

ОБЗОР ТРЕНДОВ РАЗВИТИЯ И ОПЫТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ПО СОСТОЯНИЮ НА 2024 г.

На основе исследовательских материалов CIGRE

ИК С6 «Активные распределительные системы
и распределенные энергоресурсы»



cigre

For power system expertise

Представитель РФ в SC С6, к.т.н.

В.О. Самойленко

Предпочтительные темы докладов 50-й сессии CIGRE 2024



cigre

For power system expertise

Предпочтительные темы 50-й сессии CIGRE 2024 (в переводе РНК СИГРЭ)

3

1. УПРАВЛЕНИЕ ГИБКОСТЬЮ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

- Системы накопления энергии с сопутствующим предоставлением сетевых услуг распределительным и вышестоящим сетям;
- Изменение целей и критериев планирования и эксплуатации с ростом электрификации, с изменением технологий, обеспечивающих функционирование системы на всех уровнях;
- Интеграция электромобилей и их воздействие.

2. РЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

- Оценка и количественное определение добавленной стоимости функций интеллектуальных инверторов и преобразователей и их интеграция в распределительные сети;
- Предметные исследования сетевых решений постоянного тока и гибридных решений постоянного/переменного тока для будущего;
- Предоставление системных услуг для распределительных и вышестоящих сетей.

3. СТАНДАРТЫ, ПРАКТИКА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВАРИАНТЫ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ, ИЗОЛИРОВАННЫХ РАЙОНОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

- Области применения, подчеркивающие взаимосвязь технических и нетехнических аспектов электрификации сельских районов;
- Применение объектов распределенной генерации в автономных сетях и изолированных системах, включая соответствующие меры по повышению отказоустойчивости;
- Оборудование в микросетях и мульти-микросетях.

Синтез систем автоматического регулирования с заданными свойствами для распределенных энергетических ресурсов на основе силовых преобразователей

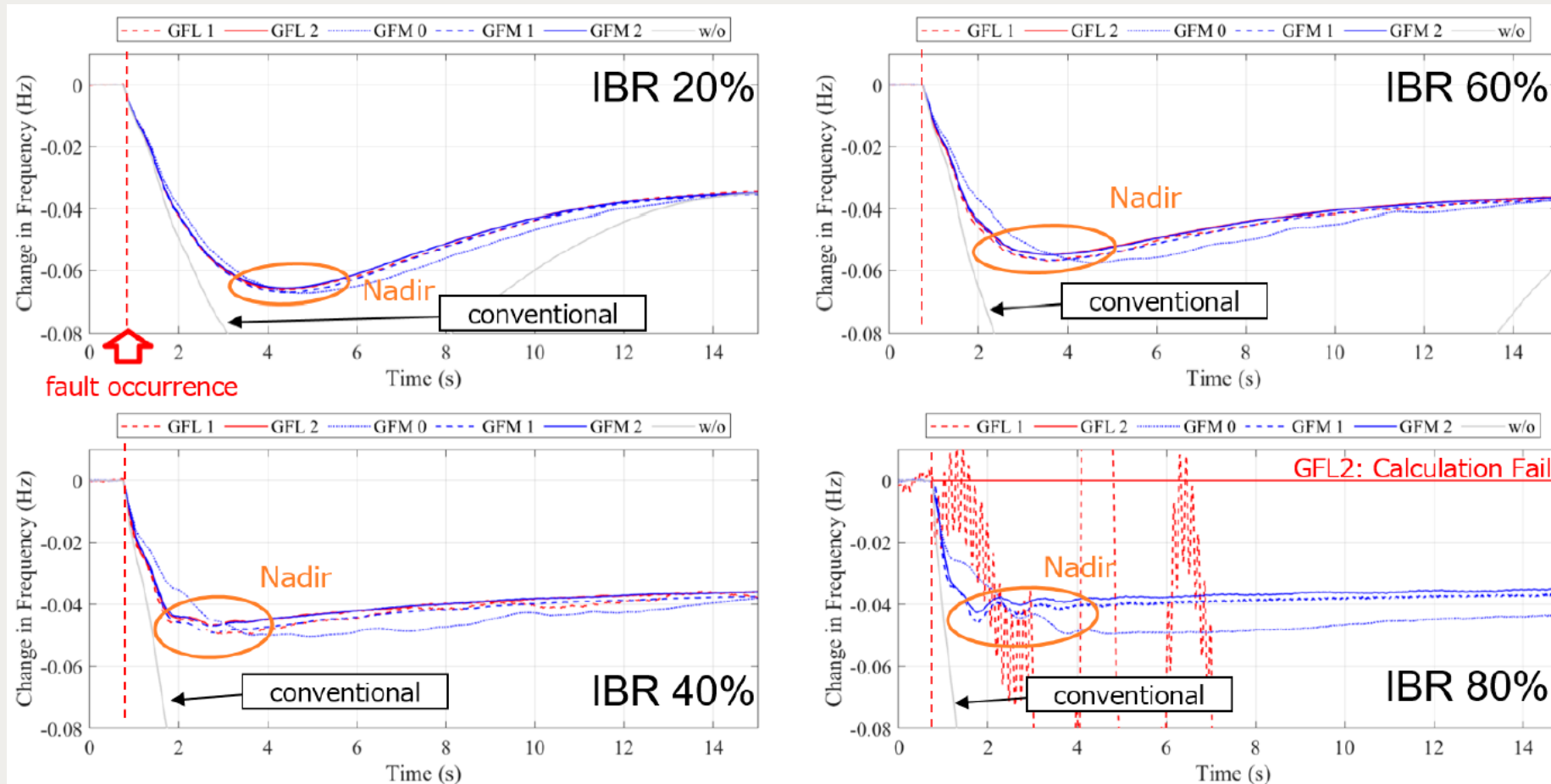


cigre

For power system expertise

Исследования критической доли распределенных энергоресурсов с силовыми преобразователями в Японии

5



IBR = Inverter Based Resources

Conventional – традиционная генерация на основе вращающихся электрических машин

GFL = Grid Following, управление инвертором по модели источника тока

GFM = Grid Forming, управление инвертором по модели источника напряжения

Nadir – низшая точка кривой

Увеличение доли распределенных энергетических ресурсов с инверторами, особенно работающими в режиме источника тока, приводит к ухудшению условий работы синхронной генерации. Критическая доля источников с инверторами оценена в ~70 %

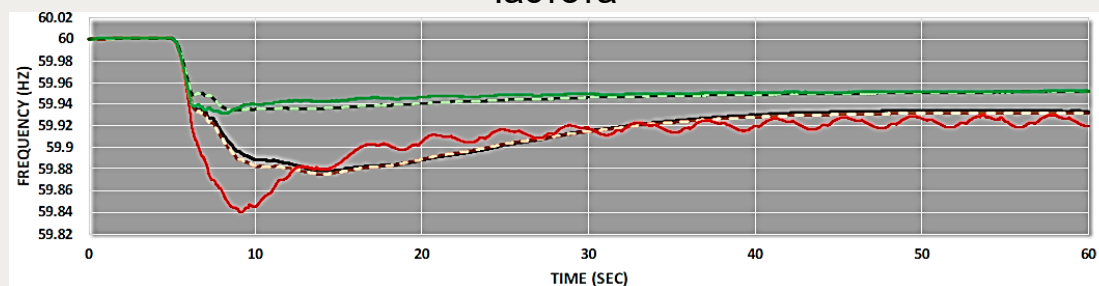
PS2-11297

Динамический отклик мощности зарядной инфраструктуры на переходные процессы. США

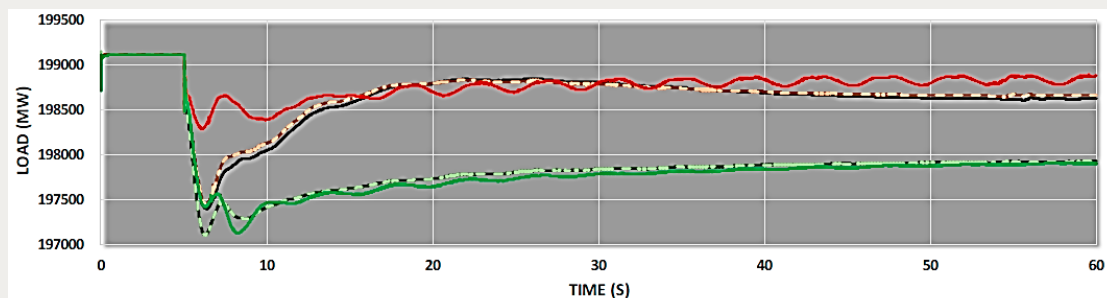
6

Отклик на изменение частоты в энергосистеме

Частота



Нагрузка электрозаправок на ЭС



Без электрозаправок

Безынерционные, уставка по напряжению

Безынерционные, уставка по напряжению, статизм f 5 %

Уставка по мощности

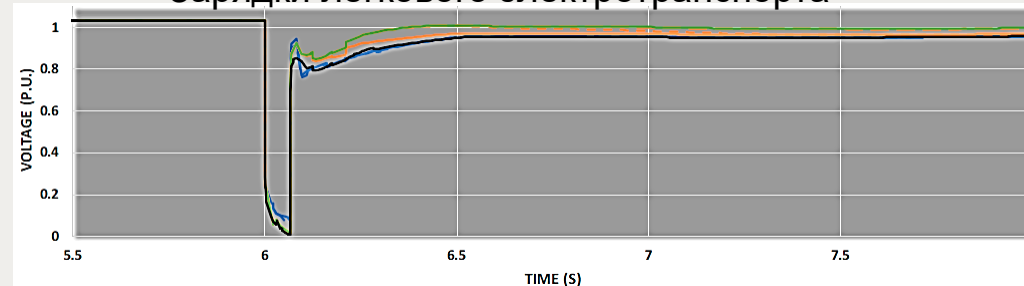
Уставка по мощности, статизм f 5 %

Уставка по току

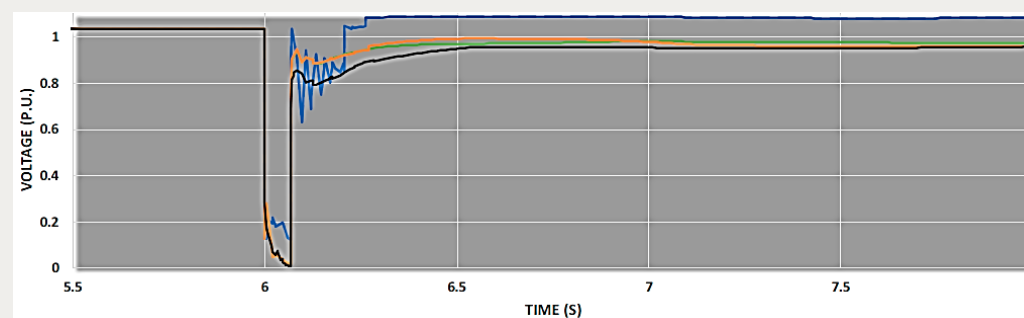
Уставка по мощности, статизм f 5 %

«Самозапуск» после КЗ

Зарядки легкового электротранспорта



Зарядки грузового и общественного электротранспорта



Без электрозаправок

Безынерционные, уставка по напряжению

Уставка по мощности

Быстрое восстановление зарядки, быстрая автоподстройка

Уставка по току

Быстрое восстановление зарядки, медленная автоподстройка

Медленное восстановление зарядки и автоподстройка

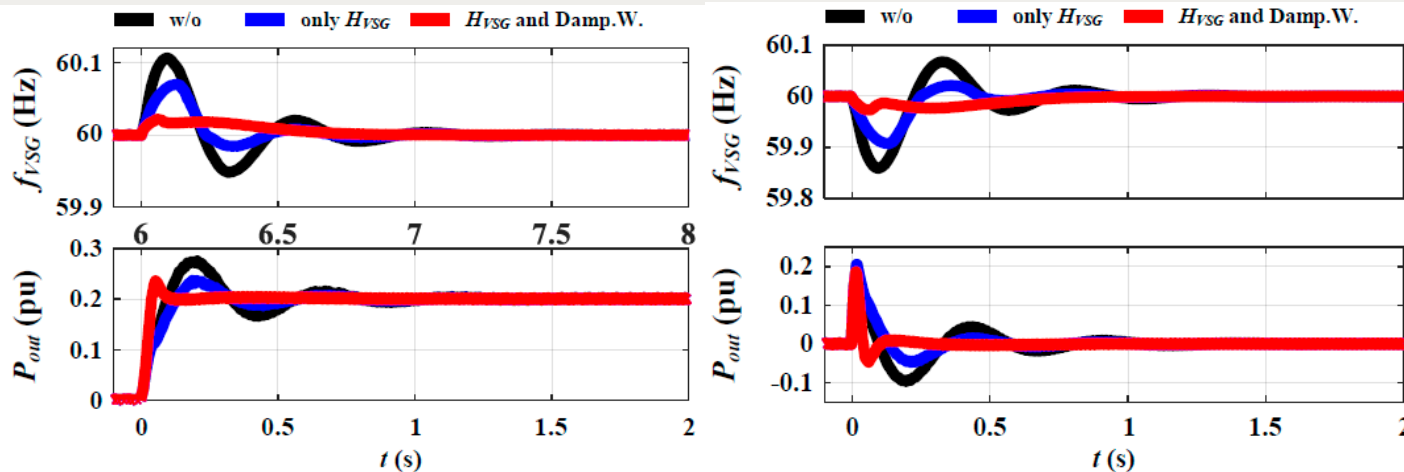
Электрозаправочные станции в зависимости от настроек инвертора и контроллера заряда АКБ могут существенно влиять на характер переходных процессов в послеаварийном режиме. Наиболее благоприятный режим зарядки – по напряжению, наименее благоприятный – неизменной мощностью

• PS1-10478

Синтез адаптивной системы управления распределенными энергоресурсами с преобразователями энергии на основе концепции виртуального синхронного генератора. Россия (ТПУ)

7

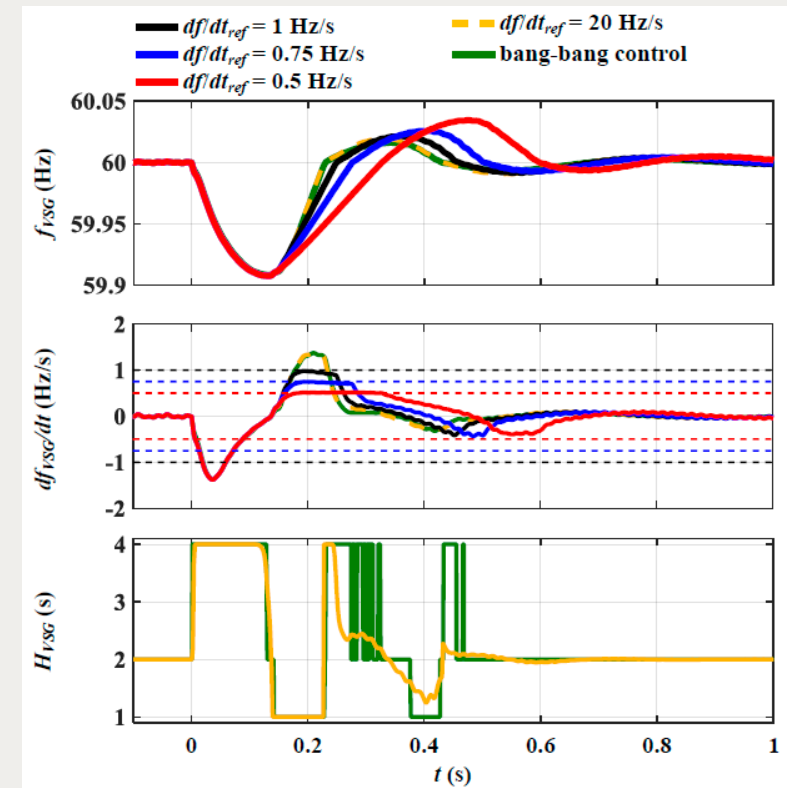
Примеры переходных процессов при работе **основного алгоритма искусственной инерции** и дополнительного алгоритма, **имитирующего демпферную обмотку**



Сглаживание процесса изменения искусственной инерции и частоты в ЭС с целью упрощения энергетических условий работы силового преобразователя и снижения требований к аппаратной доступности функции искусственной инерции →

Важной находкой проведенной работы является теоретическая возможность подбора уставок для алгоритмов искусственной инерции и демпферной клетки таким образом, что они не потребуют превышения пределов термического импульса силового преобразователя и пределов мощности первичного источника

Работа функции искусственной инерции с различными уставками скорости изменения частоты ↓



• PS2-10822

Верификация алгоритмов искусственной инерции первого в Китае накопителя энергии с подобной функцией. АКБ, мощность 50 МВт, ёмкость 100 МВт*ч

8

Внешний вид рассматриваемого накопителя энергии

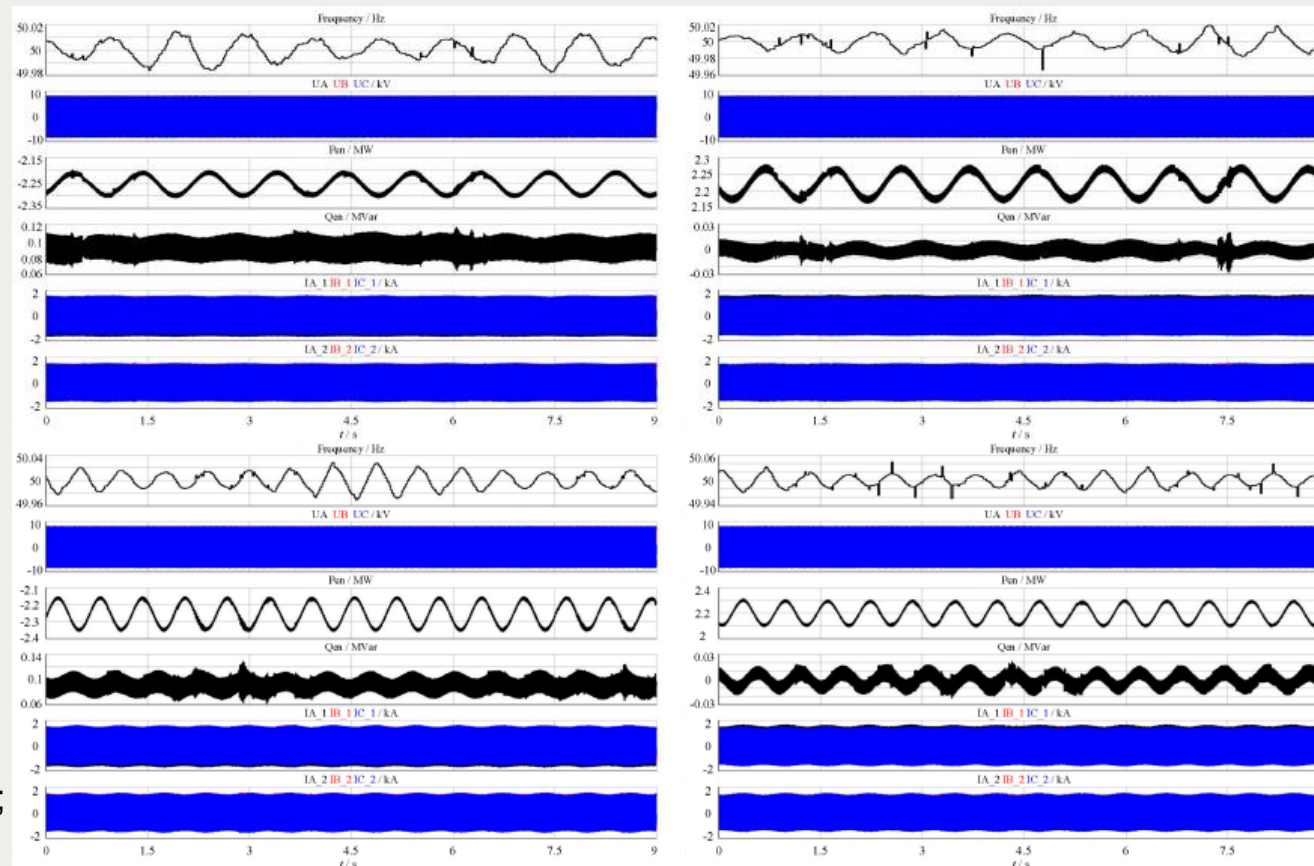


Программа испытаний:

- Все испытания проводятся при потреблении и при выдаче мощности 70 % от номинальной;
- Статизм Pf - изменение f в диапазоне 48,1-51,4 Гц;
- Статизм QV - изменение U до 5%, 25 %, 75 % и 130 %;
- Инерция - НЧК с $\{f; \Delta f\}$ {1; 0,01} и {1,6; 0,02} Гц.

По результатам модельных и натурных испытаний подтверждено соответствие разрабатываемых функций техническому заданию. Однако, на графиках имеются признаки бездействия системы управления накопителем в одних случаях и неустойчивого регулирования в других

Примеры графиков P , Q , f , U при испытаниях искусственной инерции

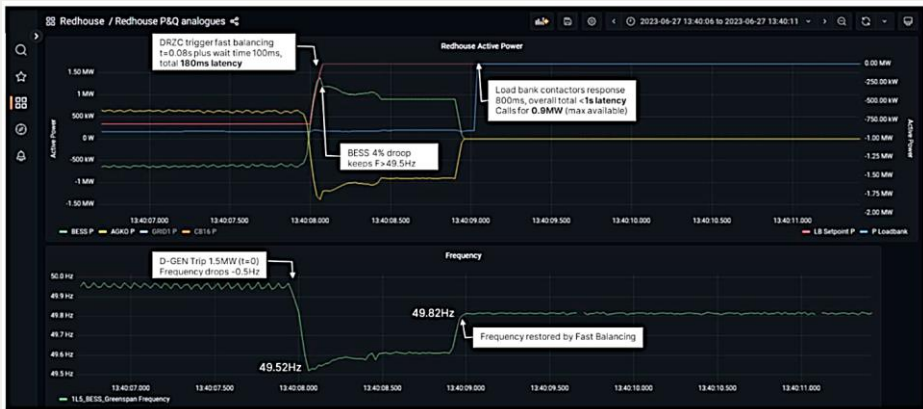


• PS1-10244

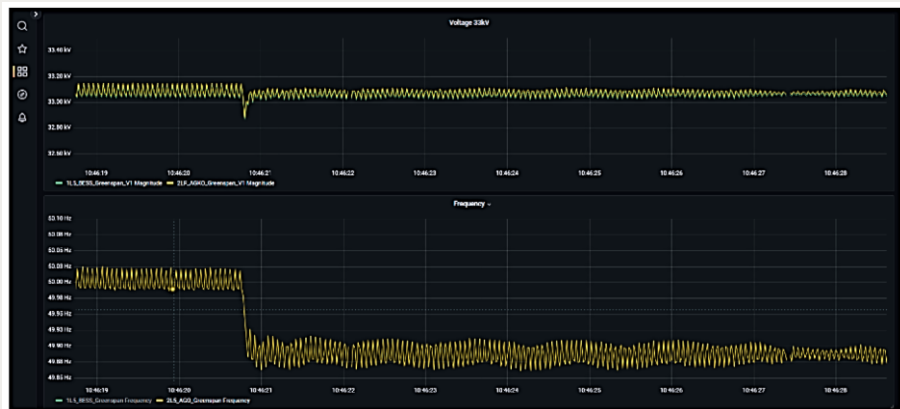
Испытание накопителя энергии 8 МВт, 8 МВт*ч в Великобритании на возможность статического и астатического регулирования мощности

9

Работа со статизмом 4 % в составе системы

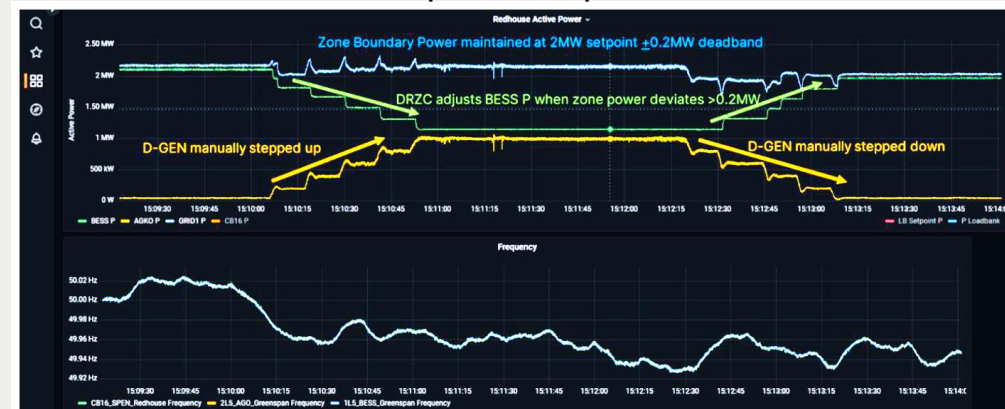


Работа со статизмом 4 % индивидуально

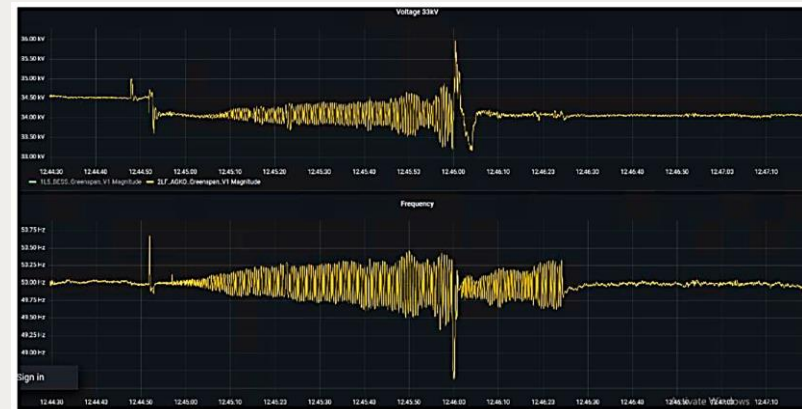


По результатам испытаний выявлена затруднительность работы накопителей энергии в режиме астатического регулирования активной мощности, например, вторичного. Также выявлена склонность к колебательным процессам и неадекватному отклику, во многом из-за особенностей ЦОС

Работа без статизма, но с широкой мертвой полосой $\pm 0,2$ МВт



Возникновение колебаний при статизме менее 1 %

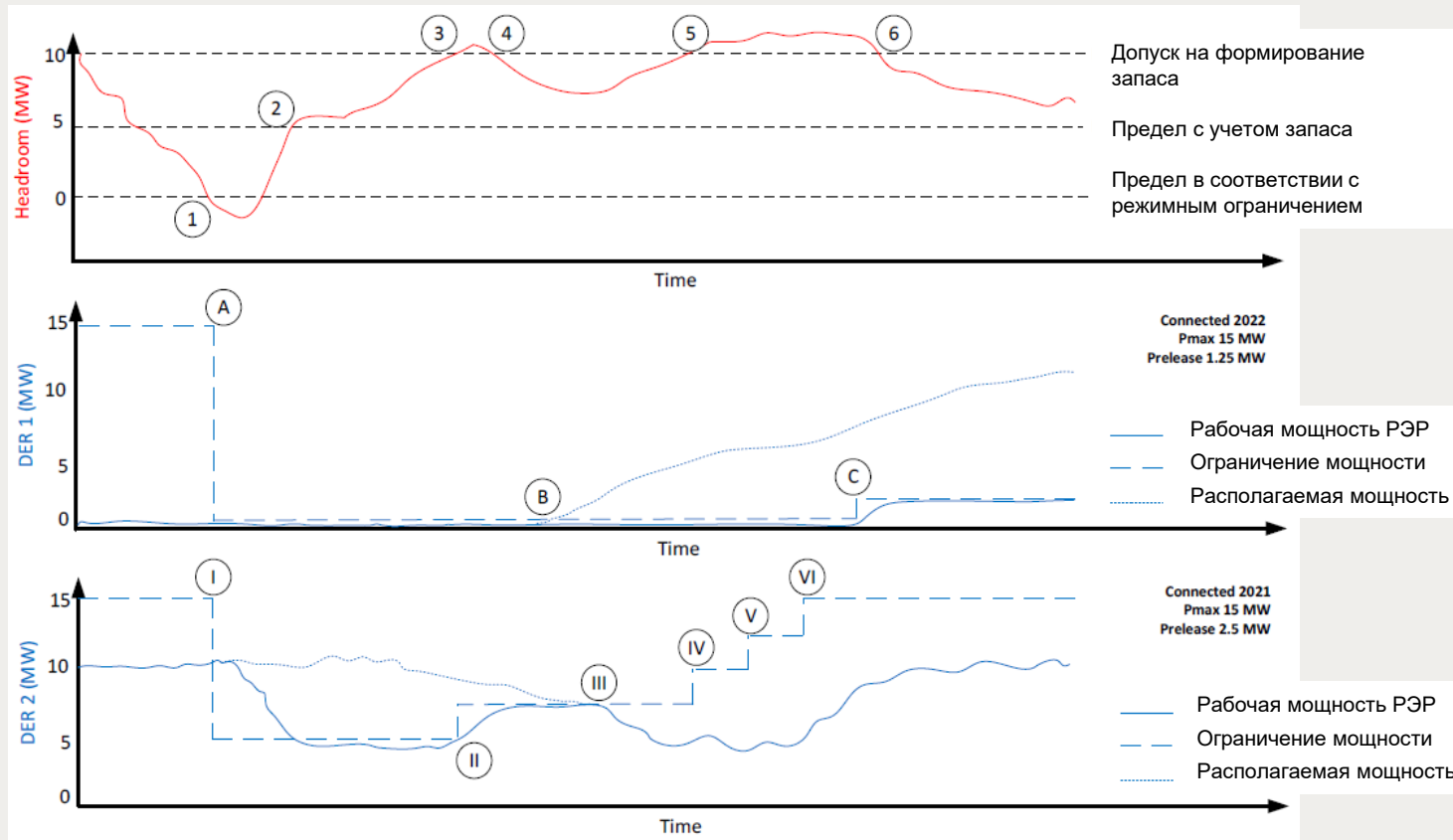


• PS1-11131

Комбинированное управление мощностью микроэнергосистемы с помощью УСВИ, статистической модели и дискретной логики в Великобритании

10

Пример графика с формированием дискретной логики



Примеры работы системы



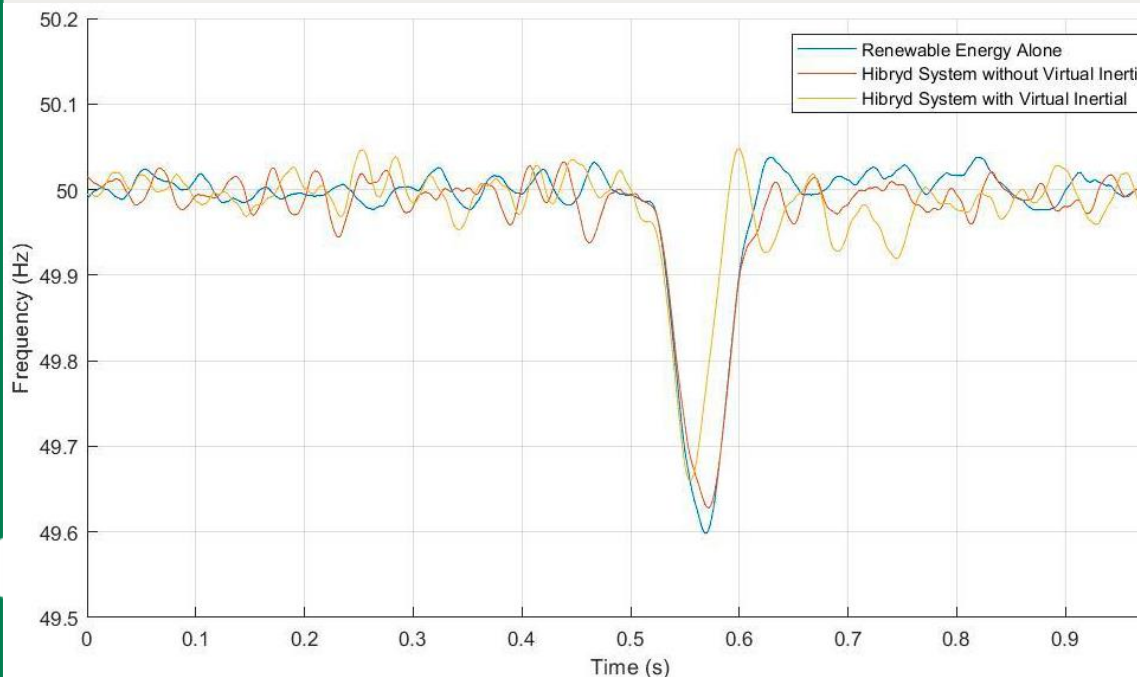
Дискретная логика подразумевает «мертвые полосы», зоны гистерезиса и задержки на время постоянной регуляции распределенного энергетического ресурса. Предусмотрена логика для выбора мощности из статистического предела, последней уставки или мощности аварийного режима

• PS1-11157

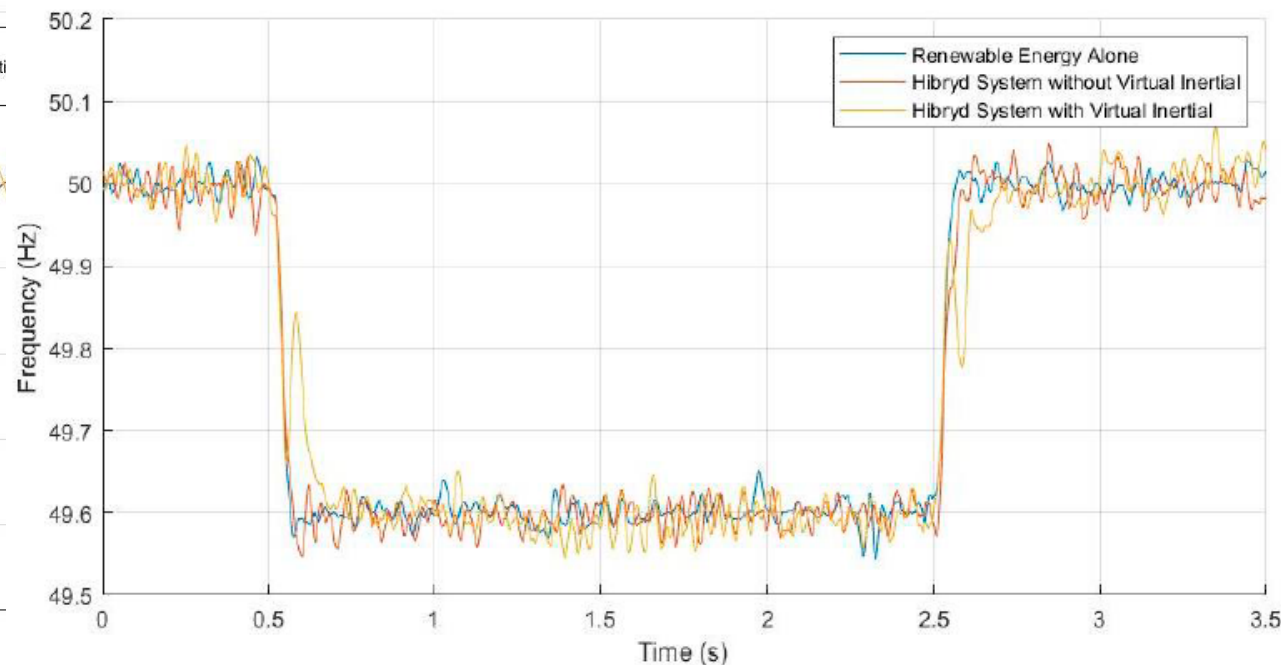
Разработка тестов на статизм и искусственную инерцию для микроэнергосистем до 1000 кВт в Испании

11

Поведение системы
при единичном кратковременном отклонении частоты



Поведение системы
при единичном длительном отклонении частоты



Микроэнергосистема на ВИЭ

Микроэнергосистема на ВИЭ + Накопитель энергии

Микроэнергосистема на ВИЭ + Накопитель энергии + Виртуальная инерция

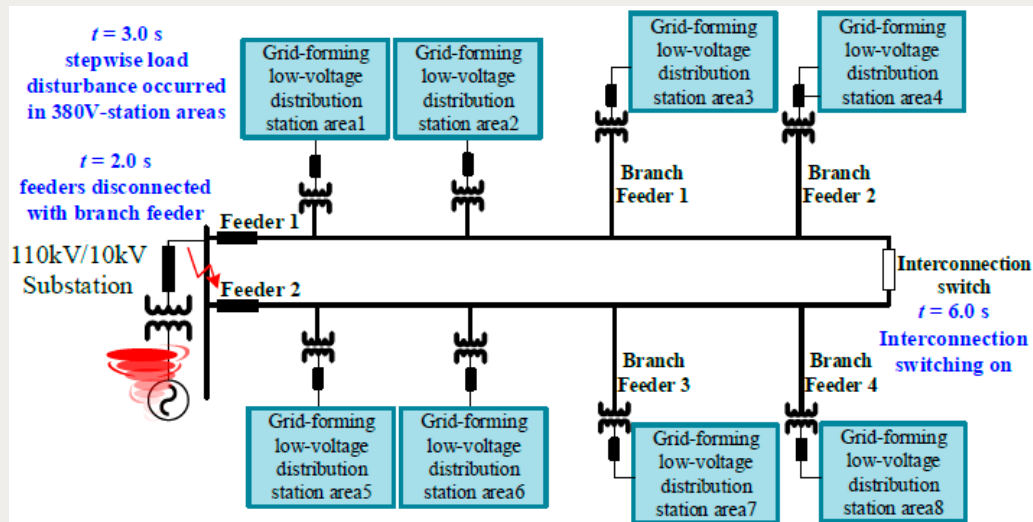
Авторы отмечают, что в микроэнергосистемах ожидаемая польза от малой искусственной инерции может быть даже меньше, чем в больших энергосистемах, в связи с высоким зашумлением сигналов и наличием мелких флуктуаций всех параметров (режим далек даже от квазиустановившегося)

• PS1-
11859

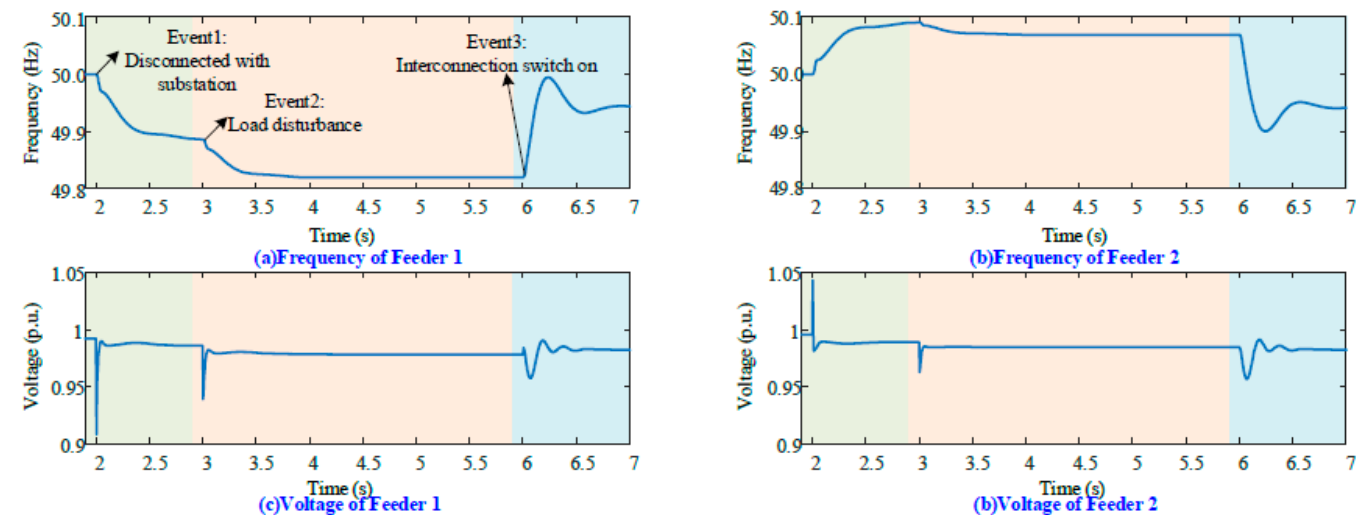
Концепция деления энергосистемы с источниками на основе силовой электроники, предусматривающая не менее одного частото ведущего источника в каждой части разделившейся системы. Китай

12

Схема тестовой сети



Характер переходного процесса при синхронизации фидеров



1. В момент времени 2 с происходит отключение фидеров 10 кВ неутонченной защитой;
2. В момент времени 3 с происходит рост нагрузки;
3. В момент времени 6 с подается команда на синхронизацию двух выделившихся энергорайонов фидеров между собой.

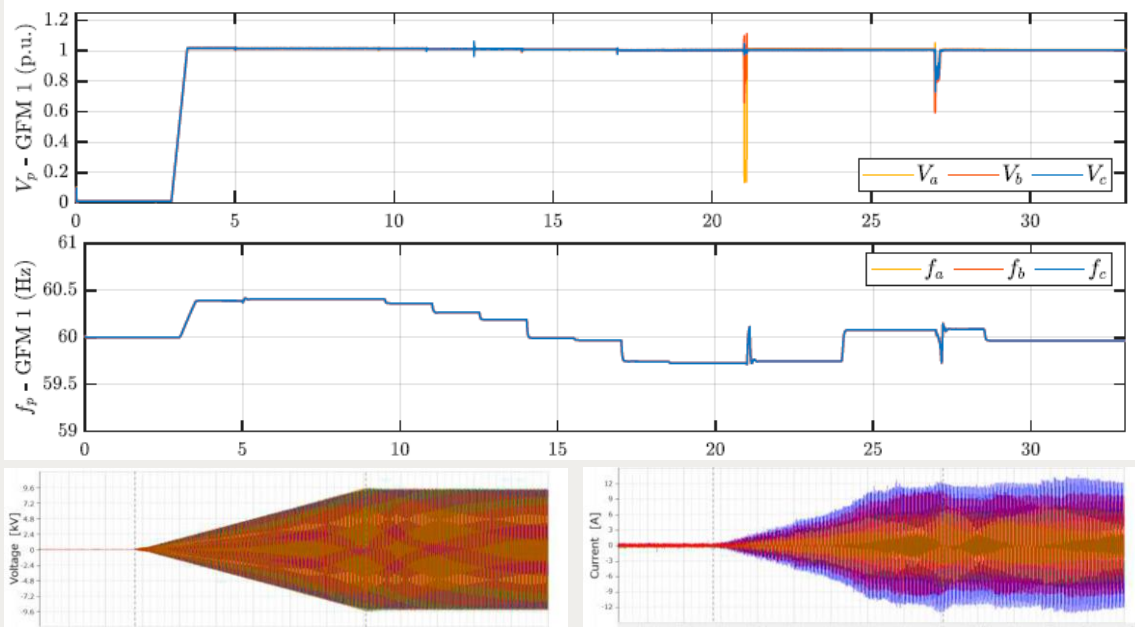
Подобное управляющее воздействие возможно, если имеются частото ведущие источники в ниже лежащей сети 0,4 кВ.

Доступная величина искусственной инерции небольшая, часто околонулевая. В реальной энергосистеме это приведет к тому, что система управления мощностью не сможет противостоять флуктуациям нагрузки в случае их наличия и синхронизировать энергорайоны

• PS2-10248

Обучение частотоведущих преобразователей децентрализованному черному пуску энергосистемы в США и в Японии

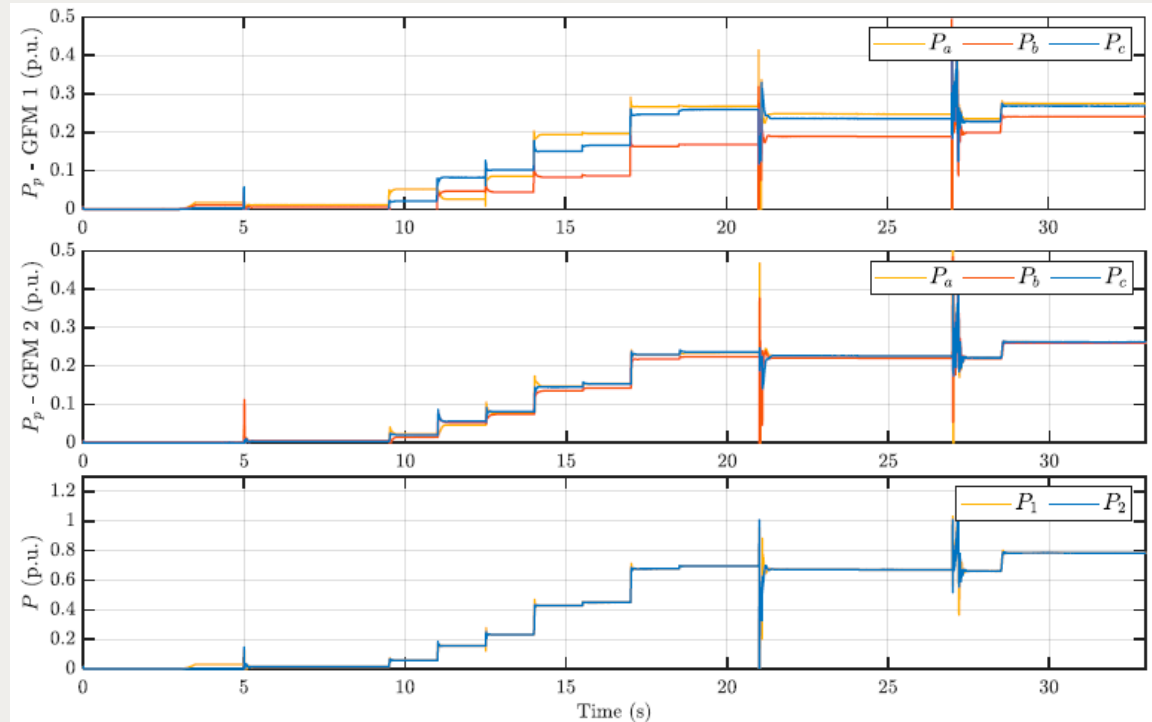
13



• PS3-11299

1. В момент времени 3 с подаётся команда на черный пуск плавным увеличением напряжения за 1 с;
2. В момент времени 5 с происходит объединение двух частотоведущих инверторов на параллельную работу;
3. В момент времени 8 с включаются нагрузочные выключатели;
4. В момент времени 21 с происходит однофазное КЗ с отключением нагрузки, которое вскоре отключается;
5. В момент времени 27 с происходит пуск электродвигателей.

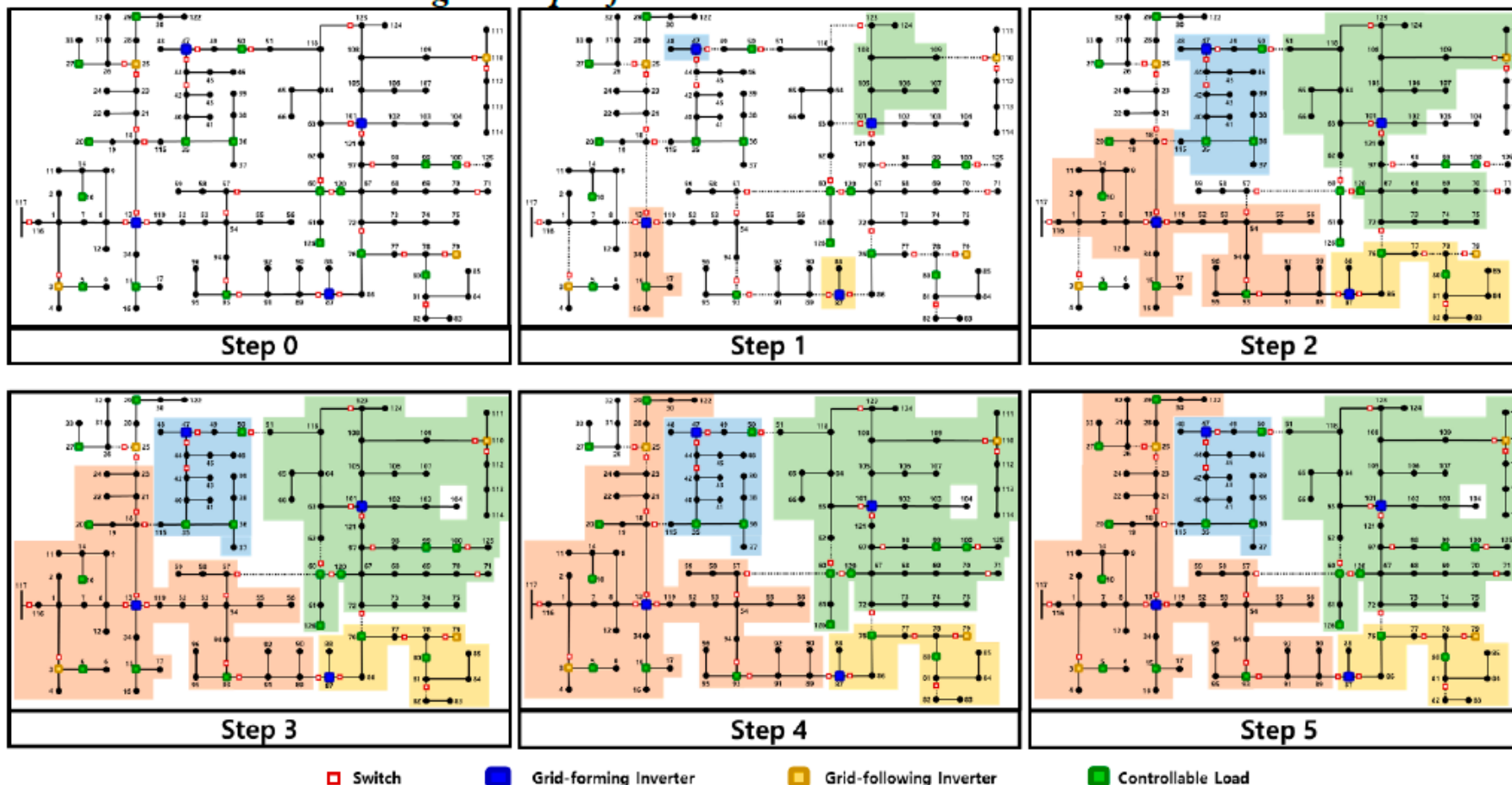
Функции черного пуска реализованы в нескольких микроэнергосистемах в США и Японии, снабженных частотоведущими инверторами



• PS2-10481

Обучение частотоведущих преобразователей децентрализованному черному пуску энергосистемы в Южной Корее

14



Выключатель
Частотоведущий инвертор
Частотоведомый инвертор
Управляемая нагрузка
■ Энергорайоны

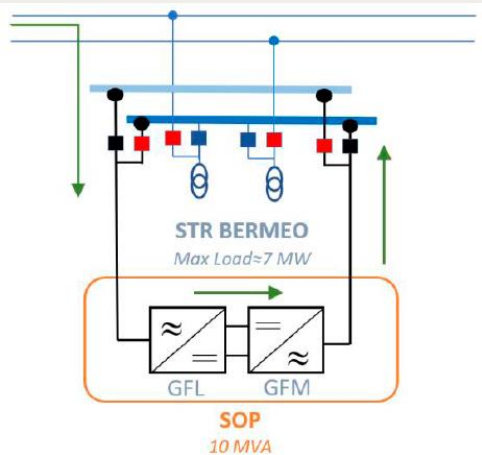
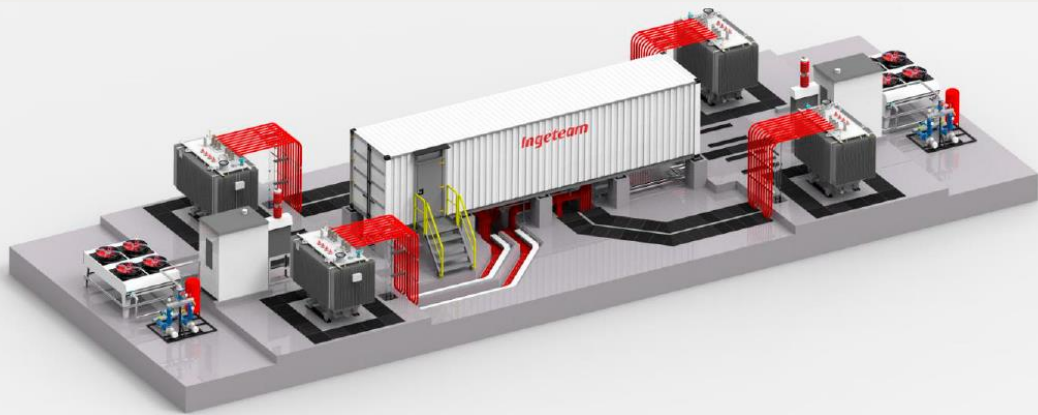
Энергорайоны могут включать частотоведомые инверторы.
Полезным оказывается наличие управляемых нагрузок

• PS3-
11542

Комбинированная понижающая и преобразовательная ПС 30 кВ Бермео 10 МВА в Испании

15

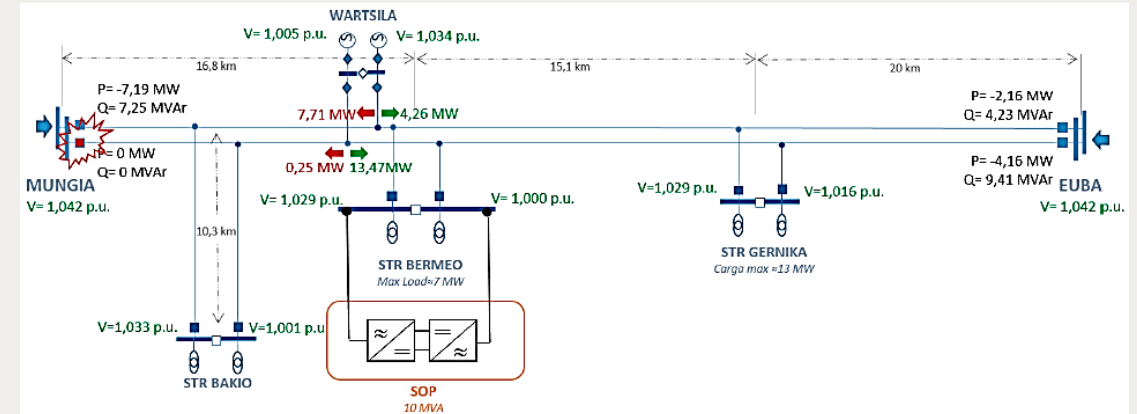
Внешний вид преобразовательной части ПС 30 кВ Бермео



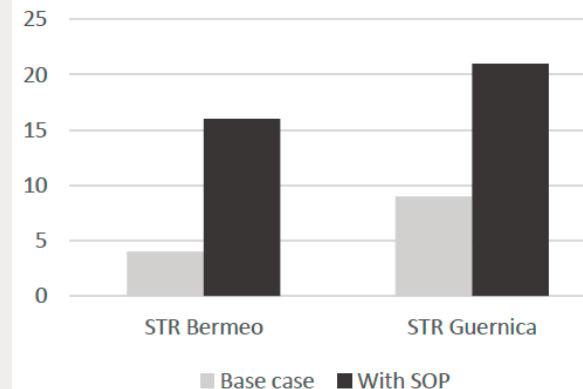
← Схема
ПС 30 кВ Бермео

SOP = Soft Operating Point

Схема сети



Hosting capacity



← Рост максимально возможной подключаемой мощности нагрузок (генерации) на двух ПС 30 кВ рассматриваемой сети после ввода преобразователей на ПС 30 кВ Бермео

ПС 30 кВ Бермео выполняет функции отдельного контроля перетоков активной и реактивной мощности между цепями, поддержания напряжения, устранения перегрузок и черного пуска. Инверторы способны переключаться с модели источника тока на модель источника напряжения или обратно

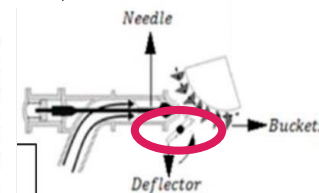
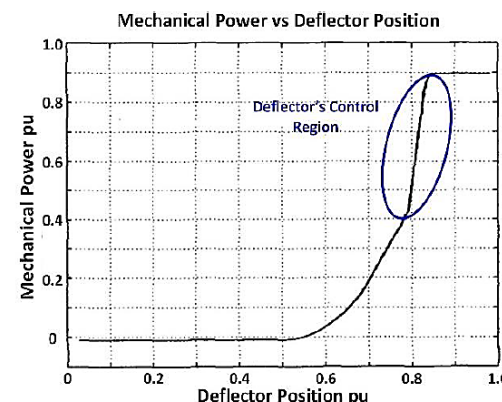
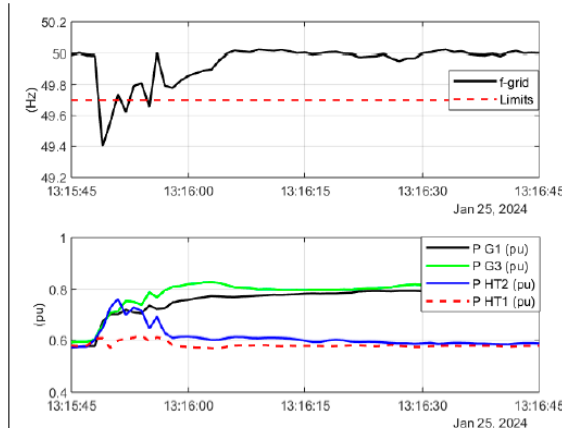
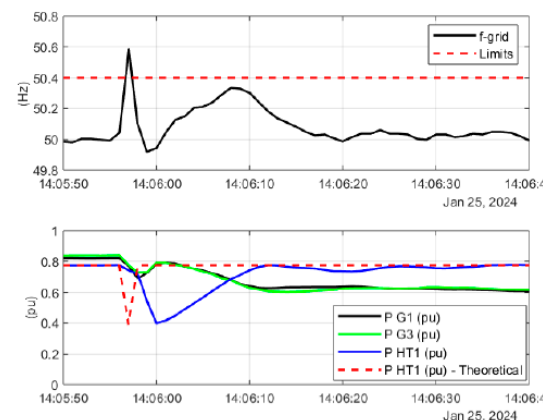
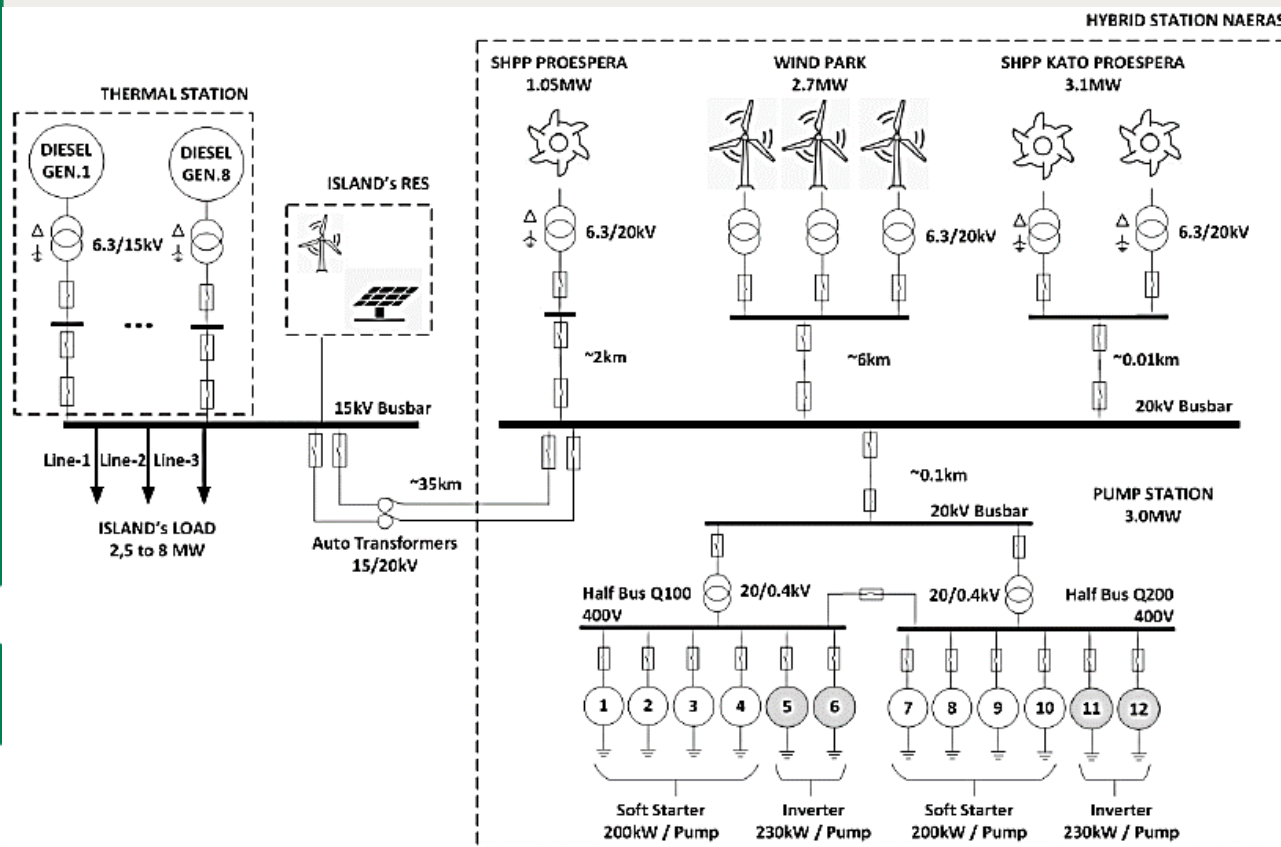
PS1-
10625

Реализация первичного и вторичного регулирования частоты и мощности на ГАЭС энергосистемы острова Икария, Греция

16

Схема энергосистемы: нагрузка ~8 МВт, установленная мощность ~15 МВт

Результаты испытаний ГАЭС на загрузку и разгрузку



← Модернизация форсунок ГАЭС путем установки дефлектора

← Рабочая зона регулятора в долях от механической мощности

Когда дизель-генераторы не работали – автоматическое регулирование частоты в ЭС острова не осуществлялось. При переходе на ВИЭ такая ситуация возникала бы чаще. Заменить существующие инверторы ВИЭ на частотоведущие невозможно, поэтому регулирование поручено ГАЭС

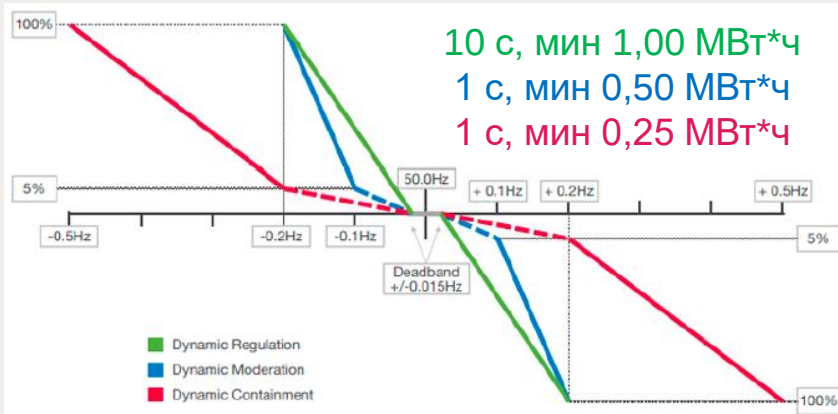
• PS1-11702



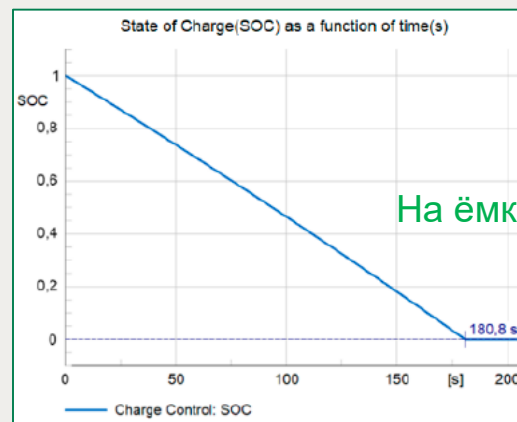
Конструирование гравитационного накопителя энергии 1 МВт, 0,05 МВт*ч под требования рынка системных услуг Великобритании

17

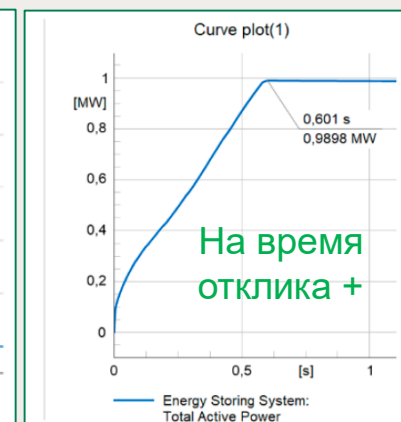
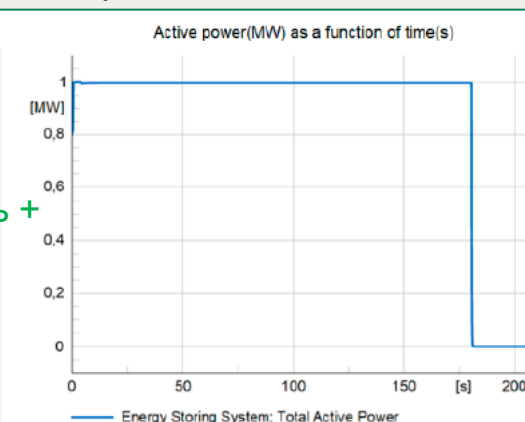
Требования к Н(П)РЧ на рынке системных услуг



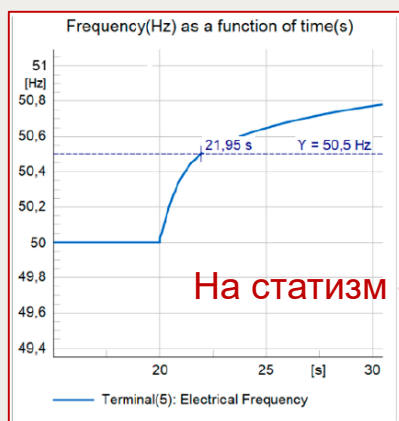
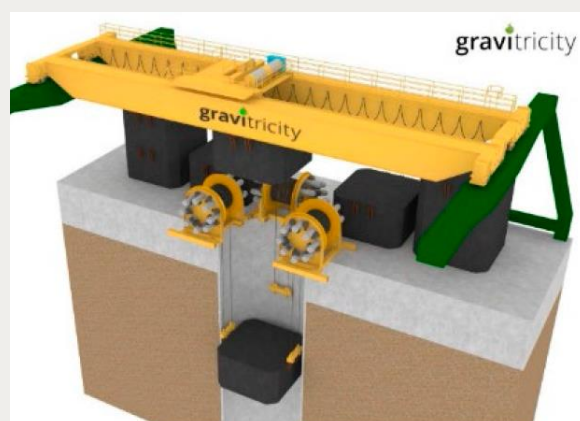
Результаты различных испытаний



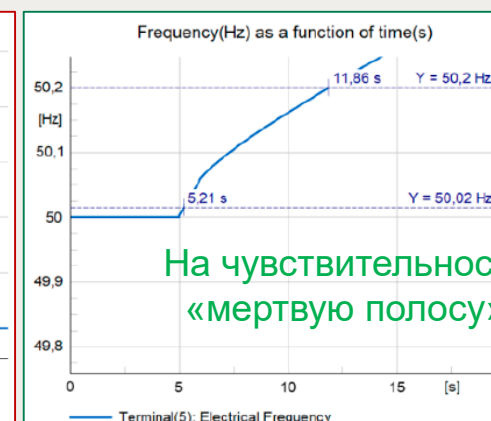
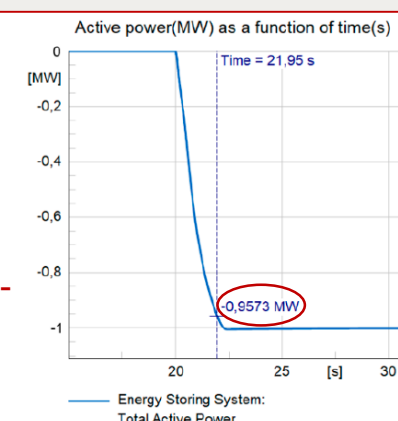
На ёмкость +



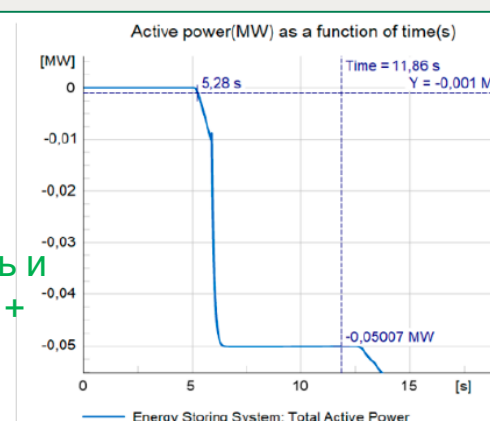
На время отклика +



На статизм -



На чувствительность и «мертвую полосу» +

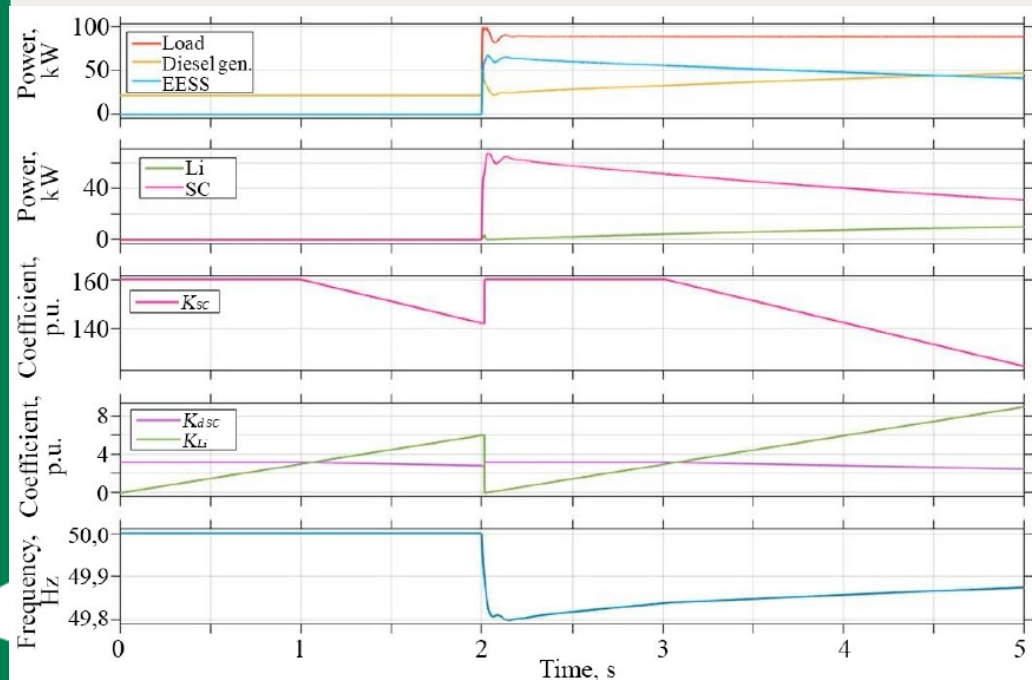


По мнению авторов статьи, наиболее сложно обеспечить не столько время отклика гравитационного накопителя, сколько статизм, т.к. процесс изменения мощности вблизи мертвых точек груза нелинеен. Чувствительность («мертвая полосу») накопителя – в пределах нормы

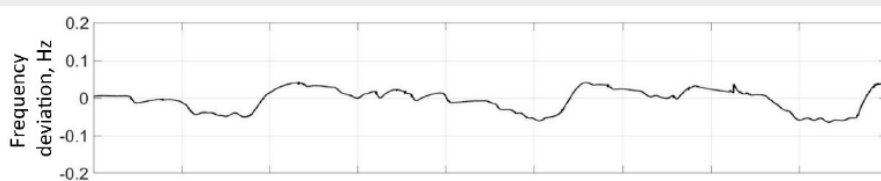
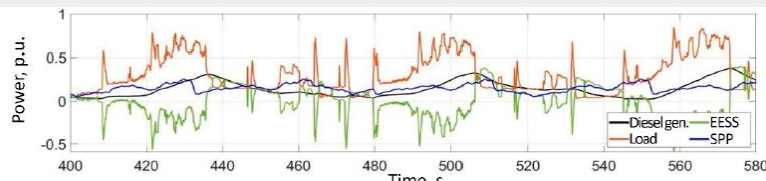
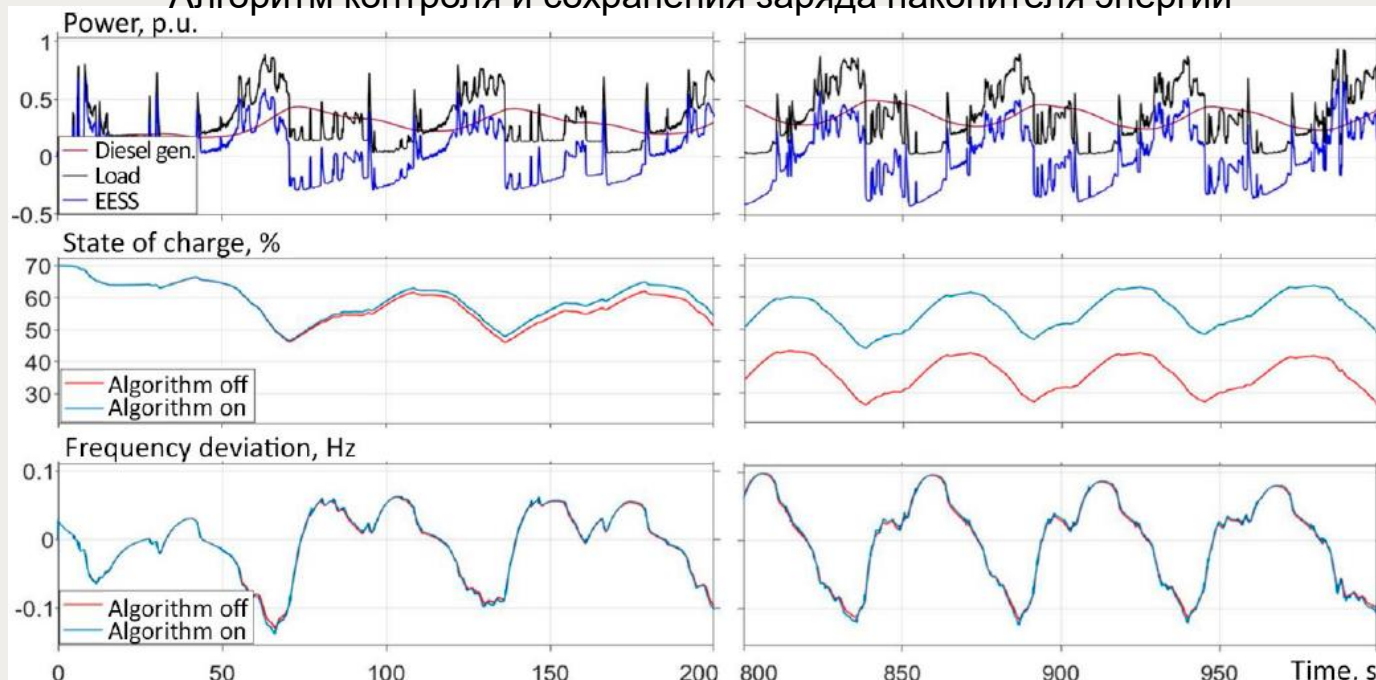
• PS1-11653

Управление частотой микроэнергосистемы с помощью накопителя энергии. Выбор эффективных параметров регуляторов. Россия (НГТУ) 18

Пример переходного процесса в микроЭС



Алгоритм контроля и сохранения заряда накопителя энергии



← Пример сглаживания изменения частоты в микроЭС с помощью накопителя энергии

Автором разработан алгоритм распределения во времени долей участия в регулировании частоты накопителей энергии разных типов в составе гибридной системы накопления электроэнергии за счёт динамического изменения коэффициентов усиления, способствующий экономии ресурса накопителей

• PS3-11867



Повышение эффективности агрегации спроса, ценозависимого потребления электроэнергии и розничного рынка системных услуг



cigre

For power system expertise

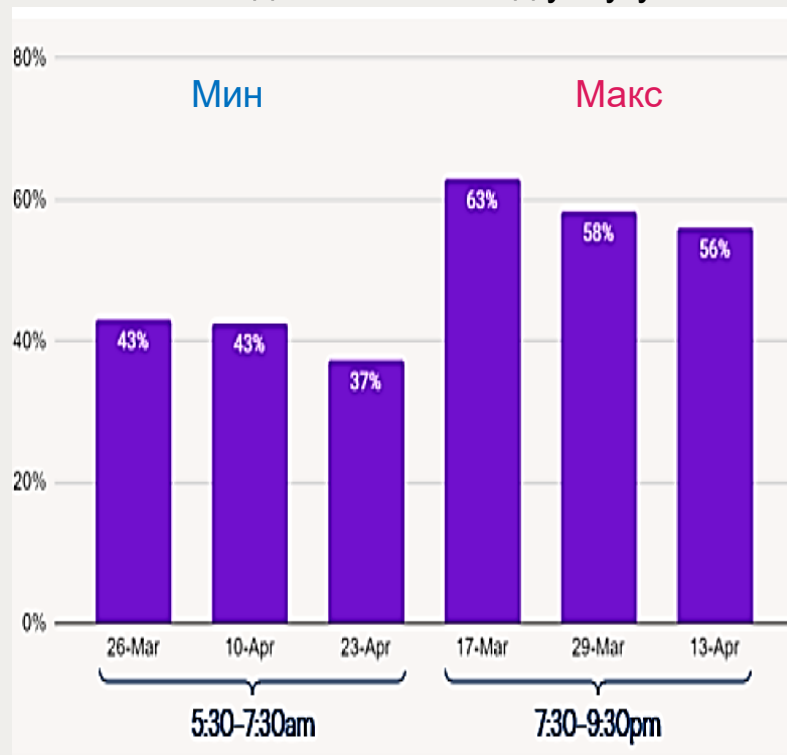
Повышение эффективности агрегации спроса бытовой нагрузки за «кэшбэк» киловатт-часами и за скидки в Великобритании

20

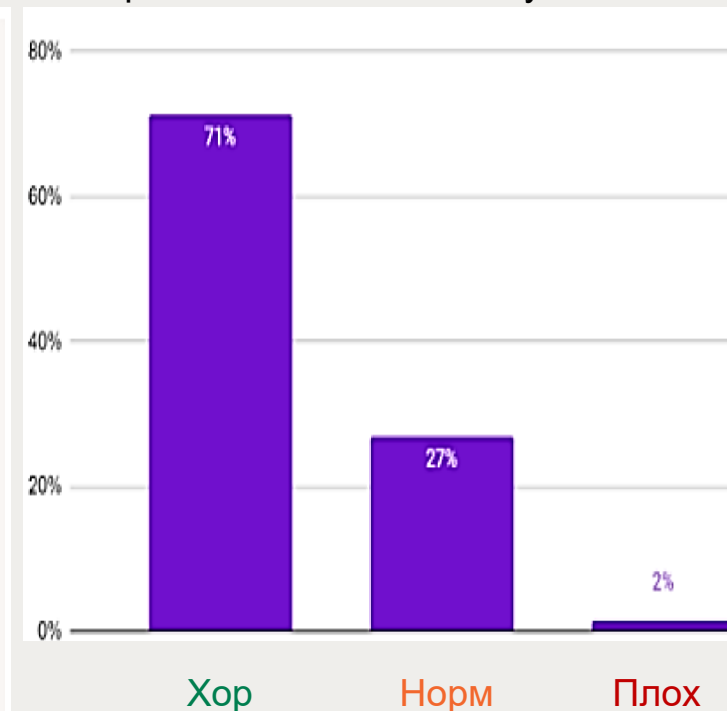
Формирование карты перегруженных ТП ■ и фидеров СН, а также предполагаемой мощности зарядных станций в зданиях (мин — ср. — макс)



Эффективность (дисциплина) агрегации спроса по изменению мощности от подключенной под услугу



Степень удовлетворенности потребителей от участия в агрегации спроса на обозначенных условиях

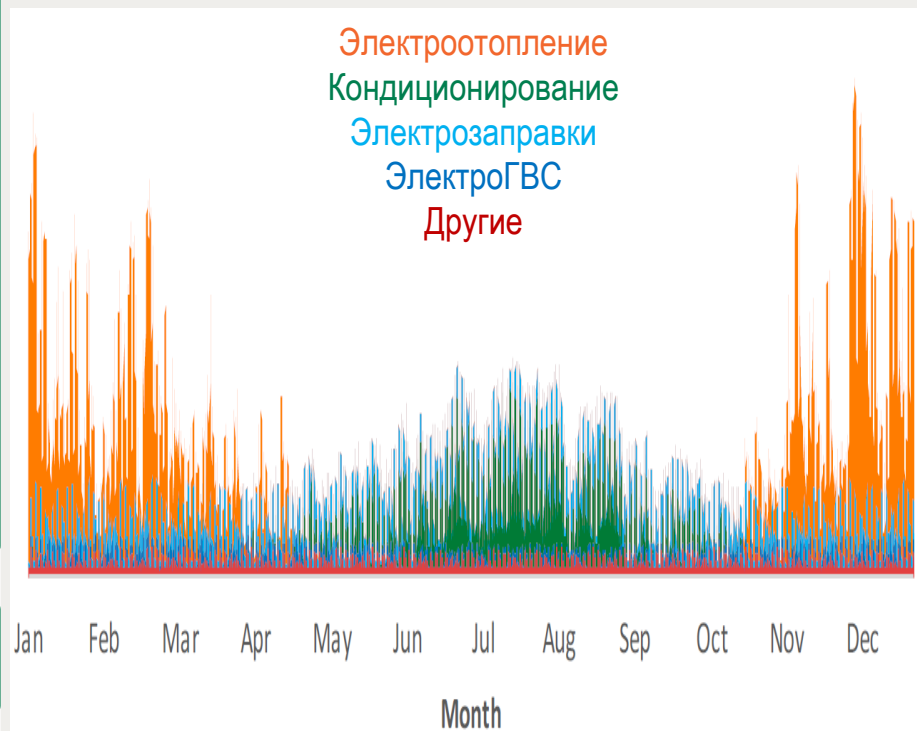


Потребители, выполнившие изменение мощности не менее чем на 10 % от заявленной, пропорционально изменению награждаются: или бесплатными киловатт-часами, если не превысили месячный норматив потребления; или скидкой на электроэнергию свыше месячного норматива

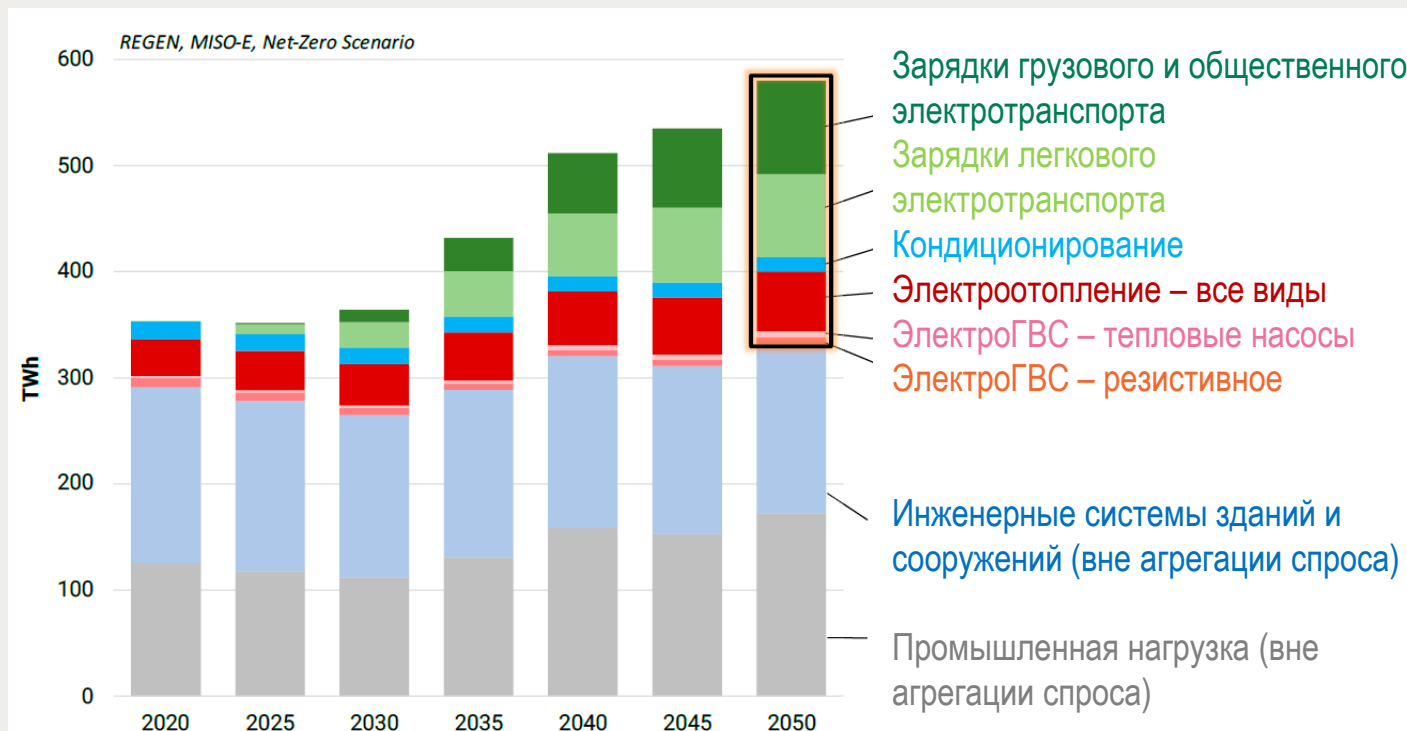
• PS1-10409

Перспективная структура нагрузки для агрегации спроса в США

Структура нагрузок США, подходящих для агрегации спроса, в разрезе года



Структура всех нагрузок по возможности участия в агрегации спроса

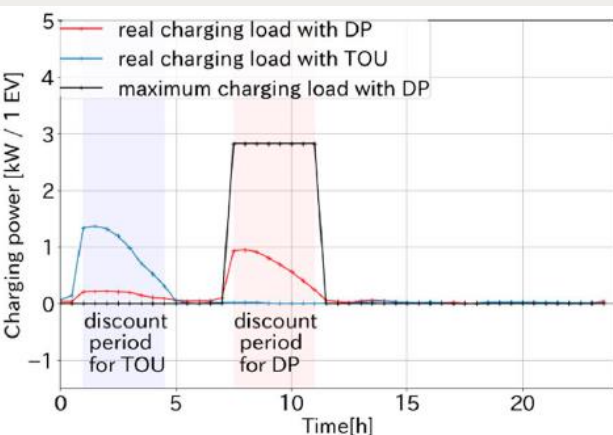


В актуализированной концепции агрегации спроса в США офисная и особенно промышленная нагрузки должны работать на экономику с максимальной производительностью без снижения мощности, вызванной агрегацией спроса. Под агрегацию спроса предполагается подключать только наиболее гибкие нагрузки, перерыв потребления мощности которых не ведет к снижению ВВП

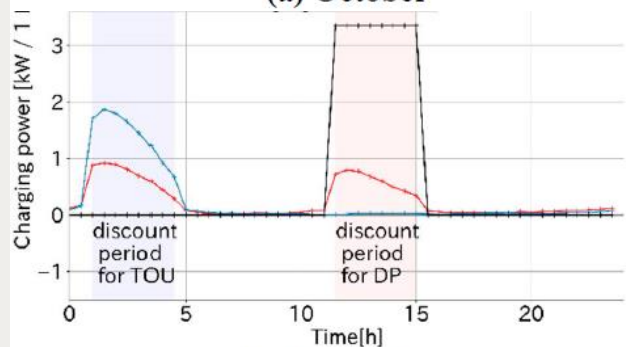
• PS1-10477

Эксперимент по регулированию мощности зарядной инфраструктуры с помощью ценозависимого потребления в Японии 22

Участие зарядных станций в ЦП

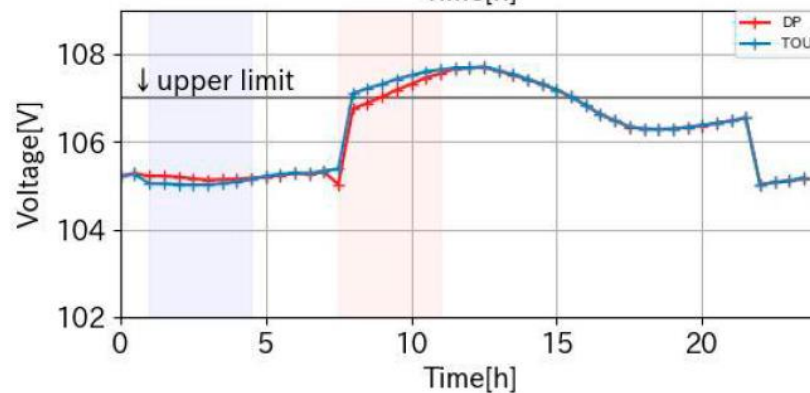
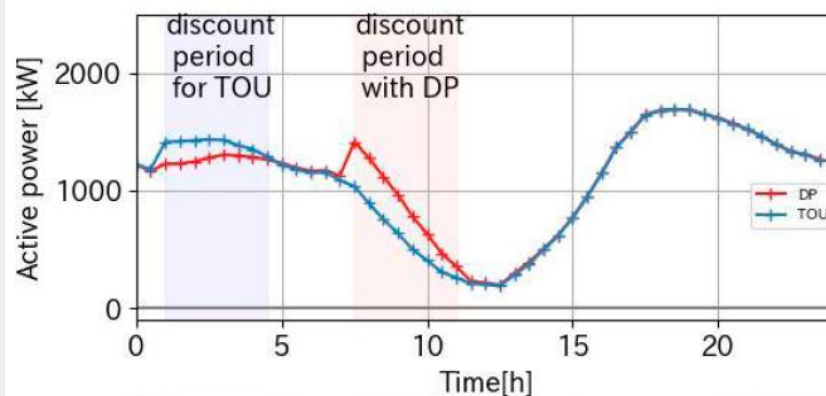


(a) October

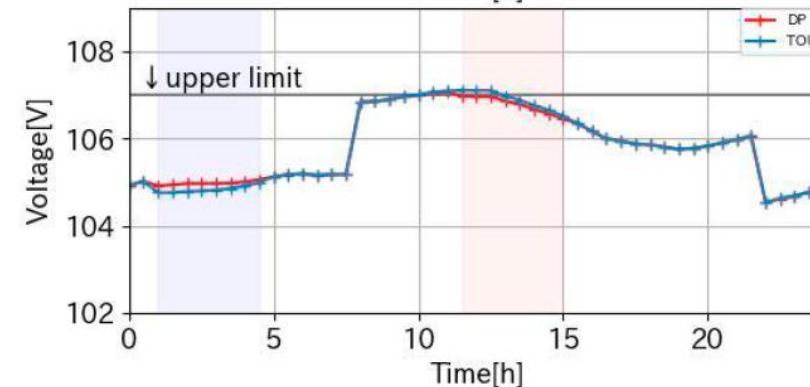
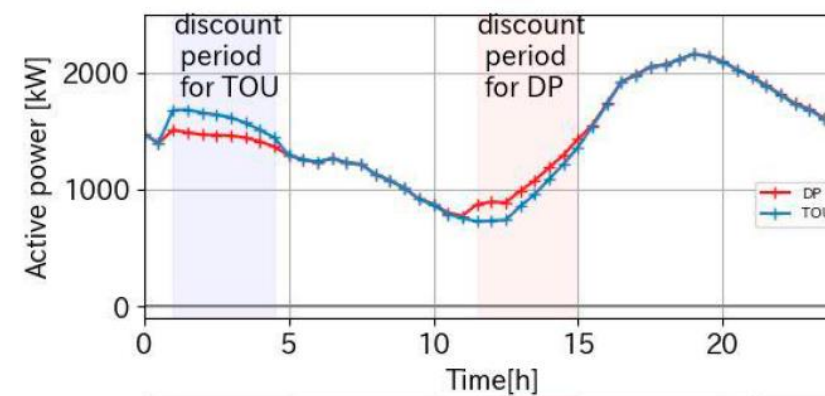


(b) December

Режимная эффективность ценозависимого потребления



(a) October



(b) December

Применение ценозависимого потребления позволяет регулировать напряжение на 0,5-0,7 %.
Регистрируется постепенный рост эластичности в установленные часы с низкой ценой на электроэнергию и снижение эластичности в часы с динамическим ценообразованием

• PS2-11295

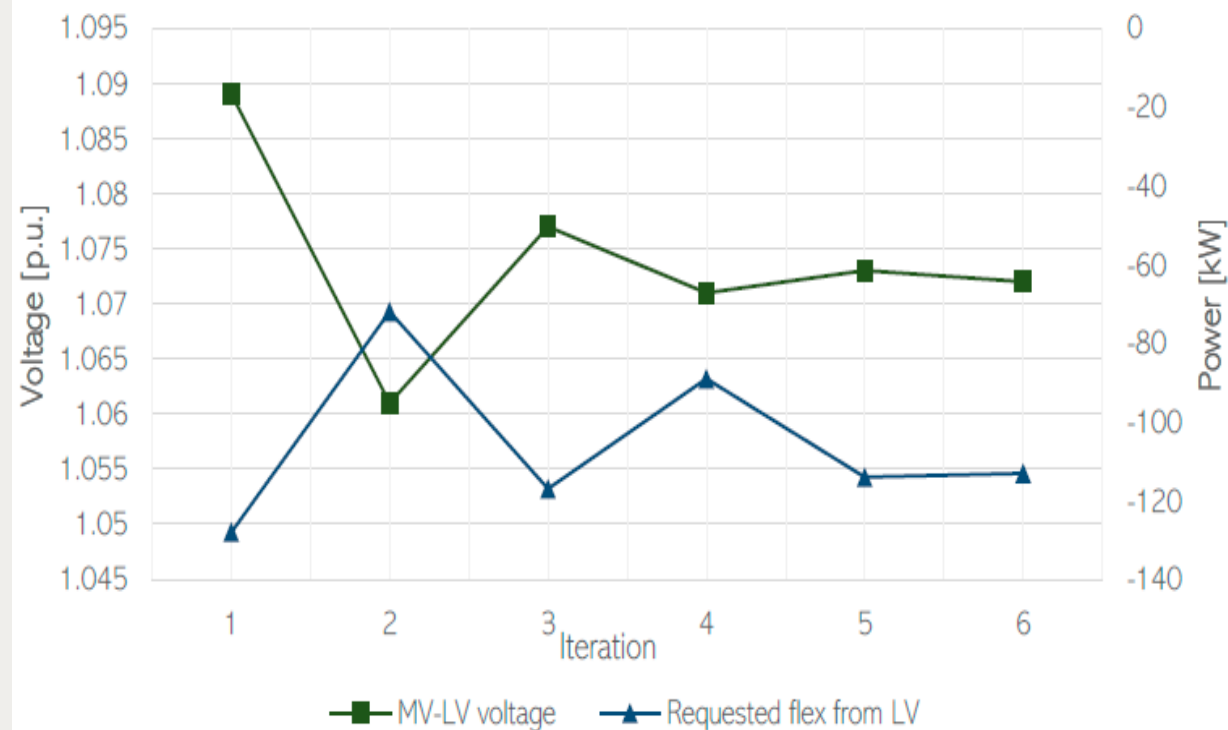
Итерационный запрос рынка системных услуг на регулирование напряжения в распределительных сетях в Португалии и Бельгии

23

Сводная таблица заявок от потребителей

Timestamp	CLIENT	Bid offer (kWh)	Cleared bid quantity (kWh)
2023-12-02T11:00:00	MV_CLIENT_208	-1000	-440
2023-12-02T11:00:00	MV_CLIENT_71	-2000	-1660
2023-12-02T11:00:00	MV_CLIENT_451	-500	0
2023-12-02T11:00:00	MV_CLIENT_465	-214	0
2023-12-02T11:30:00	MV_CLIENT_208	-1000	-438
2023-12-02T11:30:00	MV_CLIENT_71	-2000	-1650
2023-12-02T11:30:00	MV_CLIENT_451	-500	0
2023-12-02T11:30:00	MV_CLIENT_465	-214	0
2023-12-02T13:30:00	LV_GRID_93443	-160	-66
2023-12-02T13:30:00	MV_CLIENT_732	-350	-32
2023-12-02T13:30:00	MV_CLIENT_224	-120	-12
2023-12-02T23:00:00	MV_CLIENT_208	-1000	-198
2023-12-02T23:00:00	MV_CLIENT_71	-2000	-750
2023-12-02T23:00:00	LV_GRID_45134	-5	0
2023-12-02T23:00:00	LV_GRID_22465	-2	0
2023-12-02T23:30:00	MV_CLIENT_208	-1000	-173
2023-12-02T23:30:00	MV_CLIENT_71	-2000	-652
2023-12-02T23:30:00	MV_CLIENT_451	-500	0
2023-12-02T23:30:00	MV_CLIENT_465	-214	0

Итерационный процесс регулирования напряжения



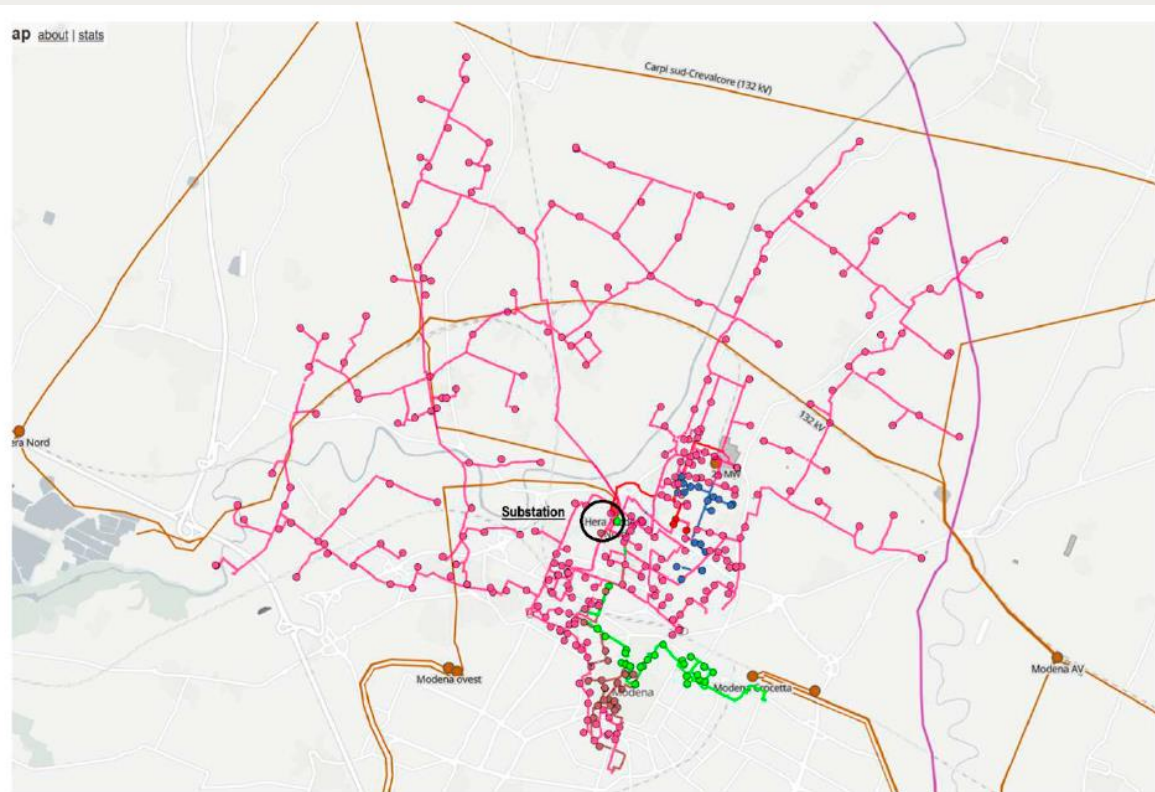
Устанавливаются цены на набор и на снижение нагрузки. Выполняется сбор заявок от потребителей по всей сети. Выбираются потребители НН на рассматриваемой ТП, после чего в ходе итерационного процесса отбора и контроля выполнения заявок, а также контроля напряжения делается вывод о достаточности или недостаточности регулирования

• PS1-10511

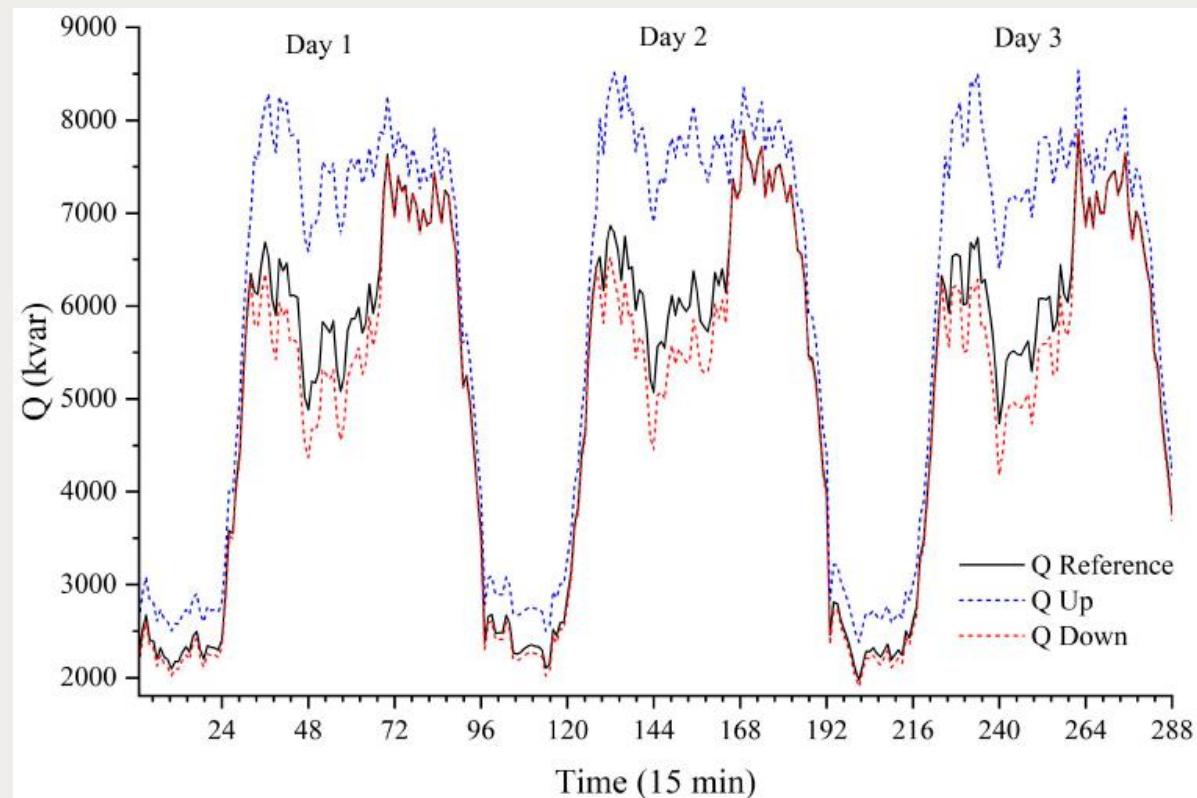
Рынок системных услуг в распределительной сети 15 кВ в Италии: выработка реактивной мощности ФЭС и СНЭЭ для поддержания напряжения

24

Схема тестовой сети



Диапазоны изменения реактивной мощности



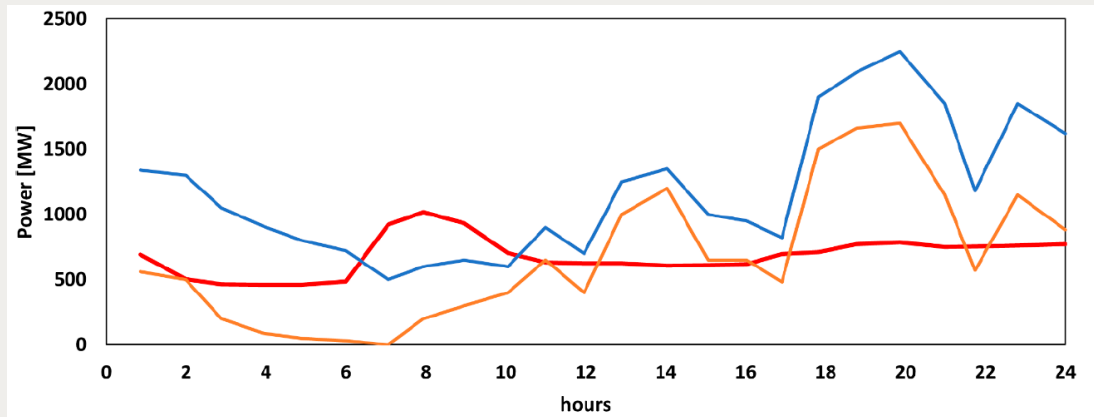
По результатам расчетов выявлено, что местные распределенные энергоресурсы позволяют на 3 % сократить затраты на покупку электроэнергии за счет снижения потерь, избежать отключения потребителей при снижении напряжения и при этом получают доход больше, чем сеть

PS1-10393,
PS1-11293

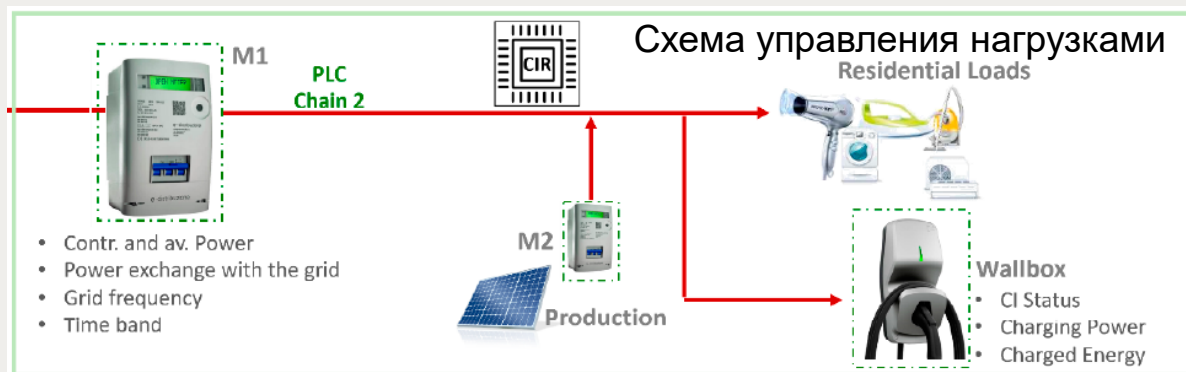
Потребители с собственной генерацией под управлением счётчиков электроэнергии со встроенными контроллерами. Италия

25

Вращающийся резерв ЭС Италии в сравнении с резервами агрегации спроса на загрузку и на разгрузку



Пример суточного графика бытовых нагрузок, зарядной станции, потребительской фотоэлектрической генерации при активации агрегации спроса



В настоящее время в Италии устанавливаются счетчики электроэнергии, которые умеют управлять нагрузками, зарядной станцией и фотоэлектрической генерацией потребителя, а также реагировать на соответствующие запросы со стороны энергосистемы

• PS1-10394

Решение задач повышения качества электроэнергии в распределительной сети с 26 помощью зарядной инфраструктуры электромобилей во Франции

График нагрузки ТП в зависимости от доли зарядных станций

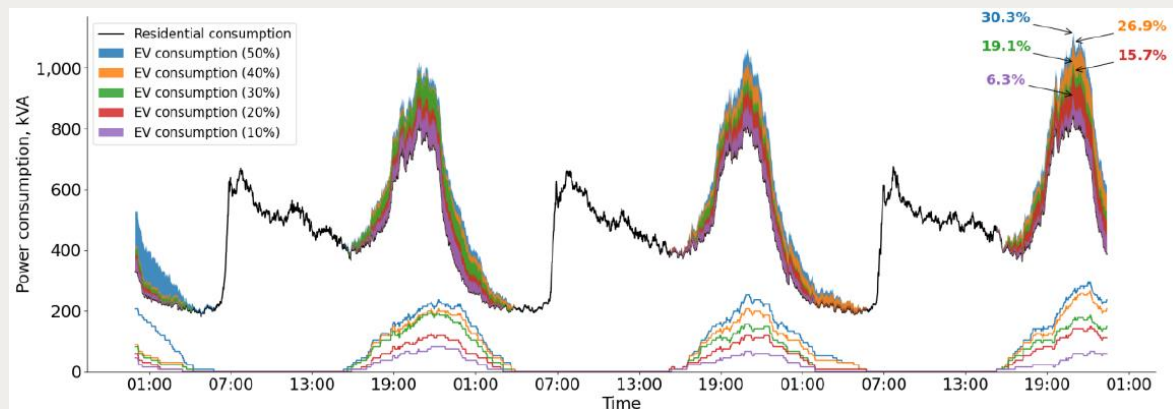
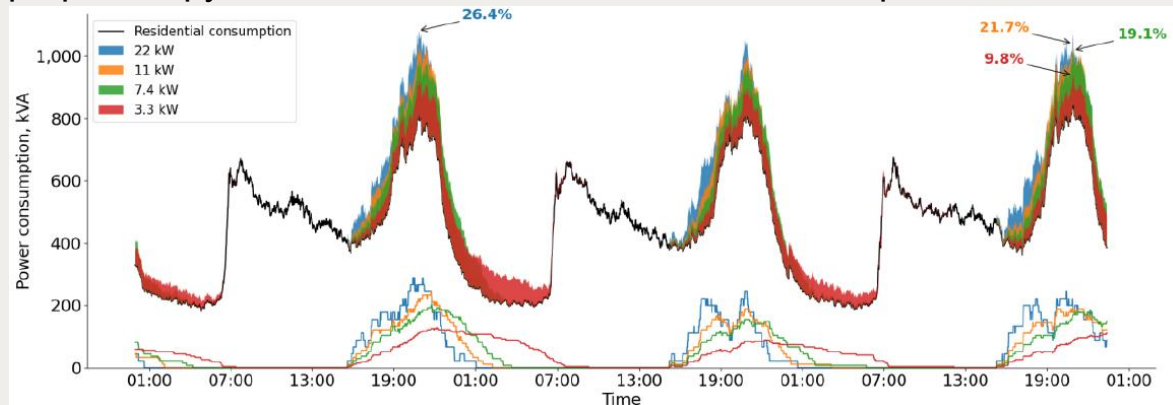
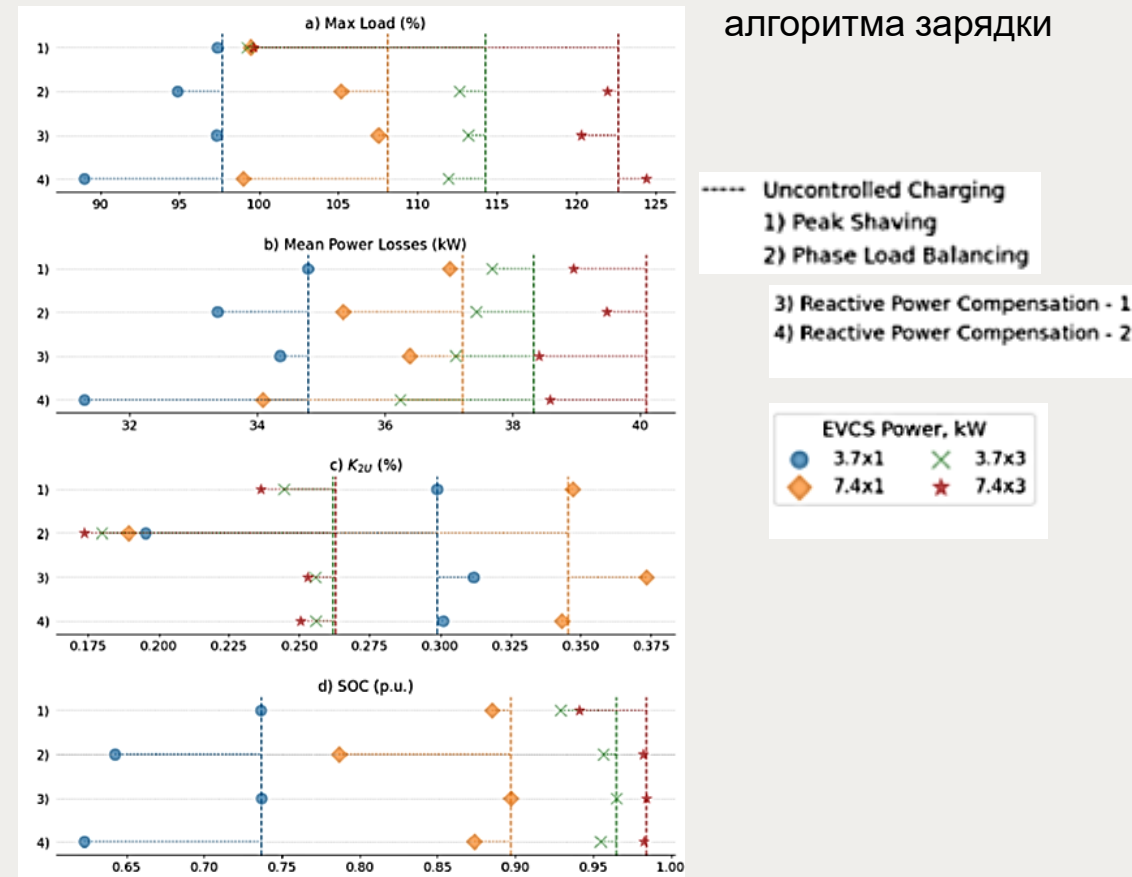


График нагрузки ТП в зависимости от мощности зарядных станций



Сетевые параметры в зависимости от мощности и алгоритма зарядки



Для частного использования оптимальными видятся трехфазные зарядки переменного тока мощностью 3,7 кВт на фазу, обеспечивающие высокие функциональные параметры в сочетании с минимальным ухудшением ПКЭ сети. Но перегрузка ТП будет во всех случаях

• PS1-10823

Управление зарядной инфраструктурой батарейного подвижного состава в Австралии. 15 x 600 кВт зарядок на линии + 50 x 50 кВт в депо

27



Гибрид электробуса, трамвая и метро
HESS lightTram 25

1-3 СДПМ x 150 кВт, АКБ 300-820 кВт*ч

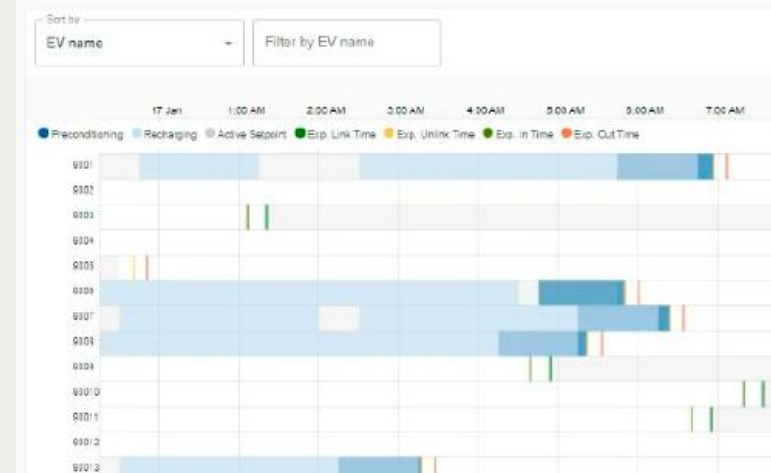
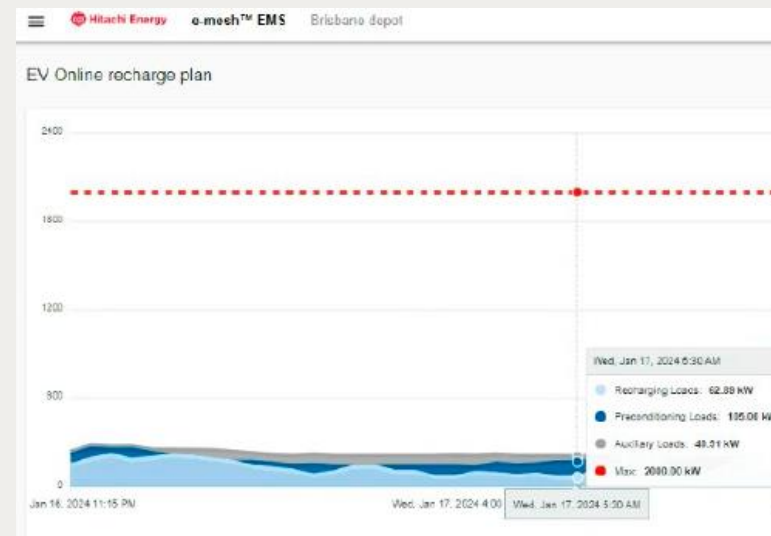
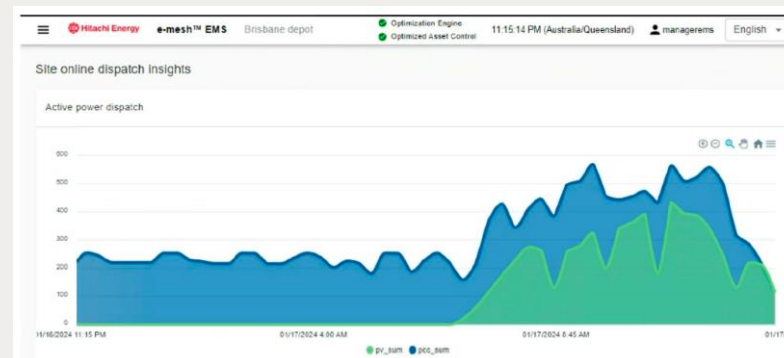
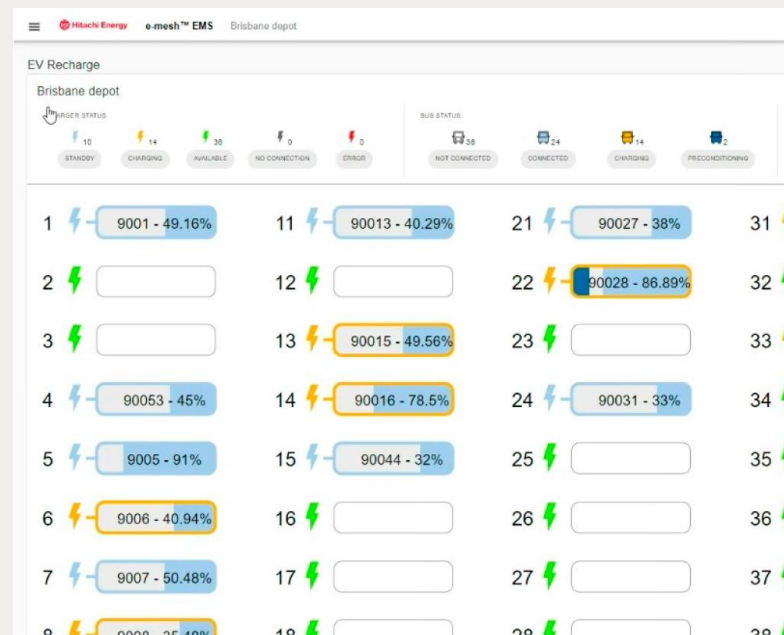
Длина маршрута: 21 км

Суточный пробег: 350 км

Максимальная скорость на маршруте: 90 км/ч

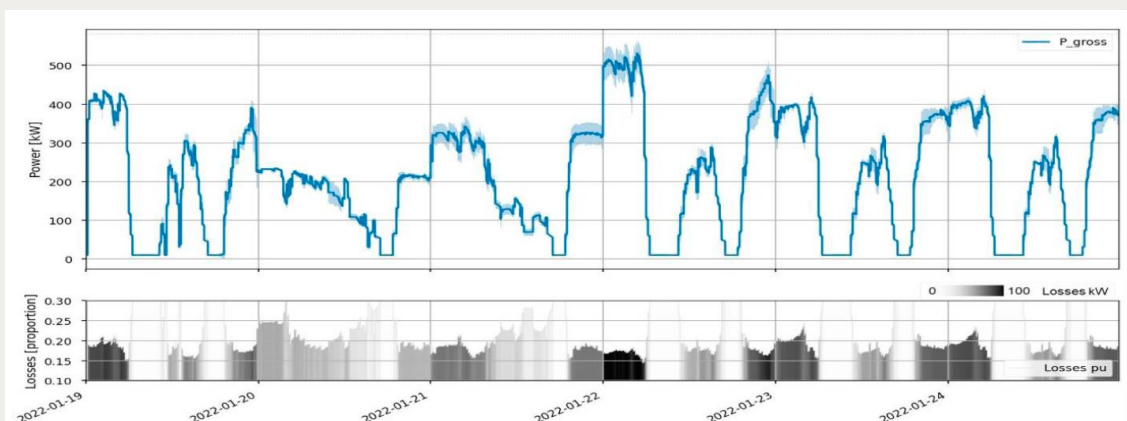
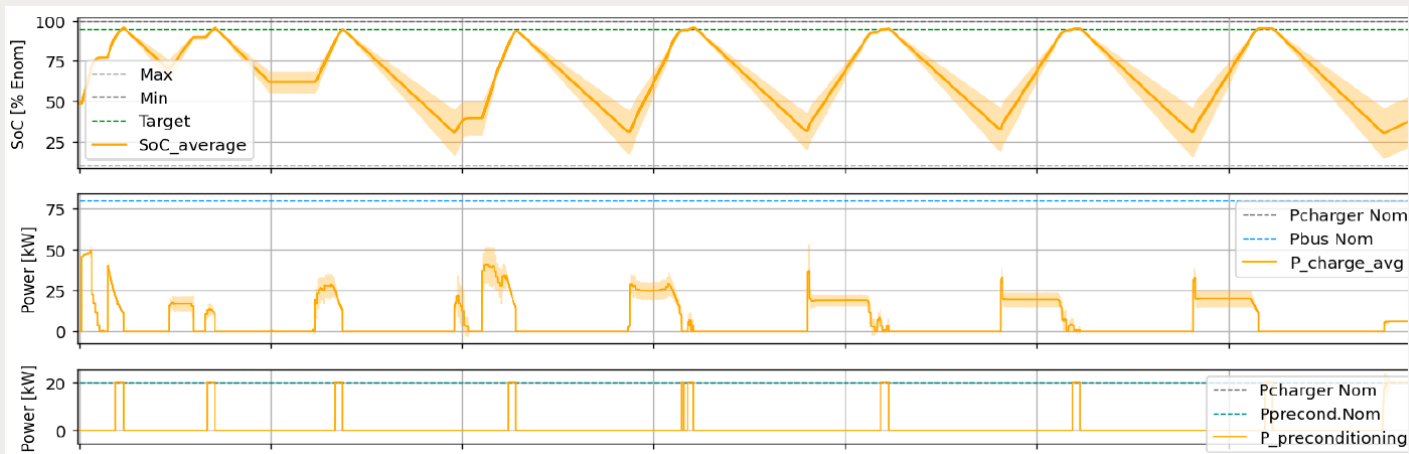
• PS1-11239

Интегральная оптимизационная постановка задачи предусматривает минимальную мощность депо и минимальную мощность на линии при заданных интервалах движения составов, поддержании резервов и наличии генерации ФЭС. Особое внимание – подготовке микроклимата в пассажирском салоне



Оптимизация расписания электробусов и режима работы зарядной инфраструктуры общественного транспорта в Германии

28

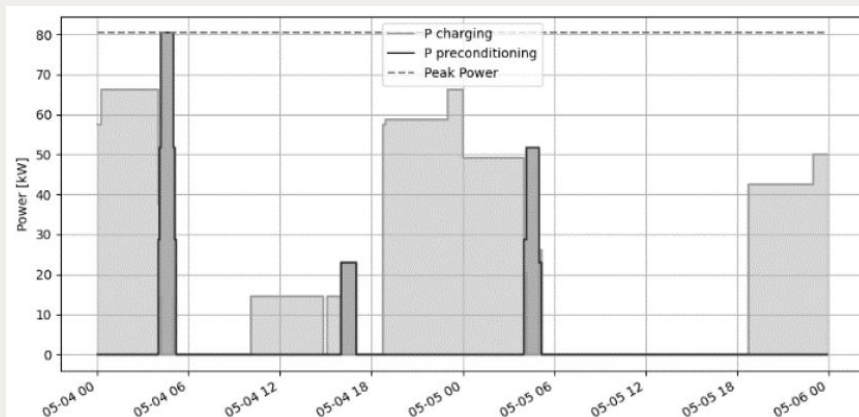


Электробусы расходуют от 96-111 кВт*ч / 100 км (город, с подготовкой микроклимата) до 179-235 кВт*ч / 100 км (пригород, микроклимат от тяговой батареи). Электробус без выделенной линии расходует в 10 раз больше энергии, чем электромобиль, в то время как дизельный автобус расходует в 5-7 больше топлива, чем дизельный легковой автомобиль. Выигрыш well-to-wheel только у общественного электротранспорта выделенных линий: электробусов, трамвая и метро

← Степень заряда бортовой АКБ электробуса, мощность на заряд АКБ и мощность на установление микроклимата в пассажирском салоне на 1 проход маршрута. Затенённая область – 1 СКО мощности

← Суммарный график мощности небольшого депо. Потери мощности во всех устройствах и кабелях могут достигать 100 кВт или же 20 %

↓ Мощность на установление микроклимата может превышать мощность на подзаряд батареи



• PS1-11409

Вопросы перспективного развития энергосистем и распределительных электрических сетей



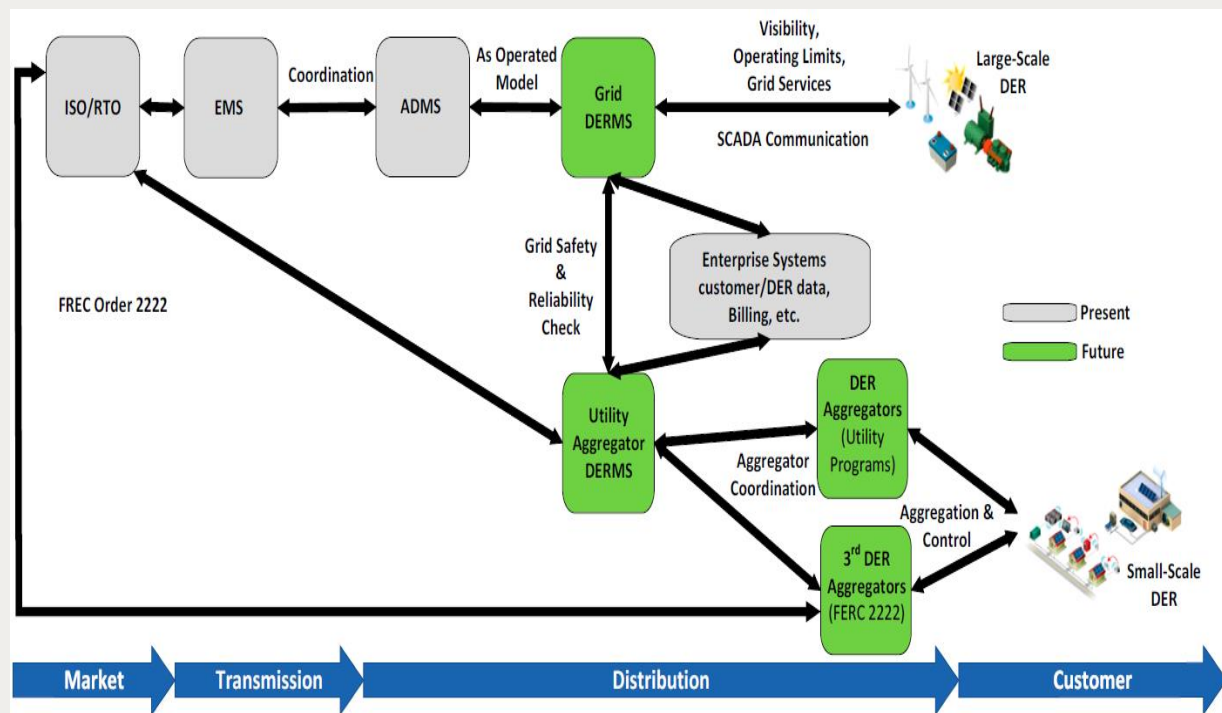
cigre

For power system expertise

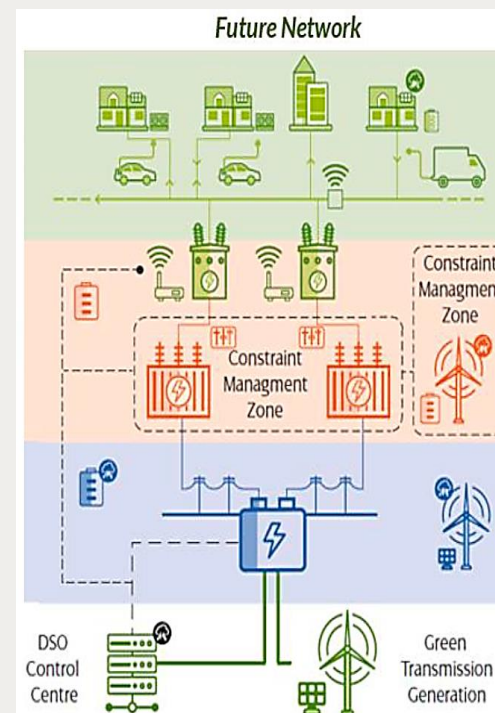
Битва концепций: распределенные энергоресурсы должны интегрироваться в существующую «большую» электроэнергетику или образовать свою?

30

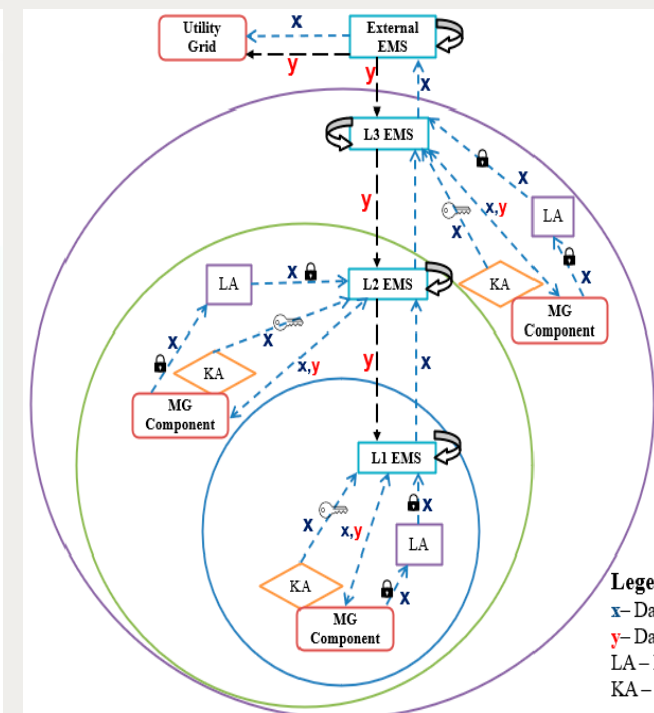
Примеры концепций с агрегаторами распределенных энергоресурсов из США, Великобритании, Южной Африки



• PS1-10474



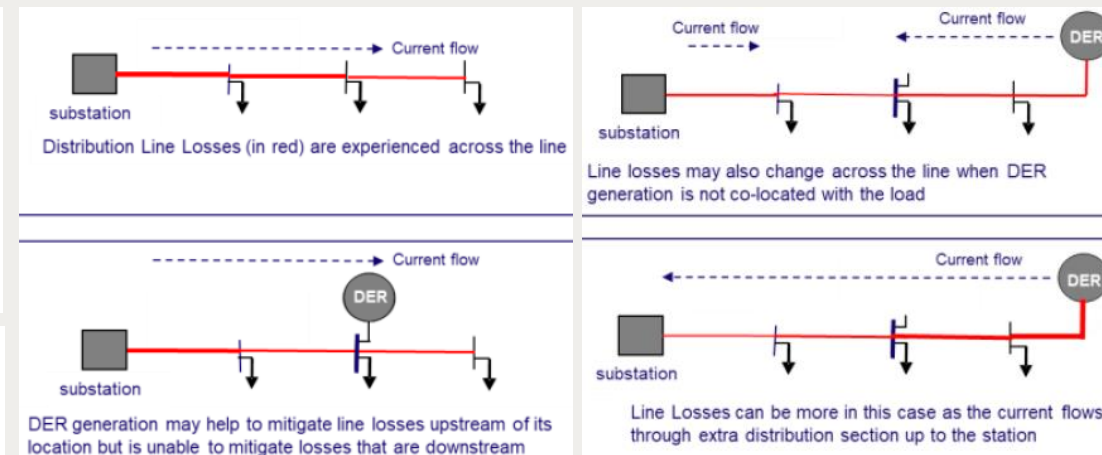
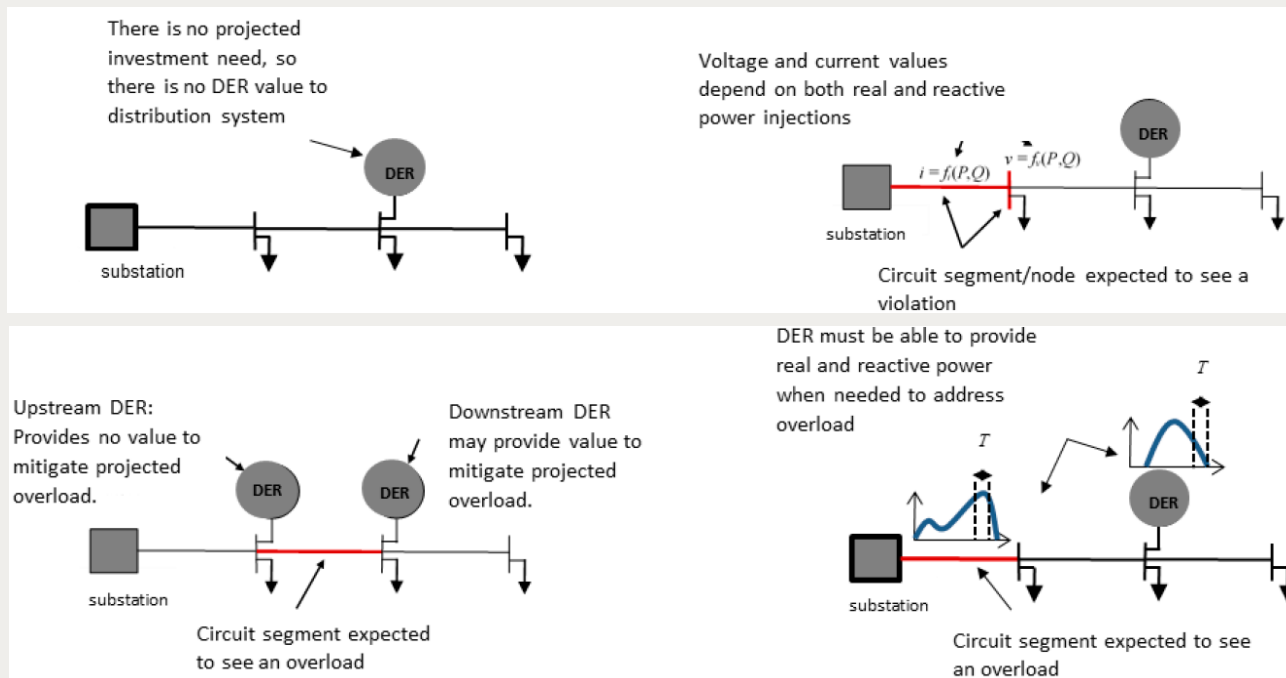
• PS1-10409



• PS2-10682

В большинстве стран мира научное сообщество приходит к выводу, что должны быть один или несколько агрегаторов распределенных энергоресурсов, децентрализованно стремящихся сбалансировать микроэнергосистему с помощью локальных рынков электроэнергии и системных услуг. Такая система самостоятельно может управлять своими балансами мощности и энергии, а также решать локальные режимные вопросы

Попытка упрощения расчёта установившихся электрических режимов на основе дискретно-логических режимных моделей в США 31



Принципы учета потерь от распределенных энергоресурсов (по часовой стрелке):

1. Потери распределены по сети;
2. Потери выше там, где мощность нагрузки и генерации не совпадает;
3. Генераторные потери могут быть выше нагрузочных;
4. Устранять потери могут только распределенные энергоресурсы за сечением с повышенными потерями

Принципы учета мощности распределенных энергоресурсов (по часовой стрелке):

1. Нет перегрузок и участка сети нет в инвестпрограмме – мощность РЭР = 0;
2. Должны учитываться как активная, так и реактивная мощности РЭР;
3. Перегрузка устраняется регулированием как активной, так и реактивной мощности РЭР;
4. Устранять перегрузку могут только РЭР за перегруженным сечением.

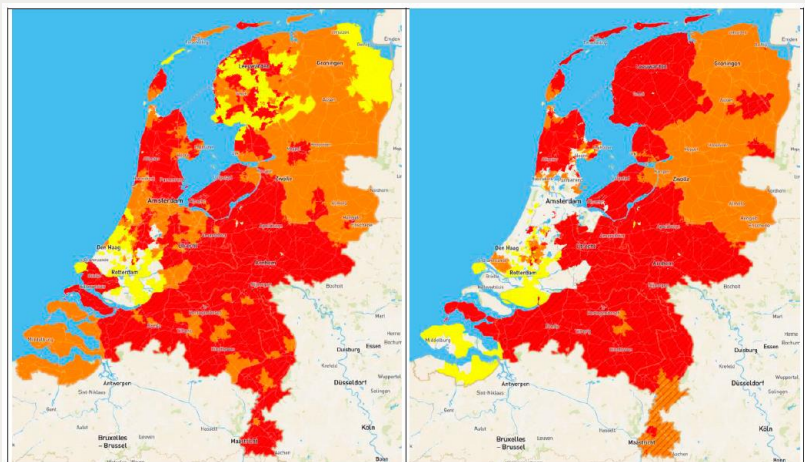
Дискретно-балансовая режимная модель позволяет без знания параметров схемы замещения электрической сети иметь примерное представление о том, какие режимы будут складываться в распределительной сети, и как на них повлиять с помощью распределенных энергоресурсов

• PS1-10475

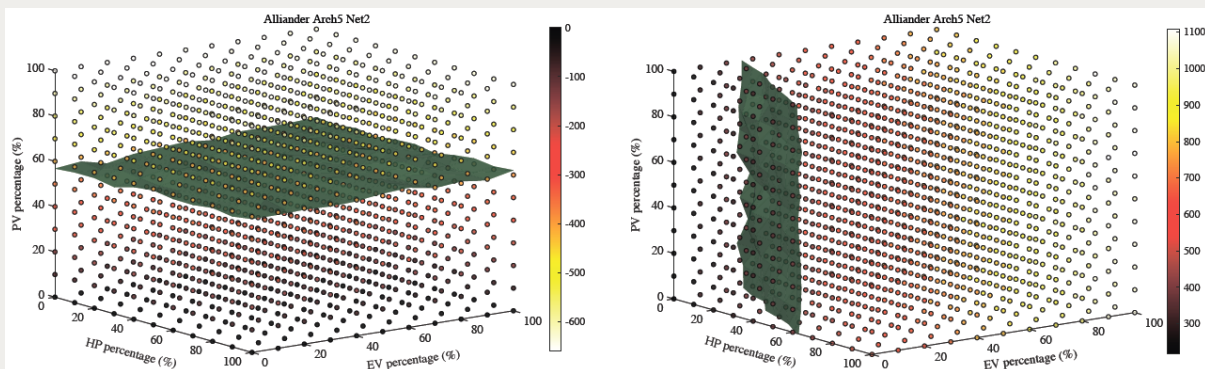
Расчёты максимальной подключаемой мощности генерации и нагрузки в распределительной сети низкого напряжения в Нидерландах

32

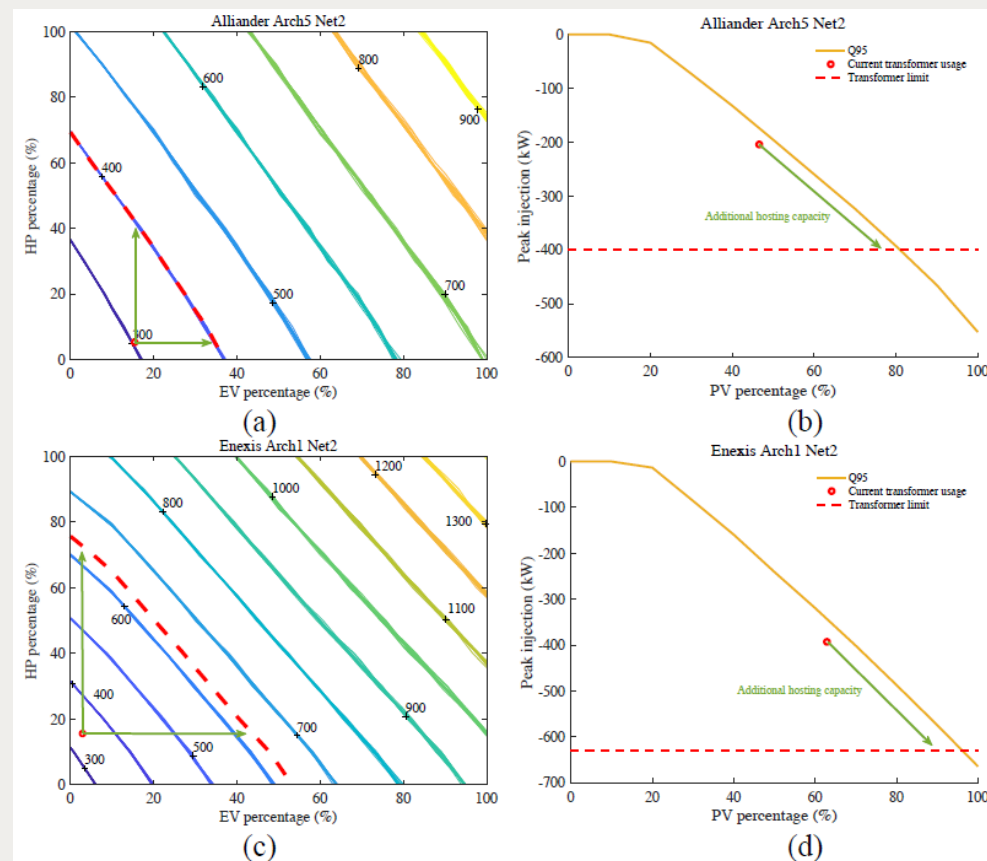
Карта резервов пропускной способности распределённой сети до 2030



↓ Резервы пропускной способности в зависимости от соотношения мощностей зарядных станций, тепловых насосов и ФЭС



Резервы пропускной способности в зависимости от мощности



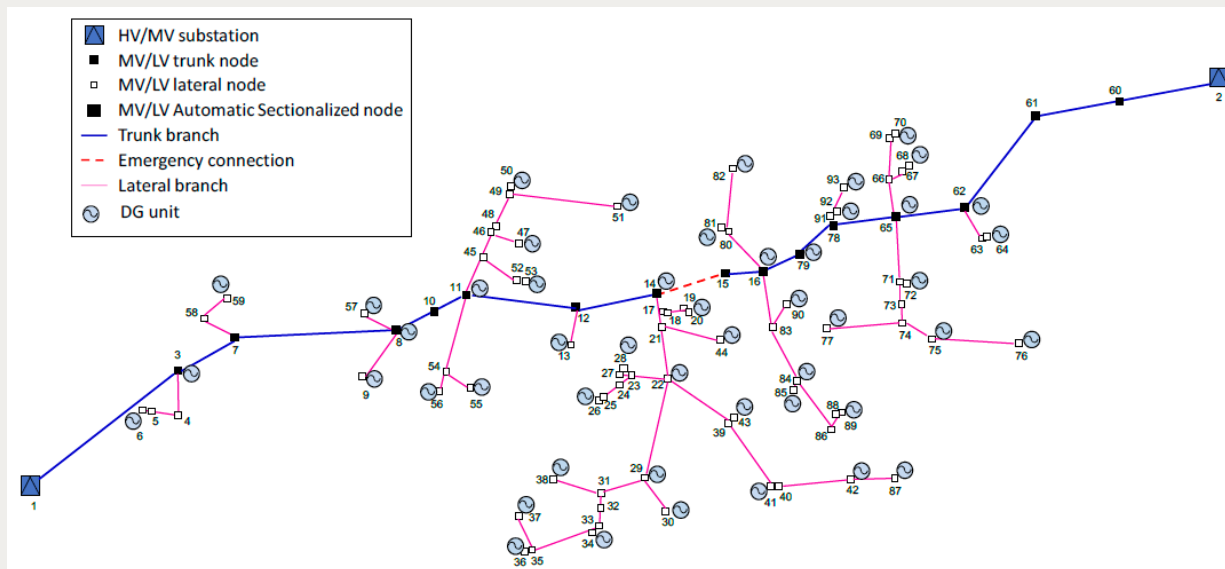
Чем мощнее электроотопление с помощью тепловых насосов – тем мощнее должны быть не только ФЭС, но и зарядные станции электромобилей, которые должны выступать буферным накопителем энергии как для нагрузок, так и для генерации

PS1-10551,
10560

Планирование перспективного развития распределительной сети 15 кВ с учетом агрегации спроса в Италии

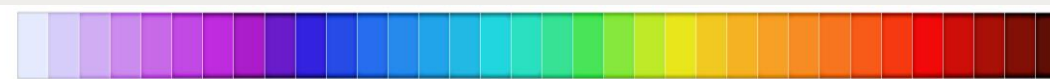
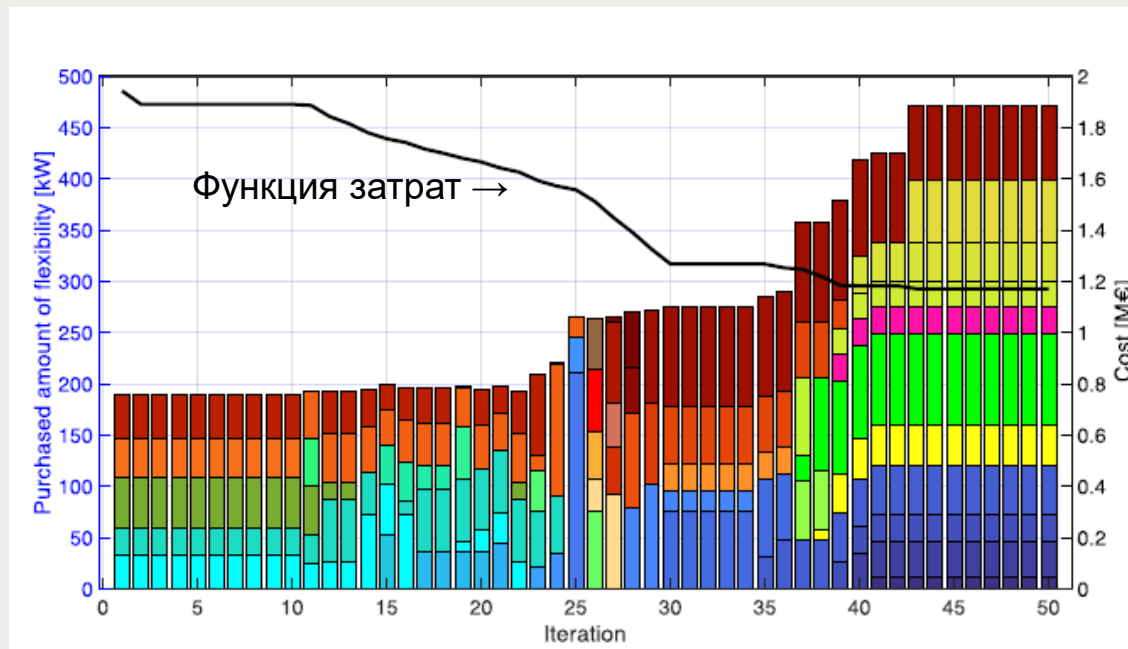
33

Схема тестовой сети



Величины агрегации спроса или управления мощностью фотоэлектростанции в отдельных узлах сети по результатам оптимизационной процедуры →

Функция затрат на сеть от величины агрегации спроса

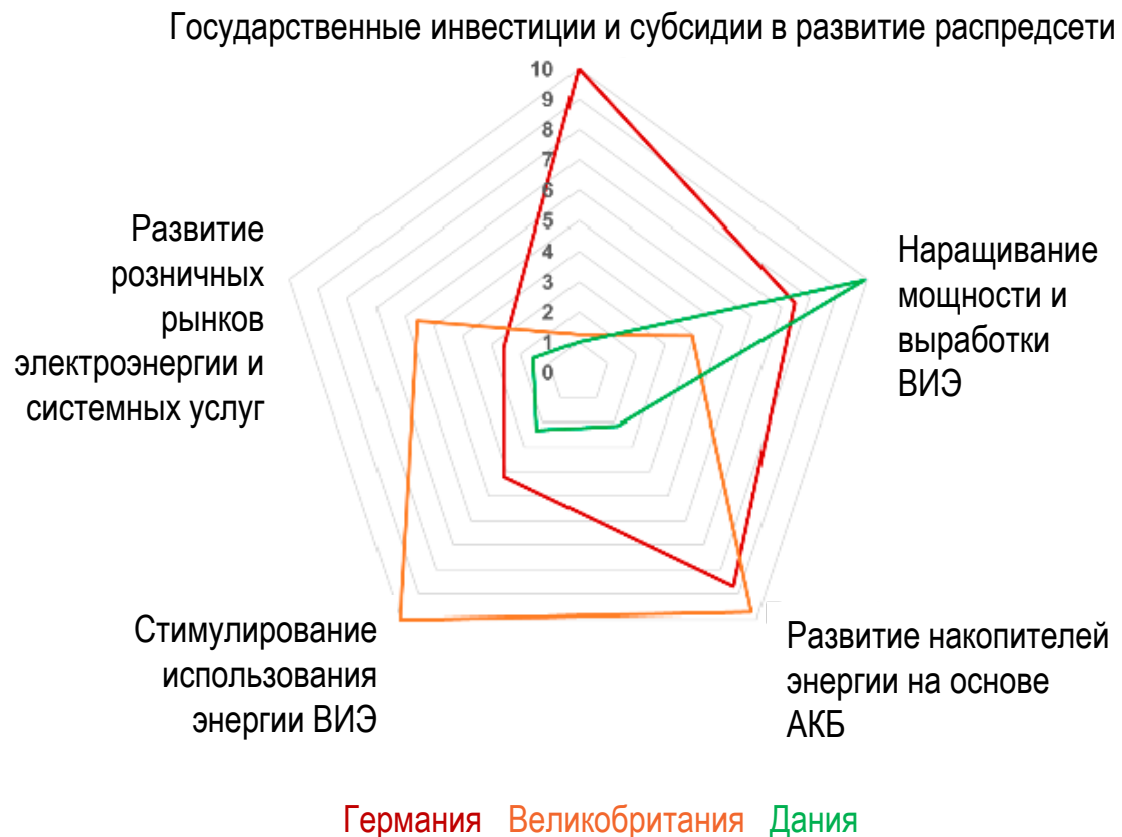


Номер узла

Агрегация спроса на электроэнергию, а также агрегация управления распределенной по сети солнечной фотоэлектрической генерацией позволяют снизить затраты на строительство или реконструкцию распределительной сети приблизительно на 40 %

• PS1-10392

Степень развития распределенных энергетических ресурсов в разных 34 странах Европы к 2030 году



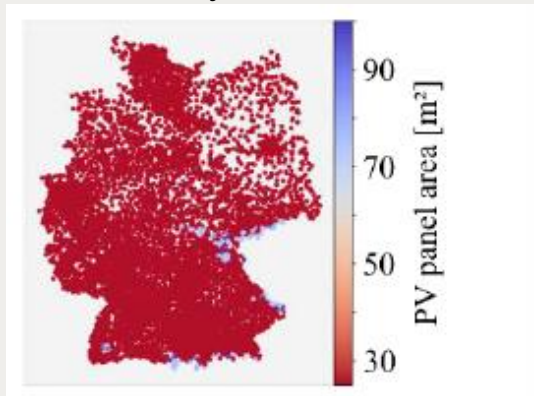
10 баллов по позициям соответствуют: государственные инвестиции и субсидии – 231 млрд. евро;
наращивание мощности/выработки ВИЭ – 76/162 % баланса;
развитие накопителей энергии на основе АКБ – 70 % от суммарной мощности нагрузки;
стимулирование использования ВИЭ – 48 компаний со 100 % энергообеспечением от ВИЭ;
рынки – 9 перерывов электроснабжения и коэффициент готовности распределительной сети 99.6926 %

• PS1-
10480

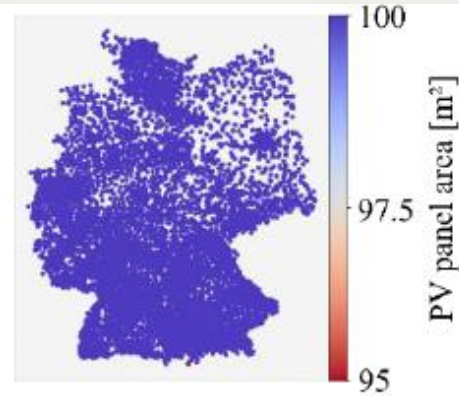
Влияние изменчивости климата на выбираемую мощность ВИЭ

Площадь
модулей ФЭС
на объект

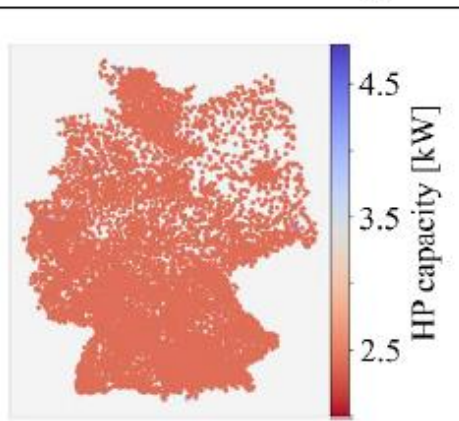
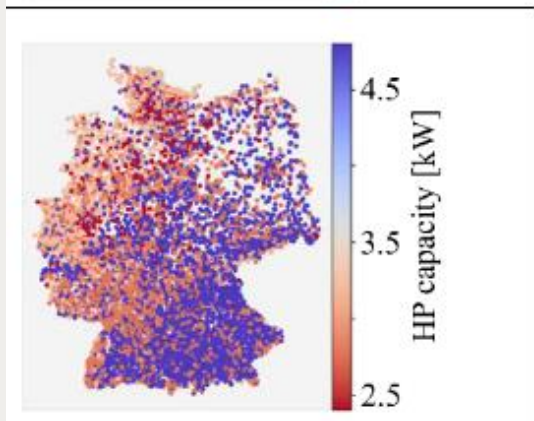
Обычные
погодные условия



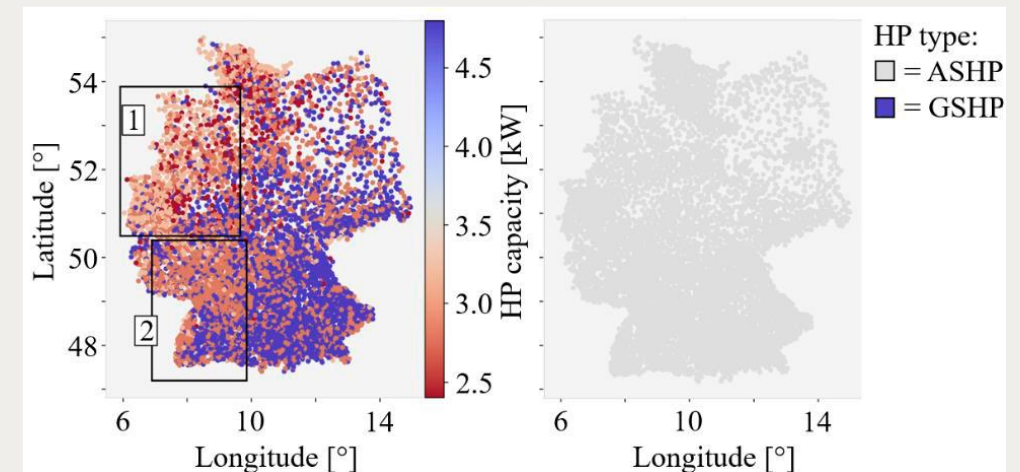
Экстремальные
погодные условия



Мощность
теплового
насоса на
объект



Выбор типа теплового насоса под климатические условия Германии с учетом технико-экономической эффективности: все – воздушные



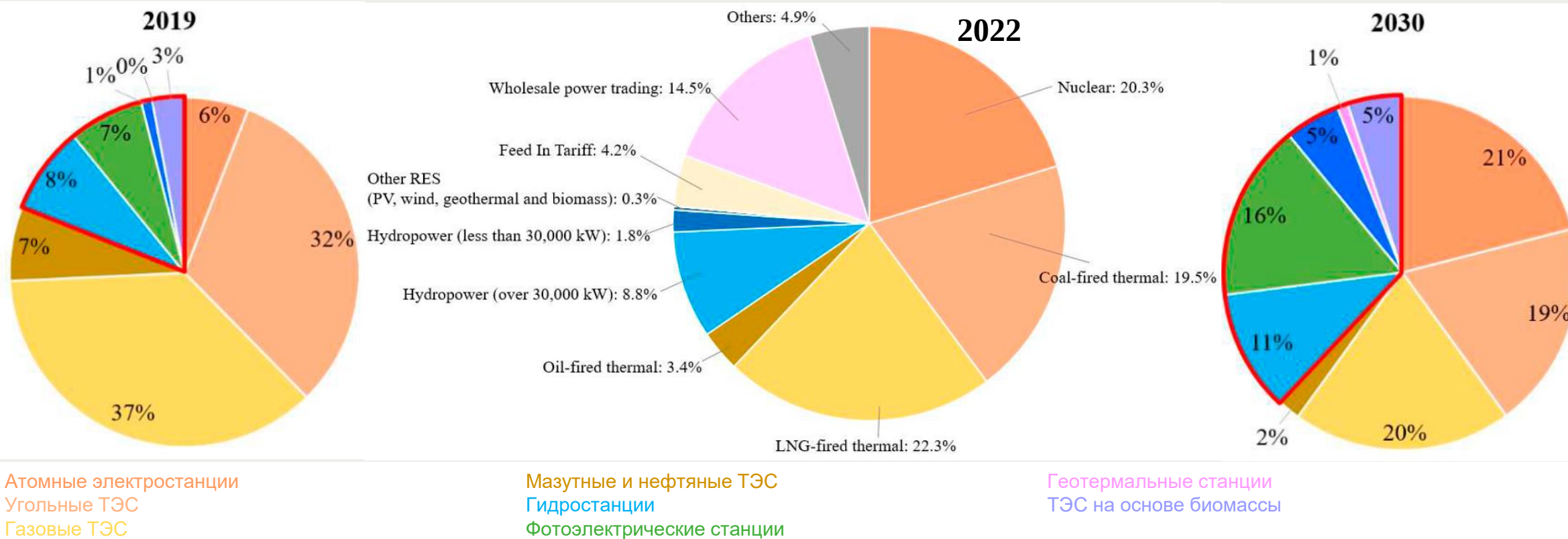
Схемы и программы
перспективного развития до 2050 г.

Изменчивость погоды как относительно многолетних климатических норм, так и на коротких промежутках времени приводит к тому, что при рассмотрении программ перспективного развития на долгосрочную перспективу необходимо вводить поправку на изменение мощности ВИЭ

• PS3-
11431

Перспективная структура выработки различных источников энергии в Японии

36



«В связи с энергетическим кризисом» Япония вернула в работу значительную часть атомных энергоблоков, остановленных в 2011 г. после аварии на АЭС Фукусима. В ближайшей перспективе Япония не планирует отказываться ни от ядерной энергии, ни от энергии углеводородов. Доля ВИЭ постепенно будет повышаться до 38 %

• PS1-11863

Оптимизация мощности, ёмкости и места подключения накопителей энергии



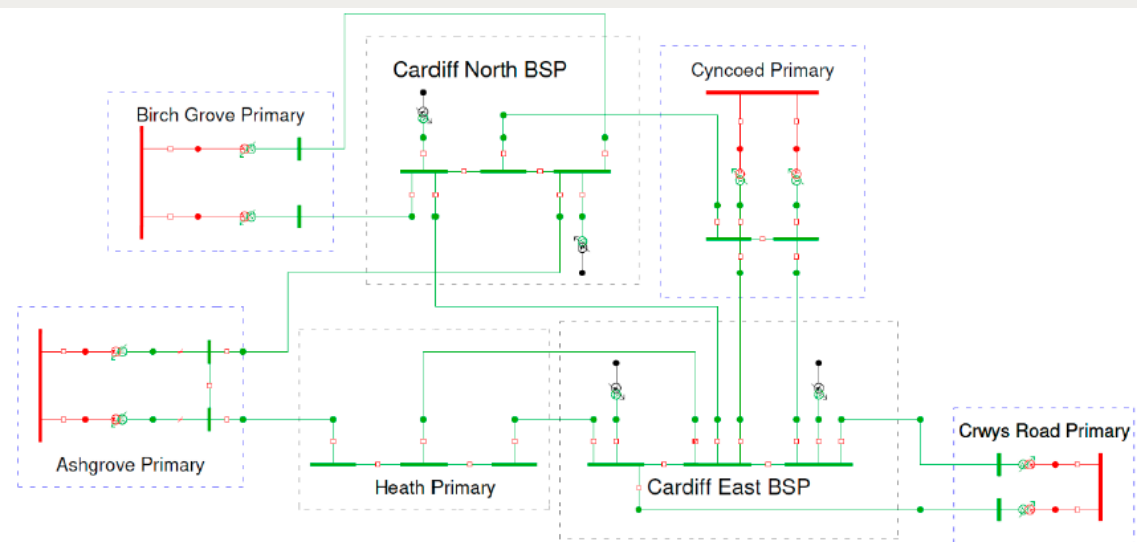
cigre

For power system expertise

Оптимизация графика работы мобильных накопителей энергии 1 МВт, 2.7 МВт*ч в ремонтных схемах с выводом ВЛ и трансформаторов. Великобритания

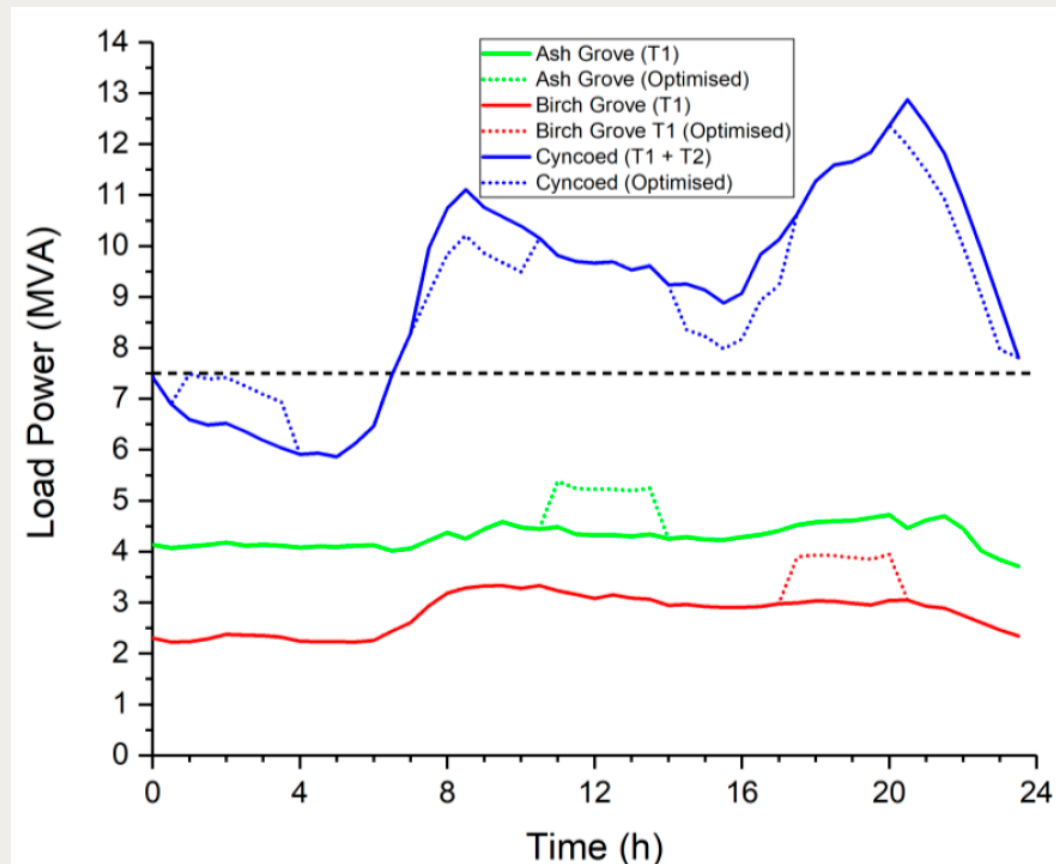
38

Схема тестовой распределительной сети 132/33/11 кВ



Расстояния между ПС, км		Origin			
		Ash Grove	Birch Grove	Crwys Road	Cyncoed
Destination	Ash Grove	-	4.4	5.9	7.5
	Birch Grove	2.1	-	4.2	4.2
	Crwys Road	3.6	4.5	-	3.3
	Cyncoed	5.1	4.2	3.3	-

График нагрузки в ремонтных схемах и послеаварийных режимах



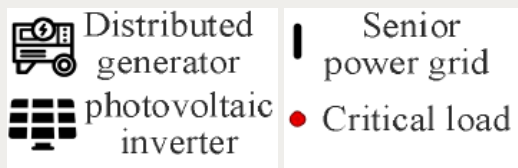
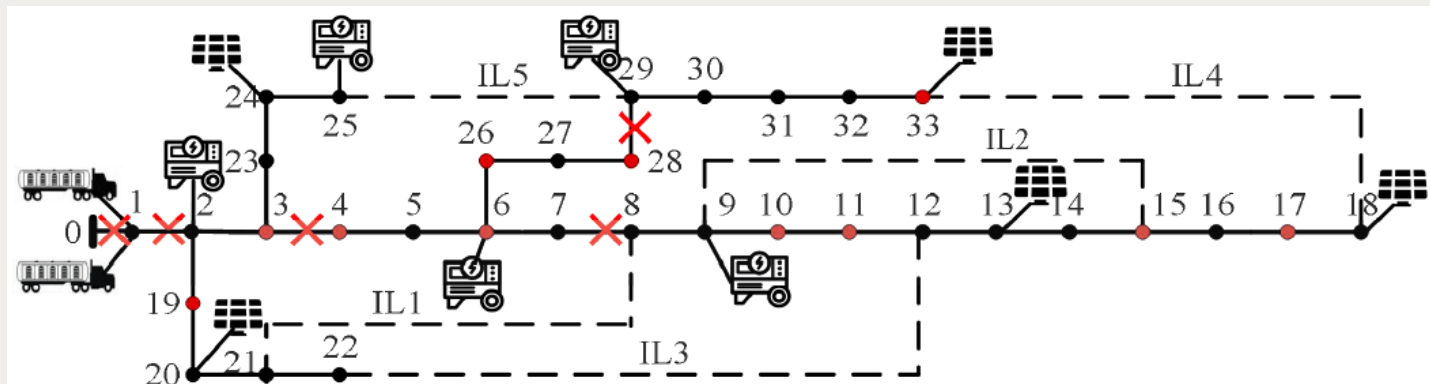
Седельный электротягач Tesla SemiTruck с паспортным запасом хода 800 км (АКБ 700-900 кВт*ч) и полуприцепом с 200-ми АКБ Tesla Powerwall (до 20 МВт*ч) в течение суток в нормальных схемах и режимах запасает энергию ВИЭ, а в ремонтных схемах и послеаварийных режимах перемещается между ПС и сглаживает пики мощности, что в разы улучшает технико-экономическую эффективность проекта

• PS1-10244



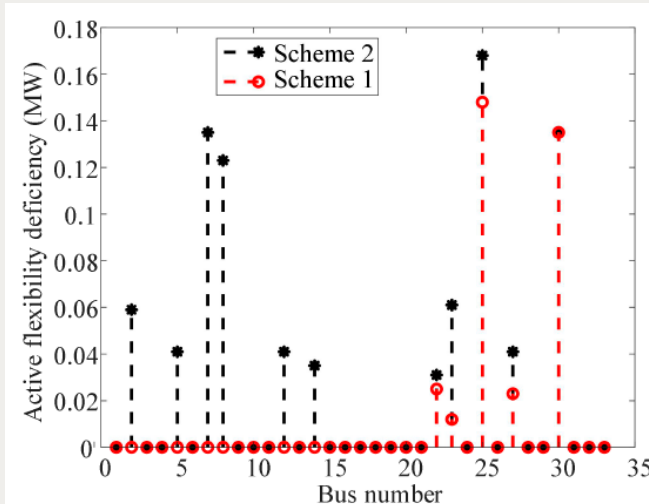
Оптимизация размещения и места подключения резервных мобильных накопителей энергии 200 кВт, 200 кВт*ч на основе АКБ в Китае

39



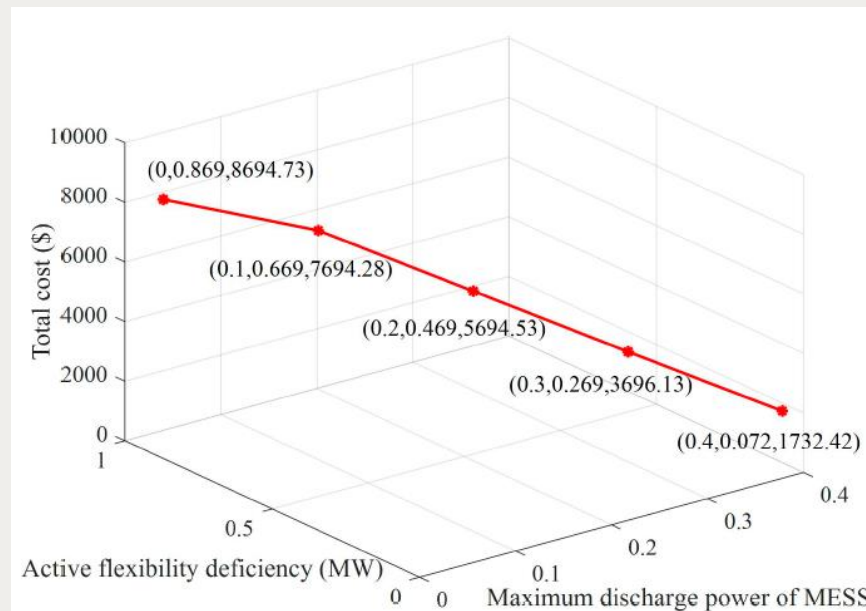
Размещение дефицита мощности по сети

↑ Доступные распределенные энергоресурсы, аварийные переключения, нагрузки I-II категории



← Структурно-функциональная схема электрической сети

↓ Функция ущерба от аварии в зависимости от величины непокрываемого дефицита и мощности накопителя



По результатам оптимизации предаварийного размещения и аварийного места подключения резервных мобильных накопителей энергии, (после)аварийной схемы, узлов и величин отключаемой нагрузки получена выгода накопителей при условии агрегации спроса или небольшого ущерба

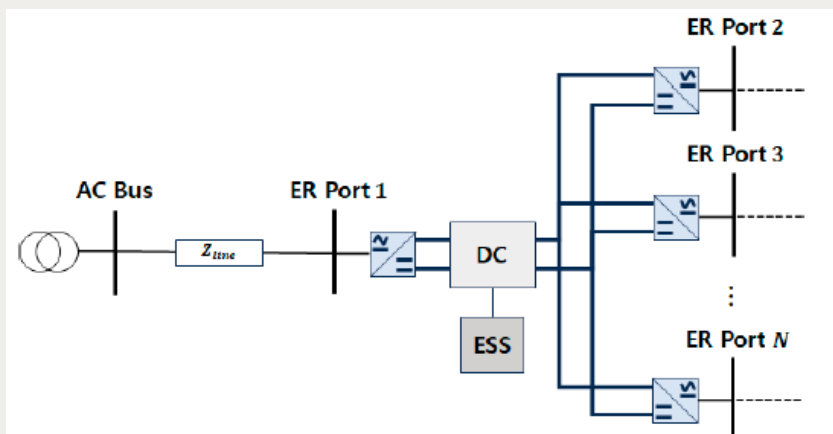
PS1-10247



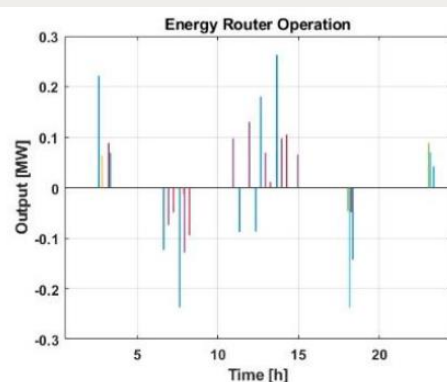
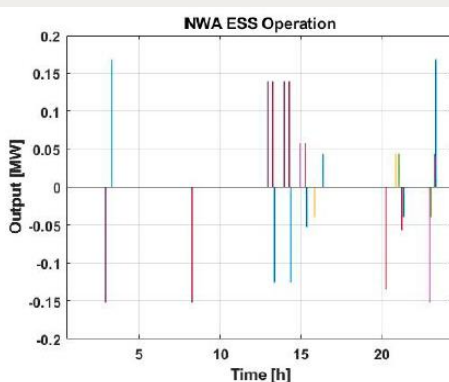
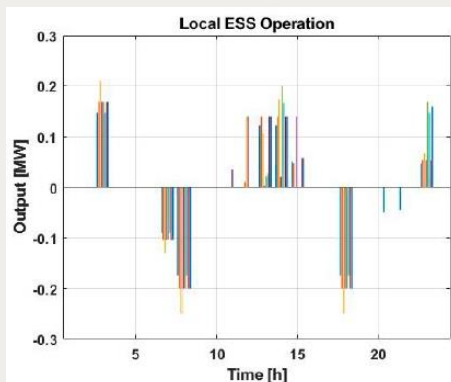
Применение энергетического роутера СН для управления накопителями энергии 100-250 кВт, 200-500 кВт*ч в Ю. Корее

40

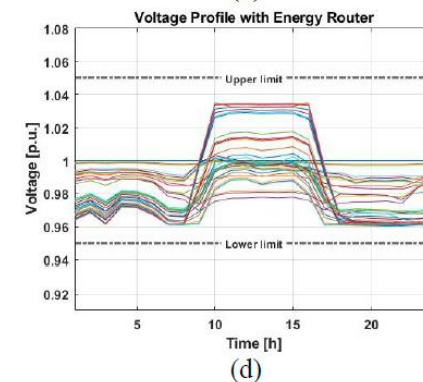
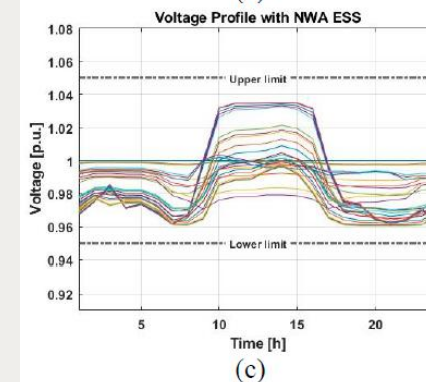
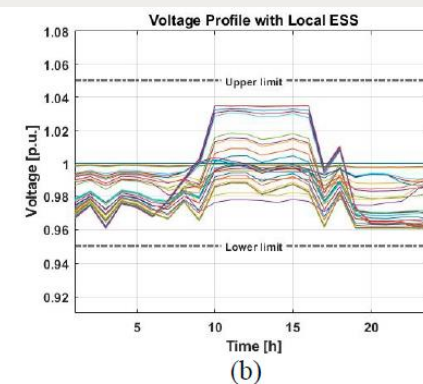
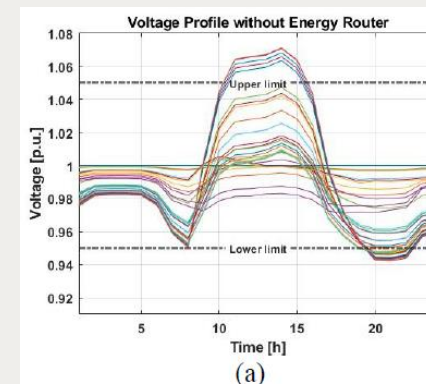
↓ Схема энергетического роутера (ПУ СН постоянного тока)



↓ Диаграмма работы местных накопителей энергии, системного накопителя энергии и энергетического роутера при работе в связке с ФЭС



Графики напряжения исходной системы с ФЭС, при наличии местных накопителей энергии, системного накопителя энергии и энергетического роутера



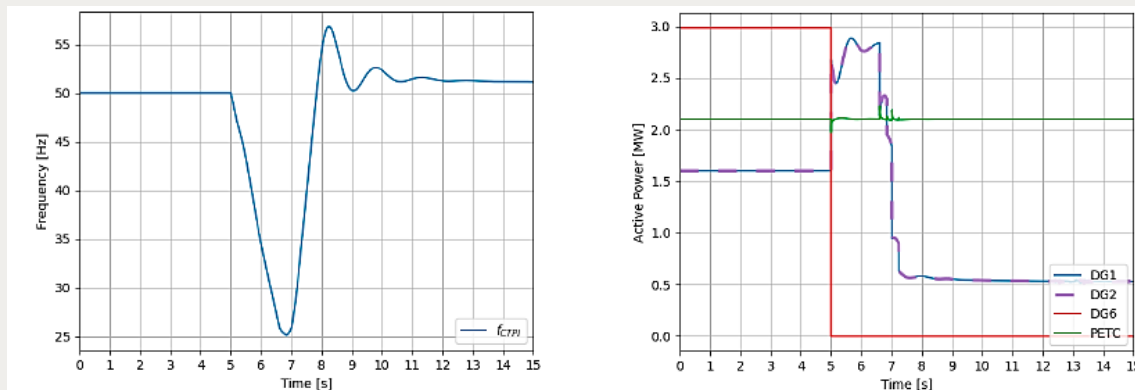
Энергетический роутер позволяет более экономично распоряжаться накопленной энергией ВИЭ, а также осуществлять централизованное регулирование реактивной мощности и напряжения, снижая размах его отклонения от номинала с 12 % до 7 %

• PS1-10690

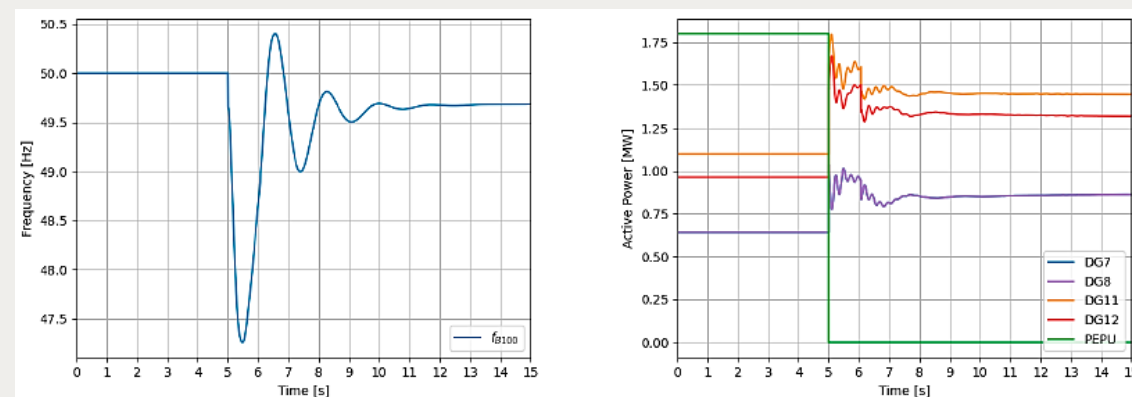
Планы строительства накопителей энергии 6 МВт, 6 МВт*ч на Азорских островах Португалии

41

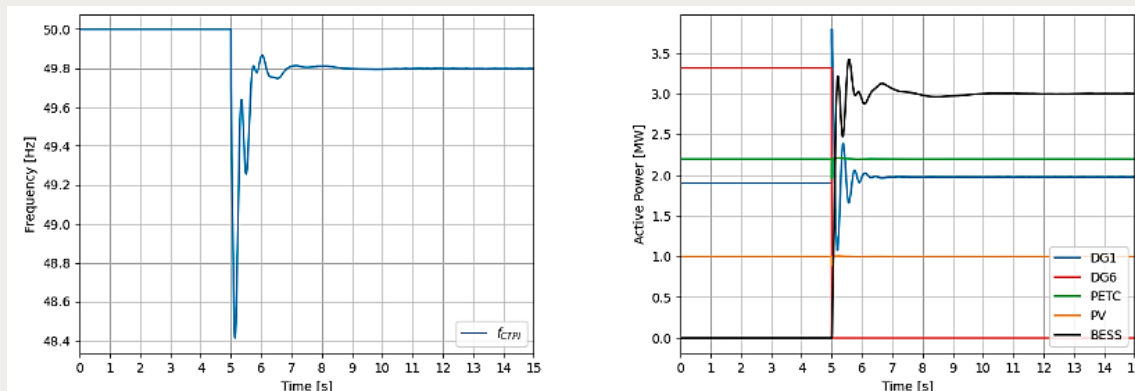
Частота ЭС о. Пику при отказе дизель-генератора – без АКБ



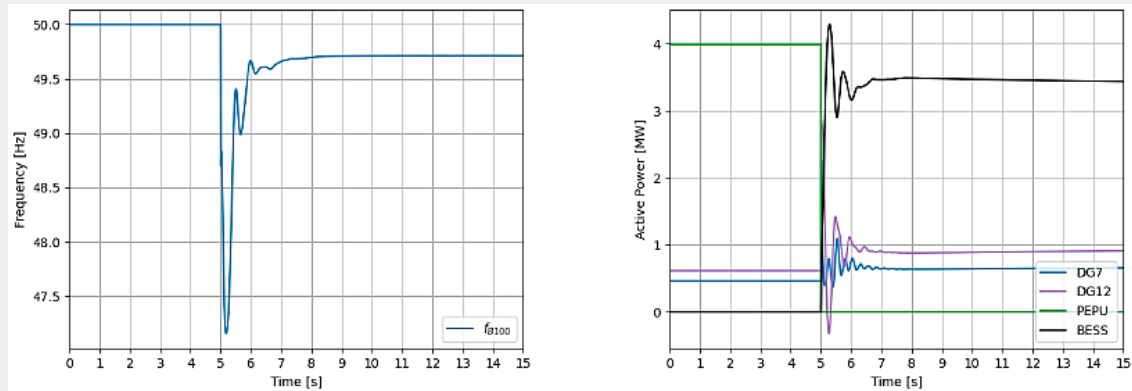
Частота ЭС о. Сан-Жоржи при отказе ВЭУ – без АКБ



Частота ЭС о. Пику при отказе одного дизель-генератора – с АКБ



Частота ЭС о. Сан-Жоржи при отказе ВЭУ – с АКБ

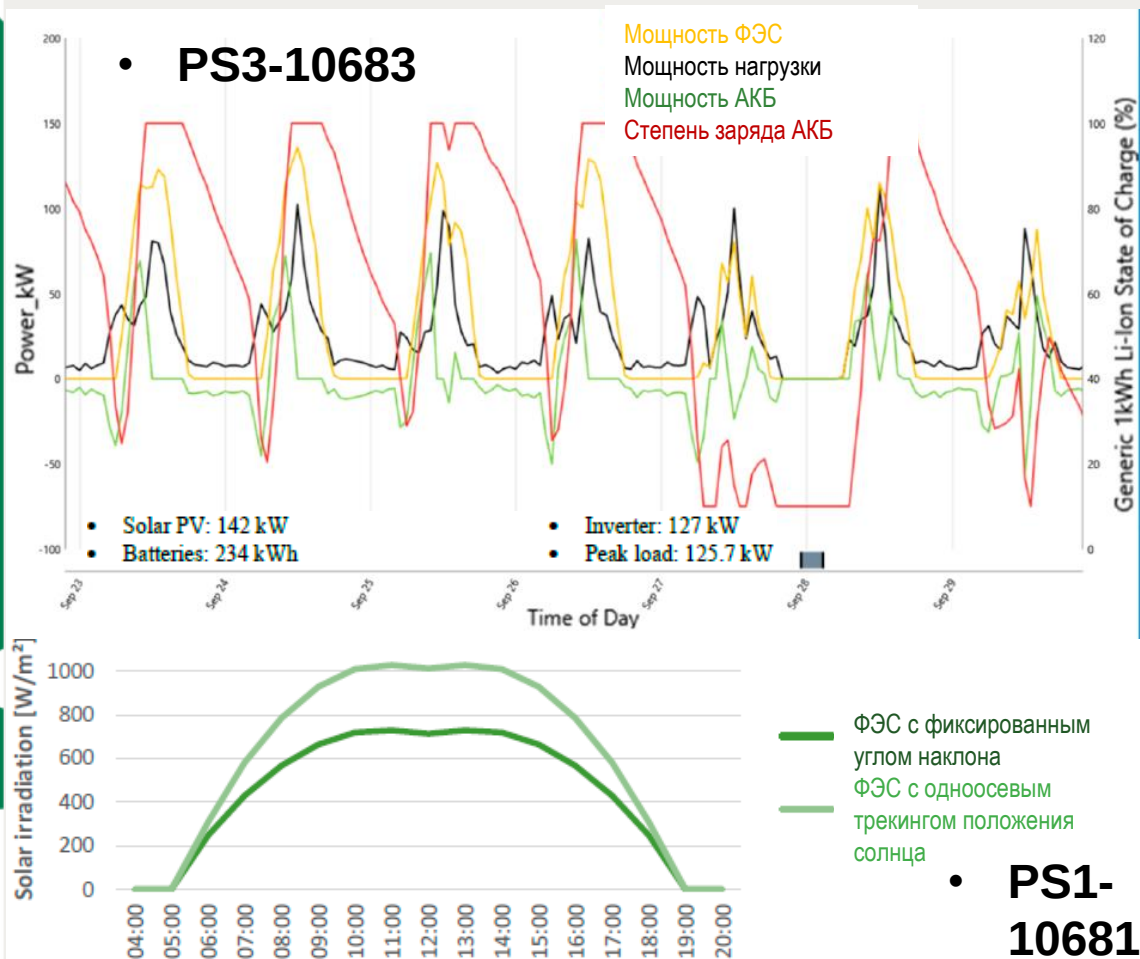


Наличие сетевого накопителя энергии позволяет существенно сгладить провалы частоты в ЭС с 25 Гц до 2,5 Гц при потере иного источника, но не позволяет устранить их совсем – для этого нужны накопители энергии типа ИБП. АЧР в публикации в явном виде не рассматривается

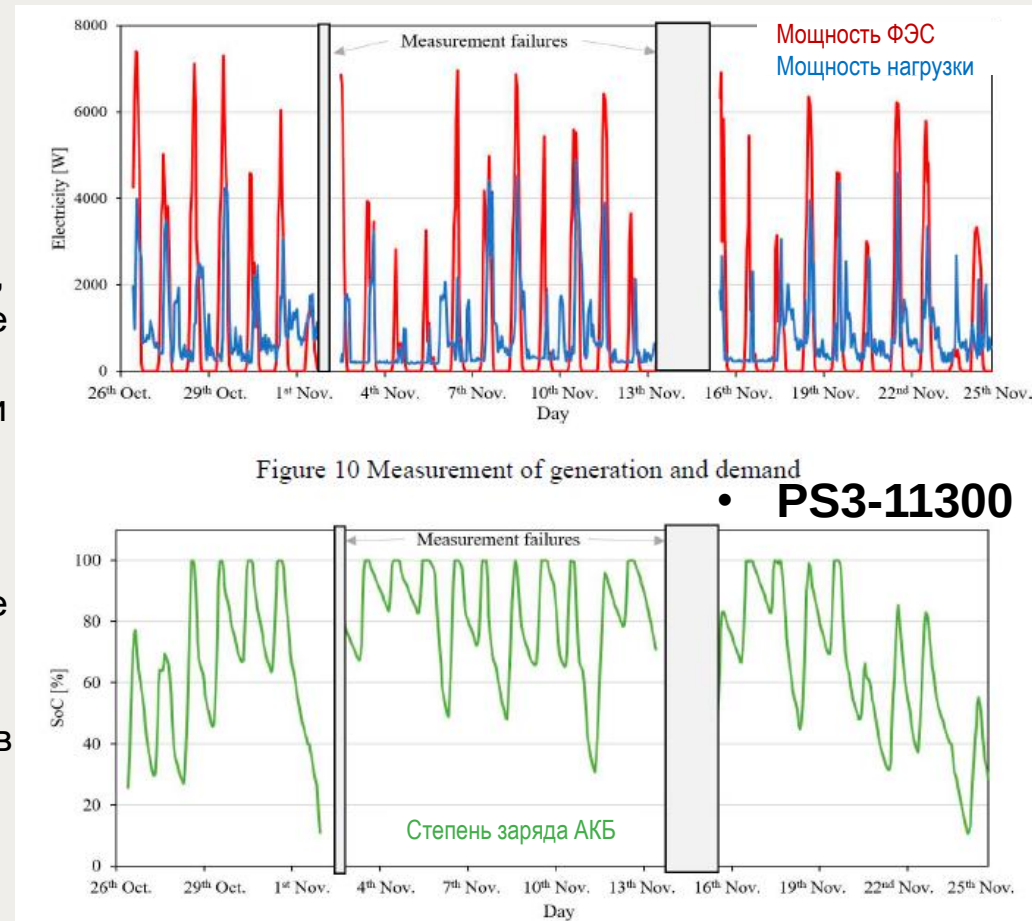
• PS1-10645

Электрификация удалённых поселений в ЮАР и Японии. Методика выбора параметров накопителя энергии на основе АКБ

42



Как правило, соотношение мощности накопителя и нагрузки выбирается 2:1, соотношение мощности и ёмкости накопителя (в числах) 1:1



Применяется квазидинамическое моделирование покрытия графика нагрузки с учетом потерь мощности. Расчёт по коэффициентам спроса, использования, совмещения и др. не применяется

Применение наук о данных в активных распределительных системах



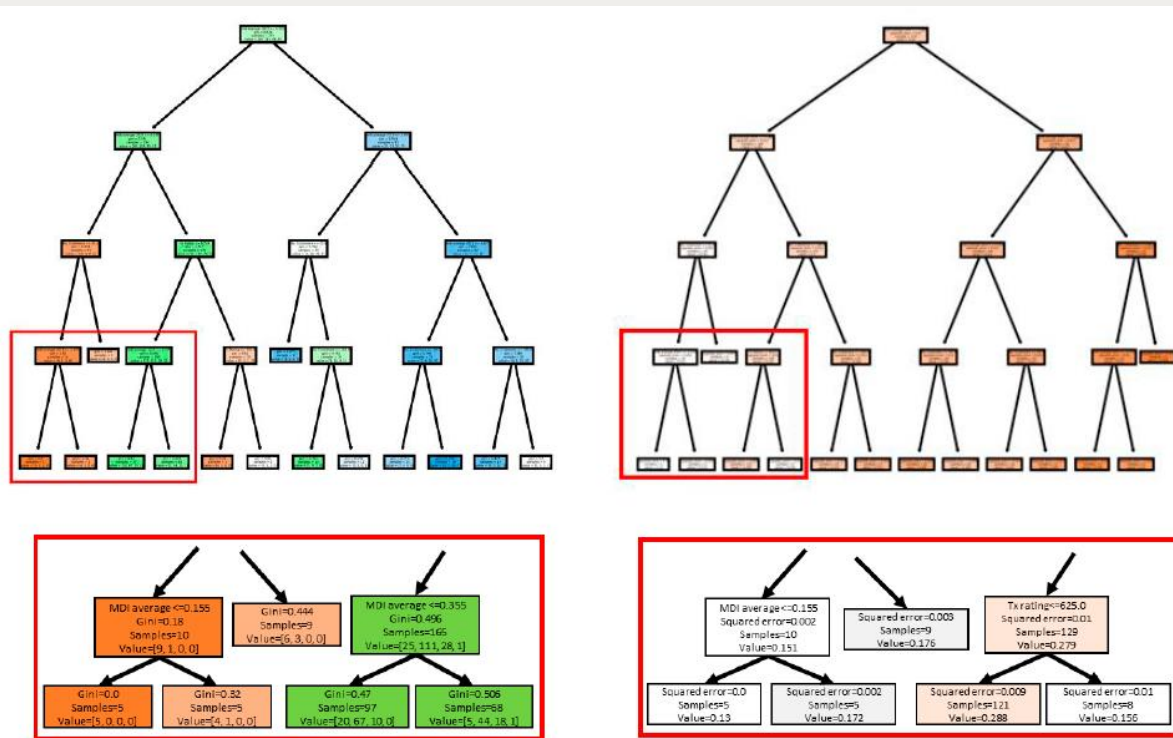
cigre

For power system expertise

Автовыбор трансформатора для ТП и оценка его загрузки на основе простых моделей. Великобритания

44

Деревья решений: классификаторы и регрессионная модель



Измеренная нагрузка

Линейная регрессионная модель (полные данные)

Линейная регрессионная модель (данные с пропусками)

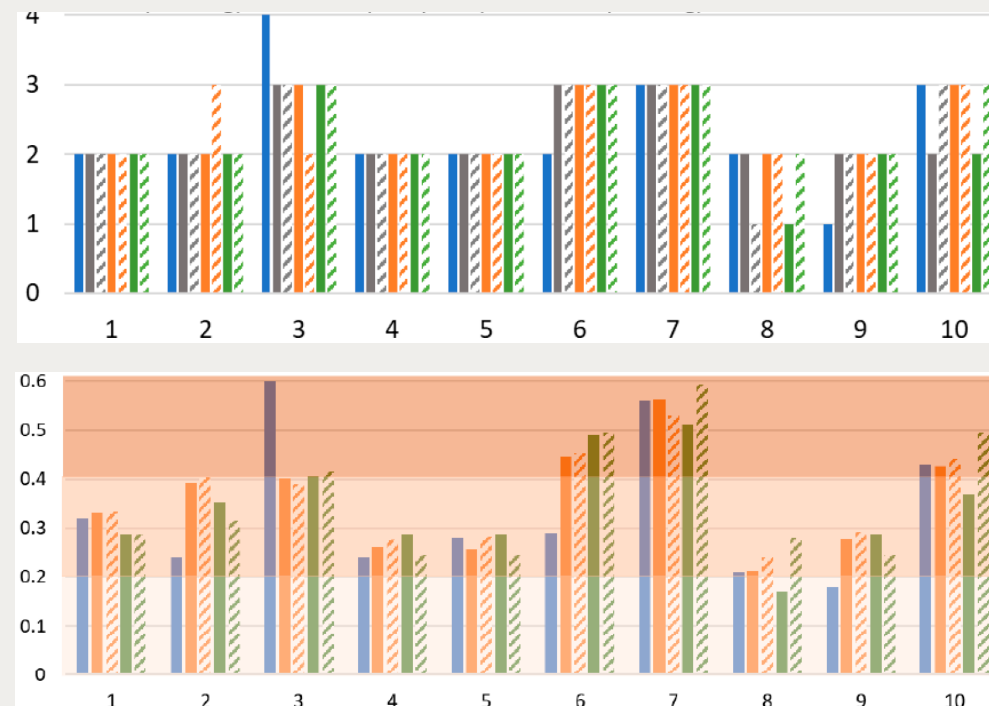
Дерево решений-классификатор (полные данные)

Дерево решений-классификатор (данные с пропусками)

Дерево решений-регрессионная модель (полные данные)

Дерево решений-регрессионная модель (данные с пропусками)

Оценка загрузки трансформаторов СН/НН №1-№10 в баллах и в о.е.



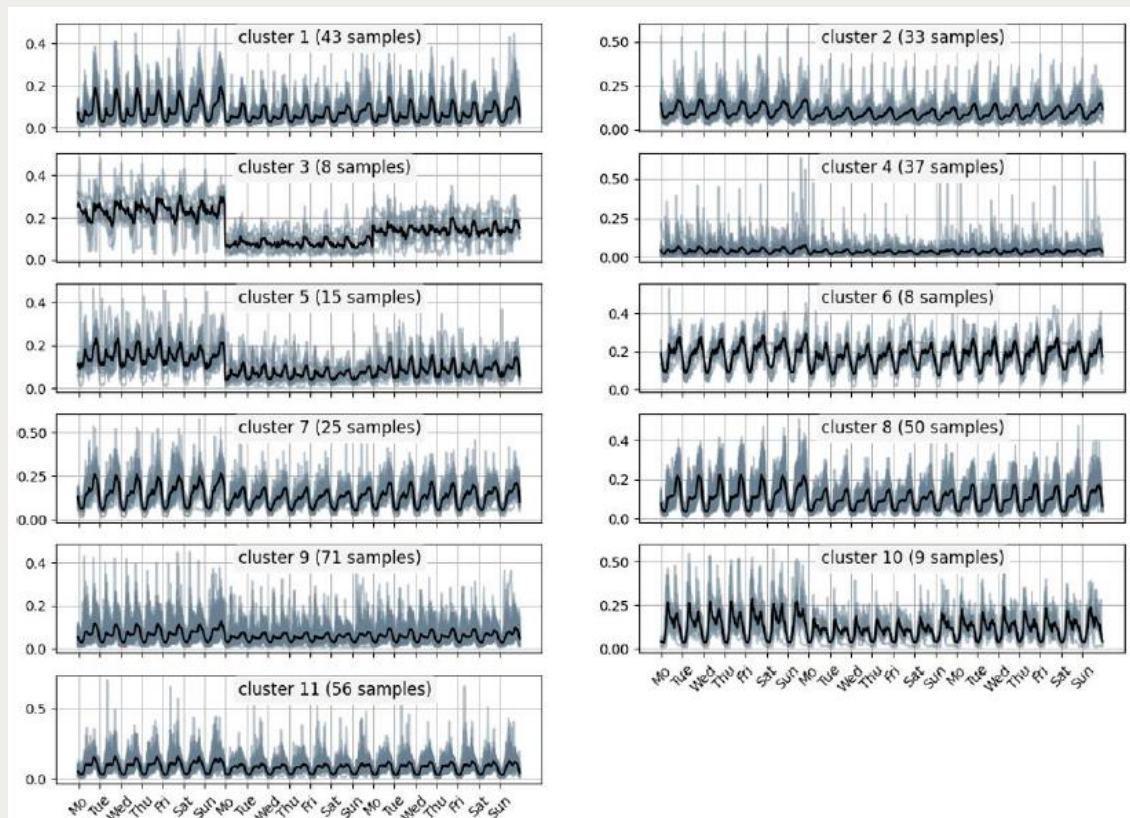
Простые модели лучше справляются с задачей, когда нагрузка трансформатора измеряется в баллах, что приемлемо для задач оценки технического состояния оборудования и части задач перспективного развития, как замена трансформатора. Простые модели робастны к выбросам и пропускам данных

PS1-10452

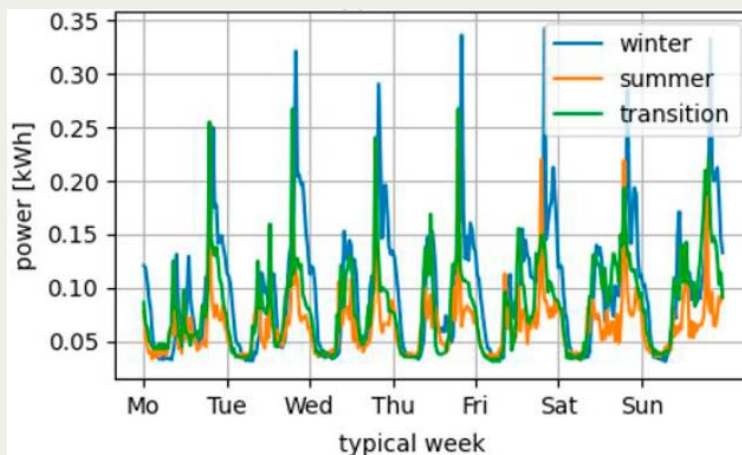
Кластеризация профилей потребителей электроэнергии на основе метода главных компонент и автокодировщика в Германии

45

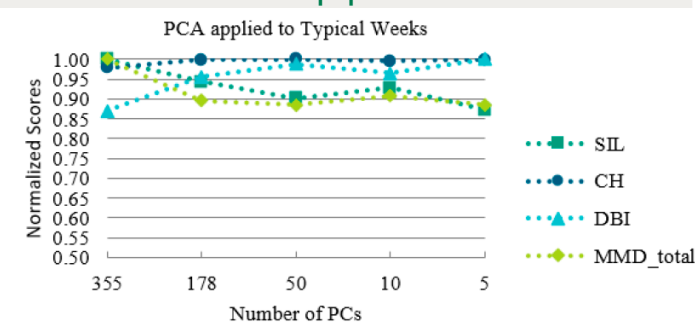
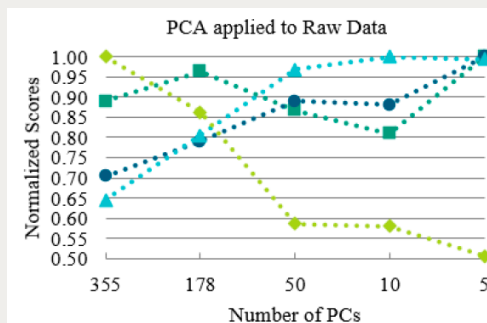
Кластеризация типовых графиков нагрузки различных потребителей



Повышение эффективности кластеризации



Предварительное выявление т.н. «типовых недель» позволяет применять метод главных компонент более эффективно, и далее кластеризация сжатых МГК графиков также проходит более эффективно



Создание «балансового портрета», или же «типового профиля потребления» нужно для задач:

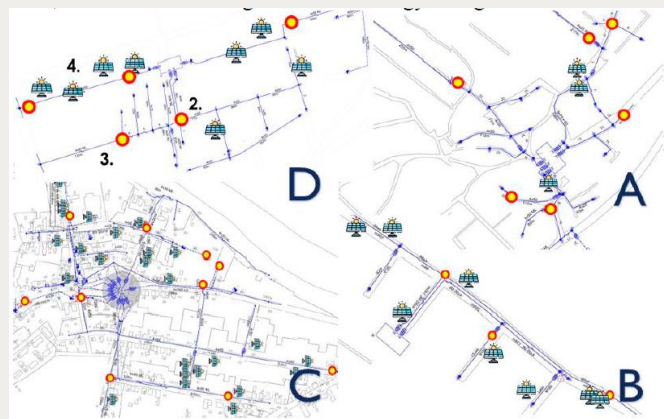
1. Расчеты квазидинамических электрических режимов при перспективном развитии;
2. Оценка пригодности потребителей для участия в агрегированном спросе;
3. Индивидуальные предложения на розничном рынке электроэнергии (квоты, «кэшбэк и скидки»)

• PS1-11443

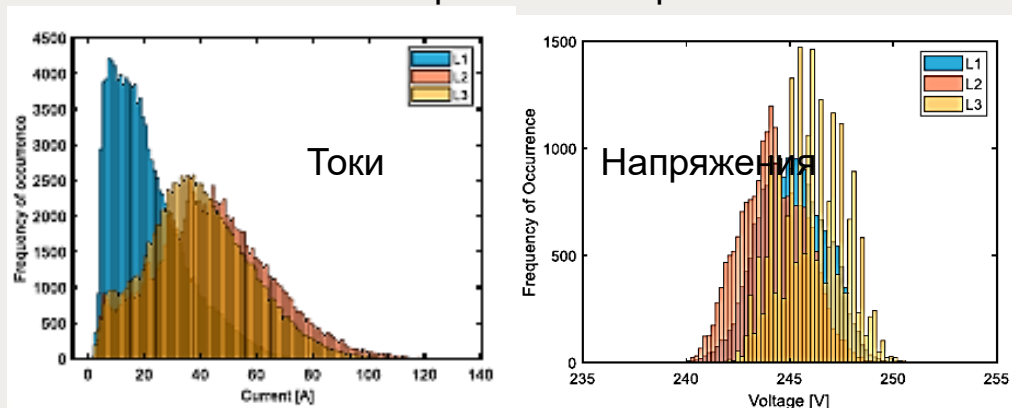
Оценивание состояния по модели узловых напряжений и по потоковой модели для выявления несимметрии питающих напряжений в результате подключения фотоэлектрических станций в Венгрии

46

Схема сети



Токи и напряжения по фазам



Псевдоизмерение

Потоковая модель

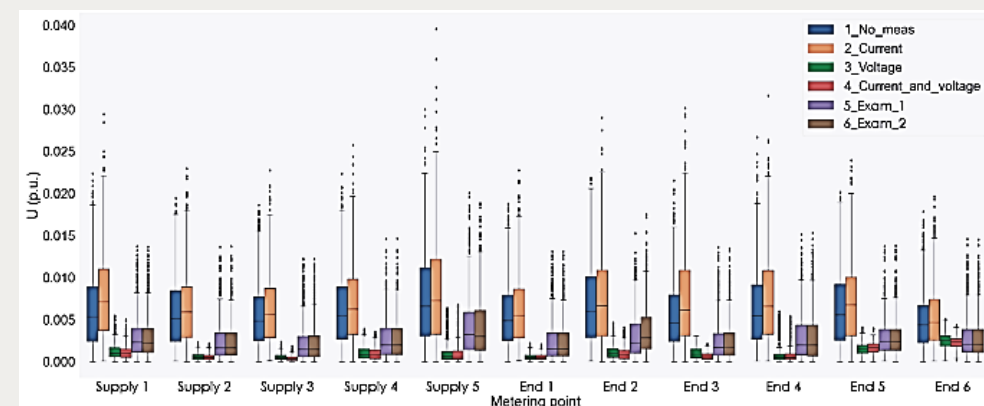
Модель на основе напряжений

Токи и напряжения

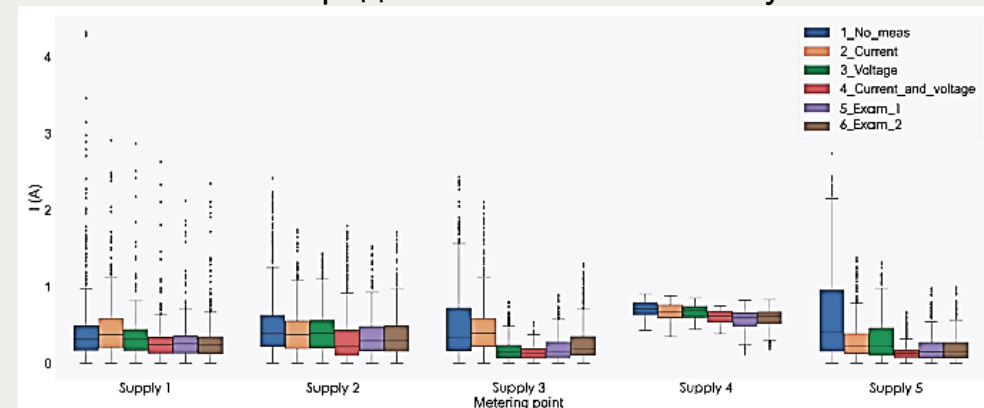
Токи и напряжения,
полунабор счетчиков 1

Токи и напряжения,
полунабор счетчиков 2

Распределение ошибки по напряжению



Распределение ошибки по току



Как для определения токов в ветвях, так и для определения напряжений в узлах лучше выступила традиционная модель на основе напряжений в узлах. Вероятно, потому, что распределение величин напряжения ближе к нормальному. Наилучший из всех результат показала комбинированная модель

• PS1-11360

Выявление нетехнических потерь электроэнергии по небалансу токов в фазном и нейтральном проводниках. ЮАР

47



Идея выявления нетехнических потерь электроэнергии по принципу устройства защитного отключения известна, но первоочередного внимания заслуживает неприкрытость и распространенность хищений электроэнергии. В некоторых ситуациях воры ЭЭ подключают собственные распределительные щиты НН

• PS1-
11891

Заземление и релейная защита



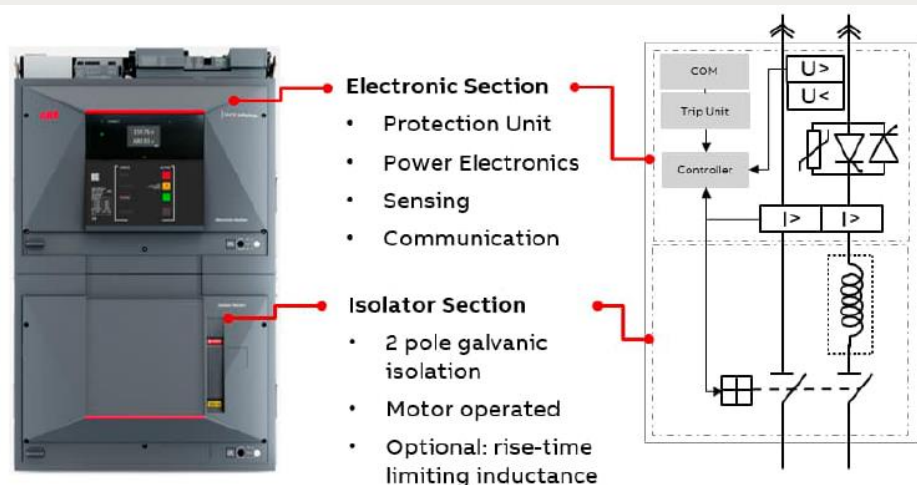
cigre

For power system expertise

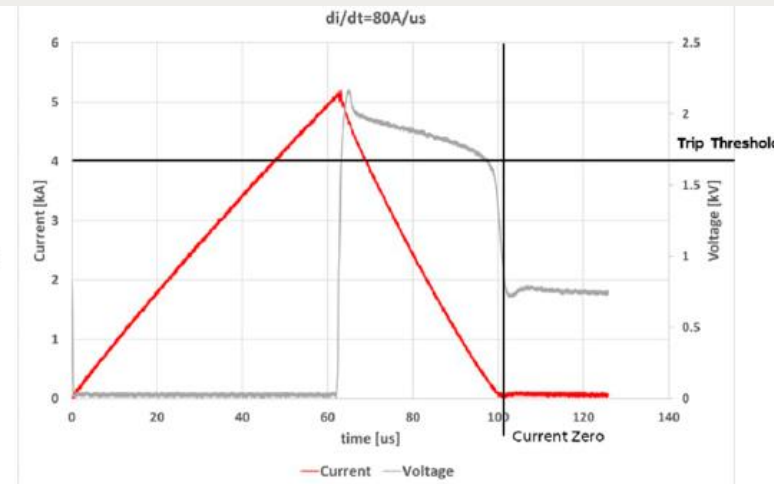
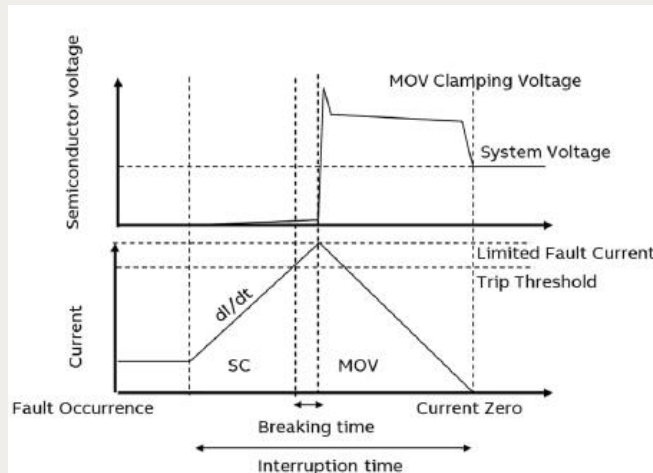
Полупроводниковый коммутационный аппарат для микроэнергосистем от АВВ на номинальные напряжения до 10 кВ и токи до 10 кА

49

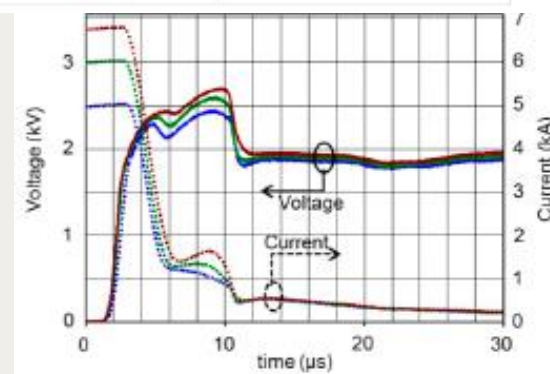
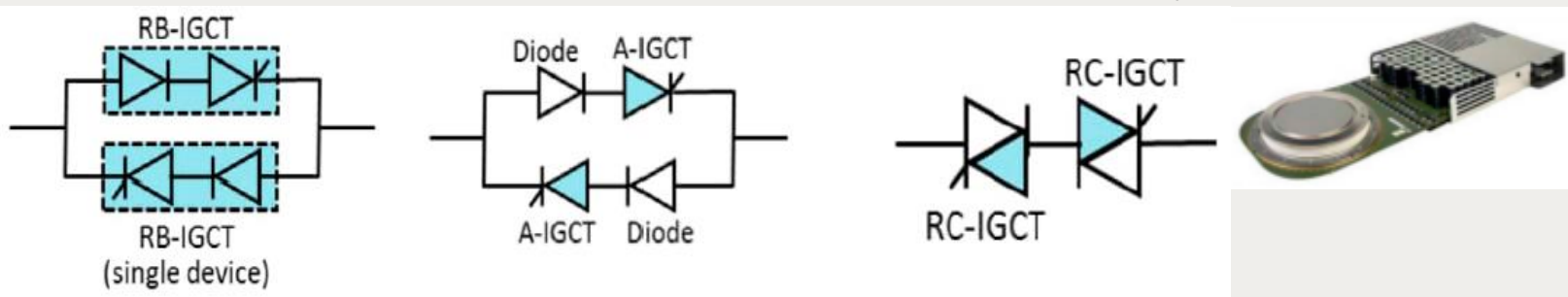
Внешний вид выключателя



Процессы возрастания величины тока при КЗ и коммутации



Разновидности запираемых тиристоров с интегрированным блоком управления



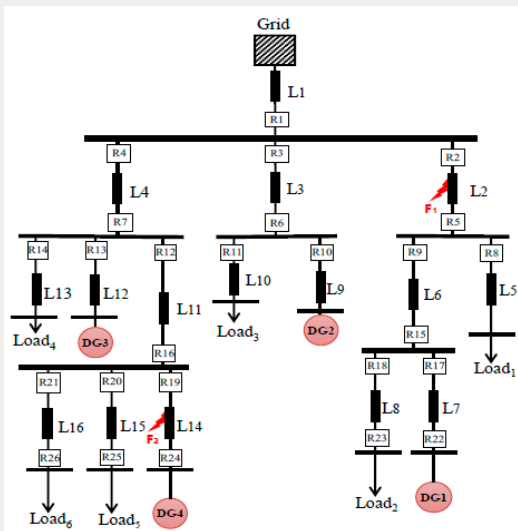
Быстродействие полупроводникового выключателя не является фиксированной величиной и рассчитывается исходя из скорости нарастания тока в тиристоре 80 А/мкс. На отключение токов ~5 кА уходит около 60 мкс, что в 1000 раз быстрее силовых вакуумных выключателей 10 кВ

• PS2-10753

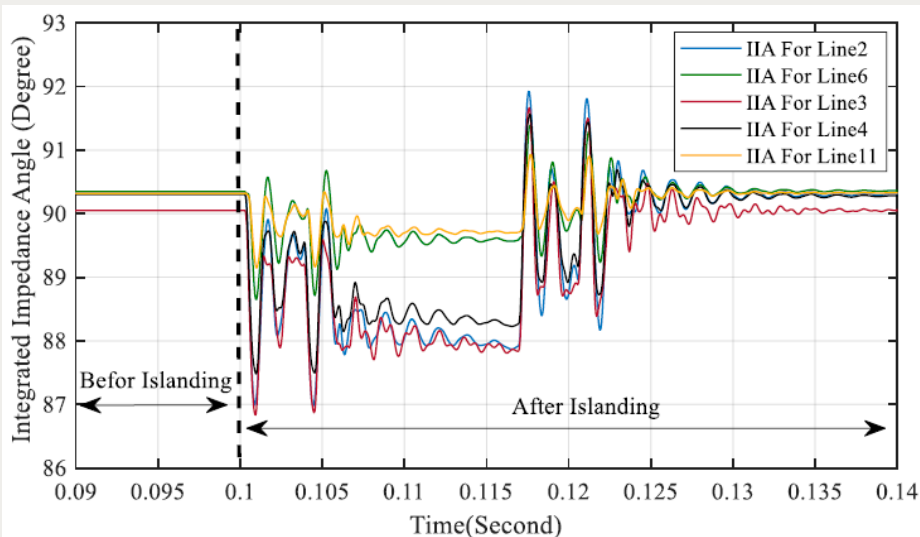
ОМП КЗ и обрывов активных распределительных систем с УСВИ из Иордании и Южной Кореи

50

Схема сети



Пример переходного процесса при выделении



Определение вида и сопротивления при КЗ

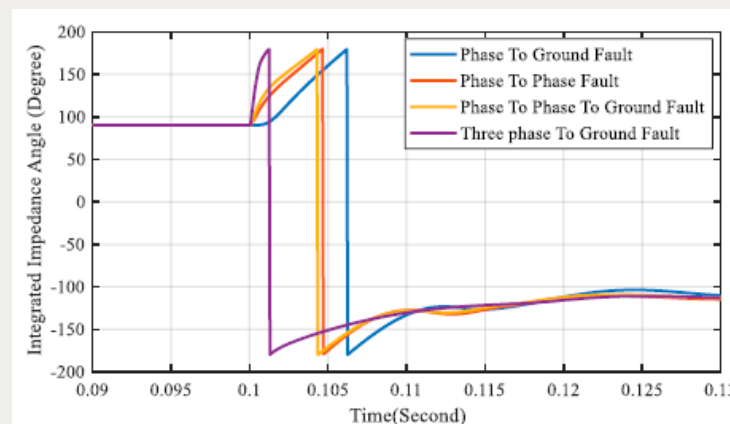
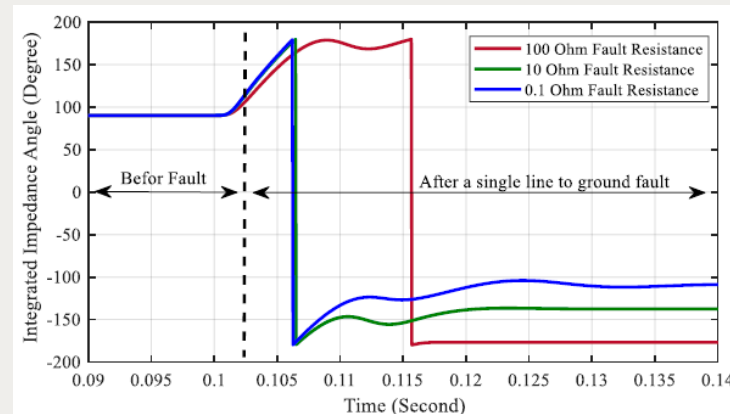


Table 4. Open conductor detection rate for all feeder

Feeder		Only RTUs	RTU + PMU
Feeder#1	Normal	82.1%	87.9%
	Noise	81.5%	87%
Feeder#2	Normal	77.8%	85.7%
	Noise	76.2%	84.3%
Feeder#3	Normal	84.4%	88.3%
	Noise	82%	86.7%

Определение места обрыва в зависимости от зашумленности в предшествующем режиме

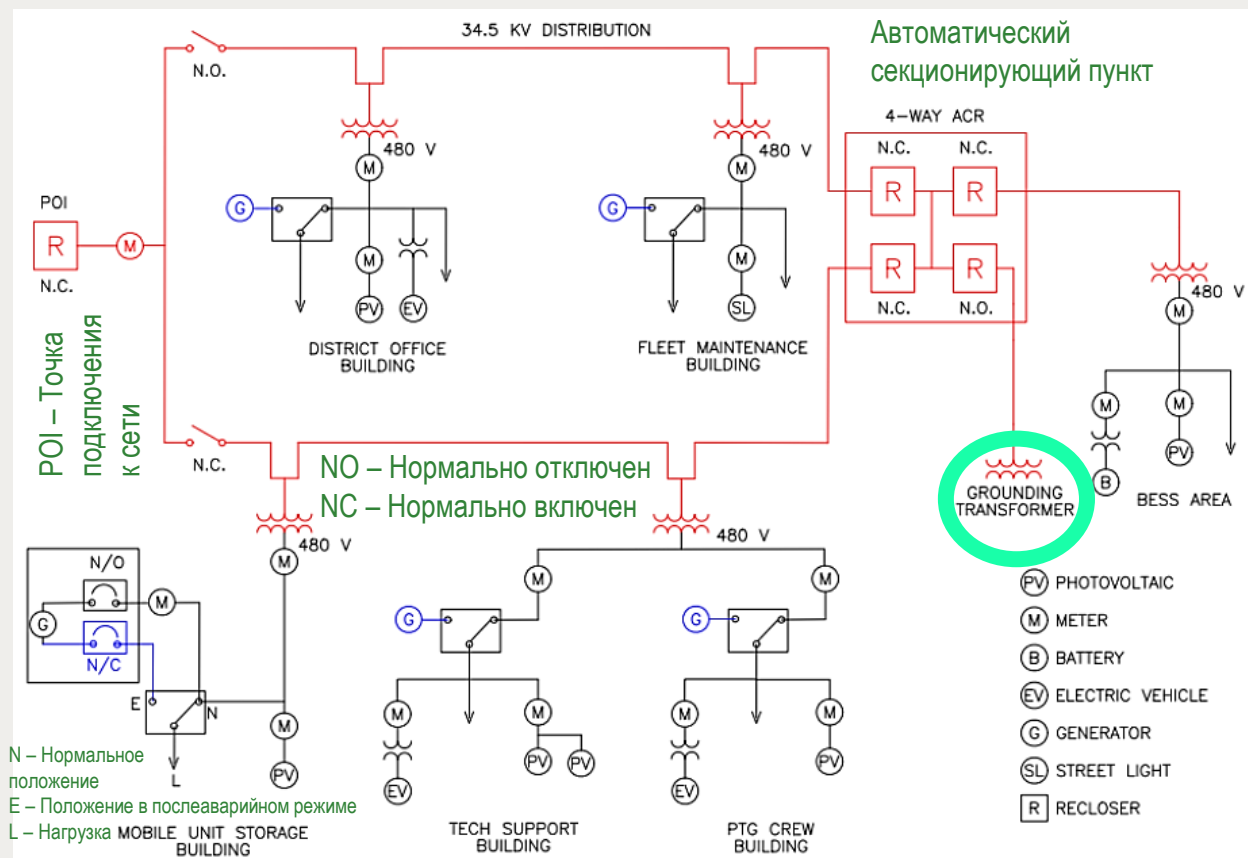
УСВИ и мини-СМГР рассматриваются как неотъемлемая часть перспективных активных распределительных систем. В публикациях подчеркивается, что эффективность применения подобных устройств в значительной мере ограничена эффективностью ЦОС на входе

- PS1-11413,
- PS3-10966

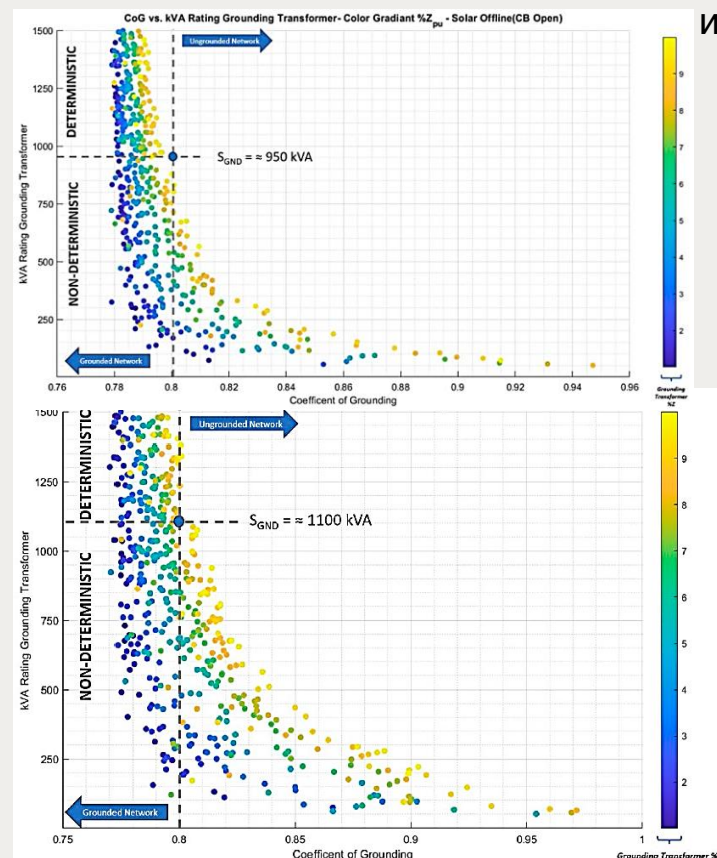
Исследования вопросов заземления микроэнергосистемы, выделившейся в автономный режим. США

51

Схема микроэнергосистемы



Зависимость коэффициента (не)заземления от мощности



и U_k заземляющего трансформатора

Здесь коэффициент заземления – отношение фазного напряжения при однофазном КЗ на землю к линейному:

$$CoG = \frac{V_{LG}}{V_{LL}}$$

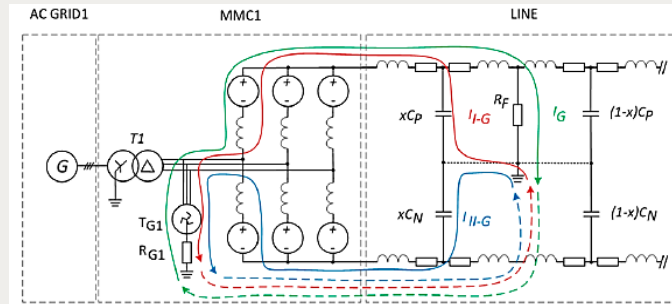
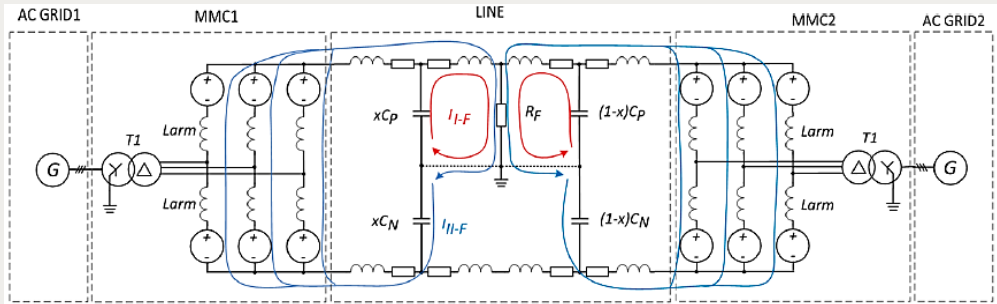
1. Сопротивление заземления микроэнергосистемы меняется в разы при параллельной и автономной работе (сложно подобрать заземляющий трансформатор без вмешательства в существующее заземление внешней сети);
2. При КЗ на землю бросок тока намагничивания заземляющего трансформатора 2-2,5 о.е. по отношению к току инверторной генерации вызывает её отключение от действия токовых защит

PS3-10482

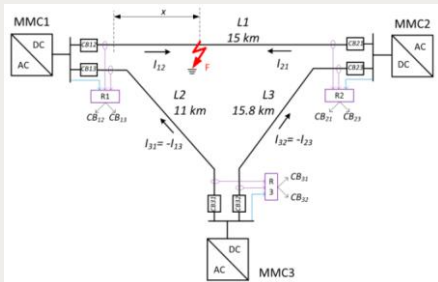
Изучение вопросов КЗ в преобразователях и в сети постоянного тока СН. Россия (МЭИ) – Ю. Корея

52

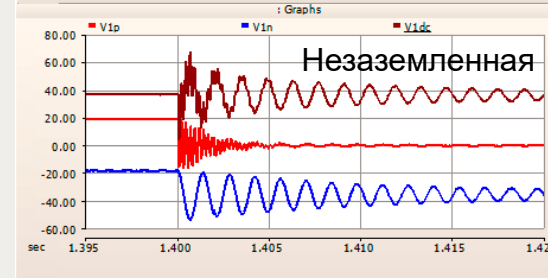
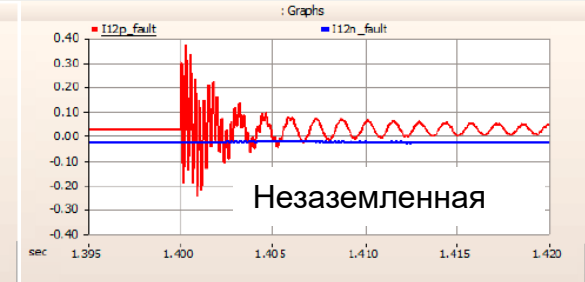
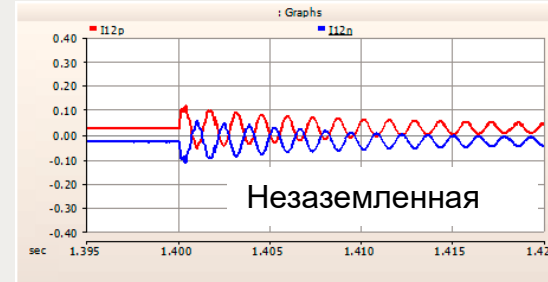
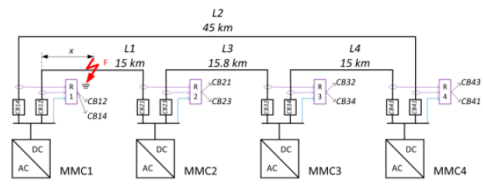
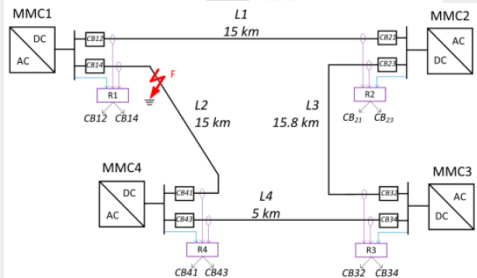
Электрические контура протекания тока при замыкании на землю в незаземленной и заземленной сети постоянного тока



↓ Примеры изменения параметров при замыкании на землю в незаземленной и заземленной сети постоянного тока



← Примеры тестовых схем различных сетей. Для каждой схемы рассматривались различные точки КЗ и ремонтные схемы



По результатам экспериментов рекомендовано высокоомное резистивное заземление для каждого из полюсов сети. Разработана двухступенчатая токовая защита с дополнительным пусковым органом по напряжению. Отмечено, что защита работает и при замыканиях полюса на полюс

• PS3-10861



Цены на розничном рынке электроэнергии

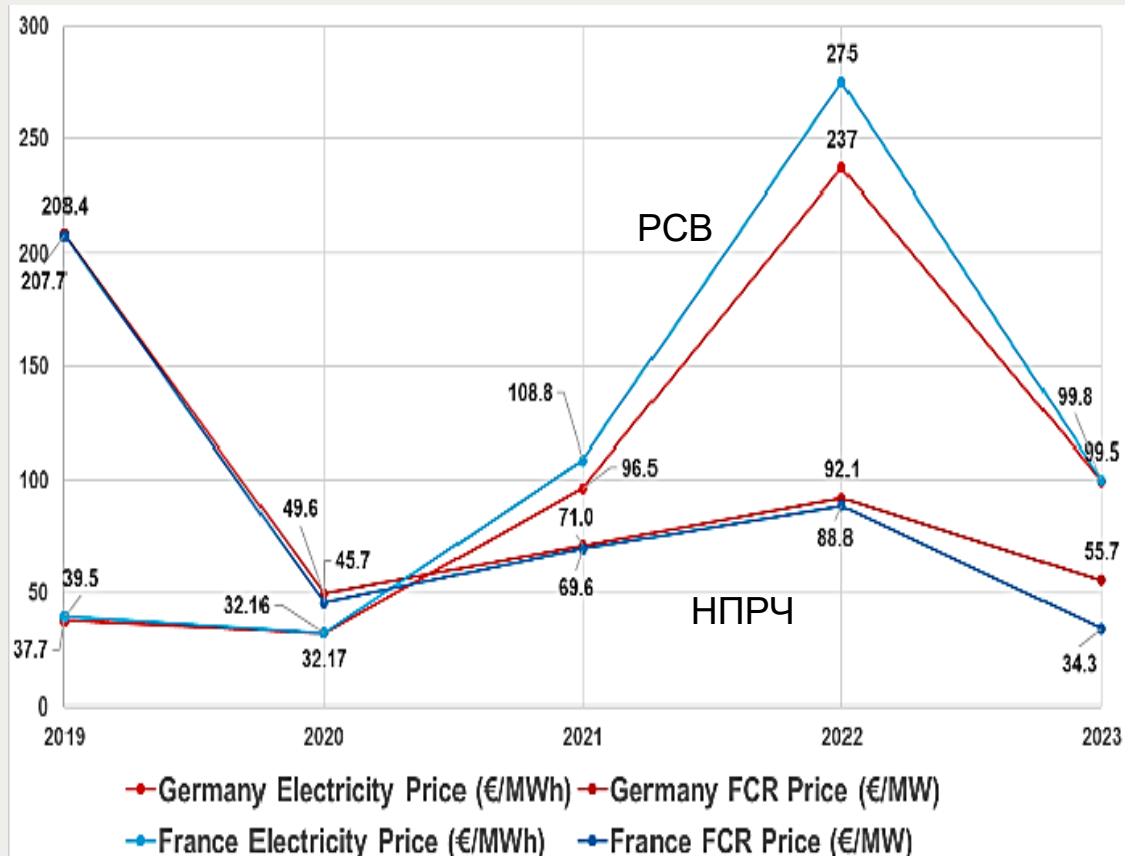


cigre

For power system expertise

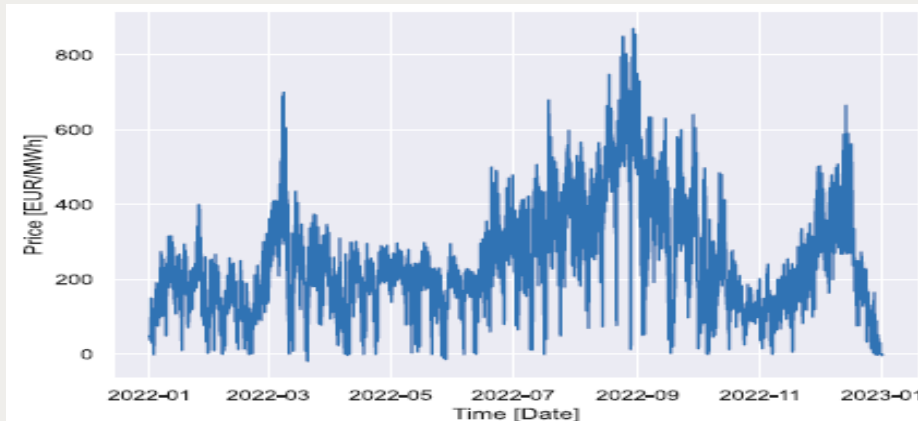
Цены на рынках электроэнергии и системных услуг Европы

Цены на РСВ и на НПРЧ 2019-2023

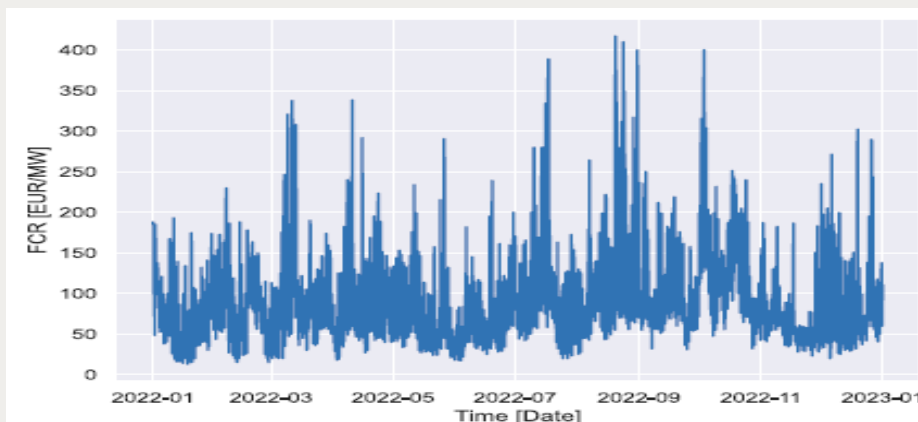


В т.ч. цены на РСВ и на НПРЧ в 2022

РСВ



НПРЧ



В 2022 г. цены РСВ в рублёвом эквиваленте на пике доходили до 100 руб/кВт*ч, в среднем по году 30 руб/кВт*ч. НПРЧ стоило до 50 руб/МВт, в среднем по году 10 руб/МВт. После закрытия части предприятий и роста поставок СПГ в 2023 г. цены составили в среднем 11 руб/кВт*ч и 6 руб/МВт

- PS1-10480, 11135

Обзор деятельности рабочих групп CIGRE SC C6



cigre

For power system expertise

Рабочие группы CIGRE SC C6 в статусе активных по состоянию на 2024

Номер	Год	Название	Руководитель	Про что группа?
Собственные				
C6.35	2018	DER aggregation platforms for the provision of flexibility services	Alexandre Oudalov (Switzerland)	Платформы для агрегации энергоресурсов на стороне энергосистемы
C6.39	2018	Customer Empowerment	Michael Ross (Canada)	Собственная генерация потребителей электроэнергии
C6.40	2019	Electric Vehicles as Distributed Energy Resource (DER) systems	Joao Peças Lopes (Portugal)	Малый электротранспорт в распределительных сетях и системах
C6.42	2020	Electric Transportation Energy Supply	Maurizio Albano (Italy)	Электрификация транспорта
C6.44	2021	Nodal value of Distributed Renewable Energy Generation	Kilian Reiche (Germany)	Идентификация МИН-МАКС мощности распределенных энергетических ресурсов в узлах сети
C6.45	2022	The impact of DER on the resilience of Distribution Networks	Nasser Usman (New Zealand)	Влияние распределенных энергетических ресурсов на отказоустойчивость энергосистемы
C6.46	2023	Energy Efficiency in Distribution Systems	Aradhna Pandarum (South Africa)	Энергоэффективность активных распределительных систем
C6.47	2023	DSO customer communication interface	Daniel Eghbal (USA)	Стандартизированный интерфейс энергобмена и управления субъекта энергетики и субъекта оперативно-диспетчерского управления
Совместные				
JWG C6/C2.34	2018	Flexibility provision from distributed energy resources	Alex Baitch (Australia)	Распределенные энергоресурсы на рынке системных услуг
JWG C5/C6.29	2018	New Electricity Markets, Local Energy Communities	-	Локальные рынки электроэнергии для распределенных энергоресурсов
JWG C6/C5.31	2019	Wholesale and Retail Cost Impact of Flexible Demand Response	Pierluigi Mancarella (Australia)	Влияние агрегации спроса на оптовый и розничный рынки

Результаты опроса членов SC С6, каким тематикам, связанным с активными распределительными системами, необходимо уделить внимание в перспективе

57



! Большинство представителей научного сообщества волнуется, справятся ли распределительные сети с интеграцией распределенных энергетических ресурсов во всех горизонтах планирования и управления

Ключевые проблемы развития активных распределительных систем и распределенных энергетических ресурсов по мнению SC C6. 1

58

Проблема	Решение (точка зрения)
Режим источника напряжения и искусственная инерция для энергоресурсов с силовыми преобразователями	«Большая» энергетика: все инверторы должны работать в режиме источника напряжения. «Малая» энергетика: требование избыточно, а регулирование в системе из источников тока может быть достигнуто программной настройкой статизма и отклика. Требование не реализуемо для уже присоединенных энергоресурсов-источников тока
Оперативное и краткосрочное планирование в распределительных сетях	Потребуется вводить с ростом доли распределенных энергетических ресурсов
Верхние уровни управления энергосистемой не владеют информацией о масштабах развития энергоресурсов в распределительных сетях	Осуществлять обмен информацией
При разделении обязанностей по управлению (по классам напряжения, по диспетчерскому и технологическому и т.д.) и росте доли распределенных энергоресурсов по факту за энергосистему в целом не отвечает никто	Ввести регламенты взаимодействия
Балансовый вклад потребителей, обладающих ненаблюдаемой системой собственной генерацией	«Большая» энергетика: обязать планировать самостоятельно и отчитываться «Малая» энергетика: нужна статистическая модель и набор правил планирования
«Последняя миля» в сельской электрификации. Кто и как платит за техприсоединение распределенных энергоресурсов, устанавливает тарифы на выработку и тарифы на передачу	Мнения разделились
Не ясно определение Hosting capacity и кто отвечает за её планирование	Hosting capacity – максимальная нагрузка или генерация, которая может быть подключена к сети с текущей пропускной способностью, но точного определения нет. Обязать планировать нижние уровни управления ЭС

Ключевые проблемы развития активных распределительных систем и распределенных энергетических ресурсов по мнению SC C6. 2

59

Проблема	Решение (точка зрения)
Как подтверждать паспортные параметры распределенных энергоресурсов при пусконаладочных работах, если они зависят от погоды	Готовое решение отсутствует
Ввод вероятностных расчетов (режимная или хотя бы балансовая надежность) в отношении распределенных энергоресурсов	Нужен «интернет вещей» и искусственный интеллект
Расчет (квази)установившихся режимов не показателен для активных распределительных систем	Все параметры нужно считать в динамике, при этом на долгосрочном интервале
Распределительные системы постоянного тока низкого напряжения	В Ю. Корее, в меньшей степени в Китае успешно применяются распределительные системы постоянного тока среднего напряжения. Взять за образец
Как определять правдоподобную мощность техприсоединения распределенных энергоресурсов	Вовлечение страхования рисков по типу финансового рынка
Субъективный объем мероприятий при техприсоединении в активных распределительных системах и его влияние на параметры качества электроэнергии	Готовое решение отсутствует
Качество исходных данных для планирования развития и функционирования активных распределительных систем намного важнее, чем самые совершенные модели	Нужны BigData
Отсутствие стандартизации, унификации и взаимозаменяемости технических решений по распределенным энергоресурсам от различных производителей на микроуровне	Нужна сквозная проверка совместимости решений до или во время техприсоединения объекта

Спасибо за внимание!

В.О. Самойленко
vvsamoylenko@yandex.ru



cigre

For power system expertise