

ОПЫТ «НТЦ РОССЕТИ ФСК ЕЭС» В РАЗРАБОТКЕ, ИЗГОТОВЛЕНИИ И ВНЕДРЕНИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

АВТОРЫ:

А.М. МАТИНЯН, К.Т.Н.,
М.В. ПЕШКОВ, К.Т.Н.,
А.Н. КИСЕЛЕВ, К.Т.Н.,
К.С. КОШЕЛЕВ, К.Т.Н.,
В.Н. КАРПОВ, К.Т.Н.,
Н.А. АЛЕКСЕЕВ,
А.В. АНТОНОВ,
П.Ю. БУЛЫКИН,
В.А. ПАДАЛКО,
«НТЦ РОССЕТИ ФСК ЕЭС»

Наличие собственного испытательного полигона позволяет «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» проводить сложные высоковольтные,

нагрузочные функциональные испытания высоковольтных тиристорных вентилях и выполнять опробование высоковольтных активных фильтров.

Ключевые слова: управляемые шунтирующие реакторы; вставка постоянного тока; активный фильтр, однофазное автоматическое повторное включение, НИОКР.



Современный управляемый шунтирующий реактор трансформаторного типа (УШРТ)

ВВЕДЕНИЕ

«НТЦ Россети ФСК ЕЭС» — преемник Всесоюзного научно-исследовательского института электроэнергетики (ВНИИЭ), основанного в 1944 г. Первый опыт разработки и внедрения высоковольтной преобразовательной техники ВНИИЭ относится к 1950 г., к проекту сооружения передачи постоянного тока на ртутных вентилях Кашира — Москва. Главные достижения «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» в области преобразовательной техники в период до 2010 г. приведены в сборнике статей под редакцией В.И. Кочкина [1]. Настоящая обзорная статья освещает основные результаты деятельности центра качества и центра производства «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» после 2010 г., являющихся центрами компетенций НИОКР по указанной тематике. Наиболее значимые результаты — создание линейки современных отечественных управляемых шунтирующих реакторов трансформаторного типа (УШРТ), высоковольтного тиристорного блока вентилях для Выборгского преобразовательного комплекса и высоковольтного активного фильтра, выполненного по наиболее широко применяемой в новых проектах в мире схеме модульных многоуровневых преобразователей.

СОЗДАНИЕ ЛИНЕЙКИ СОВРЕМЕННЫХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ УШРТ

Проведение серии НИОКР по созданию линейки быстродействующих УШРТ с расщепленными вентильными обмотками по заказу «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» было обусловлено рядом факторов, в числе которых:

- успешный опыт эксплуатации в ЕНЭС более 100 управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов, применяемых с 1998 г., значительная часть которых вы-

- пущена Запорожским трансформаторным заводом и использует принципы, предложенные д. т. н., проф. А.М. Брянцевым;
- успешный опыт применения УШРТ конструкции д. т. н., проф. Г.Н. Александрова в Анголе в 2009 г.;
- наличие теоретического обоснования эффективности применения быстродействующих УШРТ в качестве линейных реакторов;
- инновационные предложения «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» по глубокой модернизации и усовершенствованию применявшихся на момент 2010 г. УШРТ;
- решение «Россети ФСК ЕЭС» о диверсификации номенклатуры УШР и дальнейшем совершенствовании реакторов, несмотря на высокую стоимость НИОКР, риски и наличие применявшейся в ЕНЭС линейки управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов.

В 2011–2013 гг. по заказу «Россети ФСК ЕЭС» в «НТЦ Россети ФСК

ЕЭС» под руководством В.И. Кочкина С.В. Крайновым, А.Н. Киселевым, В.Н. Карповым, М.В. Пешковым, К.С. Кошелевым и другими сотрудниками института был разработан проект УШРТ технически более совершенной конструкции, которая отличалась от реактора конструкции проф. Г.Н. Александрова наличием расщепленных вентильных обмоток, соединенных в «звезду» и «треугольник», что позволяло вдвое снизить уровень эмиссии гармоник тока в сеть.

В 2014 г. был введен в работу первый экземпляр УШРТ с расщепленными вентильными обмотками мощностью 50 Мвар подстанции (ПС) 220 кВ «Светлая» МЭС Сибири. Принципиальная комбинированная схема инновационной конструкции УШРТ [2, 3] приведена на рис. 1 и включает электромагнитную часть (ЭМЧ) и вентильную часть (ВЧ). Вентильные обмотки В01а, В01б и В01с соединяются по схеме «треугольник», а вен-

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА УШРТ КОНСТРУКЦИИ «НТЦ РОССЕТИ ФСК ЕЭС»»

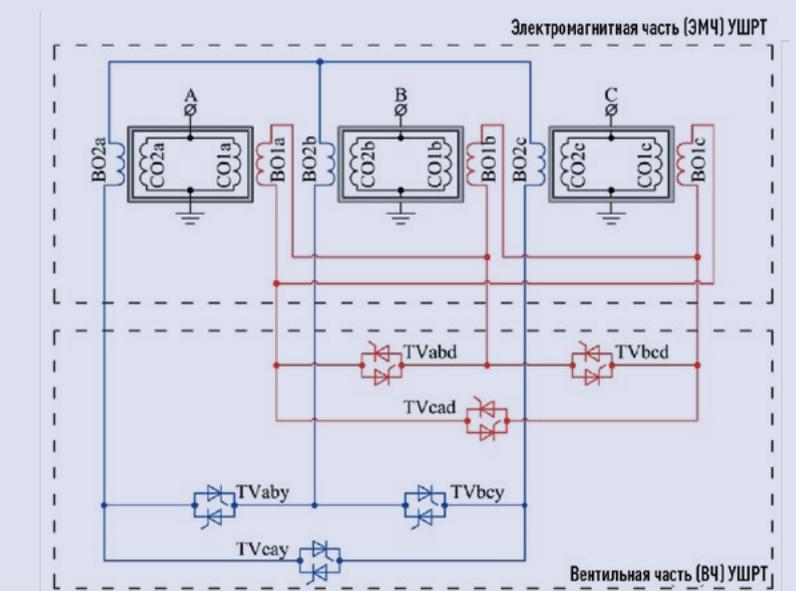


Рис. 1

СПЕКТР ТОКА СО УШРТ В РЕЖИМЕ С МАКСИМАЛЬНЫМ THD_i



Рис. 2

СПЕКТР НАПРЯЖЕНИЯ СО УШРТ В РЕЖИМЕ С МАКСИМАЛЬНЫМ THD_i



Рис. 3

тильные обмотки В02а, В02б и В02с — по схеме «звезда». Тиристорные вентили (ТВ) обеих групп соединяются по схеме «треугольник». ЭМЧ УШРТ напряжением 110 и 220 кВ и мощностью от 25 до 100 Мвар выполняется трехфазной, в едином баке. ЭМЧ реакторов 330 и 500 кВ мощностью 180 Мвар выполняется в виде трех фаз по 60 Мвар. Схема соединения фаз $Y_0/D11/Y_0$ УШРТ позволяет исключить

из спектра токов сетевых обмоток реактора, помимо всех четных и кратных трем гармоник, дополнительные гармоники с номерами $6 \times (2n - 1) \pm 1$, где n — натуральное число [2, 4, 5].

Остаточный уровень гармонических искажений тока сетевой обмотки (СО) реактора довольно мал, это позволяет отказаться от дополнительных мер ослабления высших гармоник тока

в большинстве сетей, что подтверждено результатами сетевых испытаний УШРТ на ПС 330 кВ «Старорусская» (рис. 2–4). Данная ПС выбрана с учетом отсутствия конденсаторных батарей, подключенных параллельно с УШРТ, которые могли бы явиться фильтром высших гармоник тока УШРТ. Таким образом, на примере ПС 330 кВ «Старорусская» можно продемонстрировать преимущества данного типа УШРТ в наиболее сложной схемно-режимной ситуации.

Испытания шинных УШРТ конструкции «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» показали возможность регулирования напряжения указанным устройством с высоким быстродействием (рис. 5), потенциально обеспечивающим возможность его работы в качестве линейного реактора (рис. 6), позволяющего дополнительно повысить надежность работы энергосистемы, в частности, за счет повышения вероятности успешного однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ) линии электропередачи и безопасного опробования реактированной линии напряжением.

Теоретическая возможность использования для этой цели различных типов шунтирующих реакторов известна с 1990-х гг., но практическое применение линейного УШРТ требовало разработки особых алгоритмов управления реактором и проведения существенно большего объема исследований, что привело к инициированию «Россети ФСК ЕЭС» в 2015 г. НИОКР «Исследование и разработка программно-технического комплекса управления УШРТ 500 кВ 180 Мвар в паузе ОАПВ и при включении линии 500 кВ на холостом ходу».

В результате выполнения данной НИОКР был разработан оригинальный способ управления УШРТ в цикле ОАПВ воздушной линии (ВЛ) [6], позволяющий сократить время паузы ОАПВ линии [7]. Расчетная зависимость длительности паузы ОАПВ от длины ВЛ приведена на рис. 7.

Высокое быстродействие УШРТ позволяет предотвратить развитие режима недопустимого повышения напряжения, возникающего на ЛЭП со степенью компенсации зарядной мощности близкой к 100% (большинство линий) после погасания дуги в цикле ОАПВ линии [8]. Разработанные алгоритмы с 2017 г. применяются на УШРТ, подключаемых непосредственно к линии электропередачи 500 кВ. Опытная промышленная эксплуатация УШРТ с данными алгоритмами проведена на ПС 500 кВ «Алания» и ПС 500 кВ «Усть-Кут».

Еще одним преимуществом УШРТ является фазоимпульсное управление УШРТ, которое обеспечивает включение линии без апериодической составляющей (на ЛЭП со степенью компенсации зарядной мощности, близкой к 100%) и позволяет устранить причину повреждения линейного выключателя в нормированном цикле «включение — отключение» без применения специальных дополнительных мер, таких как управляемая коммутация или предвключенные резисторы, необходимых в случае применения шунтирующих реакторов (ШР) либо управляемых шунтирующих реакторов (УШР) других типов.

В период с 2012 по 2018 г. «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» по заказу «Россети ФСК ЕЭС» был выполнен ряд НИОКР по созданию универсальной линейки отечественных современных УШРТ мощностью 25, 63, 100 и 180 Мвар на напряжение 110, 220, 330 и 500 кВ, предназначенных для обеспечения надежности работы электрических сетей 110–500 кВ в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работ [4–13]. Пилотные образцы всех типов реакторов линейки введены в эксплуатацию (рис. 8). Налажено производство оборудования электромагнитной части УШРТ на российских заводах ООО «Тольяттинский трансформатор» и ХК АО «Московский электротехнический завод».

Совместно с ООО НПП «ЭКРА» успешно выполнены дополнительные НИР

для обеспечения совместной работы УШРТ и релейной защиты (РЗ) ВЛ с функцией адаптивного ОАПВ линии.

Применение УШРТ конструкции «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» позволяет:

- снизить вероятность резонанса токов в сети и искажений напряже-

ния на высших гармониках за счет пониженной эмиссии гармоник тока;

- повысить надежность работы электрической сети и увеличить максимально допустимые перетоки (МДП) сечений в энергосистеме за счет высокого быстродействия

СПЕКТР НАПРЯЖЕНИЕ СО УШРТ НА ХОЛОСТОМ ХОДУ РЕАКТОРА



Рис. 4

НАБОР МОЩНОСТИ УШРТ НА ПС 330 КВ «СТАРОРУССКАЯ» ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УСТАВКИ НАПРЯЖЕНИЯ

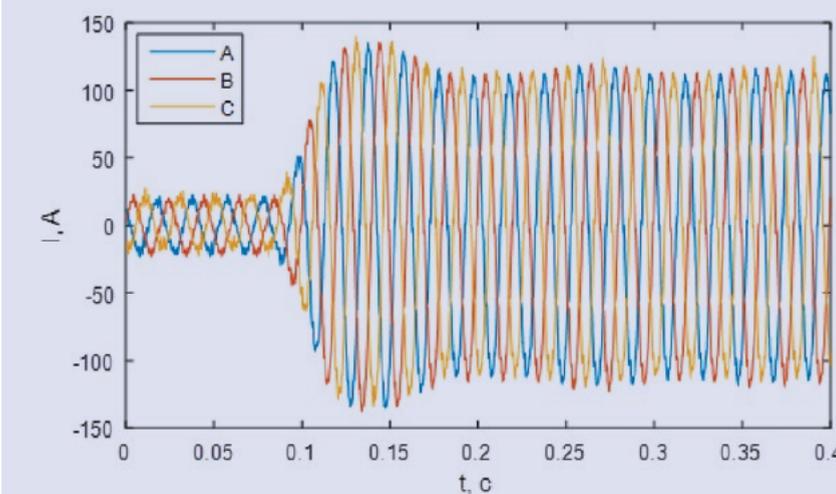


Рис. 5

ТИПЫ ПОДКЛЮЧЕНИЯ УШРТ К СЕТИ

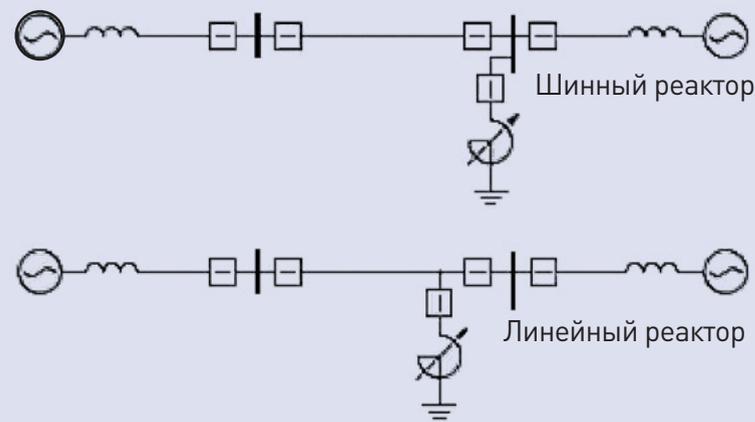


Рис. 6

(30 мс) и функции сокращения длительности паузы ОАПВ ВЛ;

- использовать УШРТ в контуре центральной системы противоаварийной автоматики (ЦСПА);
- перенести на более дальний срок либо отказаться от ввода дополнительных ЛЭП за счет более эффективного использования существующей сети.

лась в 1981 г. В настоящее время через Выборгский комплекс из России в Финляндию ежегодно экспортируется порядка 6–7 ТВт·ч электроэнергии. Основу комплекса составляют четыре однотипных комплектных вентильных преобразовательных установки (КВПУ) пропускной способностью 350 МВт каждая (рис. 9) и напряжением звена постоянного тока ± 75 кВ вместе с преобразовательными трансформаторами, а также коммутационное

устройство с автотрансформатором АТ-3330/400 кВ, через которое обеспечивается выделение одного из энергоблоков Северо-Западной ТЭЦ на параллельную синхронную работу с энергосистемой Финляндии.

Оборудование Выборгского преобразовательного комплекса вводилось в работу поэтапно, начиная с 1981 г., когда было запущено комплектное вентильное преобразовательное устройство № 2 (КВПУ2). Далее, в 1982 г. было запущено КВПУ1, в 1984 г. — КВПУ3, в 2000 г. — КВПУ4. Назначенный ресурс для преобразовательных блоков типа БВПМ800/120 составляет 25 лет, и в 2016 г. потребовалась замена эксплуатируемого оборудования на новое.

В течение 2017–2018 гг. в «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» по заказу «Россети ФСК ЕЭС» была разработана документация и изготовлены БВПМ–М (М — модернизированный), система охлаждения и шкаф управления (ШУ) для него, проведены испытания на специализированных стендах. В процессе разработки были приняты во внимание недостатки старой конструкции КВПУ и пожелания заказчика в части облегчения эксплуатации вентильного оборудования.

ЗАВИСИМОСТЬ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ОАПВ ОТ ПАРАМЕТРОВ СЕТИ

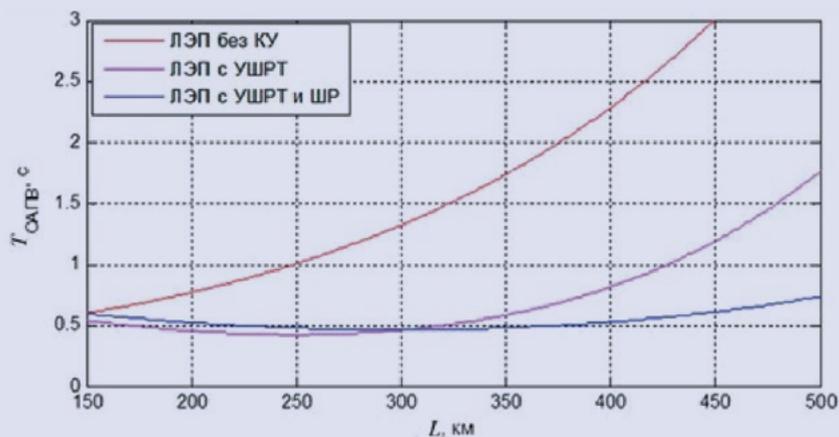


Рис. 7

СОЗДАНИЕ СОВРЕМЕННОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТИРИСТОРНОГО ВЕНТИЛЯ ДЛЯ ВЫБОРГСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Выборгский преобразовательный комплекс — крупнейший объект постоянного тока в России. Он представляет собой вставку постоянного тока на тиристорных преобразователях тока с возможностью передачи до 1300 МВт. Комплекс был построен для экспорта электроэнергии из СССР в Финляндию. Эксплуатация нача-

Преобразовательный блок типа БВПМ новой конструкции (рис. 10) состоит из двух высоковольтных тиристорных вентилей (ВТВ), они, в свою очередь, включают четыре высоковольтных тиристорных модуля (ВТМ), соединенных последовательно. ВТМ располагаются на этажах рамной конструкции БВПМ по одному на этаж. ВТМ представляет собой устройство, состоящее из последовательно соединенных двух дросселей насыщения и тиристорной сборки (см рис. 11), которая включает 12 последовательно соединенных тириستоров типа T283–1600–60 и 13 охлаждаителей с единым прижимным устройством, блок конденсаторов, резисторы цепей деления напряжения между тиристорными ячейками, стойки с блоками управления, два коллектора с трубками для подвода (отвода) охлаждающей жидкости к охладителям и дросселям насыщения. Питание блоков управления осуществляется отбором мощности с тиристорной ячейки.

Оборудование БВПМ–М, ШУ и системы охлаждения подвергалось заводским

и типовым испытаниям в соответствии с требованиями действующих в России отраслевых стандартов, стандартов организации «Россети ФСК ЕЭС», с учетом требований международных стандартов IEC 60700–1, IEC 60060, IEC 61803 и IEC 600071–1, относящихся к тематике испытаний вентильного оборудования вставок и передач постоянного тока. Оборудование БВПМ подвергалось длительным испытаниям в режимах, соответствующих максимальным токовым и потенциальным воздействиям на тиристоры ВТВ, в режимах с максимальной выделяемой мощностью в элементах цепей деления напряжения.

Проверялись работа ВТВ в условиях минимального напряжения переменного тока, режимах работы КВПУ с прерывистым током, аварийных режимах КВПУ, устойчивость оборудования БВПМ к воздействию грозовых и коммутационных импульсов, электромагнитная совместимость систем управления элементов БВПМ. Испытания проводились на стендах «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» в г. Москве

и подтвердили соответствие характеристик изготовленного оборудования расчетным [14, 15].

В мае 2019 г. оборудование БВПМ–М было смонтировано на ПС 400 кВ «Выборгская» в составе инверторного преобразователя КВПУ-3. Пусконаладочные работы БВПМ–М были успешно завершены в июне 2019 г. После окончания пусконаладочных работ оборудование БВПМ–М было передано в опытно-промышленную эксплуатацию. За годы эксплуатации на БВПМ–М не произошло ни одного аварийного отключения, ни один тиристор не вышел из строя, что говорит о правильности принятых технических решений. Были подтверждены расчетные показатели надежности оборудования БВПМ–М, а в 2020 г. принято решение приступить к тиражированию БВПМ–М для замены других БВПМ в составе КВПУ-3.

Поэтапная замена вентильного оборудования КВПУ на современное позволит сократить издержки на ремонт

КАРТА ВНЕДРЕНИЯ УШРТ

Особенности реакторов:

- Быстродействие реактора 30 мс
- Уровень гармоник тока ниже 2%
- Низкие потери
- Дополнительные функции линейного реактора
 - Сокращение паузы ОАПВ линии
 - Обеспечение опробования линии напряжением



Объекты внедрения УШРТ:

- УШРТ-50000/220 УХЛ1 на ПС 220 кВ Светлая МЭС Сибири
- УШРТ-100000/220 УХЛ1 на ПС 220 кВ Кафа МЭС Эга
- УШРТ-25000/110 УХЛ1 на ПС 220 кВ Быстринская МЭС Сибири
- УШРТ-63000/220 УХЛ1 на ПС 220 кВ Пихтовая, Роснефть
- УШРТ-180000/500 УХЛ1 на ПС 500 кВ Моздок-2 МЭС Юга
- УШРТ-180000/500 УХЛ1 на ПС 500 кВ Усть-Кут МЭС Сибири
- УШРТ-25000/110 УХЛ1 на ПС 220 кВ Тара, МРСК Сибири
- УШРТ-63000/220 У1 на ПС 220 кВ Спасск, МЭС Востока
- УШРТ-180000/330 У1 на ПС 330 кВ Старорусская, МЭС Северо-Запада



Рис. 8

оборудования, повысить надежность работы Выборгского преобразовательного комплекса и энергоэффективность объекта.

Разработанное оборудование может быть использовано при новом строительстве вставок и передач постоянного тока аналогичного типа, в том числе при реализации проектов транспорта электроэнергии из России в Китай, Японию (создание Азиатского энергокольца), ЕС и другие страны.

СОЗДАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО АКТИВНОГО ФИЛЬТРА МПУ-10000/10 УХЛ1

В электрических сетях Российской Федерации существуют районы, в которых зафиксированы систематические недопустимые ГОСТ 32144–2013 отклонения показателей качества электроэнергии (ПКЭ), обусловленные работой мощных искажающих промышленных потребителей (электрифицированная железная дорога, металлургические заводы, предприятия химической промышленности и другие нелинейные и/или несимметричные нагрузки). Низкое качество электроэнергии (КЭ) в сетях общего присоединения приводит к сокращению сроков службы электрооборудования, технологическим нарушениям и дополнительным потерям электроэнергии в электрических сетях и у потребителей.

Наиболее проблемными регионами в РФ по критерию несимметрии напряжений по обратной последовательности и несинусоидальности напряжения являются Забайкальский край и Амурская область [16, 17], где основным источником искажений КЭ является тяговая нагрузка Транссибирской и Байкало-Амурской магистралей [18]. С 2014 по 2018 г. объем

перевозок по Транссибирской магистрали увеличился на треть. С ростом количества поездов возрастает и нагрузка на энергосистему, в частности, актуализируется проблема КЭ.

Организационно аналогичные задачи за рубежом решаются нормированием предельных уровней эмиссии токов высших гармоник и тока обратной последовательности [19]. Технические мероприятия заключаются в применении компенсирующих устройств. Для компенсации искажений, вызванных электроподвижным составом, широко применяются активные фильтры [20, 21].

С 2018 г. при Министерстве энергетики РФ ПАО «Россети ФСК ЕЭС» и ОАО «РЖД» ведут скоординированные работы по обеспечению КЭ вдоль тяговых транзитов. Перечис-

ленные выше факторы и опыт «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» предопределили то, что в 2019–2021 гг. «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» по заказу «Россети ФСК ЕЭС» выполнило разработку высоковольтного активного фильтра МПУ-10000/10 УХЛ1, изготовило, испытало и провело его опытно-промышленную эксплуатацию.

МПУ — устройство, выполненное на базе модульного многоуровневого преобразователя напряжения, является активным фильтром и позволяет повысить ПКЭ за счет компенсации тока высших гармоник и тока обратной последовательности. Компоновка, внешний и внутренний виды МПУ-10000/10 УХЛ1 приведены на рис. 12.

Преобразователь напряжения выполнен по схеме соединения фаз

СХЕМЫ ВЫБОРГСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

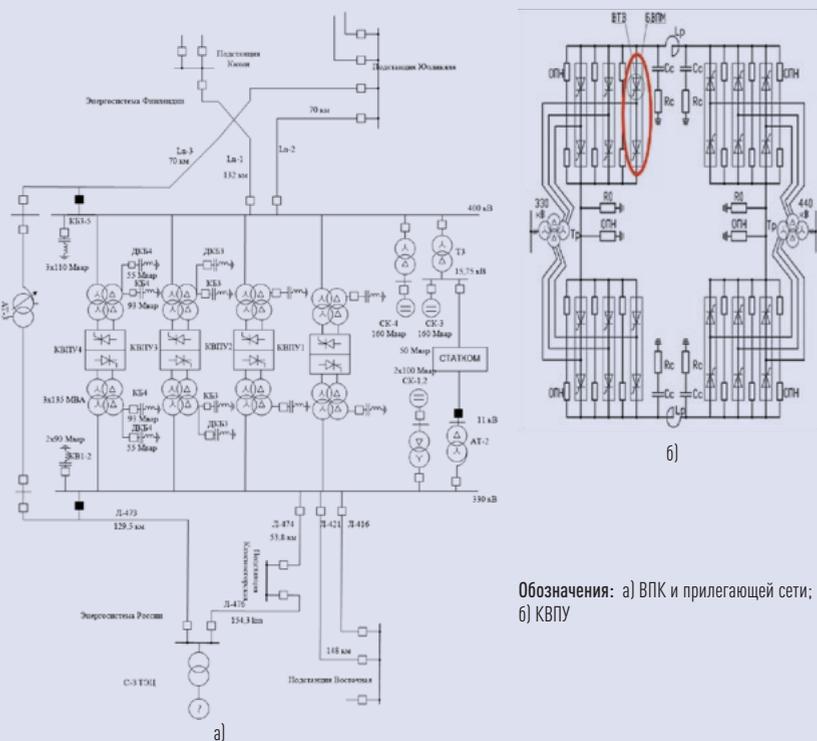


Рис. 9

Обозначения: а) ВПК и прилегающей сети; б) КВПУ

в треугольник, обеспечивающей возможность формировать линейный ток преобразователя при любом сочетании фаз тока прямой и обратной последовательности тока нагрузки [22]. В каждой фазе МПУ последовательно соединены 20 модулей МПУ, из которых один избыточный.

Основные параметры МПУ приведены в табл. 1.

Схема присоединения МПУ-10000/10 УХЛ1 на ПС 220 кВ «Жирекен» приведена на рис. 13, где ИН — искажающая тяговая нагрузка. Данная схема подключения МПУ выбрана для проверки всего функционала устройства, предусмотренного НИОКР с приоритетом повышения качества электроэнергии у местных потребителей (котельной Жирекена) Типовые схемы подключения МПУ приведены в статье Р.Г. Шамонова и соавт. [23].

В ходе проведения опытно-промышленной эксплуатации МПУ-10000/10 УХЛ1 на ПС 220 кВ «Жирекен» были испытаны следующие режимы работы устройства:

- штатный режим № 1 фильтрации тока обратной последовательности частоты 50 Гц и токов 3-й, 5-й, 7-й и 9-й гармоник (прямой и обратной последовательностей) в обмотке 2200 кВ АТ-2;
- штатный режим № 2 приоритетной компенсации напряжения обратной последовательности частоты 50 Гц на шинах 2 СШ 10 кВ и стабилизации напряжения прямой последовательности частоты 50 Гц при неполном исчерпании мощности МПУ на симметрирование напряжения;
- штатный режим № 3 приоритетной компенсации напряжения обратной последовательности частоты 50 Гц на шинах 2 СШ 10 кВ и стабилизации напряжения прямой последовательности частоты 50 Гц



Рис. 10
Внешний вид БВМ в составе Выборгского комплекса



Рис. 11
Внешний вид высоковольтного тиристорного модуля на испытательном стенде

- при неполном исчерпании мощности МПУ на симметрирование напряжения;
- экспериментальный режим № 4 одновременной компенсации напряжения обратной последовательности частоты 50 Гц и компенсации 3-й и 5-й гармоник напряжения на 2 СШ 10 кВ. Данный режим не был предусмотрен договором НИОКР и реализован для демонстрации научно-технического задела «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» в потенциальном развитии данной группы НИОКР в среднесрочной перспективе.

Осциллограмма токов обмоток 220 кВ АТ-2 до и после отключения МПУ приведена на рис. 14. После отключения МПУ в момент времени 0,6 с наблюдается увеличение коэффициента гармонических искажений токов в среднем с 14 до 42% и увеличение тока обратной последовательности с 1,2 до 3,7 А. Данный режим целесообразно применять в перспективе при реализации комплексного проекта повышения КЭ в Забайкальском крае и Амурской области при подключении МПУ через отдельный повышающий трансформатор [23].

Основную часть времени проведения опытно-промышленной эксплуатации МПУ отработало в режиме приоритетной компенсации напряжения обратной последовательности частоты 50 Гц на шинах 2 СШ 10 кВ. Осциллограмма коэффициента несимметрии по обратной последовательности приведена на рис. 15. Эффективность МПУ-10000/10 УХЛ1 в данном режиме зависит от величины тока короткого замыкания на шинах присоединения. На ПС 220 кВ «Жирекен» гарантированное снижение K_{2u} составило 2,5% при токе короткого замыкания 9,5 кА. После ввода МПУ в промышленную эксплуатацию установка будет функционировать в данном режиме, обеспечивающем повышение надежности работы, в частности, такого важного для района потребителя, как котельная.

Осциллограмма работы МПУ в экспериментальном режиме одновременной компенсации напряжения обратной последовательности частоты 50 Гц и компенсации 3-й и 5-й гармоник напряжения на 2 СШ 10 кВ приведена на рис. 16. До отключения МПУ в момент времени 0,6 с наблюдается снижение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности на шинах 2 СШ 10 кВ с 1,5 до 0%; коэффициента суммарных нелинейных искажений с 9 до 3% 2 СШ 10 кВ; коэффициента 3-й гармонической составляющей напряжения

профессионализму и практическому опыту к.т.н. Р. Г. Шамонова и Ю.А. Горюшина, являвшегося долгое время главным инженером испытательного полигона на ПС 750 кВ «Белый Раст» и принимавшего непосредственное участие в создании и испытаниях Выборгского преобразовательного комплекса, сооруженного в 1980-х гг.

Центр качества электроэнергии и центр производства «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» обладает компетенциями и материально-техническими обеспечением для решения задач разработки и опытного внедрения высоковольтной преобразовательной техники для тиристорных и транзисторных вставок и передач постоянного тока на мощности свыше 1000 МВт на передовом мировом уровне.

ОСЦИЛЛОГРАММА ТОКОВ В ОБМОТКЕ 220 КВ АТ-2 ПРИ РАБОТЕ МПУ И ПОСЛЕ ЕГО ОТКЛЮЧЕНИЯ В МОМЕНТ ВРЕМЕНИ 0,6 С

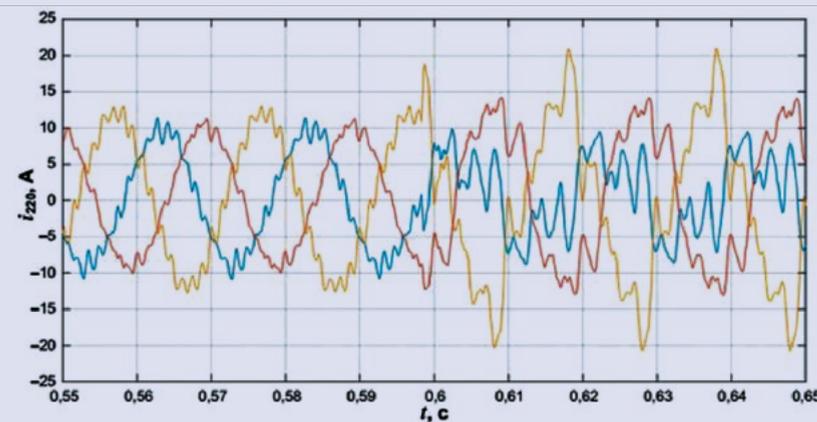


Рис. 14

КОЭФФИЦИЕНТ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ НА ШИНАХ 2 СШ 10

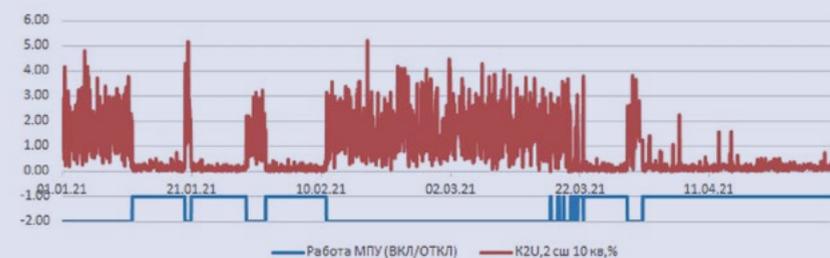


Рис. 15

ЛИТЕРАТУРА

1. Кочкин В.И., Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002.
2. Патент РФ 2518149. Управляемый реактор с трехстержневым магнитопроводом/П.Ю. Булыкин, С.В. Крайнов, Л.Л. Федосов.
3. Патент РФ 254274. Электромагнитный реактор/Е.Е. Волков, А.А. Ермишина, Л.П. Кубарев, В.В. Нечушкин, Л.Л. Федосов, Л.Г. Федосова, А.В. Антонов, П.Ю. Булыкин.
4. Матинян А.М., Пешков М.В., Карпов В.Н., Алексеев Н.А. Гармонический состав токов сетевых обмоток в УШРТ 500 кВ с расщепленными вентильными обмоткам//Электрические станции. 2016. № 4. С. 45–48.
5. Матинян А.М., Кошелев К.С., Киселев А.Н., Карпов В.Н., Пешков М.В., Алексеев Н.А., Михайлова Н.С. Расчет и контрольные замеры гармоник токов и напряжений современных УШРТ с расщепленными обмотками//Электрические станции. 2020. № 5. С. 47–53.
6. Патент РФ на изобретение № 2631260. Способ компенсации тока подпитки дуги однофазного замыкания линии электропередачи/М.В. Пешков, А.М. Матинян, А.Н. Алексеев, В.Н. Карпов, В.Н. Киселев.
7. Матинян А.М., Пешков М.В., Карпов В.Н., Алексеев Н.А. Применение УШРТ с расщепленными обмотками для сокращения времени цикла ОАПВ линий 500 кВ//Электрические станции. 2016. № 8. С. 39–45.
8. Матинян А.М., Пешков М.В., Карпов В.Н., Алексеев Н.А. Особенности УШРТ, обеспечивающие предотвращение резонанса напряжений в цикле ОАПВ линии//Электрические станции. 2016. № 11. С. 36–40.
9. Матинян А.М., Пешков М.В., Карпов В.Н., Алексеев Н.А. Исследование переходного феррорезонанса на ЛЭП с УШРТ//Электрические станции. 2017. № 2. С. 37–41.
10. Матинян А.М., Пешков М.В., Карпов В.Н., Алексеев Н.А., Пугаченко З.Е. Особенности УШРТ, способствующие безопасному опробованию ЛЭП 500 кВ//Электрические станции. 2017. № 1. С. 33–37.
11. Матинян А.М., Пешков М.В., Карпов В.Н., Алексеев Н.А., Горюшин Ю.А. Моделирование процесса отключения выключателем малых индуктивных токов УШРТ//Электро. Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность. 2017. № 2. С. 16–20.
12. Алексеев Н.А., Карпов В.Н., Матинян А.М., Пешков М.В. Дополнительные функции модернизированного УШРТ с расщепленными вентильными обмотками//Изв. НТЦ ЕЭС. 2017. № 1 (76). С. 87–101.
13. Матинян А.М., Ильин М.Д., Дони Н.А., Кошельков И.А., Шурупов А.А. Проверка работоспособности адаптивного ОАПВ и ТАПВ линии, оснащенной линейным УШРТ, методом НЛ-тестирования на RTDS//Релейная защита и автоматизация. 2017. № 2. С. 20–27.
14. Алексеев Н.А., Булыкин П.Ю., Змазнов Е.Ю., Карпов В.Н., Лозина Н.Г., Матинян А.М., Пешков М.В., Сафонов Е.П., Суслова О.В. Модернизация Выборгского преобразовательного комплекса. Расчет стойкости вентильного оборудования воздействию грозового импульсного напряжения//Электрические станции. 2018. № 11. С. 41–48.
15. Peshkov M.V., Alekseev N.A., Bulykin P. Yu., Zmaznov E.Yu., Karpov V.N., Lozinova N.G., Matinyan A.M., Safonov E.P., Suslova O.V. Upgrading of the Vyborg converter substation: analysis of lightning impulse voltage withstands capability//Power Technology and Engineering. 2019. Vol. 53. No. 1. P. 106–112.
16. Шамонов Р.Г. Качество электроэнергии в ЕЭС России. Текущие проблемы и необходимые решения/Р.Г. Шамонов, Л.И. Коверникова, В.Н. Тульский//Электроэнергия. Передача и распределение. 2016. № 2 (35). С. 33–43.
17. Романова В.В., Хромов С.В. Исследование несимметрии напряжений в узлах присоединения тяговых подстанций к питающей сети на участках Забайкальской железной дороги/Сб. статей всероссийской конференции «Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление». 1–3 сентября 2015 г. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. С. 195–203.
18. Схема и программа развития электроэнергетики Забайкальского края на период 2019–2023 гг. [Электронный ресурс]. URL: <http://минтер.зabaykalskiykray.ru/uxn> — e1aftqk/files/167-%D1%80.pdf
19. Emission Limits for Customer Facilities Connected to the Hydro-Quebec Transmission System [Electronic resource]. URL: http://www.hydroquebec.com/transenergie/fr/commerce/pdf/limites_emission_en.pdf
20. Gruber R., O'Brien D. Use of Modular Multilevel Converter (MMC) technology in rail electrification//AusRAIL 2014. Making Innovation Work. Perth, WA, Australia, 2014. P. 1–8.
21. Ma F. A railway traction power conditioner using modular multilevel converter and its control strategy for high-speed railway system/Fujun Ma, Qianming Xu, Zhixing He, et. al//IEEE Trans. Transp. Electrification. 2016. Vol. 2. P. 96–109. DOI: 10.1109/TTE.2016.2515164
22. Behrouzian E. Investigation of negative sequence injection capability in H-bridge multilevel STATCOM/E. Behrouzian, M. Bongiorno, H.Z. Parra//Power electronics and applications, 2014. 16th European conference. Lappeenranta, 2014. P. 1–10. DOI: 10.1109/EPE.2014.6910883
23. Шамонов Р.Г., Алексеев Н.А., Матинян А.М., Антонов А.В. Опыт и перспективы применения высоковольтного активного фильтра серии

ОСЦИЛЛОГРАММА НАПРЯЖЕНИЯ НА ШИНАХ 2 СШ 10 ДО И ПОСЛЕ ОТКЛЮЧЕНИЯ МПУ-10000/10 УХЛ1

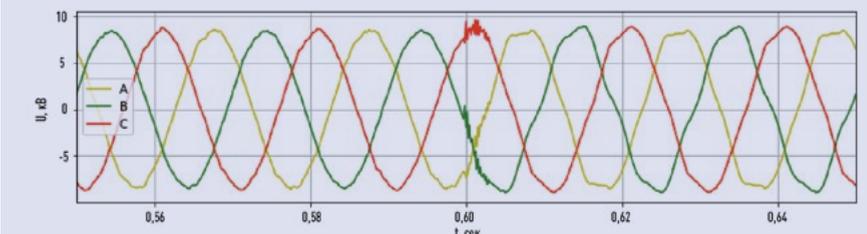


Рис. 16

СХЕМА ПОДКЛЮЧЕНИЯ МПУ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ИСКАЖЕНИЯ ОТ ТЯГОВОЙ НАГРУЗКИ

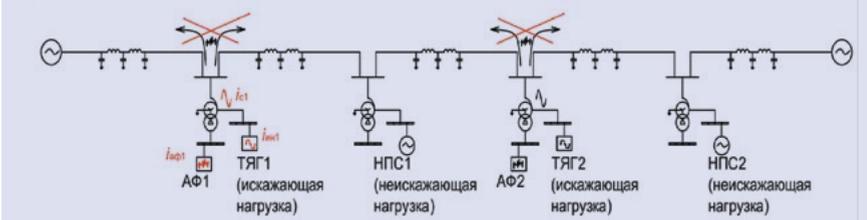


Рис. 17

21. Ma F. A railway traction power conditioner using modular multilevel converter and its control strategy for high-speed railway system/Fujun Ma, Qianming Xu, Zhixing He, et. al//IEEE Trans. Transp. Electrification. 2016. Vol. 2. P. 96–109. DOI: 10.1109/TTE.2016.2515164
22. Behrouzian E. Investigation of negative sequence injection capability in H-bridge multilevel STATCOM/E. Behrouzian, M. Bongiorno, H.Z. Parra//Power electronics and applications, 2014. 16th European conference. Lappeenranta, 2014. P. 1–10. DOI: 10.1109/EPE.2014.6910883
23. Шамонов Р.Г., Алексеев Н.А., Матинян А.М., Антонов А.В. Опыт и перспективы применения высоковольтного активного фильтра серии МПУ для повышения качества электроэнергии//Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 2 (65). С. 76–82.
24. Алексеев Н.А., Матинян А.М., Киселев А.Н. Особенности работы поперечно-подключаемого высоковольтного активного фильтра в электрической сети высокого напряжения//Электрические станции. 2020. № 8. С. 24–32.
25. Патент РФ 2020141930. Способ адаптивной компенсации высших гармоник в электрической сети переменного напряжения/А.Н. Алексеев, А.М. Матинян, А.Н. Киселев.
26. Матинян А.М. Повышение качества электроэнергии в электрических сетях современными компенсирующими устройствами: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2016.