

Томин Никита Викторович,
к.т.н., с.н.с., Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
e-mail: tomin@isem.irk.ru

Ашихмин Максим Валерьевич,
магистрант, Иркутский национальный исследовательский технический университет,
e-mail: mrharry@mail.ru

**ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СЕТЯМИ, СОДЕРЖАЩИМИ
ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ¹**

Tomin N.V., Ashikhmin M.V.

**OPERATION AND MANAGEMENT OF SMART GRIDS CONTAINING WIND
POWER PLANTS**

Аннотация. Рассмотрен пример работы интеллектуальной электрической сети с участием ветрогенерирующих установок. Проанализирована работа средств компенсации реактивной мощности на основе технологии Flexible Alternative Current Transmission System (FACTS).

Ключевые слова: распределённая генерация, энергосистема, интеллектуальная распределительная сеть.

Abstract. The example of the operation of the intelligent network with the involvement of wind turbines is considered. The operation of reactive power measurement tools based on the Flexible Alternative Current Transmission System technology is analyzed.

Keywords: distributed generation, energy system, smart grid.

Введение

В настоящее время активно развиваются и усложняются интеллектуальные распределительные сети, наблюдается тенденция роста уровня распределённой генерации с использованием возобновляемых источников (ВИЭ), в числе которых наибольшая интенсивность использования характерна для ветро- и солнечной энергетики.

Процесс развития ветро- и солнечной энергетики одновременно создает проблемы, связанные с необходимостью проведения ряда технических изменений при подключении ветро- и солнечных источников к энергосистеме. Эти изменения вызваны, в первую очередь, случайным характером выработки мощности ветрогенераторами и солнечными фотоэлектрическими установками (ФЭП), что в значительной степени отражается на качестве электрической энергии и устойчивости напряжения.

¹ Данная работа была выполнена при поддержке проекта государственного задания фундаментальных исследований РАН «Теоретические основы, модели и методы управления развитием и функционированием интеллектуальных электроэнергетических систем», FWEU-2021-0001 (пер. №: AAAA-A21-1210121900»27-4).

Рост мощности генерации от ветроисточников, подключенных к энергосистеме, и стохастический характер изменчивости этой мощности увеличивают потребляемую реактивную мощность в распределительной электрической системе и, таким образом, создают риски появления неустойчивости напряжения в системе, что усложняет моделирование и прогнозирование режимов распределительных сетей. Поэтому целесообразно использование различных автоматизированных инструментов для расчета, оптимизации и прогнозирования режима распределительных сетей с высокой долей такой генерации.

Концепция интеллектуальных распределительных сетей определяется как совокупность подключенных к генерирующим источникам и электроустановкам потребителей программно-аппаратных средств, а также информационно-аналитических и управляющих систем, обеспечивающих надежную и качественную передачу электрической энергии от источника к приемнику в нужное время и в необходимом количестве [1]. Интеллектуальная сеть предполагает применение устройств регулирования реактивной мощности и напряжения, накопителей электроэнергии, сверхпроводящих кабельных линий, устройств ограничения токов короткого замыкания [2].

Принцип работы интеллектуальной распределительной сети

Основными компонентами интеллектуальных сетей являются [3, 4] (рис. 1):

- микросети;
- центральная сеть электроснабжения;
- серверы обработки данных.

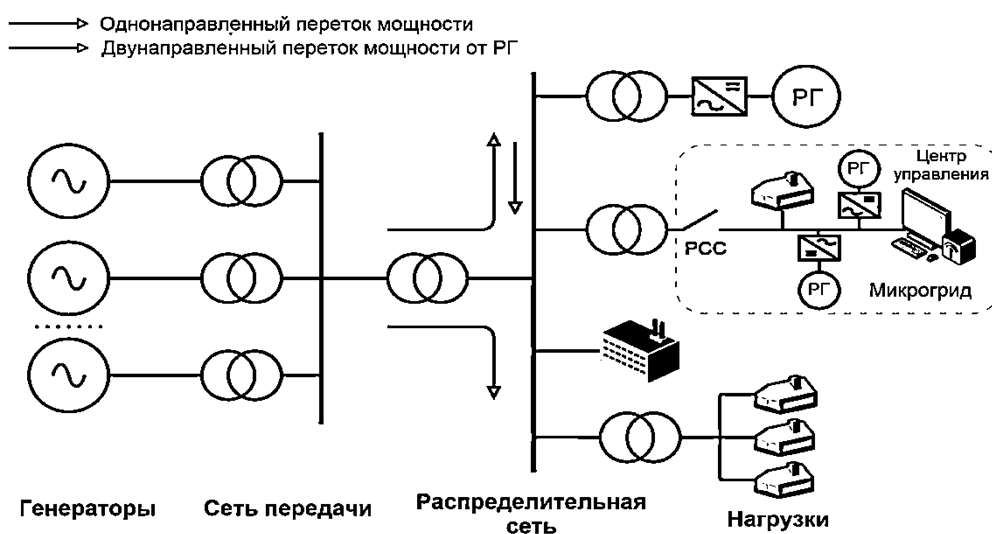


Рисунок 1 – Общая схема интеллектуальной энергосистемы с ВИЭ

Микросеть (или микрогрид) – это локальная энергосистема, которая предполагает создание на определённой территории собственных энергосетевых структур, способных работать в том числе автономно. Поскольку микросетевые технологии ориентированы на использование местных возобновляемых источников, исчезает необходимость транспортировки энергии на большие расстояния, что значительно уменьшает ее потери. Кроме того, микросети способствуют повышению надежности энергоснабжения за счет оперативного переключения пользователей между общей энергосетью и местными источниками энергии. Появление микросетей не случайно совпало с началом широкого использования возобновляемых источников электроэнергии. Неравномерность генерации энергии от ветровых и солнечных электростанций требует постоянного перераспределения энергоресурсов внутри микросети и подпитку ее из внешней централизованной сети. В случае избытка энергии возможна ее передача во внешнюю (центральную) сеть [5].

Центральная сеть электроснабжения (дистрибутивная сеть) – традиционная общая сеть электроснабжения, в которой основная часть электроэнергии производится централизованно на больших электростанциях, таких как ТЭЦ, АЭС и ГЭС.

Микросети могут работать как одновременно с присоединенной централизованной электросетью, так и в автономном режиме. Комбинирование различных типов энергоустановок существенно повышает надежность всей микросети. Множество взаимодействующих друг с другом микросетей, подключенных к центральным сетям электроснабжения образуют распределенную энергосистему.

Для эффективной работы умной сети необходимо наличие сервера обработки данных (сервер Smart Grid) – кооперативного сервера для хранения, централизованной обработки и передачи информации всем микросетям данного региона [6, 7]. Эта информация содержит сведения о тарифах на электроэнергию, сводки прогноза погоды, статистические данные, позволяющие прогнозировать энергопотребление.

Для обеспечения надёжной и оптимальной работы микросетей используют систему управления энергией (англ. Energy Management System), которая, в соответствии с выработанной стратегией, будет автоматически переключаться между источниками энергии, обмениваться энергией с внешней сетью, и при необходимости отключать потребителей [8].

Последствия использования ветрогенерации в интеллектуальной распределительной сети

При включении ветроэнергетической установки (ВЭУ) в сеть могут наблюдаться такие неполадки как большие токи и частота неподходящая для се-

ти. Такие неполадки могут вызвать серьезные проблемы в электрической сети. Интеллектуальная сеть предлагает решение, связанное с одним из ключевых достоинств этой системы – быстрый и незаметный для потребителя переход на другие источники питания. Так как интеллектуальная сеть предлагает распределенную генерацию (много малых источников энергии расположенных недалеко друг от друга для более стабильной подачи электроэнергии и удобства переключения «умной» сети между ними), то нейронные сети, которые управляют данными сетями, смогут без проблем и опасностей переключать потребителя [10].

Так как работоспособность ветроустановок зависит от климата и потоков ветра, то нагрузка у ВЭУ имеет неравномерный характер. Для предотвращения нехватки электроэнергии и порчи приборов и кабелей в интеллектуальной сети предусмотрены умные счетчики, которые могут в реальном времени и с большой точностью определять потребляемое количество электроэнергии и увеличивать мощность если потребуется (то есть несколько генераторов энергии будут работать вместе для потребителя). Или при отсутствии ветра сеть так же будет переключать потребителя на активный источник питания. Все это делает поставку энергии более стабильной [9].

Умные счетчики – счетчик электроэнергии, который регистрирует потребление электроэнергии с интервалом в 1 час или меньше и передает эту информацию не реже одного раза в день в энергетическую компанию для целей мониторинга и управления. Интеллектуальные счетчики обеспечивают двустороннюю связь между счетчиком и центральной системой.

Компенсация реактивной мощности на базе устройств FACTS

Мировой опыт показал, что при параллельной работе ВЭУ и ЭЭС необходимо уделять внимание решению вопроса компенсации реактивной мощности, если в состав ВЭУ входят асинхронные генераторы.

ВЭУ в настоящее время классифицируются по разным параметрам, одним из которых является возможность работы параллельно с электроэнергетической системой. В этом случае требование выработки электроэнергии заданного качества для выдачи в ЭЭС выполняется механическими и электрическими способами. Механическими способами является поддержание определенной скорости вращения ротора, которое достигается работой ветроэнергетической установки в зоне ограничения мощности. Очевидно, что большую часть времени ветроэнергетическая установка простаивает в ожидании ветров выше номинального значения. В таком режиме работали ВЭУ, введенные в эксплуатацию после энергетического кризиса семидесятых годов двадцатого века. В настоящее время используется электрический способ, который заключается в использовании машинно-вентильных систем с асинхронизированными син-

хронными генераторами или подключении статического преобразователя частоты в цепь статора ВЭУ [10].

Базовым кластером интеллектуальной системы являются устройства, относящиеся к технологии управляемых систем электропередачи переменного тока – Flexible Alternative Current Transmission System (FACTS). FACTS является одной из наиболее перспективных электросетевых технологий, суть которой состоит в том, что электрическая сеть из пассивного устройства транспорта электроэнергии превращается в устройство, активно участвующее в управлении режимами работы электрических сетей.

К устройствам FACTS первого поколения (FACTS-1) относят устройства, обеспечивающие регулирование напряжения (реактивной мощности) и обеспечивающие требуемую степень компенсации реактивной мощности в электрических сетях (БСК, УБСК, ФКУ, УФКУ, СК, ШР, ВРГ, УПК, ТОУ, ТУБСК, ТРГ, СТК, УШР, УУПК, ФПУ). К новейшим FACTS устройствам второго поколения (FACTS-2) относят устройства, обеспечивающие регулирование режимных параметров на базе полностью управляемых приборов силовой электроники (IGBT транзисторы, IGCT - тиристоры и др.). FACTS-2 обладают новым качеством регулирования – векторным, когда регулируется не только величина, но и фаза вектора напряжения электрической сети (СТАТКОМ, АСК, ССПК, ФВТ, ВПТ, ВПТН, АС ЭМПЧ, ОРПМ).

Оптимизация реактивной мощности представляет собой подзадачу оптимального потока мощности, в ходе решения которой определяется правильная настройка переменных реактивной мощности, таких как величины: напряжения, положений ступеней трансформаторов и характеристик устройств компенсации реактивной мощности [11].

Экспериментальный пример

Рассмотрим тестовую электрическую сеть, взятую из [12] (рис. 2), которая включает ветростанцию на шине В2 и имеет устройств FACTS типа статического компенсатора реактивной мощности (СТК), подключенного к шине В6.

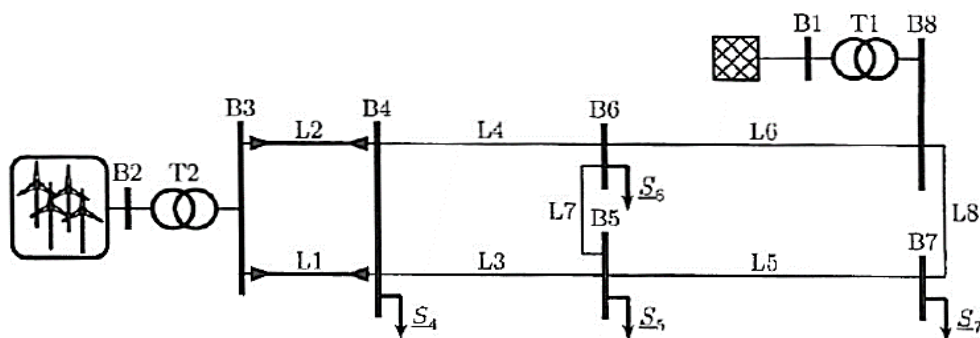


Рисунок 2 – Тестовая электрическая сеть, включающая ветроэнергетическую станцию и СТК

Все нагрузки в данном примере приняты постоянными. Выходная мощность ВЭС определяется профилем задаваемой ветровой энергии (рис. 3). На рисунке 4 представлены смоделированные напряжения по узлам схемы в течении суток.

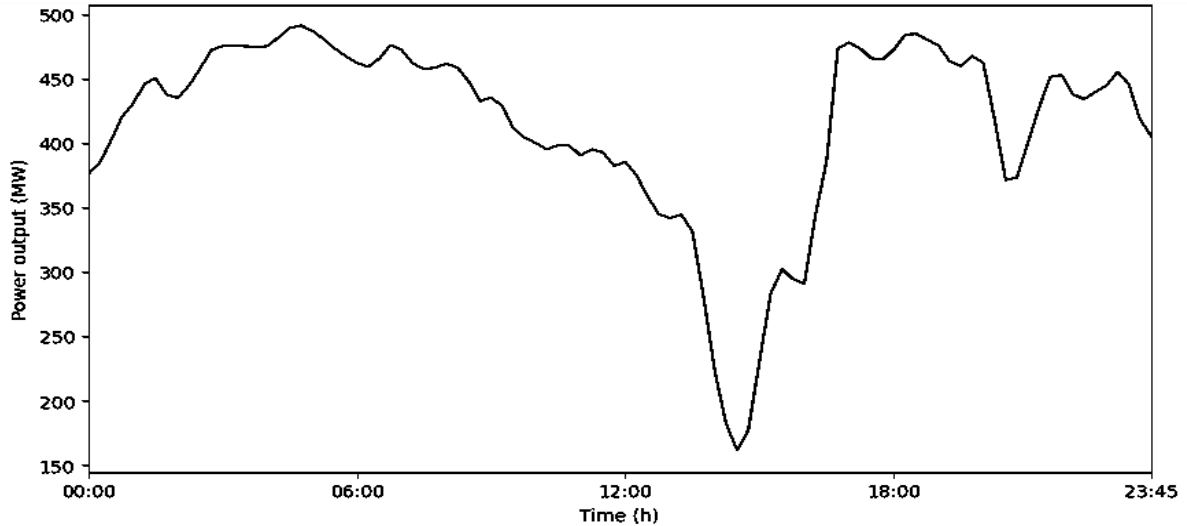


Рисунок 3 – Выходная мощность ВЭС, подключенного к шине В2, в течении суток

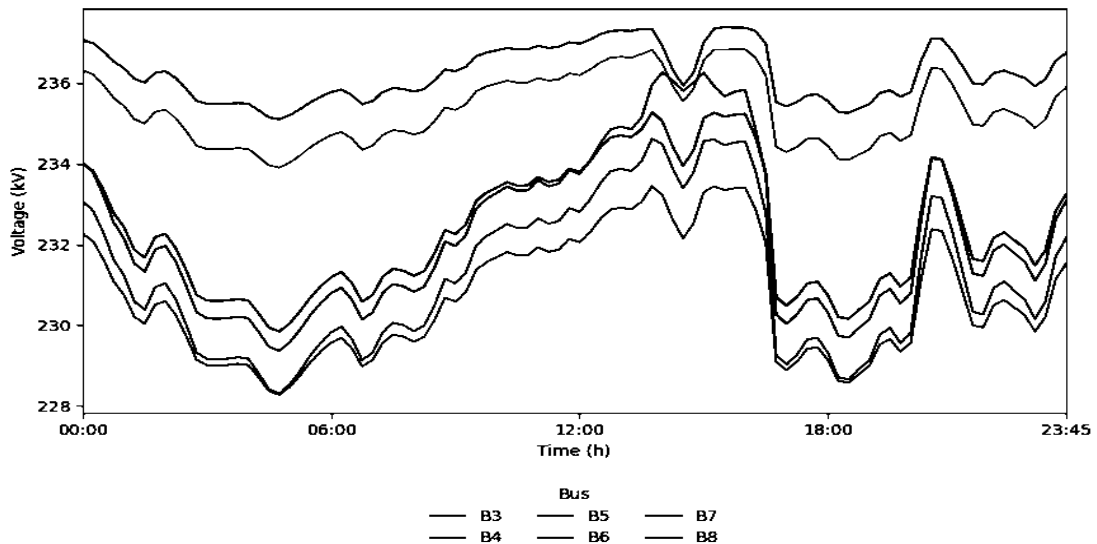


Рисунок 4 – Профили напряжения в узлах тестовой сети в течении суток

СТК регулирует величину напряжения на подключенной шине, регулируя значение импеданса шунта, который имеет только реактивную составляющую (резистивная часть отсутствует). Полное сопротивление может быть емкостным

или индуктивным, поскольку устройство состоит из постоянного конденсатора, включенного в параллельную цепь с реактором, который регулируется парой встречно-параллельных тиристоров. Угол открытия тиристора регулирует полное сопротивление элемента (рис. 5). Устройство работает в диапазоне значений угла открытия тиристора от 90° до 180° .

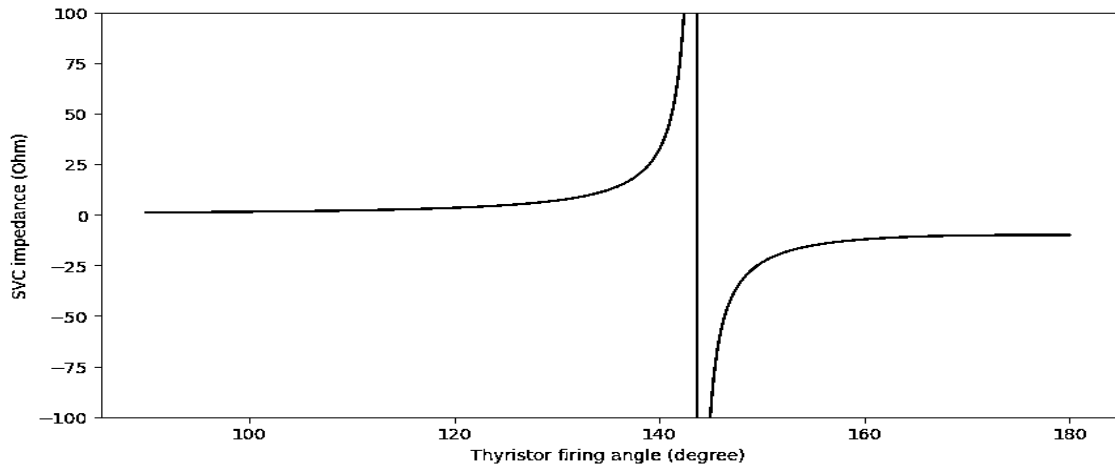


Рисунок 5 – Зависимость полного сопротивления элемента от угла открытия тиристора

Из рисунка 5 видно, что устройство имеет резонансную область между индуктивной (положительной) и емкостной характеристиками импеданса. В реальном приложении работа прибора в области резонанса запрещена.

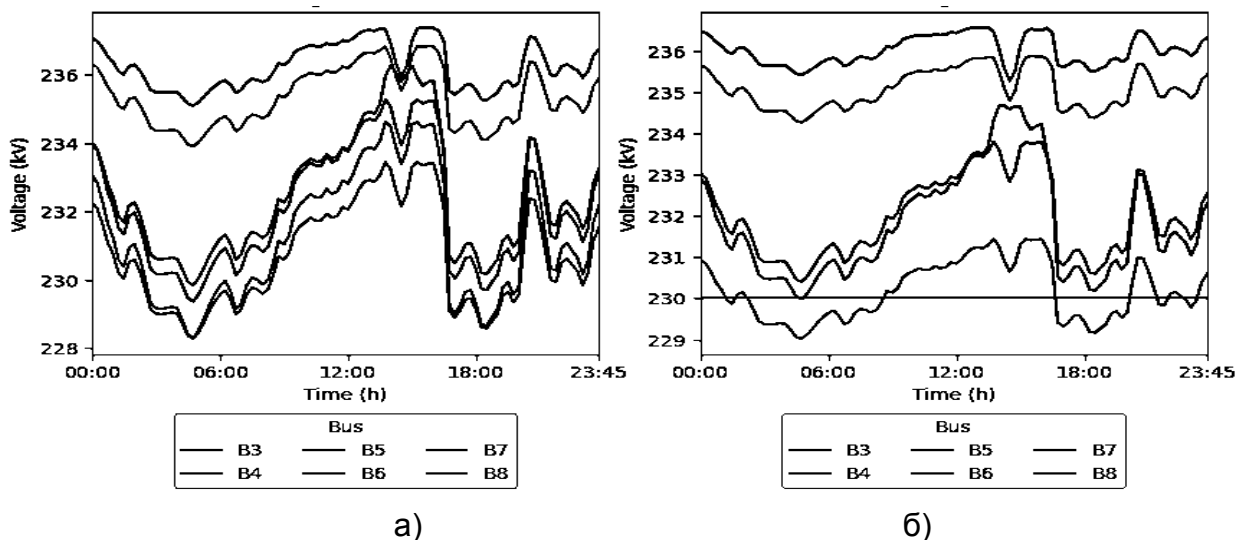


Рисунок 6 – Профили напряжения, полученные в результате расчета потоко-распределения мощности в схеме без СТК (а) и с подключенным СТК в шине В7 с подключенным СТК (б)

Результаты расчета потокораспределения мощности в схеме с подключенным СТК и без него показаны на рисунке 6. Изменения угла открытия тиристора во время управления напряжением, представлена на рисунке 7.

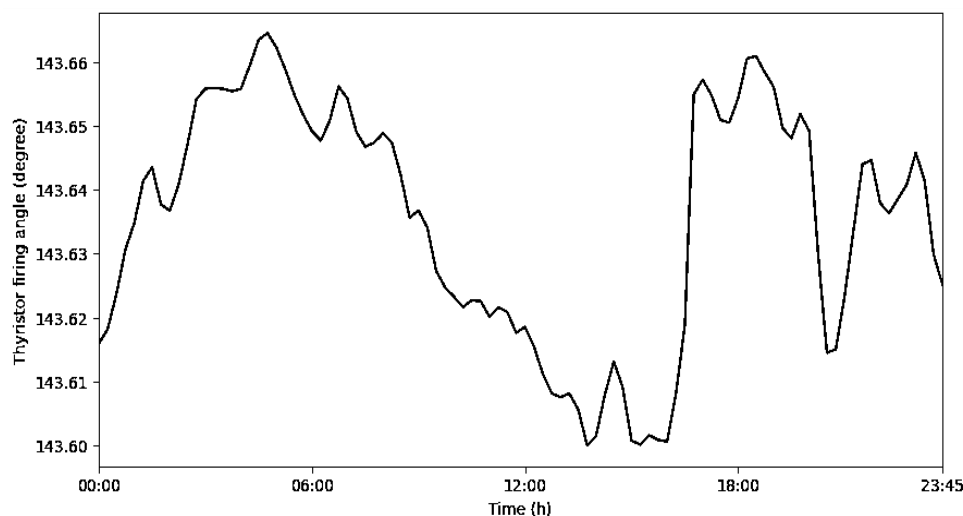


Рисунок 7 – Изменения угла открытия тиристора СТК

Хорошо видно, что при подключенном СТК (рис. 6б), профили напряжения в схеме, в большей степени, остаются в рамках границ по режимной надёжности. Подобное регулирование позволяет повысить гибкость системы в случае присутствия ВЭС.

Выводы

Наличие возобновляемых источников энергии в парке генерирующего оборудования, интегрированном в интеллектуальную электрическую сеть, приводит к положительным системным эффектам. В то же время, стохастический характер выработки электроэнергии на ветро- и солнечных источниках порождает ряд технических ограничений по части электроснабжения потребителей.

При детальном рассмотрении работы ветрогенерирующих установок наблюдаются проблемы, связанные с качеством электрической энергии. За счёт использования нейронных сетей и умных счётчиков удаётся избежать аварийных ситуаций. Однако основными инструментами для поддержания качества электроэнергии в интеллектуальных электрических сетях служат устройства регулирования реактивной мощности FACTS. Данная технология позволяет использовать ветрогенерирующие установки для обеспечения электроснабжения потребителей посредством широкого спектра компенсирующих устройств и компонентов силовой электроники.

В результате наблюдается стабильная работа интеллектуальной электрической сети при более экономичном использовании ресурсов (по сравнению с традиционной централизованной системой электроснабжения).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ледин С.С.** Интеллектуальные сети Smart Grid – будущее российской энергетики / С. С. Ледин. – Текст : непосредственный // Автоматизация и IT в энергетике. – 2010. – №11 (16). – С. 4-9.
2. **Николаев Б.** Будущее сетей за интеллектом: [Независимая газета, 23.03.2010] / Б. Николаев. – Текст : электронный // Независимая газета : электронный журнал. – URL: https://www.ng.ru/ng_energiya/2010-03-23/13_nets.html (Дата обращения: 09.04.23).
3. **Hatziargyriou N., Asano H., Iravani R., and Marnay C.** Microgrids: an overview of ongoing research, development, and demonstration projects, IEEE Power and Energy Magazine, vol.5, no.4, 2007. – pp. 78–94.
4. **Zhao B., Zhang X., Li P., Wang K., Xue M., and Wang C.** Optimal sizing, operating strategy and operational experience of a stand-alone microgrid on Dongfushan Island, Applied Energy, vol. 113, 2014. – pp. 1656–1666.
5. **Pogaku N., Prodanovic M., Green T.C.** Modeling, Analysis and Testing of Autonomous Operation of an Inverter-Based Microgrid, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 22, Issue-2, 2007. – pp. 613-625.
6. **Puttgen H.B., MacGregor P.R., Lambert F.** Distributed generation: Semantic hype or the dawn of a new era, Power and Energy Magazine, IEEE vol.1, no.1, 2003 – pp. 22-29.
7. **Сташкевич Е.В., Айзенберг Н.И., Илюхин И.Г.** Прогнозирование и управление электропотреблением сообщества микросетей с применением искусственного интеллекта // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 2. С. 18-29. DOI: 10.14529/power220202.
8. **Манакова, Е.А.** Целесообразность внедрения технологий Smart Grid в сети с альтернативными источниками энергии / Е. А. Манакова, И. А. Гаибов, И. А. Бычков, Т. А. Черкасова. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2016. – № 28.2 (132.2). – С. 87-89.
9. **Манусов В.З., Ядагаев Э.Г.** Особенности параллельной работы ветроэлектростанций и электроэнергетических систем: [Сборник материалов VIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, посвященной 155-летию со дня рождения К. Э. Циолковского, Новосибирск, Сибирский федеральный университет, 2012] / В. З. Манусов, Э. Г. Ядагаев. – Текст : электронный // Сибирский федеральный университет : электронный журнал. – URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/section06.html>.
10. **Палау И. А. Г.** Многофункциональная оптимизация при компенсации реактивной мощности / И. А. Г. Палау [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 12. – С. 94-103.
11. **Panosyan A.** "Modeling of advanced power transmission system controllers", Ph.D. dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2010.