборона в 1921 г. на базе электротехнической лаборатории МВТУ. До 1927 г. институт носил название Государственного экспериментального электротехнического института (ГЭЭИ), затем был переименован во Всесоюзный электротехнический институт (ВЭИ). В этот период были проведены различные испытания по заданиям предприятий электропромышленности.

В 1994 г. ВЭИ присвоен статус Государственного научного центра Российской Федерации (ГНЦ ВЭИ). В 2004 г. институт включен в перечень стратегических предприятий Российской Федерации. С 2015 г. входит в Госкорпорацию «Росатом».

КОМПОНОВКА ВТВ ДЛЯ ВПТ

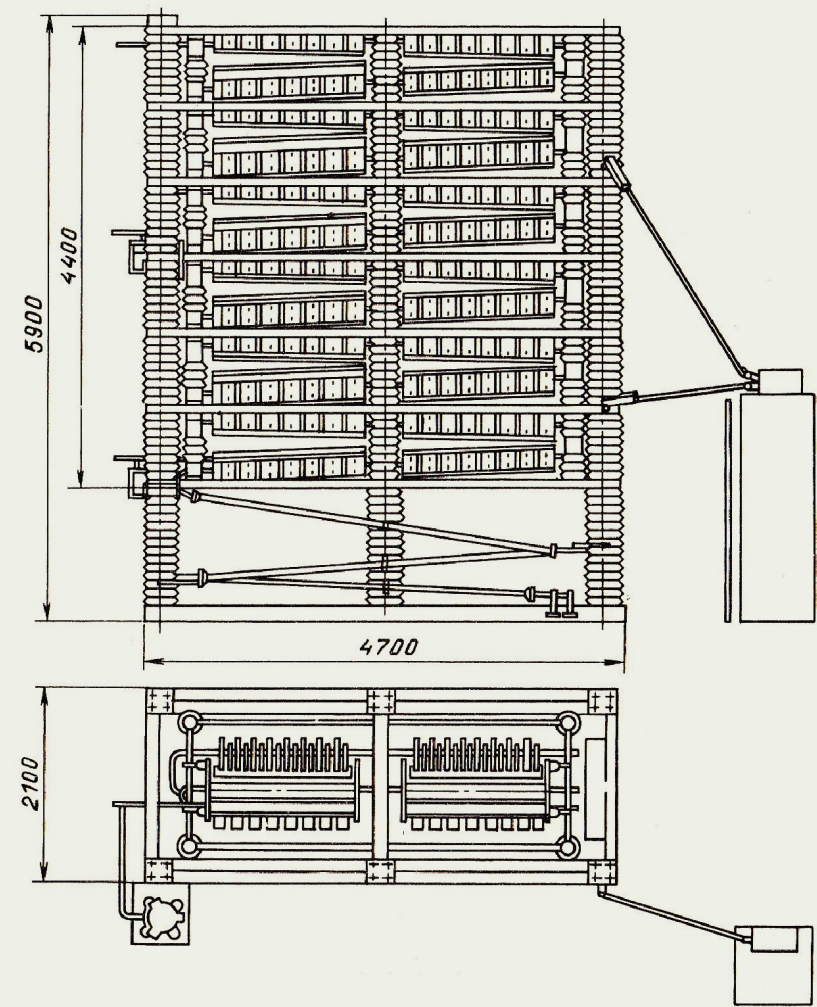


Рис. 5

напряжений других ПС, а перераспределяются САР автоматически. Затраты на установку БК удорожает каждую ПС примерно на 15 %. Замена тиристоров ПС на приборы IGBT приводит к отказу от БК, что упрощает и удешевляет МППТ. Нарастание в мире числа системных аварий с начала XX века привело к необходимости создания МСПТ, которые реализуются в Китае в виде кабельной сети 500 кВ. Однако сложность и дороговизна выключателей постоянного тока пока препятствует распространению МСПТ.

ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОСОБЕННОСТИ ВПТ

Характеристики и особенности ВПТ иллюстрируются на примере Выборгской ВПТ мощностью 1,5 ГВт с четырьмя блоками напряжением 170 кВ, которую начали вводить в строй с 1981 г. ВПТ соединяет четыре ЛЭП 330 кВ системы «Ленэнерго» и две ЛЭП 400 кВ системы Иматран Войма (Финляндия).

Главная схема ВПТ состоит из четырех комплектных высоковольтных преобразовательных устройств (КВПУ), каждое из которых состоит из четырех мостов напряжением 170 кВ на ток 2100 А, после реконструкции 2400 А. Каждый мост состоит из трех вентильных фаз (шесть плеч моста), модули которых выполнены ранее на тиристорах Т-630, впоследствии — на Т-1250 производства завода «Электровыпрямитель» (г. Саранск). Диаметр шайбы тиристоров Т-250 80 мм. В плече 64 тиристора, в модуле четыре тиристора мощностью 470 кВт. В фазе 128 тиристоров и 32 модуля. Главная схема ВПТ приведена на рис. 4.

Преобразовательные трансформаторы выпрямителя 3×ОДЦТНП-135000/330/110–78, 330/√3±12×1,27%, вентильная

обмотка 67/√3/67/38,5 кВ. Трансформатор инвертора 3×ОДЦТП 135000/400/110–78, 400/√3, вентильная обмотка 70/√3/70/38,5 кВ.

Преобразовательные мосты питаются от однофазных четырехобмоточных трансформаторов производства ЗаТЗ г. Запорожье, вентильные обмотки которых соединены по схеме звезда и треугольник, а обмотка НН 35 кВ служит для присоединения фильтров высших гармоник. Трансформаторы, присоединенные к шинам 330 кВ, снабжены РПН.

Для снижения влияния гармоник токов на линии связи на ВПТ установлены две группы фильтров. Первая группа состоит из трех узкополосных фильтров на 5, 7, 13-ю гармоники и одного широкополосного фильтра, подключенных к обмотке НН преобразовательного трансформатора. Вторая группа фильтров состоит из двух широкополосных фильтров, включенных на шины переменного тока 330 и 400 кВ. Настройка фильтров осуществляется переключением отпаек фильтровых реакторов.

Для работы ВПТ с наибольшим коэффициентом мощности во всем диапазоне нагрузок ее реактивная мощность компенсируется фильтрами и синхронными компенсаторами (СК), которые обеспечивают поддержание напряжения на шинах переменного тока в определенном диапазоне и ограничивают переток реактивной мощности по линиям 400 кВ. На шины 330 кВ подключены два СК мощностью 100 МВА, к шинам 400 кВ подключены два СК мощностью 160 МВА.

Ключевым элементом ВПТ является ВТВ, который благодаря заложенной избыточности тиристоров, отработке конструкций и испытаниям на МИС г. Тольятти показал высокую надежность. Компоновка ВТВ приведена на рис. 5.

Успешная эксплуатация КЭО на ВПТ подтвердила правильность принятых решений и перспективность строительства других ВПТ в нашей стране для управления потоками мощности, ограничения токов КЗ связанных энергосистем, повышения устойчивости и надежности энергоснабжения. Значительный вклад в разработку КЭО, проектирование и ввод в эксплуатацию ВПТ сыграли Кулаков В.П., Викулин А.Г., Таратута И.П. и сотни специалистов ВЭИ, НИИПТ, ЭСП и десятков других организаций. Отработанная на четырех КВПУ цифровая САР (Мазуренко А.К.) наряду с системой мониторинга (Мордкович А.Г.) обеспечили создание по существу впервые в стране цифровой ВПТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Передача энергии постоянным током/Под ред. И.М. Бортника и А.В. Поссе. М.: Энергоатомиздат, 1985.

2. Поссе А.В., Схемы и режимы электропередач постоянного тока. Л.: Энергия. отд-ние. 1973.

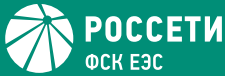
3. Электротехническое оборудование для вставки постоянного тока: Сб. науч. тр. / Всесоюз. электротехн. ин-т им. В.И. Ленина; под общ. ред. И.М. Бортника, В.П. Кулакова. М.: Энергоатомиздат, 1986.

4. Лытаев Р.А, Таратута И.П., Фтин В.П., Перспективы применения высоковольтной преобразовательной техники для ЛЭП постоянного тока//Всемирный электротехнический конгресс. М.: Изд. ВЭЛК, 1977. Доклад № 2.32.

5. Воеводин В.П., Белецкий В.И., Лоханин А.К., Трансформаторное оборудование для ЛЭП постоянного тока, //Всемирный электротехнический конгресс. М.: Изд. ВЭЛК, 1977. Доклад № 2.34.

6. Поссе А.В., Герцик К.А., Петров С.Я. и др., Электропередача постоянного тока 1500 кВ Экибастуз — Центр//Электрические станции, 1983. № 2. С. 45–49.

7. Стукачев А.В., Травин Л.В., Шульга Р.Н., Техничко-экономические проблемы передачи электрической энергии постоянным током высокого напряжения//Итоги науки и техники. Сер. Электрические сети. 1984. ВИНТИ. Т. 2.



УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА:
ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ
КОМПАНИЯ ЕДИНОЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ

ЭНЕРГИЯ
ЕДИНОЙ СЕТИ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Периодичность: 6 раз в год
Тираж: 3050 экземпляров
Учредитель: ПАО «ФСК ЕЭС»
Издатель: «НТЦ Россети ФСК ЕЭС»

Редакционная коллегия:
представлена ведущими учеными
и специалистами в энергетической области
(докторов технических наук — 11,
кандидатов технических наук — 9,
член-корреспондентов — 2).

Журнал включен в перечень
рецензируемых изданий ВАК.

Журнал включен в «Российский
индекс научного цитирования».

Рубрики
журнала:

- Электроэнергетика и электротехника
- Электрические машины и аппараты
- Трансформаторы и электрические реакторы
- Силовая преобразовательная техника
- Провода и кабели
- Электротехническое оборудование
- Электрические системы
- Средства РЗА
- Линии электропередачи и подстанции
- Возобновляемая энергетика

Приглашаем авторов к публикации статей
в научно-техническом журнале
«Энергия единой сети».
С правилами подачи заявки можно ознакомиться
на сайте www.Энергия-единой-сети.РФ.

Контакты:
editor@энергия-единой-сети.рф
editor@ntc-power.ru

Тел.: + 7 (495) 118-43-65
www.Энергия-единой-сети.РФ

ИНФОРМАЦИЯ
ДЛЯ АВТОРОВ

РАСПРОСТРАНЕНИЕ:

- Министерство энергетики Российской Федерации;
- Министерство обороны Российской Федерации;
- Государственная Дума Федерального Собрания РФ;
- ПАО «Россети»;
- ПАО «ФСК ЕЭС»;
- АО «СО ЕЭС»;
- отраслевые НИИ;
- вузы и библиотеки;
- инфраструктурные энергетические компании;
- производители и поставщики электротехнического оборудования;
- отраслевые мероприятия.



Зарегистрирован: в Федеральной службе
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций
(Роскомнадзор) 20 сентября 2012 г. Свидетельство
о регистрации: № ПИ №ФС77-51276.

реклама