

СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ БАЛАНСИРОВКОЙ НАГРУЗКИ В СЕТИ СО СТОРОНЫ ГЕНЕРАЦИИ И ПОТРЕБЛЕНИЯ

**А.В. Новых¹, Х.А. Мендес Перез¹, Б. Гонзалез-Диаз¹,
И.И. Свириденко², Г.В. Гоголев², В.А. Тимофеев²**

¹ Университет Ла-Лагуна, г. Сан-Кристобаль-де-ла-Лагуна, Испания,

² Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

Рост доли возобновляемых источников энергии, характеризующихся непостоянной выработкой электроэнергии в общем балансе ее производства, приводит к снижению качества электроэнергии и необходимости балансировки нагрузки в сети. Применяемые сегодня методы балансировки нагрузки со стороны генерации, а также использование технологии аккумулирования энергии не всегда обеспечивают эффективное решение задачи балансировки. Особенно это проявляется при переводе традиционных генераторов из основных источников электроэнергии в резервные. Основная проблема заключается в росте потерь электрической энергии из-за низкой эффективности применяемых технологий аккумулирования. На примере самой современной гибридной электростанции *Gorona del Viento* (остров Эль-Йерро, Канарский архипелаг, Испания), имеющей в своем составе традиционные и возобновляемые источники энергии, рассмотрены методы балансировки нагрузки в сети, особенностью которых является проведение балансировки как со стороны генерации электроэнергии, так и со стороны потребления. С использованием расчетных моделей режимов работы гибридной электростанции продемонстрирована возможность реализации различных стратегий балансировки нагрузки со стороны потребления, рассмотрены особенности, показана их эффективность для снижения потерь энергии.

Ключевые слова: гибридная электростанция, возобновляемые источники энергии, балансировка нагрузки, потери энергии, аккумулятор энергии, активный потребитель.

Введение

Появление гибридных электростанций, включающих различные типы источников энергии – традиционных и возобновляемых, – поставило задачу разработки принципиально новых методов балансировки нагрузки в сети. Увеличение доли использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ), несмотря на явный положительный эффект от их внедрения, характеризуется непостоянной выработкой электроэнергии в общем балансе ее производства, что становится одной из причин снижения качества электроэнергии [1]. Повышение мощности ВИЭ, рост количества частных электростанций, нестабильная генерация, хаотичное подключение и отключение от сети приводят к существенным колебаниям частоты в сети [2]. Несмотря на то, что эти колебания носят кратковременный характер, влияние их на работу сети существенно. Кроме того, объекты электрогенерации от ВИЭ имеют самый низкий коэффициент использования установленной мощности [3].

Ранее предполагалось, что балансировка нагрузки при использовании ВИЭ будет осуществляться системами аккумулирования энергии. Но пока доля ВИЭ в общей генерации оставалась незначительной и полученная от нее энергия явля-

лась малым дополнением к общей генерации, аккумулирования энергии не требовалось, и проблема решалась за счет изменения мощности тепловых электростанций, то есть только со стороны генерации. Со стороны потребления балансировка нагрузки никогда не производилась.

По мере развития гибридных электростанций к традиционным тепловым генераторам добавлялись более мощные генераторы от ВИЭ. Надежда на то, что нестабильность работы ВИЭ, зависящих от погодных условий, компенсируется применением технологий аккумулирования энергии, не оправдалась. Причина – их низкая эффективность, а также высокая стоимость практически всех типов аккумуляторов энергии. В результате энергосети, в первую очередь локальные, стали нести значительные потери энергии. Пришлось вернуться к апробированному методу балансировки нагрузки с помощью традиционных электрогенераторов, что в конечном итоге привело к еще большим потерям.

Именно на этапе широкого внедрения ВИЭ большой установленной мощности с системами аккумулирования энергии и возникла острая проблема балансировки нагрузки. Практически все известные методы аккумулирования сопровожда-

ются значительными потерями энергии при каждом цикле заряда и разряда. В итоге уже произведенная электрическая энергия безвозвратно теряется. Поэтому для снижения потерь необходимо разработать такие технологии, которые позволят обеспечить устойчивую работу энергосистемы в условиях постоянного изменения нагрузки.

Одной из перспективных технологий обеспечения устойчивости энергосистемы в условиях колебания нагрузки является технология балансировки нагрузки в сети как со стороны генерации электроэнергии, так и со стороны ее потребления. Особенно актуально решение этой задачи для локальных энергосетей с гибридными электростанциями, объединяющими в своем составе традиционные и альтернативные источники энергии большой мощности. Реализация подобной технологии балансировки может стать основой для повышения эффективности локальных энергосетей в таких отдаленных районах, как Сибирь и Дальний Восток, в южных районах России, в первую очередь в Крыму и на Кавказе, где использование ВИЭ наиболее перспективно.

Целью статьи является анализ применения такой технологии балансировки нагрузки для сетей с гибридными электростанциями. Решение поставленной задачи позволит реализовать возможность эффективного управления нагрузкой в сети со стабилизацией ее работы и снижением соответствующих потерь энергии, несмотря на высокую долю использования в гибридной электростанции ВИЭ.

Увеличение в генерации доли ВИЭ и последствия этого процесса

Пока доля ВИЭ в общем балансе производства электрической энергии гибридными электростанциями составляла менее 10–20 %, их влияние на дисбаланс в энергосети был незначительным. Все колебания нагрузки в сети гасились за счет изменения мощности традиционных тепловых генераторов электрической энергии. Однако как только эта доля приблизилась к 40–50 %, негативные последствия стали очевидными и весьма ощутимыми.

Во-первых, с повышением доли использования ВИЭ традиционные тепловые генераторы постепенно переходят с режима постоянной работы на номинальной нагрузке в режим резервных источников энергоснабжения на доленой нагрузке, что приводит к увеличению их удельного расхода топлива на 10–15 %. Во-вторых, существенные колебания мощности генерации при использовании ВИЭ приводят к дополнительным потерям, связанным с необходимостью балансировки нагрузки в сети. В-третьих, достигнуть столь высокой доли использования ВИЭ возможно лишь за счет применения технологий аккумулирования энергии, что автоматически приводит к повыше-

нию стоимости необходимого оборудования и дополнительным потерям избыточной электрической энергии из-за низкой эффективности самих аккумуляторов энергии.

Возникает парадоксальная ситуация. С одной стороны, широкое использование ВИЭ, преследуя своей целью снижение выбросов CO₂ в атмосферу, одновременно приводит к увеличению удельного расхода органического топлива традиционными тепловыми генераторами, работающими на сниженной нагрузке. Кроме того, растут потери электрической энергии из-за низкой эффективности применяемых технологий аккумулирования энергии.

Эту ситуацию проиллюстрируем на примере работы одной из самых современных гибридных электростанций *Gorona del Viento*, расположенной на острове Эль-Йерро (Канарский архипелаг, Испания). Электростанция включает 11 дизель-генераторов общей мощностью 11,32 МВт, пять ветрогенераторов по 2,3 МВт каждый и гидроаккумулирующую электростанцию (ГАЭС), позволяющую запастись ~ 50 МВт·ч электрической энергии [4].

На рис. 1 приведены отчетные данные испанской электроэнергетической компании *Endesa* по работе электростанции *Gorona del Viento* за 2018 год [5], когда был достигнут наиболее высокий уровень использования ВИЭ. Однако и потери электрической энергии, направленной в систему аккумулирования, в этот период были значительны и составили 10 141,6 МВт·ч: это разница между затратами на привод насосов (18 734,54 МВт·ч) и генерацией электрической энергии гидротурбиной ГАЭС (8592,94 МВт·ч). Таким образом, среднегодовая эффективность системы аккумулирования энергии составила всего 45,9 %. Причем это не потери, связанные с особенностями термодинамического цикла при использовании традиционных органических видов топлива. Это уже произведенная электрическая энергия, которая на тот момент была избыточной и не нашла своего применения. Потери электрической энергии составили почти 30 % от всей годовой выработки с использованием ВИЭ, и это – только один вид потерь энергии и только за один год.

Результаты детального анализа работы гибридной электростанции *Gorona del Viento* за весь период ее эксплуатации, проведенного нами по данным [5], представлены на рис. 2. Как видно из графика, рост потерь электроэнергии в системе аккумулирования в последние три года остается на одном уровне, хотя и прослеживается общая тенденция к их увеличению. Это объясняется тем, что в 2017 году была проведена модернизация проекта с целью повышения эффективности системы аккумулирования энергии. В 2016 году эффективность этой системы была на уровне 20 %. В 2018 году, как было отмечено выше, удалось достичь эффективности 45,9 %, хотя расчетное значение эффек-

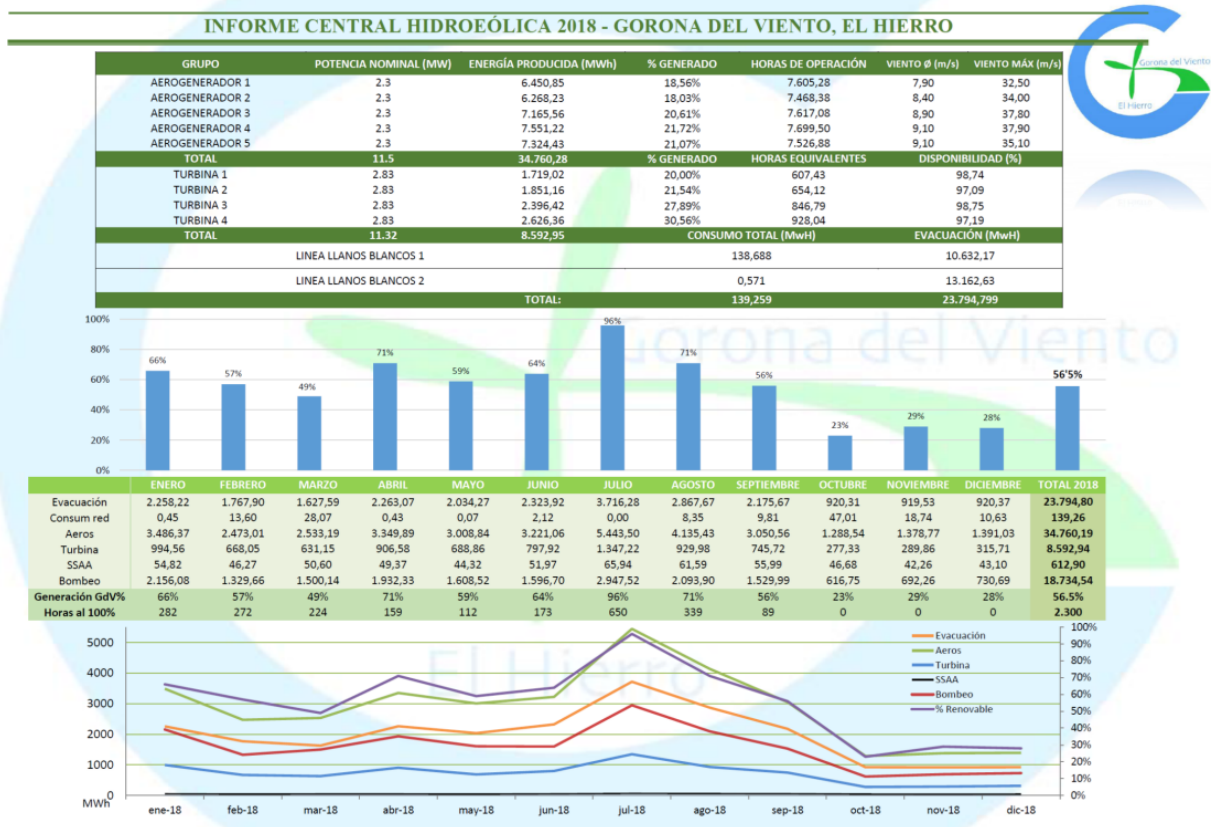


Рис. 1. Результаты работы электростанции Gorona del Viento в 2018 году [5]

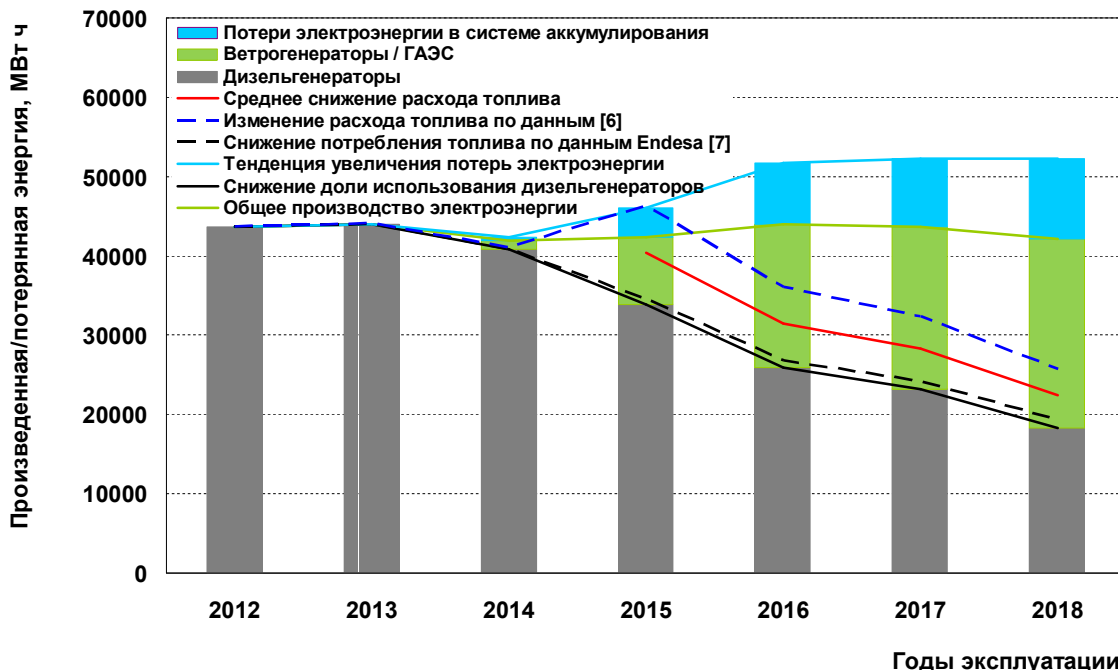


Рис. 2. Анализ эффективности гибридной электростанции Gorona del Viento за весь период эксплуатации

тивности подобных систем аккумулирования должно составлять не менее 60 %. Столь низкий уровень достигнутой эффективности является следствием постоянных колебаний нагрузки в сети.

Также из-за постоянного дисбаланса мощности, как со стороны потребления, так и со стороны генерации, резко снижается эффективность резервных генераторов электроэнергии, функции которых в рассматриваемой гибридной электро-

Альтернативные источники энергии

станции выполняют дизель-генераторы. Причем большую часть времени дизель-генераторы работают именно в режиме резервных источников энергии, что автоматически приводит к увеличению их удельного расхода топлива на 10–15 %. Суммарные выбросы CO₂ в атмосферу при этом снижаются, но снижение это не пропорционально сокращению времени работы дизель-генераторов. Реальное снижение выбросов CO₂ примерно на 10–15 % ниже, чем доля использования ВИЭ в общем объеме генерации.

На рис. 2 из двух разных источников [6, 7] приведены данные по эффективности дизель-генераторов (пунктирные линии). Эти данные существенно отличаются друг от друга. Работа [6] содержит критику проекта Gorona del Viento, и приведенные в ней данные эффективности электростанции несколько занижены. Резкое падение эффективности дизель-генераторов в 2015 году до 24 % вызывает сомнение, тем более что авторы [6] не раскрывают источник этих данных. В сноске к данным указано только – «по оценке».

Вторая группа данных взята из официального отчета совладельца и соавтора проекта – компании Endesa [7]. Снижение эффективности дизель-генераторов в этой работе имеет такую же тенденцию, как и в [6], однако в абсолютном выражении увеличение удельного расхода топлива существенно ниже, чем в [6], что, на наш взгляд, является явно заниженной оценкой. В этом же отчете приведены данные по удельным выбросам CO₂ в атмосферу, которые представлены на рис. 3. На этой диаграмме очевиден рост удельных выбросов CO₂ в атмосферу, свидетельствующий и об увеличении соответственно удельного расхода топлива. Учитывая вышеизложенное, можно предположить, что реальная кривая снижения эффективности дизель-генераторов занимает среднее положение между данными [6] и [7]. На рис. 2 эта зона выделена красным цветом.

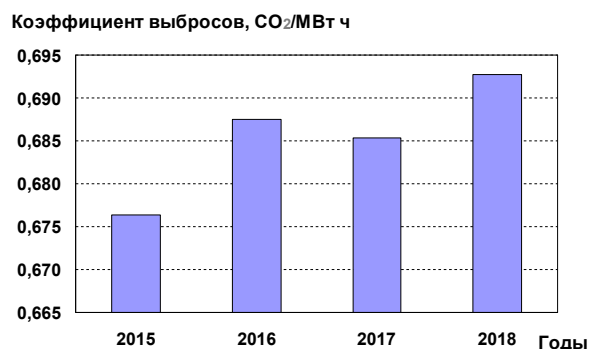


Рис. 3. Рост удельных выбросов CO₂ дизельными двигателями в атмосферу

Если даже считать, что удельный расход топлива дизельных двигателей увеличился всего на 5–7 %, что примерно соответствует паспортным данным подобных дизелей при длительной рабо-

те на частичных нагрузках, то в абсолютном выражении перерасход дизельного топлива составит более 250 тонн в год. Более детальный анализ опыта эксплуатации гибридной электростанции Gorona del Viento и определения потерь энергии приведен в [8].

Таким образом, постоянный дисбаланс между спросом и генерацией, особенно в условиях широкого использования ВИЭ, приводит к большим потерям электрической энергии и увеличению расхода топлива резервных дизель-генераторов. Причем по мере роста доли использования ВИЭ величина этих потерь увеличивается. Кроме того, следует подчеркнуть, что согласно данным работы [9], которая также направлена на критику проекта Gorona del Viento, электрическая энергия в общем потреблении энергоресурсов острова составляет всего 23 %. Следовательно, использование ВИЭ при производстве электрической энергии с долей более 50 % позволило сократить общее потребление органических видов топлива в целом на острове только на 15 %.

На основании представленного анализа работы электростанции Gorona del Viento можно сделать следующий вывод: повысить эффективность гибридных электростанций с высокой долей использования ВИЭ возможно двумя методами:

- 1) путем внедрения высокоэффективных и достаточно маневренных систем аккумулирования электрической энергии;
- 2) обеспечив балансировку нагрузки в электрической сети как со стороны генерации, так и со стороны потребления.

Первый метод представляет интерес для производителей электроэнергии, но, к сожалению, на данный момент времени трудно реализуем по техническим и экономическим причинам. Реализации этого метода посвящен целый ряд исследований [10–14], результаты которых показывают, что наилучшими эксплуатационными характеристиками обладают аккумуляторные батареи. Их эффективность достигает 95 %, а время реакции на спрос составляет всего несколько секунд. Однако аккумуляторные батареи имеют высокую стоимость и ограниченный срок службы. Именно эти два фактора в значительной степени сдерживают широкое применение этого метода. Технологии гидроаккумулирования электрической энергии и аккумулирования с использованием сжатого или сжиженного воздуха значительно дешевле и позволяют накапливать достаточные объемы электрической энергии, однако их эффективность в реальных условиях составляет не более 50–60 %, что приводит к значительным потерям энергии при каждом цикле заряда и разряда.

Второй метод затрагивает интересы потребителей электрической энергии и может быть более эффективен. Современные информационные технологии и цифровая трансформация всех областей

жизнедеятельности человека позволяет активно управлять работой различных потребителей электроэнергии, что в итоге дает возможность управлять нагрузкой в электрической сети. Данному методу посвящены исследования [15–17], однако в отличие от первого метода эти работы несут больше экспериментальный характер. Реализация второго метода выполнена лишь в некоторых проектах локальных электросетей небольшой мощности.

Балансировка нагрузки в электрической сети со стороны генерации

Балансировка нагрузки со стороны генерации осуществляется путем изменения мощности традиционных тепловых генераторов и до определенного ее уровня потери от снижения нагрузки в сети остаются незначительными. Мощность же ВИЭ зависит от погодных условий, регулировать их невозможно. С увеличением диапазона регулируемой мощности источников электроэнергии, а также с переводом традиционных тепловых генераторов на работу на частичных нагрузках существенно возрастают потери. Детально уровень реальных потерь энергии и их причины покажем на графике работы гибридной электростанции Gogona del Viento в период с 9 по 12 ноября 2019 года (рис. 4).

В течение рассматриваемого периода времени интенсивность генерации с использованием энергии ветра значительно превышала суммарную мощность потребителей. Избыточная электроэнер-

гия направлялась в систему аккумулирования энергии, однако из-за низкой эффективности последней большая часть электроэнергии (зона выделена красным) терялась. Но это – только потери электрической энергии в насосах ГАЭС. При обратном преобразовании потенциальной энергии воды в электрическую энергию добавляются потери, которые будут рассмотрены ниже.

Первые три дня рассматриваемого периода балансировка нагрузки осуществлялась только с помощью насосов ГАЭС. Это негативно сказывалось на эффективности гибридной электростанции. Черным цветом на рис. 4 выделена область дополнительных потерь энергии из-за работы насосов на частичной нагрузке. На четвертый день из-за резкого падения интенсивности ветра и возникшей угрозы провала нагрузки в электрической сети были запущены дизель-генераторы. ГАЭС в этом случае не использовалась, так как система гидроаккумулирования имеет большую инерционность и ее кратковременный ввод в действие привел бы к существенным потерям электрической энергии.

Запуск дизель-генераторов для поддержания нагрузки в сети экономически более эффективен. Однако вся электрическая энергия, произведенная в этот период дизель-генераторами, была направлена в систему аккумулирования энергии, что привело к безвозвратной потере более 50%. На рис. 4 видно, как увеличилась доля потерь энергии (выделенная область) после запуска дизель-генераторов. В конечном итоге в период

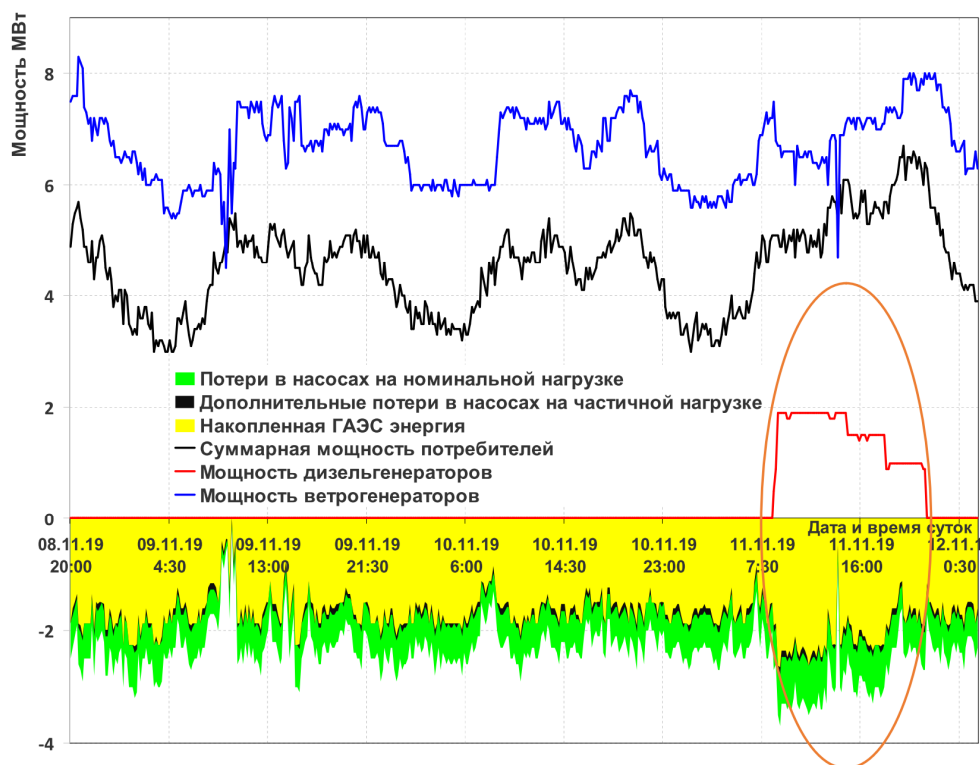


Рис. 4. График работы электростанции Gogona del Viento в период с 9 по 12 ноября 2019 года

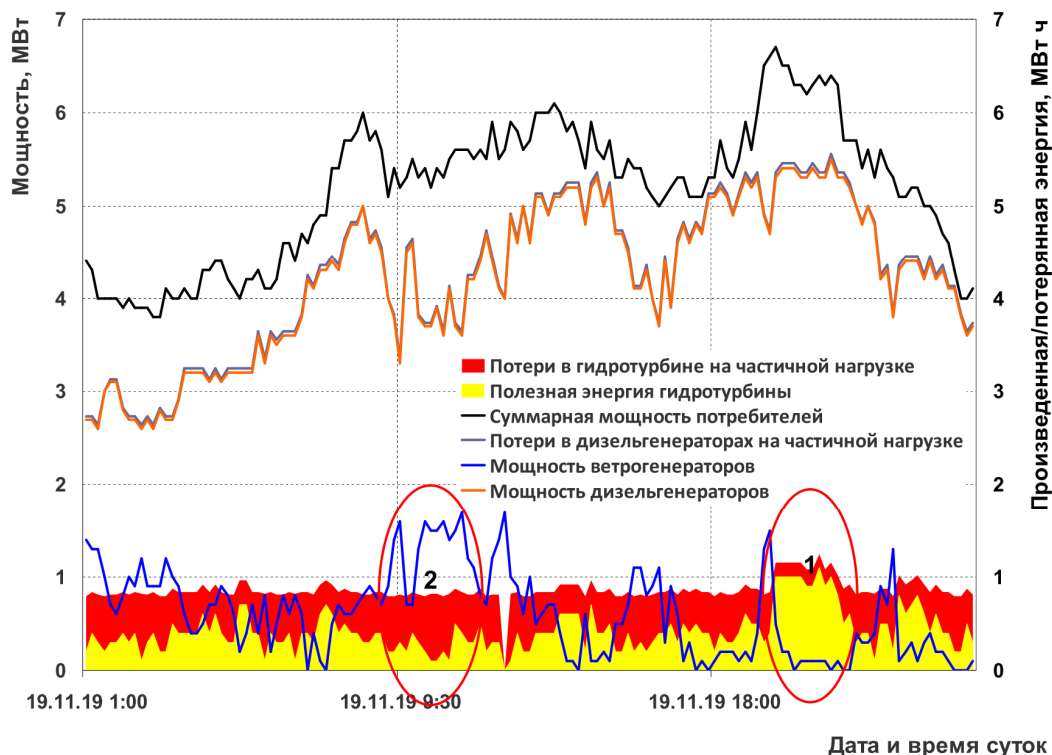


Рис. 5. График работы электростанции Gogona del Viento в период суток 19 ноября 2019 года

с 8 по 12 ноября 2019 года суммарные безвозвратные потери электрической энергии составили 67,97 МВт·ч, что соответствует 20 % от общего потребления. Возвращаясь к результатам нашего анализа (см. рис. 2) и данным [6], можно сделать вывод: именно в этот период эффективность дизель-генераторов достигает не более 25 %, что в определенной степени подтверждает правильность приведенных в [6] оценок.

Теперь проанализируем другой отрезок времени: в период суток 19 ноября 2019 года, когда интенсивность ветра была незначительной и недостаточной для покрытия нагрузки потребителей (рис. 5). Поэтому в этот период балансировка нагрузки в сети осуществлялась в основном дизель-генераторами и частично с использованием гидравлической турбины ГАЭС. Полностью осуществить балансировку нагрузки с использованием гидравлической турбины было невозможно. Для этого потребовалось бы израсходовать около 100 000 м³ воды, что соизмеримо с емкостью нижнего водоема ГАЭС. Практически весь ее запас был бы использован за один день.

Кроме этого, дизель-генераторы имеют более высокие маневренные показатели. В итоге потери электрической энергии составили около 10 МВт·ч в системе гидроаккумулирования и около 1 МВт·ч – в дизель-генераторах, что составило 8,8 % от общего потребления. В основном эти потери связаны с работой генераторов на частичных нагрузках, что в первую очередь характерно для гидротурбины. Достаточно сравнить выделенные на рис. 5

зоны 1 и 2. При работе гидравлической турбины на уровне мощности более 1 МВт, составляющей более 40 % от номинальной мощности, потери энергии существенно ниже, чем при более низкой мощности. Однако если поднять уровень мощности гидравлической турбины до 2 МВт, то это автоматически приведет к увеличению потерь в дизель-генераторах, так как их уровень мощности понизится.

Результаты, представленные на рис. 4 и 5, поясняют, почему с ростом доли использования ВИЭ существенно повышаются потери электрической энергии. Если бы 19 ноября 2019 года для балансировки нагрузки использовались только дизель-генераторы, то суммарные потери на балансировку нагрузки не превысили бы 1 %. Правда, в этом случае выбросы CO₂ в атмосферу увеличились бы на 25 %.

Основная причина столь высоких потерь электрической энергии заключается в низкой эффективности системы аккумулирования энергии. В 2019 году авторы проекта Gogona del Viento провели его модернизацию, добавив аккумуляторную батарею мощностью 650 кВт суммарной емкостью 3 МВт·ч [18]. С помощью этой аккумуляторной батареи планировалось обеспечить частичную балансировку нагрузки в сети. Несомненно, этот шаг повысит общую эффективность системы аккумулирования энергии, как минимум, на 10–15 %, но не решит проблему кардинально. Емкость этой аккумуляторной батареи составляет менее 3 % от среднесуточного потребления электрической энергии, а стоимость ее достаточно высокая.

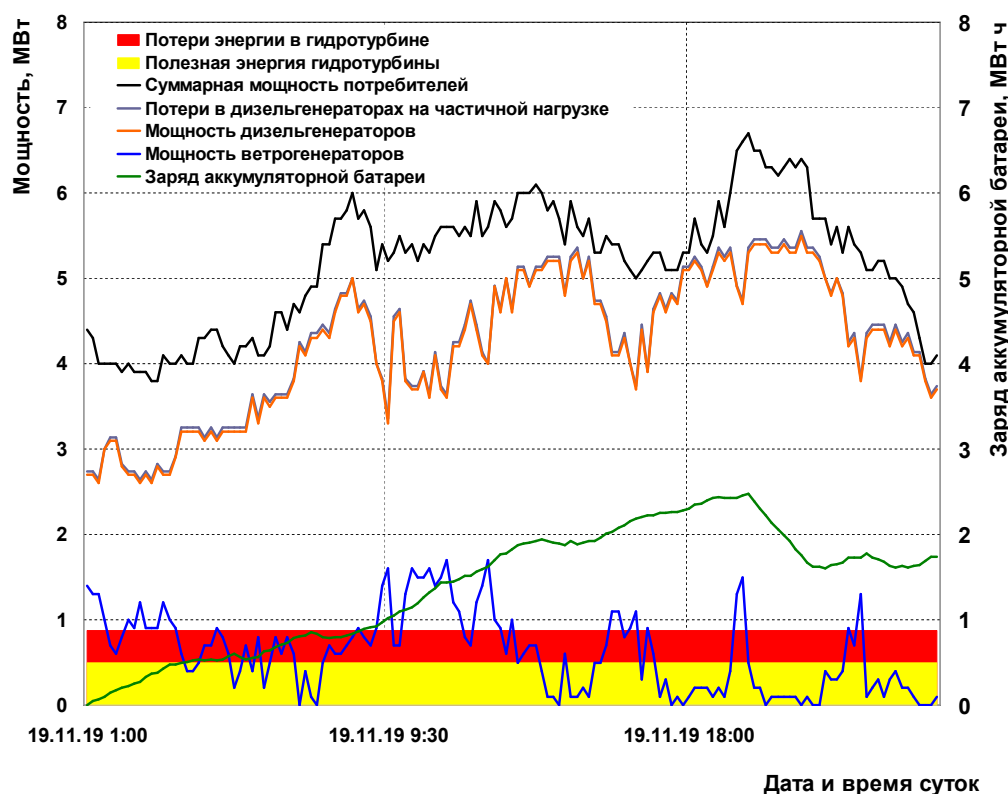


Рис. 6. Стабилизация работы гидротурбины за счет использования аккумуляторной батареи

Тем не менее использование аккумуляторной батареи может предотвратить и преждевременный запуск дизель-генераторов. При этом потери снизятся, так как провал нагрузки будет скомпенсирован аккумуляторной батареей. Если же стабилизировать работу и гидротурбины за счет аккумуляторной батареи (рис. 6), то потери электрической энергии сократятся до 9 МВт·ч, экономия составит 1 МВт·ч. Увеличивая мощность гидротурбины, можно сократить потери электрической энергии и свести их к минимуму, но в этом случае потребуется аккумуляторная батарея емкостью в 4–5 раз больше.

Аналогичным образом можно стабилизировать и работу насосов, но в этом случае многократные ежедневные циклы заряда–разряда аккумуляторной батареи существенно сократят срок ее службы.

Стабилизировать работу дизель-генераторов с помощью аккумуляторной батареи не имеет смысла. Потери энергии при каждом цикле заряда–разряда аккумуляторной батареи сопоставимы со снижением эффективности дизельных двигателей при работе на частичных нагрузках. Суммарный положительный эффект от такой комбинации будет несущественным.

Балансировка нагрузки в электрической сети со стороны потребления

По мере роста доли использования ВИЭ потери электрической энергии будут расти до тех пор,

пока сети не получат высокоэффективные системы аккумулирования энергии большой емкости. Поэтому сегодня целесообразно рассмотреть потенциальные возможности балансировки нагрузки и со стороны потребления. Исследования в этом направлении ведутся активно [19–22], и прежде всего следует отметить одну из последних разработок в этом направлении – проект Gamma, который находится уже в стадии опытной эксплуатации (рис. 7) [22].

Современные информационные технологии позволяют эффективно управлять отдельными группами активных потребителей, и это можно использовать для балансировки нагрузки в электрической сети со стороны потребления, что и реализовано в проекте Gamma. Однако его авторы рассматривают в качестве активных потребителей в основном децентрализованные электростанции малой мощности и зарядные станции для электромобилей. Несомненно, это – существенный шаг вперед и возможности этой группы потребителей нужно обязательно использовать, но это такие же аккумуляторные батареи, которые были рассмотрены в предыдущем разделе, с теми же недостатками. Нет особой разницы, где расположена аккумуляторная батарея: на самой электростанции, как это реализовано в проекте Gorgona del Viento, или это большое количество автономных аккумуляторных батарей, находящихся в домах потребителей. Для эффективного решения задачи балансировки нагрузки со стороны потребления следу-

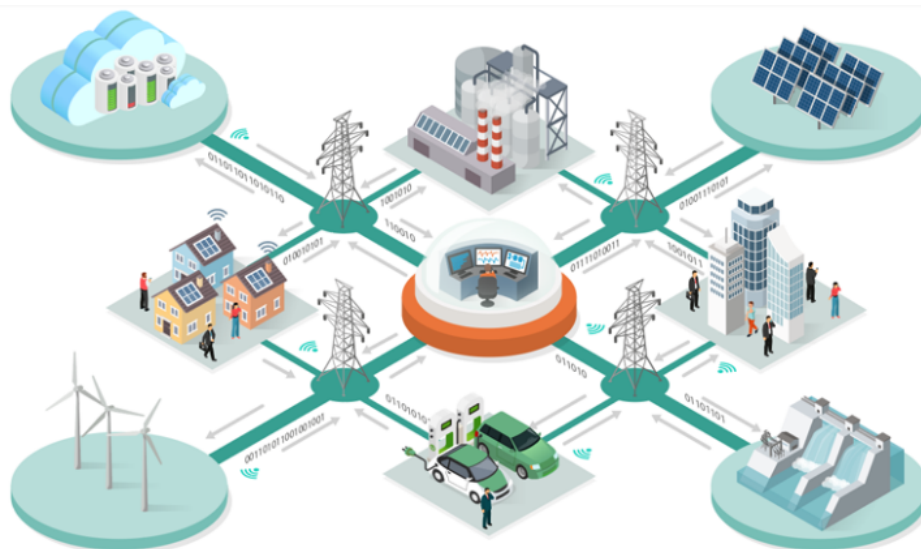


Рис. 7. Принципиальная схема проекта Gamma балансировки нагрузки в сети с высокой долей использования ВИЭ [22]

ет расширить круг возможных активных потребителей.

Промышленность и население помимо электрической энергии постоянно нуждается в тепловой энергии. Причем потребность в тепловой энергии зачастую существенно превышает потребности в электроэнергии. Население острова El Hierro – около 10 тысяч человек. По санитарным нормам Испании минимальный расход горячей воды на бытовые нужды должен быть не менее 28 литров на человека в день. Следовательно, суммарная потребность в горячей воде для жителей острова составляет, как минимум, 280 м³. Для нагрева такого количества воды до температуры 60 °С требуется не менее 13 МВт·ч энергии. Причем это только потребность в тепловой энергии частных домохозяйств. Если к этому добавить необходимость обеспечения горячей водой школ, больниц, спортивных центров, гостиниц и промышленных предприятий, то потребуются тепловой энергии не менее 20 МВт·ч.

Для нагрева воды в частных домах обычно используется электроэнергия, природный газ или солнечная энергия. И даже при наличии у таких потребителей солнечных панелей все они имеют резервные электронагреватели и резервуары горячей воды. Отличительной особенностью данной группы потребителей является то, что они не требуют постоянной работы. Все они включаются или отключаются хаотично в произвольный момент времени. Прерывистость их работы не влияет на выполнение конечной функции нагрева воды. Также к данной группе активных потребителей можно отнести различные компрессорные холодильные машины, которые оснащены аккумуляторами холода или резервуарами холодного теплоносителя. Их тоже можно отключать в любой момент без ущерба для выполнения целевого назначения.

С целью исследования различных стратегий балансировки нагрузки в электрической сети авторами была разработана математическая модель на базе программного комплекса SciLab, позволяющая смоделировать динамические характеристики гибридной электростанции Gorona del Viento.

Первая стратегия балансировки нагрузки предусматривает осреднение колебаний нагрузки электрической сети (рис. 8). Эта стратегия идеально подходит для варианта с применением аккумуляторных батарей. Моделирование работы гибридной электростанции было проведено для условий использования аккумуляторной батареи мощностью 650 кВт и емкостью 3 МВт·ч.

В первом варианте моделирование производилось при условии работы только дизель-генераторов, которые работали постоянно на номинальном режиме с максимальной эффективностью. В конечном итоге достигнутый положительный эффект получился незначительным. Экономия топлива составила менее 0,1 %. Кроме этого, как видно из рис. 9а, за одни сутки переключение аккумуляторной батареи с режима заряда на режим разряда происходило более 15 раз, что приведет в итоге к существенному снижению ее срока службы. Поэтому использование аккумуляторных батарей в подобных условиях неэффективно. Баланс емкости аккумуляторной батареи представлен на рис. 9б.

Другой вариант стратегии балансировки нагрузки в сети предусматривает использование части электрической энергии, вырабатываемой дизель-генераторами, на собственные нужды дизелей. По данным официального отчета компании Endesa [7] эта часть составляет около 5 %, большая часть из которых идет на работу элементов системы охлаждения самих дизельных двигателей. Соответственно, при суммарной мощности двигате-

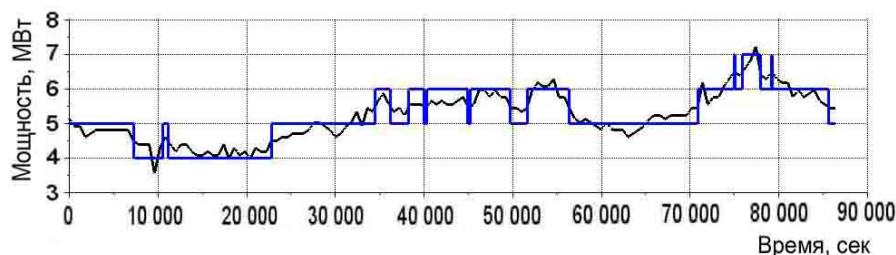


Рис. 8. Сглаживание колебаний нагрузки в сети по средней линии

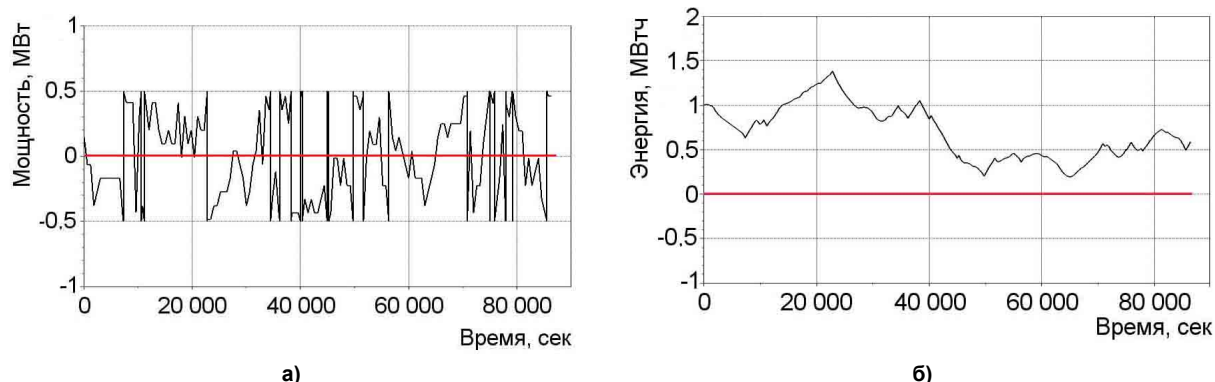


Рис. 9. Цикличность заряда – разряда (а) и баланс (б) аккумуляторной батареи

лей 6 МВт суммарная мощность вентиляторов сухих градирен системы охлаждения дизель-генераторов составит около 200 кВт. При наличии в системе аккумулятора холодной воды емкости объемом 3–4 м³ вентиляторы можно отключать при повышении нагрузки в сети и, наоборот, включать при снижении нагрузки. Тем самым, как показывают расчеты, эффективность системы будет повышена на 2 %, а экономия топлива для дизелей составит около 1 тонны в сутки.

Конечно, мощности только вентиляторов будет недостаточно для идеального варианта балансировки, но если к этому добавить оборудование систем отопления, вентиляции и кондиционирования крупных торговых и социальных объектов, то суммарная мощность может достигнуть до 500 кВт, что станет вполне достаточно для балансировки нагрузки. Более подробно подобная схема балансировки нагрузки в электрической сети со стороны потребления изложена в [8].

В условиях, когда мощность ВИЭ превышает суммарную мощность потребителей, целесообразно применить другую стратегию путем искусственного завышения спроса. С целью снижения потерь необходимо как можно больше электрической энергии направить потребителям. Однако в этом случае целесообразно выравнивать не нагрузку в сети, а разницу между мощностью ВИЭ и нагрузкой в сети. Эту стратегию проиллюстрируем реальными данными работы гибридной электростанции *Gorona del Viento* в уже рассмотренном выше интервале времени с 9 по 12 ноября 2019 года (рис. 10).

Проведенное моделирование показывает, что в результате балансировки нагрузки в электрической сети за счет использования активных потребителей по сравнению с реальными данными, которые представлены на рис. 4, удалось снизить безвозвратные потери электроэнергии с 52,57 до 43,25 МВт·ч. Дополнительно активным потребителям может быть направлено 15,67 МВт·ч электроэнергии для нагрева воды, что в свою очередь позволит сократить расход природного газа на ~ 1800 м³.

Аналогичным образом можно достичь снижения потерь электроэнергии в результате балансировки нагрузки гидравлической турбины с использованием активных потребителей (см. рис. 6).

Технически балансировка нагрузки на стороне спроса может быть реализована с использованием технологии виртуальной электростанции [23]. Эта технология уже получила широкое применение [24–26]. Однако большинство проектов виртуальных электростанций реализовано только для локальных энергосетей, где реакция на включение или отключение отдельного активного потребителя электроэнергии имеет почти мгновенный характер. В случае же работы в распределенной сети включение или отключение отдельного активного потребителя будет происходить с определенной задержкой во времени, что негативно скажется на суммарной эффективности подобной системы.

Поэтому для такой ситуации целесообразно применить иерархическую систему подключения активных потребителей. В каждой группе актив-

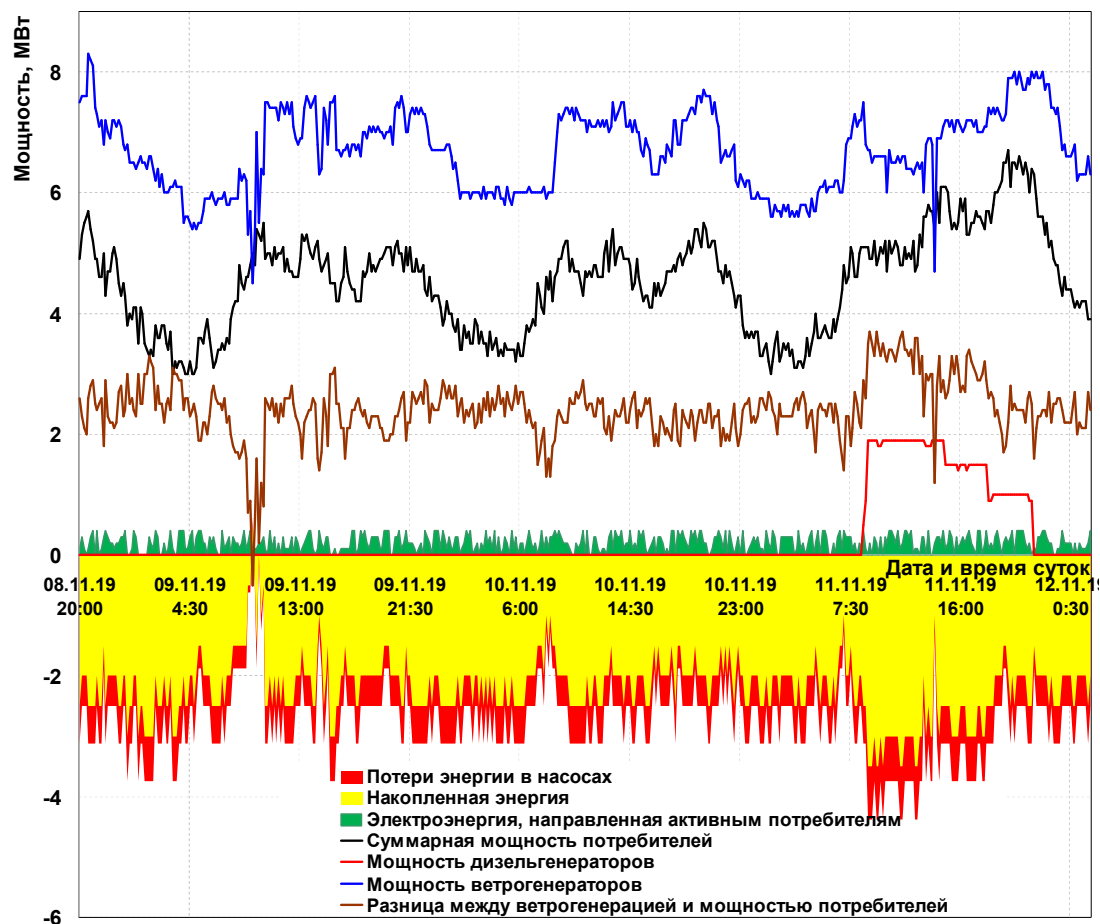


Рис. 10. Моделирование стратегии использования активных потребителей для балансировки нагрузки в сети с использованием реальных данных работы электростанции Gorona del Viento в период с 9 по 12 ноября 2019 года

ных потребителей, расположенных на небольшой территории, должен быть хотя бы один активный потребитель достаточно большой мощности с возможностью плавной ее регулировки. Его включение и отключение даст необходимую быструю реакцию электрической сети. По мере включения более мелких активных потребителей потребитель большой мощности должен постепенно снижать свою мощность.

Таким образом, система сможет задействовать большое количество активных потребителей и одновременно обеспечить быструю реакцию в распределенной сети. В качестве главного активного потребителя в группе можно использовать оборудование систем отопления, вентиляции и кондиционирования, например, крупного торгового центра или отеля, расположенного в данном районе, а в качестве более мелких активных потребителей – бытовые маломощные водонагревательные приборы частных домов и квартир. Подобная структура с одним потребителем большой мощности и множеством маломощных активных потребителей обеспечит балансировку нагрузки в электрической сети, что позволит получить максимальную экономическую эффективность.

Выводы

1. Детальное изучение опыта эксплуатации гибридной электростанции Gorona del Viento имеет важное значение для развития возобновляемой энергетики в целом. После того как на этой электростанции была достигнута высокая доля использования ВИЭ в общем балансе производства электрической энергии, необходимость балансировки нагрузки, как со стороны генерации, так и потребления, стала весьма актуальной. В противном случае потери электрической энергии будут продолжать расти практически пропорционально доле использования ВИЭ. Таким образом, конечная цель – 100%-ный переход на ВИЭ – никогда не будет достигнута.

2. Для балансировки нагрузки со стороны генерации необходимо создать эффективные и недорогие системы аккумулирования энергии. К сожалению, существующие технологии имеют низкие показатели эффективности либо очень высокую стоимость.

3. Балансировка нагрузки в электрической сети со стороны потребления является наиболее перспективной. Оборудование, которое может быть при этом задействовано, имеет значительно меньшую стоимость и более высокие показатели эффективности.

Кроме этого, такой метод позволит существенно расширить область использования ВИЭ и сократить применение традиционных видов органического топлива со снижением выбросов CO₂ в атмосферу.

4. Для балансировки нагрузки в электрической сети со стороны потребления целесообразно использовать технологию виртуальных электростанций.

Литература/References

1. Farhoodnea M., Mohamed A., Shareef H., Zayandehroodi H. Power Quality Impact of Renewable Energy Based Generators and Electric. *Procedia Technology*, 2013, vol. 11, pp. 11–17. DOI: 10.1016/j.protcy.2013.12.156
2. Bevrani H., Ghosh A., Ledwich G. Renewable energy sources and frequency regulation: Survey and new perspectives. *IET Renewable Power Generation*, 2010, vol. 4, iss. 5, pp. 438–457. DOI: 10.1049/iet-rpg.2009.0049
3. Эффективное использование возобновляемых источников энергии [*Effektivnoe ispol'zovanie vozobnovlyaemykh istochnikov energii* [Efficient use of renewable energy sources]]. Available at: <https://alternativenergy.ru/energiya/758-effektivnoe-ispolzovanie-vozobnovlyaemyh-istochnikov-energii.html> (accessed 05.02.2020).
4. Остров зеленой энергетики [*Ostrov zelenoy energetiki* [Green Energy Island]]. Available at: <https://tenergy.livejournal.com/58060.html> (accessed 12.01.2020).
5. *Informe Central Hidroelica 2018 – Gorona-del-Viento. El Hierro*. Available at: <http://www.goronadelviento.es/wp-content/uploads/2019/05/Informe-anual-Central-Hidroelica-2018-Gorona-del-Viento.pdf> (accessed 01.07.2019).
6. Garcia Latorre F.J., Quintana J.J., de la Nuez I. Technical and economic evaluation of the integration of a wind-hydro system in El Hierro island. *Renewable Energy*, 2019, vol. 134, pp. 186–193. DOI: 10.1016/j.renene.2018.11.047
7. *Declaración Ambiental Enero-Diciembre 2.018 CD Llanos Blancos*. Endesa, APODERADO Llanos Blancos, 2019. 47 p.
8. Novykh O., Méndez Pérez J.A., González-Díaz B., Sviridenko I. Performance analysis of hybrid hydroelectric gorona del viento and the basic directions of its perfection. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 2019, vol. 17, pp. 489–494. DOI: 10.24084/repqj17.353
9. Riechmann, Jorge. *Gorona del Viento y la transición energética: ¿qué cabe esperar?* Available at: <https://www.15-15-15.org/webzine/2016/08/01/gorona-del-viento-y-la-transicion-energetica-que-cabe-esperar/> (accessed 10.12.2019).
10. Abdi H., Mohammadi-ivatloo B., Javadi S., Reza Khodaei A., Dehnavi E. Energy Storage Systems. *Distributed Generation Systems: Design, Operation and Grid Integration*, 2017, pp. 333–368. DOI: 10.1016/B978-0-12-804208-3.00007-8
11. Díaz-González F., Sumper A., Gomis-Bellmunt O., Villafáfila-Robles R. A review of energy storage technologies for wind power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, vol. 16, iss. 4, pp. 2154–2171. DOI: 10.1016/j.rser.2012.01.029
12. Joseph A., Shahidepour M. Battery storage systems in electric power systems. *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2006, pp. 8. DOI: 10.1109/PES.2006.1709235
13. Morgan R., Stuart N., Emma G., Gareth B. Liquid air energy storage – Analysis and first results from a pilot scale demonstration plant. *Applied Energy*, 2015, vol. 137, pp. 845–853. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.07.109
14. Poonpun P., Jewell W. Analysis of the cost per kWh to store electricity. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, vol. 23, pp. 529–534. DOI: 10.1109/TEC.2007.914157
15. Arias J., Calle M., Turizo D., Guerrero J., Candelo-Becerra J.E. Historical load balance in distribution systems using the branch and bound algorithm. *Energies*, 2019, vol. 12, iss. 7, 1219. DOI: 10.3390/en12071219
16. Sicchar J.R., Da Costa Jr.C.T., Silva J.R., Oliveira R.C., Oliveira W.D. A Load-Balance System Design of Microgrid Cluster Based on Hierarchical Petri Nets. *Energies*, 2018, vol. 11, iss. 12, 3245. DOI: 10.3390/en11123245
17. Kim T.-Y., Sung-Bae C. Predicting residential energy consumption using CNN-LSTM neural networks. *Energy*, 2019, vol. 182, pp. 72–81. DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.230
18. *Baterías como aliados del agua para producir energía eléctrica más limpia en Canarias*. Available at: <http://rac-ciencias.org/wp/wp-content/uploads/2019/05/ZZJose-Manuel-Valle-1.pdf> (accessed 14.03.2020).
19. Применение технологии управления спросом на электроэнергию. Цифровая подстанция [*Primenenie tehnologii upravleniya sprosom na jelektroenergiju. Cifrovaja podstancija* [The application of electricity demand management technology. Digital substation]]. Available at: <http://digitalsubstation.com/blog/2019/11/07/primenenie-tehnologii-upravleniya-sprosom-na-elektroenergiju/> (accessed 14.03.2020).
20. Muralitharan K., Sakthivel R., Shi Y. Multiobjective optimization technique for demand side management with load balancing approach in smart grid. *Neurocomputing*, 2016, vol. 177, pp. 110–119. DOI: 10.1016/j.neucom.2015.11.015

21. Costanzo G.T., Zhu G., Anjos M.F., Savard G. A System Architecture for Autonomous Demand Side Load Management in Smart Buildings. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, vol. 3, iss. 4, pp. 2157–2165. DOI: 10.1109/TSG.2012.2217358

22. *Nace el proyecto piloto Gamma, un laboratorio demostrador de la gestión digitalizada de la energía*. Available at: <https://www.smartgridsinfo.es/2020/03/06/nace-proyecto-piloto-gamma-laboratorio-demostrador-gestion-digitalizada-energia> (accessed 22.02.2020).

23. Novykh A.V., Sviridenko I.I., Gogolev G.V. Improving the Efficiency of a Hybrid Electric Power Plant by Means of a Virtual Power Plant. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 87–96. (in Russ.). DOI: 10.14529/power190210

24. Osório G.J., Shafie-khah M., Carvalho G.C.R., Catalão J.P.S., Osório G.J. Analysis Application of Controllable Load Appliances Management in a Smart Home. *Energies*, 2019, vol. 12, 3710. DOI: 10.3390/en12193710

25. Liu J., Li M., Fang F., Niu Y. Review on virtual power plants. *Chinese Society for Electrical Engineering*, 2014, vol. 34, no. 29, pp. 5103–5111. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.29.012

26. Ropuszynska-Surma E., Weglarz M. A virtual power plant as a cooperation network. *Marketing and Management of Innovations*, 2018, vol. 4, pp. 136–149. DOI: 10.21272/mmi.2018.4-13

Новых Александр Владимирович, канд. техн. наук, докторант, департамент «Индустриальная инженерия», Университет Ла-Лагуна, г. Сан-Кристобаль-де-ла-Лагуна, о. Тенерифе, Испания; alexandr.novykh@gmail.com.

Хуан Албино Мендес Перез, PhD, профессор, департамент «Информационная инженерия и системы», Университет Ла-Лагуна, г. Сан-Кристобаль-де-ла-Лагуна, о. Тенерифе, Испания; jamendez@ull.edu.es.

Бенжамин Гонзалез-Диаз, PhD, профессор, департамент «Индустриальная инженерия», Университет Ла-Лагуна, г. Сан-Кристобаль-де-ла-Лагуна, о. Тенерифе, Испания; bgdiaz@ull.edu.es.

Свириденко Игорь Иванович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Энергоустановки морских судов и сооружений», Морской институт, Севастопольский государственный университет, г. Севастополь; i.sviridenko@mail.ru.

Гоголев Геннадий Вениаминович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Энергоустановки морских судов и сооружений», Морской институт, Севастопольский государственный университет, г. Севастополь; ggogolevsgu@mail.ru.

Тимофеев Вячеслав Алексеевич, старший преподаватель кафедры «Энергоустановки морских судов и сооружений», Морской институт, Севастопольский государственный университет, г. Севастополь; sevastim@mail.ru.

Поступила в редакцию 5 июня 2020 г.

DOI: 10.14529/power200307

REDUCING HYBRID POWER PLANT POWER LOSSES BY BALANCING THE LOAD IN THE NETWORK ON THE GENERATION AND CONSUMPTION SIDE

A.V. Novykh¹, alexandr.novykh@gmail.com,

Ju.A. Méndez Pérez¹, jamendez@ull.edu.es,

B. González-Díaz¹, bgdiaz@ull.edu.es,

I.I. Sviridenko², i.sviridenko@mail.ru,

G.V. Gogolev², ggogolevsgu@mail.ru,

V.A. Timofeev², sevastim@mail.ru

¹ University of La Laguna, San Cristobal de La Laguna, Spain,

² Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

An increase in the share of renewable energy sources characterized by intermittent generation leads to a decrease in the quality of electricity and the need to balance the load on the network. The methods used today for balancing the load on the generation side, as well as the use of energy storage technology, do not always

provide an effective solution to the balancing problem. This is especially evident when traditional generators are transferred from the base load electricity sources to the reserve ones. The main issue is the increased electric energy losses due to the low efficiency of the power storage technology. Using the most advanced hybrid power plant Gorona del Viento (El Hierro island, Canary archipelago, Spain), which includes traditional and renewable energy sources, as reference, we are describing the methods of balancing the load on the network, which includes balancing, both the electricity generation and consumption. Using the calculation models of the hybrid power plant operating modes, the possibility of implementing various load balancing strategies on the consumption side has been demonstrated, their features have been analyzed, their effectiveness in reducing energy losses has been demonstrated.

Keywords: hybrid power plant, renewable energy sources, load balancing, power losses, energy storage device, energy intensive consumer.

Received 5 June 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Снижение потерь гибридной электростанции балансировкой нагрузки в сети со стороны генерации и потребления / А.В. Новых, Х.А. Мендес Перез, Б. Гонзалез-Диаз и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 65–77. DOI: 10.14529/power200307

FOR CITATION

Novykh A.V., Méndez Pérez Ju.A., González-Díaz B., Sviridenko I.I., Gogolev G.V., Timofeev V.A. Reducing Hybrid Power Plant Power Losses by Balancing the Load in the Network on the Generation and Consumption Side. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 65–77. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200307
