

Исследовательский комитет В4 «Системы постоянного тока и силовая электроника»

Сулова О.В., к.т.н.

ОАО «НИИПТ», Санкт-Петербург

suslova_ov@niipt.ru

Предметная область исследовательского комитета (ИК) В4 включает следующий перечень изучаемых объектов, систем, процессов, явлений, тем, вопросов по различным аспектам функционирования и развития электроэнергетики:

постоянный ток высокого напряжения; силовая электроника для высоковольтных систем переменного тока и улучшение качества электрической энергии: экономические аспекты использования, области применения, планирование, проектирование, эксплуатация, управление, регулирование и защита преобразовательного оборудования и преобразовательных комплексов в целом;

развитие силовой электроники: разработка новых преобразовательных технологий для преобразовательных комплексов постоянного тока высокого напряжения, систем переменного тока и для улучшения качества электрической энергии.

Увеличение генерирующих мощностей от источников возобновляемой энергии и изменения схем передачи мощности повысило необходимость в устройствах постоянного тока и гибких системах передачи электроэнергии переменным током (FACTS¹). Очевиден рост интереса к использованию постоянного тока при более низком напряжении для распределительных сетей. Одновременно, развитие полупроводниковых устройств и топологий схем открывает новые возможности для планирования и эксплуатации систем переменного тока. Исследовательский комитет В4 играет важную роль в этом процессе, являясь площадкой для специ-

¹ FACTS – Flexible Alternative Current Transmission Systems – **регулируемая передача переменного тока**

алистов для обмена идеями и опытом.

Для обсуждения в рамках заседания ИК В4 на 48-ю сессию СИГРЭ 2022 г. отобрано 53 доклада по трём предпочтительным темам. В докладах представлена новейшая информация о схемах систем постоянного тока и FACTS на стадиях планирования, строительства и эксплуатации; новые достижения в производстве полупроводников для использования в системах постоянного тока и устройствах на основе силовой электроники, а также в сфере новых топологий для устройств силовой электроники; опыт модернизации устройств HVDC² и FACTS.

1. Системы постоянного тока высокого напряжения и их применение

Основные вопросы:

- Планирование и реализация новых проектов ПТВН, включая обоснование потребности, проектирование, интеграцию возобновляемых источников, экологическую и экономическую оценку.
- Применение новых технологий, включая кибербезопасность и средства контроля для решения новых проблем в сетях, сеть постоянного тока, многотерминальные системы ПТВН, гибридные системы и автоматические выключатели.
- Реконструкция и модернизация существующих систем ПТВН, опыт обслуживания и эксплуатации преобразовательных подстанций, включая преобразователи морского базирования, и их последствия для преобразовательного оборудования в результате перевода линий электропередачи переменного тока на постоянный ток.

2. Системы постоянного тока для распределительных энергосистем

Основные вопросы:

² HVDC – High Voltage Direct Current – высоковольтная линия постоянного тока.

- Применение постоянного тока в распределительных системах.
- Применение силовой электроники на распределительных объектах, экономические аспекты и вопросы надежности.
- Новые концепции и конструктивные типы оборудования.

3. Устройства FACTS и другие системы силовой электроники для передачи электроэнергии

Основные вопросы:

- Планирование и реализация новых проектов FACTS, включая обоснование потребности, интеграцию возобновляемых источников, экологическую и экономическую оценку.
- Применение новых технологий в FACTS и другом оборудовании силовой электроники, включая сопряжение объектов генерации и накопления энергии с сетью.
- Реконструкция и модернизация существующих систем FACTS и другой силовой электроники; опыт обслуживания и эксплуатации.

Предпочтительная тема 1. Системы постоянного тока высокого напряжения и их применение

V4-101. *A.R.M. Tenório, K.S. Herszterg, A.C. Vinhaes, M.P. Muniz L.D. Penna* (Бразилия)

Бразильский опыт коммутации преобразовательных трансформаторов 800 кВ

V4-102. *P. Fischer de Toledo* (Бразилия), *A. Kumar* (Швеция).

Принципы работы систем ПТВН с линейной коммутацией с параллельным соединением преобразователей: передачи постоянного тока, многотерминальные передачи и сети постоянного тока

V4-103. *P. Freire, J. Kalife, P. Borin, J. Jardini* (Бразилия)

Измерение сопротивления электродов заземления система постоянного тока высокого напряжения.

B4-104. *Gomes Paulo, Martins Nelson* (Бразилия).

Энергосистема, содержащая несколько преобразователей систем ПТВН большой мощности. Управление одновременными плановыми отключениями линий для обеспечения защиты энергосистемы.

B4-105. *S. P. Ashok* (США).

Моделирование и разработка пульта управления ПТВН с передовыми ЧМИ, интерфейсными системами, аналитическими инструментами, инфраструктурой и мониторингом кибербезопасности.

B4-106. *D. Woodford* (Канада) *R. Adapa* (США)

Повышение компактности преобразовательных станций с ПН и ПТ для сокращения занимаемой площади.

B4-107. *Olivier Antoine, Pierre Henneaux, Karim Karoui* (Бельгия), *Jelle van Uden, John Moore* (Нидерланды), *Felix Rudolph, Hendrik Vennegeerts* (Германия), *Dirk Van Hertem* (Бельгия).

О плане развертывания шельфовой европейской электрической сети будущего: разработка топологий.

B4-108. *J. Rimez, K. Geens, T. Schuyvens, L. Yang* (Бельгия), *T. Priebe* (Германия)

Запуск и восстановление системы с помощью модульного многоуровневого преобразователя NEMO: практический тест в бельгийской энергосистеме.

B4-109. *S. Bødal, M. Meisingset*, (Норвегия) *C. G. A. Koreman, A. Vinoth* (Нидерланды), *H. S. Andersson* (Швеция).

Наладка преобразователей напряжения постоянного тока для эксплуатации в режиме СТАТКОМ.

B4-110. *K. Sharifabadi* (Норвегия), *I. Jahn, L. Bessegato, J. Björk, F. Hohn, S. Norrga, N. Svensson* (Швеция), *O. Despouys* (Франция).

Перспективное управление системами ПТВН с открытым кодом.

B4-111. *P. LINDBLAD* (Финляндия), *M. Aguado, M. Schudel, R. Rossetti* (Франция), *A. Van SCHIJNDEL, R. ZHANG* (Германия), *K. Geens* (Бельгия)

Европейский опыт в области надежности и готовности систем ПТВН.

B4-112. *L. Arevalo, A. Kumar* (Швеция)

Проблемы стандартизации ПТВН при проектировании внешней изоляции преобразовательных подстанций.

B4-113. *R. Macneill* (Ньюфаундленд), *R. Nickler* (Германия), *A. Feyh* (Бразилия), *H. Bjorklund* (Швеция), *E. Zuim* (Бразилия), *V. Prendergast* (Ирландия), *E. Jansson, U. Elgqvist* (Швеция).

Управление жизненным циклом систем ПТВН с точки зрения надежности и готовности.

B4-114. *Y. J. Häfner, A. Abdalrahman, S. Roy-choudhury, P. Lundberg* (Швеция)

Усовершенствованный преобразователь напряжения для электроэнергии передачи постоянного тока по воздушным линиям.

B4-115. *M. Andersson* (Китай), *Y. Jiang Häfner* (Швеция), *W. Cao* (Китай)

Системный анализ по гибриднему проекту передачи ультравысокого напряжения ± 800 кВ постоянного тока Байхэтань – Цзянсу.

B4-116. *R. Hanson C. Mchardy* (Англия), *K.Linden* (Швеция)

Планирование и внедрение вставки ПТВН в систему переменного тока с низким уровнем КЗ и большой долей ветровой генерации.

B4-117. *C.A. Plet* (Нидерланды), *M. Hoffmann* (Германия), *W. El-Khatib* (Дания), *A. Alefragkis* (Нидерланды), *M. Kurrat* (Германия).

Оптимизация нормированной стоимости энергии за счет выбора концепции и повышения эксплуатационной готовности экспортных линий ветропарков Норфолка.

B4-118. *L. Michi, E.M.Carlini, G.M. Giannuzzi, R. Zaottini, C.Pisani*

F. Allella, G. Bruno, R. Gnudi, A. Pascucci, G. Pecoraro (Италия)

Проблемы с динамической устойчивостью систем ПТВН с преобразователями напряжения при имитационном управлении передачей переменного тока на примере Гранд-Иль.

B4-119. *K. Leontaritis, M. Karystianos, K. Tsirekis, X. Shi, D. Michos, I. Mar-*

garis (Греция)

Конструктивные и функциональные аспекты новой линии передачи электроэнергии ПТВН между о. Крит и материковой энергосистемой Греции.

B4-120. *O. D. Adeuyi, M. H. Rahman, I. Cowan, B. Ponnalagan, B. Marshall, S. Marshall* (Англия)

Расширение двухтерминальной передачи постоянного тока с преобразователями напряжения до многотерминальной.

B4-121. *C.C. Davidson, J.A. Vodden, J.J. Snazell* (Англия)

Новый подход к эксплуатационному испытанию вентилей ПТВН.

B4-122. *S. Semmler, K. Dallmer-Zerbe, D. Ergin, R. Alvarez* (Германия)

Комбинированный мостовой ММП как эффективное решение для систем ПТВН с обязательной возможностью сохранения работоспособности при КЗ постоянного тока.

B4-123. *J.M.M. Moore, J. Van Uden* (Нидерланды), *O. ANTOINE, P. HENNEAUX, K. KAROUI* (Бельгия), *F. Rudolph, H. Vennegeerts* (Германия), *S. Poullain* (Франция), *L. De Vries* (Нидерланды)

О плане развертывания шельфовой европейской электрической сети будущего: анализ рентабельности топологий.

B4-124. *F. Loku, P. Ruffing, P. Tünnerhoff, R. Puffer* (Германия), *J. Rivest, N. Stankovic, C. Brayet, J. Bélanger* (Канада).

Демонстрация сопряжения многотерминальной сети постоянного тока с испытательным стендом ММП.

B4-125. *W. Gawlik, C. Alacs, J. Marchgraber, Y. Guo, A. Anta, J. Kathan, B. Weiss, K. Oberhauser, M. Lenz, M. Froschauer, A. Stimmer, M. Leonhardt* (Австрия).

Оптимизация синтетической инерции с помощью сопряженных с силовой электроникой источников мощности для поддержания устойчивости системы в будущем.

B4-126. *K French* (Ирландия), *Y Delanne* (Франция), *G Nolan* (Ирландия)

Линия ПТВН Кельтик - соединитель электросетей Ирландии и Франции

- B4-127.** *M. Mori, J. Chiba A. Miura, K. Shimada Y. Chiba D. Suzuki* (Япония)
Функции и приемо-сдаточные испытания новой линии ПТВН Хоккайдо-Хонсю
- B4-128.** *D. Vodennikov, M. Peshkov, E. Davydov, A. Antonov, N. Alekseev, A. Matinyan* (Россия)
Опыт разработки оборудования для модернизации Выборгского преобразовательного комплекса на ПС 330/400 кВ «Выборгская» ПАО «ФСК ЕЭС»
- B4-129.** *J. Kapitula, O. Suslova* (Россия)
Алгоритм выявления участка повреждения на кабельно-воздушной линии трехтерминальной передачи постоянного тока.
- B4-130.** *A. Díaz* (Испания), *G. Torresan* (Франция), *A. Cordón, L. Coronado, S. Sanz, J. Peiró, A. Hernández, J. Pérez* (Испания), *F. Xavier, C. Cardozo, S. Akkari* (Франция)
Уменьшение межсистемных колебаний мощности за счет системы регулирования линии постоянного тока между Испанией и Францией.
- B4-131.** *L. LIU, Y. ZHANG, S. SHEN, B. LIU, L. XIONG, Q. CHEN, W. KONG, Y. PU* (Китай).
Оптимизация и моделирование динамических характеристик при взаимодействии с примыкающими энергосистемами вставок ПТ с преобразователями напряжения
- B4-132.** *A Saciak, G Balzer, J Hanson* (Германия)
Метод расчета пиковых токов короткого замыкания для защиты сетей постоянного тока
- B4-133.** *J. H. Kim, N. J. Koo, J. C. Lee, H. H. Yoo, H. J. Jung* (Корея)
Проектирование и разработка вставки постоянного тока HYOSUNG 200МВт с преобразователями напряжения в системе КЕРСО
- B4-134.** *Y. M. Kim, H. S. Chai, J. R. Jung J. W. Shin, T. Y. Nam, J. C. Kim* (Корея)
Метод оценки приоритета ответственных компонентов для системы управления активами подстанции постоянного тока.

B4-135. *S.M. Kim, H.B. Park, Y.J. Kim, J.W. Koh, K.J. Kim* (Корея)

Сейсмический расчет и проверка конструкции вентиля для систем постоянного тока.

B4-136. *A. Dugar* (Индия), *G Óheidhin, A. Kumar* (Англия)

Фильтры подавления основной частоты для параллельной двухполюсной системы передачи ± 800 кВ постоянного тока мощностью 6000 МВт. Конструктивные решения

B4-137. *A. Bertinato, G. Dantas De Freitas, S. Poullain, B. Ismail* (Франция), *O. Despouys, P. Ruffing* (Германия), *D. Van Hertem* (Бельгия)

Оценка вариантов стратегии защиты для электрических сетей постоянного тока будущего

B4-138. *S. Denetiere P. Rault, H. Saad, Y. Fillion* (Франция), *K. Sharifabadi* (Норвегия), *J. H. Johansson* (Швеция), *N. Krajisnik* (Германия)

Технические решения для прогнозирования и подавления нежелательных взаимодействий двух параллельно соединенных схем постоянного тока с преобразователями напряжения для питания изолированной морской сети нефтегазового комплекса

B4-139. *M.G. Bennett, L. Crowe* (Англия). Исследование надежности систем ПТВН в мире в 2017 – 2018 г.г.

(ПТ1-1) Планирование и реализация новых проектов ПТВН, включая обоснование потребности, проектирование, интеграцию возобновляемых источников, экологическую и экономическую оценку

Доклад **B4-101** описывает результаты исследований по применению управляемых устройств коммутации и зарядных резисторов для подавления пусковых токов во время включения преобразовательных трансформаторов двухполюсных систем ПТВН 800 кВ Шингу-Эстрейту и 800 кВ Шингу-Терминал Рио.

Представлены результаты исследований включения преобразовательных трансформаторов и сделан вывод о том, что зарядные резисторы доказали свою эффективность (в системе Шингу-Терминал Рио), и что их

использование позволило бы снять эксплуатационные ограничения системы Шингу-Эстрейту.

Доклад **В4-103** посвящен методам измерения сопротивления заземляющего электрода. Метод измерения сопротивления падением напряжения для измерения сопротивления электродов СПТВН основан на измерении разности потенциалов на поверхности почвы, начиная с шины электродов в распредустройстве подстанции следуя в радиальном направлении на несколько километров от периметра электродов. Обработка этих данных позволяет построить кривую сопротивления, которая является асимптотической по отношению к сопротивлению электрода, если выносное заземление находится близко от электрода (в пределах нескольких километров), что обеспечивает среду с низким удельным сопротивлением.

Однако в случае среды с высоким удельным сопротивлением, когда выносное заземление находится слишком далеко от электрода (в пределах нескольких десятков километров), метод падения потенциала не применим из-за сложной логистики и временных затрат для измерения сопротивления. Для этой ситуации предлагается альтернативный метод, основанный на измерении потенциала между шиной нейтрали постоянного тока и локальной сетью заземления на преобразовательной подстанции.

Приведены примеры измерения сопротивления электродов с помощью обоих методов.

В докладе **В4-106** обсуждаются аспекты, которые следует учитывать при подключении преобразовательной подстанции постоянного тока с ММПН/ПТ (модульными многоуровневыми преобразователями напряжения/преобразователями тока) к подстанции переменного тока. Приводятся размеры вентильных залов преобразовательных подстанций с модульным многоуровневым преобразователем напряжения и каскадным двухуровневым преобразователем напряжения двух схем ПН с разными конфигурациями (симметричная монополярная и биполярная системы). Также приводятся размеры вентильных залов преобразователей тока на трех объектах с

разными номиналами мощности. В докладе оцениваются объемные показатели трех компактных береговых преобразовательных подстанций мощностью 1000 МВт, 1400 МВт и 1800 МВт и сравниваются компактные вентильные залы преобразовательной подстанции DolWin3, расположенной в море и преобразовательной подстанции INELFE, расположенной на суше.

Доклад **В4-108** описывает натурные испытания пуска межсистемной связи ПТВН NEMO между энергосистемами Бельгии и Великобритании мощностью 1 ГВт при условии полностью обесточенного состояния примыкающей энергосистемы. Преобразователи СПТВН соединены при помощи 140 км подводных и подземных кабелей. В докладе описываются концепции и варианты функций пуска при условии полностью обесточенного состояния примыкающей энергосистемы применительно к межсистемной линии постоянного тока. Для проверки этой функциональной возможности была выделена микросеть в пределах бельгийской энергосистемы и выполнены процедуры тестирования последовательного и совместного пуска из обесточенного состояния данной микросети. При последовательной процедуре запуска изолированная сеть создается путем последовательного подключения элементов сети при напряжении, близком к номинальному. При применении схемы совместного пуска все элементы изолированной сети соединяются вместе (по предварительно сконфигурированной схеме) и подключаются одновременно с начальным напряжением ниже номинального и контролируемой скоростью нарастания напряжения.

Также в докладе говорится о том, как решались проблемы, связанные с низкими уровнями тока КЗ и низким отношением импедансов нулевой и прямой последовательности в микросети. Авторы заключают, что метод совместной постановки под напряжение («плавный пуск») позволяет избежать затруднений, обусловленных качаниями тока и напряжения нулевой последовательности.

В докладе **В4-127** приводятся параметры новой линии ПТВН Хоккайдо-Хонсю в Японии и результаты испытаний, проведенных во время

наладки системы в конце 2018 и начале 2019 года. Новая линия Хоккайдо-Хонсю имеет номинальную мощность 300 МВт и представляет собой асимметричную монополярную систему ПТВН на основе преобразователей напряжения с возвратом тока по обратному проводу. В число особенностей и функций новой системы входят: автоматическое регулирование частоты, регулирование реактивной мощности, быстрый рестарт (при КЗ на воздушной линии передачи постоянного тока), пуск из обесточенного состояния примыкающей системы переменного тока и стабилизация в случае если примыкающая энергосистема Хоккайдо изолируется от остальной системы переменного тока. Доклад описывает испытание функции пуска из обесточенного состояния примыкающей системы переменного тока, включая конфигурацию соседней системы электропередачи и тепловых энергоблоков, которое прошло успешно. В заключении доклада говорится о том, что наладочные испытания были успешно завершены, и что система была введена в коммерческую эксплуатацию в марте 2019 года.

В докладе **В4-109** описываются результаты испытаний норвежской преобразовательной подстанции межсистемного соединения ПТВН Nordlink между энергосистемами Германии и Норвегии. Nordlink – это передача постоянного тока мощностью 1400 МВт, в которой используется технология модульных многоуровневых преобразователей напряжения. Nordlink имеет двухполюсную конфигурацию. Тестирование подсистем начато осенью 2018 года, а испытания на постановку под высокое напряжение и испытания терминалов преобразовательных подстанций были проведены в июле 2019 года. Представлены результаты первоначальной постановки под высокое напряжение, первой разблокировки, испытаний при максимальной реактивной мощности и регулирования напряжения переменного тока. Отмечается, что ввод в эксплуатацию преобразователя в режиме СТАТКОМ прошел успешно, и что возможность проведения такой пуско-наладки позволяет тестировать режимы работы без необходимости согласования с другой преобразовательной станцией и рынком электро-

энергии, обеспечивая гибкость испытательной программы.

Доклад **В4-112** рассказывает о трудностях, которые следует ожидать в связи со стандартизацией систем ПТВН в части устройства внешней изоляции преобразовательных подстанций. В докладе обсуждаются аспекты нагрузок перенапряжением, условия снаружи и во внутренних помещениях при проектировании внешней изоляции, а также влияние стандартизации на конструкцию преобразовательных подстанций ПТВН. Также авторы рассуждают о том, как внешняя изоляция может помочь снизить воздействие преобразовательных подстанций ПТВН на окружающую среду, и о важности обеспечения свободы и новаторства в некоторых областях координации изоляции и проектирования внешней изоляции подстанций ПТВН.

В докладе **В4-115** представлены системные исследования, проведенные в отношении нового гибридного объекта постоянного тока ультравысокого напряжения (УПТВН) ± 800 кВ Байхэтань – Цзянсу, который должен будет передавать 8 ГВт мощности от Байхэтаньской ГЭС к центру питания провинции Цзянсу на восточном побережье Китая. Для этого проекта выбрана новая гибридная топология УПТВН, которая были использована для исследований, проведенных главным образом в целях проверки управления и распределения энергии в различных преобразователях, динамических характеристик системы при поочередном пуске преобразователей напряжения во время работы преобразователей тока, аварийного отключения ПН в случае КЗ на шине преобразователя, сохранения работоспособности при КЗ в цепях переменного и постоянного тока. Схема выпрямительной преобразовательной подстанции содержит преобразователь тока, схема приемной преобразовательной подстанций состоит из преобразователя тока, соединенного последовательно с тремя параллельными преобразователями напряжения.

В докладе **В4-116** описывается планирование и основные характеристики пятитерминальной ППТВН Кейтнесс-Морай в северной Шотлан-

дии. Кабельная СПТВН реализована с применением преобразователей напряжения по симметричной монополярной схеме. Она предназначена для связи энергосистем островов и материковой части, а также для передачи электроэнергии с ветроэлектростанций, расположенных в открытом море.

В энергосистемах Европы и Северной Америки существует потребность в новых коридорах передачи электроэнергии для присоединения возобновляемых источников энергии. Однако процесс лицензирования для получения разрешения на строительство новых воздушных линий является сложным, в отдельных случаях получить разрешение на строительство невозможно. При этом альтернативные схемы с применением кабельных передач ПТВН могут обеспечить усиление электросети при сокращении сроков планирования.

На севере Шотландии компания Scottish Hydro Electric Transmission (SHE Transmission) нуждалась в усилении системы передачи в Кейтнессе, чтобы обеспечить экспорт из Кейтнесса возрастающих объемов электроэнергии от ветровых электростанций. Рассматривались альтернативы как наземной воздушной линии переменного тока, так и подводной линии электропередачи постоянного тока высокого напряжения. В результате анализа вариантов с учетом воздействия на окружающую среду, рентабельности и пропускной способности системы был рекомендован вариант СПТВН. Система была введена в эксплуатацию в конце 2018 года.

По условиям уровня мощности короткого замыкания энергосистемы Кейтнесс СПТ ВН Кейтнесс-Морей была реализована с применением преобразователей напряжения. Помимо основной возможности передачи электроэнергии, СПТВН обеспечивает поддержание напряжения в замыкающей энергосистеме, возможность запуска при отсутствии других генераторов мощности в энергосистеме и работу в автономном режиме. Технология ПН также дает возможность в перспективе расширить передачу и обеспечить присоединение энергосистемы Шетландских островов.

В докладе **В4-118** представлена методика исследования работы и выбора оптимальных параметров гибридного режима управления (ГРУ) с точки зрения динамической стабильности для межсистемного соединения постоянного тока Пьоссаско – Гранд-Иль (Италия-Франция). Основная идея ГРУ состоит в том, чтобы управлять соединением ППТ, как если бы это была линия передачи переменного тока, чтобы активная мощность ППТ была бы функцией фазового угла в параллельной линии переменного тока. В соответствии с этой стратегией управления не требуется прямая диспетчеризация заданного значения активной мощности оператором, и, следовательно, работа операторов системы в диспетчерской упрощается.

Описанный принцип регулирования реализован на модели энергосистемы, построенной с помощью Digsilent Power Factory и Matlab. Предложенная методика может применяться к любой системе ПТВН, оснащенной функцией ГРУ.

Доклад **В4-119** межсистемное соединение между греческой Аттикой и островом Крит через двухполюсную линию ПТВН мощностью 2x500 МВт, которая является вторым этапом строительства. Первым этапом проекта станет двухцепная кабельная линия электропередачи переменного тока мощностью 2x200 МВА. Проектируемая ПТВН будет построена по биполярной схеме с возвратом тока через два электрода, проложенным вдоль побережья. Преобразовательные подстанции ПТВН будут построены с использованием технологии ММПН с полумостовыми субмодулями и будут обладать способностью пуска энергосистемы острова Крит из обесточенного состояния. Преобразовательные подстанции будут соединены кабелями постоянного тока с вязкой пропиткой длиной 380 км. В докладе описаны задачи, которые необходимо решить для того, чтобы обеспечить работу энергосистемы острова Крит при отключенной кабельной линии переменного тока и местных энергоблоков, т.е. асинхронную работу слабой энергосистемы, и обеспечить плавный переход между различными режимами. Запланировано расширение системы ПТВН до мно-

готерминальной линии постоянного тока в районе юго-восточной части Средиземного моря, включая добавление выключателей постоянного тока.

Доклад **В4-121** представляет новый подход к электрическим типовым испытаниям вентилях ПТВН, в том числе к «эксплуатационным» типовым испытаниям. Эти испытания требуют поочередной подачи на испытуемый вентиль высокого напряжения и тока в течение продолжительного времени. В докладе описывается новый испытательный стенд, построенный в Стаффорде, Великобритания, который использует четыре последовательные цепи полномостовых субмодулей, соединенных параллельно, которые по сути образуют «программируемый генератор сигналов заданной формы». В докладе описана работа испытательного стенда в режимах преобразователя тока (ПТ) и ПН. В заключении указано, что новый объект является универсальным и дает возможность испытывать вентили ПТ и ПН.

В докладе **В4-126** описываются цели, преимущества и подход к разработке проекта Кельтской ЛЭП – новой перспективной системы постоянного тока мощностью 700 МВт, соединяющей системы электропередачи Ирландии и Франции. Системы будут соединены подводным кабелем постоянного тока длиной 600 км и подземным кабелем протяженностью 75 км. В системе будет применена технология ПН в симметричной однополюсной конфигурации. В докладе описывается общее обоснование проекта, которое включает в себя улучшение рыночной интеграции, повышение надежности поставок и расширение использования и развития возобновляемых источников энергии в Ирландии за счет возможности экспорта возобновляемой энергии во Францию и в остальную часть Европы. Описан процесс выбора точек размещения преобразовательных подстанций и результаты камерального исследования морского маршрута и морских исследований. В заключении говорится о том, что были продемонстрированы значительные преимущества соединения систем электропередачи Ирландии и Франции через передачу постоянного тока, и что проект должен

быть завершен в 2026 году.

В докладе **В4-132** предлагается простой метод вычислений для оценки ожидаемого максимального тока короткого замыкания в сложнзамкнутых сетях ПТВН на этапе планирования, когда объем доступных данных о сетях ограничен. Основу метода составляют эквивалентная схема и выведение формул для расчета элементов эквивалентной схемы непосредственно из базовых данных преобразователей и линий. Пригодность предложенного метода расчета подтверждается результатами PSCAD/EMTDC на сложнзамкнутой испытательной сети ПТВН.

Доклад **В4-133** рассказывает о проектировании межсистемной вставки постоянного тока мощностью 200 МВт, напряжением ± 120 кВ на базе преобразователей напряжения, которая будет введена в эксплуатацию в 2023 году для снижения токов КЗ сети КЕРСО (корейская электроэнергетическая корпорация). Описаны испытания системы регулирования вставки, проведенные для проверки параметров системы и разработанных алгоритмов управления, электрические испытания вентиля.

В докладе **В4-135** представлена вентильная схема системы ПТВН 200 МВт, разработанная с учетом сейсмических требований корейского оборудования передачи и распределения и проверенная с помощью испытаний и анализа по методу конечных элементов, и предложены два метода повышения сейсмической стойкости за счет конструктивных решений. Один из методов заключается в установке раскосов для распределения сейсмической нагрузки опорного изолятора, поддерживающего конструкцию вентиля, а другой – в увеличении жесткости в горизонтальном направлении путем добавления изоляционной балки для снижения сейсмической нагрузки при монтаже submodule вентиля.

(ПТ1-2) Применение новых технологий, включая кибербезопасность и средства контроля для решения новых проблем в сетях, сеть постоянного тока, многотерминальные системы ПТВН, гибридные системы и автоматические выключатели

В докладе **В4-102** рассматриваются основные принципы, используемые в системах СПТВН на базе преобразователей тока с параллельными преобразователями. Изложены основные принципы работы, включая принципы управления, переходные процессы, распределение уставок тока при наличии инвертора небольшой мощности.

Описывается нормальное параллельное подключение и отключение преобразователей и защитное параллельное отключение. Даны примеры применения принципов параллельного подключения и отключения в системах ПТВН с преобразователями тока.

- Многотерминальная схема передачи ПТВН северо-восточной Агры (NEA800), номинальной мощностью 6000 МВт, напряжением ± 800 кВ для передачи энергии от ГЭС в северо-восточной части Индии в регион Агра, на расстояние свыше 1700 км.

- Система передачи ПТВН Итайпу, которая состоит из двух двухполюсных линий номинальной мощностью 3150 МВт каждая, на напряжением ± 600 кВ.

- Система передачи ПТВН Рио-Мадейра, которая состоит из двух двухполюсных линий номинальной мощностью 3150 МВт каждая, напряжением ± 600 кВ.

Во вводной части доклада **В4-104** приведены определения основных коэффициентов, характеризующих взаимодействие постоянного тока и примыкающих к ним систем переменного тока, включая отношение короткого замыкания (SCR), эффективное отношение короткого замыкания (ESCR), коэффициенты взаимного влияния инверторов в системах с двумя и более инверторными преобразователями (MIF, MIF x Pdcj/Pdci) (мультиинверторные системы), и отношение КЗ в схеме, содержащей два и более инверторных преобразователя (MISCR). Затем обсуждается системная процедура для определения недельного графика технического обслуживания оборудования для безопасного управления многочисленными запросами на отключение ЛЭП со стороны передающих компаний. Приведены

числовые значения коэффициентов взаимодействия одно- и мультиинверторных систем переменного и постоянного тока для двух объединенных энергосистем Бразилии. После этого проводится сравнение коэффициентов взаимодействия систем переменного и постоянного тока на четырех шинах преобразователей в режиме (N-1). В заключении представлена чувствительность коэффициентов взаимодействия систем переменного и постоянного тока к повышению инерции в юго-восточном регионе энергосистемы.

В докладе **В4-105** рассматриваются вопросы кибербезопасности на примере многотерминальной вставки постоянного тока на северо-востоке США. Приводятся примеры применения аппаратного и программного обеспечения для систем диспетчерских пунктов ПТВН с точки зрения заказчика. В докладе рассматриваются успешные технологии сопряжения систем управления ПТВН для передачи данных о событиях и показаниях с другими многотерминальными линиями на примере последовательных телекоммуникационных линий и использования последовательных IP-соединений для передачи данных с корректировкой интервалов опроса.

В докладе **В4-110** обсуждается возможность управления системами ПТВН с открытым кодом и соответствующие технические и нетехнические аспекты такого подхода. К техническим аспектам относятся реализация, преимущества, технические улучшения, к нетехническим – точка зрения отрасли, заказчика, исследователей, лицензирование, оформление патентов, гарантии, кибербезопасность, критическая инфраструктура, стандарты, нормативная и финансовая база. В докладе отмечается, что подход с открытым исходным кодом может быть полезен для решения текущих и будущих проблем, связанных с управлением, как для двухтерминальных так и многотерминальных ПТВН, а также для сетей ПТВН, системы управления преобразователями которых разрабатывались разными поставщиками.

В докладе **В4-114** представлена усовершенствованная система ПТВН на базе преобразователя напряжения (ПН), в которой преобразователь со-

стоит из смешанных полумостовых и полномостовых ячеек, и приведено детальное сравнение систем ПТВН на базе преобразователей тока и улучшенной системы с ПН ПТВН в части сохранения работоспособности при КЗ с демонстрацией полученных характеристик. Обозначены проблемы, связанные с улучшенной системой ПН ПТВН, и предложено их решение. Авторы заключают, что улучшенные системы ПН ПТВН представляют собой надежное и экономически выгодное решение для передачи электроэнергии постоянным током по воздушным ЛЭП.

В докладе **В4-120** разбирается техническая целесообразность расширения существующих схем ПТВН, дается оценка характеристик имитационного моделирования с применением моделей ПН различных поставщиков, уточняются требования к испытаниям и демонстрации мультивендорной системы ПТВН, а также обозначаются риски, которые необходимо контролировать при реализации проектов мультивендорных систем. Излагаются требования к проектированию, испытанию и демонстрации, связанные с разработкой мультивендорных многотерминальных систем ПТВН с преобразователями напряжения.

В докладе **В4-138** описываются технические проблемы, возникшие при реализации второй очереди проекта Johan Sverdrup, который представляет собой мультивендорную систему ПТВН, питающую изолированную морскую нефтегазовую электросеть, в том числе – анализ взаимодействий между двумя преобразователями напряжения, реализованными на первом и втором этапах строительства. Приведено описание основных функций системы регулирования СПТВН, приводятся результаты моделирования для иллюстрации того, как можно координировать уставки систем ПТВН для безопасной и надежной работы.

В докладе **В4-122** представлен обзор комбинированного (полу- и полномостового) ММП для систем ПТВН с воздушными линиями электропередачи для сохранения работоспособности при КЗ постоянного тока, перечислены основные функции систем ПТВН по обеспечению надежно-

сти сетей, рассмотрены три главных проектных критерия для эксплуатации в установившемся режиме, сохранения работоспособности при КЗ переменного и постоянного тока, приведены характеристики комбинированного мостового ММП и обсуждаются вопросы проектирования и управления. Также в работе представлены основные аспекты проектирования и сравнения стоимости комбинированных мостовых ММП.

В докладе **В4-107** представлены методика и основные результаты анализа разработки будущих топологий морских сетей в Северном море для проекта PROMOTioN на период 2020-2050 с целью сбора данных для составления плана развертывания данного объекта. Методика, используемая в данном исследовании, включает в себя скрининг Северного моря для определения наиболее подходящих мест установки ветровых электростанций, использование специального алгоритма оптимизации и моделирования рынка электроэнергетики стран данного региона. Техническая жизнеспособность предложенных топологий и влияние на сеть переменного тока также были продемонстрированы и проанализированы путем моделирования различных стратегий защиты морской сети.

В докладе **В4-123** приводится оценка инвестиций, затрат и потенциальных (общественных) выгод каждой из конструкторских конфигураций, разработанных в упомянутой в нем статье, с целью выдачи рекомендаций по плану развития будущей сложнзамкнутой европейской морской сети ПТВН в Северном море. Была пересмотрена и доработана методика ENTSO-E по построению модели для анализа экономической эффективности с помощью модульного подхода, проведено имитационное моделирование трех основных вариантов конфигурации сети, и соответствующие результаты количественной оценки затрат и выгод по концептуальным вариантам обычного ведения дел (BAU), национального распределения (NAT), европейского распределения (EUR) и европейской централизации (HUB) представлены в докладе.

В докладе **В4-124** рассматривается аппаратный комплекс для испы-

тания сети постоянного тока с ПН в лаборатории Ахенского университета RWTH в рамках проекта «Горизонт-2020». Исследуемая 4-терминальная сеть постоянного тока с двумя ветроэлектростанциями была представлена в виде полномасштабной модели и испытательного стенда лабораторного масштаба для сравнения результатов и оценки характеристик и эффективности управления соответствующих систем.

В докладе **В4-125** рассматривается вопрос о том, какое влияние оказывает увеличение числа источников мощности, сопряженных с силовой электроникой (PEIPS), на стабильность частоты энергосистемы при создании синтетической инерции этими PEIPS, анализируются аспекты создания синтетической инерции (СИ) PEIPS при изменении выдаваемой ими мощности пропорционально СИЧ энергосистемы, проводится анализ чувствительности воздействия синтетической инерции на графики частоты и мощности и предлагается несколько вариантов зонально-селективной схемы управления.

В докладе **В4-129** описывается алгоритм для линий постоянного тока, имеющих в своем составе как воздушные линии электропередачи, так и кабельные, который определяет присутствие КЗ в кабельной либо воздушной секции линии постоянного тока. Приводятся результаты имитационного моделирования для демонстрации работы этого алгоритма.

В докладе **В4-130** описывается процесс и результаты исследования реакции ППТ INELFE между Францией и Испанией на межсистемные колебания мощности, происходившие в системе континентальной Европы в конце 2016 года. Рассказывается об исследованиях, проведенных для определения требуемых изменений в управлении ППТ с целью улучшения эффективности и проверки отсутствия негативных последствий для безопасности системы, а также о том, как эти изменения внедрялись и утверждались на конкретных объектах.

В докладе **В4-131** анализируются эксплуатационные риски электросетей, к которым подключены ПН ПТВН, рассматривается оптимизиро-

ванная схема вставки постоянного тока на базе ПН ± 420 кВ «Ю-Э» для работы в распределительной сети, предлагаются два метода оптимизации (подавления) резонанса и обеспечения устойчивой работы в изолированном режиме, а также строится платформа моделирования с обратной связью на с применением RTDS для испытания системы регулирования.

В докладе **В4-136** обсуждается влияние работы параллельных воздушных ЛЭП 765 кВ и 400 кВ переменного тока на схему ПТВН Чампа-Курукшетра в Индии. Параллельные линии моделируются вместе с ЛЭП ± 800 кВ постоянного тока и преобразователями ПТВН для оценки воздействия и расчета фильтров блокировки основной частоты, устанавливаемых на стороне постоянного тока. Моделирование используется для демонстрации эффекта блокирующего фильтра по снижению постоянной составляющей тока в преобразовательных трансформаторах.

В докладе **В4-137** предлагается набор из трех ключевых показателей эффективности (КПЭ): эффективность, отказы и экономика, который демонстрирует то, как четыре стратегии защиты помогают достигать ключевых целей, и представляется методика для сравнения и оценки стратегий защиты сетей ПТВН на основании множественных критериев с использованием этих КПЭ. КПЭ эффективности дает количественное определение влиянию стратегии защиты на время устранения КЗ и процесс восстановления электроснабжения; КПЭ отказов оценивает характеристики, относящиеся к нарушению стратегии защиты; экономический КПЭ оценивает капитальные и эксплуатационные затраты на ту или иную стратегию. Рассматривается испытательный стенд многотерминальной сети постоянного тока (МТПТ) высокого напряжения для иллюстрации методики оценки стратегии защиты и сравнения стратегий защиты, предложенных в рамках проекта ЕС «PROMOTioN» (развитие многотерминальных систем передачи постоянного тока высокого напряжения на морском шельфе).

(ПТ1-3) Реконструкция и модернизация существующих систем ПТВН, опыт обслуживания и эксплуатации преобразовательных

станций, включая преобразователи морского базирования, и их последствия для преобразовательного оборудования в результате перевода цепей переменного тока на постоянный ток

В докладе **В4-111** описываются наработки и результаты, полученные рабочей группой Европейского сообщества сетевых системных операторов (ENTSO-E), созданной для поиска способов повышения надежности и эксплуатационной готовности систем ПТВН. Основное внимание в докладе уделяется преобразовательным подстанциям. Доклад начинается с перечисления ключевых показателей надежности и готовности систем ПТВН. Приводится анализ статистических данных СИГРЭ и других источников об отказах элементов преобразовательных подстанций. Описаны проблемы, с которыми сталкиваются члены ENTSO-E во время предварительного планирования, составления технических заданий, проведения тендеров и технического проектирования, приведены несколько примеров, как были повышены надежность и готовность преобразовательных подстанций. Рассмотрен ряд ключевых технических направлений, в том числе: шунтирование сглаживающих реакторов, схем коммутации постоянного тока, мониторинга помещения вентиля в реальном времени, борьба с загрязнениями в сглаживающем реакторе, стратегии сокращения времени замены преобразовательных трансформаторов, аспекты проектирования систем охлаждения вентиля и других вспомогательных систем. Обсуждаются системные вопросы, а также проблемы, касающиеся эксплуатации и технического обслуживания. В заключение авторы говорят о том, что надежности следует уделять большое внимание начиная с первых этапах реализации проектов ПТВН.

В докладе **В4-113** предложено рассмотреть управление жизненным циклом системы ПТВН с точки зрения промышленного сервиса. В начале доклада приводится краткое описание управления жизненным циклом и объяснение «экосистемы сервиса», которая включает производителей, операторов и подрядчиков, а затем приводятся примеры проблем, с кото-

рыми сталкиваются пользователи систем ПТВН. Вопросы повышения долговременной надежности, готовности и устойчивости рассматриваются на таких примерах, как управление климатическими условиями, минимизация «окон отключения» и повышение физической и кибербезопасности. Рассмотрены также методы профилактического обслуживания, использование систем сбора данных (регистрация данных, управление активами, создание цифрового двойника), улучшение анализа причин отказов, улучшение сотрудничества, учет затрат в связи с неготовностью оборудования и модели потенциальных договоров подряда на сервисное обслуживание.

В докладе **В4-117** дается ряд предположений при оценке среднего времени наработки на отказ кабелей ПТВН в изоляции из сшитого полиэтилена на основании информации, находящейся в открытом доступе, и в качестве примера приводится ветропарк в британском Норфолке. Предлагается использовать непереданную энергию в качестве одного из показателей при выборе той или иной концепции устройства каналов экспорта ПТВН для расчета времени простоев, доступности энергии и ожидаемого объема недопоставки энергии по каждому из вариантов таких концепций. Обсуждается метод оценки готовности ВЭС, подключенных к сети ПТВН, на основе общедоступных данных и с учетом специфики реальных проектов.

В докладе **В4-128** описывается конфигурация и эксплуатация Выборгской станции – преобразовательного комплекса системы постоянного тока, который соединяет энергосети России и Финляндии. Система была введена в эксплуатацию в 1981 году, вентили преобразователя уже достигли конца срока службы и требуют замены. В докладе рассказывается о процессе и результатах разработки и изготовления новых вентилях преобразователя, в том числе об их испытаниях, установке и вводу в эксплуатацию.

В докладе **В4-134** проводится FMEA (анализ видов и последствий отказов) и FTA (анализ дерева ошибок) для системы ПН ПТВН с целью

определить ключевое оборудование и найти причины отказов, оценивается важность компонентов подстанции ПН ПТВН, обсуждается разработка датчиков и приоритетность технического обслуживания объектов, проводится анализ чувствительности ФТА при определенных сценариях. Цель данного исследования – определить приоритетность подсистем с помощью технологии превентивной диагностики, которая может быть применена в зависимости от важности подсистемы в станции ПТВН.

Консультативная группа СИГРЭ В4.04 ежегодно собирает данные касательно надежности работы систем ПТВН во всем мире. Доклад **В4-139** представляет результаты анализа надежности эксплуатации систем ПТВН в 2017 и 2018 годах. Отчет основан на данных по 49 системам с преобразователями тока и трем системам с ПН за 2017 год и 50 системам с преобразователями тока и четырем системам с ПН за 2018 год.

Предпочтительная тема 2. Системы постоянного тока и другие системы силовой электроники (СЭ) для распределительных систем

В4-201. *J. Lian, D. Zhang, Z. Shao, Y. Xie, W. Wang, Z. Zhang* (Китай)

Схема и способ управления для гибкой распределительной электрической сети постоянного тока Ханчжоу

В4-202. *J. Yang, Y. Jia, X. Xiao, S. Gao, J. Wang* (Китай).

Новый метод определения коротких замыканий на линиях постоянного тока в распределительной энергосистеме.

В4-203. *C. Han, J. Lee, G. Jang, D. Rho, H. Lee, S. Jung, J. Kim* (Корея).

Разработка многотерминальной линии постоянного тока в распределительной сети

В4-204. *P. Maibach, C. Häderli, A. Schlachter* (Швейцария), *J. Berry* (Англия)

Гибкая система распределения энергии Western Power: изучение на конкретном примере.

(ПТ2-1) Применение постоянного тока в распределительных си-

стемах

В докладе **В4-201** описывается проект распределительной сети постоянного тока, которая была разработана и установлена в городе Ханчжоу (Китай). С целью минимизации площади, занимаемой оборудованием, и снижения затрат на объекте реализовано бестрансформаторное подключение преобразователей. Описаны примененные технические решения для ограничения и отключения токов короткого замыкания в сети переменного и постоянного тока, а также для снижения воздействий на сеть переменного тока во время пуска трансформатора постоянного тока. В докладе приведена схема гибридного выключателя постоянного тока с IGBT – транзисторами и мостовой схемой с диодами.

Доклад **В4-203** посвящен методам управления многотерминальной системой постоянного тока на базе преобразователей напряжения, используемой для связи распределительных сетей переменного тока, содержащих возобновляемые источники электроэнергии.

Управление активной и реактивной мощностями с помощью ПН делает работу распределительной сети более гибкой и эффективной. Для систем постоянного тока в распределительных сетях используется централизованное управление, для осуществления которого требуется информация об объеме генерации и потребления в виде данных в реальном времени или прогнозируемых данных. Такая структура управления требует дополнительных затрат на удаленный мониторинг и зависит от полученных данных. В докладе предлагается децентрализованный способ управления сетью постоянного тока для преодоления этих недостатков. Проводится анализ потокораспределения для всех возможных сценариев генерации и потребления в сети и строятся кривые отклика нагрузки в системе. Применяя полученную кривую отклика, система регулирования преобразователя напряжения рассчитывает величину нагрузки в подключенной сети переменного тока, используя информацию, полученной из точки общего присоединения. Кроме того, формируется кривая отклика о сумме общих по-

терь в линии в сети в соответствии с инжектируемой мощностью от преобразователя напряжения в определенный момент времени. С помощью предварительно определенных кривых отклика определяется оптимальная уставка мощности преобразователя напряжения, чтобы уменьшить разницу в нагрузке между каждой сетью и минимизировать сумму общих потерь в линиях. Данный процесс управления выполняется только с использованием информации в точке общего присоединения и не требует данных в реальном времени о генерации и потреблении. Для проверки предложенного метода результаты моделирования сравниваются с централизованным методом управления с использованием модифицированных испытательных сетей стандарта IEEE-33.

В докладе **В4-204** представлено исследование гибкой системы распределения (ГСР), соединяющей части сети 33 кВ компании «Western Power Distribution» на юго-западе Великобритании. Преобразователь системы состоит из двух трехфазных преобразовательных блоков, соединенных по двенадцатипульсной схеме. В преобразователе используются трехуровневые фазные модули для выработки переменного напряжения от источника постоянного тока. Два фазных модуля собраны вместе в трехуровневый двухфазный силовой электронный блок. Запираемые тиристоры с интегрированным блоком управления IGCT используются в качестве полупроводниковых переключателей.

Преобразователи подключены к сети через трансформаторы, на стороне переменного тока установлены фильтры 28 гармоника. Трансформаторы установлены в одном баке для экономии места и усилий по снижению уровня шума. В докладе описываются особенности и функциональные возможности ГСР, а также результаты пуско-наладочных работ и приемочных испытаний на объекте для демонстрации требуемых характеристик.

(ПТ2-2) Применение силовой электроники на распределительных объектах, экономические аспекты и вопросы надежности

Для данной рубрики докладов представлено не было.

(ПТ2-3) Новые концепции и конструктивные типы оборудования

В докладе **В4-202** предлагается новый метод заземления для распределительной системы ± 10 кВ постоянного тока, при котором точка нейтрали трансформатора связи на стороне вентили заземляется через сопротивление, и представлена новая стратегия обнаружения и защиты от КЗ, включая коэффициент адаптивного усиления для системы распределения постоянного тока среднего напряжения.

Предпочтительная тема 3. Устройства FACTS и другие системы силовой электроники для передачи электроэнергии

В4-301. *B. Bojorquez, E. Santos Lopez, M. Longoria, S. Babaei* (США)

Преимущества модульных статических синхронных последовательных компенсаторов по сравнению с традиционными устройствами последовательной компенсации.

В4-302. *Manfredo Lima* (Бразилия)

Актуальные применения системы FACTS в энергосистеме Chesf: Аспекты технологических разработок.

В4-303. *R. A. Rivas, A. Owens, F. Wang, E. Arnsten* (Швеция), *R. Rui, C. Foote* (Шотландия, Англия)

Phoenix: Первая в мире гибридная система синхронных конденсаторов

В4-304. *T. Soong, L. Bessegato, L. Meng, T. Wu, J.-P. Hasler,*

G. Ingeström, And J. Kheir (Швеция).

Эффективность и гибкость устройств СТАТКОМ с накопителями энергии в малоинерционных сетях

В4-306. *R Gupta, T R Nudell, M Osborne, A Hiorns, D Stamatiadis, D Schweer,*

J Yu (Англия)

Оценка технологии на базе модульных преобразователей напряжения в британской системе передачи электроэнергии с помощью анализа электромагнитных процессов (ЭМП)

B4-307. *E. Fombang B. Buterbaugh* (США), *T. Tatsumi, A. Matsuda, S. Ogusa, M. Takeda* (Япония)

Разработка функции активной фильтрации для СТАТКОМ

B4-309. *C. Winter, A. Kienitz* (США), *J.H, U B. Bisewski* (Канада), *S. Schneider, B. Niemann* (Германия)

СТАТКОМ NSSS - оптимальное решение для динамического регулирования реактивной мощности в слабой сети

B4-310. *Jeetesh Kumar, Sangita Sarkar, A. Sensarma, R.K. Tyagi* (Индия)

Анализ и опыт эксплуатации СТАТКОМ для новой магистральной электросети с подключенной к ней электросетью на базе возобновляемых источников электроэнергии

B4-311. *J. Hu, B. Bisewski* (Канада), *J. Carrara* (США)

СТК Аскутни - проектирование, испытание и ввод в эксплуатацию

(ПТЗ-1) Планирование и реализация новых проектов FACTS, включая обоснование потребности, интеграцию возобновляемых источников, экологическую и экономическую оценку

В докладе **B4-302** описывается проектирование, анализ и ввод в эксплуатацию СКРМ Тауа – статический компенсатор реактивной мощности от - 45 МВАр до 90 МВАр, установленный в системе передачи электроэнергии бразильской компании Chesf. Приводится обоснование для выбора СКРМ вместо ПН СТАТКОМ, названы ключевые компоненты и особенности реализованной схемы, в том числе схемы автоматического расчета и управления коэффициентом усиления, последовательный блокирующий реактор для подавления гармоник, и схема управления для координации работы с соседним СКРМ. Эффективность СКРМ при КЗ переменного тока демонстрируется с помощью программы моделирования переходных про-

цессов (АТР) и RTDS. В заключении предлагается гибридный вариант СКРМ с многоуровневым ПН на базе СТАТКОМ, который устанавливается параллельно с конденсаторами или реакторами с тиристорной коммутацией.

В докладе **В4-309** описывает внедрение технологии СТАТКОМ для решения проблем, связанных с ослаблением Северного берегового кольца, расположенного в системе электропередачи на северо-востоке Миннесоты. Особую озабоченность вызывала потеря динамической поддержки реактивной мощности из-за закрытия существующих генераторов, работающих на угле, или их вывода из режима обеспечения основной энергетической нагрузки. Были рассмотрены обе технологии: СКРМ и СТАТКОМ. В итоге был выбран СТАТКОМ, так как эта технология оказалась единственной предложенной участниками тендера. В докладе описывается несколько проблем, обнаруженных в системе на этапе проектирования и инжиниринга, включая переходные перенапряжения, гармонический резонанс, пусковые токи трансформаторов и пуск больших электродвигателей, и рассказывается о том, как они были решены с помощью СТАТКОМ,

Доклад **В4-310** описывает внедрение СТАТКОМов в индийской сети электропередачи. Приведены причины выбора СТАТКОМов вместо устройств FACTS, таких как СКРМ, в том числе: сравнительно лучшие характеристики реактивной мощности при низких напряжениях, более быстрая реакция, меньшие монтажные размеры и модульная конструкция СТАТКОМов. Описаны проблемы, связанные с увеличением числа установок на базе возобновляемой энергии, и то, как СТАТКОМы позволяют с этими проблемами справиться. В заключении приведено несколько примеров характеристик СТАТКОМов в индийской передающей сети, а также наработки, полученные из эксплуатационного опыта.

В докладе **В4-311** описываются работы по проектированию, испытанию и вводу в эксплуатацию СКРМ -25 / +50 МВАр, установленного на подстанции Аскутни в Вермонте (США) в конце 2018 года. Главной зада-

чей СКРМ является поддержание напряжения при определенных авариях, а также регулирование напряжения на шине 115 кВ переменного тока и ограничение перенапряжения в режимах малой нагрузки. Описаны ключевые элементы конструкции, в том числе использование автоматических выключателей на батареях фильтров переменного тока, добавление батареи заземляющих трансформаторов и дополнительных режимов работы. В проекте предусмотрена возможность расширения площадки в будущем. Представлены результаты оценки характеристик в ходе испытаний при вводе в эксплуатацию, включая характеристики при включении трансформатора, ступенчатые реакции, проверку характеристик UQ/UI , испытания на нагрев, гармонические характеристики, потери и акустический шум. В частности, потребовались меры против акустического шума для соблюдения выдвинутых требований.

В докладе **В4-312** описаны средства первичного регулирования качаний и подавления субсинхронного резонанса, которые представляют известный интерес в южнокорейской энергосистеме, затронуты вопросы конструирования компонентов последовательных компенсаторов с тиристорным управлением (ПКТУ) и управления ими, а также приведены результаты исследований энергосистемы и испытаний аппаратных средств, проведенных с целью анализа работы ПКТУ и подтверждения преимуществ наличия их в сети. Делается вывод о том, что ПКТУ дает возможность улучшить устойчивость энергосистемы и подавлять субсинхронный резонанс.

(ПТЗ-2) Применение новых технологий в FACTS и другом оборудовании силовой электроники, включая сопряжение объектов генерации и накопления энергии с сетью

В докладе **В4-301** описываются эксплуатационные и экономические достоинства и преимущества модульных статических синхронных после-

довательных компенсаторов (M-SSSC) перед последовательными конденсаторами с нерегулируемой емкостью (FSC) для повышения передаваемой мощности линий в рамках моделирования PSCAD на основе сопоставительной модели, разработанной экспертами IEEE, с целью продемонстрировать эффективность M-SSSC при подавлении субсинхронного резонанса (ССР). Авторы доклада рекомендуют предприятиям ранжировать приоритеты оценок использования M-SSSC для последовательной компенсации в целях совершенствования передачи электроэнергии.

В докладе **В4-303** описывается проект Phoenix – схема гибридного синхронного компенсатора, сочетающая в себе синхронный конденсатор с устройствами СТАТКОМ, которая будет смонтирована на демонстрационной площадке близ поселка Нейлстон в Шотландии. СТАТКОМы соединены параллельно с синхронным конденсатором через трехобмоточный трансформатор, подсоединенный к сети переменного тока. Синхронный конденсатор обеспечивает поддержку инерции, поддержку при перегрузках и подпитку токами КЗ, тогда как СТАТКОМ обеспечивает более эффективную динамическую поддержку напряжения, подавление перенапряжений, демпфирование колебаний мощности и управление качеством электроэнергии. В докладе описаны ключевые элементы конструкции, основные характеристики и режимы управления, а также представлены результаты заводских системных испытаний и динамических эксплуатационных испытаний, проведенных в конце 2019 года. Ввод объекта в эксплуатацию ожидается во втором квартале 2020 года.

Доклад **В4-304** рассказывает об итогах исследования статических синхронных компенсаторов с накопителями энергии (Э-СТАТКОМ) для решения проблем с низкой инерцией путем ограничения скорости изменения частоты и снижения колебаний частоты при различных событиях в сети. Предметом исследования стала система Э-СТАТКОМ, в состав которой входят преобразователь напряжения и устройством накопления и хранения энергии, с управлением на основании принципов формирования сети. В

докладе представлены результаты моделирования Э-СТАТКОМов и сравнение полученных показателей с характеристиками синхронных генераторов аналогичного типоразмера. Делается вывод о том, что Э-СТАТКОМы обеспечивают более высокую гибкость при отклонениях частоты в сети, служат лучшим источником инерции, нежели аналог на базе синхронного генератора.

В докладе **В4-306** описано устройство для регулирования перетока мощности с использованием последовательно подключенных модульных многоуровневых преобразователей напряжения, которое может обеспечить более гибкую и динамическую функциональность, чем традиционная технология регулирования перетоков мощности. Приведены результаты расчетов переходных процессов при коротких замыканиях в энергосистеме, где расположено данное устройство. Также приведены результаты исследования влияния существующих гармоник на работу устройства, исследования работы защит устройства.

В докладе **В4-307** описывается проектирование функции активной фильтрации энергосистемы путем внедрения функции активной фильтрации в реальном СТАТКОМе, который был поставлен и установлен в энергосистеме США в 2019 году. Системные характеристики активной фильтрующей функции СТАТКОМа были проверены испытаниями на цифровой модели на заводе-производителе и пусконаладочными испытаниями на месте установки устройства.

(ПТЗ-3) Реконструкция и модернизация существующих систем FACTS и другой силовой электроники; опыт обслуживания и эксплуатации

Для данной рубрики докладов представлено не было.