



ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ КОМИТЕТ С6 «АКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ЭНЕРГОРЕСУРСЫ»

САМОЙЛЕНКО В.О., канд. техн. наук
Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург
v.o.samoilenko@urfu.ru

К предметной области исследовательского комитета С6 относится оценка технических требований, предъявляемых к структуре и принципам функционирования систем передачи и распределения электроэнергии в условиях постепенного распространения распределённых энергетических ресурсов (РЭР), а также увеличения суммарной доли недиспетчеризируемой генерации в энергосистеме. Научно-технические вопросы, рассматриваемые комитетом, включают:

- особенности функционирования распределённой генерации всех типов и видов, включая возобновляемые источники энергии (ВИЭ);
- технологии преобразования различных видов энергии и их совместное использование для повышения энергетической эффективности электрических систем;
- проектирование, эксплуатация и управление режимами перспективных активных распределительных систем;
- электрификация сельских районов и удалённых территорий;
- применение систем накопления энергии (СНЭ);
- ценозависимое потребление и агрегация спроса (Demand Response);
- интеграция зарядной инфраструктуры электромобилей в распределительные системы.

Большинство вопросов рассматриваются в ключе целесообразности применения тех или иных перспективных технологий в распределительных сетях и электроэнергетических системах.

Для рассмотрения обсуждения на Общем заседании подкомитета в рамках

Генеральной сессии СИГРЭ 2021 отобрано 74 доклада по трём предпочтительным темам.

Предпочтительная тема 1. Усовершенствованное устройство распределительной системы с использованием распределенных энергоресурсов (25 докладов)

Основные вопросы:

- планирование активных распределительных систем с учетом накопления и хранения энергии;
- планирование для электромобилей и регулирования спроса в активных распределительных системах;
- вопросы управления при планировании активной распределительной системы;
- моделирование активных распределительных систем с учетом РЭР;
- планирование распределительных систем для широкого использования аккумуляторных систем накопления энергии.

Предпочтительная тема 2. Передовые технологии и решения для систем распределения электроэнергии (19 докладов)

Основные вопросы:

- эффективные технологии, включающие цифровые решения и новые аппаратные разработки;
- возможности финансирования новых технологий. Рыночные стимулы для развития новых технологий;
- инновационные решения по управлению мощностью и энергией для систем с высокой долей распределенных энергоресурсов на основе ВИЭ;
- аккумуляторные системы накопления энергии;
- электроснабжение островов и отдаленных районов;
- городские распределительные системы.

Предпочтительная тема 3. Проблемы управления системами при увеличении использования распределенных энергоресурсов (31 доклад)

Основные вопросы:

- повышение гибкости, надежности и устойчивости.
- оказание услуг сети посредством плано-учетно-расчетных компаний (агрегаторов энергетических ресурсов).
- взаимодействие с агрегаторами.

Обзор докладов, представленных по тематике ИК С6

Предпочтительная тема 1. Усовершенствованное устройство распределительной системы с использованием распределенных энергоресурсов

C6-101. T. BLASI (Бразилия)

Анализ коэффициента запаса устойчивости по напряжению для распределительной сети с фотоэлектрической генерацией и накопителями энергии.

C6-102. S. ROCHA (Бразилия)

Анализ преимуществ установки аккумуляторного накопителя энергии для фидера с наличием фотоэлектрических станций в энергосистеме Бразилии.

C6-103. L. LEITE (Бразилия)

Технические, экономические и регуляторные аспекты влияния накопителей энергии на основе свинцово-кислотных и литиевых батарей на распределительную сеть 13,8 кВ

C6-104. K. DEDEKIND (ЮАР)

Проект накопителя энергии на основе аккумуляторных батарей емкостью 800 МВт·ч в ЮАР

C6-106. A. G. PAPA-KONSTANTINOY, S. A. PAPA-THANASSIOY, J. S. ANAGNOSTOPOYLOS, N. G. BOYLAXIS, G. N. PSARROS (Греция)

Влияние накопителя энергии на поддержание пропускной способности сети применительно к островным энергосистемам.

C6-107. *M. LUO* (Китай)

Исследование контроля состояния заряда накопителя энергии на основе аккумуляторных батарей с подключением по балансной схеме.

C6-108. *D. CLERICI, G. VIGANO, D. MONETA, M. ROSSI* (Италия)

Предоставление системных услуг распределенными энергоресурсами: управление накопителем энергии оператором распределительной сети без рыночных взаимоотношений.

C6-109. *P. ZINCK* (Канада)

Внедрение накопителей энергии на основе аккумуляторных батарей для регулирования частоты и (графика) мощности, а также управления вращающимся резервом.

C6-110. *P. ILYUSHIN, V. SAMOYLENKO, S. FILIPPOV* (Россия)

Применение накопителей электроэнергии для расширения области допустимых режимов генерирующих установок распределенной генерации

C6-111. *J. MERINO, P. EGUÍA-LÓPEZ, E. TORRES-IGLESIAS, D. RUBIO-MIGUEL* (Испания)

Оценка потерь в распределительной сети в зависимости от точки подключения накопителя энергии к фотоэлектрическим системам в трех участках сети в Мурсии.

C6-112. *J. TAYLOR, M. BELLO, A. MAITRA, J. PEPPANEN* (США)

Учет накопителей энергии при перспективном развитии распределительной сети.

C6-113. *G. EDWARDS, M. MCFARLANE, C. HIGGINS, G. MCFADZEAN* (Великобритания)

Учет неопределенности, связанной с откликом потребителей в рамках ценозависимого потребления и агрегации спроса.

C6-114. *T. HUBERT, F. PETRENKO, O. TRINKO, M. HERNANDEZ, J. DEBOEVER, M. MCCARTY, J. PEPPANEN* (США)

Положения по моделированию с целью оценки функционала «интеллектуальных» инверторов.

C6-115. *M FARIDI, B KELLY, C WINNING* (Великобритания, Ирландия)

Использование улучшенных модульных устройств FACTS для расширения режимной области распределительной сети и обеспечения возможности подключения большего количества распределенных энергоресурсов.

C6-116. *H. CIFTCI* (Турция)

Оптимизация работы зарядных станций электромобилей с помощью генетического алгоритма.

C6-117. *R. DAHOUD* (Иордания)

Влияние процессов зарядки электромобилей на распределительные сети на примере Акаба в Иордании.

C6-118. *L. JIANG* (Китай)

Исследование последовательной зарядки электромобилей с помощью системы с новой SCADA.

C6-119. *M. SAMPER* (Аргентина)

Концептуальные основы планирования активных распределительных систем применительно к сетям Южной Америки.

C6-120. *M. SOSNINA, P. KOTSAMPOPOULOS, K. MÄKI, R. BRANDL, K. HEUSSEN, E.C.W DE JONG, J.E. RODRIGUEZ-SECO, D. BABAZADEH, R. BHANDIA, C. SANDRONI, F. COFFELE, T. STRASSER* (Австрия)

Достижения, опыт и выводы по работе европейской исследовательской инфраструктуры по достоверизации параметров энергосистем.

C6-122. *B. HERNANDEZ, N. SELAK, M. MONDELLO* (США)

Расстановка распределенных энергоресурсов при в различных схемах автоматизации распределительных сетей

C6-123. *P. MULLOR, N. PITARCH, M. GARCÍA-PELICER, A. QUIJANO-LÓPEZ, J.C. DÍAZ* (Испания)

Инновационные решения по интеллектуальному управлению электрическими сетями

C6-124. *AHMED AL-NADABI* (Зимбабве)

Управление напряжением в активных сетях применительно к Оману

C6-126. *B. ARENDARSKI, C. WENGE, M. LISERRE, G. DE CARNE, P. KOMARNICKI, P. LOMBARDI* (Германия)

Использование «умных» трансформаторов в электростанциях с нулевыми выбросами

C6-127. *M. GREIML, T. KIENBERGER, A. TRAUPMANN* (Австрия)

Метод уменьшения взаимных перетоков энергии при ячейковом принципе планирования сети применительно к оценке устойчивости в низковольтных сетях.

В докладах **C6-101**, **C6-102** и **C6-103** описывается опыт подключения накопителя энергии на основе АКБ мощностью 1,2 МВт и емкостью 1,3 МВт·ч к бразильским распределительным сетям 13,8 кВ с нагрузкой 3,2-4,6 МВт и установленной мощностью фотоэлектрических станций 0,5-1,6 МВт. Эффект от подключения накопителя энергии по уменьшению размаха колебания напряжения составляет 1,2-4,0 %.

В докладе **C6-104** приводятся сведения о том, в ЮАР действует план установки 1440 МВт·ч накопителей энергии в сельских сетях к 2023 г. и запуск их в работу к 2028 г. При этом расчеты показывают увеличение пропускной способности сети и снижение пиковой загрузки электросетевого оборудования. В реальности совпадение часов ветреной погоды и часов системного пика привело к увеличению перегрузки фидера за счет одновременной выдачи мощности ВЭС и неправильно настроенной СНЭ.

В докладе **C6-106** рассматривается выбор накопителя энергии для резервирования слабой связи переменного тока $\approx 2 \times 150$ МВт энергосистемы острова Крит с энергосистемой континентальной части Греции. Для уменьшения пика нагрузки на 88 МВт необходима СНЭ 150 МВт, 1200 МВт*ч ввиду вероятностных свойств ВИЭ и условиям окупаемости при работе на рынке ЭЭ. При этом ёмкость накопителя оказывает большее влияние на резерв пропускной

способности, чем мощность. По результатам расчета выявлено, что технически невозможно получить резерв пропускной способности более 88 МВт (58,6 %). Произведен отказ от накопителя в пользу кабельной линии постоянного тока =2x500 МВт аналогичной стоимостью.

Доклад **С6-108** рассматривает вклад накопителя энергии в Италии в повышение пропускной способности распределительной сети с помощью регулирования как активной мощности P , так и реактивной мощности и Q . С учетом электрического режима вклад накопителя энергии в повышение пропускной способности несколько выше. Во многих случаях достаточно задействовать и настроить регулирование по Q вместо капиталовложений в дополнительные емкость и мощность накопителя.

В докладе **С6-109** рассматривается Вклад накопителя энергии в регулирование частоты энергосистемы Багамских островов. Багамская энергосистема обладает 65 МВт пиковой нагрузки при 97 МВт установленной мощности поршневой генерации. В 2015-2017 г. суперпозиция нагрузок драглайна и портового крана давала нерегулярные колебания нагрузки 23-50 % и скорость набора-сброса нагрузки более 12 %/секунду. Размах колебания частоты при этом составлял ± 1 Гц. Установка накопителя энергии 9,5 МВт, 7,31 МВт·ч в 2018 г. позволила удержать размах колебания частоты в пределах $\pm 0,4$ Гц. Примечательно, что в 2019 г. ураган 5-й категории «Дориан» вывел из строя 46 МВт генерации, но энергосистема продолжает функционирование с накопителем энергии.

В докладе **С6-111** представлен результат оптимизация параметров и места расположения накопителей энергии в распределительных сетях Испании – у конечного потребителя или на головном участке. Целевая функция призвана обеспечить минимум потерь в электросетевом оборудовании, включая сам накопитель энергии. Установлено, что, при наличии развитой микрогенерации более чем у 40 % конечных потребителей, выгоднее накопители у конечных потребителей (рисунок 1). В иных случаях выгоднее накопитель на головном участке сети.

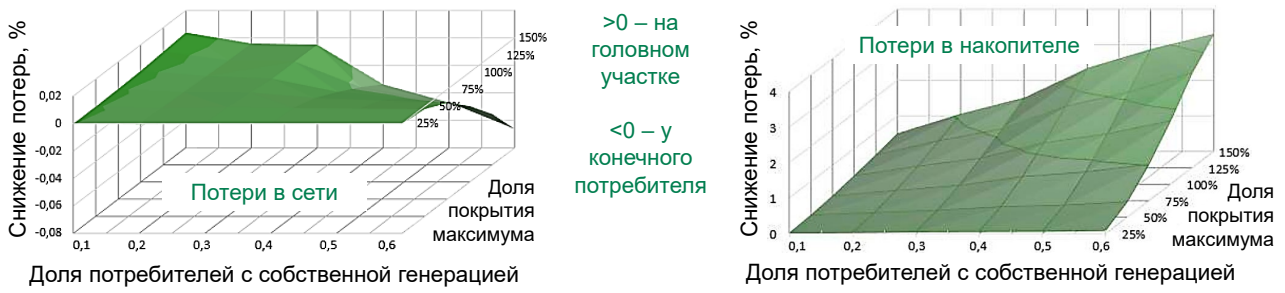


Рис. 1. Эффект снижения потерь электроэнергии от установки СНЭ:

В докладе **С6-113** анализируется дисциплинированность потребителей ценозависимого потребления под управлением агрегаторов спроса в Великобритании (рисунок 2). Статистика показывает, что снижение суточных пиков составляет 3,2-12,5 %; снижение годового пика составляет 2,1-10,3 %. Устойчивый регулирующий эффект достигается, если в распоряжении агрегатора имеется 80-90 потребителей. При этом вероятность получения небольшого регулирующего эффекта (в пределах 5 %) выше, если имеется значительное количество потребителей (от 80), а вероятность снижения мощности на 15 % и более достижима, наоборот, только при наличии небольшого числа (до 20) мощных, но технологически гибких потребителей.

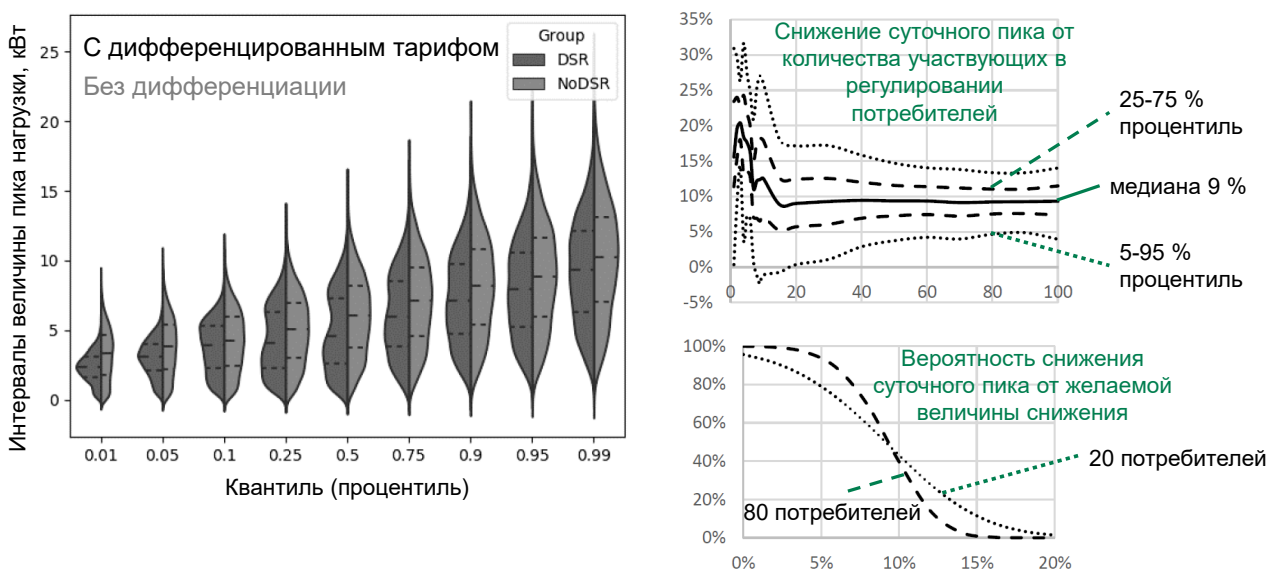


Рис. 2. Статистические распределения эффективности участия потребителей в ценозависимом электропотреблении и агрегации спроса

В докладе **С6-114** рассмотрены проблемы с согласованием настройки средств регулирования напряжения в разветвленных распределительных сетях Калифорнии в США. Средства регулирования напряжения включают: устройства РПН трансформаторов, управляемые батареи конденсаторов, инверторы фотоэлектрических станций, инверторы накопителей энергии. Решение выбрано в виде назначения ведущих по напряжению инверторов и подбор для них стратегий регулирования. Остальные средства переведены в «базовую» и «полупиковую» части графика регулирования реактивной мощности и напряжения.

Также в Великобритании и Ирландии имеется опыт перевода распределительной сети от простой к сложноразветвленной многоконтурной топологии для передачи энергии ВИЭ с помощью гибкой передачи переменного тока среднего напряжения. Соответствующий опыт представлен в докладе **С6-115**. Подвесные и стационарные реакторы сопротивлением 1,65 и 1,45 Ом используются для выравнивания перетоков по трём ветвям. Основное управление осуществляется по частной сотовой сети 4G, резервное – по радиоканалу. Экономия на капиталовложениях ввиду отказа от строительства новых линий составила 800 млн. руб. Примечательно, что в проекте приняли решение о увеличении индуктивного сопротивления первичного контура вместо снижения емкостного сопротивления вторичных контуров с помощью емкостной компенсации ВЛ, поскольку расчеты показывали возможный подсинхронный резонанс ВИЭ на частотах 18-27 Гц.

В докладах **С6-116** и **С6-118** рассматривается оптимизация графика зарядки электромобилей различных моделей с помощью генетического алгоритма от авторских коллективов из Турции и Китая. Графики оптимальной зарядки электромобиля строятся исходя из тарифов на электроэнергию и остатка заряда по приезду домой в 18:00. Дальноточные модели электромобилей с емкостью батареи порядка 100 кВт·ч, как Tesla Model S или Mercedes-Benz EQC, позволяют участвовать в снижении максимума и выравнивании графика нагрузки, выдавая мощность в энергосистему вечером, далее заряжаясь ночью.

Модели с небольшой емкостью батареи не обладают необходимым для этого остаточным запасом энергии (рисунок 3).

Концепция модульного конструирования низковольтных электрических сетей получила очередной виток развития в Австрии и Германии, что представлено в докладах **C6-127** и **C6-203** (Предпочтительная тема 2). Предполагается, что электрические сети низких классов напряжения могут рассматриваться как совокупность ячеек. Критерии эквивалентирования частей сети в ячейки включают электрические и географические критерии. Каждую ячейку планируется сбалансировать по активной и реактивной мощности с помощью накопителя энергии.

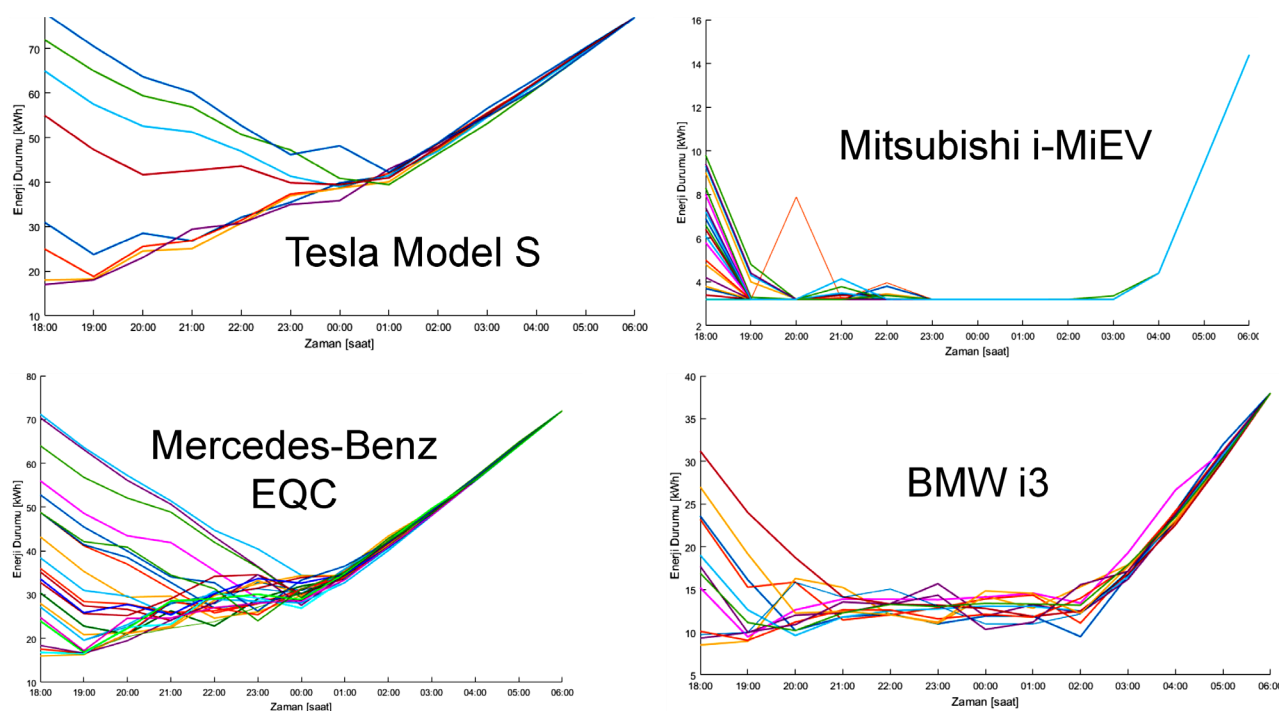


Рис. 3. Примеры оптимизации графика зарядки электромобилей в зависимости от остаточного заряда, мощности зарядного разъема и графика нагрузки энергосистемы

Предпочтительная тема 2. Передовые технологии и решения для систем распределения электроэнергии

C6-201. A. OUDALOV (Швейцария)

Платформы для агрегации распределенных энергетических ресурсов (по

материалам рабочей группы С6.35)

C6-202. *CRAY, J. GLASSMIRE, J. BAUMGARTEN, A. LAKSHMINARAYANAN, T. DRAKE, K. HUTCHISON, H. BITARAF* (Германия, США)

Платформа для контроля микроэнергосистем в США, предоставляющая надежное и эффективное управление распределенными энергоресурсами и накопителями энергии

C6-203. *D. YOO, J. KIM, S. KIM, G. BYEON, S. LIM, H JO, H. SUN* (Корея)

Оптимальное управление энергоресурсами и контроль управления нагрузкой в микроэнергосистемах с интегрированными по технологии V2G электромобилями.

C6-204. *M. CINTUGLU, A. VALDES, H.J. LIU, P. BUASON, D. LAWRENCE, A. KONDABATHINI, A. BRISSETTE, R. MACWAN, H. CHOI, S. LAVAL, D. ISHCENKO* (США)

Отказоустойчивые киберфизические микроэнергосистемы.

C6-205. *C. ZHANG, N. GURUNG, S.R. KOTHANDARAMAN* (США)

Использование симулятора реального времени для тестирования технологии солнечного накопителя энергии, интегрированного в микроэнергосистему.

C6-206. *S OBERHOFER, S CRAY, S SCHNEIDER, M OSBORN* (Германия, Великобритания).

Центр по проверке и оптимизации проектирования, моделирования интеллектуальному управлению и управлению жизненным циклом микроэнергосистемы.

C6-207. *V. BUEHNER, P. NOGLIK, B. BUCHHOLZ* (Германия)

Ячейковый подход и новые решения для распределительных систем и промышленных системах электроснабжения в Германии.

C6-208. *D DALE, F HOLDER, S HODA, S ROSSI-ASHTON, J BEASLEY, S J HODGSON, M HISATOMI, S C E JUPE* (Великобритания, Норвегия, Япония)

Демонстрация виртуальной электростанции с островов Силли

C6-209. *C. GARCÍA, R. PINTO, J. IGLESIAS* (Испания)

Алгоритм реального времени для интеграции накопителя энергии на основе АКБ для оптимизации выработки активной мощности на примере реальной островной микроэнергосистемы: концепция и ее проверка.

C6-210. *J.F. SANZ-OSORIO, J. MUÑOZ-CRUZADO-ALBA, J. BALLESTÍN-FUERTES* (Испания)

Активная нагрузка для определения выхода на автономную работу.

C6-211. *P PONNAGANTI* (Дания)

Контроль напряжения и частоты в островной распределительной сети с помощью СНЭ на основе АКБ

C6-212. *J. HAMILTON, E. SEMSHCHIKOV, X. WANG, M. NEGNEVITSKY* (Австралия)

Усиление гибкости, надежности и отказоустойчивости изолированных энергосистем с помощью дизель-генератора с переменной частотой вращения

C6-214. *L. COCCHI, M. GARCIA BUSTOS, E. VALIGI* (Италия)

Опыт Enel в сельской электрификации Южной Америки

C6-215. *ESMA MUSIC* (Босния и Герцеговина)

Концепция гибридной энергосистемы и проект микроэнергосистемы для электроснабжения отдаленной туристической деревни.

C6-216. *DHEERAJ SRIVASTAVA* (Индия)

Съём мощности с грозотроса линии сверхвысокого напряжения для электроснабжения отдаленных нагрузок

C6-217. *I. SABOYA, L. ROUCO, L. DIEZ, L. SIGRIST* (Испания)

Система управления энергопотреблением на основе простых правил для изолированной энергосистемы

C6-218. *H.M. SANCHEZ* (Колумбия)

Аппаратное обеспечение для тестирования контроллера кольцевой микроэнергосистемы.

C6-219. *BHAVESH R. BHALJA* (Индия)

Новый способ управления микроэнергосистемой на основе

многоуровневого инвертора с гибридной генерацией.

C6-220. BALINT HARTMANN (Венгрия)

Создание модульного набора средств для оценивания состояния.

C6-221. S. SHIRZADI, N. K. C. NAIR (Новая Зеландия)

Тестирование активной распределительной системы в составе типичных для Новой Зеландии сетей низкого и среднего напряжений.

В докладе **C6-201** рассматриваются последствия развития распределенной генерации в Северной Европе. Отмечается острая необходимость в создании виртуальных электростанций в связи с тем, что с 2014 г. количество объектов генерации выросло с нескольких десятков до нескольких тысяч. Волатильность цен на электроэнергию в разрезе суток такова, что цена на электроэнергию меняется от -17 до 42 €/МВт·ч со скоростью около 53 €/МВт·ч за 1 ч. Волатильность цен на рынке системных услуг такова, что в 2011-2019 гг. отобранные для нормированного первичного регулирования частоты и мощности субъекты получали от 8 до 36 €/МВт(·ч), вторичного – от 0,1 до 18 €/МВт(·ч) в разные годы (рисунок 4).

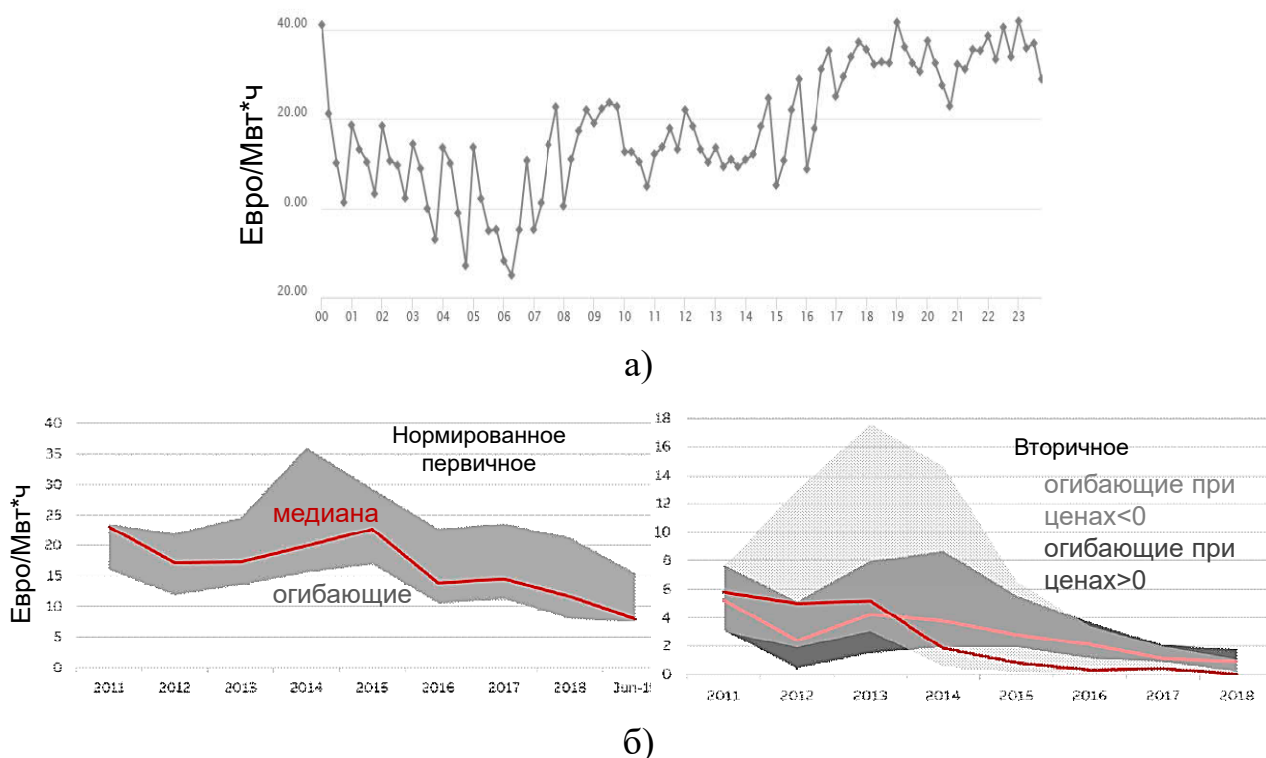


Рис. 4. Цены: а) на электроэнергию; б) на регулирование частоты и мощности

Необходимость в виртуальных электростанциях подкрепляется и очередью на техприсоединение генерации в энергосистеме PJM (восток США). Соответствующие выкладки представлены в докладе **С6-202**. По состоянию на 2020 год существует 1376 объектов генерации установленной мощностью 180 ГВт. Имеется 1021 заявка на техприсоединение 172 ГВт установленной мощности генерации (преимущественно ВИЭ, СНЭ или комплексы ВИЭ-СНЭ) до 2029 г. Таким образом, ожидается двукратный прирост установленной мощности за 10 лет, что является серьезной технической, технологической, экономической и организационной проблемой функционирования энергосистемы. Делается вывод, что горизонт упреждения при планировании ВИЭ должен составлять не менее 3 лет – именно на такой срок ввода объекта рассчитывает большинство собственников.

Доклад **С6-203** посвящен виртуальным электростанциям на основе V2G (Vehicle-to-Grid, реверсивная выдача мощности электромобилей в сеть) технологий зарядных станций электромобилей в Южной Корее. Объединение батарей электромобилей со стационарными СНЭ позволяет осуществлять полноценный срез пика в прилегающей сети, уход от реверсивных перетоков мощности вследствие работы локальных источников энергии и, главное, существенно улучшить условия работы стационарных СНЭ по количеству и тяжести циклов заряда-разряда, что должно положительно сказаться на сроках их службы.

Вопросы кибербезопасности распределительных сетей обсуждаются не только в докладах подкомитета D2, но и С6. В докладе **С6-204** представлена достоверизация состояния отдельной микросети на основе «голосования» смежных микросетей в США. Она осуществляется по следующему алгоритму: 1) оценивание состояния электрических параметров энергообмена между микросетями; 2) при превышении порога «разногласия» - «голосование» по вопросу расхождения параметров в отношении подозрительной микросети; 3) отключение микросети с ошибочными параметрами; 4) автоматическое восстановление подключения при возврате параметров в зону допуска.

Вклада накопителя энергии в регулирование частоты и напряжения энергосистемы острова Мадейра представлен в докладе С6-211. Энергосистема обладает сильнейшей неравномерностью нагрузки – от 1 до 63 кВт, а также дефицитом располагаемой генерирующей мощности – 38 кВт. В таких условиях размах отклонения частоты составлял до $\pm 1,4$ Гц, напряжения до ± 15 % от номинальных величин. Для сравнения, согласно нормативам ENTSO-E, в изолированных ЭС частота может отклоняться на ± 1 Гц, напряжение на ± 10 % от номинальных величин. Установка накопителя энергии 40 кВт, 80 кВт·ч позволила удержать размах колебания частоты в пределах $\pm 0,95$ Гц и стабилизировать напряжение на уровне номинального.

Вопреки тенденции к унификации и стандартизации технических решений в области распределенной генерации, в мире есть регионы, где широчайшее разнообразие и диверсификация источников энергии и технических решений в распределительных сетях считается залогом устойчивого развития. В докладе С6-221 представлено разнообразие классов напряжения и источников энергии в распределительных системах Новой Зеландии. Имеется: 5 классов среднего напряжения; генерация на основе 8 типов источников энергии (рисунок 5); однофазные, двухфазные и трехфазные линии; различная широко используемая конденсаторная техника; до 5 выбранных точек «нормального» деления (не секционирования) сети в зависимости от схемно-режимной ситуации.

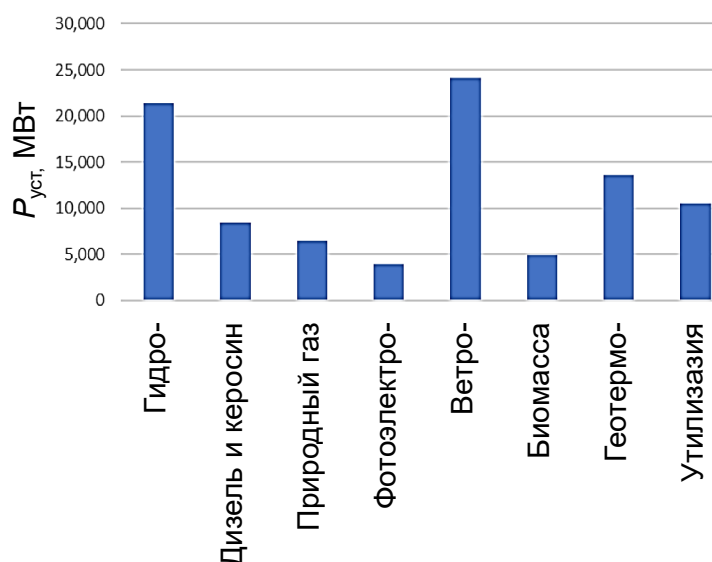


Рис. 5. Структура распределенной генерации в Новой Зеландии

Предпочтительная тема 3. Проблемы управления системами при увеличении использования распределенных энергоресурсов

C2-C6-301. A. TUOHY, D. LINDSEY, A. CHUANG (США)

Актуальные результаты вклада EPRI в оценку реагирования спроса, которая касается небольших нагрузок потребителей (водяные насосы, электронагреватели, кондиционеры).

C2-C6-302. A. GUARINI (Бразилия)

Актуальные результаты исследования на предмет условий, при которых некоторые ветропарки могут быть вновь синхронизированы с сетью во время реконструкции.

C2-C6-303. S. CISNEIROS (Бразилия)

Краткое описание энергосистемы Бразилии и рекомендации по устранению неопределенности и изменчивости возобновляемых источников энергии и распределенных энергоресурсов, включая использование систем накопления и хранения энергии.

C2-C6-304. Y. CHEN, J. BLADEN, J. HARRISON, C. WANG (США)

Баланс между максимально широкой агрегацией РЭР и надежностью передающей сети или эффективностью организованных оптовых рынков электроэнергии.

C2-C6-305. D. STENCLIK, M. RICHWINE (США)

Результаты исследования, целью которого является сравнение различных стратегий управления для регулирования спроса для системы быстрого реагирования на изменение частоты.

C2-C6-306. A. NEVE (Бельгия)

Проблема ухудшения инерции и первичного регулирования частоты в результате интеграции непостоянной генерации ВИЭ в энергосистему Сенегала.

C2-C6-307. L. SZCZEPANIAK (Польша)

Специальная оперативная схема защиты для автоматического устранения перегрузки в системе передачи и распределения высокого напряжения при

возмущении сети путем оптимального сокращения ветрогенерации.

C2-C6-308. *G.M. GIANNUZZI, L. MICHI, L. ORTOLANO, E.M. CARLINI, C. MARTARELLI* (Италия)

Переход от зонального прогнозирования к более детальному узловому прогнозированию для решения проблемы повышенной волатильности из-за большого количества ВИЭ в структуре мощностей.

C2-C6-309. *L. DELLI CARPINI, L. D'ORAZIO, C. BALDI, G. DI LEMBO, M. GIOVANNINI, L. PIMIPINELLA, E. RUGGERI, G. SAPIENZA* (Италия)

Внедрение интеллектуальной сети в Апулии, Италия, носящей название «активной сети Пулья».

C2-C6-310. *D. N. TRAKAS, N. D. HATZIARGYRIOU* (Греция)

Превентивное оперативное планирование распределительной системы, которое смягчает воздействие прогрессирующего лесного пожара путем предотвращения перебоев в электроснабжении ответственных потребителей

C2-C6-311. *J. DREWES, J. FRUNT* (Нидерланды)

Цели и состав проекта ввода вторичных резервов в нидерландской электрической системе.

C2-C6-312. *N AL-ASHWAL, P M ASHTON, S NORRIS, P MCNABB, J YU, D H WILSON* (Великобритания)

Средство прогнозирования инерционности системы и результирующей СИЧ для сильных возмущений в отношении локальных зон.

C2-C6-313. *D AUTY, S WATERS, N MILLER, C FOOTE, S HAY, D GUTSCHOW, P CHANDLER* (Великобритания)

Исследует использование распределенных энергетических ресурсов (РЭР) для содействия восстановлению энергосистемы после полного или частичного отключения.

C2-C6-314. *L. KALISCH, H. VENNEGEERTS, A. MOSER, D. LEHMANN* (Германия)

Актуальные изменения в процедуре определения размеров для ввода вторичного резерва мощности в Германии, особенно с учетом большего влияния

ошибок прогноза выработки электроэнергии из ВИЭ.

C2-C6-315. *S. SCHMITT, T. MUEHLPFORDT, V. HAGENMEYER, A. MONTI, V. BIAGINI, P. NOGLIK, A. ENGELMANN, A. KOROMPILI, M. GIUNTOLI* (Германия)

Два разных метода разбиения централизованной задачи оптимального потока мощности на распределенные подсекции.

C2-C6-316. *I. LUPANDINA, W. GAWLIK, K. VIERECK, M. SCHRAMMEL* (Австрия)

Методы максимального использования существующей передающей сети путем включения номиналов компонентов в анализ аварийных ситуаций для обеспечения безопасности системы (N-1).

C2-C6-317. *M. TSUNEMATSU* (Япония)

Платформа РЭР, которая позволяет согласовывать спрос и агрегаторов ресурсов на основе скорости реакции, мощности и продолжительности.

C2-C6-318. *S. OKA* (Япония)

Система агрегации устройств накопления и хранения, которая позволяет управлять частотой нагрузки с помощью иерархического гибридного управления.

C2-C6-319. *H.M. TRÓNDHEIM* (Дания)

Регулирование частоты на Фарерских островах в свете 100% выработки электроэнергии из ВИЭ, запланированной на 2030 год.

C2-C6-320. *D. HENSCHEL, C. SCHNEIDERS, M. HEIDEMANN, A. MANNEBACH, H. KUHN, L. REINIG, S. JACOBS, J. VANZETTA, F. REYER, S. HILGERS, M. WALTER, R. BADER, C. HECK, P. HEINEN, W. H. WELLSOW* (Германия и Люксембург)

Планирование, проведение и результаты эксперимента по восстановлению энергосистемы на передающей сети Amprion.

C2-C6-321. *J. NAUGHTON, S. RIAZ, H. WANG, P. MANCARELLA* (Австралия)

Ключевые возможности, которые могут возникнуть в результате

интеграции низкоуглеродной распределенной электроэнергетической системы с водородной энергетикой

C2-C6-322. *S. SPROUL, S. ZABIHI, R. KORTE, H. KLINGENBERG, B. BUCHHOLZ, A. OUDALOV, S. CHEREVATSKIY* (Австралия, Швейцария)

Резюме практического опыта использования инверторов в сети ОРС в Южной Австралии.

C2-C6-323. *L. ROUCO, I. EGIDO, L. SIGRIST, E. LOBATO, K. DOENGES* (Испания)

Участие ветропарка в системе автоматического управления генерацией.

C2-C6-324. *Q. XU, Z. YUAN, P. LI, L. YU* (Китай)

Адаптивный инструмент для оценки синхронизированных векторов, основанный на мульти-автокалибровке и мульти-автопереключении для достижения высокой точности и быстрого отклика при синхронизированных векторных измерениях основной и гармоники в различных условиях, таких как установившийся режим, квазистационарный режим, квазидинамический, динамический, квазипереходный и переходный режим.

C2-C6-325. *H. XU* (Китай)

Исследования в области распространенных технологий распределения и управления возобновляемой энергией на основе киберфизических и социальных систем.

C2-C6-326. *B. REQUARDT, Z. WANG, S. STOCK, W. ALBERS, M. STAUDT, M. BRAUN, L. LÖWER, C. CALPE, J. SCHWEDLER, S. WENDE-VON BERG* (Германия)

Программные инструменты для улучшения координации распределенных генераторов в работе интеллектуальной сети.

C2-C6-327. *D. ILISIU* (Румыния)

Анализ распределенных энергоресурсов на предмет включения в службы автоматического ввода вторичных резервов.

C2-C6-328. *K.V.V. RAMKUMAR* (Индия)

Объекты орошения с машинным водоподъемом для облегчения работы

системы в части регулирования частоты и напряжения.

C2-C6-330. PANKAJBHAI SUTHAR (Индия)

Взаимодействие традиционной крупной генерации с растущей распределенной генерацией при работе энергосистемы штата Гуджарат, Индия.

C2-C6-331. R. MARTINS (Польша)

Концепция виртуальной электростанции, архитектуры и методология, а также применение этой концепции, которые могут быть масштабированы для различных уровней напряжения и более широких портфелей генерации (проект EU-SysFlex).

Эволюция балансов мощности и энергии в Бразилии на примере Северо-Восточного региона представлена в докладе **C6-303**. Хотя визитной карточкой энергетики Бразилии в конце XX-начале XXI века была гидроэнергетика, в настоящее время рекордный по мировым меркам коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) ветрогенерации величиной 42 % привел к росту доли ветрогенерации в балансе энергии с 0 до 49 % за 10 лет. Доля гидрогенерации снизилась с 80 % до 23 % (рисунок 6). Сэкономленные гидроресурсы используются в других отраслях экономики. Примечательно, что КИУМ ветрогенерации, к примеру, в Дании и Великобритании составляет 29 %, в Германии и Китае – 19-20 %.

В докладе **C6-304** рассмотрены масштабы неучтенной распределенной генерации во внутренних системах электроснабжения в MISO, США. Имеется 16240 МВт установленной мощности распределенной генерации, из которых около 4500 МВт (28%) находятся в информационном ведении и оперативно-технологическом управлении только их собственников. Также рассматривается эффективность действующей модели рынка при функционировании энергосистемы подобной структуры. Переход от часовых к 15-минутным коммерческим интервалам позволяет снизить цену на электроэнергию на 8-17 %. Основной фактор – длительность циклов заряда-разряда накопителей энергии с учетом фактического режима работы.

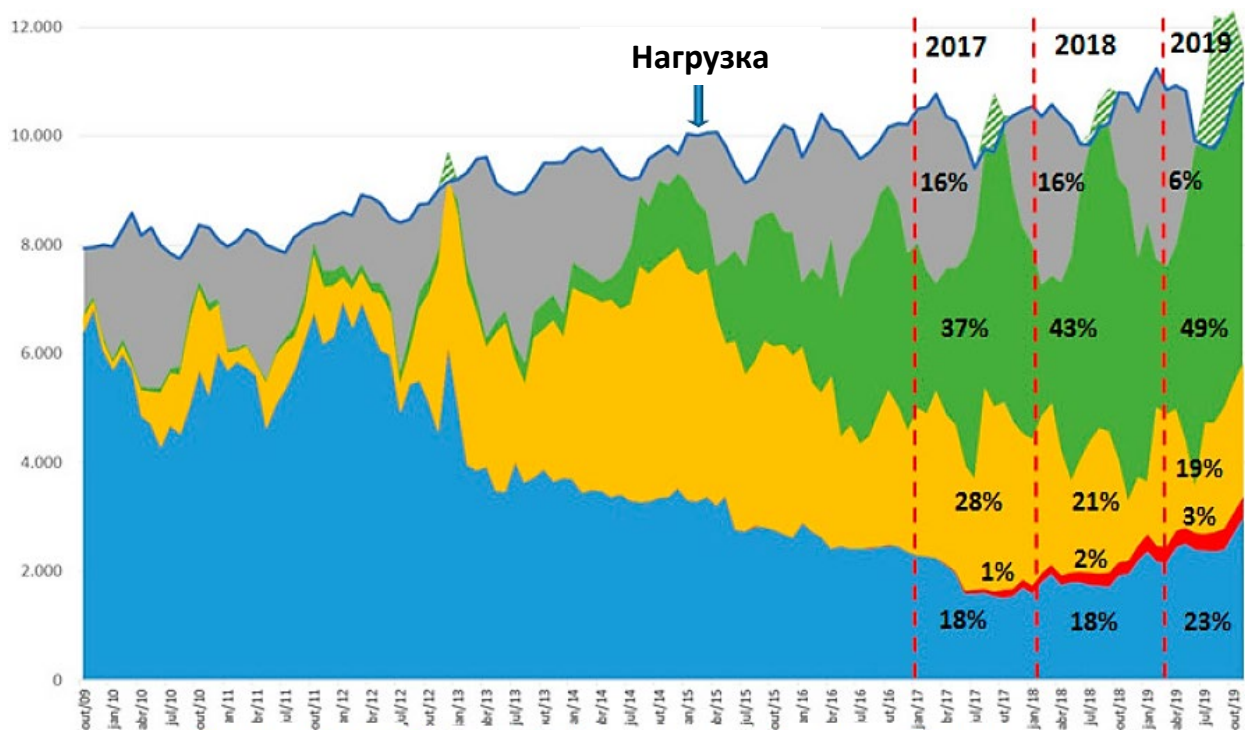


Рис. 6. Эволюция балансов мощности и структуры генерации в Бразилии 2009-2019: гидро-, фотоэлектро-, тепло- и ветрогенерация, а также экспорт и импорт

В Великобритании вводится новый тип прогнозной информации – системная инерция (по предложению компании General Electric). Соответствующие подробности раскрыты в докладе С6-312. Зарегистрированы факты ложного срабатывания устройств автоматики и АСУ ТП, основанных на принципах измерения значения скорости изменения частоты (ROCOF-алгоритмы). Размах колебания инерции в ЭС составляет порядка 42 % в течение суток: от 26 ГВт(А)·с до 40 ГВт(А)·с в зависимости от состава работающего генерирующего оборудования вследствие высокой доли ветрогенерации. Прогноз инерции предполагается по зонам энергосистемы на сутки вперед.

Увеличение количества и мощности распределенных энергоресурсов приводит не только к ускорению протекания переходных процессов, но и к замедлению восстановления энергосистемы в случае крупных системных аварий. В докладе С6-313 представлена информация о том, как в Великобритании распределенные энергоресурсы ранжируются по способности осуществления «черного пуска». Расчеты системной надежности показывают,

что за 72 ч после тотального гипотетического «блэкаута» удастся восстановить электроснабжение только 75,2 % нагрузки. Электроснабжение оставшихся 24,8 % нагрузки может быть восстановлено не ранее чем через 168 ч.

С целью поддержания и восстановления частоты при системных авариях в докладе рассматривается Формирование кластеров распределенных энергетических ресурсов и микросетей для восстановления частоты в ЭС в Германии **С6-314**, которыми необходимо управлять вплоть до отделения на изолированную работу. В различных сценариях просчитывается вероятность получения управляющих воздействий автоматики по ограничению нагрузки от 0 до 30 ГВт в зависимости от времени суток и дня недели. При этом в Германии, как и в Великобритании, всерьез рассматривается сценарий разворота энергосистемы, состоящей из распределенных энергетических ресурсов, с нуля (доклад **С6-320**). В качестве пускорезервного средства для энергосистемы выступает гидроаккумулирующая станция средней мощности, которая должна выступить источником энергии для угольной конденсационной электрической станции на консервации. Подключение производится со снятым возбуждением генераторов ГАЭС при частоте 50,8-51 Гц (в ручном режиме за 15 мин) или с помощью отдельного автономного регулятора частоты и мощности-скорости вращения (в автоматическом режиме за 60 мин). Сборка схемы производится и напряжении $\sim 0,7$ о.е. от номинального для ограничения бросков тока намагничивания и перенапряжения дальних линий электропередачи в режиме одностороннего включения.

В докладе **С6-321** рассматриваются перспективы расширения использования водорода для накопления энергии и рынка системных услуг в энергосистеме Австралии. Перспективные способы и средства использования водорода включают баковые накопители водорода, водородные топливные элементы, электролизеры и газовые турбины на водороде. Технологии должны применяться в совокупности в составе виртуальной электростанции, которая должна предоставлять время отклика: для вращающегося резерва – не более 5 с, для горячего резерва – не более 50 с, для холодного резерва – не более 3 мин.

С целью повышения инерции осуществлен ввод искусственной инерции в систему управления накопителем энергии Далримпл 30 МВА, 8 МВт·ч в Австралии (рисунок 7). Система управления накопителем энергии обучена имитации частотного (инерционного) отклика в переходных процессах на выбор одного из трех сопоставимых по мощности синхронных генераторов как это описывается в докладе С6-322.

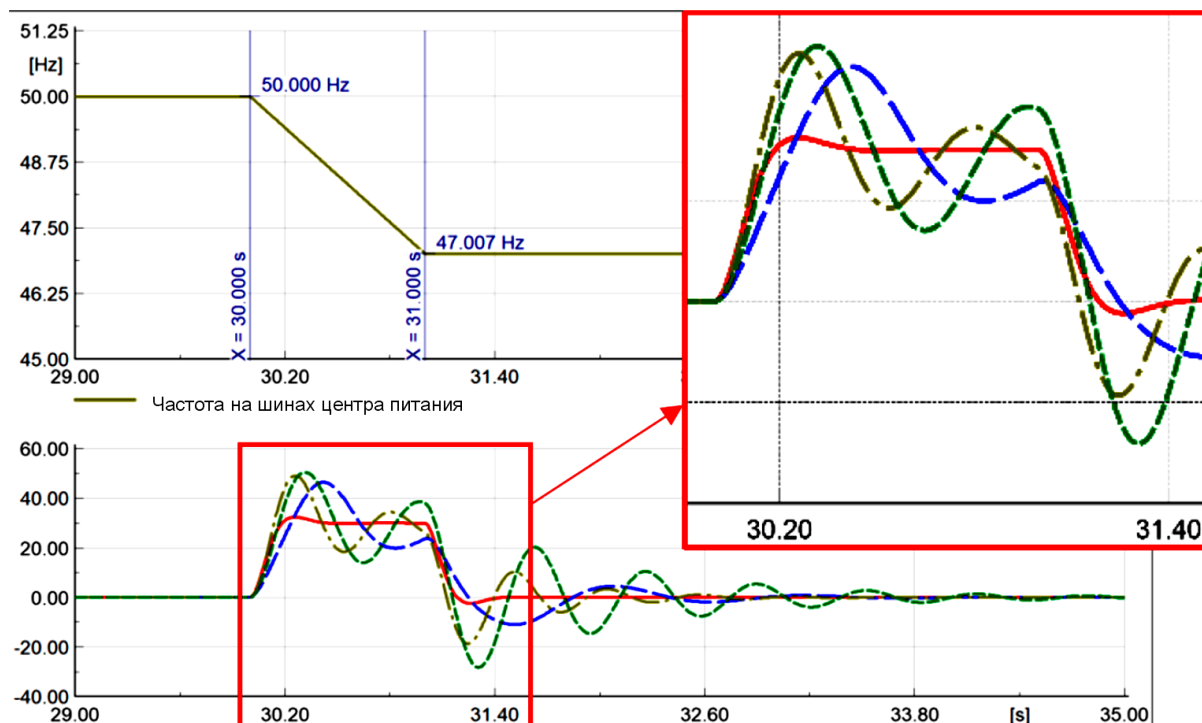


Рис. 7. Сравнение траектории отклика **накопителя энергии** и различных синхронных генераторов 1, 2 и 3 на изменение частоты на шинах центра питания: вверху график частоты, внизу график активной мощности в МВт

В Испании производится обучение регуляторов мощности ветровых генераторов следованию заданному графику мощности (доклад С6-323). Опытным путем получено, что для системных нужд ВЭУ должны работать примерно на 40 % от доступной мощности, поддерживая тем самым резерв на загрузку 60 % и на разгрузку 40 %. Такие величины получены путем моделирования по сценариям различных неполадок в системе АРЧМ и телеметрии с измерениями мощности и скорости ветра.

Деятельность международного исследовательского комитета SC C6

Со времени проведения 47-й Генеральной сессии CIGRE в Париже утверждены следующие исследовательские группы (список групп соответствует таковому в пространстве SC C6 в системе документооборота CIGRE KMS и фактической работе групп; данный список может отличаться от списков, представленных на международном и русскоязычном сайтах CIGRE).

C6.44 Nodal Value of Distributed Renewable Energy Generation. Рыночное стимулирование технологического присоединения объектов распределенной генерации в дефицитных узлах сети и препятствование ему в избыточных узлах сети.

C6.43 Aggregation of battery energy storage and distributed energy resources (DER), including solar PV (создана на базе Battery energy systems for distribution grid services). Техничко-экономическая оценка и рыночная модель технологического присоединения и работы накопителей энергии в избыточных узлах сети.

C6.42 Electric Transportation Energy Supply Systems. Вопросы электрификации всех видов транспорта и создания соответствующей энергетической инфраструктуры.

C6.41 Technologies for Electrical Railway Distribution Supply Systems. Перспективные технологии для железнодорожных систем электроснабжения.

C6.40 Electric Vehicles. Планирование перспективного развития малого электротранспорта, его зарядной инфраструктуры и способов его применения.

C6.36 Benchmark Systems. Разработка, унификация и стандартизация расчетных моделей для разработки схем выдачи мощности распределенных энергетических ресурсов.

Совместная рабочая группа C5.C6.29 Local energy communities. Создание сбалансированных по мощности и энергии участков энергосистем, на которых существуют локальные розничные рынки электроэнергии.

Совместная рабочая группа C1.C6.42 Planning tools and methods for systems

facing high levels of distributed energy resources. Применение методов системного анализа для планирования перспективного развития распределенных энергетических ресурсов и оценки их влияния на магистральные электрические сети и энергосистемы в целом.

В рамках деятельности подкомитета закончили свою работу с изданием брошюры следующие исследовательские группы.

S6.28 Hybrid Systems for Off-Grid Power Supply (секретарь – П.В. Чусовитин, Россия). Анализ создания и функционирования изолированных энергосистем с комбинированными источниками энергии на основе существующих проектов и кейсов.

S6.38 Rural Electrification. Практика электрификации отдаленных сельских потребителей электроэнергии, преимущественно в Африке. Примеры современных решений по электроснабжению сельских нагрузок на северных территориях Канады и США.

Заключение

Тенденции изменения предпочтительных тем и тематик докладов позволяют сделать вывод, что получение нового знания, а также развитие науки и техники по направлению С6 происходит по методу индукции – от частного к общему:

1. От электротехники к электроэнергетике;
2. От электроэнергетики к общей энергетике и экономике энергетики;
3. От декомпозиции энергосистем с рассмотрением только распределенных энергоресурсов к применению теории больших систем и соответствующих подходов.

Данные тенденции отражают повсеместное развитие распределенных энергетических ресурсов в мировом масштабе.