



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 С2 «Функционирование и управление энергосистем» CIGRE, 25-29 августа 2014 года, Париж (Франция)



Отчет подготовили: **Дьячков Владимир Анатольевич,**

к.т.н., заместитель главного диспетчера по режимам ОАО «СО ЕЭС» (Москва), член CIGRE с 2004 г., постоянный представитель от России в Study Committee CIGRE C2 «[System Operation and Control](#)» с 2012 г., руководитель Подкомитета РНК СИГРЭ С2 «Функционирование и управление энергосистем» с 2014 г.



Федоров Юрий Геннадьевич,

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



Репина Елена Анатольевна,

главный специалист Службы электрических режимов ОАО «СО ЕЭС» (Москва), член РНК СИГРЭ с 2013 г.



Контактные данные:

E-mail: dyach@so-ups.ru // fedorov-yg@so-ups.ru // repina@so-ups.ru
Тел. +7 (495) 627-95-24 // +7 (499) 788-17-52 // +7 (495) 627-95-67

Дата отчета:

06.10.2014

Москва, 2014 год

Оглавление

1. Общие сведения о SC C2 «Функционирование и управление энергосистем».....	3
2. Общий обзор докладов и дискуссии на Сессии.....	4
3. Предпочтительная тема 1 «Решение новых задач оперативного планирования и управления электроэнергетическими системами».....	6
4. Предпочтительная тема 2 «Новые вопросы взаимодействия передающих и распределительных сетей».....	15
Приложение	21

1. Общие сведения о SC C2 «Функционирование и управление энергосистем»

Исследовательский комитет (Study Committee) CIGRE SC C2 «Функционирование и управление энергосистем» (System operation and control) рассматривает вопросы обеспечения функционирования энергосистем, управления перегрузками, ликвидации аварийных ситуаций, в том числе различные стратегии восстановления энергосистем после аварий и технологических нарушений, функциональных возможностей и надежности диспетчерских центров, а также тренировки оперативного и диспетчерского персонала. В целом, исследовательский комитет SC C2 занимается техническими функциями, структурами и компетенциями, необходимыми для управления объединенными энергосистемами в соответствии с установленными требованиями по надежности и качеству электроснабжения потребителей.

Область исследования SC C2 включает следующие направления:

1. Управление режимом работы и переключения на объектах электроэнергетики, регулирование напряжения, регулирование частоты, мониторинг и управление потоками мощности для предотвращения перегрузок.
2. Управление режимом работы энергосистем и объектов электроэнергетики в аварийных ситуациях, действия при возникновении аварий и технологических нарушений и восстановление энергосистемы.
3. Краткосрочное планирование, выбор состава оборудования, планирование ремонтной кампании.
4. Оценка и сопоставительный анализ режимов работы энергосистемы по стандартным показателям.
5. Влияние на цели, методы и результаты управления энергосистемой со стороны институциональных структур: системного оператора, регулятора, участников рынка, а также функционирование рынка системных услуг.
6. Требования, методы, инструменты (тренажеры) и критерии оценки подготовки диспетчерского и оперативного персонала.
7. Разработка и использование результатов анализа режимов работы энергосистемы и оценки ее надежности в процессе оперативного планирования и управления.
8. Информационные и телекоммуникационные средства поддержки диспетчерского персонала.

Руководством и организацией деятельности SC C2 в настоящее время занимаются представители Германии (от оператора передающих сетей Amprion) – председатель **Joachim Vanzetta** и секретарь **Christoph Schneiders**. В исследовательском комитете SC C2 состоят 24 национальных представителя и 14 членов-наблюдателей.

2. Общий обзор докладов и дискуссии на Сессии

Для обсуждения представлены 36 докладов, которые сгруппированы по двум предпочтительным темам:

PS 1 «Решение новых задач оперативного планирования и управления электроэнергетическими системами» – 24 доклада;

PS 2 «Новые вопросы взаимодействия передающих и распределительных сетей» – 12 докладов.

С полным перечнем докладов можно ознакомиться в [Приложении](#) к настоящему Отчету.

По представленным докладом подготовлены обзорные отчеты и вопросы для обсуждения. Обозревателями докладов в указанных тематиках выступили: **Susana de Almeida de Graaff** (системный оператор Tennet, Нидерланды) и **Paulo Gomes** (системный оператор ONS, Бразилия) соответственно.

По тематике PS 1 «Решение новых задач оперативного планирования и управления электроэнергетическими системами» предложены для обсуждения следующие вопросы:

- Анализ устойчивости, мониторинг и управление, в том числе регулирование напряжения и частоты, устойчивость по углу.
- Использование нагрузочной способности линий электропередачи и динамическая оценка допустимой нагрузки ЛЭП.
- Системные услуги, включая оперативный резерв мощности.

Системные операторы постоянно сталкиваются с вызовами в развивающихся энергосистемах, которые требуют оценки эксплуатационной надежности, новых методов, парадигм и более сложных, близких к режиму реального времени и скоординированных подходов к управлению режимами работы энергосистем. Новые вызовы, например, интеграция ВИЭ, новых технологий и повышение резкопеременных режимов работы генерации под воздействием рыночных механизмов, ставят энергосистему в условия, близкие к пределам по устойчивости. Во всех докладах эти вызовы обозначены, и это дает четкий сигнал о том, что системные операторы внимательно смотрят в будущее, внедряя в практику эксплуатации энергосистем и управления режимами ее работы такие решения как динамическая оценка надежности (DSA), устройства векторных измерений (PMU), системы глобального мониторинга (WAMS), динамическая оценка нагрузочной способности линий электропередачи (DLR), оценка и управление риском и др.

По тематике PS 2 «Новые вопросы взаимодействия передающих и распределительных сетей» предложены для обсуждения следующие вопросы:

- Интерфейсы для систем передачи, распределения и потребления электроэнергии.
- Интерфейсы диспетчерских центров и операторов рынка.
- Образование и обучение операторов.
- Оперативные вопросы наблюдаемости и информированности.
- Требования к моделированию и обмен данными.
- Управляемость распределенной генерации.
- Управление уровнем токов короткого замыкания.
- Управление потреблением.

Задачей современной ЭЭС является обеспечение надежного электро-снабжения, которое должно удовлетворять противоречивым требованиям, таким как: надежность и энергетическая безопасность, экономичность, экологические ограничения и низкие тарифы.

В последнее время со стороны общества предъявляются требования уменьшения выбросов углекислого газа. В ряде стран мира это привело к широкому внедрению возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и распределенной генерации (РГ) с целью замещения тепловых электростанций на угле и жидком углеводородном топливе. Другой особенностью является отторжение обществом атомных электростанций ввиду сопутствующих рисков, принимая во внимание последние события в Японии в 2011 году. Эти факты ведут к частичной потере управляемости ЭЭС, что приводит к необходимости переосмысления подходов к управлению ЭЭС, внедрению развитой логики и повышению эффективности.

В дискуссии по обозначенным вопросам в ходе открытого обсуждения выступило более 150 участников, включая 35 сообщений по тематике PS 1 и 19 сообщений по тематике PS 2.

В ходе обсуждения по тематике PS 1 затронуты вопросы применения WAMS, WAMPAC и PMU, динамической оценки допустимой нагрузки ЛЭП, региональной координации по обеспечению надежности, повышению пропускной способности сети, интеграции ВИЭ, управления спросом и стратегии восстановления энергосистемы после аварий и технологических нарушений.

По тематике PS 2 рассмотрены вопросы интерфейсов для передающих и распределительных сетей, потребителей, диспетчерских центров и операторов рынка, образования и подготовки оперативного персонала, наблюдаемости, расчетных моделей и информационного обмена, управляемости распределенной генерации, координации уровней токов короткого замыкания, управления спросом. Более 50% сообщений касались аспектов интеграции ВИЭ и распределенной генерации в энергосистему.

3. Предпочтительная тема 1 «Решение новых задач оперативного планирования и управления электроэнергетическими системами»

В докладе С2-101 рассматривается комбинированный принцип оценивания состояния параметров электроэнергетического режима, сочетающий применение иерархического и распределенного подхода. В предлагаемом подходе различные области, в которых выполняется оценивание состояния, предоставляют данные для выполнения оценивания для других областей в целях получения начальных результатов оценки.

Поскольку первоначальные результаты оценивания состояния могут быть не вполне достоверными, после первого этапа оценивания реализуется второй этап, позволяющий получать более надежные и устойчивые результаты. Также особенностью предлагаемого алгоритма является то, что на начальном этапе выполнения оценивания энергорайоны с недостоверной телеметрической информацией могут быть исключены из рассмотрения, что позволяет получать более качественные результаты оценивания в наблюдаемой части энергосистемы.

Применение иерархического подхода в составе предлагаемого комбинированного метода также позволяют решить проблему возможных сбоев и нарушений в системе обмена информацией между отдельными энергорайонами, в которых выполняется оценивание, а также между различными уровнями оценки. При наличии указанных сбоев результаты оценивания состояния на любом локальном уровне могут быть доступны и использованы в различных целях, например, при управлении электроэнергетическим режимом, разумеется, при определенных ограничениях. Вычислительная нагрузка для реализации полной процедуры оценивания состояния в больших энергосистемах в целом снижается, поскольку каждый последующий уровень оценки выполняет лишь проверку качества оценки предыдущего (как правило, оцененных параметров режима, общих для двух рассматриваемых энергорайонов).

Для проверки работоспособности данной структуры оценивания телеинформации проводилось тестирование на модели электрической сети напряжением 500 кВ Колумбийской энергосистемы, показавшее работоспособность предлагаемых подходов и алгоритмов.

В докладе С2-102 представлен опыт электросетевых компаний Австралии и Новой Зеландии, а также австралийского оператора рынка электроэнергии. Поставщики услуг по передаче электроэнергии в Австралии и Новой Зеландии используют динамическую оценку нагрузочной способности ЛЭП для повышения степени использования пропускной способности сети и уменьшения затрат на обслуживание и эксплуатацию электрооборудования. Представлено описание тепловой модели, которая используется для динамической оценки, а также результаты полевых и лабораторных испытаний по

проверке достоверности модели. Обсуждается вопрос о повышении в перспективе степени использования нагрузочной способности ЛЭП с использованием метода оценивания кратковременной перегрузочной способности ЛЭП в переходных режимах.

Доклад С2-103 посвящен описанию критериев динамической оценки нагрузочной способности ЛЭП, которые эффективно используются при оперативно-диспетчерском управлении. Существующие исследования методов динамической оценки нагрузочной способности ЛЭП направлены на эффективное внедрение данных критериев и разработанных на их базе алгоритмов в процесс оперативно-диспетчерского управления и тем самым на повышение степени использования пропускной способности сети в режиме реального времени. Различные пилотные проекты в Европе и во всем мире показали высокую эффективность данной технологии, при этом особое внимание уделяется возможностям максимально эффективного использования при одновременном снижении рисков при оперативном управлении электроэнергетическими режимами. В докладе описан опыт внедрения технологии динамической оценки нагрузочной способности ЛЭП в Бельгийском операторе передающих сетей – Elia.

В докладе С2-104 отмечается, что постоянное развитие энергосистем и усложнение конфигурации сети в условиях присоединения ранее изолированных энергорайонов к системообразующей сети приводят к достижению предела использования пропускной способности сети. Для крупной единой электроэнергетической системы Бразилии с мощными гидроузлами и необходимостью обмена электроэнергией между разными частями энергосистемы, а также расширением объема использования ВИЭ, возможность объединения с энергосистемами соседних стран представляет собой сложную задачу с точки зрения оперативного планирования и обеспечения надежности функционирования энергосистемы. Разрабатываются несколько сценариев такого объединения, а также новые средства расчета статической и динамической устойчивости как для нормальной схемы, так и для послеаварийных режимов. В докладе описывается разработанный в исследовательском центре CEPREL совместно с университетами Бразилии вычислительный инструмент параллельных вычислений для оценки статической и динамической надежности больших энергосистем. Приведены результаты тестирования на 9-узловой модели и реальной схеме энергосистемы Бразилии.

В докладе С2-105 представлен опыт французского оператора передающей сети. В связи с использованием большого числа электронагревательных приборов в электрической сети, в последнее время французская энергосистема сталкивается с историческими максимумами электропотребления, особенно зимой, в период низких температур. Кроме того, развитие ВИЭ, увеличение энергообменов на рынке, рост управляемого спроса – все это

приводит к необходимости реализации оптимального управления в режиме, близком к режиму реального времени, близком к пределам по условиям надежности, а также в постоянно меняющейся среде. Следствием этого является необходимость развития методик и средств управления.

В вопросах регулирования напряжения французский оператор передающих сетей сталкивается как с проблемами низких уровней напряжения и риском возникновения лавины напряжения, особенно в периоды максимального электропотребления, так и высоких уровней напряжения в периоды минимальных нагрузок, что только усугубляется увеличивающейся долей ВИЭ.

В докладе описаны разработанные французским оператором RTE методология и средства анализа, основанные на динамическом моделировании и анализе риска на разных временных интервалах, процессы и правила эксплуатации, обеспечивающие корректное представление режима с использованием наиболее эффективных средств прогнозирования, приведена информация о средствах автоматического регулирования напряжения в нормальных и аварийных режимах.

Доклад С2-106 посвящен вопросам региональной координации планирования и управления режимами работы энергосистем в Европе и содержит первые результаты исследований, начатых в 2013 году. Отличие фактической и прогнозной схемно-режимной ситуации – одна из основных проблем в области управления электроэнергетическими режимами. Большое число переменных факторов может привести к критической разнице между прогнозом электроэнергетических балансов «на день вперед» и реально сложившейся ситуацией. Одним из решений этой проблемы является модернизация процесса суточного и внутрисуточного планирования.

В докладе подробно рассмотрен процесс внутрисуточного планирования в рамках региональной программы CORESO и TSC в западных и восточных районах центральной части Европы:

- непрерывные и автоматически обновляемые прогнозы, основанные на доступном прогнозном значении нагрузки потребителей, генерирующей мощности (включая ВИЭ), перетоков мощности в электроэнергетической системе, а также топологии сети;
- объединение данных об ограничениях в сети на каждый расчетный час;
- оценка надежности и расчет режимов для расчетного часа с целью предупреждения операторов о необходимости реализации управляющих воздействий и координации;
- оперативная координация при реализации противоаварийных мероприятий на большой территории.

Доклад С2-107 рассматривает задачу оценки устойчивости по напряжению. Все операторы передающей сети непрерывно контролируют пара-

метры электрического режима для обеспечения их нахождения в области допустимых значений как в нормальном режиме, так и в послеаварийном (соблюдая критерий N-1). При обычном анализе перетоков мощности допускается, что максимальная располагаемая реактивная мощность электростанции не зависит от напряжения. Это упрощение, однако, приводит к излишне оптимистическим результатам, поскольку максимальная располагаемая реактивная мощность снижается со снижением напряжения. В докладе представлена расширенная модель генератора, учитывающая указанную зависимость, а также информация о ее практическом применении.

В докладе C2-108 описан сценарий развития электроэнергетической системы Индии, начиная со строительства нескольких региональных сетей до этапа объединения их в единую электроэнергетическую систему. Быстрое развитие электроэнергетической отрасли и рынка электроэнергии и мощности привело к проблемам, связанным с ограничениями передачи мощности из-за приближения к пределу использования пропускной способности сети. При наблюдающихся высоких темпах роста возрастает и степень неопределённости в прогнозировании развития, долгосрочных прогнозах балансовых ситуаций. В докладе представлен подход к решению этой проблемы – обработка большого массива информации с большой степенью неопределённости с учетом требований разработанных нормативных документов.

В докладе C2-109 рассматривается электроэнергетическая система Индии, которая прошла эволюционный путь развития от нескольких изолированно работающих региональных энергорайонов до двух крупных объединенных энергосистем. В ближайшее время планируется объединение этих энергосистем в единое целое с установленной мощностью генерации в единой энергосистеме 223 ГВт.

Размер и сложность топологии электрической сети в энергосистеме Индии увеличивается также в связи с такими факторами как рост спроса на электроэнергию, строительство новых генерирующих источников (в том числе возобновляемых), необходимость передачи большого объема электроэнергии на дальние расстояния. С увеличением конкуренции на рынке электроэнергии и мощности, в условиях больших сезонных колебаний нагрузки потребителей, системному оператору необходимо улучшать наблюдаемость параметров электрического режима. Система SCADA способна обеспечить наблюдаемость установившегося режима, в то время как синхрофазоры способны обеспечить наблюдаемость параметров динамических переходных режимов, соблюдая тем самым требования, предъявляемые к современному мониторингу состояния сети. Региональные энергетические системы применяют синхрофазоры с 2010 года. В докладе описан опыт их применения, а также преимущества внедрения данных устройств.

Доклад С2-110 посвящен задачам мониторинга устойчивости. Развитие распределенной генерации в передающей сети с крупными электростанциями, в районах распределительных сетей делает все более актуальной задачу разработки новой технологии контроля устойчивости, создающей более приемлемые условия для интеграции распределенной генерации в существующие энергосистемы.

В основу предлагаемой технологии контроля ограничений на выдачу мощности генераторами по условиям статической аperiodической устойчивости в режиме реального времени положено использование модели режима генераторов в виде многополюсника узлов подключения их электродвижущих сил (матрицы собственных и взаимных проводимостей ЭДС генераторов).

При использовании предлагаемой технологии в распределительной сети с центром питания и включенными в разные узлы генераторами соразмерной мощности реализуется одноуровневая система контроля для всех генераторов распределительной сети, в которой предельные мощности каждого из генераторов определяются для направления утяжеления «генератор – центр питания».

При использовании в передающей сети энергосистемы, содержащей крупные электростанции (генераторы) и распределенную по отдельным узлам генерацию, реализуется двухуровневая система контроля исходя из разделения движений крупной и малой генерации. Устойчивость параллельной работы крупных генераторов оценивается по традиционной технологии. Устойчивость районов с распределенной генерацией – по предлагаемой технологии в условиях контролируемого движения крупных генераторов.

Представлены результаты проверки работоспособности метода и технологии, полученные при компьютерном моделировании режимов ЭЭС, а также на физической модели.

В докладе С2-111 представлена информация о проекте «AGREGA». Так называемый «агрегатор спроса», новый игрок рынка электроэнергии и мощности, способен координировать конечных потребителей и взаимодействовать с системным оператором. Данный исследовательский проект был запущен в 2012 году и был направлен на подготовку электроэнергетических систем к вводу нового рыночного игрока. Проект ведет оператор передающих сетей Испании REE совместно с энергетическим агентством, потребителями и рядом других участников. Суммарная мощность в рамках программы управления потреблением составляет 4 МВт.

В рамках данного проекта разработано программное обеспечение, процедуры управления и верификации данных, а также коммуникационная инфраструктура. Основные инновационные направления проекта «AGREGA»:

- впервые «агрегатор спроса» может взаимодействовать с системным оператором;

- программное обеспечение, процедуры и системы, разработанные системным оператором, согласованы с действующими характеристиками системных услуг и соответствующими процедурами.

В результате применения разработанных в рамках проекта средств удалось улучшить прогнозируемость и управляемость потребления электроэнергии, что в результате привело к лучшему мониторингу и планированию уровня потребления.

Доклад С2-112 описывает итальянский опыт определения допустимой нагрузки высоковольтных линий электропередачи. Предел передаваемой мощности по ЛЭП устанавливается таким образом, чтобы обеспечить все необходимые требования по надежности в энергосистеме. Неадекватная оценка этой величины может увеличить число аварийных событий, в том числе связанных с отключением или снижением мощности генерации (в том числе ВИЭ), что оказывает негативное влияние на зональные цены. В условиях большой доли ВИЭ электрические сети, не рассчитанные на работу в таких условиях, могут оказаться перегруженными. Простым решением этой проблемы является строительство новых ЛЭП, что влечёт за собой значительные финансовые затраты, а также усугубляет экологические проблемы на территории нового строительства. Альтернативным решением является расширение возможностей эксплуатации существующих ЛЭП за счет применения методов оценки загрузки ЛЭП, допустимой по условиям нагрева.

Динамическое определение допустимой нагрузки ЛЭП значительно эффективнее традиционной статической оценки. Это обусловлено тем, что динамические методы учитывают фактические условия эксплуатации, а не среднестатистические, полученные в результате анализа температурной ретроспективы. Кроме того, тепловая инерция проводников позволяет кратковременно нагружать ЛЭП токами, значительно превышающими длительно допустимые значения. Такой подход позволяет увеличить степень использования пропускной способности сети, повысить системную надежность и снизить соответствующие затраты.

В докладе представлен алгоритм динамической оценки допустимой нагрузки реальной ЛЭП, который учитывает зависимость термических деформаций провода и изменения стрелы провеса от длины пролета.

Доклад С2-113 посвящен сотрудничеству европейских системных операторов при решении важнейших задач планирования и управления электроэнергетическими режимами работы энергосистем. Сотрудничество и координация системных операторов происходит по целому ряду ключевых вопросов: создание общеевропейской базы данных стандартов и нормативных документов для обмена информацией, обмен результатами планирования электроэнергетических режимов (еженедельное, ежедневное и внутрисуточное планирование), регулярные видео-конференции с обсуждением результатов работы.

В докладе рассматривается опыт, полученный в результате ликвидации аварий, который привёл к изменениям в процессе планирования, оперативно-го управления и организационного взаимодействия, а также в европейской нормативно-правовой базе. Рассмотрен процесс разработки Сетевых кодексов в ENTSO-E и практический опыт кооперации в рамках программ TSC и CORESO.

В докладе С2-114 рассматривается проблема устойчивости энергосистемы с большой долей ВИЭ. С ростом числа ветровых электростанций операторы передающих сетей уделяют все большее внимание вопросам регулирования частоты. Ветровые турбины с переменной скоростью вращения изолированы от основной электрической сети конверторами и, следовательно, не влияют на инерцию энергосистемы. В случае замещения традиционных электростанций ветростанциями общая эквивалентная инерционная постоянная энергосистемы может значительно уменьшиться.

Инерция энергосистемы может быть определена как совокупность кинетической энергии, запасенной во вращающихся генераторах и электродвигателях, работающих синхронно. В случае снижения частоты в переходном режиме совокупная кинетическая энергия высвобождается и препятствует снижению частоты. С ростом единичной мощности генераторов в энергосистеме и уменьшением инерции системы скорость изменения и глубина снижения частоты при аварийном отключении генерации возрастают, что может привести к нарушению устойчивости.

Ветровые турбины с переменной скоростью вращения могут реализовать закон управления, направленный на компенсацию общей инерции системы. Результаты исследований показали, что вклад ветроустановок, реализующий разработанный закон управления может снизить скорость снижения частоты в переходных режимах.

Доклад С2-115 представляет североамериканский опыт анализа синхронных качаний в энергосистеме. Современная электроэнергетическая система представляет собой большой комплекс со сложной топологией и тысячами генераторов, электропередачами постоянного тока и устройствами FACTS. Системы управления этими устройствами могут работать некорректно, что приводит к возникновению синхронных качаний в энергосистемах. Важной задачей является своевременное выявление этих качаний и мониторинг их развития, а также предотвращение и ликвидация в случае необходимости. Новая технология синхронизированных векторных измерений позволяет обеспечивать выявление подобных качаний.

В докладе приводится выполненный на основании данных синхронизированных векторных измерений параметров электрического режима анализ четырех аварийных событий в западной части США. Анализ выявил низкочастотные колебания, вызванные системами управления или большими возмущениями: 0,6 – 0,7 Гц от генератора в Монтане в октябре 2003 года; 0,28 –

0,29 Гц от генератора в Альберте (Канада) в ноябре 2005 года; 3,6 – 4,5 Гц от системы управления вставкой постоянного тока в Орегоне в январе 2008 года; 0,28 Гц в сечении Север-Юг при аварийном отключении ЛЭП 500 кВ в Альберта в августе 2000 года.

Доклад С2-116 посвящен актуальной задаче сближения подходов по релейной защите и планированию. В выводах Североамериканской корпорации по надежности (NERC) по результатам анализа аварии в энергосистеме США в августе 2003 года указано, что настройка защит ЛЭП, генераторов и автоматики отключения нагрузки при снижении частоты могли быть недостаточно адекватны, а также не были скоординированы с целью совместного действия по снижению вероятности и последствий каскадного развития аварии. Кроме того, сама необходимость подобной координации ранее не рассматривалась.

В докладе представлена новая имитационная платформа, разработанная в США, которая сочетает анализ электромеханических переходных процессов и действия релейной защиты, позволяя проводить полный анализ динамических свойств системы и проектировать алгоритмы противоаварийной автоматики с учетом каскадных отключений.

В докладе С2-117 рассматривается задача противоаварийного управления. Ввиду затруднений с отводом земель под электростанции новые крупные электростанции сооружаются вдали от центров потребления и присоединяются к существующим сетям 765 кВ. Примером является электростанция Joetsu в Японии мощностью 2380 МВт, присоединенная к радиальной передающей сети региона Нагано протяженностью порядка 300 км. Возникновение междуфазных коротких замыканий на этой электропередаче может вызвать не только нарушение устойчивости, но и существенные колебания напряжения. Кроме того, в случае отключения линии электропередачи или внезапного изменения нагрузки электростанции Joetsu возникающие качания не могут быть устранены ни действием традиционной противоаварийной автоматики, ни в ручном режиме.

В докладе показана система «объединенного контроля устойчивости», которая применяется в Нагано с 2012 года для управления электрическими сетями с протяженными ЛЭП. Внедрение этой системы позволило обеспечить надежную работу энергосистемы и уменьшить затраты на сооружение ЛЭП (порядка 800 млн евро). Представлен опыт управления такой системой, относящейся к Smart Grid, а также описаны возможности ее применения в различных ситуациях.

Доклад С2-118 описывает применяемую в Мексике систему оценки надежности в режиме реального времени. В диспетчерских центрах энергосистемы Мексики с 2006 года применяется программа оценки надежности установившихся режимов ESEE, которая спроектирована для оценки устой-

чивости по напряжению в установившемся режиме, расчета PV-кривых и определения предельных значений передаваемой мощности и запасов по реактивной мощности. Для наиболее тяжелых случаев поводится оценка устойчивости в переходных режимах, что является новой функциональной возможностью программного комплекса.

В докладе С2-119 рассматривается возможность применения динамического управления напряжением, потоками активной и реактивной мощности в передающей электрической сети Катара. В перспективе после 2015 года энергосистема может столкнуться с рядом сложностей в области планирования и управления электроэнергетическими режимами. Рассматриваются возможные пути решения этих проблем, включая замену проводов ЛЭП, установку устройств продольной компенсации и применение инновационных устройств (FACTS) и средств управления. Приведены сценарные примеры расчетов для стадии планирования, а также рассмотрены общие методы оптимизации для выбора мест размещения FACTS и обеспечения оптимального потокораспределения в электрической сети.

Доклад С2-120 представляет итоги исследования и процесса пересмотра Системного кодекса в области водного хозяйства и электроснабжения с учетом планируемой интеграции ВИЭ и атомных электростанций, который был проведен Управлением Абу-Даби. Также рассматриваются соответствующие проблемы в области оперативного управления.

В докладе представлены результаты пересмотра Кодекса передающих сетей, а также дополнения, рекомендованные для включения в Системный кодекс.

Доклад С2-121 представляет описание системы синхронных измерений в передающих электрических сетях Ирландии. В настоящее время в Ирландии установлено 18 устройств PMU в сетях напряжением 110-400 кВ, которые предназначены для измерения частоты, фазных напряжений и токов на генераторах тепловых электростанций, крупных ВИЭ, в критически важных узлах сети, а также на двух вставках постоянного тока связи с энергосистемой Великобритании. Рассматриваются преимущества применения PMU для задач оперативного управления в энергосистеме, например, в части противоаварийного управления, уточнения моделей электрической сети, развития систем управления, анализа возмущений, синхронизации изолированных частей энергосистемы и многих других.

В докладе С2-122 рассматривается возможность применения координированного Q-U управления (CQVC) для обеспечения вторичного регулирования напряжения на электрических станциях, которая детально проанализирована в исследованиях по применению нескольких скоординированных

устройств управления в энергосистеме. Система CQVC может также использоваться для расчета стоимости производства реактивной мощности.

В докладе C2-123 представлен опыт системного оператора Италии по определению, оценке и проверке стратегии восстановления энергосистемы в координации с соседними операторами, в особенности со швейцарским, с минимизацией количества переключений и времени восстановления. Описан опыт подготовки и выполнения испытаний по восстановлению энергоснабжения энергосистемы Италии от Швейцарии, проведенных 6 января 2013 года с целью развития стратегии восстановления и обеспечения соответствия требованиям Эксплуатационного кодекса ENTSO-E.

Новый подход к реализации стратегии восстановления учитывает возможности регулируемых шунтирующих реакторов на подстанциях 400 кВ передающей сети Италии, что позволяет создавать длинные цепочки в схеме восстановления электроснабжения от энергосистем соседних стран.

В докладе также рассмотрен полный комплекс необходимых мер, включая оперативные мероприятия, обучение оперативного персонала на тренажере и анализ состояния и режимов работы электрической сети в установившихся и переходных режимах.

Доклад C2-124 описывает развитие системы мониторинга и управления WAMAC в энергосистеме Кореи. Система базируется на EMS и данных PMU, а также реализует двухступенчатую систему ограничения нагрузки. Информация поступает от 40 устройств PMU, установленных на 28 подстанциях напряжением свыше 345 кВ в агломерации Сеула. Первая ступень противоаварийной автоматики действует на отключение 1000 МВт нагрузки потребителей, вторая отключает 500 МВт только в случае необходимости.

Новая система противоаварийного управления позволяет обеспечить устойчивость по напряжению и уменьшить объем отключаемой нагрузки потребителей для большинства случаев. Это противоаварийное мероприятие успешно прошло тестирование на RTDS.

4. Предпочтительная тема 2 «Новые вопросы взаимодействия передающих и распределительных сетей»

В докладе C2-201 рассматриваются крупные отключения ветрогенерирующего оборудования в Китае, суммарная установленная мощность которого превысила 60 ГВт в 2012 году, а в перспективе может достигнуть 150 ГВт в 2015 году и 200 ГВт в 2020 году. В последнее время часто фиксируются отключения ветрогенераторов, например, в 2011 году зафиксировано 193 случая, из которых 12 связаны с аварийным небалансом более 500 МВт. Одной из основных причин отключений стало превышение предельных эксплуатационных значений напряжения для ветроустановок вследствие замедленной

реакции компенсирующих устройств на ветростанциях и избытка реактивной мощности в энергосистеме.

В докладе предложена превентивная стратегия, которая включает скоординированное управление реактивной мощностью ветротурбин и компенсирующих устройств, а также обеспечение выполнения требований к ветротурбинам по способности выдерживать повышенные уровни напряжения (HVRT). Эффективность предлагаемых мер проверена и подтверждена путем соответствующего моделирования.

Доклад С2-202 посвящен проблеме стремительного развития электрического отопления во Франции и, как следствие, повышению чувствительности потребления электроэнергии к температуре воздуха. За последние 10 лет общее энергопотребление выросло на 10 %, в то время как пиковое потребление выросло на 30 %, в результате чего проблема ограничений в передающей сети в районах с недостаточной собственной генерацией становится все более актуальной.

Новый закон от апреля 2013 года создает основу для развития ресурсов управления электропотреблением и рыночных механизмов. В докладе представлено описание нового рыночного механизма (NEBEF), который был разработан для оценки возможности управления потреблением (DSM) с помощью независимого оператора, который выступает как агрегатор.

Реализация нового подхода представляет сложности для операторов электрических сетей. Распределенные ресурсы управления электропотреблением с одной стороны требуют детальной информации о размещении отдельных узлов электропотребления в сети (аналог проблемы распределенной генерации), а с другой стороны, предоставляют новые возможности по предотвращению нарушений в случае наличия ограничений в сети и требований по обеспечению баланса потребления и производства электроэнергии.

В докладе С2-203 рассматривается ситуация в Германии, где внедрение ВИЭ приводит к росту генерирующей мощности в распределительных сетях и вытеснению тепловых электростанций с рынка. С учетом роли ВИЭ в структуре электроэнергетики будущего актуальной является задача корректировки подходов к управлению режимами работы энергосистемы в части усиления взаимодействия операторов передающих и распределительных сетей.

В докладе представлено также описание нового устройства управления активной и реактивной мощностью (P-Q контроллер) для распределительных сетей, с помощью которого возможно управлять потоками мощности в точках подключения к передающей сети, предоставляя оператору передающей сети технические ресурсы для нормализации режима, а также позволяя совместно учитывать маневренные характеристики потребителей с управляемой нагрузкой, накопителей электроэнергии и средств регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности. Преимуществом такого подхода к

управлению является широкий круг возможностей по управлению мощностью независимо от обуславливающих необходимость управления причин.

Для управления активной мощностью распределенных устройств используется радио-управление с помощью пульсирующих сигналов, а в сети среднего и высокого напряжения – система телеуправления на базе стандарта IEC 60870-5-104.

Возможности предложенного подхода опробованы с помощью численного моделирования на примере реальной сети. Ключевым условием является возможность удаленного управления распределенными источниками, которая не реализуется на большинстве существующих установок. В будущем концепция управления с учетом мощностей P-Q на связях между различными уровнями электрической сети может использоваться при планировании режима с целью оптимизации обменов активной и реактивной мощностью между системообразующей и распределительной электрическими сетями.

Доклад C2-204 иллюстрирует сложности, с которыми могут столкнуться операторы передающих сетей при существенном и быстром изменении потокораспределения, вызывающем появление ограничений на границах сети. Это вызывает увеличение затрат на устранение ограничений, которые обусловлены спросом на услуги по регулированию на спотовом рынке и реализуется посредством договорных отношений. В качестве альтернативной меры, которая позволяет избежать затратных мероприятий по усилению сети или минимизировать затраты по изменению состава генерирующего оборудования, предложено применять скоординированное управление фазоповоротными трансформаторами.

Модель управления основана на оптимизационных методах программирования с элементами декомпозиции. Применяется итерационный подход по оптимизации потокораспределения с учетом режимных ограничений после возникновения расчетных возмущений. В качестве исполнительных устройств используются фазоповоротные трансформаторы или HVDC-вставки, находящиеся в управлении национального оператора передающей сети.

Использование быстрых и надежных расчетных методов обеспечивает возможность применения модели в режиме реального времени и на стадии оперативного планирования. На расчетных примерах показаны преимущества скоординированного применения фазоповоротных трансформаторов для энергосистемы Великобритании.

Доклад C2-205 посвящен проблеме повышения функциональности SCADA с целью повышения эффективности работы энергосистемы. В докладе приведено описание модификаций, которые были внедрены в конфигурацию региональной системы SCADA в Японии с целью создания интегрированной региональной системы SCADA на базе внутренней IP сети, которая может использоваться как резервная система в случае аварий в диспетчер-

ском центре. Модель управления базируется на концепции многостороннего доступа.

Конфигурация SCADA-системы представлена на примере системы управления энергосистемы Хакайдо. Новая система управления введена в эксплуатацию в марте 2013 года, а к декабрю 2014 года запланирована полная замена существующих SCADA систем на новые.

Доклад С2-206 рассматривает задачу сбора и обработки информации в передающих и распределительных сетях в условиях роста установленной мощности распределенной генерации, присоединяемой на низком напряжении. Рассмотрены примеры координации между системой управления режимами работы передающей и распределительной сети. Подобная координация позволяет обеспечить быстрое восстановление энергосистемы в послеаварийных режимах, а также мониторинг состояния оборудования потребителей. Кроме того, проиллюстрированы новые функции, способные обеспечить устойчивое электроснабжение при присоединении значительного количества фотоэлектрических генерирующих установок.

Доклад С2-207 показывает, каким образом внедрение ВИЭ в распределительную сеть энергосистемы Южной Африки вызвало необходимость ряда изменений в части обязанностей диспетчерских центров распределительной сети и формирования новых требований по информационному обмену. В центрах управления распределительной сетью собирается информация от SCADA и других источников, которая в обобщенном виде предоставляется в диспетчерский центр национального оператора Eskom в структурированном виде и с использованием стандартных средств визуализации. Также в докладе рассматривается концепция присоединения ВИЭ к энергосистеме.

Доклад С2-208 посвящен проблеме оперативного управления в современных условиях с учетом массивной интеграции ВИЭ, кооперации европейских системных операторов и формирования единого европейского рынка электроэнергии. Авторы анализируют интеграцию процессов управления в голландском системном операторе TenneT, показывая сложности в части формулирования общих и частных требований, ИТ-инфраструктуры и учета потребностей субъектов электроэнергетики и субъектов управления. Внимание уделяется процессам, близким к режиму реального времени, которые представляют наибольшую сложность.

Доклад С9-209 представляет развитие темы диспетчерского управления в условиях интеграции распределенной генерации и ВИЭ, которой занимается рабочая группа СИГРЭ С 2.16. В докладе представлены перспективные вызовы по эксплуатации ВИЭ и распределенной генерации, которые рассматриваются в пяти аспектах: организационные (положение дел и будущие вызовы), оперативная деятельность (ограничения в сетях и управление

напряжением), наблюдаемость и управляемость (надежность системы и технические возможности), нормативные и коммерческие аспекты. В докладе анализируется информация основных мировых энергосистем в части подходов к управлению ВИЭ. Материалы доклада войдут в итоговый обзор по рассматриваемой проблеме, который будет опубликован в Технической брошюре СИГРЭ, выпуск которой запланирован в 2015 году.

Доклад С2-210 содержит описание вероятностного подхода к оценке работоспособности энергосистемы. Авторы предлагают несколько показателей работоспособности, которые классифицируются в отношении режимной и балансовой надежности энергосистемы. Четыре показателя отнесены к балансовой надежности (частота, напряжение в электрической сети, резерв мощности, загрузка электросетевого оборудования) и четыре – к режимной (напряжение, загрузка электросетевого оборудования, пределы пропускной способности, противоаварийная автоматика). В докладе рассматривают три области анализа – работоспособность, резерв и риск, основанные на критериях надежности. Предложенный подход позволяет обеспечить наглядную поддержку диспетчерского персонала при оперативном управлении для быстрой оценки ситуации и принятия эффективных решений.

Доклад С2-211 посвящен проблеме ограничения токов короткого замыкания (КЗ) в энергосистеме Кореи в условиях роста нагрузки. Авторы предлагают интерактивный метод и построенный на его основе алгоритм для осуществления реконфигурации сети, который сочетает поиск оптимального потокораспределения в условиях требуемого ограничения токов КЗ. Алгоритм предназначен для принятия решений о необходимости деления сборных шин или размыкании линий электропередачи (секционирования электрической сети) для уменьшения уровня токов КЗ с учетом фактических отключающих способностей коммутационного оборудования. В докладе предложен новый подход по минимизации числа мест секционирования с учетом информации о топологии сети, актуальных ограничений по уровню токов КЗ и количества требуемых операций по делению сети. Приведены результаты применения алгоритма для энергосистемы Кореи размерностью в расчетной модели объемом 1338 узлов.

В докладе С2-212 рассматривается методология анализа риска, которая была применена португальским оператором передающих электрических сетей с целью более эффективного использования пропускной способности сети. Современные вызовы в области оперативного управления связаны с методами прогнозирования, мониторинга и анализа в режиме реального времени, а также применением вероятностных методов. Показатели риска основаны на вероятности и тяжести возмущения и рассчитываются на основании информации о внешних условиях эксплуатации (температура, влажность, грозовая активность, лесные пожары) и анализе отказов из расчетного переч-

ня N-к. В докладе проиллюстрированы результаты применения вероятностного подхода для ЛЭП разных классов напряжения и представлены предложения по развитию и улучшению методики.

Приложение

Перечень докладов 45-й Сессии CIGRE 2014 г. по направлению SC C2 «Функционирование и управление энергосистем»

PS1: Решение новых задач оперативного планирования и управления электроэнергетическими системами

- C2-101. J. Espinosa, M. Arboleda, N. Duque, J. Gomez, W. Amador, N. Ortiz, J. Tobon, E. Perez, F. Valencia, M. Cifuentes, M. Giraldo, S. Salazar (Колумбия).
Иерархическая и распределенная система оценки состояния энергосистем. Опыт Колумбии.
- C2-102. G. Athanasius, M. Miller, A. Peard, C. Scott, L. Bell (Австралия, Новая Зеландия).
Опыт применения динамической оценки нагрузочной способности ЛЭП в энергосистемах Австралии и Новой Зеландии.
- C2-103. H.M. Nguyen, J.J. Lambim, F. Vassort, J.L. Lilien (Бельгия).
Опыт применения прогнозных динамических оценок нагрузочной способности ЛЭП с целью повышения степени использования пропускной способности сети.
- C2-104. F. Alves, R.M. Henriques, J.A. Filho (Бразилия).
Статическая и динамическая оценка надежности больших энергосистем для online и offline приложений.
- C2-105. V. Hanneton, T. Margotin, G. Nerin, H. Lefebvre (Франция).
Опыт французского оператора передающей сети по управлению рисками при регулировании напряжения в условиях переменных режимов.
- C2-106. F. Detraz, T. Loxq (Франция).
Внутрисуточное планирование электроэнергетических режимов в рамках региональной координации по обеспечению надежности.
- C2-107. W.H. Wellssow, J. Vanzetta, D. Cremer (Германия).
Оценка устойчивости по напряжению с использованием расширенных моделей генераторов тепловых электростанций для проведения P-U анализа.
- C2-108. R. Narasimhan, P. Reddy, V.K. Agrawal, S.K. Soonee, P. Mukhopadhyay (Индия).
Проблемы оценки пропускной способности в условиях развития, значительной неопределенности и реструктуризации в энергосистеме Индии.
- C2-109. S. Soonee, V.K. Agrawal, S.R. Narsimhan, R.K. Porwal, V. Pandey (Индия).
Опыт применения синхрофазоров в Индии.

- C2-110. A.G. Fishov, M.A. Soboleva, A.I. Dechtereв, V.A. Fishov, D.V. Tutundaeva (Россия).
Мониторинг устойчивости и управление генерацией по данным синхронизированных измерений.
- C2-111. A. Molto, M. Ordiales, A. Blanco, F.D. Mingo, E. Barroso (Испания).
Проект «AGREGA».
- C2-112. M. Giuntoli, P. Pelacchi, D.Poli, F. Bassi, G.M. Giannuzzi (Италия).
Термо-механический подход к определению допустимой загрузки высоковольтных линий электропередачи в Италии.
- C2-113. C. Auxenfans, R. Baumann, T. Karpetanovic, P. De Leener, R. Paprocki, A. Wirth, D. Klaar (Польша, Новая Зеландия).
Сотрудничество европейских Системных операторов для повышения системной надежности, интеграции возобновляемых источников электроэнергии и поддержки рынка электроэнергии.
- C2-114. L.Wu, D. Infield (Великобритания).
Оценка устойчивости электроэнергетической системы Великобритании со значительной долей ветровых электростанций.
- C2-115. J. Balance, B. Bhargava, H. Chen, P. Palayam, J.Hiebert (США).
Анализ качаний в электроэнергетической системе WECC с помощью технологии синхронизированных векторных измерений.
- C2-116. S. Aquiles-Pérez, D. Macgregor, D. Coleman, P. McGuire, K. Jones, J. Senthil, J. Feltes, G. Pietrow, A. Bose (USA).
Моделирование энергосистемы Smart Grid 21-го века – сближение подходов по релейной защите и планированию.
- C2-117. S.Yoshiyama K.Takafuji, H.Taguchi, K.Hara, Y.Kowada (Япония).
Комплексное решение задач обеспечения устойчивости, допустимых уровней частоты и напряжения при управлении протяженной высоковольтной электрической сетью.
- C2-118. C. Tirado, S. Romo (Мексика).
Оценка надежности энергосистемы Мексики в режиме реального времени.
- C2-119. H. Elsayed S. ABU Eida S. Chaudhry A. AL-Mahmoud (Катар).
Динамическое управление напряжением и мощностью в передающей сети Катара.
- C2-120 E.Uddin, S. Al Harthi, H. Siddiqui (ОАЭ).
Проблемы управления энергосистемой с возобновляемыми источниками в сети ADWEA.
- C2-121. S. McGuinness (Ирландия).

Анализ устойчивости в реальном времени и мониторинг функционирования энергосистемы с применением синхрофазоров.

- C2-122. D. Arnautovic, J. Dragosavac, Z. Janda, J. Milanovic, L. Mihailovic (Сербия).

Внедрение координированного Q-U управления для многомашинной электростанции в систему вторичного регулирования напряжения.

- C2-123. G. Giannuzzi, R. Zaottini, F. Palone, W. Sattinger, R. Notter, M. Salvetti, G. Matli (Италия, Швейцария).

Имитационное моделирование и результаты применения стратегий восстановления от энергосистем соседних стран.

- C2-124. S. Han, Y. Kwon, J. Song, B. Ko, J. Lee, S. Nam, T. Kim, Y. Ahn, J. Shin, S. Kim, D. Woo, D. Kim (Корея).

Применение PMU в энергосистеме Кореи для глобальной системы мониторинга и контроля (WAMAC).

PS2: Новые вопросы взаимодействия передающих и распределительных сетей

- C2-201 L. Yao, H. Zhao, Y. Chi, Y. Li, J. Wu (Китай).

Исследования по стратегии предотвращения крупных отключений ветрогенерации в условиях повышения напряжения.

- C2-202. A. Dutoit, F. Galmiche (Франция).

Перспективные механизмы управления спросом и их использование при оперативном управлении.

- C2-203. D. Westermann, S. Schlegel, R. Schwerdfeger, S. Koethe (Германия).

Управление распределительными сетями нового поколения с учетом потребностей оператора передающих сетей.

- C2-204. M. Belivanis, K.R.W. Bell (Великобритания).

Координация уставок фазорегулирующих трансформаторов для минимизации затрат по изменению состава генерирующего оборудования.

- C2-205. T. Kusano, T. Koumi, K. Sato, T. Tatekoji, M. Shimada, H. Kudo (Япония).

Интегрированная система управления реального времени для интеллектуального разделения функций управления и мониторинга.

- C2-206. S. Kodama, G. Ushio, T. Goto, T. Sawa, H. Tanaka (Япония).

Координации между системами управления передающими и распределительными сетями и ее применение.

- C2-207. C. Billingham, R. Candy, M. Kurup, J. Muller, T. Smit (ЮАР).

Перспективные вопросы управления взаимосвязанными режимами передающих и распределительных сетей.

- C2-208. J.B.M. van Waes Movares, P.J. van de Ploeg, S.A. de Graaff, S.J.M. Bruijns (Нидерланды).
Применение процессов прогнозирования в ЭЭС для TenneT: от стратегического планирования до ретроспективного анализа.
- C2-209. M. Power, N. Singh, M. Sanchez, C. Roggatz, M. Cremenescu, R. Besselink, F. Bassi (Ирландия, Швейцария, Испания, Германия, Румыния, Нидерланды, Италия).
Перспективные вызовы для диспетчерского центра в условиях наличия распределенной генерации и возобновляемых источников энергии.
- C2-210. J. Choi, J. Lim, H. Choi, J. Joо (Южная Корея).
Вероятностная модель рабочего состояния энергосистемы и его визуализация.
- C2-211. H. Song, P.Vovos, T.-S. Kim, K.-W. Cho (Южная Корея, Греция).
Принятие решения о секционировании сборных шин для уменьшения уровня токов короткого замыкания с использованием нового алгоритма реконфигурации с повторной оптимизацией.
- C2-212. N.Machado, S.A. de Graaff , R.Pestana (Португалия, Нидерланды).
Методика оценки риска в Нидерландах.