



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 С4 «Технические характеристики энергосистем» CIGRE, 25-29 августа 2014 года, Париж (Франция)



Отчет подготовили:



Кучеров Юрий Николаевич,

д.т.н., с.н.с., начальник Департамента технического регулирования ОАО «СО ЕЭС» (Москва), лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, член CIGRE с 1986 года, наблюдательный член от России в [SC C6 «Distribution Systems and Dispersed Generation»](#) в 2010-14 гг., наблюдательный член от России в [SC C4 «System Technical Performance»](#) с 2014 г. по наст. время, член Технического комитета РНК СИГРЭ с 2013 г., удостоен звания «Заслуженный член CIGRE» (CIGRE Distinguished Member) в 2014 г. //

Тел. +7 (499) 788-19-25, kucherov@so-ups.ru

Федоров Юрий Геннадьевич,

главный специалист Департамента технического регулирования ОАО «СО ЕЭС» (Москва), член РНК СИГРЭ с 2013 г.

fedorov-yg@so-ups.ru
+7 (499) 788-17-52



Березовский Петр Константинович,

ведущий специалист Департамента технического регулирования ОАО «СО ЕЭС» (Москва)

Berezovskiy-PK@so-ups.ru
+7 (499) 788-19-69



Скуратова Екатерина Викторовна,

ведущий специалист Департамента технического регулирования ОАО «СО ЕЭС» (Москва)

skuratova-ev@so-ups.ru
+7 (495) 627-83-65



Дата отчета: 22 октября 2014 г.

Москва, 2014 год

Оглавление

1.	Общие сведения о деятельности SC C4	3
2.	Общий обзор докладов по тематике C4 на Сессии.....	3
3.	Предпочтительная тема 1 «Технические характеристики функционирования электроэнергетических систем в условиях широкого распространения генерирующего оборудования, подключаемого с помощью силовых преобразователей»	5
3.1.	Влияние интеграции возобновляемых источников энергии (ветро-, солнечной и приливной генерации) на качество электроэнергии	5
3.2.	Влияние на устойчивость и надежность функционирования энергосистем большого количества ветро- и солнечной генерации на базе силовых преобразователей	7
3.3.	Влияние оборудования постоянного тока высокого напряжения (ВПТ и ППТ) на характеристики функционирования энергосистем и электромагнитную совместимость	9
4.	Предпочтительная тема 2 «Методы и оборудование для определения параметров молниезащиты и координации изоляции».....	9
4.1.	Оценка и моделирование воздействия молнии (например, с помощью моделирования развития лидера молнии или электрогеометрического моделирования) на линии постоянного и переменного тока сверх- и ультравысокого напряжения	9
4.2.	Защита от молнии открытых объектов, таких как ветроустановки.....	10
4.3.	Координация изоляции систем переменного тока сверх- и ультравысокого напряжения, включая соответствующее моделирование оборудования	11
5.	Предпочтительная тема 3 «Передовые методы, модели и инструменты для анализа технических характеристик энергосистем»	12
5.1.	Применение гибридных инструментов для моделирования электроэнергетических систем, а также применение метода конечных разностей во временной области для анализа электромагнитных переходных процессов	12
5.2.	Характеристика и моделирование геомагнитных индуцированных токов	13
5.3.	Анализ характеристик функционирования систем с большим количеством протяженных кабелей переменного тока, в т.ч. гармонического резонанса	14
	Приложение.....	17

1. Общие сведения о деятельности SC C4

Предметная область.

Деятельность Исследовательского комитета (Study Committee) CIGRE C4 «Технические характеристики энергосистем» ([System Technical Performance](#)), далее – «SC C4», направлена на изучение вопросов, связанных с разработкой методик и инструментов для анализа функционирования энергосистем. При этом особое внимание уделяется аспектам, связанным с обеспечением динамической устойчивости и с переходными режимами энергосистем. В область исследований комитета также входят вопросы взаимодействия между энергосистемой и ее подсистемами, между энергосистемой и другими объектами и электроустановками, в том числе являющимися источниками возмущений.

Специфичные вопросы, связанные непосредственно с проектированием и производством электрооборудования, а также аспекты планирования, эксплуатации и управления энергосистем, не являются сферой деятельности SC C4, за исключением случаев, когда параметры работы электрооборудования напрямую зависят от параметров функционирования энергосистемы.

Состав комитета.

Комитет объединяет 38 членов, из которых 24 имеют постоянный статус (Regular Members) и 14 статус наблюдателей (Observer Members).

Руководство комитета.

Руководством и организацией деятельности SC C4 в настоящее время занимаются председатель *Pouyan Pourbeik* (США, *EPRI*) и ответственный секретарь *Hideki Motoyama* (Японии, *CRIEPI*).

2. Общий обзор докладов по тематике C4 на Сессии

По тематике SC C4 на 45-й Сессии CIGRE 2014 г. представлено 32 доклада, объединенных по трем предпочтительным темам (Preferential Subjects).

Предпочтительные темы включают в себя широкий спектр направлений деятельности комитета и учитывают технический прогресс в различных областях электроэнергетики, таких как качество электроэнергии, электромагнитная совместимость, координация изоляции, моделирование воздействия молнии на параметры функционирования энергосистем, др.

По предпочтительной теме 1 «Технические характеристики функционирования электроэнергетических систем в условиях широкого распространения генерирующего оборудования, подключаемого с помощью силовых преобразователей» представлено 15 докладов, которые были сгруппированы по трем категориям для рассмотрения и дискуссии:

© Кучеров Ю.Н., Федоров Ю.Г.,

Березовский П.К., Скуратова Е.В., НП «РНК СИГРЭ», 2014

- Влияние интеграции возобновляемых источников энергии (ветро-, солнечной и приливной генерации) на качество электроэнергии;
- Влияние на устойчивость и надежность функционирования энергосистем большого количества ветро- и солнечной генерации на базе силовых преобразователей, а также оборудования постоянного тока высокого напряжения (ветроэлектростанции и вставки постоянного тока);
- Влияние оборудования постоянного тока высокого напряжения (ВПТ и ППТ) на характеристики функционирования энергосистем и электромагнитную совместимость.

Доклады подготовлены представителями энергокомпаний, научных институтов и промышленных организаций из стран Европы, Северной и Южной Америки, Китая, Таиланда, Великобритании и Австралии.

По предпочтительной теме 2 «Методы и способы оценки воздействия молнии и координация изоляции» представлено 7 докладов, которые были сгруппированы по трем категориям для рассмотрения и дискуссии:

- Оценка и моделирование воздействия молнии (например, с помощью моделирования развития лидера молнии или электрогеометрического моделирования) на линии постоянного и переменного тока сверх- и ультравысокого напряжения;
- Защита от молнии открытых объектов, таких как ветроустановки;
- Координация изоляции систем переменного тока сверх- и ультравысокого напряжения, включая соответствующее моделирование оборудования.

Доклады подготовлены представителями Китая, Европы, США, России, Японии и стран Юго-Восточной Азии.

По предпочтительной теме 3 «Передовые методы, модели и инструменты для анализа технических характеристик энергосистемы» представлено 10 докладов, которые были сгруппированы по трем категориям для рассмотрения и дискуссии:

- Применение гибридных инструментов для моделирования электроэнергетических систем, а также применение метода конечных разностей во временной области для анализа электромагнитных переходных процессов;
- Характеристика и моделирование геомагнитных индуцированных токов;
- Анализ характеристик функционирования систем с большим количеством протяженных кабелей переменного тока, в т.ч. гармонического резонанса.

Доклады подготовлены представителями Северной Америки, Европы, ЮАР, Японии.

Полный перечень докладов с указанием тем и авторов приведен в приложении к Отчету. Далее в Отчете представлен подробный обзор докладов.

3. Предпочтительная тема 1 «Технические характеристики функционирования электроэнергетических систем в условиях широкого распространения генерирующего оборудования, подключаемого с помощью силовых преобразователей»

3.1. Влияние интеграции возобновляемых источников энергии (ветро-, солнечной и приливной генерации) на качество электроэнергии

В докладе **C4-101** рассматриваются методы снижения негативного воздействия колебаний напряжения (фликера), возникающих при подключении ветроэлектростанций через фидера распределительной сети, том числе ослабленные и протяженные.

В работе показано, что дополнительные быстродействующие контроллеры могут устанавливаться, как в точке общего подключения, так и в точке подключения ветроустановки. Предлагаемое решение обеспечивает выполнение требуемых функций при достаточной номинальной мощности силового преобразователя. Дополнительные программные алгоритмы управления, рассмотренные в данной статье, разработаны для снижения флуктуаций мощности, вызванных колебаниями напряжения, и эффективны только в диапазоне частот фликера. Данные программные алгоритмы затрагивают направлены на регулирование активной и реактивной мощности. Однако наиболее эффективным, но и наиболее дорогим решением, по мнению авторов, является применение накопителей электрической энергии для демпфирования колебаний мощности.

Доклад C4-102 обращается к опыту ЭЭС Аргентины, полученному при измерениях фликера и гармонических колебаний в двух зонах установки ветроэлектростанций. Методика измерений основана на применении датчика электрического поля (*EFS*) и датчика магнитного поля (*MFS*).

В докладе также рассмотрены нормативно-технические документы в аспекте качества электроэнергии, действующие в Аргентине. Представленные в докладе результаты показывают, что зарегистрированные в ходе измерений значения ниже установленных регулируемыми документами пределов. По мнению авторов, это означает, что либо во время проведения измерений гармонические колебания были незначительными, либо распределитель-

ная сеть Аргентины достаточно «сильна» для демпфирования таких гармонических колебаний.

Доклад С4-103 посвящен анализу кодексов магистральных сетей. В докладе также даны рекомендации по включению ряда требований в состав НТД, регламентирующих вопросы подключения ветроэлектростанций и фотоэлектрических панелей к сетям среднего и высокого напряжения. Основная идея доклада заключается в необходимости гармонизации технических требований с помощью электронного интерфейса, который также мог бы учитывать особенности схемно – режимной ситуации в каждой конкретной точке подключения к сети.

В докладе С4-109 рассматривается методика оценки краткосрочных колебаний мощности фотоэлектрических установок для контролируемых областей (районы Осаки, Токио, Саппоро, Нагою).

Параметры краткосрочных колебаний мощности исследовались для фотоэлектрических установок кВт-ного класса мощности, распределенных в контролируемых областях. С помощью анализа краткосрочных колебаний солнечных излучений было установлено, что в километровом диапазоне распределения фотоэлектрических установок наблюдается сглаживающие эффекты колебания солнечных излучений. Также в докладе представлен метод оценки краткосрочных колебаний мощности для рассматриваемых контролируемых областей. Результаты исследований показали, что колебания агрегированной мощности фотоэлектрических установок составляют 1-2% от минимальной нагрузки в выходные дни в контролируемых областях.

Доклад С4-113 «Влияние процесса производства энергии с помощью ветра и солнечной энергии на качество электроэнергии в Румынии» представляет опыт Румынии в техническом регулировании и мониторинге параметров качества электроэнергии в сетях передачи и распределения, с учетом возрастающей доли ветроэлектростанций и фотоэлектрических установок, работающих в составе ЭЭС Румынии.

В 2013 г. был сделан акцент на колебания напряжения (фликер), в 2014 г. на гармонические колебания. В докладе также представлены ряд задач, возникших при внедрении Системы оценки параметров качества электроэнергии, с основным акцентом на вопросы управления качеством электроэнергии.

В докладе С4-114 представлено влияние первых и крупнейших в Юго-Восточной Азии коммунальных ветроэлектростанций на качество электроэнергии, а также решения по снижению их негативного воздействия. Резуль-

таты наблюдений показали, что колебания напряжения не критичны для ветроустановок, присоединенных к сети с помощью силового преобразователя.

Ветрогенераторы могут поддерживать напряжение, коэффициент мощности, частоту, колебания напряжения и значения постоянного тока в допустимых пределах. Однако, гармонические колебания тока и напряжения иногда не соответствуют требованиям регламентирующих документов. Также в докладе представлены результаты исследований и разработки фильтра высших гармоник.

В докладе С4-115 кратко раскрыты основные результаты работы совместной рабочей группы *CIGRE/CIREД С4.112* «Руководство по проведению мониторинга качества электроэнергии – определение местоположения, обработка и представление данных» полученные за период с февраля 2011 г. по декабрь 2013г. Данная рабочая группа была создана специально для изучения практических аспектов применения системы мониторинга параметров качества электроэнергии.

В частности, рабочей группой установлены параметры измерения, а также способы измерения и обработки данных. В докладе представлены руководящие принципы для осуществления мониторинга параметров качества электроэнергии в зависимости от поставленных целей, а также обозначены области, требующие дальнейшего развития и проведения исследований для выработки комплексных решений для электрических сетей настоящего и будущего.

3.2. Влияние на устойчивость и надежность функционирования энергосистем большого количества ветро- и солнечной генерации на базе силовых преобразователей

В докладе С4-104 представлены мероприятия, разработанные системным оператором Бразилии в целях обеспечения безопасности и необходимых эксплуатационных характеристик энергосистемы, в условиях интеграции крупных ветроэлектростанций. В докладе также рассматриваются аспекты, связанные с динамической устойчивостью, регулированием напряжения, электромагнитными переходными процессами и развитием нормативно – технической базы для подключения ветроэлектростанций.

В докладе С4-107 представлен обзор основных методик оценки рисков подсинхронного взаимодействия между установками продольной компенсации в магистральной сети высокого напряжения и возобновляемыми источниками энергии, такими как ветро- и солнечная генерация.

В докладе также представлена оценка различных способов снижения негативного эффекта подсинхронного взаимодействия. В докладе представлен метод оценки рисков и снижения негативного эффекта от подсинхронного взаимодействия, имеющего место в передающей сети Техаса. Хозяйству-

ющими субъектами (7 сетевых компаний) передающей сети напряжением 345 кВ в рамках одного проекта было установлено 18 конденсаторных батарей для интеграции 18,456 МВт ветроустановок.

Доклад С4-108 представляет отчет о результатах исследования, проведенного для исследования вопросов регулирования частоты в Восточном Энергообъединении США в условиях частых отключений большого количества генерации, с учетом большой доли ветрогенерации в структуре генерирующих мощностей в будущем.

Проведенное исследование показало, что применение чувствительных регуляторов частоты вращения на ветроэлектростанциях может оказать положительное влияние на эксплуатационные характеристики энергосистемы, а регулирование инерции ветровых турбин на характер переходных процессов. По мнению авторов, участие ветроустановок в первичном регулировании частоты может существенно помочь в поддержании частоты в энергосистеме.

В докладе С4-110 приведена методика вероятностно – алгебраического моделирования, которая была разработана для оценки эксплуатационных характеристик энергосистем с высокой долей ВИЭ, а также связанных с небольшими изолированными энергосистемами.

Разработанная методика основана на методе Монте-Карло и реалистично имитирует наиболее важные характеристики эксплуатируемой энергосистемы. Методика используется для оценки эксплуатационных характеристик типовых энергосистем, соединенных с различными изолированными энергосистемами с помощью ВПТ.

Доклад С4-111 представляет результаты исследования динамической устойчивости больших изолированных энергосистем с высоким уровнем ветра в среднесрочной перспективе, проводившегося в Ирландии.

Исследование проводилось с учетом доли ветрогенерации в структуре генерирующих мощностей Ирландии – 79 %. Результаты исследования рассчитаны на пятилетний период, а основная цель их проведения заключается в оценке граничных условий обеспечения динамической устойчивости при возникновении трехфазных коротких замыканий, с помощью определения максимально допустимого времени ликвидации короткого замыкания. Целью работы также было изучение влияния ветрогенерации, подключенной к распределительной сети через контуры с высоким сопротивлением.

3.3. Влияние оборудования постоянного тока высокого напряжения (ВПТ и ППТ) на характеристики функционирования энергосистем и электромагнитную совместимость

В докладе С4-105 представлена классификация испытаний регуляторов высшего уровня, при вводе в эксплуатацию системы постоянного тока высокого напряжения *Fenno-Skan 2*, наряду с модернизацией регуляторов *Fenno-Skan 1*, позволяющих испытать линии в биполярном режиме работы. В статье описываются меры, принятые для решения задач оперативного планирования в условиях функционирования рынка электроэнергии при проведении приемо-сдаточных испытаний.

В докладе С4-106 описываются возможные выгоды от интеграции сети переменного тока с прибрежной сетью постоянного тока с ВИЭ, в т.ч.:

- Оказание услуг по обеспечению системной надежности (регулирование частоты и устойчивость при провалах напряжения);
- Эксплуатация и безопасность системы переменного тока;
- Использование прибрежных ветроэлектростанций для восстановления системы.

Альтернативные схемы для обеспечения функционирования сети постоянного тока были исследованы в комбинированной сети постоянного и переменного тока. При эксплуатации комбинированной сети важное значение имеет система управления сетью постоянного тока.

В докладе С4-112 представлены аспекты решения задач планирования и электромагнитной совместимости для системы постоянного тока высокого напряжения *DolWinβ*, с установленным преобразователем напряжения. Платформа *Dolwinβ* находится за пределами 12-мильной зоны, а требования действующих регулирующих документов не распространяются на оборудование платформы. Авторами доклада приведены доводы о необходимости внесения изменений в регламентирующие документы и стандарты МЭК, с расширением сферы их действия на прибрежное электрооборудование.

4. Предпочтительная тема 2 «Методы и оборудование для определения параметров молниезащиты и координации изоляции»

4.1. Оценка и моделирование воздействия молнии (например, с помощью моделирования развития лидера молнии или электрогеометрического моделирования) на линии постоянного и переменного тока сверх- и ультравысокого напряжения

Доклад С4-201 «Сравнение модели развития лидера и Электро-Геометрической Модели для анализа молниезащиты ЛЭП» посвящен оценке

пригодности модели развития лидера для расчета прорыва удара молнии через грозозащитный трос ЛЭП сверхвысокого и ультравысокого напряжения, как альтернативы Электро-Геометрической Модели (ЭГМ).

Дана критическая оценка существующим методам расчета прорыва удара молнии через тросовую защиту, а также проведены дополнительные полевые испытания на полигоне ультравысокого напряжения. В докладе представлен сравнительный анализ эксплуатационных данных по действующим ЛЭП переменного тока с данными, полученными при моделировании. Авторы заключают, что результаты расчета с применением модели развития лидера более точно соответствуют данным, полученным при эксплуатации ЛЭП. По мнению авторов доклада, ЭГМ наиболее подходит для проведения расчетов прорывов тросовой защиты линий напряжением до 500 кВ.

Доклад С4-204 «Новые технологии регистрации токов молнии с высоким разрешением» описывает опыт пилотной эксплуатации нового регистратора тока молнии для оценки распределения переходного тока по линии 200 кВ. Регистратор размещается непосредственно на опорах ЛЭП или на грозозащитном тросе. В докладе представлены результаты измерений, полученные более чем за год эксплуатации регистратора, а также представлены соответствующие осциллограммы в высоком разрешении. По мнению авторов, применение такого регистратора позволит более точно рассчитывать грозовые возмущения и более подробно изучить природу молнии.

Доклад С4-207 «Эффективность применения импульсных разрядников на ЛЭП Куала Край – Гуа Мусанг, напряжением 132 кВ» показывает опыт применения импульсных разрядников на ЛЭП, находящейся в грозовой зоне. Малайзия известна как территория с наибольшей плотностью разрядов молний в землю в мире.

В частности, за 12 лет зафиксировано 55 отключений (включая 11 отключений одной цепи и 22 отключения двух цепей) ЛЭП Куала Край – Гуа Мусанг, протяженность которой составляет 113 км. С 2007 г. линия была оборудована 120 Линейными Разрядниками, однако данное мероприятие оказалось не эффективным, поскольку с ростом числа Линейных Разрядников – показатель числа пробоев увеличивался. В результате эксплуатирующей сетевой компанией были проведены исследования, которые показали, что низкая эффективность применения Линейных Разрядников связана с неправильным выбором мест установки разрядников на опорах ЛЭП. Также исследования показали зависимость количества отключений ЛЭП от плотности разрядов молний в землю, и установили, что ток молнии больше 50 кА будет приводить к отключению двух цепей ЛЭП.

4.2. Защита от молнии открытых объектов, таких как ветроустановки

По данной подтеме докладов не представлено.

4.3. Координация изоляции систем переменного тока сверх- и ультравысокого напряжения, включая соответствующее моделирование оборудования

Доклад С4-202 «Моделирование и экспериментальные испытания сверхбыстрых переходных процессов (перенапряжений) для разъединителей КРУЭ, напряжением 500 и 800 кВ» посвящен анализу возникновения сверхбыстрых переходных процессов (перенапряжений), вызванных коммутацией разъединителя КРУЭ, с учетом захваченного заряда на сборных шинах.

Сверхбыстрые переходные перенапряжения характеризуются очень коротким и крутым фронтом волны. На них следует обращать особое внимание при эксплуатации КРУЭ напряжением от 800 кВ и выше. Воздействие сверхбыстрых переходных процессов на таких классах напряжения может приводить к перенапряжениям в изоляции КРУЭ и подключенного к нему оборудования. В докладе авторы представляют результаты моделирования переходных процессов при коммутации разъединителем зарядного тока сборных шин, проведенного на основе рекомендаций стандарта МЭК 62271-102, и проводят их сравнительный анализ с измерениями, полученными при эксплуатации разъединителя КРУЭ, напряжением 500 кВ. Также авторами проведено моделирование сверхбыстрых переходных процессов для компактного КРУЭ напряжением 765 кВ, с учетом конфигураций нескольких подстанций, и максимального и более реалистичного значения захваченного заряда. Исследования представляют важность для координации изоляции оборудования сверхвысокого класса напряжения.

Доклад С4-203 «Применение мощных линейных разрядников для повышения устойчивости ЛЭП напряжением 500 кВ к коммутационным перенапряжениям» поднимает вопросы применения модифицированных для осуществления коммутаций линейных разрядников.

Авторами проведена оценка влияния коммутационных перенапряжений и повышения напряжения при включении ЛЭП. Во взаимодействии с энергокомпанией, был проведен ряд испытаний на ЛЭП, напряжением 500 кВ, оборудованной модифицированным линейным разрядником. В докладе приводится описание электрических свойств и конструкции модифицированного линейного разрядника, а также информация о системе мониторинга состояния разрядника. Расчеты необходимого количества и места расположения линейных разрядников произведены с помощью компьютерного моделирования.

В докладе С4-205 «Защита силовых трансформаторов, подключенных к КРУЭ, от грозовых перенапряжений» рассмотрены модели расчета электромагнитных переходных процессов, возникающих из-за воздействия молний, на подстанциях 132 кВ и 220 кВ.

Рассмотрено типовое КРУЭ (с двумя системами шин) с двумя присоединенными ЛЭП, двумя присоединенными трансформаторами и шиносоединительным выключателем. В статье проанализировано три варианта подключения присоединений к шинам:

- 1) трансформаторы и ЛЭП подключаются к шинам с помощью элегазовых линий;
- 2) трансформаторы и ЛЭП подключаются к шинам с помощью изолированных кабелей;
- 3) трансформаторы подключаются к шинам с помощью изолированных кабелей, ЛЭП подключаются к шинам с помощью элегазовых линий.

Результаты детального моделирования показали, что при подключении ЛЭП и трансформаторов к шинам подстанции 220/20 кВ с помощью изолированных кабелей, импульсные разрядники, установленные только в местах подключения ЛЭП к кабелям, обеспечивают требуемый уровень защиты трансформаторов от грозовых перенапряжений. В остальных случаях требуются дополнительные меры по защите трансформаторов.

В докладе С4-206 «Принципы координации изоляции и меры по снижению уровней изоляции в Японии» представлена текущая ситуация с координацией изоляции электрооборудования в Японии.

В докладе также описаны принципы и меры по рационализации уровня изоляции, принятые в Японии. Испытательные напряжения были снижены в соответствии с рациональным уровнем изоляции для повышения технико-экономических и эксплуатационных показателей, и стандартизированы для систем классом напряжения от 66/77 кВ до 1100 кВ.

5. Предпочтительная тема 3 «Передовые методы, модели и инструменты для анализа технических характеристик энергосистем»

5.1. Применение гибридных инструментов для моделирования электроэнергетических систем, а также применение метода конечных разностей во временной области для анализа электромагнитных переходных процессов

В докладе С4-304 «Вовлечение энергопредприятий в разработку инструментов моделирования электромагнитных переходных процессов (ЭМПП)» представлена действующая практика и имеющийся опыт исследо-

вательского института *CRIEPI*, а также компаний *Électricité de France (EDF)*, *Hydro-Québec and Réseau de Transport d'Électricité (RTE)* в области моделирования электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах. В докладе рассмотрены инструменты «*off-line*» (с помощью комплекса *EMTP-RV*) и «*real-time*» (с помощью комплекса *Hypersim*) моделирования. Доклад также посвящен исследованию моделирования электромагнитных переходных процессов в общем, в аспекте широкомасштабного внедрения устройств *FACTS* и электрооборудования постоянного тока высокого напряжения.

5.2. Характеристика и моделирование геомагнитных индуцированных токов

Геомагнитные возмущения, а также соответствующий индуцированный геомагнитный ток определены как потенциальная угроза для электрических сетей, в особенности сетей с протяженными ЛЭП, расположенными в высокой местности. Эти низкочастотные геомагнитные возмущения, как известно, могут привести к авариям в энергосистеме, а, следовательно, являются источником потенциального риска, который необходимо изучить и смоделировать на программном комплексе. Индуцированные низкочастотные квазипостоянные токи могут привести к повреждению электросетевого оборудования (в частности, трансформаторов и реакторов) или неселективному отключению другого оборудования (в частности, статического компенсатора реактивной мощности или конденсаторных батарей), а также, что более важно, привести к возникновению лавины напряжения и привести к длительному нарушению электроснабжения.

В докладе С4-301 «Моделирование лавины напряжения, вызванной геомагнитными возмущениями - проблемы и решения» показана сравнительная оценка моделирования влияния геомагнитных возмущений на регулирование напряжения в энергосистеме.

Для анализа используется модифицированная версия тестовой системы *IEEE39-Bus* в качестве основы, а также *EMTP-RV* в качестве инструмента моделирования. Кроме того, в работе рассматривается эффективность использования устройств продольной компенсации для исключения возникновения лавины напряжения. Моделирование показало, что для однофазных трансформаторов, соотношение между реактивным током и постоянным током в нейтрале трансформатора, в большинстве случаев составляет 0,47. В более общей топологии сети это соотношение колеблется между 0,20 и 0,64. Среднее значение тока в нейтрале трансформатора, по мнению авторов, является хорошим индикатором уровня гармонических колебаний.

Доклад С4-302 «Разработка передовых инструментов анализа индуцированного геомагнитного тока для сети передачи провинции Манитоба» опи-

сывает опыт успешной разработки программного комплекса для анализа и расчета геомагнитных индуцированных токов на каждой подстанции, а также для оценки возможности возникновения лавины напряжения в энергосистеме провинции Манитоба. Для оценки авторы рекомендуют использовать равномерность распространения геоэлектрического поля 1В/км. Последующая работа предполагает разработку инструмента для учета влияния гармонических колебаний на настройку РЗиА.

Доклад С4-306 на тему «Моделирование и оценка влияния геомагнитных возмущений на электроэнергетическую систему» описывает методики моделирования для исследования влияния индуцированных геомагнитных токов на электрическую сеть в различных аспектах: перетоки мощности, постоянство напряжения и др. В работе также описываются методы моделирования дополнительных потерь реактивной мощности.

В докладе **С4-307** «Применение метода оценки уязвимости перед геомагнитными возмущениями на модели сети передачи *Eskom*» рассматриваются аспекты разработки программной модели для оценки влияния геомагнитных возмущений в сети передачи *Eskom*. В докладе описывается методология оценки и определения уязвимых мест энергосистемы. В докладе отмечено, что потери реактивной мощности в статических компенсаторах и других средствах компенсации при возникновении геомагнитных возмущений усугубят воздействие на устойчивость энергосистемы. В рамках оценки уязвимости ЭЭС, непредвиденные нештатные ситуации и потенциальные меры по снижению последствий должны быть также включены в анализ.

5.3. Анализ характеристик функционирования систем с большим количеством протяженных кабелей переменного тока, в т.ч. гармонического резонанса

Доклад С4-303: «Опыт *RTE* в применении изолированных кабелей переменного тока сверхвысокого напряжения» суммирует знания, приобретённые *RTE* с помощью нескольких исследований электромагнитных переходных процессов, связанных с применением кабелей сверхвысокого напряжения в энергосистеме в прошедшие 3 года.

Согласно полученным результатам, медленные переходные процессы, например, при включении кабельной линии, или переходные восстанавливающиеся напряжения во время коротких замыканий на (или близко от) кабельной линии не будут достаточно проанализированы для каждого конкретного проекта до тех пор, пока не будет уделено особое внимание совместной работе изолированных кабелей с последовательно установленными реакторами.

С другой стороны, авторы констатируют трудность предвидения возникновения гармонических перенапряжений при включении трансформатора и усиления фоновых гармоник, которые также должны учитываться при разработке проекта. Соответствующие инструменты и методологии были разработаны *RTE* в течение последних лет для проведения исследований переходных режимов. Также авторы доклада считают необходимым внести изменения в стандарт *CEI 62271-100*, для учета возмущений при включении изолированных кабелей переменного тока сверхвысокого напряжения.

В докладе С4-305: «Исследование работы межсистемной ЛЭП Мальта-Сицилия в различных диапазонах частоты» описывается подробный частотный анализ, проводимый для строящейся ЛЭП Мальта-Сицилия напряжением 245 кВ и протяженностью 118 км. Линия кабельного типа, комбинированной прокладки (подземная/подводная), соединяющая энергосистемы Мальты и Сицилии. В данной работе излагаются результаты частотного анализа, который проводился с использованием модели *АТР-ЕМТР*.

В докладе С4-308 «Анализ гармонических колебаний в кластерах ветроэлектростанций, использующих высоковольтные кабели подземной прокладки в сети передающей сети Ирландии» рассматривается влияние на гармонические колебания в ЭЭС Ирландии от распространения возобновляемых источников электроэнергии и, соответственно, кабельных линий переменного тока. Уровень гармонических искажений может превысить ожидаемые значения и привести к нежелательным последствиям, если не уделить данному аспекту должного внимания.

В докладе представлена методика, принятая оператором *EirGrid* для оценки воздействия гармонических колебаний в передающей сети, вызванных установкой кабельных линий высокого и сверхвысокого напряжения, которые зачастую применяются при подключении ветроэлектростанций. По мнению авторов, экономически выгодно осуществлять фильтрацию гармоник в передающей сети, а не на каждой ветроэлектростанции отдельно.

Представленная авторами доклада методика состоит из двух этапов. Первый этап заключается в оценке инфраструктуры сети передачи и гармоническом анализе до и после подключения нового объекта, а также определения мер по снижению негативного воздействия и удержанию гармонических колебаний на запланированном уровне. На втором этапе, при помощи рекомендаций стандарта МЭК 61000-3-6, для каждого присоединения определяется предельный уровень гармонических колебаний. Предельный уровень гармонических колебаний контролируется для точки подключения к сети по двум составляющим: появление новых искажений напряжения, вызванных появлением новых гармоник при подключении нелинейного оборудования (силовых преобразователей ветроустановок) и усиление существующих искажений напряжения при подключении.

В докладе С4-309 на тему «Анализ работы ЛЭП комбинированной прокладки (надземной/подземной) с компенсирующими контурами и заземляющими устройствами в различных диапазонах частоты» исследуются электромагнитные переходные процессы при расширении голландской электрической сети, напряжением 380 кВ, состоящей из участков с ЛЭП и из участков с кабельными линиями с компенсирующим проводом. Представленный авторами метод может применяться для учета влияния компенсирующих проводов и сопротивлений заземляющих устройств на резонанс до 10 кГц, как на ЛЭП, так и в кабельных линиях.

В докладе С4-310 «Анализ воздействия на резонанс прибрежных ветроэлектростанций, с учетом их расположения» приводится описание методов моделирования, которые позволяют исследовать резонанс, возникающий в прибрежных ветроэлектростанциях, с учетом специфики их принципиальной схемы. Для основных компонентов (кабели, трансформаторы, конденсаторы) применялись широкополосные модели. Анализ включал в себя частотное сканирование во временной плоскости.

Предполагаемые перенапряжения могут возникать в некотором диапазоне частот, в зависимости от расположения ветроэлектростанции, с учетом длины кабельных линий и характеристик трансформаторного оборудования. Авторы заключают, что применение методик моделирования на этапе проектирования прибрежной ветроэлектростанции позволит более точно оценить возможные значения резонансов, при различной протяженности кабельных линии, применяющихся для подключения объекта.

Приложение

Перечень докладов на 45-й Сессии CIGRE 2014 г. по направлению SC C4 «Технические характеристики энергосистем»

Доклады по предпочтительной теме 1:

«Технические характеристики функционирования электроэнергетических систем в условиях широкого распространения генерирующего оборудования, подключаемого с помощью силовых преобразователей»

- **C4-101** *G. Joos, M. Ammar, D. Mascarella, P. Venne, C. Abbey* (Канада).
Оценка колебаний напряжения при подключении ветроэлектростанций к распределительным сетям и меры по их снижению.
- **C4-102** *J.L. Agüero, P.E. Issouribehere, D.A. Esteban, F. Issouribehere, G.A. Barbera, H.G. Mayer* (Аргентина).
Влияние крупных ветроэлектростанций на качество электроэнергии. Первый опыт ЭЭС Аргентины.
- **C4-103** *F. Oliveira, P.F. Ribeiro, P.M. Almeida* (Нидерланды, Бразилия).
Требования в отношении качества электроэнергии для интеграции возобновляемых источников (фотоэлектрических и ветроэнергетических) энергии в передающую сеть.
- **C4-104** *S.J. N. Cisneiros, M.J. Botelho, D.O.C. Brasil, F.C. Medeiros, M. Groetaers, A.B. Fernandes, A.D.R. Medeiros, S.L.A. Sardinha, A. Bianco* (Бразилия).
Новые вызовы, связанные с новыми источниками энергии в энергосистеме Бразилии.
- **C4-105** *T. Rauhala, M. Laasonen, H. Nurminen, A.-J. Nikkilä* (Финляндия).
Аспекты классификации испытаний системы управления линиями постоянного тока *Fenno-Skan* в биполярном режиме, в условиях функционирования рынка электроэнергии, в рамках проведения приемосдаточных испытаний при модернизации линии *Fenno-Skan-1*.
- **C4-106** *E. Ciapessoni, D. Cirio, A. Gatti, A. Pitto, A.M. Denis, L. He, C-C. Liu, C. Moreira, B. Silva* (Италия, Франция, Ирландия, Португалия).
Влияние передач постоянного тока высокого напряжения с промежуточными присоединениями на устойчивость функционирования систем переменного тока.
- **C4-107** *K. Andov, D. Kidd, B. Mehraban, B. English, S. Dutta, M. Neal* (США).
Методы оценки рисков в аспекте надежности при подсинхронном взаимодействии между системами управления генерацией на базе ВИЭ и системами переменного тока с продольной емкостной компенсацией.

© Кучеров Ю.Н., Федоров Ю.Г.,

Березовский П.К., Скуратова Е.В., НП «РНК СИГРЭ», 2014

- **C4-108** *N. Miller, M. Shao, S. Pajic, R. D'Aquila, K. Clark* (США).
Регулирование частоты в Восточном энергообъединении США в условиях широкого распространения ветрогенерации.
- **C4-109** *K. Yoshimoto, T. Nanahara, Y. Wazawa, M. Kubo, Y. Kataoka, S. Imai* (Япония).
Краткосрочные колебания мощности фотоэлектрических установок в Японии. Методика оценки колебаний при крупномасштабной интеграции.
- **C4-110** *E.N. Dialynas, L.G. Daoutis, V. Kyriakides* (Греция).
Оценка надежности энергосистем, связанных с изолированными системами, в состав которых входят фотоэлектрические установки и ветроэлектростанции.
- **C4-111** *T. Gallery, Y. Coughlan, C. Mccarthy, S. Grimes* (Ирландия).
Среднесрочные исследования динамической устойчивости больших изолированных энергосистем с высокой долей ветрогенерации.
- **C4-112** *F.M. Koers, H. Landau, G.E. Tap, L.E. Juhlin, O. Andersson, J. Skansens* (Нидерланды, Германия, Швеция).
Электромагнитная совместимость прибрежных передач постоянного тока высокого напряжения в задачах планирования развития ЭЭС.
- **C4-113** *C. Stanescu, D. Ilisiu, S. Gheorghe, D. Apetrei, P. Postolache* (Румыния).
Влияние ветро- и солнечной генерации на качество электроэнергии в энергосистеме Румынии.
- **C4-114** *C. Madtharad, J. Warman* (Тайланд, Австралия).
Влияние первой ветроэлектростанции, установленной в Королевстве Таиланд, на качество электроэнергии, снижение негативных воздействий на ЭЭС.
- **C4-115** *J.V. Milanovic, M.H.J. Bollen, N. Cukalevski - ON BEHALF OF CIGRE/CIREN JWG C4.112* (Великобритания, Швеция, Сербия).
Указания по мониторингу качества электроэнергии в современных электрических сетях и в электрических сетях будущего (по результатам деятельности совместной рабочей группы CIGRE/CIREN C4.112).

Доклады по предпочтительной теме 2:

«Методы и способы оценки воздействия молнии и координация изоляции»

- **C4-201** *J. He, X. Wang, R. Zeng* (Китай).
Сравнение модели развития лидера и Электро-Геометрической Модели для анализа молниезащиты ЛЭП.
- **C4-202** *S. Sun, G. Tremouille, G. Marquezin, T. Berteloot, P. Vinson, A. Giraudet* (Китай, Франция).

© Кучеров Ю.Н., Федоров Ю.Г.,

Березовский П.К., Скуратова Е.В., НП «РНК СИГРЭ», 2014

Моделирование и экспериментальные испытания сверхбыстрых переходных процессов (перенапряжений) для разъединителей КРУЭ, напряжением 500 и 800 кВ.

- **C4-203** *P. Bunov, D. Biswas, J. Hunt, A.J.F. Keri, R. Thallam, L. Klingbeil* (Германия, США).

Применение мощных линейных разрядников для повышения устойчивости ЛЭП, напряжением 500 кВ, к коммутационным перенапряжениям.

- **C4-204** *A.V. Shurupov, A.V. Kozlov, E.M. Bazelyan, A.N. Chulkov* (Россия).
Новые технологии регистрации токов молнии с высоким разрешением.
- **C4-205** *L. Rouco, L. Sigrist, H. Gago, E. Palazuelos, J. Bernal, M.A. Jimeno* (Испания).

Защита силовых трансформаторов, подключенных к КРУЭ, от грозовых перенапряжений.

- **C4-206** *H. Goshima, K. Hidaka, J. Takami, T. Saida, S. Yoshiike, Y. Matsushita* (Япония).

Принципы координации изоляции и меры по снижению уровней изоляции в Японии.

- **C4-207** *Iryani Mohamed Rawi, Mohd Zainal Abidin Ab Kadir* (Малайзия).
Эффективность применения импульсных разрядников на ЛЭП Куала Край – Гуа Мусанг, напряжением 132 кВ.

Доклады по предпочтительной теме 3:

«Передовые методы, модели и инструменты для анализа технических характеристик энергосистемы»

- **C4-301** *L. Gérin-lajoie, J. Mahseredjian, S. Guillon, O. Saad* (Канада).
Моделирование лавины напряжения, вызванной геомагнитными возмущениями – проблемы и решения.

- **C4-302** *D.A.N. Jacobson, S. Shelemy, W. Chandrasena, D. Boteler, R. Pirjola* (Канада, Финляндия).

Разработка передовых инструментов анализа индуцированного геомагнитного тока для сети передачи провинции Манитоба.

- **C4-303** *Y. Vernay, S. Deschanvres, Y. Fillion* (Франция).

Опыт оператора RTE в применении изолированных кабелей переменного тока сверхвысокого напряжения.

- **C4-304** *S. Dennetière, O. Saad, A. El-akoum, X. Legrand, A. Xémard, J. Mahseredjian, H. Motoyama* (Франция, Канада, Япония).

Вовлечение энергопредприятий в разработку инструментов моделирования электромагнитных переходных процессов.

- **C4-305** *F. Palone, M. Rebolini, S. Lauria, M. Schembari, J.P. Vassallo* (Италия, Мальта).

Исследование работы межсистемной ЛЭП Мальта-Сицилия в различных диапазонах частоты

- **C4-306** *K. Patil* (США).
Моделирование и оценка влияния геомагнитных возмущений на электроэнергетическую систему.
- **C4-307** *J. Taylor, V. Singhvi, A. Tarditi, M. Van Harte* (США, ЮАР).
Применение метода оценки уязвимости перед геомагнитными возмущениями на модели сети передачи *Eskom*.
- **C4-308** *M. Val Escudero, S. Murray, J. Ging, B. Kelly, M. Norton* (Ирландия).
Анализ гармонических колебаний в кластерах ветроэлектростанций, использующих высоковольтные кабели подземной прокладки в сети передающей сети Ирландии.
- **C4-309** *L. Wu, M. Achterkamp, J.P.W. De Jong, P.A.A.F. Wouters, W.L. Kling, M. Popov, E.F. Steennis* (Нидерланды).
Анализ работы ЛЭП комбинированной прокладки (надземной/подземной) с компенсирующими контурами и заземляющими устройствами в различных диапазонах частоты
- **C4-310** *A. Holdyk, J. Holboell, E. Koldby, A. Jensen* (Дания).
Анализ воздействия на резонанс прибрежных ветроэлектростанций, с учетом их расположения