УДК 621.311
DOI: 10.53015/18159958_2025_21_2_3

АНАЛИЗ ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА ТЕХНОЛОГИИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

ANALYSIS OF FOREIGN EXPERIENCE IN DISTRIBUTEDGENERATIONTECHNOLOGY

©2025
Гладков Иван Николаевич[1,2], аспирант ОмГТУ, ассистент кафедры электроэнергетики, младший научный сотрудник филиала ТИУ в г. Тобольске
Горюнов Владимир Николаевич[1], доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий

Gladkov Ivan Nikolaevich[1,2], postgraduate student, assistant of the Department of Electric Power Engineering, junior research fellow of the TIU branch in Tobolsk
Goryunov Vladimir Nikolaevich[1], Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises

[1]Омский государственный технический университет, Омск (Россия)
[2]Тюменский индустриальный университет, Тобольск, (Россия)
[1]Omsk State Technical University, Omsk (Russia)
[2]Tyumen Industrial University, Tobolsk, (Russia)

E-mail: gladkovin@tyuiu.ru

Аннотация: Высокий уровень выбросов ввиду использования традиционных типов генерации (паровые турбины), работающих по принципу сжигания ископаемого топлива, а также исчерпаемость данного вида топлива ставит перед современной энергетикой большие вызовы по созданию устойчивой, экологичной и надежной системы электроснабжения. В свете данной проблемы наука и промышленность вынуждены искать новые способы обеспечения растущего спроса на электроэнергию. Чтобы решить столь серьезную проблему, энергетический сектор сосредоточился на технологии распределенной генерации, которая повышает качество, устойчивость и надежность электроснабжения, а также при возможности использования РГ на основе возобновляемых источников снижает выбросы в атмосферу, улучшая экологическую ситуацию. В данной обзорной статье проведен анализ и систематизация имеющихся исследований технологии распределенной генерации. Рассмотрено влияние источников распределенной генерации на традиционную энергосистему, свойства гибкости электрической сети при наличии в ней источников распределенной генерации, обозначены главные проблемы и вызовы, связанные с внедрением распределенной генерации в традиционные сети, а также приведены точки зрения заинтересованных сторон по данному вопросу, включая Международное энергетическое агентство.

Ключевые слова: распределенная генерация, возобновляемые источники энергии, микросеть, распределительные сети, интеграция источников распределенной генерации, распределенные энергоресурсы.

Для цитирования: Гладков, И.Н. Анализ зарубежного опыта технологии распределенной генерации / И.Н. Гладков, В.Н. Горюнов // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2025. – Т. 21, № 2 (78). – С. 3-13. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_2_3.

Abstract: High emissions from traditional fossil fuel-fired generation (steam turbines) and the exhaustibility of this type of fuel pose major challenges to the modern energy sector in creating a sustainable, environmentally friendly and reliable power supply system. In light of this problem, science and industry are forced to look for new ways to meet the growing demand for electricity. To solve such a serious problem, the energy sector has focused on distributed generation technology, which improves the quality, sustainability and reliability of electricity supply and, when using renewable DG, reduces emissions into the atmosphere, improving the environmental situation. This review article analyzes and systematizes the available research on distributed generation technology. We considered the impact of distributed generation sources on the traditional power system, the flexibility properties of the electric grid in the presence of distributed generation sources, identified the main problems and challenges associated with the introduction of distributed generation in traditional networks, and provided the views of stakeholders on this issue, including the International Energy Agency.

Keywords: distributed generation, renewable energy sources, microgrid, distribution networks, integration of distributed generation sources, distributed energy resources.

For citation: Gladkov, I.N. Analysis of foreign experience in distributed generation technology / I.N. Gladkov, V.N. Goryunov // Vesti of Higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2025. – Vol. 21, № 2 (78). – P. 3-13. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_2_3.

ВВЕДЕНИЕ

Интеграция нетрадиционных источников энергии (солнечных элементов, ветроэнергетических систем и топливных элементов) в распределительную сеть постоянно увеличивается с целью уменьшения загрязнения окружающей среды. За последние десятилетия, благодаря инновационным подходам, перестройке структуры коммунальных предприятий и пересмотру правил энергетического рынка, распределенная генерация (далее – РГ) стала важной и многообещающей областью в энергетическом секторе. Централизованные электростанции не способны удовлетворить общие потребности в электроэнергии, поскольку они не успевают адаптироваться к изменению в соответствии с требованиями потребителей из-за высоких затрат на выработку, передачу и распределение электроэнергии. В нынешних обстоятельствах РГ будет полезна для минимизации проблем с центральными электростанциями. Включение распределенных энергетических ресурсов в сеть одновременно уменьшит выбросы парниковых газов и снизит негативное воздействие на атмосферу. На данный момент РГ можно назвать децентрализованной электростанцией или малой электростанцией в диапазоне от 1 кВт до нескольких МВт, поскольку она варьируется в соответствии с различными типами применения. Надежность системы можно повысить за счет оптимального подбора ресурсов РГ.

РГ включает в себя следующие типы электростанций: ветроэлектростанции, солнечные электростанции на основе солнечных панелей, электростанции на использовании топливных элементов, биомассы, геотермальной энергии и т. д. Эти типы электростанций возобновляемой энергии способствуют уменьшению загрязнения окружающей среды, повышению качества напряжения, повышению надежности систем электроснабжения [1]. Источники РГ подключаются рядом с нагрузкой, что сокращает протяженность линий электропередач, следовательно, уменьшаются потери в линии, а также общая стоимость системы передачи. Популярность этих типов источников РГ особенно возрастает в Европе, Китае и США.

Развитие компонентов силовой электроники побуждает использовать различные распределенные энергоресурсы для проектирования микросетей с РГ, способных удовлетворить запрос потребителей, обеспечивая стабильное электроснабжение как при сетевой, так и при автономной работе. Вследствие использования импульсных преобразователей на уровне распределения электроэнергии возникают колебания напряжения и гармонические составляющие в системе электроснабжения [2] как одно из негативных последствий внедрения РГ, что

создает ряд проблем для внедрения данной технологии в энергосистемы.

Другая проблема, связанная с возобновляемыми ресурсами, заключается в их случайном характере выработки энергии, что может привести к изменениям силы электрического тока из-за таких факторов, как сопротивление линий электропередачи и дисбаланс разнопеременных нелинейных нагрузок, подключенных к сети. Помимо этих негативных воздействий, источники РГ выполняют вспомогательные функции в распределительных системах для повышения качества электроэнергии за счет использования различных типов контроллеров в системах, подключенных к сети. Это также оказывает влияние на проектирование и работу распределительной сети как в экономическом, так и в практическом плане. Источники РГ вызывают интерес на электротехническом рынке.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью работы является анализ использования и внедрения различных технологий РГ на основе зарубежного опыта.

В соответствии с целью решались задачи:

1. Изучить влияние и преимущества РГ.
2. Проанализировать точки зрения заинтересованных сторон.
3. Изучить проблемы и вызовы, создаваемые технологией распределенной генерации.
4. Выявить преимущества внедрения распределенной генерации.
5. Систематизировать данные о влиянии распределенных источников энергии на традиционные энергоблоки.
6. Изучить аспекты РГ, последствия внедрения источников РГ.

АКТУАЛЬНОСТЬ

В настоящее время из-за использования большого количества ископаемого топлива уровень загрязнения окружающей среды быстро увеличивается. Чтобы решить столь серьезную проблему, энергетический сектор сосредоточился на технологии РГ, которая повышает качество, устойчивость и надежность электроснабжения. На рынке электроэнергии доступны различные виды ресурсов РГ. Чтобы снизить потери при передаче, источники РГ располагаются рядом с нагрузкой конечного потребителя.

РГ – это современная тенденция в электроэнергетическом секторе по созданию новых малых электростанций.

Большое количество исследований по данной тематике описывает широкий круг вопросов касаемо РГ, но узкая направленность отдельных исследований не дает возможным оценить общую картину по данному аспекту развития энергетики, в связи с этим возникает необходимость в систематизации научного знания. Нами проведена работа по обобщению, систематизации и выделению общих трендов развития современной технологии РГ на основе зарубежного опыта.

АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ АСПЕКТОВ ВНЕДЕНИЯ РГ

Исследования Международного энергетического агентства.

Проведенный нами анализ использования технологий РГ отразил положительное влияние от внедрения данной технологии:

– Технологии РГ на возобновляемых источниках энергии безвредны для экосистемы в отличие от традиционных технологий генерации [3].

– Технология снижает потребность в масштабных и дорогостоящих проектах новых линий электропередачи за счет расположения источника РГ вблизи потребителя [4].

– Использование источников РГ нивелирует ограничения, связанные с качеством электроэнергии [5].

– РГ стимулирует развитие современных энергетических технологий на основе возобновляемых источников энергии, а также способствует либерализации рынка электроэнергии [6].

С точки зрения заинтересованных сторон на РГ выделим следующие аспекты РГ:

– Снижает качество электроэнергии вследствие коммутационных режимов электросети и вызывает провалы мощности, снижение устойчивости работы электрических сетей и т. д.

– Генераторы малой мощности менее требовательны к инвестиционным и технологическим процессам: на установку источников РГ требуется меньше времени и инвестиций.

– РГ способна удовлетворить рост потребительского спроса.

– Регулирование рынка электроэнергии.

– Повышение надежности систем электроснабжения за счет наличия резервного источника, представленного источником РГ.

– Снижение доли экологических проблем за счет использования источников возобновляемой энергетики.

– Вследствие использования источников РГ повышается качество напряжения.

Видим, что по указанным причинам РГ меняет фокус с традиционных методов генерации на используемые в настоящее время технологии для удовлетворения нужд потребителей, таких как повышение качества напряжения для работы энергосистемы, подключенной к РГ, и оптимизация потребления энергии для тех отраслей, в которых уже высокий спрос на электроэнергию. На внедрение РГ влияют и некоторые негативные последствия традиционных технологий, например, необходимость высоких инвестиций, неэкологичность, использование невозобновляемых источников энергии [7, 8].

Проблемы и вызовы. В современных энергетических сетях жизненно важно сохранять баланс потребляемой и генерируемой мощностей. Это включает такие аспекты, как управление напряжением и частотой в микросетях [9–11]. Отметим, что наличие взаимодействия между централизованной энергосистемой и зонами дистанционного управления в островном режиме влияет на работу приборов релейной защиты и автоматики из-за отсутствия эффективной схемы управления. Дисбаланс мощности часто возникает во время переключения между изолированным и подключенным к энергосистеме режимами и наоборот, когда источник РГ поставляет электроэнергию в основную сеть непосредственно [12–14]. Гармоники, возникающие из-за использования переключающих преобразователей с РГ, относятся к неисправности чувствительной нагрузки, подключенной к сети. Они должны находиться в приемлемом диапазоне в точке общего подключения источника РГ к сети. По мнению ряда авторов, эти проблемы с качеством электроэнергии возникают в генераторах переменного тока, которые имеют неравномерность выработки мощности и, как следствие, возникающие гармоники. Эти трудности приводят к новым проблемам, связанным с электроснабжением, возникающим в результате подключения источника РГ к распределительным сетям [15–17].

В современных энергетических сетях важно сохранять баланс между потребляемой и генерируемой мощностями, поскольку нарушение этого баланса приводит к проблемам электроснабжения и ухудшению качества электроэнергии из-за гармоник и неполадок в релейной защите при переключении между изолированным и подключенным режимами.

Гибкость электросети означает способность регулировать выработку или потребление электроэнергии в ответ на колебания спроса или предложения. Проще говоря, речь идет о том, насколько эффективно энергосистема может реагировать на неожиданные изменения, такие как внезапное увеличение спроса или падение доступного предложения. Гибкость важна, поскольку она помогает поддерживать стабильность и надежность энергосистемы. Если энергосистема не является гибкой, она может быть более уязвима к перебоям в работе. Современные распределительные системы должны быть гибкими, чтобы реагировать на изменения спроса и неожиданные события [18]. Поддержание избытка энергии и стратегическое управление производством электроэнергии имеет важное значение. Ядерные установки постоянно работают на максимальной мощности, что ограничивает их способность адаптироваться к колебаниям спроса. В современных энергосистемах все большее распространение получают источники РГ. Нагрузка, которая не удовлетворяется прерывистой генерацией, может поступать из множества источников, каждый из которых имеет свои характеристики [19]. Эта возрастающая изменчивость спроса и сложность в его прогнозировании создают потребность в большей адаптивности энергосети. Гибкость производства электро-

энергии – это мера того, насколько быстро и легко электростанция может изменить свою мощность. В его основе лежат три основных фактора:

1. Разница между максимальной и минимальной мощностью, которую может произвести установка.

2. Как быстро электростанция может увеличить или уменьшить объем выработки электроэнергии.

3. Насколько хорошо электростанция может поддерживать определенный уровень производительности в течение долгого времени.

Энергетическая сеть должна обладать определенным уровнем гибкости, чтобы отвечать меняющимся запросам потребителей и бизнеса. Это приводит к ряду изменений, в том числе к тому, что коммунальные предприятия инвестируют в технологии нового поколения, обеспечивающие большую гибкость, такие как газовые турбины комбинированного цикла и системы хранения энергии. Коммунальные предприятия также работают с потребителями над разработкой программ реагирования на спрос, которые могут снизить спрос в периоды пиковой нагрузки [20]. Специалисты выделяют ряд способов повышения гибкости энергосистемы, например:

– Совместное использование возобновляемых источников энергии, таких как солнечная и ветровая энергия, которые обеспечивают гибкость ввиду совместной выработки электроэнергии в зависимости от погодных условий.

– Использование накопителей энергии: накопители энергии можно использовать для хранения избыточной электроэнергии, когда спрос низкий, а затем высвобождать ее, когда спрос высок.

– Управление спросом: инициативы по управлению спросом стимулируют потребителей снижать потребление электроэнергии в периоды высокого спроса.

Адаптивность энергосети предполагает ее способность приспосабливаться к колебаниям как предложения, так и спроса. На эту адаптивность могут влиять различные факторы, включая [21, 22]:

– Изменения нагрузки, когда требуется больше или меньше электроэнергии, система должна иметь возможность быстро реагировать.

– Ошибки прогноза погоды. Если прогноз погоды неверен, система может не вырабатывать достаточно электроэнергии для удовлетворения спроса.

– Отключения генераторной установки: если электростанция выходит из строя, система должна быть в состоянии компенсировать потерянную выработку.

– Отключения линии электропередачи: если линия электропередачи выйдет из строя, система должна иметь возможность направлять электроэнергию в обход места отключения.

– Производство электроэнергии из переменных возобновляемых источников энергии: такие источники, как солнечная и ветровая энергия, генерируют электроэнергию с перерывами, поэтому система должна быть в состоянии компенсировать эти колебания.

Помимо этих элементов, три важнейших атрибута были признаны ключевыми при оценке потребностей в гибкости энергосистемы:

– Степень изменчивости системы. Чем более изменчива система, тем больше гибкости ей потребуется.

– Скорость, с которой система должна реагировать. Чем быстрее система должна реагировать на изменения, тем больше гибкости ей потребуется.

– Расположение ресурсов гибкости. Ресурсы гибкости должны соответствовать спросу и стратегически располагаться для оптимального использования.

Иначе говоря, гибкость энергосистемы подобна запасному плану. Это способность системы поддерживать «свет включенным», даже когда дела идут не по плану. Более гибкая сетка имеет ряд преимуществ, в том числе:

– Повышенная надежность. С меньшей вероятностью будет нарушена экстремальными погодными явлениями или кибератаками.

– Снижение затрат. Можно сэкономить деньги за счет уменьшения необходимости строительства новых электростанций и линий электропередачи.

– Повышенная эффективность. Можно снизить потери энергии и повысить эффективность сети РГ.

– Расширение внедрения использования возобновляемых энергоресурсов: гибкая энергосистема может облегчить включение таких ресурсов в энергосеть.

Гибкость энергосистемы обеспечивает надежность, снижение затрат и повышение эффективности, что в свою очередь способствует более широкому внедрению возобновляемых энергоресурсов.

Влияние распределенных источников энергии на традиционные энергоблоки. Возобновляемые источники энергии играют важную роль в производстве электроэнергии. Однако их надежность колеблется из-за изменений производительности, что приводит к прерывистым и переменным характеристикам. Эта ситуация создает проблемы для традиционных генерирующих установок, которые обычно проектируются для обеспечения стабильной производительности. Источники энергии, такие как солнечная и ветровая энергия, демонстрируют непостоянство, следовательно, их производство электроэнергии не является непрерывным. Это может создать проблемы для электростанций с базовой нагрузкой, которые рассчитаны на постоянную работу. Когда выработка электроэнергии из возобновляемых источников высока, электростанции с базовой нагрузкой должны сократить или вообще прекратить выработку электроэнергии. Однако, когда выработка электроэнергии из станций на возобновляемых источниках снижается, электростанциям с базовой нагрузкой приходится быстро наращивать выработку, чтобы удовлетворить спрос. Это может вызвать износ оборудования, что приведет к таким проблемам, как усталость металла, коррозия и эрозия. Назовем некоторые из проблем, которые РГ на базе возобновляемой энергии создают для традиционных энергоблоков, включают [3]:

– Быстрые колебания объема производства могут привести к необходимости быстрой корректировки выработки традиционными станциями, чтобы привести предложение в соответствие со спросом. Такие резкие изменения создают сложные с позиции управления условия на эти традиционные станции.

– Выходная мощность возобновляемых источников энергии также может колебаться в течение более длительных периодов времени, что требует более частого запуска и остановки традиционных энергоблоков. Это становится стрессом для обычных агрегатов и сокращает срок их службы.

– Чистая нагрузка – это общее количество электроэнергии, которое необходимо произвести традиционными энергоблоками после вычета мощности возобновляемых источников. По мере увеличения проникновения таких источников полезная нагрузка становится все более изменчивой и неопределенной, что затрудняет эффективную и надежную работу традиционных энергоблоков.

По мнению ряда исследователей, одна серьезная проблема возникает из-за того, что источник РГ потенциально может увеличивать токи повреждения. Эти токи, внезапные скачки тока внутри цепи, возникающие в результате короткого замыкания или других проблем, создают риск повреждения оборудования и перебоев в подаче электроэнергии [23]. Это может привести к неправильной работе системы защиты сети, ввиду чего возникают отключения электроэнергии. Другая проблема заключается в том, что РГ может сделать сеть более сложной и непредсказуемой. При использовании источников РГ в сети появляется больше источников энергии, которые управляются по-разному. Эти обстоятельства могут усложнить операторам эффективное управление сетью и предотвращение сбоев. Однако, несмотря на эти проблемы, в настоящее время разрабатываются различные решения этих проблем. Например, создаются новые технологии, которые помогут операторам сетей управлять интеграцией РГ и защищать сеть от сбоев и отключений [24]. Ожидается, что по мере более широкого распространения этих решений РГ станет все более важной частью электросети. Появляется несколько решений этих проблем, связанных с возобновляемыми источниками энергии на традиционных энергоблоках [20]:

– Системы хранения энергии накапливают излишки энергии из источников возоб-

новляемой энергии и сохраняют ее для последующей отдачи в сеть при возникновении спроса. Эта стратегия устраняет необходимость быстрой корректировки традиционных единиц, сводя к минимуму необходимость быстрого увеличения и уменьшения мощности.

– Программы реагирования на спрос побуждают потребителей сокращать потребление электроэнергии, особенно в периоды пиковой нагрузки, посредством стимулов. Таким образом, можно уменьшить зависимость от традиционных энергоблоков, работающих на максимальной мощности в периоды высокого спроса.

– В ряде стран (Китай, Германия, Америка, Индия) разрабатываются технологии нового поколения, такие как газовые турбины комбинированного цикла и накопители энергии, которые обеспечивают большую гибкость, чем традиционные генерирующие установки. Это делает их более подходящими для работы в системе с высоким уровнем возобновляемых источников энергии [25, 26].

В заключение отметим, что проблемы, которые возобновляемые источники энергии создают для традиционных энергоблоков, значительны, но данные трудности не являются непреодолимыми. Несколько развивающихся решений направлены на устранение проблем и сохранение главной роли этих источников в удовлетворении наших энергетических потребностей. Эти инициативы направлены на обеспечение надежного и экономически эффективного энергоснабжения, одновременно обеспечивая интеграцию их в энергетическую систему [27, 28].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гибкость энергосистем: выявленные проблемы с гибкостью энергосистем подчеркивают необходимость адаптации к изменениям спроса и предложения. Рост зависимости от возобновляемых источников энергии требует наличия энергосистемы, которая может быстро адаптироваться в соответствии с продолжающимся переходом на возобновляемые источники энергии.

Влияние на традиционные генерирующие установки: хранение энергии, реагирование на спрос и достижения в области генерирующих технологий согласуются с усилиями по модернизации производства электроэнергии.

Проблемы качества электроэнергии и интеграции. Проблемы с качеством электроэнергии, гармониками и токами короткого замыкания, связанные с генерацией электроэнергии, подчеркивают необходимость тщательной интеграции и разработки механизмов управления. Улучшенные возможности преодоления неисправностей и усовершенствованные стратегии управления соответствуют постоянным усилиям по повышению надежности.

Проблемы интеграции возобновляемых источников энергии (технические, нормативные вопросы и проблемы перебоев) подчеркивают необходимость комплексных подходов. Сочетание технических достижений с нормативно-правовой базой имеет решающее значение для эффективного решения этих проблем.

Экономическая и экологическая устойчивость: исследования, оценивающие экономическую и экологическую устойчивость интеграции возобновляемых источников энергии, дают представление о положительном влиянии на обоих фронтах. Это согласуется с глобальными трендами по достижению баланса между экономическим развитием и охраной окружающей среды посредством продвижения возобновляемых источников энергии.

Рассмотрев зарубежный опыт внедрения распределенной генерации, мы приходим к следующим выводам:

1. Мировая тенденция энергетики направлена на все большее внедрение источников РГ в электрические сети, в особенности на возобновляемых источниках энергии.

2. Повышенная гибкость технологии РГ и обилие видов используемой первичной энергии становятся важным стимулом для внедрения данной технологии.

3. Источники РГ, интегрированные в распределительные сети совместно с традиционными энергоблоками, изменяют архитек-

туру сетей, что создает сложности для управления ими.

4. Источники РГ осложняют функционирование систем защиты и автоматики сетей, что требует стратегического измерения принципов обеспечения безопасного и надежного электроснабжения и селективности защит.

5. РГ вносит значительный вклад в обеспечение надежной и экологичной энергетики.

6. Технологии РГ оказывают значительное влияние на формирование современных трендов развития распределительных сетей, при этом лаконично вписываясь в общепринятые векторы развития энергетики: цифровизация, smartgrid, индустрия 4.0.

7. Имеются значительные трудности, связанные с РГ, в области нормативных документов и правовых норм регулирования вопроса электроснабжения и рынка электроэнергии, которые оказывают тормозящее воздействие на внедрение данной технологии.

В заключение, исследование в совокупности подчеркивает потенциал интеграции РГ и возобновляемых источников энергии в формировании устойчивой, надежной и гибкой системы производства электроэнергии. Для успешной интеграции РГ в современные энергетические системы необходим комплексный подход, включающий технологические инновации, нормативную поддержку и стратегическое планирование. Будущая сфера применения технологий РГ включает технологические достижения, интеграцию возобновляемых источников энергии, интеграцию накопителей энергии, интеграцию интеллектуальных сетей, расширение микросетей, политическую поддержку, децентрализованные энергетические системы и меры по повышению энергоэффективности. Ожидается, что продолжение исследований, разработок и поддерживающая политика будут способствовать широкому внедрению и оптимизации технологий РГ в ближайшие годы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ приведенного теоретического и практического материала показал, что внедрение РГ пережило значительный глобальный рост, отмеченный разнообразными технологиями, вносящими вклад в генерацию электроэнергии. Однако отсутствие стандартизированных определений отражает развивающийся характер терминологии РГ. Последствия и преимущества внедрения источников РГ огромны и охватывают технические, экономические и экологические аспекты. Выводы международного энергетического агентства подчеркивают экологичность, снижение ограничений на линиях электропередачи и положительное влияние на качество электроэнергии. Мнения заинтересованных сторон отражают роль РГ в решении проблем качества электроэнергии, содействии более простой идентификации малых генераторов, сокращении времени сооружения установки и инвестиций, удовлетворении потребительского спроса и содействии либерализации рынка электроэнергии.

Несмотря на эти преимущества, РГ создает проблемы для современных энергетических сетей, включая дисбаланс мощности во время переходных процессов, гармоники от переключающих преобразователей и увеличение токов короткого замыкания. Адаптация к изменениям спроса и предложения имеет решающее значение для энергетических систем. Включение возобновляемых источников энергии создает такие проблемы, как внезапные изменения производительности и повышение нагрузки на оборудование. Результаты исследований зарубежных коллег предлагают такие решения, как хранение энергии, алгоритмы реагирования на спрос и инновационные технологии генерации для повышения гибкости. Надежность энергосистемы, перспективы защиты, а также экономическая и экологическая устойчивость интеграции РГ энергии также являются ключевыми областями исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rani P., Arora V.P., Sharma N.K. An overview of integration of PV system into electric grid // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 1228 (1). P. 012017.

2. Rani P., Arora V.P., Sharma N.K. Control of dynamic performance through feedback converter SSC in grid integrated wind energy system // Distributer Generate and Alternative Energy Journal. 2022. Vol. 38 (1). P. 343-366.

3. Distributed energy systems: a review of classification, technologies, applications, and policies: current Policy, targets and their achievements in different countries (continued) / T.B. Nadeem, M. Siddiqui, M. Khalid, M. Asif // Energy Strategy Reviews. 2023. Vol. 48. P. 101096.

4. A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies / E. Erdiwansyah, A.T. Mahidin, H. Husin [et al.] // Protection and control of modern power systems. 2021. Vol. 6. P. 1-18.

5. A review on micro grid decentralized energy/voltage control structures and methods / M. Shirkhani, J. Tavoosi, S. Danyali [et al.] // Energy Reports. 2023. Vol. 10. P. 368-380.

6. Micro grids: a review, outstanding issues and future trends / M. Uddin, H. Mo, D. Dong [et al.] // Energy Strategy Revives. 2023. Vol. 49. P. 101127.

7. Yu X., Qu H. The role of China's renewable powers against climate change during the 12th Five-Year and until 2020 // Renew Sustain Energy Reviews. 2013. Vol. 22 (C). P. 401-409.

8. A review on the development ofoffshore wind energy conversion systems / J. Li, G. Wang, Z. Li [et al.] // International Journal of Energy Research. 2020. Vol. 44 (12). P. 9283-9297.

9. Three energy self-sufficient networks of wastewater treatment plants developed by nonlinear bi-level optimization models in Jeju Island / T. Woo, A.S.T. Charmchi, P. Ifaei [et al.] // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 379. P. 134465.

10. Performance evaluation of two grid-connected solar photovoltaic systems under temperate climatic conditions in South Korea / A.B. Owolabi, A.O. Yakub, H.X. Li, D. Suh // Energy Reports. 2022. Vol. 8. P. 12227-12236.

11. Influence of battery energy storage systems on transmission grid operation with a significant share of variable renewable energy sources / S.F. Santos, M. Gough, D.Z. Fitiwi [et al.] // IEEE Systems Journal. 2021. Vol. 16 (1). P. 1508-1519.

12. A comprehensive review / M. Stecca, L.R. Elizondo, T.B. Soeiro [et al.] // IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society. 2020. Vol. 1. P. 46-65.

13. A techno-economic analysis of an optimal self-sufficient district / A. Laitinen, O. Lindholm, A. Hasan [et al.] // Energy Conversion and Management. 2021. Vol. 236. P. 114041.

14. Lavidas G., Blok K. Shifting wave energy perceptions: the case for wave energy converter (WEC) feasibility at milder resources // Renewable Energy. 2021. Vol. 170. P. 1143-1455.

15. A review of different renewable energy resources and their energy efficiency technologies / A. Abuzreda, T.A.M. Hamad, A. Elayatt, I. Ahmad // Advance in Environmental Waste Management & Recycling. 2023. Vol. 6 (1). P. 384-389.

16. Performance analysis of a novel biomass gasification system coupled to a coal-fired power plant based on heat and water recovery / X. Chen, C. Zhang, X. Chen [et al.] // Energy conversion and management. 2023. Vol. 299. P. 117822.

17. Progress and challenges in smart grids: distributed generation, smart metering, energy storage and smart loads / I. Diahovchenko, M. Kolcun, Z. Conka [et al.] // Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering. 2020. Vol. 44. P. 1319-1333.

18. Degefa M.Z., Sperstad I.B., Sæle H. Comprehensive classifications and characterizations of power system flexibility resources // Electric Power Systems Research. 2021. Vol. 194. P. 107022.

19. Impram S., Nese S.V., Oral B. Challenges of renewable energy penetration on power system flexibility: a survey // Energy Strategy Reviews. 2020. Vol. 31. P. 100539.

20. Facing the high share of variable renewable energy in the power system: flexibility and stability requirements / K. Guerra, P. Haro, R.E. Gutierrez, A. Gomez-Barea // Applied Energy. 2022. Vol. 310. P. 118561.

21. Patel D.K., Singh D., Singh B. A comparative analysis for impact of distributed generations with electric vehicles planning // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. Vol. 52. P. 101840.

22. Gupta A.R., Kumar A. Deployment of distributed generation with D-FACTS in distribution system: a comprehensive analytical review // IETE Journal Research. 2022. Vol. 68 (2). P. 1195-1212.

23. A cost-effective and ecological stochastic optimization for integration of distributed energy resources in energy networks considering vehicle-to-grid and combined heat and power technologies / A.S. Daramola, S.E. Ahmadi, M. Marzband, A. Ikpehai // Journal of Energy Storage. 2023. Vol. 57. P. 106203.

24. Saha S., Saleem M.I., Roy T.K. Impact of high penetration of renewable energy sources on grid frequency behavior // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2023. Vol. 145. P. 108701.

25. Impacts of renewable energy generation on greenhouse gas emissions in Saudi Arabia: a comprehensive review / F.S. Al-Ismail, M.S. Alam, M. Shafiullah [et al.] // Sustainability. 2023. Vol. 15 (6). P. 5069.

26. Fang Z. Assessing the impact of renewable energy investment, green technology innovation, and industrialization on sustainable development: a case study of China // Renewable Energy. 2023. Vol. 205. P. 772-782.

27. Akhtar I., Kirmani S., Jameel M. Reliability assessment of power system considering the impact of renewable energy sources integration into grid with advanced intelligent strategies // IEEE Access PP. 2021. Vol. 9. P. 32485-32497.

28. A critical review on environmental impacts of renewable energy systems and mitigation strategies: wind, hydro, biomass and geothermal / E.T. Sayed, T. Wilberforce, K. Elsaid [et al.] // Sci Total Environ. 2021. Vol. 766. P. 144505.

REFERENCES

1. Rani P., Arora V.P., Sharma N.K. An overview of integration of PV system into electric grid // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 1228 (1). P. 012017.

2. Rani P., Arora V.P., Sharma N.K. Control of dynamic performance through feedback converter SSC in grid integrated wind energy system // Distributer Generate and Alternative Energy Journal. 2022. Vol. 38 (1). P. 343-366.

3. Distributed energy systems: a review of classification, technologies, applications, and policies: current Policy, targets and their achievements in different countries (continued) / T.B. Nadeem, M. Siddiqui, M. Khalid, M. Asif // Energy Strategy Reviews. 2023. Vol. 48. P. 101096.

4. A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies / E. Erdiwansyah, A.T. Mahidin, H. Husin [et al.] // Protection and control of modern power systems. 2021. Vol. 6. P. 1-18.

5. A review on microgram decentralized energy/voltage control structures and methods / M. Shirkhani, J. Tavoosi, S. Danyali [et al.] // Energy Reports. 2023. Vol. 10. P. 368-380.

6. Micro grids: a review, outstanding issues and future trends / M. Uddin, H. Mo, D. Dong [et al.] // Energy Strategy Revives. 2023. Vol. 49. P. 101127.

7. Yu X., Qu H. The role of China's renewable powers against climate change during the 12th Five-Year and until 2020 // Renew Sustain Energy Reviews. 2013. Vol. 22 (C). P. 401-409.

8. A review on the development of offshore wind energy conversion systems / J. Li, G. Wang, Z. Li [et al.] // International Journal of Energy Research. 2020. Vol. 44 (12). P. 9283-9297.

9. Three energy self-sufficient networks of wastewater treatment plants developed by nonlinear bi-level optimization models in Jeju Island / T. Woo, A.S.T. Charmchi, P. Ifaei [et al.] // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 379. P. 134465.

10. Performance evaluation of two grid-connected solar photovoltaic systems under temperate climatic conditions in South Korea / A.B. Owolabi, A.O. Yakub, H.X. Li, D. Suh // Energy Reports. 2022. Vol. 8. P. 12227-12236.

11. Influence of battery energy storage systems on transmission grid operation with a significant share of variable renewable energy sources / S.F. Santos, M. Gough, D.Z. Fitiwi [et al.] // IEEE Systems Journal. 2021. Vol. 16 (1). P. 1508-1519.

12. A comprehensive review / M. Stecca, L.R. Elizondo, T.B. Soeiro [et al.] // IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society. 2020. Vol. 1. P. 46-65.

13. A techno-economic analysis of an optimal self-sufficient district / A. Laitinen, O. Lindholm, A. Hasan [et al.] // Energy Conversion and Management. 2021. Vol. 236. P. 114041.

14. Lavidas G., Blok K. Shifting wave energy perceptions: the case for wave energy converter (WEC) feasibility at milder resources // Renewable Energy. 2021. Vol. 170. P. 1143-1455.

15. A review of different renewable energy resources and their energy efficiency technologies / A. Abuzreda, T.A.M. Hamad, A. Elayatt, I. Ahmad // Advance in Environmental Waste Management & Recycling. 2023. Vol. 6 (1). P. 384-389.

16. Performance analysis of a novel biomass gasification system coupled to a coal-fired power plant based on heat and water recovery / X. Chen, C. Zhang, X. Chen [et al.] // Energy conversion and management. 2023. Vol. 299. P. 117822.

17. Progress and challenges in smart grids: distributed generation, smart metering, energy storage and smart loads / I. Diahovchenko, M. Kolcun, Z. Conka [et al.] // Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering. 2020. Vol. 44. P. 1319-1333.

18. Degefa M.Z., Sperstad I.B., Sæle H. Comprehensive classifications and characterizations of power system flexibility resources // Electric Power Systems Research. 2021. Vol. 194. P. 107022.

19. Impram S., Nese S.V., Oral B. Challenges of renewable energy penetration on power system flexibility: a survey // Energy Strategy Reviews. 2020. Vol. 31. P. 100539.

20. Facing the high share of variable renewable energy in the power system: flexibility and stability requirements / K. Guerra, P. Haro, R.E. Gutierrez, A. Gomez-Barea // Applied Energy. 2022. Vol. 310. P. 118561.

21. Patel D.K., Singh D., Singh B. A comparative analysis for impact of distributedgenerations with electric vehicles planning // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. Vol. 52. P. 101840.

22. Gupta A.R., Kumar A. Deployment of distributed generation with D-FACTS in distribution system: a comprehensive analytical review // IETE Journal Research. 2022. Vol. 68 (2). P. 1195-1212.

23. A cost-effective and ecological stochastic optimization for integration of distributed energy resources in energy networks considering vehicle-to-grid and combined heat and power technologies / A.S. Daramola, S.E. Ahmadi, M. Marzband, A. Ikpehai // Journal of Energy Storage. 2023. Vol. 57. P. 106203.

24. Saha S., Saleem M.I., Roy T.K. Impact of high penetration of renewable energy sources on grid frequency behavior // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2023. Vol. 145. P. 108701.

25. Impacts of renewable energy generation on greenhouse gas emissions in Saudi Arabia: a comprehensive review / F.S. Al-Ismail, M.S. Alam, M. Shafiullah [et al.] // Sustainability. 2023. Vol. 15 (6). P. 5069.

26. Fang Z. Assessing the impact of renewable energy investment, green technology innovation, and industrialization on sustainable development: a case study of China // Renewable Energy. 2023. Vol. 205. P. 772-782.

27. Akhtar I., Kirmani S., Jameel M. Reliability assessment of power system considering the impact of renewable energy sources integration into grid with advanced intelligent strategies // IEEE Access P. 2021. Vol. 9. P. 32485-32497.

28. A critical review on environmental impacts of renewable energy systems and mitigation strategies: wind, hydro, biomass and geothermal / E.T. Sayed, T. Wilberforce, K. Elsaid [et al.] // Sci Total Environ. 2021. Vol. 766. P. 144505.