



Некоммерческое партнерство «Российский национальный комитет Международного Совета по большим электрическим системам высокого напряжения» (РНК СИГРЭ)

109074, Россия, г. Москва, Китайгородский проезд, дом 7, стр.3. ОГРН 1037704033817.
ИНН 7704266666 / КПП 770501001. Тел.: +7 (495) 627-85-70. E-mail: cigre@cigre.ru

ОТЧЕТ

об участии в 45-й Сессии CIGRE и работе Исследовательского Комитета В4 «Системы постоянного тока высокого напряжения и силовая электроника» CIGRE, 25-29 августа 2014 года, Париж (Франция)



Отчет подготовил:

Герасимов Андрей Сергеевич,
к.т.н., доцент, заместитель Генерального директора – директор департамента системных исследований и перспективного развития [ОАО «НТЦ ЕЭС»](#) (Санкт-Петербург), член РНК СИГРЭ с 2008 г., постоянный представитель от России в Study Committee CIGRE В4 “[HVDC and Power Electronics](#)” с 2012 г.



Контактные данные:

E-mail: gerasimov@ntces.ru
Тел. +7 (812) 292-94-65

Дата отчета:

22.10.2014

Москва,
2014 год

Оглавление

1. Общие сведения.....	4
2. Основные темы докладов:.....	4
3. Предпочтительная тема 1 «Высоковольтные системы постоянного тока, оборудование и применение».....	5
4. Предпочтительная тема 2 «Оборудование FACTS и его применение»	8
5. Предпочтительная тема 3 «Разработка оборудования на основе силовой электроники»	9

1. Общие сведения

Председатель В4: Bjarne Andersen (США).

Секретарь В4: Stig Nilsson (США).

Специальные обозреватели : Norman MacLeod (Великобритания) и Thomas Magg (ЮАР).

Заседание комитета В4 пользовалось большой популярностью. В ходе заседания в зале регистрировалось от 300 до 400 делегатов.

28 докладов было принято к рассмотрению комитетом В4. 25 из этих докладов представлены авторами во время сессии стендовых докладов, которую посетило порядка 450 человек. В ходе заседания заслушано 65 заранее подготовленных сообщений из 14 стран и приблизительно 50 незапланированных выступлений, что свидетельствует о большом интересе специалистов во всем мире к вопросам передачи электроэнергии постоянным током и силовой электронике в целом.

Особенно отмечено выступление представителей Южной энергосистемы Китая, в котором представлены детали недавно введенной в промышленную эксплуатацию (декабрь 2013 г.) первой в мире многоподстанционной электропередачи постоянного тока на преобразователях напряжения. Электропередача состоит из трех преобразовательных подстанций мощностью в 100 МВт, 50 МВт и 50 МВт, расположенных на островах и связанных с преобразовательной подстанцией мощностью 200 МВт на материке. Планируется расширение электропередачи и добавление еще одной подстанции на 50 МВт в ближайшем будущем. Передача использует мультиуровневую схему преобразователей напряжения и работает на напряжении ± 160 kV. Передача находится в промышленной эксплуатации и осуществляет передачу энергии от ветроэлектростанций, расположенных на островах, на материк.

2. Основные темы докладов:

Предпочтительная тема 1 «Высоковольтные системы постоянного тока, оборудование и применение»:

- 1) развитие технологии, включая сети постоянного тока;
- 2) подключение к энергосистемам возобновляемых источников энергии (ВИЭ);
- 3) планирование проектов, вопросы законодательства и защиты окружающей среды;
- 4) опыт реализации проектов и эксплуатации.

Предпочтительная тема 2 «Оборудование FACTS и его применение»:

- 1) подключение к энергосистемам возобновляемых источников энергии;
- 2) улучшение показателей эффективности работы энергосистем;

- 3) планирование проектов, вопросы законодательства и защиты окружающей среды;
- 4) опыт реализации проектов и эксплуатации.

Предпочтительная тема 3 «Разработка оборудования на основе силовой электроники»:

- 1) преобразователи для подключения ВИЭ и накопителей энергии;
- 2) выключатели постоянного тока, регуляторы перетоков мощности и ограничители токов короткого замыкания в сети постоянного тока;
- 3) новые полупроводниковые устройства и схемные решения преобразователей.

3. Предпочтительная тема 1 «Высоковольтные системы постоянного тока, оборудование и применение»

3.1. «Проект “Двадцати”»: выводы по демонстрационному проекту исследования и внедрения оффшорных сетей постоянного тока. Отчет о результатах Европейского проекта, в рамках которого решался широкий спектр задач, связанных с сетями постоянного тока (ПТ). Продемонстрированы модель для испытаний способов и алгоритмов защит для сетей ПТ, а также выключатель ПТ, построенный с использованием инновационных технологий в механике и силовой электронике.

3.2. Проектирование сетей ПТ, устойчивых к коротким замыканиям, с ограниченной необходимостью в использовании выключателей ПТ. Содержит обзор альтернативных методов отключения коротких замыканий в сетях ПТ. Приведены результаты моделирования отключения коротких замыканий с помощью выключателей ПТ, способных быстро изолировать поврежденный участок сети ПТ, сохраняя в работе преобразователь для поддержания сети переменного тока. Также исследованы решения на основе изоляции (блокирования) короткого замыкания с помощью специализированных преобразователей.

3.3. Исследование работы технологии передачи ПТ сверхвысокого класса напряжения ± 1100 кВ. Представлены актуальные данные по реализации проекта передачи 11 ГВт мощности с помощью ППТ напряжением ± 1100 кВ и силой тока 5000 А. Проектные исследования показывают, что Китаю потребуется шесть таких ППТ, при этом длина некоторых из них будет превышать 3000 км. В работе приведены результаты выбора оборудования главных преобразовательных подстанций и их предварительные проекты.

3.4. Специальные требования к преобразователям напряжения (VSC) для работы в составе гибридных воздушных линий переменного – постоянного тока. Представлена концепция пилотного проекта в Германии по выполнению преобразования переменного тока в постоянный для повышения пропускной способности существующей передачи. Рассмотрены проблемы данной концепции, в том числе реализация эффективного противоава-

рийного управления, создание распределенной сети и эффекты при объединении систем постоянного и переменного тока.

3.5. Новая тестовая схема для эксплуатационных испытаний нового тиристорного вентиля. Описывает разработку в Корее новой испытательной установки, реализующей концепцию тестовой схемы, в которой импульсы переменного тока и напряжения подаются на объект исследований. Представлены примеры смоделированных форм кривых тока и напряжения.

3.6. Оценка надежности различных вариантов проектов прибрежных сетей постоянного тока высоких классов напряжения. Представлена методология оценки надежности сетей ПТ, которая учитывает различные технологии, варианты топологии и систем защиты, применяемые проектировщиками. В методике совмещаются такие показатели, как наработка на отказ и среднее время восстановления для ключевых компонентов ППТ с вероятностными методами (Монте Карло) для учета влияния силы ветра и волн на доступность прибрежных ветровых установок для ремонтных бригад. Учитываются различные объемы объединения энергосистем, объемов резервирования, функционирования при наличии и отсутствии выключателей ПТ и оценивается объем сокращения поставок мощности для каждого случая. Сокращение поставок предлагается считать мерой надежности сети ПТ.

3.7. Технология сертификации прибрежных систем постоянного тока высоких классов напряжения (ПТВН). Сформулированы проблемы, которые возникают в схемах, где есть хотя бы одна прибрежная (внебереговая) подстанция постоянного тока высокого напряжения (ПТВН), по которой отсутствует достаточный опыт эксплуатации или реализации аналогичных проектов. Ввиду отсутствия соответствующих стандартов, руководств и рекомендаций, в документе предлагается технология сертификации прибрежных ППТ, заимствованная из нефте-газовой индустрии.

3.8. Доработка проекта электропередачи Колумбия – Панама. Описывает проектные исследования, необходимые для завершения проектирования. Начальный проект по передаче 600 МВт напряжением ± 450 кВ на расстояние 600 км в целях оптимизации технических и материальных затрат был скорректирован до 300 МВт на ± 250 кВ или 400 МВт напряжением ± 300 кВ на 480 км.

3.9. Заключительная концепция проекта первой ППТ 800 кВ в Бело Монте. Представлены предпроектные изыскания по двум биполярным ППТ мощностью 4 000 МВт напряжением ± 800 кВ, реализуемых в рамках создания Бразильского Северо-Южного коридора. Представлены начальные результаты исследований электромагнитных и электромеханических переходных процессов в предлагаемой схеме. Выбор топологии преобразователей (одна или две двенадцати-пульсных групп) предложен производителям.

3.10. Первый проект по передаче постоянного тока в Индонезии: системные исследования и начальный вариант проекта ППТ Ява – Суматра. Представлены результаты начальной фазы проектирования ППТ, ко-

торая свяжет угольную ТЭС на Суматре с основным центром потребления, расположенным на Яве. Проект предполагает реализации биполярной ППТ номинальной мощностью 3 000 МВт на напряжении ± 500 кВ с заземляющими электродами на каждой станции, при этом 369 км по территории Суматры и 110 км по Яве будет выполнено воздушными линиями, а расстояние 38 км будет покрыто подводным кабелем. Для повышения надежности планируется использовать два двенадцати-пульсных преобразовательных группы на полюс.

3.11. Презентация межсистемной связи постоянного тока Селило Пасифик. Представляет исследования по модернизации существующей северной преобразовательной подстанции ППТ Пасифик. Рассмотрена возможность замены четырех существующих преобразователей на два биполярных. После модернизации предполагается увеличить мощность ППТ до 3800 МВт на ± 560 кВ.

3.12. Проблемы и их решения, возникшие при реализации проекта Pole 3 в Новой Зеландии. Представлены инженерные проблемы и решения, родившиеся при реализации схемы Pole 3. Новое оборудование Pole 3 устанавливалось на существующей подстанции наряду с работающим оборудованием, что создало существенные трудности для реализации проекта. Представлены решения по повышению сейсмической стойкости оборудования. Описаны специальные меры по обеспечению совместной работы нового и существующего оборудования (интеграция средств управления новым полюсом в существующие цепи управления и защиты станции используя оборудование различных производителей), работы в слабой сети переменного тока.

3.13. Опыт эксплуатации проекта Река Мадейра в исходной конфигурации в энергосистеме Бразилии. Отчет о первой передаче энергии гидрогенераторами ГЭС Сан Антонио на вставку постоянного тока 400 МВт и первый полюс биполярной передачи постоянного тока мощностью 3 150 МВт напряжением ± 600 кВ. Представлены результаты первых тестов, а также список аварийных событий, зафиксированных в ходе приемо-сдаточных испытаний.

3.14. Проектные решения для ППТВН ± 800 кВ, 3000MW Чампа – Курукшетра со специальным обратным проводом. Представлены различные задачи, решенные в рамках предпроектных исследований и проектирования ППТ длиной 1 035 км в Индии. Представлены основные параметры выбранного проекта. Проект является первым, в котором вместо распространенного возврата тока через землю используется специальный обратный провод. Проект предполагает увеличение мощности до 6 000 МВт путем строительства второй биполярной передачи мощностью 3 000 МВт.

3.15. Проект восточное объединение Франции и Испании. Стимулы для выбора технологии. Приводится сравнение преимуществ и недостатков технологий, построенных на базе преобразователя с линейной коммутацией и преобразователя напряжения при работе в установившихся режимах и динамических процессах в системах, где передачи постоянного тока

входят в состав систем переменного тока. На примере объединения Франции и Испании показано, что предпочтительной является технология на основе VSC.

3.16. Статистика и анализ данные по работе ППТ в Государственной Сетевой компании Китая в период 2006-2012 гг. Статистическая выборка включает 14 объектов, среди которых передачи постоянного тока высокого и сверхвысокого класса напряжения, а также вставки ПТ. Приведены данные по продолжительности вынужденных простоев и коэффициентам готовности оборудования за указанный период. На основе анализа статистики выделены ключевые аспекты, влияющие на обеспечение надежного функционирования систем ПТ.

3.17. Исследование надежности ППТ во всем мире за период 2011-2012 года. Приведен обзор за двухлетний период надежности и доступности ППТ. В соответствии с разработанным В4 AG-04 протоколом в отчете представлена информация о коэффициентах готовности, использования, вынужденных и запланированных простоях. Причины вынужденных простоев разделены на шесть категорий и выполнено их сравнение с аналогичными показателями за 1983-2010 годы. Количество простоев связанных с повреждением трансформаторов снизилось значительно. Также приведена специализированная информации по наработке на отказ тиристорных вентилях и коммутационного оборудования.

4. Предпочтительная тема 2 «Оборудование FACTS и его применение»

4.1. Сравнение натуральных измерений и результатов моделирования электромагнитных переходных процессов в многоуровневом STATCOM для интеграции ветро-генерирующей электростанции в энергосистему Лондона. Описывает разработку и верификацию по результатам натуральных измерений обобщенной модели многоуровневого STATCOM для расчета электромагнитных переходных процессов. Результаты измерений коррелируются с результатами измерений.

4.2. Обобщенная модель преобразователя напряжения VSC для проектных исследований. Описывает разработку обобщенной модели преобразователя напряжения для расчетов динамической устойчивости. Модель разработана в PSS/E и имеет представление как для расчетов установившихся режимов, так и переходных процессов. По результатам воспроизведения аварийных возмущений как на стороне постоянного, так и на стороне переменного тока выполнено успешное сравнение с моделью для расчета электромагнитных переходных процессов.

4.3. Новый метод управления в сети с распределенной генерацией, основанный на адаптивном импульсном инвертере напряжения (VSI) и его сравнение с другими методами компенсации гармоник и повышения качества энергии. Рассматривает объединение систем с распределенной

генерацией с сетью с помощью инвертеров напряжения VSI. Для VSI доступны различные типы контролеров, авторы предлагают технологию импульсной адаптации для контролера широтно-импульсной модуляции. Это, как показывают результаты моделирования, оказывает положительное влияние на гармонический состав тока.

4.4. Функционирование STATCOM в энергосистеме острова Жежу. Рассмотрена работа STATCOM по поддержанию баланса реактивной мощности в сети переменного тока при потере одной из двух ППТ ВН, обеспечивающих электроснабжение острова. Выполнено моделирование для трех вариантов схем: с двумя, одним и без устройств STATCOM. Результаты исследований показывают, что отключение одной из ППТ в схеме без устройства STATCOM приводит к неприемлемым последствиям.

4.5. Экспериментальный исследовательский проект «адаптивная» линия электропередачи. Представлена концепция, заключающаяся в объединении воздушной линии электропередачи и мини-подстанции путем установки на опорах (в тупиках линии) коммутационного оборудования, модулей защиты, управления и измерительных систем. В работе представлены концептуальные проекты таких устройств, предлагаются испытания на линии класса 765 кВ.

4.6. Динамическая компенсация в энергосистеме Индии – размещение и размеры. Выполнена оценка потребности энергосистемы в динамическом перераспределении реактивной мощности, необходимой для обеспечения динамической устойчивости на первом колебании путем поддержания уровней напряжения в энергосистеме при существенных аварийных возмущениях. Для западной части Индии предложены оптимальные места установки и мощность устройств STATCOM, дополненных реакторами и управляемыми батареями конденсаторов.

4.7. Заводские и приемо-сдаточные испытания устройства STATCOM мощностью 450 МВА. Приведены результаты моделирования и натурных испытаний STATCOM, состоящего из двух устройств, в распределительной сети, обеспечивающей подключение новой ТЭЦ. В гибридной модели реального времени, содержащей модель STATCOM с реальной системой управления и цифровую модель энергосистемы, выполнены исследования перенапряжений и устойчивости энергосистемы. Затронуты проблемы под-синхронных торсионных колебаний и гармонического резонанса в сети. Натурные испытания позволили оптимизировать настройки системы управления обоими STATCOM.

5. Предпочтительная тема 3 «Разработка оборудования на основе силовой электроники»

5.1. Разработка и испытания выключателя ПТ 120 кВ. По результатам оценки величин токов короткого замыкания, возникающих в многополюсных системах ПТ, сформулированы требования к выключателям. Приве-

дено описание основных компонентов выключателя (элементы силовой электроники, сверхбыстрые механические выключатели, батареи конденсаторов и ограничители перенапряжений). Описан коммутационный процесс от замкнутого до разомкнутого состояния, позволяющий разорвать ток за 5,3 мс. Представлена тестовая схема и программа испытаний для тестирования прототипов.

5.2. Гибридный выключатель для ППТ ВН – решение будущего для систем ПТ. Содержит детальное описание гибридного выключателя ПТ, включающее в себя принципы управления и построения. Приведено описание основных компонентов, включая сверхбыстрый разъединитель. Проверка выключающей способности выполнена на прототипах.

5.3. Механический выключатель ПТ с низкими потерями для применения в ППТ ВН. Представлена концепция отличного от гибридного выключателя ПТ – механического устройства, отвечающего аналогичным функциональным требованиям. Обыкновенный выключатель переменного тока, оснащенный электромагнитным пускателем, использующим малую подвижную массу и ограниченный ход, может обеспечить требуемое быстродействие. Переход тока через ноль происходит под воздействием высокочастотного колебания, сгенерированного в схеме параллельного резонанса (С-L схема) с использованием схемы с предварительно заряженным конденсатором.

5.4. Би-модальный транзистор с изолированным затвором как идеальный силовой полупроводник для силовой электроники, на базе которой построены выключатели ПТ. Описывается создание единого чипа, совмещающего в себе высоковольтный силовой транзистор (IGBT) и диод. Номинальное напряжение лежит в пределах от 3,3 до 6,5 кВ. Для проведенных исследований выбрано устройство номинального напряжения 4,5 кВ. Представлены эксплуатационные характеристики IGBT. Основной сферой применения является гибридный выключатель ПТ, в котором благодаря улучшенным характеристикам IGBT удастся разорвать ток 16 кА в течении 5 мс от определения короткого замыкания. Это почти в два раза превышает величину тока, на который рассчитаны выключатели на базе обычных IGBT. Во время испытаний удалось обеспечить отключение тока величиной 19 кА.