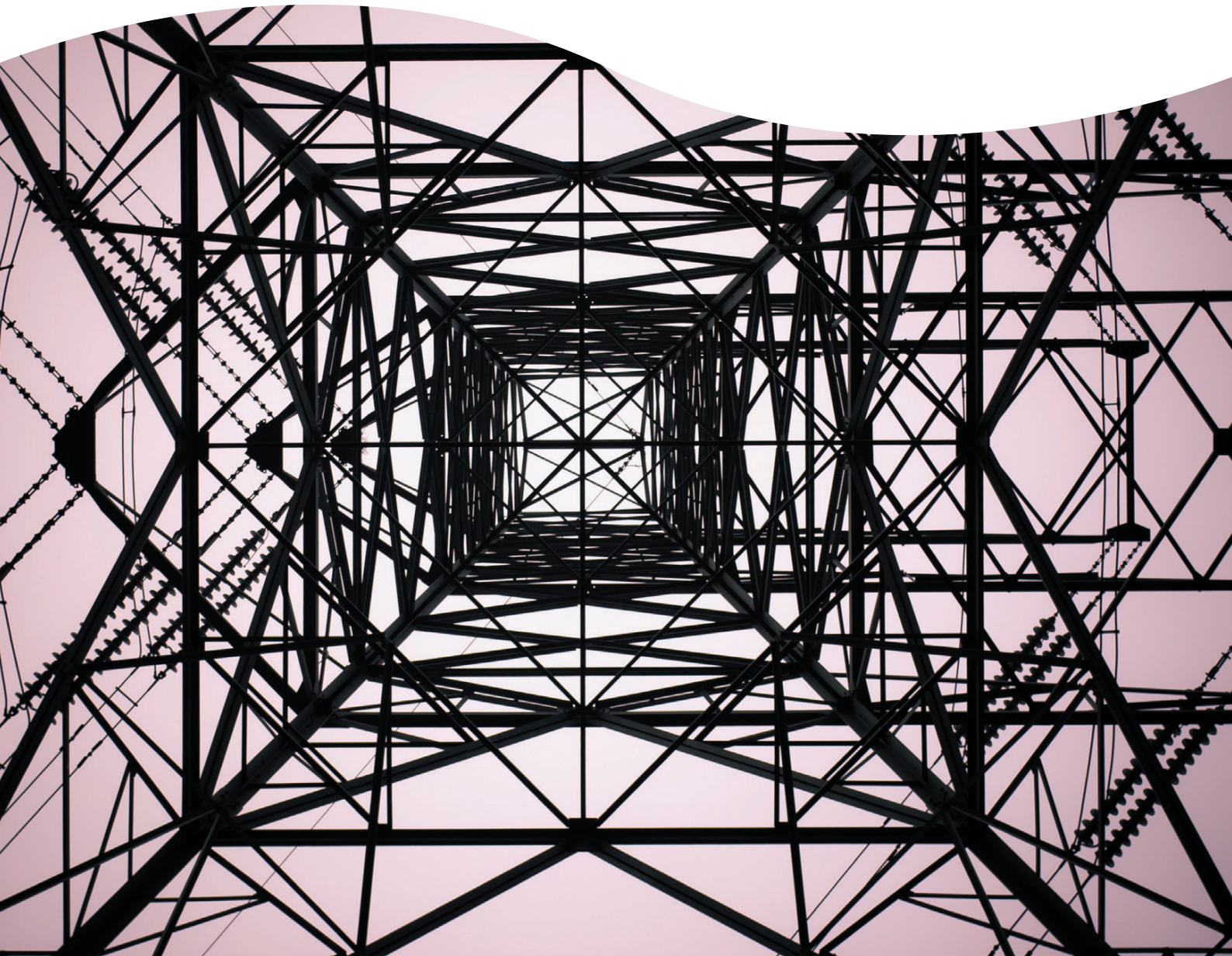


НЕСКОЛЬКО СЛОВ О СЕТЯХ

Как электрические сети помогают
интегрировать переменные
возобновляемые источники энергии



НЕСКОЛЬКО СЛОВ О СЕТЯХ

ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Несколько слов о сетях.

Как электрические сети помогают интегрировать переменные возобновляемые источники энергии.

ПО ЗАКАЗУ:

Agora Energiewende
10178 Берлин, Анна-Луиза-Карш-Штрассе, 2
Тел.: +49 (0)30 700 14 35-000
Факс: +49 (0)30 700 14 35-129
www.agora-energiewende.de
info@agora-energiewende.de

АВТОРЫ:

Стефани Ропениус,
Филипп Годрон,
Маркус Штайгенбергер

ПЕРЕВОД:

Татьяна Ланьшина

Корректурa: Марианна Морра-Скрябина
Макет: Марика Гельф

Изображение на обложке: [unsplash.com/ Shane Rounce](https://unsplash.com/ShaneRounce)

Дата завершения подготовки публикации:
31 октября 2018 г.
279/01-won-2022/RU
Публикация: февраль 2019 г.

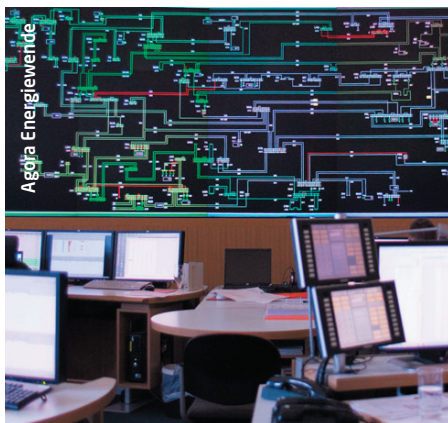


Публикация доступна для ска-
чивания по данному QR-коду.

О ЧЕМ ВЫ УЗНАЕТЕ

Почему ветровая и солнечная электроэнергия создают новые вызовы для эксплуатации и планирования развития сетей

Подробнее на стр. 9



Производство электроэнергии за счет энергии ветра и солнца зависит от погоды. Чтобы энергосистема оставалась стабильной, несмотря на колебания в реальном времени, спрос на электроэнергию всегда должен соответствовать предложению. Эксплуатация энергосистем с растущей долей переменных возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и большей склонностью к резким изменениям в выработке является сложной задачей. Возобновляемая электроэнергия зачастую вырабатывается на небольших модульных генерирующих установках, которые подключаются к распределительной сети и расположены вблизи потребителей электроэнергии. Это отличается от традиционной энергосистемы, в которой несколько крупных тепловых генераторов подают электроэнергию непосредственно в магистральную сеть.

Высокая доля переменных ВИЭ делает координацию производства электроэнергии и спроса все более сложной задачей для проектировщиков и операторов.

Как можно оптимально использовать существующую сетевую инфраструктуру для интеграции переменных возобновляемых источников энергии

Подробнее на стр. 14

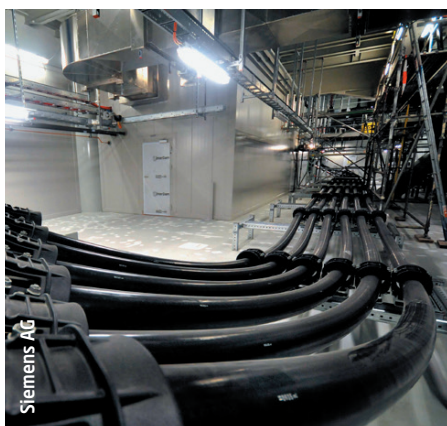


Изменения в структуре генерации часто требуют расширения сети. Хорошая новость заключается в том, что существующая сетевая инфраструктура может быть адаптирована для интеграции растущей доли переменных ВИЭ. Мониторинг температуры существующих линий электропередачи позволяет лучше использовать их пропускную способность. Внедрение фазосдвигающих трансформаторов позволяет операторам сетей контролировать и оптимизировать потоки электроэнергии, а также снимать ограничения перетоков. Благодаря усилению сети существующие линии электропередачи могут быть модернизированы без необходимости строительства новых. Универсального решения не существует, но оптимальный выбор решений должен учитывать условия в каждом регионе энергосистемы и

в стране. Применение «принципа GORE» – «сначала оптимизация, потом усиление, потом расширение сети» – снижает затраты и укрепляет общественную поддержку в случаях, когда возникает необходимость строительства новых линий электропередачи, после того как меры по оптимизации и усилению сети не принесли результатов.

Как планирование сетей может обеспечить высокую долю переменных возобновляемых источников энергии на ранних этапах

Подробнее на стр. 17



Существуют различные подходы к планированию развития сетей. В традиционном подходе расширение сетей следует за появлением новой генерации и спроса. Однако длительные сроки строительства линий электропередачи означают, что расширение сетей не будет успевать за темпами строительства таких видов новой переменной генерации, как ветровые и солнечные фотоэлектрические электростанции, которые строятся достаточно быстро. Комплексный подход к планированию включает в себя инструменты по координации планирования развития сетей и строительства новых объектов переменной генерации.

Что делать в случае возникновения «узких мест» в сети

Подробнее на стр. 28



Если расширение сети не успевает за ростом доли переменной генерации, это может привести к перегрузке сети и возникновению «узких мест». Хорошо развитая сеть защищена от таких ограничений. Например, в Германии возобновляемые источники энергии покрывают около половины годового спроса на электроэнергию, и только от 2% до 4% возобновляемой генерации принудительно ограничивается. Тем не менее, даже страны с развитой сетевой инфраструктурой могут столкнуться с перегрузкой сети. Когда это происходит, их сетевые операторы должны предпринимать конкретные действия на основе различных инструментов и следовать четко прописанным правилам. В противном случае переменная выработка может быть ограничена, в то время как значительные объемы традиционной генерации продолжают работать. Чтобы максимизировать объем зеленой электроэнергии в сети, ограничение возобновляемой генерации должно быть крайней мерой. Дистанционное управление электростанциями с переменной выработкой и использование данных о выработке электроэнергии в режиме реального времени могут помочь сетевым операторам в управлении энергосистемой.

Как закупать системные услуги в периоды более низкой традиционной генерации

Подробнее на стр. 32



fotolia.de/Kara

Обычно традиционные тепловые электростанции предоставляют системные услуги, такие как регулирование частоты и напряжения, которые необходимы для надежной работы системы. Но в настоящее время традиционное производство электроэнергии сокращается, поэтому решающее значение приобретают новые источники системных услуг. Если определены соответствующие условия, возобновляемая генерация может предоставлять определенные системные услуги, например, как часть требований к ее подключению. Кроме того, элементы системных услуг (без когенерации электроэнергии) также могут быть встроены непосредственно в сеть (например, оборудование STATCOM). Даже генераторы на выведенных из эксплуатации атомных электростанциях могут быть трансформированы во вращающиеся синхронные компенсаторы и способствовать поддержанию напряжения. В распределительных сетях колебания напряжения или повышение напряжения, вызванное передачей электроэнергии от солнечных фотоэлектрических станций, можно компенсировать путем установки трансформаторов переменного напряжения.

Почему важно заранее учитывать влияние переменной генерации на энергосистему

Подробнее на стр. 33



Agora Energiewende

Управлять переменной генерацией просто, когда доля этой генерации невелика. Но важно заранее учитывать влияние растущей доли переменных ВИЭ, поскольку модернизация существующих электростанций в целях повышения надежности системы является дорогой и трудоемкой. Наличие реестра, содержащего в себе данные обо всех электростанциях с переменной генерацией (включая их технические характеристики), имеет важнейшее значение для мониторинга влияния переменной генерации на энергосистему и для выявления необходимости принятия дополнительных мер.

СОДЕРЖАНИЕ

О ЧЕМ ВЫ УЗНАЕТЕ	3
Введение	7
1. Солнце, ветер и сеть: тренды и вызовы	9
2. Возможности сети для повышения гибкости: набор инструментов для планирования и расширения сети	14
2.1 Принцип GORE – сначала оптимизация, потом усиление, потом расширение сети	14
2.2 Процесс планирования сетей	17
2.3 Укрепление общественной поддержки строительства новых линий электропередачи	23
3. Функционирование системы: набор инструментов для интеграции растущей доли возобновляемых источников энергии	27
3.1 Работа системы в случае, когда гибкость является приоритетом	28
3.2 Закупка системных услуг	32
ИСТОЧНИКИ	37

Введение

1.1.1. Интеграция ВИЭ в сеть

Затраты на производство электроэнергии за счет энергии солнца и ветра в последние годы снижались впечатляющими темпами. В 2021 году в Саудовской Аравии инвесторы выиграли аукционы с вознаграждением за электроэнергию от солнечных фотоэлектрических установок в размере 1 евроцента за киловатт-час¹. В Германии цена на материковую ветровую электроэнергию резко упала до 3,5 евроцентов за киловатт-час в августе 2017 года, в то время как цена на солнечную энергию достигла нового рекордно низкого уровня в 3,55 евроцента за киловатт-час во время последнего аукциона в феврале 2020 года².

1 См. Energy Utilities (2021).

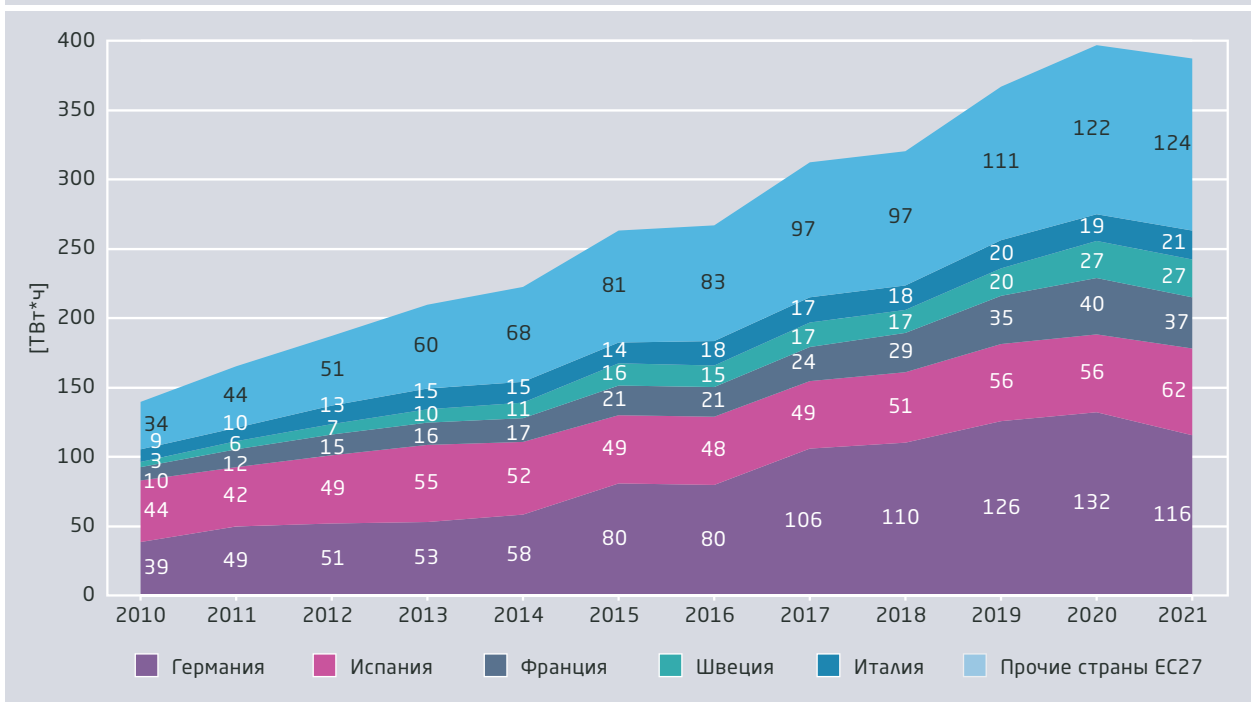
2 См. Informationsportal Erneuerbare Energien (2022).

Из-за снижения затрат ветровая и солнечная фотоэлектрическая энергия являются самыми быстрорастущими источниками электроэнергии в мире, и ожидается, что в ближайшем будущем на них будет приходиться значительная доля в структуре производства электроэнергии.

Энергия ветра и солнечная энергия зависят от погоды. По мере увеличения доли переменных возобновляемых источников энергии становятся необходимыми фундаментальные изменения в работе сети. Поэтому многие исследователи и политики обращают внимание на страны, в которых переменные ВИЭ уже составляют значительную долю электроснабжения, как, например, Дания, где на переменные ВИЭ приходится более половины генерации, а также Ирландия,

Производство ветровой электроэнергии в ЕС-27, ТВт*ч (включая производство в каждой из топ-5 стран)

Рисунок 1



Источник: Ember (2022). European Electricity Review 2022.

Испания и Германия, где за счет солнца и ветра производится около трети всей электроэнергии.³

Интеграция больших долей переменной генерации может быть вызовом для системных операторов. Тем не менее, страны с высокой долей переменной генерации неплохо с этим справляются, а надежность электроснабжения в них остается очень высокой. Например, индекс средней продолжительности перерывов в работе системы (SAIDI) показывает, что энергосистема Германии является стабильной (рис. 2), несмотря на растущую долю переменных ВИЭ и снижение уровня базовой нагрузки.⁴ Эти данные свидетельствуют о том, что высокая надежность сети и интеграция растущей доли возобновляемых источников энергии не обязательно должны быть взаимоисключающими.⁵

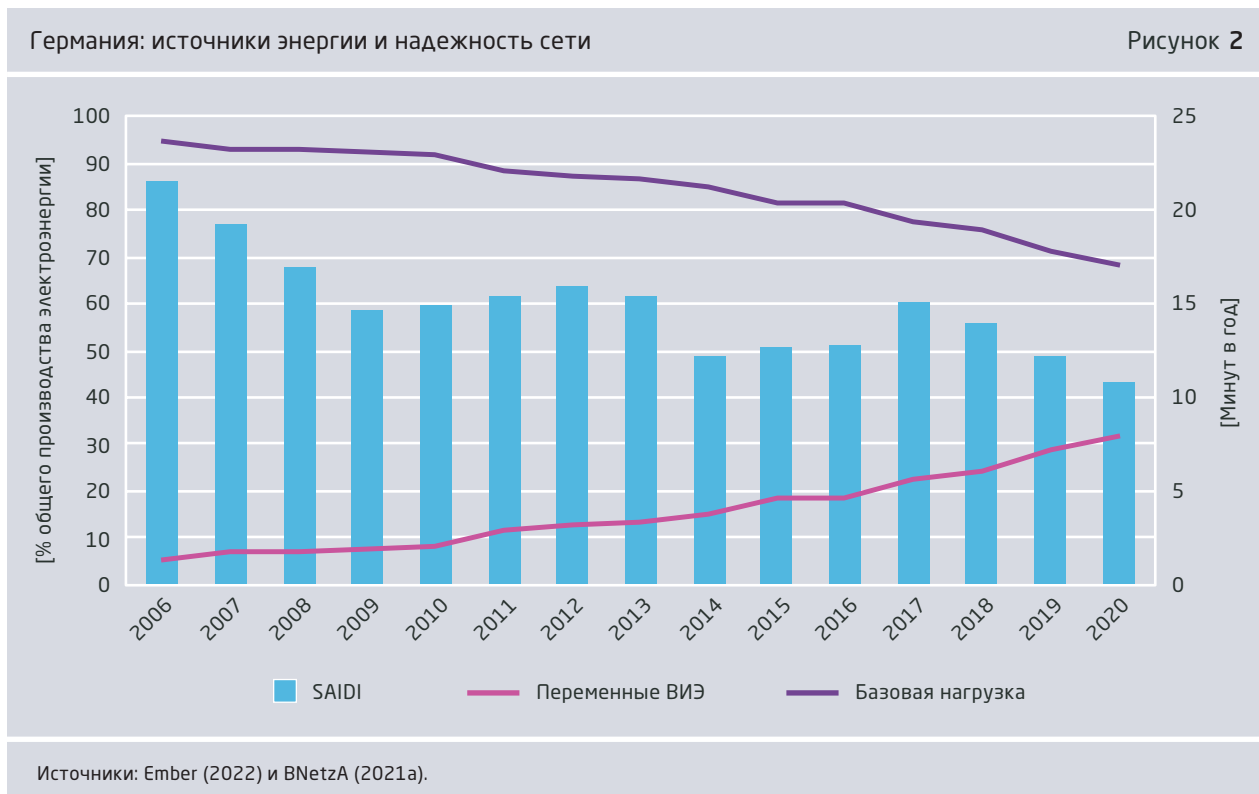
В этой работе мы проводим обзор некоторых уроков, извлеченных из интеграции переменных ВИЭ в энергосистемы стран, в которых высока доля переменной генерации. Примерами таких стран являются Германия и Дания. Мы представляем текущую практику в контексте нормативно-правовой базы этих стран, а также изменения, принятые для решения проблем, с которыми столкнулись сетевые операторы этих стран. В разделе 1 описываются будущие тенденции и проблемы в энергосистемах с растущим уровнем переменной генерации. Раздел 2 посвящен строительству новых линий электропередачи и трансформаторных подстанций. Раздел 3 сосредоточен на эксплуатации электроэнергетической системы и системных услугах.

3 См. Ember (2022).

4 См. Hogan et al. (2018).

5 Единого индикатора для измерения надежности системы

(и качества электроэнергии) не существует. Хотя показатель SAIDI отражает только перебои с подачей электроэнергии, мы считаем, что он дает хорошее представление об общем качестве системы.



1. Солнце, ветер и сеть: тренды и вызовы

Как и дорожную инфраструктуру, электрические сети можно разделить на магистральные линии электропередачи высокой пропускной способности («дороги федерального значения») и региональные и местные распределительные линии («дороги муниципального и местного значения»). Основной задачей **магистральных электросетей** является передача электроэнергии на большие расстояния из районов с высоким уровнем выработки электроэнергии в города и промышленные центры, которым необходима электроэнергия. Обмен электроэнергией также осуществляется через национальные границы с помощью интерконнекторов.

Распределительная сеть передает электроэнергию отдельным потребителям, которые подключены на более низком уровне напряжения. Традиционно электроэнергия производилась на тепловых электростанциях, работающих на буром или каменном угле или природном газе, а также на атомных электростанциях и на

гидроэлектростанциях. Как правило, эти крупные генерирующие установки располагаются вблизи больших центров нагрузки и подключаются к магистральной сети. Электроэнергия транспортируется «сверху вниз» от магистральных сетей к более низким уровням напряжения в распределительной сети, а затем, в конечном итоге, к частным потребителям. Большая часть электроэнергии от переменных ВИЭ, наоборот, сначала поступает в распределительные сети. В основном, материковые ветровые турбины подключены к линиям среднего или высокого напряжения.⁶ Многие солнечные фотоэлектрические установки, особенно расположенные на крышах, поставляют свою электроэнергию в сеть низкого напряжения, расположенную в непосредственной географической близости

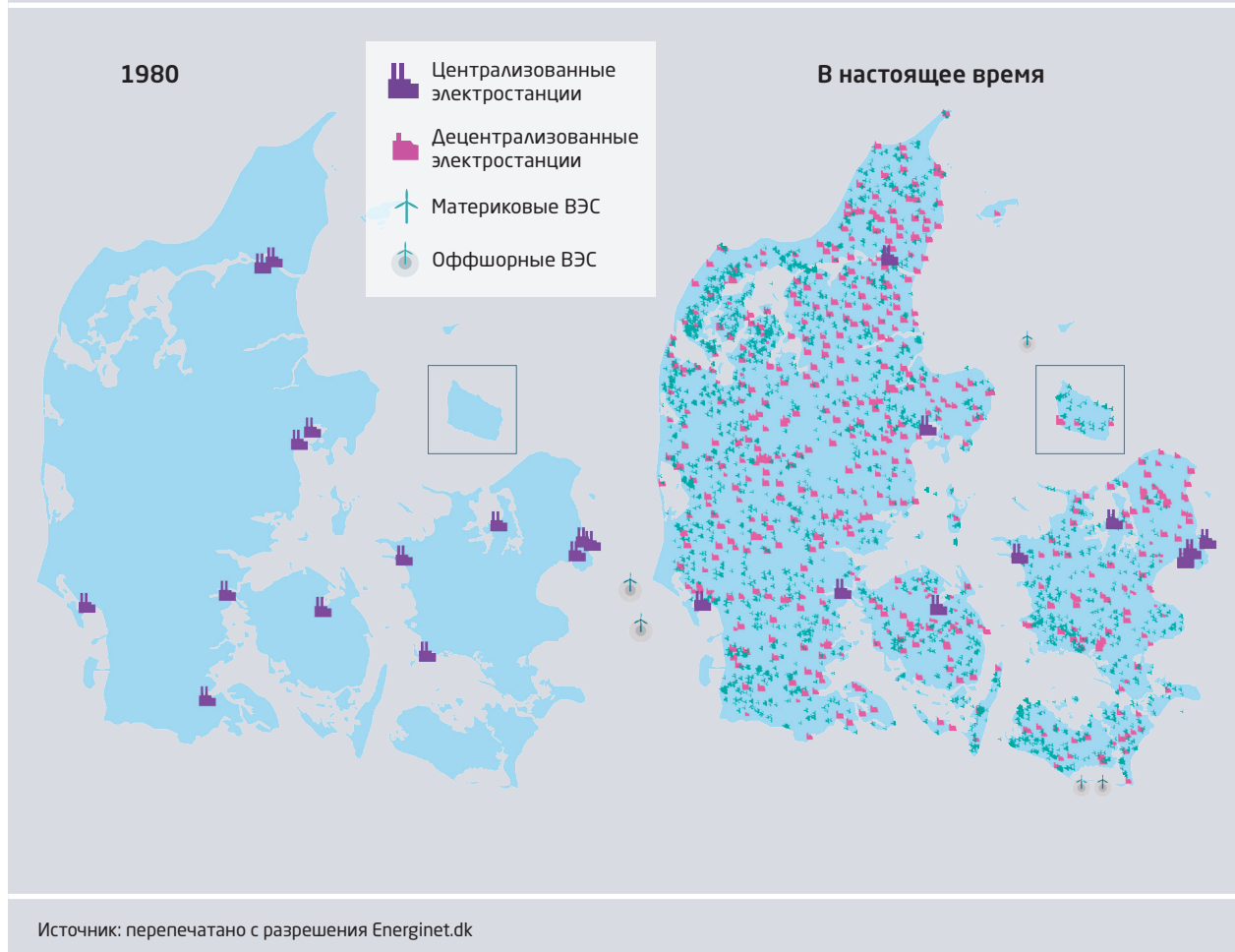
⁶ В некоторых странах, например в Германии, высоковольтные линии (110 кВ) являются частью распределительной сети; в других странах уровень 110 кВ относится к магистральной сети.

Ключевые выводы:

- По мере роста доли переменной генерации в распределительную сеть поступает все больше электроэнергии. Это особенно характерно для переменной генерации с помощью солнечных фотоэлектрических установок на крышах зданий и материковых ветропарков.
- Будущее электросети зависит от пространственного распределения новой генерации и спроса.
- Изменчивость поставок возобновляемой электроэнергии усложняет работу энергосистемы и требует большей гибкости.
- Будущая энергетическая система должна обеспечивать большую координацию спроса и предложения в условиях растущего числа источников энергии, агрегаторов и устройств со стороны спроса на электроэнергию.
- Требуется больше системных услуг ввиду сокращения числа поставщиков традиционных системных услуг.

Производство электроэнергии в Дании в 1980 году и сегодня: от централизованной к распределенной генерации

Рисунок 3

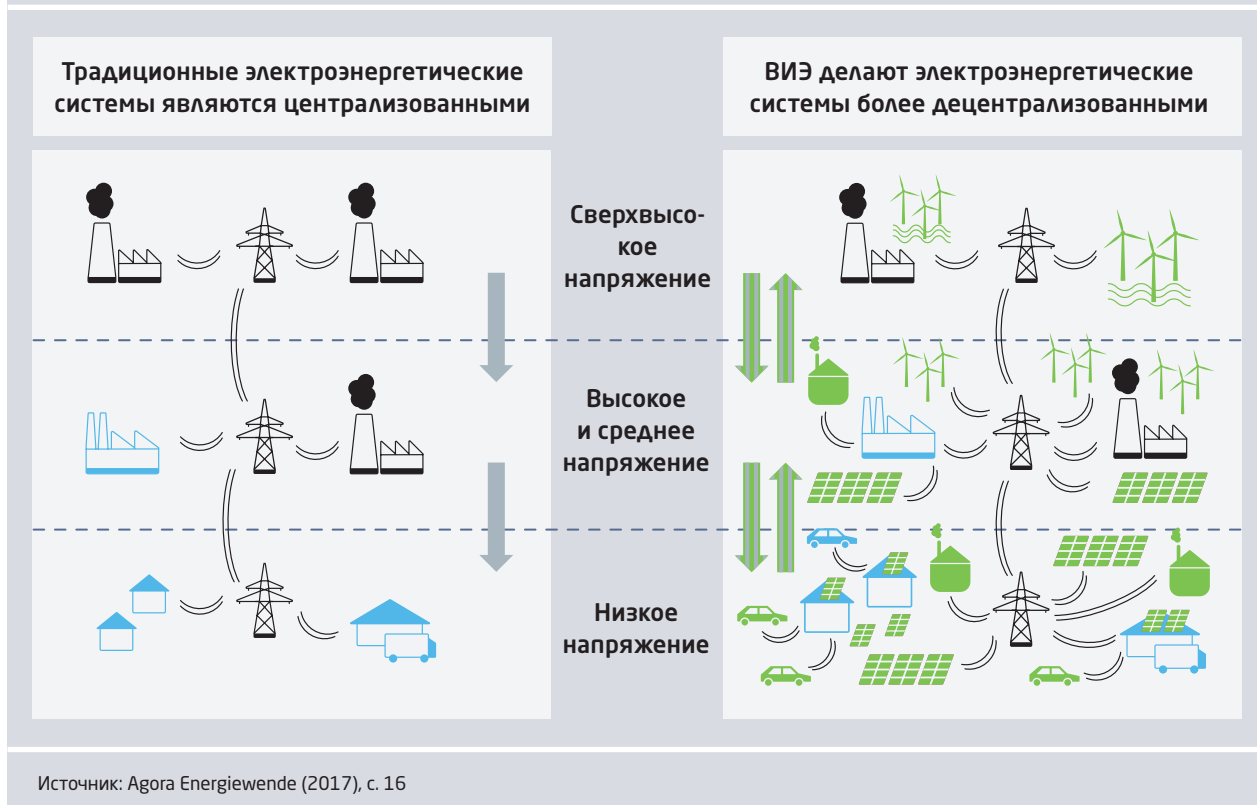


сти к потребителям. Однако существуют также объекты переменной генерации, такие как оффшорные ветровые электростанции, которые – из-за их большой мощности – вынуждены подключаться к сети сверхвысокого напряжения. Некоторые крупные материковые ветровые электростанции и солнечные фотоэлектрические установки также подключаются напрямую к магистральной сети. На рисунке 3 проиллюстрирован переход в Дании от централизованной системы, основанной на традиционной тепловой генерации, к распределенной системе, состоящей из децентрализованных теплоэлектроцентралей и ветропарков.

Когда больше электроэнергии поступает в распределительную сеть, **меняется роль распределительной сети**. Она больше не используется исключительно для передачи электроэнергии сверху вниз от крупных электростанций к потребителям. Скорее, если электроэнергия от распределенной генерации не потребляется локально, она поступает снизу вверх на более высокие уровни напряжения, где она направляется в другие регионы. Это приводит к возникновению **двунаправленных потоков энергии** — от сети передачи к сети распределения и наоборот — это является сильным отличием от однонаправленного потока сверху вниз в

Переход от традиционной однонаправленной системы передачи электроэнергии к более децентрализованной двунаправленной системе

Рисунок 4



Источник: Agora Energiewende (2017), с. 16

традиционных энергосистемах. Другими словами, изменения в структуре генерации могут сильно повлиять на планирование и работу сети (рис. 4).

Рассмотрим другой пример. На протяжении десятилетий кривая спроса на электроэнергию следовала одним и тем же предсказуемым недельным и сезонным графикам потребления. Однако это больше не соответствует действительности. **Новые и непредсказуемые кривые спроса** создают новые проблемы для сетевых операторов и проектировщиков. Другим фактором, сильно влияющим на схему и работу системы снабжения электроэнергией, является более широкое использование тепловых насосов, электромобилей и новых бизнес-моделей управления спросом.

В целом, мы определили четыре основные тенденции развития энергетических систем и связанные с ними вызовы:

Тенденция 1: Энергосистема будущего должна адаптироваться к территориальному распределению новой генерации и спроса.

В основном, ветровые турбины и солнечные фотоэлектрические установки расположены в районах с хорошими условиями с точки зрения скорости ветра и инсоляции. Если новая переменная генерация будет сосредоточена в районах с низким локальным спросом на электроэнергию, сеть придется расширять, чтобы можно было распределять энергию в другие регионы. Это особенно актуально, если новые станции с переменной генерацией располо-

жены в районах со слабой сетью, при этом имеющаяся сеть уже перегружена. В то же время изменения со стороны спроса могут существенно повлиять на планирование и работу системы. Эти изменения могут включать в себя реализацию мер по повышению эффективности для снижения и/или обеспечения более гибкого энергопотребления, например, переход на энергоэффективные приборы, двигатели, системы освещения и охлаждения. Но они также могут включать в себя новые типы спроса на электроэнергию, например, электромобили, тепловые насосы, электрические котлы и установки для производства топлива (например, метана или водорода). Пространственное распределение генерации и спроса является важным фактором при определении необходимости расширения линий и планировании развития будущей энергосистемы. Расширение сети может оказаться довольно длительным процессом – оно может занять больше времени, чем строительство ветровых или солнечных электростанций.

Тенденция 2: Спрос и предложение могут быстро меняться.

Колебания скорости ветра и солнечной радиации могут вызвать резкие изменения в объеме выработки электроэнергии. Электричество как товар существует в реальном времени и требует мгновенного баланса спроса и предложения. Существует два типа ситуаций, в которых может возникнуть дисбаланс: когда производство электроэнергии превышает спрос (это может быть вызвано, например, высокой скоростью ветра и/или ярким солнечным светом)⁷ и когда выработка переменных ВИЭ очень мала или отсутствует. Хотя прогнозирование в

последнее время улучшилось, объем переменной генерации может меняться довольно быстро, что вынуждает сетевых операторов при необходимости принимать краткосрочные балансирующие меры. Аналогичный эффект возникает, когда увеличивается изменчивость спроса. Например, электромобили и тепловые насосы могут способствовать балансировке системы, если они потребляют электроэнергию в часы избыточной выработки. Однако они также могут привести к быстрому нарастанию дисбалансов и создать новые пики спроса, если они будут активированы одновременно (например, массовая зарядка многих электромобилей по сравнению с «умным» подходом к зарядке, который снимает системные ограничения). Задача состоит в том, чтобы справляться с существенными изменениями как в предложении, так и в спросе, сохраняя при этом системный баланс.

Тенденция 3: Количество источников электроэнергии со стороны предложения и количество электрических приборов со стороны спроса увеличивается.

Высокий уровень проникновения возобновляемых источников энергии обычно увеличивает количество источников генерации на стороне предложения. Это связано с тем, что установки ВИЭ в основном состоят из небольших и модульных блоков, в отличие от систем, в которых участвуют всего несколько крупных производителей тепловой энергии. Со стороны спроса на рынок поступает все больше и больше таких электрических устройств, как автомобили на аккумуляторах и тепловые насосы. В некоторых странах, например, в Норвегии, изменения происходят достаточно быстро. В начале 2022 года в Норвегии было зарегистрировано 470 000 электромобилей,⁸ почти в 5 раз больше, чем в начале 2017 года.⁹ В дополнение к этому наблюдается рост

⁷ Следует обратить внимание на то, что это зависит не только от объема производства ветровой электроэнергии, но также и от гибкости энергетической системы (например, гибкость обычных электростанций, гибкий спрос, хранение), помогающей приспособиться к внезапному увеличению производства энергии.

⁸ См. Norsk elbilforening (2022).

⁹ См. SBB (2018).

числа просьюмеров, которые могут как производить, так и потреблять электроэнергию. Просьюмеры обычно устанавливают и солнечные фотоэлектрические панели, и накопители энергии – данная опция является особенно привлекательной в связи со значительным падением цен на эти виды оборудования в последнее время. Увеличение числа источников электроэнергии со стороны предложения и числа электрических устройств со стороны спроса влияет на сеть в режиме реального времени. Их воздействие зависит как от того, где они производят или потребляют электроэнергию, так и от того, когда они это делают. Координация всех этих устройств, а также управление сетью представляет собой непростую задачу. Цифровизация и распространение информационных и коммуникационных технологий (ИКТ) становятся все более важными для получения данных в режиме реального времени и для обеспечения связи между источниками энергии и электрическими устройствами.

Тенденция 4: Требуется все больше системных услуг из-за сокращения числа поставщиков традиционных системных услуг.

Сетевые операторы несут ответственность за обеспечение доступности вспомогательных (системных) услуг. Эти услуги включают в себя управление частотой, поддержание вращающихся резервов мощности, поддержание напряжения, компенсацию потерь в сетях, а также возможность запуска из обесточенного состояния и возможность работы в автономном режиме. По сути системные услуги необходимы для поддержания стабильной и надежной работы сети в любое время. Традиционно тепловые электростанции предоставляют системные услуги наряду с производством электроэнергии. В настоящее время необходимо искать баланс между обеспечением доступности системных услуг для обеспечения надежной работы системы и развитием новых способов их получения.

2. Возможности сети для повышения гибкости: набор инструментов для планирования и расширения сети

Сеть электропередачи является важным источником гибкости для обеспечения балансировки системы между регионами и сглаживания колебаний в поставках электроэнергии от ветровых и солнечных электростанций. Одна из основных трудностей заключается в прогнозировании длины и расположения будущих линий электропередачи, а также в прогнозировании того, какие технологические инновации обеспечат альтернативы классическому расширению сети.

2.1. Принцип GORE – сначала оптимизация, потом усиление, потом расширение сети

Принцип GORE представляет собой подход к планированию сети, который отдает приоритет оптимизации уже существующей сетевой инфраструктуры перед строительством новых линий электропередачи. GORE расшифровывается как «сначала оптимизация, потом усиление, потом расширение сети» (Grid Optimization before Reinforcement before

Ключевые выводы:

- Ключевые выводы:
- Сеть электропередачи играет важнейшую роль в балансировке предложения и спроса между регионами.
- Одним из подходов к планированию сети, который укрепляет общественную поддержку и минимизирует издержки, является принцип GORE - сначала оптимизация, потом усиление, потом расширение сети.
- Среди легкодоступных результатов – систематическое внедрение технологий оценки параметров линии электропередачи в динамическом режиме и замена существующих линий электропередачи специальными линиями, которые могут передавать ток более высокого напряжения.
- Согласование планирования сети и планирования строительства объектов переменной генерации может улучшить координацию расширения сети и строительства ВИЭ-электростанций.
- Частичное подземное размещение линий электропередачи в уязвимых регионах и консультации с местными заинтересованными сторонами могут помочь обеспечить общественную поддержку.
- Рекомендуется создание реестра всех новых электростанций, включая новые установки с переменной генерацией, на ранних этапах.

Expansion), и данный принцип предполагает, что сначала необходимо предпринять меры по оптимизации мощности существующих линий электропередачи (см. ниже). Затем допускается усиление существующих линий электропередачи, например, за счет использования специальных линейных проводников, способных передавать ток более высокого напряжения. И только когда все эти варианты исчерпаны, можно перейти к строительству новых линий электропередачи. Такой подход минимизирует затраты и снижает негативное воздействие на граждан и окружающую среду. Германия является одной из стран, уже применяющих принцип GORE.¹⁰

2.1.1. Оптимизация означает безопасное использование существующей сети на полную мощность в любой момент времени

Для стабильной работы электрических сетей очень важно, чтобы линии электропередачи, трансформаторы и другие виды оборудования не перегревались. Чем больше электроэнергии передается по линии электропередачи или трансформатору, тем выше становится рабочая температура проводника. Если рабочая температура воздушной линии электропередачи превышает ее предельное значение, материал расширяется, и линия провисает ниже допустимого уровня (рис. 5). Это может создать чрезмерную механическую нагрузку на опоры ЛЭП и подвергнуть окружающую среду воздействию сильных электрических и магнитных полей.¹¹

¹⁰ На немецком языке система называется «NOVA» («Netz Optimierung vor Verstärkung vor Ausbau»).

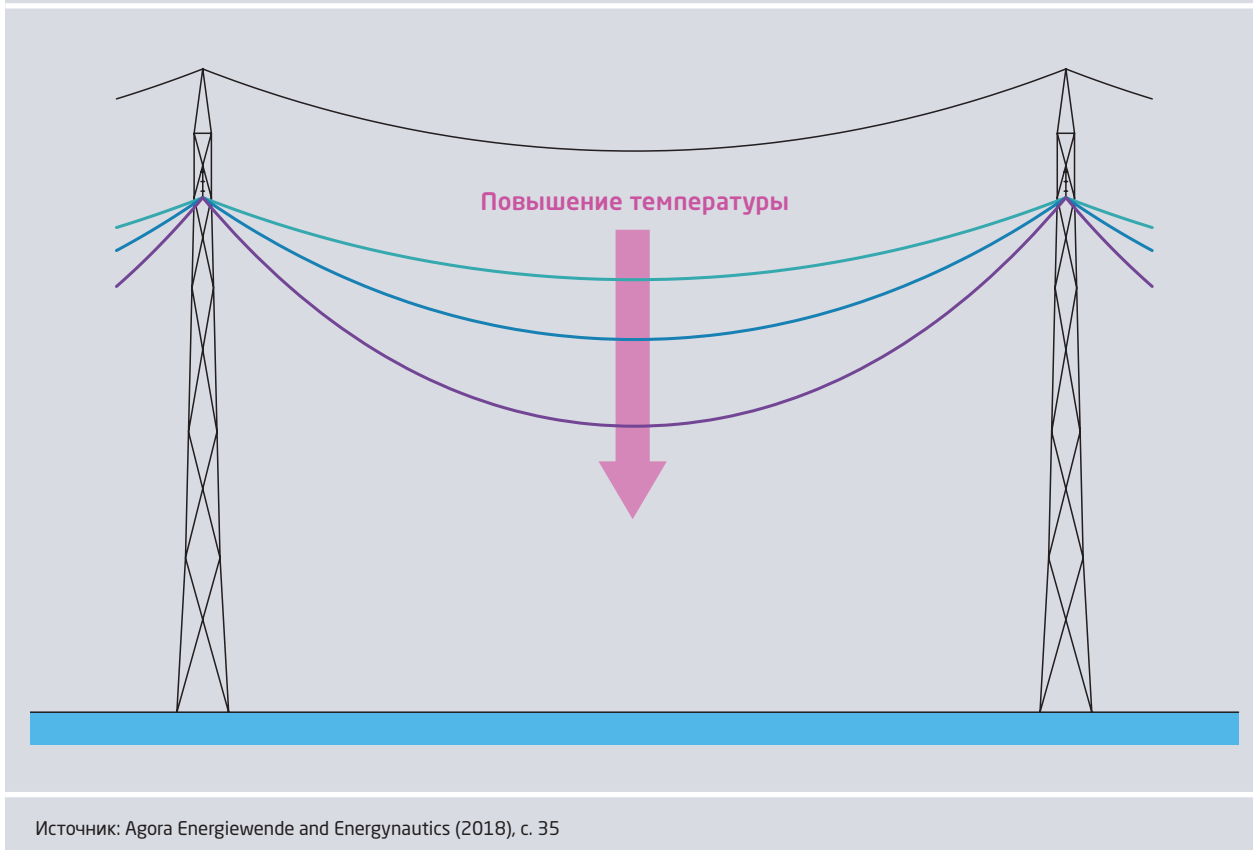
¹¹ Стрела провеса линии электропередачи — это расстояние между одной из двух точек крепления линии к опорам и самой нижней точкой линии электропередачи. Если линия провисает, расстояние от нее до земли уменьшается. Другие факторы, такие как натяжение линии, также могут играть роль в дополнении к провисанию линии электропередачи.

На рабочую температуру линий электропередачи влияют различные факторы, такие как потери электроэнергии, скорость и направление ветра, инсоляция и свойства материала проводника. Традиционно номинальная мощность линии определяется статически, исходя из «наихудшего сценария», но при этом часто недооценивается фактическая пропускная способность линии электропередачи. *Динамическая оценка* позволяет безопасно использовать пропускную способность существующих линий электропередачи за счет учета реальных условий, в которых они работают. В отличие от статической оценки, в которой для расчета используются детерминированные или вероятностные методы, динамическая оценка линии учитывает фактические атмосферные условия. Поскольку динамическая оценка мощности линии также учитывает условия охлаждения, она позволяет передавать более существенный объем «динамического» тока, чем статическая оценка. В этом отношении энергия ветра и температура окружающей среды являются «идеальными партнерами»: чем сильнее дует ветер, тем ниже становится температура окружающей среды вокруг линий электропередач и тем больше электроэнергии может быть транспортировано в периоды высокой выработки ветроэлектростанций. Динамическая оценка требует непрерывного измерения температуры воздушных линий электропередачи. Это реализуется за счет установки таких технических устройств, как датчики и инфракрасные тепловизионные камеры. Собранные данные передаются операторам сети.

Фазосдвигающие трансформаторы и другие устройства управления потоком электроэнергии также могут помочь оптимизировать использование сети. Поскольку управление потоком электроэнергии является частью работы сети, эти технологии рассматриваются в разделе 3.1.3.

Провисание линии электропередачи при повышении рабочей температуры

Рисунок 5



Источник: Agora Energiewende and Energynautics (2018), с. 35

2.1.2. Усиление сети означает модернизацию существующих линий электропередачи без строительства новых

Под *усилением сети* понимается модернизация существующих линий электропередачи в магистральных и распределительных сетях. Одной из мер по усилению сети является замена «традиционных» воздушных линий электропередачи высокотемпературными проводниками с малым провисанием (high-temperature low-sag, HTLS). По сравнению с алюминиевым проводником, армированным сталью (aluminium-core steel-reinforced, ACSR), обычно используемым в воздушных линиях электропередачи, HTLS-проводники способны работать при более высоких рабочих температурах, хотя их диаметр является таким же, как у обычных кабелей ACSR. Это означает, что

проводники HTLS допускают больший ток в той же линии электропередачи. Другие меры по усилению сети включают в себя модернизацию сети до более высокого уровня напряжения и добавление второй цепи к уже существующим линиям электропередачи. В идеальных условиях усиление сети с помощью HTLS-проводников может увеличить пропускную способность на 50–100% по сравнению с обычными воздушными линиями электропередачи. Фактическое увеличение пропускной способности за счет внедрения HTLS-проводников зависит от используемых материалов.¹²

¹² Сравнительный анализ различных проводников HTLS содержится в Kenge et al. (2016).

С помощью специальных фазосдвигающих трансформаторов потоки электроэнергии могут быть перенаправлены с сильно загруженных линий на менее загруженные



2.1.3. Универсального решения не существует, но оптимальный выбор должен учитывать неоднородность сети

Меры по оптимизации и усилению сети могут значительно увеличить пропускную способность. В свете обычной неопределенности будущих изменений системные операторы заинтересованы в определении надежных мер по развитию сети, которые не приводят к инвестициям в убыточные активы. В этом отношении оптимизация сети и ее усиление могут рассматриваться как «беспроблемные» меры, если они осуществимы. Данные меры не делают расширение сети излишним, но они могут сэкономить много километров новых линий. Задача состоит в том, чтобы найти оптимальное сочетание оптимизации сети, усиления и расширения. Оптимальное сочетание является индивидуальным, так как структура сети может быть очень неоднородной. Принцип GORE отдает приоритет легким решениям в виде оптимизации и усиления сети, перед строительством новых линий электропередачи.

2.2. Процесс планирования сетей

Планирование сетей требует прогнозирования. Реализация новых проектов линий электропередачи часто является длительной. Она включает в себя не только строительство новых линий электропередачи и вышек, но и получение разрешений и проведения оценки воздействия на окружающую среду. Главный вопрос, с которым сталкиваются проектировщики сетей, заключается в том, сколько километров новых линий электропередачи требуется и где. Этот вопрос особенно важен в свете поразительных темпов роста доли возобновляемых источников энергии. Одна из проблем при планировании сетей заключается в достижении баланса между заблаговременным прогнозированием развития и сохранением определенной степени гибкости. В этом разделе представлены различные подходы и инструменты сетевого планирования.

ИНФОРМАЦИОННЫЙ БЛОК – Требования к сети, предусмотренные законодательством Германии: приоритетный доступ, ограниченная плата за подключение и увеличение пропускной способности сети

- В Германии производители электроэнергии за счет ВИЭ получают немедленный приоритетный доступ к сети и несут расходы лишь за строительство линии от своей генерирующей установки до точки подключения после выхода за пределы электростанции (известные как ограниченная плата за подключение). Это в значительной степени способствовало стабильному развитию возобновляемых источников энергии в энергосистеме Германии.

Ключевой вывод: приоритетный доступ ВИЭ к сети играет важнейшую роль; также важную роль играют усиление сети и оптимизация на более высоких уровнях напряжения

- *Приоритетное подключение к сети.* Также известное как приоритетный доступ, приоритетное подключение к сети требует от операторов сети подключения новых установок ВИЭ к сети на подходящем уровне напряжения и на кратчайшем линейном расстоянии (если отсутствует более технически и экономически подходящая точка подключения). Примечательно, что генераторы ВИЭ могут выбрать другую точку подключения к сети при условии, что это не повлечет значительных дополнительных затрат для оператора сети.
- *Обязательная оптимизация сети, ее усиление и расширение для ВИЭ-электростанций.* Большинство сетевых операторов, которые подключают электростанции на ВИЭ к сети, также являются операторами системы распределения электроэнергии. Они обязаны оптимизировать, проводить усиление и расширять свою сеть от низковольтного до высоковольтного (110 кВ) уровней каждый раз, когда это необходимо для транспортировки возобновляемой электроэнергии в районы спроса.
- *Схема распределения затрат: ограниченная плата за подключение.* Оператор сети несет расходы по оптимизации, усилению и расширению сети. Производитель возобновляемой электроэнергии несет расходы только на строительство прямой линии от станции до точки подключения к сети и за приборы учета, установленные на этом маршруте. Точку подключения к сети можно считать «разделительной линией» в плане распределения затрат (рис. 6). Также для ВИЭ-электростанций, подключенных на среднем напряжении, актуально усиление сети до 110 кВ. Опыт показал, что заблаговременное прогнозирование воздействия новых объектов генерации ВИЭ на уровни напряжения выше уровня подключения приводит к более последовательному планированию сети.
- *Приоритетная диспетчеризация.* Сетевые операторы обязаны уделять первоочередное внимание покупке и транспортировке возобновляемой электроэнергии. Ограничение выработки ВИЭ-электростанций является крайней мерой. (Подробнее см. в разделе 3.)



2.2.1. Подход «расширение сети следует за генерацией и спросом»

Обычный подход к сетевому планированию состоит из двух последовательных шагов. Во-первых, планировщики разрабатывают *сценарии*, описывающие, где и какая нагрузка и новая генерация будут расположены в определенном целевом году (например, в 2030 г.). Эти предположения служат входными параметрами. Во-вторых, планировщики выполняют *симуляцию сети* на основе входных параметров из сценариев. Во многих случаях планировщики также строят модель диспетчеризации рынка электроэнергии, чтобы имитировать диспетчеризацию традиционной электроэнергии и электроэнергии от ВИЭ. Затем результаты модели диспетчеризации рынка электроэнергии используются в качестве входных параметров для моделирования сети. Любые перегрузки, возникающие при моделировании сети, указывают на потребность в новых линиях электропередачи.

В основе этого подхода лежит предположение о том, что *расширение сети должно следовать за генерацией и спросом*. Одной из стран, которая использует данный подход, является Германия. В Германии четыре оператора системы электропередачи следуют описанному ниже процессу.¹³

Этап 1 – Определение сценариев. До того, как планировщики оценят необходимость дальнейшего расширения сети, необходимо получить ответы на следующие вопросы. Сколько генерирующих мощностей и какого типа будет существовать в определенный момент времени (например, в 2030 году)? Где они будут расположены? Насколько высоким будет спрос на электроэнергию? Где будут находиться пункты потребления? Какие еще факторы будут влиять

¹³ Магистральной сетью электропередачи в Германии управляют четыре оператора: 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH и TransnetBW GmbH.

на сеть? Чтобы ответить на эти вопросы, операторы немецкой системы передачи электроэнергии раз в два года разрабатывают сценарии. Обычно разрабатывается как минимум четыре сценария, три из которых рассчитаны на следующие 10 или 15 лет, а оставшийся четвертый – на следующие 15 или 20 лет. Сценарии получают одобрение регулирующего органа Германии, Федерального сетевого агентства (*Bundesnetzagentur, BNetzA*).

Этап 2 – План развития сети. Используя входные параметры из сценариев, планировщики выполняют моделирование рынка на основе модели диспетчеризации рынка электроэнергии. В ходе последующего моделирования сети калибруются меры по оптимизации сети, ее усилению и расширению, необходимые в следующем десятилетии. Предполагаемое расширение линий электропередачи вносится в план развития сети в соответствии с принципом GORE (см. выше). План развития сети включает в себя все необходимые меры и график их реализации. Прежде чем план развития сети получит одобрение регулирующего органа, он должен пройти оценку воздействия на окружающую среду.

Этап 3 – Федеральный план требований. Каждые четыре года Федеральное сетевое агентство представляет план развития сети федеральному правительству. План развития сети служит основой для федерального плана требований, который включает в себя высокоприоритетные проекты расширения сети и определяет их начальные и конечные точки. Как только парламент Германии принимает федеральный план требований, он становится юридически обязательным (рис. 7).

Реализация планов расширения сети оказалась сложной во многих странах, где происходили значительные задержки из-за сопротивления местного населения строительству линий высо-

кого напряжения или из-за длительных процедур планирования и получения разрешений. Задержки в расширении сети могут затруднить ее работу в периоды высокой нагрузки. Поэтому Германия стала уделять существенное внимание разработке решений для согласования планирования сети и строительства объектов ВИЭ в регионах, где сети электропередачи перегружены. Это привело к внедрению следующих инновационных решений.

Трехпроцентный подход: сглаживание пиков при планировании сети

Первоначально план развития сети Германии требовал, чтобы сетевые операторы принимали весь объем произведенной возобновляемой электроэнергии. Конфигурация сети рассчитывалась таким образом, чтобы было возможно принять переменную выработку ВИЭ в любое время, даже в часы с исключительно высокой выработкой ВЭС и СЭС и очень низкой нагрузкой. Однако данное базовое требование является экономически неэффективным, потому что экстремальные условия возникают всего несколько часов в году. Идея трехпроцентного подхода состоит в том, чтобы найти баланс между расширением сети и экономической эффективностью. При таком подходе операторы сетей электропередачи отказываются от возобновляемой электроэнергии во время пиковой выработки в размере до 3% от годовой прогнозируемой выработки. Это устраняет необходимость строительства новых линий для покрытия очень ограниченного количества часов в течение года и приводит к значительному снижению затрат на расширение сети.

Размещение новых объектов переменной генерации с учетом развития сети

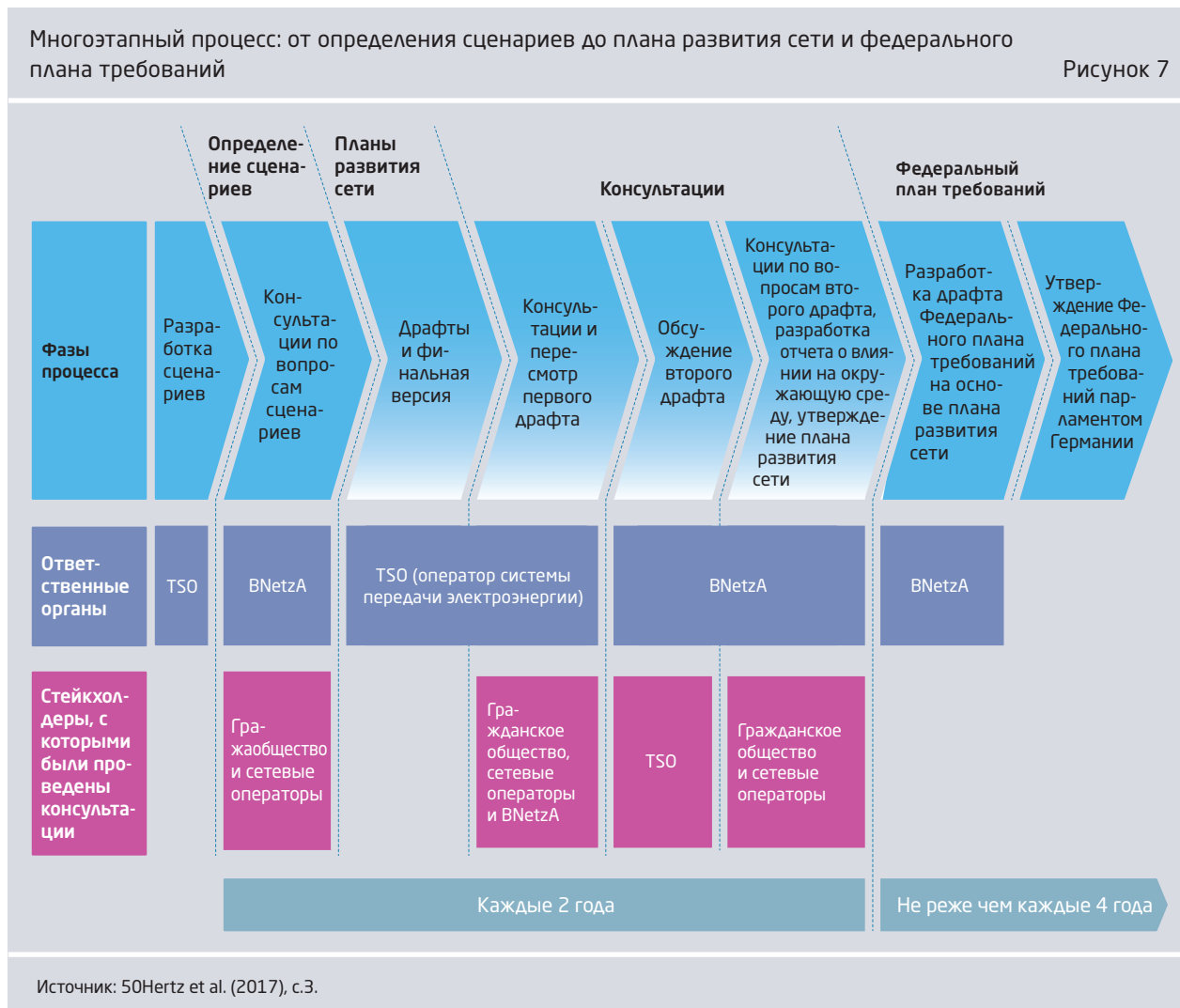
Регионы с очень высокой долей переменных ВИЭ могут создать значительную нагрузку на сеть электропередачи, если новые линии не

будут построены достаточно быстро. Возникающая в результате перегрузка требует увеличения объема перераспределения (включение и выключение обычных электростанций для устранения узких мест в сети) и сокращения объема переменной генерации. В последние годы подобные ситуации происходили в Северной Германии, где более 70% электроэнергии производится за счет энергии ветра. В результате правительство решило ограничить установку новых материковых ветровых турбин в районах, где сеть электропередачи уже перегружена (известных как регионы

расширения сети), до тех пор, пока мощность сети не будет увеличена.

2.2.2. Подход «заблаговременное планирование сетей в зонах ВИЭ»

Как отмечалось выше, несоответствие между относительно короткими периодами строительства ветровых и солнечных электростанций и относительно длительными периодами строительства линий электропередачи представляет собой проблему для традиционного планирования сети электропередачи. Соответственно, подход «расширение сети следует за генера-



цией и спросом» может не суметь достаточно быстро удовлетворить растущие потребности в электропередаче при быстром развитии переменных ВИЭ. Ветровые и солнечные электростанции расположены в ветреных и солнечных районах, которые иногда находятся далеко от центров высокой нагрузки. Даже крупные проекты переменной генерации могут быть построены в течение 1-3 лет. Это значительно быстрее, чем строительство обычных электростанций. Это также быстрее, чем планирование и строительство новых магистральных линий электропередачи для подключения удаленных районов с высоким объемом производства ветровой или солнечной электроэнергии к центрам с высокой нагрузкой – данный процесс обычно занимает от 5 до 10 лет, а иногда и дольше. В идеале решения по планированию электропередачи должны приниматься задолго до принятия решений по развитию возобновляемой генерации. На практике, однако, это редко осуществимо из-за

сложности прогнозирования того, где будут построены новые мощности ВИЭ. В результате зачастую возникает временной лаг между строительством новых электростанций на ВИЭ и расширением сети.

Одним из эффективных решений этой проблемы является заблаговременное планирование магистральных линий электропередачи в зоне возобновляемых источников энергии, разработанное в американском штате Техас.¹⁴ Данное решение направлено на поощрение инвестиций в переменные ВИЭ в так называемых районах с лучшими ресурсами, то есть в районах, идеально подходящих для производства возобновляемой электроэнергии, при одновременном обеспечении своевременного строительства инфраструктуры электропередачи.

¹⁴ Подробнее см. в N. Lee. et al. (2017).



Транспортировка машин и оборудования требует определенной инфраструктуры, такой как порты и дороги. Из-за большого размера некоторых компонентов, таких как лопасти ротора и сегменты башни, к проектам ВЭС предъявляются более высокие требования, чем к СЭС.

При реализации данного подхода в ходе планирования магистральных линий электропередачи проводится углубленная оценка солнечных и ветровых ресурсов страны или региона с целью определения зон возобновляемой энергии. Эти зоны являются «географическими областями, в которых возможно прибыльное и эффективное с точки зрения затрат развитие проектов ВИЭ, подключенных к сети. Зоны ВИЭ обладают высококачественными ресурсами ВИЭ, подходящей топографией и категорией земель, что привлекает интерес со стороны застройщиков, поддерживающих рентабельное развитие возобновляемых источников энергии. [Основываясь на назначении этих зон], процесс планирования магистральных линий электропередачи в них представляет собой планирование, утверждение и создание инфраструктуры электропередачи, которая соединит эти зоны с энергосистемой».¹⁵

Этапы разработки плана электропередачи представлены на рисунке 8.

Как и при традиционном планировании линий электропередачи, процессом управляет соответствующее министерство, регулирующий орган или оператор магистральной сети электропередачи. Однако даже в большей степени, чем при традиционном планировании, успех зависит от активного участия девелоперов, инвесторов, природоохранных органов, электроэнергетических предприятий и неправительственных организаций. В случае успешной реализации процесса создаются необходимые ресурсы электропередачи для ускоренного развития ветровой и солнечной энергии в наиболее благоприятных местах.

2.3. Укрепление общественной поддержки строительства новых линий электропередачи

Прозрачность и раннее вовлечение в дискуссию граждан, проживающих рядом с новыми запланированными магистральными линиями электропередачи, имеют решающее значение для получения общественной поддержки. Строительство новых линий электропередачи может оказать негативное влияние на местных жителей следующим образом: жители могут воспринимать новые линии как ущерб ландшафту, они могут ожидать снижения стоимости их собственности или опасаться отрицательного воздействия электрических и магнитных полей на свое здоровье или здоровье животных и растений. Важно серьезно относиться ко всем этим вопросам и решать их должным образом.

Существуют различные способы укрепления общественной поддержки. Одним из них является использование подземных кабелей вместо воздушных линий электропередачи в отдельных районах (частичное заглобление). В Дании обычно строятся воздушные линии электропередачи, но некоторые участки, особенно те, которые проходят вблизи природных заповедников или муниципалитетов, находятся под землей. В Германии было принято решение о подземном проектировании новых крупных линий постоянного тока высокого напряжения (HVDC), соединяющих север и юг страны. Преимущества очевидны: подземные линии менее заметны, чем классические воздушные линии, для них характерно более низкое электромагнитное излучение и меньшее негативное воздействие на птиц и летучих мышей. С другой стороны, подземные кабели стоят значительно дороже воздушных линий электропередачи (их точная стоимость зависит от различных факторов, таких как длина кабеля, состав почвы и технология электропередачи), и поэтому обычно они предназначены для особо уязвимых зон.

¹⁵ См. N. Lee et al. (2017), с. iii

ШАГ 1. ДИЗАЙН ПРОЦЕССА И ОБЩАЯ КОНЦЕПЦИЯ

ШАГ 2. ОЦЕНКА РЕСУРСОВ ВИЭ

Краткое содержание:
 Выбрать области с наивысшим потенциалом

Итог:
 Карты изученных областей и кривые предложения

- Оценить ресурсы
- Отсортировать области для исключения
- Определить области с наивысшим качеством ресурсов, пригодные для развития

ШАГ 3. ВЫБОР ЗОН

Краткое содержание:
 Определить наиболее прибыльные зоны для развития

Итог:
 Карты зон-кандидатов и кривые предложения (одна на каждую область)

- Оценить коммерческий интерес
- Определить области, где высокое качество ресурсов пересекается с коммерческим интересом

ШАГ 4. АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Краткое содержание:
 Сгруппировать зоны-кандидаты и провести анализ вариантов

Итог:
 Оценка издержек, выгод и надежности для каждой из альтернатив

- Выбрать методологию создания сценариев
- Провести анализ «затраты-выгоды» для разных опций
- Провести анализ стационарного состояния, динамической устойчивости, себестоимости и надежности

ШАГ 5. Определение финального плана передачи электроэнергии

Краткое содержание:
 Выбрать вариант передачи электроэнергии в соответствии с заданными критериями

Итог:
 Окончательный вариант

- Выбрать вариант, который в наилучшей степени отвечает определенным критериям, включая стандарты надежности, экономические выгоды и экологические цели

ШАГ 6. МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

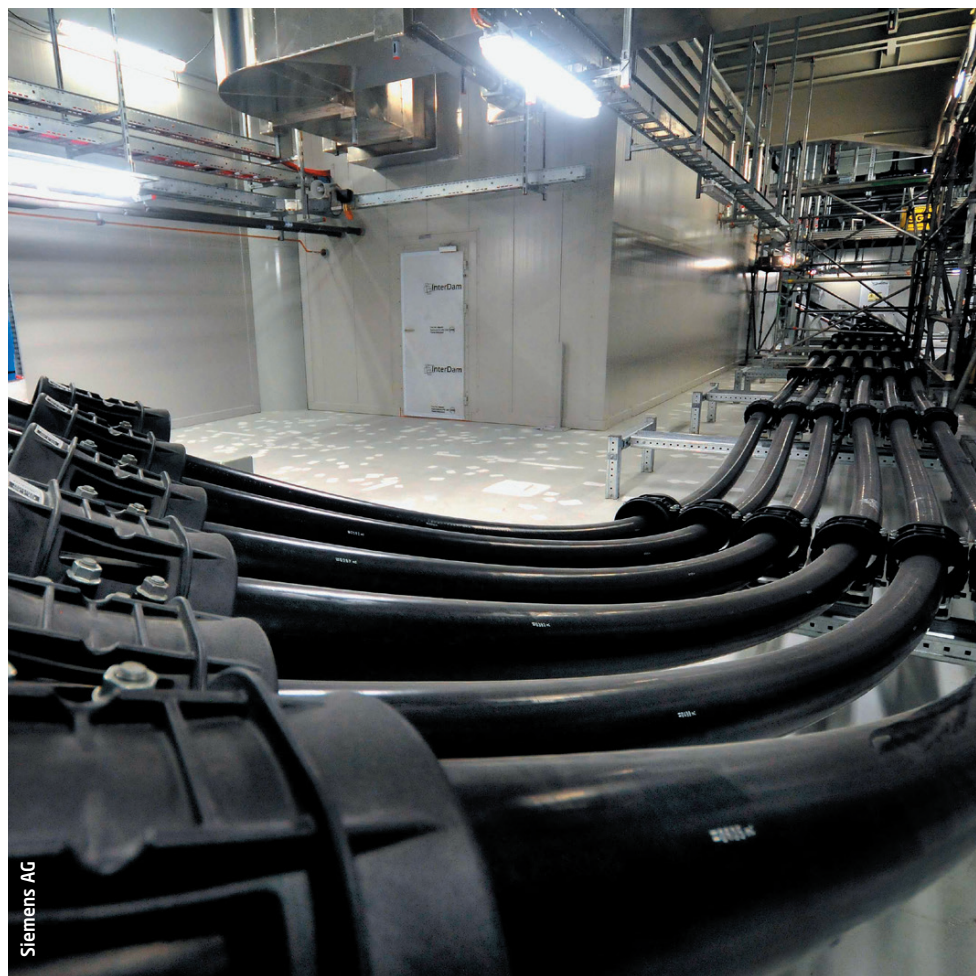
Источник: N. Lee et al. (2017).

Чтобы свести к минимуму негативное влияние линий электропередачи, Дания инициировала план «благоустройства» уже существующих воздушных линий электропередачи мощностью 400 кВ. Предпринятые меры включают в себя частичную замену воздушных линий подземными кабелями на коротких расстояниях или строительство опор ЛЭП, которые вписываются в ландшафт, а также прочие корректировки на коротких отрезках.¹⁶ Датский оператор системы электропередачи провел консультации с гражданами и заинтересованными организациями, которые высказали предпочтения по маршруту линии электропередачи и предложили участки для замены воздушных линий подземными кабелями.

¹⁶ См. Energinet.dk (2018).

Еще один способ укрепления общественной поддержки строительства новых линий заключается в вовлечении граждан в процесс планирования на раннем этапе. В Германии, например, важную роль играют консультации с общественностью и оценка воздействия. Регулирующий орган вместе с оператором системы электропередачи предоставляет информацию, запрашивает письменные отзывы граждан и других заинтересованных сторон и проводит различные мероприятия, на которых общественность может высказать свое мнение и опасения. Темы для обсуждения включают сценарии, план развития сети и определение маршрутов в коридорах, установленных планировщиками. Кроме того, на Интернет-сайте публикуются запланированные проекты электропередачи, а общественные бюро в муниципалитетах предоставляют информацию о местных проектах.

Подземные высоковольтные линии пользуются существенной поддержкой населения. Однако их строительство занимает больше времени, чем строительство обычных линий, и обходится дороже.





Элегантные опоры высоковольтных линий, которые вписываются в ландшафт, могут стать альтернативой подземным высоковольтным линиям.

3. Функционирование системы: набор инструментов для интеграции растущей доли возобновляемых источников энергии

Изменчивость объемов выработки солнечных и ветровых электростанций, обусловленная естественными причинами, ставит новые задачи перед операторами электросетей. Электричество — это товар в реальном времени. Чтобы

поддерживать частоту близкой к заданному значению (обычно 50 или 60 герц), спрос и предложение требуют мгновенной балансировки. Растущая доля переменных ВИЭ в производстве электроэнергии требует от операторов и

Ключевые идеи:

- Задержки в расширении сети могут привести к ее перегрузке и к возникновению «узких мест».
- Редиспетчеризация традиционных электростанций, ограничение выработки электроэнергии за счет ВИЭ и прочие подобные меры необходимы для обеспечения стабильной работы сети. Кроме того, требуются прозрачные критерии для ограничения выработки электроэнергии за счет переменных ВИЭ.
- Использование данных электростанций с переменной ВИЭ-генерацией в режиме реального времени и дистанционное управление выработкой помогают операторам сети безопасно управлять сетью.
- По мере сокращения традиционного производства электроэнергии предоставление системных услуг ВИЭ-электростанциями с переменной выработкой и использование новых технологий становится все более важным.
- В сетях низкого напряжения может происходить повышение напряжения, когда солнечные фотоэлектрические станции поставляют в сеть слишком много электроэнергии.
- Инновационные технологии, такие как регулируемые распределительные трансформаторы, позволяют принять в сеть больше возобновляемой электроэнергии и смягчить проблемы с напряжением.
- Уже на этапах планирования девелоперы должны учитывать влияние увеличения доли переменных ВИЭ на систему. В противном случае может потребоваться дорогостоящая модернизация существующих мощностей ВИЭ с переменной генерацией.

проектировщиков другого мышления. Традиционный акцент на базовой нагрузке с крупными генерирующими установками, работающими круглосуточно и без выходных, не обеспечивает достаточной гибкости для систем с большими долями ВИЭ. Чтобы компенсировать колебания объемов производства электроэнергии за счет ВИЭ, необходимы маневренные мощности и прочие инструменты маневрирования. Возможные варианты включают в себя диспетчеризуемые электростанции с возможностью быстрой выдачи мощности (например, газовые турбины), управление спросом, технологии хранения и, в более долгосрочной перспективе, интеграция электроэнергетического, теплоэнергетического и транспортного секторов. Публикация Agora Energiewende «Пара слов о маневренности» содержит более подробную информацию о стратегиях и технологиях для решения проблемы маневренности.¹⁷

Сети электропередачи могут обеспечить гибкость, уравновешивая переменную выработку в разных регионах. Балансировка спроса и предложения в системе является «глобальной» задачей, но перегрузка сети происходит на локальном уровне. Теоретически могут возникать ситуации, когда электроэнергии достаточно для удовлетворения спроса в определенном регионе или даже во всей стране, но сети не хватает мощности для передачи электроэнергии от генерирующих станций к центрам нагрузки. В следующем разделе рассматриваются меры по решению проблемы перегрузки сети. В последующих разделах будет рассмотрено еще одно необходимое условие надежной работы сети: закупка системных услуг, таких как регулирование частоты и напряжения. Традиционно системные услуги предоставляют обычные генераторы наряду с производством электроэнергии. Когда доля традиционной тепловой гене-

рации в системе сокращается, требуются новые способы предоставления этих услуг.

3.1. Работа системы в случае, когда гибкость является приоритетом

Перегрузка сети возникает тогда, когда пропускная способность для передачи электроэнергии от генерирующих станций к точкам потребления является недостаточной. Это происходит при поступлении в сеть слишком больших объемов электроэнергии, например, в часы высокой выработки ветровой электроэнергии, как это часто бывает в северной Германии. Однако перегрузки также могут возникать из-за задержек с расширением сети, наличия негибкой тепловой генерации или трансграничных потоков электроэнергии.

Проблема с перегрузкой заключается в том, что она ставит под угрозу безопасность системы. Это связано с тем, что каждая линия или трансформатор в системе имеет максимальную надежную пропускную способность по току в зависимости от их тепловых пределов. Если рабочая температура воздушной линии электропередачи превышает установленный предел, линия может провиснуть (раздел 2). Если активная и реактивная мощность, проходящая через линию передачи или трансформатор, слишком долго превышает соответствующий предел, произойдет необратимое повреждение. Наряду с тепловыми пределами сетевые операторы также должны соблюдать ограничения по напряжению и стабильности для дополнительной безопасности системы.¹⁸ В случае отказа

¹⁸ Эти ограничения упоминаются здесь для полноты картины, хотя более подробное обсуждение выходит за рамки данного доклада. В настоящее время стабильность не является серьезной проблемой в Германии, но в будущем важность этого вопроса может возрасти. Поскольку пределы стабильности в реальном времени гораздо более сложны и менее линейны по отношению к величине передаваемого тока, требуется оценка стабильности сети в реальном времени (онлайн-оценка устойчивости в динамике — Online-DSA).

¹⁷ См. Agora Energiewende (2018).

одной линии электропередачи, генератора или трансформатора, встроенное резервирование, известное как критерий «N-1», гарантирует, что энергосистема сможет продолжать стабильную работу.

3.1.1. Борьба с перегрузками: редиспетчеризация и ограничение выработки

Для предотвращения перегрузок сетевые операторы могут принимать различные меры в режиме реального времени. К ним относятся меры, связанные с сетью (операции переключения), редиспетчеризация (включение и выключение обычных электростанций по обе стороны от «узкого места»), ограничение генерации (сокращение переменной генерации за счет ВИЭ) и, в некоторых случаях, отключение нагрузки. Важно наличие четких и прозрачных правил и порядка их применения. В противном случае переменная выработка за счет ВИЭ может быть сокращена, в то время как традиционная генерация электроэнергии будет продолжать работать и выделять углекислый газ. Многие страны Европы установили политику приоритетной диспетчеризации для возобновляемых источников энергии. То есть они ограничивают пере-

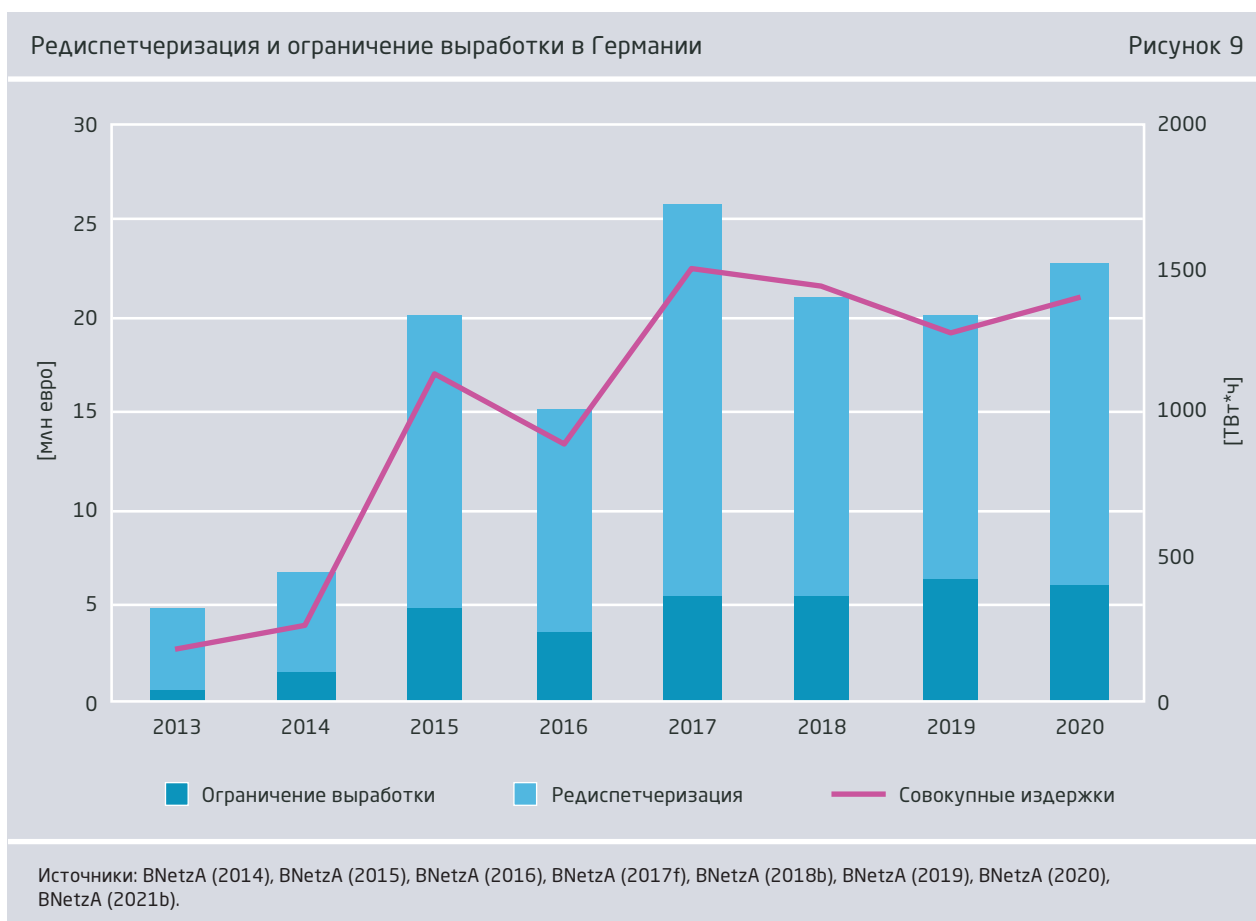
менную выработку за счет ВИЭ только после того, как исчерпаны другие меры. Приоритетная диспетчеризация возобновляемых источников энергии особенно полезна для интеграции и продвижения генерации за счет переменных ВИЭ в странах с низкой (но растущей) долей ВИЭ.

В Германии сетевые операторы в основном используют следующие четыре основных инструмента для управления сетями (в порядке важности):

- Системные, такие как выполнение операций переключения;
- Рыночные, такие как редиспетчеризация (включение и выключение обычных электростанций мощностью более 10 МВт), в основе которых лежат либо контрактные отношения между производителем электроэнергии (или оператором системы накопления) и оператором сети, либо установленные законом обязательства оператора сети (по возмещению затрат и финансовых потерь, понесенных производителем электроэнергии);

ИНФОРМАЦИОННЫЙ БЛОК - Редиспетчеризация и ограничение выработки в Германии

Рост использования редиспетчеризации и ограничения выработки в Германии в последние несколько лет привлекает все больше внимания в политических дискуссиях и в средствах массовой информации. Стоимость этих мер в настоящее время составляет около полутора миллиардов евро. Поскольку потребители должны покрывать эти расходы через сетевые сборы, общественная поддержка таких мер может ослабнуть. На данный момент ограничение производства возобновляемой электроэнергии по-прежнему является в основном локальным явлением. Около двух третей ограничений приходится на северную землю Шлезвиг-Гольштейн, где находятся большинство ветропарков. Совокупный объем редиспетчеризированной и ограниченной выработки в настоящее время составляет примерно 3% от валового производства электроэнергии, что относительно немного по сравнению с другими странами. Чтобы предотвратить рост отключений электростанций на ВИЭ, регуляторы должны стимулировать маневренность, например, через использование электроэнергии для отопления и подключение гибких нагрузок.



- Активация резервных электростанций для компенсации дефицита редиспетчеризированной мощности с возмещением затрат производителям электроэнергии;
- Ограничение выработки электроэнергии на основе возобновляемых источников энергии и совместной выработки тепловой и электрической энергии (постепенное или резкое сокращение выработки за счет ВИЭ или на когенерационных установках теплоэлектростанций) с финансовой компенсацией 95% упущенных доходов для пострадавших генераторов на основании так называемой «огорки о затруднениях».¹⁹

¹⁹ Если убыток составляет более 1% годовой выручки, производители электроэнергии получают полную финансовую ком-

Другие возможные меры, которые применяются в крайнем случае, включают в себя регулирование подачи электроэнергии и отключение потребителей по требованию оператора сети (без финансовой компенсации).

3.1.2. Удаленный мониторинг и управление переменной выработкой ВИЭ

Ограничение выработки ВИЭ более эффективно, когда операторы сети имеют удаленный доступ к данным о переменной генерации ВИЭ в режиме реального времени, а также имеют возможность удаленного управления снижением мощности на объектах ВИЭ. Интеграция переменных ВИЭ становится намного проще, если удаленный онлайн-мониторинг и

пенсацию вместо 95%.

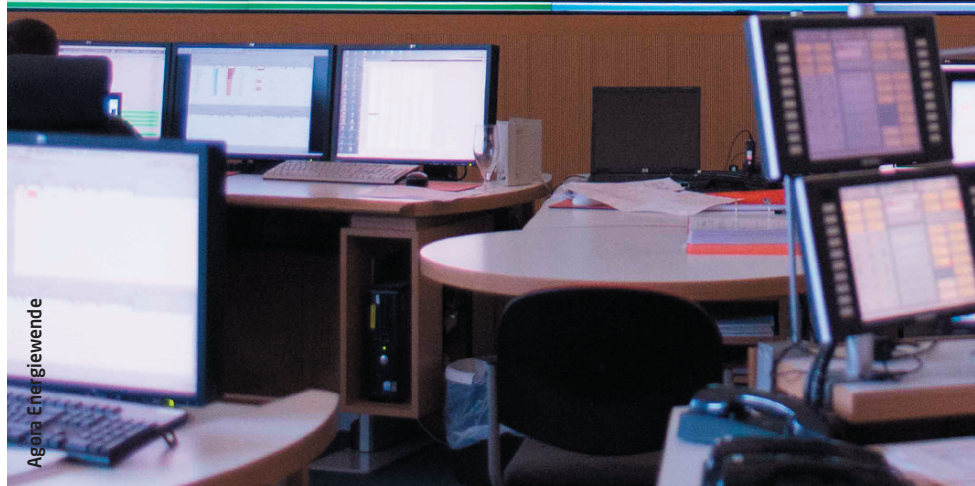
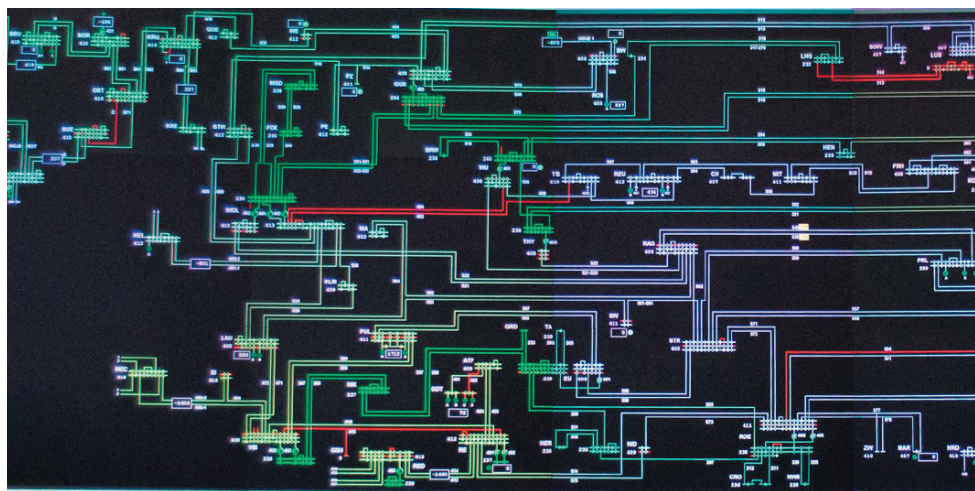
управление объектами ВИЭ устанавливаются с самого начала, чтобы операторы могли отказаться от «опции телефонного звонка», когда они звонят операторам объектов ВИЭ и просят их снизить мощность. По мере роста доли возобновляемых источников энергии контроль и мониторинг генерации переменных ВИЭ приобретают все большее значение. Модернизация уже существующих электростанций ВИЭ может быть довольно трудоемким процессом, особенно когда задействовано множество небольших фотоэлектрических установок и ветряных турбин. Вот почему желательно, чтобы объекты переменной генерации определенной мощности имели устройства дистанционного контроля и управления до подключения к сети. В целом, мониторинг и управление в режиме реального времени приобретают все большее значение по мере роста количества объектов генерации и потребления, а также по мере роста сложности работы сети.

3.1.3. Управление перетоком мощности: оптимизация перетока мощности и краткосрочные меры по управлению перегрузками в сети.

Внедрение *фазосдвигающих трансформаторов и других устройств управления перетоком мощности* позволяет операторам сетей оптимизировать переток мощности и повышать коэффициент использования уже существующей пропускной способности. Фазосдвигающие трансформаторы представляют собой трансформаторы особого типа, которые контролируют и направляют поток активной мощности в сетях передачи переменного тока. Например, фазосдвигающие трансформаторы регулируют трансграничные перетоки мощности на интерконнекторах между Польшей и Германией.²⁰ Точно так же фазосдвигающие трансформаторы могут использоваться для **контроля**

²⁰ См. 50Hertz and PSE (2016).

Точный мониторинг потоков электроэнергии и нагрузки на линии является необходимым условием для работы сети с высокой долей возобновляемых источников энергии.



ИНФОРМАЦИОННЫЙ БЛОК - Применение фазосдвигающих трансформаторов для разгрузки сети в Германии

В ближайшие несколько лет операторы систем электропередачи в Германии установят фазосдвигающие трансформаторы в отдельных районах с высоким уровнем загруженности сети, чтобы уменьшить объем перераспределения и сокращения возобновляемой электроэнергии. Перед их установкой будет проведен анализ экономической эффективности, чтобы убедиться, что внедрение фазосдвигающего трансформатора (или другого устройства для управления потоками мощности) более рентабельно, чем затраты на редиспетчеризацию и отключение электростанций на ВИЭ из-за перегрузки. В 2017 году внедрение фазосдвигающих трансформаторов стало новой краткосрочной мерой в процессе планирования сети для устранения узких мест в сети в Германии. Важно подчеркнуть, что ситуация на перегруженном участке сети может улучшиться, а возникновение узких мест в сети может иметь временный характер. Например, узкие места могут исчезнуть после строительства новой линии электропередачи. Если фазосдвигающий трансформатор больше не нужен на данном конкретном участке сети, его можно использовать в другом месте. Внедрение фазосдвигающих трансформаторов обычно оказывает незначительное воздействие на окружающую среду, поскольку их часто можно установить на уже существующих подстанциях. Если в соседних областях используется несколько фазосдвигающих трансформаторов, операторы сети должны учитывать взаимозависимость управления потоками мощности. Управление потоками мощности является важным инструментом для контроля потоков активной мощности, регулирования напряжения и стабилизации сети.

или перенаправления потоков мощности

в сети передачи *в пределах одной страны*, чтобы уменьшить перегрузку определенных линий передачи. Перегрузки на определенных линиях электропередачи можно избежать путем перенаправления потоков мощности на другие линии электропередачи или области сети при условии наличия достаточной пропускной способности. В краткосрочной перспективе фазосдвигающие трансформаторы могут использоваться в качестве устройств управления потоком мощности для снятия ограничений сети в сильно нагруженных цепях.

3.2. Закупка системных услуг

Чтобы система работала надежно, ей требуется широкий набор системных (вспомогательных) услуг. В целом, системные услуги представляют собой «все услуги, которые требуются оператору системы передачи или распределения

электроэнергии для поддержания целостности и стабильности системы передачи или распределения электроэнергии, а также для обеспечения качества электроэнергии».²¹ Они включают в себя управление частотой, поддержку напряжения, компенсацию потерь в сетях, а также запуск электростанции из полностью обесточенного состояния и автономную работу. Как отмечалось выше, некоторые из этих услуг можно считать «глобальными» или «общесистемными» (например, управление частотой), тогда как другие услуги являются «локальными» (например, поддержка напряжения). Для предоставления системных услуг (например, регулирования частоты и напряжения) оператор сети организует и закупает необходимые системные услуги (например, резервы для регулирования частоты, реактивную мощность для регулирования напряжения) у производителей электроэнер-

²¹ См. Eurelectric (2004).

ИНФОРМАЦИОННЫЙ БЛОК - Правильное решение с самого начала: проблема 50,2 Гц в Германии

Для поддержания стабильности системы требуется частота 50 или 60 Гц (в зависимости от страны). Когда выработка электроэнергии превышает потребление, частота поднимается выше допустимых пределов (повышенная частота); когда выработки электроэнергии недостаточно для удовлетворения спроса, частота падает ниже допустимых пределов (пониженная частота). Обе ситуации могут поставить под угрозу стабильность системы. В Германии правила подключения к сети изначально требовали отключения солнечных фотоэлектрических установок (обычно подключаемых к сетям низкого напряжения) от сети при достижении повышенной частоты 50,2 Гц. Пока доля солнечной энергетики в системе была небольшой, это требование не создавало проблем. Но в период с 2009 по 2012 гг. в Германии устанавливалось от 7 до 8 ГВт солнечных фотоэлектрических систем в год. Их общая установленная мощность увеличилась с 11 ГВт в 2009 году до 33 ГВт в 2012 году. При этом материковые ветротурбины были настроены на отключение от сети при достижении пониженной частоты 49,5 Гц. В результате, система становилась менее устойчивой: если большая часть солнечных фотоэлектрических модулей отключается сразу на частоте 50,2 Гц, основной резерв не сможет компенсировать внезапное падение частоты сети. Кроме того, потеря генерации может вызвать понижение частоты, что вынудит материковые ветротурбины отключиться на частоте 49,5 Гц. Конечный результат этого «эффекта домино» может привести к остановке подачи электроэнергии. Поэтому Федеральное министерство экономики и энергетики Германии (BMWi)¹ потребовало от производителей переменной возобновляемой электроэнергии выполнить трудоемкую задачу по модернизации нескольких сотен тысяч солнечных фотоэлектрических модулей и материковых ветротурбин и реконфигурации уровней их отключения, что во многих случаях приходилось выполнять на местах. Эта ситуация стала важным уроком для немецких регуляторов: следовало оценить влияние правил подключения к сети на систему на этапах планирования, а не менять их после того, как они были введены в действие.

¹ С 2021 года – Федеральное министерство экономики и защиты климата (BMWK).

гии, операторов накопителей электроэнергии и у других участников рынка. Традиционно системные услуги оказывают обычные вращающиеся генераторы. По мере увеличения доли переменной возобновляемой генерации в энергосистеме необходимы новые источники системных услуг. Без новых источников определенная доля тепловых электростанций должна постоянно оставаться в сети для обеспечения напряжения или поддержки безопасности, что ограничивает прием переменной возобновляемой электроэнергии. Следовательно, производство возобновляемой электроэнергии (наряду с

прочими вариантами) должно вносить вклад в предоставление системных услуг.

3.2.1. Системные услуги, предоставляемые производителями возобновляемой электроэнергии

Предоставление системных услуг всегда было условием, которое должны выполнить обычные электростанции, чтобы получить разрешение на подключение к сети. Эти минимальные технические требования определяются сетевыми кодексами для соответствующих уровней напряжения. Возобнов-



Генераторы выведенных из эксплуатации электростанций могут быть преобразованы во вращающиеся синхронные компенсаторы для обеспечения поддержки напряжения.

ляемая генерация не оказывает влияния на систему, пока доля производства электроэнергии от переменных ВИЭ остается незначительной. Поскольку темпы развития переменной генерации в Германии выросли, аналогичные требования по предоставлению системных услуг были введены для ветротурбин. *Постановление о системных услугах* было принято в 2009 году, когда на суше было установлено около 25 ГВт ветровых электростанций. Постановление ввело требования по поддержке частоты и напряжения для материковых ветровых турбин и определило для них технические правила в дополнение к существующим сетевым кодексам. Требования стали обязательными для новых материковых ветровых турбин, которые были введены в эксплуатацию в апреле 2011 года или позже. Турбины, введенные в эксплуатацию до этой даты, могли получить надбавку, если их операторы добровольно придерживались правил постановления. Сегодня требования к возобновляемой генерации являются частью существующей системы сетевых кодексов для различных уровней напряжения.

3.2.2. Новые способы оказания системных услуг

По мере роста доли переменных ВИЭ в распределительную сеть поступает все больше электроэнергии. Электричество, которое не потребляется локально, подается на более высокие уровни распределительной сети или в сеть электропередачи. С тех пор как Германия начала поэтапный отказ от атомных электростанций, многие из которых были расположены на юге страны, задача стабилизации напряжения усложнилась, поскольку обычных централизованных электростанций, способных предоставлять реактивную мощность, стало меньше. Системные услуги могут обеспечиваться генераторами электроэнергии или компонентами сети для обеспечения стабильности системы. Например, статические компенсаторы реактивной мощности (Static VAR Compensators SVC), статические синхронные компенсаторы (static synchronous compensators, STATCOM) и синхронные компенсаторы (synchronous condensers) могут предоставлять системные услуги для поддержки напряжения без одновременного производства электроэнергии. В одном случае инженеры переоборудовали генератор А выведенной

из эксплуатации АЭС Библис во вращающийся синхронный компенсатор. Мощность данного генератора составляет 1,2 ГВт, и он расположен на юге земли Гессен. Это был первый случай, когда генератор такого размера стал доступен для регулирования реактивной мощности в ситуациях низкого или высокого напряжения сети.²² В Дании оператор системы электропередачи Energinet.dk провел ряд тендеров на предоставление системных услуг. По результатам некоторых тендеров, установка нового синхронного компенсатора оказалась дешевле, чем получение системных услуг от существующей электростанции.²³

3.2.3. Предоставление системных услуг распределительной сетью

Повышение напряжения в распределительных сетях может быть связано с поступлением электроэнергии от небольших солнечных фотоэлектрических установок, подключенных на низких уровнях напряжения. Эта проблема особенно актуальна для регионов с высокой плотностью

децентрализованной генерации за счет переменных ВИЭ при ограниченном локальном спросе и больших расстояниях распределения.²⁴ Одним из решений компенсации колебаний напряжения в сети низкого напряжения является установка трансформаторов переменного напряжения. Как правило, колебания напряжения в сетях низкого и среднего напряжения должны оставаться в пределах +/-10%. Внедрение регулируемых распределительных трансформаторов позволяет использовать весь диапазон напряжения +/-10% для каждого уровня напряжения. Таким образом, разделение двух уровней напряжения позволяет увеличить потребление энергии, производимой за счет ВИЭ.²⁵ На Рисунке 10 показаны различные типы мер, применяемых 880 операторами системы распределения в Германии. Хотя некоторые из этих мер являются частью традиционного расширения сети, внедрение «умных» технологий приобретет более важное значение в будущем.

²² См. Siemens (2017) и Amprion (2012).

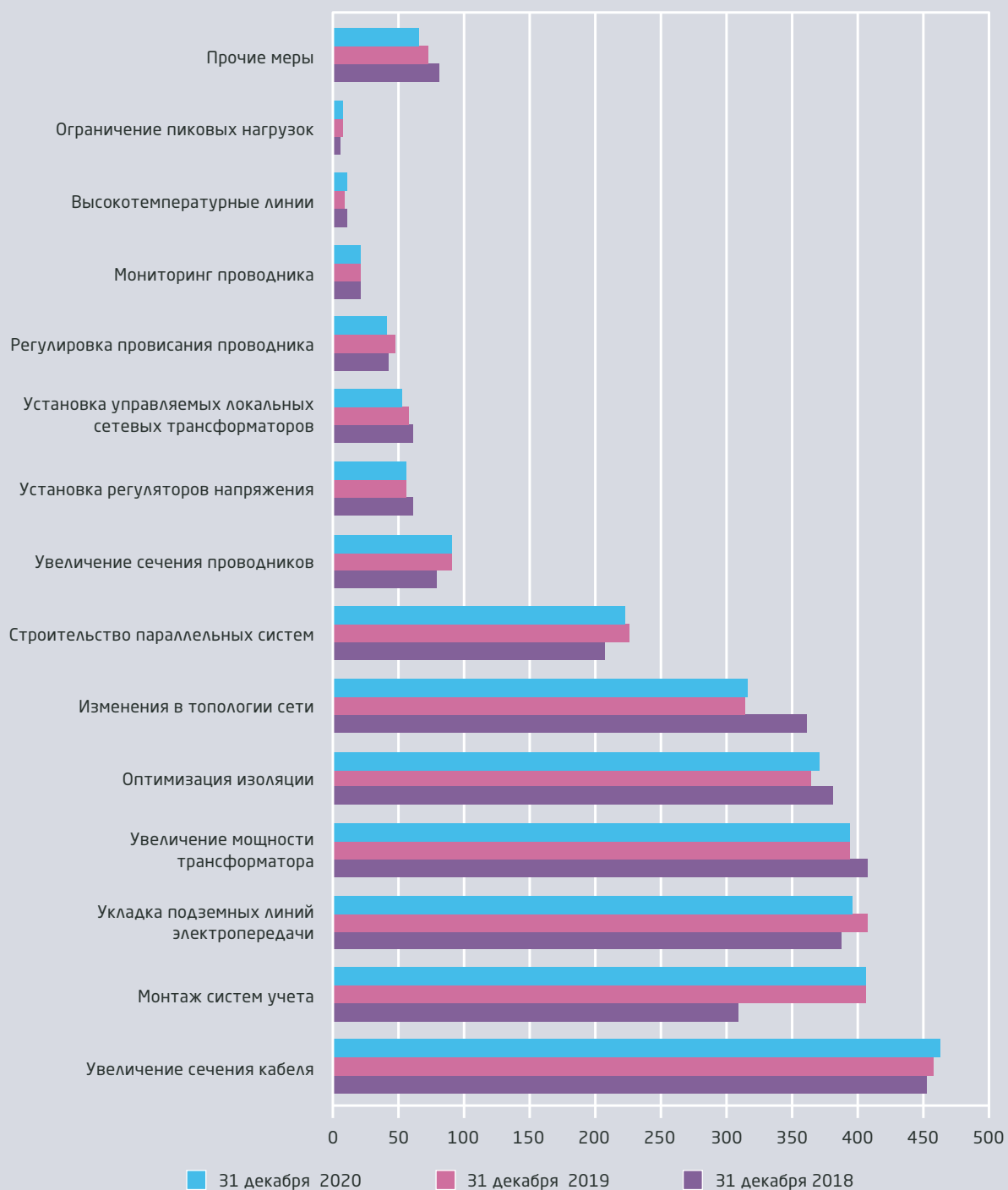
²³ Более подробная информация содержится в Ea Energy Analysis (2015), с. 51.

²⁴ См. Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg (2017).

²⁵ Более детальное объяснение содержится в E-Bridge, IAEW and OFFIS (2014).

Меры по оптимизации и усилению сети, применяемые в соответствии с разделом 12 Закона о возобновляемых источниках энергии, и частота их использования операторами сети (операторами распределительных систем)

Рисунок 10



Источник: BNetzA (2021b).

ИСТОЧНИКИ

50Hertz and PSE (2016).

Milestone for Improved Power Flow Regulation between German and Polish Electricity Systems. Press release.

50Hertz et al. (50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH) (2017).

Netzentwicklungsplan Strom 2030. Offshore Netzentwicklungsplan 2030. Version 2017, 1. Entwurf.

Agora Energiewende and Sandbag (2018).

The European Power Sector in 2017. State of Affairs and Review of Current Developments.

Agora Energiewende (2017). Energiewende 2030:

The Big Picture. Megatrends, Ziele, Strategien und eine 10-Punkte-Agenda für die zweite Phase der Energiewende.

Agora Energiewende (2018).

A Word on Flexibility.

Amprion (2012):

Generator wird zum Motor. 24.02.2012.

BNetzA (Bundesnetzagentur – Federal Network Agency) (2014).

Monitoringbericht 2014.

BNetzA (Bundesnetzagentur – Federal Network Agency) (2015).

Monitoringbericht 2015.

BNetzA (Bundesnetzagentur – Federal Network Agency) (2016).

Monitoringbericht 2016.

BNetzA (Bundesnetzagentur – Federal Network Agency) (2017f).

Monitoringbericht 2017.

BNetzA (Bundesnetzagentur – Federal Network Agency) (2018b).

Monitoringbericht 2018.

BNetzA (Bundesnetzagentur – Federal Network Agency) (2019).

Monitoringbericht 2019.

BNetzA (Bundesnetzagentur – Federal Network Agency) (2020).

Monitoringbericht 2020.

BNetzA (Bundesnetzagentur – Federal Network Agency) (2021a).

Kennzahlen der Versorgungsunterbrechungen Strom.

BNetzA (Bundesnetzagentur – Federal Network Agency) (2021b).

Monitoringbericht 2021.

Ea Energy Analysis (2015).

The Danish Experience with Integrating Variable Renewable Energy.

E-Bridge, IAEW und OFFIS (2014).

Verteilernetzstudie. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi).

Ember (2022).

European Electricity Review 2022.

Energy Utilities (2021).

Saudi Arabia achieves two new world record solar tariffs.

Energinet.dk (2018).

Politiske rammer for udbygning af elnettet.

Eurelectric (2004).

Ancillary Services. Unbundling Electricity Products – an Emerging Market. Thermal Working Group. Ref: 2003-150-0007.

**Hogan, M., Kadoch, C., Linvill, C.,
O'Reilly, M. (2018).**

How Germany's Energiewende Renewables
Integration Points the Way. Public Utilities
Fortnightly. February 2018.

Informationsportal Erneuerbare Energien (2022).

Nationale Ausschreibungen und Ergebnisse.

Kenge, A.V., Dusane, S.V., Sarkar, J. (2016).

Statistical Analysis & Comparison of HTLS
Conductor with Conventional ACSR Conductor.
International Conference on Electrical, Electronics,
and Optimization Techniques (ICEEOT). IEEE (2016).

Lee, N., Flores-Espino, F., Hurlbut, D. (2017).

Renewable Energy Zone Transmission Process: A
guidebook for practitioners. Golden, CO, USA, 2017.

Norsk elbilforening (2022).

Norwegian EV policy.

**Ostbayerische Technische Hochschule
Regensburg (2017).**

Informationsportal Regelbare
Ortsnetztransformatoren.

SBB (Statistisk sentralbyr –

Statistics Norway) (2018). Over 140,000 elbiler i
Norge. 22 March 2018.

Siemens (2017).

Biblis A generator stabilizes the grid as a
synchronous condenser.

Об Agora Energiewende

Agora Energiewende разрабатывает основанные на фактических данных политически реализуемые стратегии для обеспечения успешного перехода к экологически чистой энергии в Германии, Европе и других странах мира. Как аналитический центр и лаборатория по выработке мер политики, мы стремимся делиться знаниями с заинтересованными сторонами в мире политики, бизнеса и науки, обеспечивая при этом продуктивный обмен идеями. Наши научно обоснованные исследования выдвигают на первый план практические меры политики, избегая при этом идеологической повестки дня. Как некоммерческий фонд, финансируемый в основном за счет благотворительных пожертвований, мы не зависим от узких корпоративных или политических интересов и придерживаемся приверженности борьбе с изменением климата.



Публикация доступна для скачивания по данному QR-коду.

Agora Energiewende

10178 Берлин, Анна-Луиза-Карш-Штрассе, 2

Тел.: +49 (0)30 700 14 35-000

Факс: +49 (0)30 700 14 35-129

www.agora-energiewende.de

info@agora-energiewende.de

