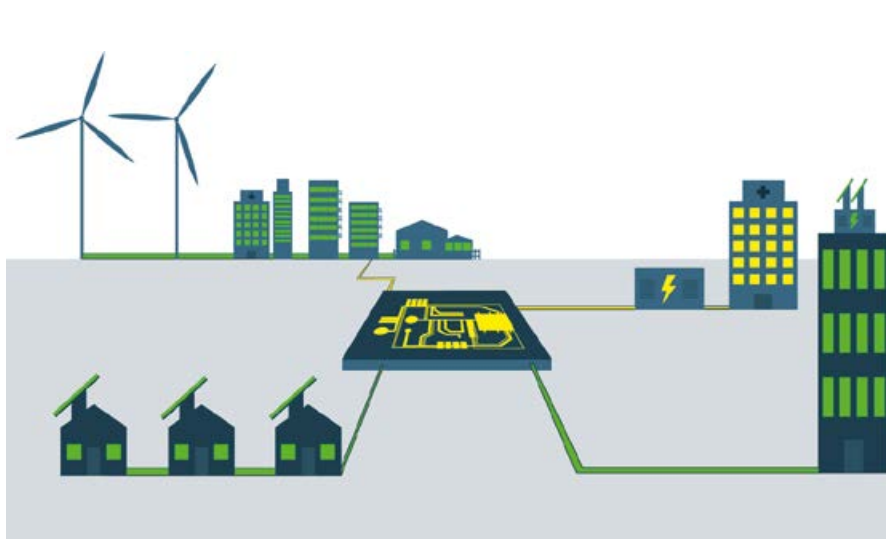




Обзор существующих решений по интеллектуализации энергосистем с ВИЭ в мире и анализ их применения в России

Вступление

Микросеть — это небольшая по своему масштабу энергосистема с разнообразной конфигурацией выработки и распределения электроэнергии (в некоторых случаях используется и тепловая энергия). Такая система состоит из комбинации генераторов, нагрузок, систем преобразования энергии, систем мониторинга и автоматизации (АСУ ТП). Микросеть может быть рассмотрена в двух вариациях, а именно сетевой и островной. Данная классификация применяется по всему миру, и к каждой из вариаций требуется свой собственный подход. Научный и практический интерес к созданию микросетей наблюдается с конца 1990-х годов (в России с конца 2000-х). Это произошло из-за бурного развития возобновляемой энергетики, как в РФ, так и за границей.

Кроме того, на рынке появились эффективные и стабильные решения для смягчения колебаний мощности и частоты в сети и для усиления устойчивости сети. Гибкость интеграции ресурсов, экономическая эффективность и общая ценовая доступность являются причинами повышенного внимания к микросетям.

В данном исследовании авторы уделяют основное внимание обзору существующих решений по микросетям в энергетике по всему миру. В основном рассматриваются такие аспекты, как проектирование, внедрение, пусконаладочные работы (ПНР), тестирование и эксплуата-

ция, техническое обслуживание. Помимо вышеперечисленного, в последнее время микросети обсуждаются с точки зрения схем и конфигураций источников, проникновения ресурсов (в случаях применения генерации на основе ископаемых видов топлива), политики и стандартов, государственной поддержки и экономического анализа. Однако в данной статье будут рассмотрены в основном технические аспекты внедрения таких систем [1].

«Дорожная карта» развития микросетей будущего

Гибкость и устойчивость работы микросети может быть использована для жизнеспособного планирования и проектирования. Таким образом, будут достигаться доступность по цене, безопасность, повышенная эффективность использования и экономическая эффективность, а также снижение воздействия на окружающую среду. Для инженеров-проектировщиков гораздо более важна техническая эффективность при эксплуатации системы. Но любая технологическая эффективность обязательно должна подкрепляться достаточными экономическими показателями и быть рентабельна. Это подразумевает, что все люди, вовлечённые в проект (политики, проектировщики, эксплуатирующий персонал), должны чётко представлять проектные решения и их экономический эффект, чтобы связать расширение системы и её автоматизацию.

Рецензия эксперта на статью получена 15.09.2021 [The expert review of the article received on September 15, 2021].

УДК 620.92. Научная специальность: 05.14.08.

Обзор существующих решений по интеллектуализации энергосистем с ВИЭ в мире и анализ их применения в России

Ф. В. Молотов, аспирант; А. Г. Васков, к.т.н., доцент; Т. А. Шестопалова, к.т.н., заведующая кафедрой «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии», Московский энергетический институт (НИУ «МЭИ»)

В статье рассматриваются новые возможности и подходы к использованию и проектированию микросетей на основе ВИЭ. Дана оценка эффективности и экономической выгоды использования новейших подходов к реализации генераторного и управляющего оборудования, входящего в микросеть. Рассматриваются основные методы ведения проекта внедрения микросетей в локальную и изолированную энергосети.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, микросеть, «умная» сеть, ветряная электростанция (ВЭС), солнечная электростанция (СЭС).

UDC 620.92. Scientific specialty number: 05.14.08.

Review of existing solutions for the intellectualization of renewable energy sources in the world and analysis of their application in Russia

Ph. V. Molotov, postgraduate student; A. G. Vaskov, PhD, Associate Professor; T. A. Shestopalova, PhD, Head of the Department of "Hydropower and Renewable Energy Sources", Moscow Power Engineering Institute (MPEI)

The article discusses new opportunities and approaches to the use and design of micro-networks based on RES. The efficiency and economic benefits of using the latest approaches to the implementation of generator and control equipment included in the microgrid are evaluated. The main methods of project implementation of microgrids in local and isolated power grids are considered.

Key words: renewable energy sources (RES), microgrid, smart grid, wind power plant (WPP), solar power plant (SPP).



Всё это требует высокой заинтересованности и глубокой вовлечённости сторон. Выравнивание технической и технологической эффективности за счёт инноваций в технологиях с приемлемым уровнем модернизации с высокой отказоустойчивостью и стабильной работой системы неизбежно. Это же касается выбросов в окружающую среду и утилизации оборудования. Отдельное внимание нужно обратить на наличие и доступность ресурсов, а также на возможные ограничения их использования, при использовании, например, дизельных генераторов учитывается стоимость завоза топлива.

В отличие от иных генераторов, возобновляемые источники энергии (ВИЭ) не требуют постоянного завоза топлива (если речь идёт про солнечную и ветровую энергетику). В таком случае рассматривается только лишь завоз запчастей и комплектующих системы. Но на текущий момент технический потенциал установок ВИЭ сильно зависит от местности и в некоторых случаях невозможен для применения. Таким образом, развитие и применение ВИЭ в микросетях поднимает широкий спектр проблем [1].

Политика и управление финансами в этих процессах занимают далеко не последнюю роль. Для поддержки микросетей с ВИЭ государства Европы, Россия и некоторые другие страны принимают различные стимулирующие политики. Властями принимаются законы, по которым даётся приоритет выработки электроэнергии на ВИЭ, устанавливаются «зелёные» тарифы. В целом, в отдельных регионах России и некоторых странах Европы генерация электроэнергии на возобновляемых источниках носит чисто дотационный характер.

В связи с особенностями генерации и потребления электроэнергии в микросетях, в которых большую роль играют график потребления, характер потребления и быстрая изменения нагрузки, согласование на уровнях техники и политики может быть осложнённым. В разработке концеп-

Гибкость и устойчивость работы микросети может быть использована для жизнеспособного планирования и проектирования. Таким образом, будут достигаться доступность по цене, безопасность, повышенная эффективность использования и экономическая эффективность, а также снижение воздействия на окружающую среду

ции (политики) микросети имеется два подхода: нисходящий и восходящий.

Восходящий подход в основном имеет дело с индивидуальным потребительским спросом, ожиданиями, адаптацией сети, гибкостью, контролем и т.д. Обычно отдельные клиенты стремятся гарантировать свой контроль и участие на оптовых рынках на индивидуальной основе или через розничных торговцев коммунальными услугами, особенно отдельные поколения, привязанные к сетям. В то же время интерес к контролю оптовых рынков может варьироваться от общества к обществу из-за культуры, экономики, правил, политики, осведомлённости и, что более важно, местного участия [1]. Другое дело, что в микросетях в основном потребителями являются частные лица, реже предприятия или же коммунальные службы, что особенно важно в тех случаях, когда микросеть является изолированной. Здесь, поскольку нет выдачи электроэнергии в объединённую энергетическую систему, как такового оптового рынка электроэнергии нет, поэтому используются другие механизмы расчёта между генерацией и потреблением.

Нисходящий подход фокусируется на национальном и региональном уровнях, которые решают глобальные задачи и задачи в рамках мер по охране окружающей среды, экономики и мира. Согласование этих двух основных факторов может обеспечить приемлемую политику устойчивого развития микросетях. Можно сделать вывод от том, что нисходящий подход идёт от государства, а восходящий — от технической составляющей. Точка пересечения этих подходов и является точкой с оптимальными параметрами микросети.



План проектирования и реализации микросети

В европейской практике создания микросетей была выработана специальная методика по оценке условий реализации и их дальнейшему проектированию, а также и воплощению в жизнь проектов. Она состоит из нескольких этапов.

1. Этап технико-экономической оценки

Этот этап выступает в качестве подготовительного для остальных этапов, в то же время он носит важную роль формирования концептуализации проекта и применяемых решений в следующих этапах.

Основные факторы являются по сути исходными данными по местности и состоянию энергосистемы: существующая генерация; текущая система управления энергией; доступная целостность и расширяемость; структура сети по генерации; профиль нагрузки и скорость изменения; отказоустойчивость.

Технически расширение микросети за счёт адаптации новых технологий и распределённой генерации с разнонаправленными потоками может столкнуться с планировщиками и операторами в надёжной работе в режиме реального времени

ведение анализа прогноза достаточной нагрузки через потенциальный спрос с учётом неопределённости и изменения климата, темпов роста и моделью потребления электроэнергии является необходимостью.

3. Этап модернизации и интеграции

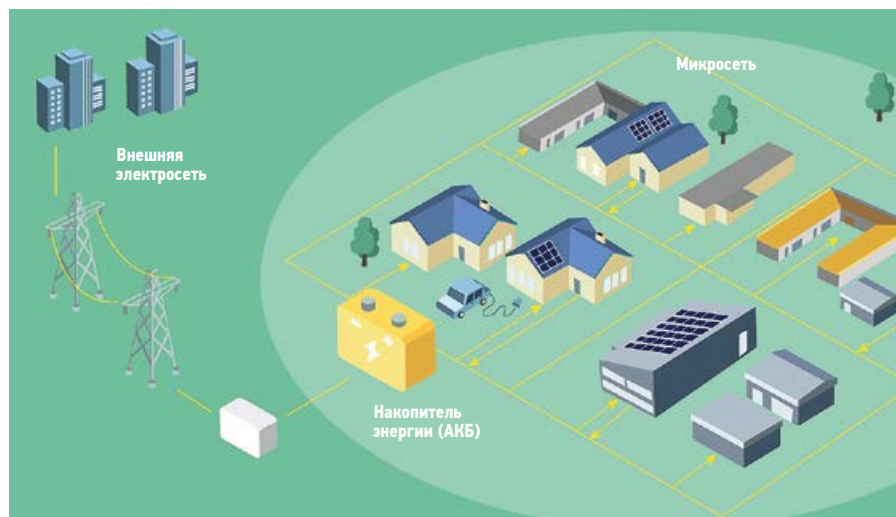
На данном этапе проводится предварительное исследование существующей инфраструктуры на предмет существующей инфраструктуры для оценки имеющихся вариантов расширения. Энергоэффек-

тивность и надёжность имеют дело с критическим состоянием системы (пиковой нагрузкой, разнообразием спроса и генерации).

4. Этап проектирования и моделирования

Моделирование на основе проектирования возможных проблем (стихийных бедствий, непредвиденных аварий, физических или кибератак, проблем информационной безопасности) является важным измерением, которое в некоторых случаях учитывается при проектировании и внедрении микросетей. В микросетях могут проводиться моделирования следующих негативных факторов:

- поток нагрузки (разнонаправленный со смешанной генерацией);
- анализ адаптивности и совместимости элементов микросети;
- анализ стабильности мощности и напряжения (в существующих линейных и нелинейных источниках);
- анализ короткого замыкания в различных точках системы;
- возможность проведения контроля параметров (напряжение и частота в зависимости от спроса/генерации);
- возможность развития автоматизации — автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) верхнего уровня и применение системы сбора и передачи технологической информации (ССПТИ);
- соответствие основным принципам устойчивого развития;
- характеристика ресурса генерации;
- предложение механизма экономической эффективности (отключение электрической энергии).



2. Этап планирования

Технически расширение системы за счёт адаптации новых технологий и распределённой генерации с разнонаправленными потоками может столкнуться с планировщиками и операторами в надёжной работе в режиме реального времени. Одним из важнейших этапов принятия решений на этапе планирования является определение размера микросети с учётом параметров инвестиций и потребления конечным пользователем [1]. Завышенная или заниженная величина системы может привести к плохой работе, неудовлетворённости клиентов, неоправданно дорогим отправка топлива и комплектующих. Также это может повысить стоимость системы не только в следствие эксплуатационных расходов, но и на этапе капиталовложения при строительстве. По вышеперечисленным причинам про-



5. Инновации и стадия реализации

Постепенная эволюция микросети и добавление новых функций в течение длительного времени с учётом технико-экономической эффективности и надёжности могут иметь ряд нюансов. Экономическая эффективность состоит из двух этапов: микросетевая структура (эксплуатация и генерация), распределение и сбыт (включая управление энергией, сброс нагрузки и т.д.).

По данным американской Национальной лаборатории ВИЭ (NREL), увеличение экономической ценности повышает экономическую эффективность и снижает стоимость жизненного цикла. Оптимизация работы подобной системы — важное решение во время и после модернизации микросети. Оно может применяться с точки зрения производства и потребления энергии, безопасности, эффективности и общей устойчивости, в том числе быть кибербезопасной [1].

6. Эксплуатация и техническое обслуживание

Анализ стоимости жизненного цикла системы включает следующие сегменты: начальный, эксплуатационный, ремонтный, запасной, простой, потери, техническое обслуживание (корректирующее, профилактическое и прогнозирующее) и затраты на утилизацию. Правильное и своевременное техническое обслуживание обеспечивает длительный срок службы всей системы. Кроме того, оно определённо улучшает энергоэффективные характеристики системы, снижает риск различных уровней повреждений, требующих ремонта или замены в будущем.

Концепция работы микросети

Для возможности разграничения управления сегментами микросети во многих странах мира используется иерархическая схема. По данным Министерства энергетики США (DoE), алгоритмы управления микросетью размещаются в разных слоях с необходимым обменом информацией между ними, но с различными реакциями. Обычно рассматривается трёхуровневая иерархия, включающая первичный, вторичный и третичный уровни управления [2].

Первичное (нижний уровень) управление осуществляется в локальных контроллерах, включая внутренние контуры управления напряжением и силой тока и контуры управления распределением мощности. Это обеспечивает стабильную работу и правильное распределение управления между ними.



Кроме того, для повышения качества питания системы и достижения точного распределения мощности могут быть разработаны вторичные подходы управления (средний уровень), которые действуют поверх первичных контуров управления путём отправки регулировочных и компенсационных ссылок.

Микросети являются высокоинтеллектуальными системами, к которым требуется очень внимательный и проработанный подход, и тогда такие системы призваны оптимально использовать энергетические ресурсы, в том числе и возобновляемые. Микросеть может быть полностью автоматизирована

На третичном уровне (верхний уровень) могут быть применены функции оптимизации и принятия решений, которые дают оптимальные уставки контроллерам более низкого уровня, обеспечивая интеллектуальную и более эффективную работу всей системы. Кроме того, синхронизация и перепоключение с внешними сетями основаны на сотрудничестве между вторичным и третичным уровнями. Центр диспетчеризации электроэнергии использует данные ВЭС, СЭС и прогноза нагрузки, представленные каждой системой, для формирования плана диспетчеризации [3].

Благодаря достижениям в области информационно-коммуникационных технологий реализация вышеупомянутых уровней управления может воплощаться в жизнь с помощью централизованного управления.

Выводы

Проведя крупный анализ и собрав основные решения и подходы к проектированию микросетей по всему миру, можно сделать выводы о том, что проблемой оптимальной работы таких систем активно занимаются. Микросети являются высокоинтеллектуальными системами, к которым требуется очень внимательный и проработанный подход, и тогда такие системы призваны оптимально использовать энергетические ресурсы, в том числе и возобновляемые. Микросеть при соответствующем подходе может быть полностью автоматизирована или же объединена с другими микросетями, образуя энергетический кластер.

Для полноценного анализа энергоэффективности и экономичности подхода к построению микросетей, описанного в статье, требуется реализация на основе физико-математической модели с применением минимум двух уровней управления процессами. Для полноценной интеллектуализации необходимо учитывать много факторов и предусмотреть защитные и противоаварийные алгоритмы. ●

1. Danish M.S.S., Matayoshi H., Howlader H.R., Chakraborty S., Mandal P., Senjyu T. Microgrid planning and design: resilience to sustainability. 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia 2019). Bangkok, Thailand. 2019. Pp. 253–258.
2. Meng L., Savaghebi M., Andrade F., Vasquez Ju.C., Guerrero Jo.M., Graells M. Microgrid central controller development and hierarchical control implementation in the intelligent microgrid lab of Aalborg University. 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2015). Charlotte, NC (US). 2015. Pp. 2585–2592.
3. He L., Wei Zh., Yan Hai, Xv Kang-Yi, Zhao Meng-yu, Cheng Sh. A day-ahead scheduling optimization model of multi-microgrid considering interactive power control. 2019 International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG 2019). Yichang, China. 2019. Pp. 666–669.

[References — see page 78.](#)

[Review of existing solutions for the intellectualization of renewable energy sources in the world and analysis of their application in Russia. Pp. 58–61.](#)

Philip V. Molotov, postgraduate student; **Alexey G. Vaskov**, PhD, Associate Professor; **Tatiana A. Shestopalova**, PhD, Head of the Department, the Department of "Hydropower and Renewable Energy Sources", Moscow Power Engineering Institute (MPEI)

1. M.S.S. Danish, H. Matayoshi, H.R. Howlader, S. Chakraborty, P. Mandal, T. Senjyu. Microgrid planning and design: resilience to sustainability. 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia 2019). Bangkok, Thailand. 2019. Pp. 253–258.
2. L. Meng, M. Savaghebi, F. Andrade, Ju.C. Vasquez, Jo.M. Guerrero, M. Graells. Microgrid central controller development and hierarchical control implementation in the intelligent microgrid lab of Aalborg University. 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2015). Charlotte, NC (US). 2015. Pp. 2585–2592.
3. L. He, Zh. Wei, Hai Yan, Kang-Yi Xv, Meng-yu Zhao, Sh. Cheng. A day-ahead scheduling optimization model of multi-microgrid considering interactive power control. 2019 International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG 2019). Yichang, China. 2019. Pp. 666–669.