

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет энергетический

Кафедра энергетики

Направление подготовки 13.04.02 - Электроэнергетика и электротехника

Направленность (профиль) образовательной программы Электроэнергетические системы и сети

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой

_____ Н.В. Савина

« ____ » _____ 20__ г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: Интеграция возобновляемых источников энергии в распределительную электрическую сеть при ее интеллектуализации

Исполнитель

студент группы 342-ом

подпись, дата

Юй Хан

Руководитель

профессор, докт. техн. наук

подпись, дата

Н.В. Савина

Руководитель

научного содержания

программы магистратуры,

профессор, докт. техн. наук

подпись, дата

Н.В. Савина

Нормоконтроль

старший преподаватель

подпись, дата

Л.А. Мясоедова

Рецензент

подпись, дата

Благовещенск 2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет энергетический
Кафедра энергетики

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

_____ Н.В. Савина
« _____ » _____ 20__ г.

З А Д А Н И Е

К выпускной квалификационной работе студента Юй Хан

1. Тема выпускной квалификационной работы (магистерской диссертации):

Интеграция возобновляемых источников энергии в распределительную электрическую сеть при ее интеллектуализации

(утверждено приказом 06.03.2025 № 609-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы (проекта) 18.06.2025

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе:

Материалы по производственной и преддипломной практикам

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов):

Интеллектуализация распределительных электрических сетей. Характеристика и анализ возобновляемых источников энергии, накопителей электроэнергии. Интеграция возобновляемых источников энергии в интеллектуальную электрическую сеть и особенности режимов работы такой сети с возобновляемых источников энергии. Исследование влияния возобновляемых источников энергии на функционирование интеллектуальных распределительных электрических сетей.

5. Перечень материалов приложения: (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем, программных продуктов, иллюстративного материала и т.п.)

Два чертежа формата А1, презентация

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе (с указанием относящихся к ним разделов)

7. Дата выдачи задания 25.02.2025

Руководитель выпускной квалификационной работы:

Савина Н.В., зав. кафедрой энергетики, д-р техн. наук, профессор

(фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень, ученое звание)

Задание принял к исполнению (дата): 25.02.2025

(подпись студента)

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 133 с., 20 рисунков, 5 таблиц, 57 источников.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПЕРЕХОД, ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНАЯ СЕТЬ, ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ, СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА, ВЕТРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА, СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ, СТРУКТУРА ЭНЕРГОСЕТИ, ПОДКЛЮЧЕНИЕ К СЕТИ, ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИЯ, РЕГУЛИРОВАНИЕ НАГРУЗКИ, КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, НАДЁЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ, ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ

Актуальность работы обусловлена необходимостью перехода к устойчивым, экологически чистым и эффективным энергетическим системам, где распределённая генерация и цифровые технологии играют ключевую роль.

Целью диссертации является анализ структуры, технической инфраструктуры и эксплуатационных характеристик интеллектуальных распределительных сетей, а также разработка решений по повышению управляемости, надёжности и качества электроснабжения при интеграции возобновляемых источников энергии.

В ходе исследования были получены следующие основные результаты:

Проведён сравнительный анализ традиционных распределительных сетей и интеллектуальных распределительных сетей с точки зрения адаптивности, управляемости и энергоэффективности; Изучены типы, архитектуры и особенности применения различных возобновляемых источников энергии и устройств накопления энергии в интеллектуальных распределительных сетях; разработаны принципы выбора узлов подключения возобновляемых источников энергии, методы цифрового управления и стратегии повышения надёжности и качества электроснабжения интегрированных сетей.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1. Интеллектуализация распределительных электрических сетей	9
1.1 Характеристика распределительных электрических сетей и эффективности их функционирования	9
1.2 Выбор технологической инфраструктуры для распределительных электрических сетей, обеспечивающей ее адаптивность и управляемость	21
1.3 Характеристика цифровых технологий, применяемых в распределительных электрических сетях	28
1.4 Выводы	33
2. Характеристика и анализ возобновляемых источников энергии, накопителей электроэнергии	34
2.1 Виды возобновляемых источников энергии, архитектура и области их применения	34
2.1.1 Основная классификация возобновляемых источников энергии	34
2.1.2 Архитектура систем возобновляемой энергетики	40
2.1.3 Области применения возобновляемых источников энергии	46
2.2 Структурные схемы и конструктивное исполнение солнечных электростанций и характеристика их режимов работы	47
2.3 Структурные схемы и конструктивное исполнение ветряных электростанций и характеристика их режимов работы	55
2.4 Выбор типов накопителей электроэнергии для включения их в состав объектов возобновляемых источников энергии	61
2.5 Выводы	65
3. Интеграция возобновляемых источников энергии в интеллектуальную электрическую сеть и особенности режимов работы такой сети с возобновляемых источников энергии	67
3.1 Выбор узлов электрической сети для подключения объекта возобновляемых источников энергии	67

3.2	Разработка принципов и способов включения объектов возобновляемых источников энергии в распределительную электрическую сеть	74
3.3	Характеристика и анализ работы электрической сети с объектами возобновляемых источников энергии	79
3.4	Повышение управляемости электрической сети с возобновляемых источников энергии с помощью цифровых технологий	84
3.5	Выводы	91
4.	Исследование влияния возобновляемых источников энергии на функционирование интеллектуальных распределительных электрических сетей	93
4.1	Регулирование графиков нагрузки электрических сетей с возобновляемыми источниками энергии	93
4.2	Влияние возобновляемых источников энергии на экономичность функционирования электрических сетей	100
4.3	Влияние возобновляемых источников энергии на надежность электроснабжения	105
4.4	Влияние возобновляемых источников энергии на качество электроэнергии	110
4.5	Ожидаемые эффекты от включения возобновляемых источников энергии в интеллектуальную распределительную электрическую сеть	115
4.6	Выводы	122
	Заключение	124
	Библиографический список	127

Введение

Выбор темы «Интеграция возобновляемых источников энергии в распределительную электрическую сеть при ее интеллектуализации» обусловлен современными тенденциями в энергетике, направленными на повышение устойчивости, экологической безопасности и эффективности электроснабжения. Рост доли распределённой генерации и требований к качеству энергии ставит перед операторами и проектировщиками новые задачи—от адаптивного управления сетями до обеспечения надёжного подключения возобновляемых источников.

Традиционные распределительные сети не обладают достаточной гибкостью и автоматизацией для надёжной работы в условиях высокой доли возобновляемых источников энергии, характеризующихся переменной и трудно прогнозируемой выработкой. Это приводит к повышенным потерям, снижению качества напряжения и частоты, а также усложняет планирование нагрузок и аварийное восстановление.

Объект исследования - распределительные электрические сети, включающие элементы автоматизации, цифровых систем управления и распределённую генерацию.

Предмет исследования - методы и средства интеллектуализации распределительных сетей, а также технологии и алгоритмы интеграции солнечных, ветровых и иных возобновляемых источников с учётом обеспечения устойчивости, надёжности и качества электроснабжения.

Цель исследования: разработать комплекс подходов к построению и управлению интеллектуальными распределительными сетями, обеспечивающий эффективную и безопасную интеграцию возобновляемых источников энергии.

Задачи исследования:

1. Проанализировать структурные и функциональные особенности традиционных и интеллектуальных распределительных сетей.
2. Описать архитектуры и характеристики основных типов возобновляемых источников энергии и накопителей в контексте их интеграции

в распределительную сеть.

3. Сформулировать принципы выбора узлов подключения возобновляемых источников с учётом минимизации потерь и повышения надёжности.

4. Разработать методы цифрового мониторинга и управления для обеспечения качества напряжения и частоты при переменной генерации.

5. Оценить влияние возобновляемых источников на эффективность, надёжность и планирование нагрузки сети.

Научная новизна - в работе применялись методы сравнительного анализа и системного моделирования, математического описания энергетических потоков и электрических параметров (модель двухсостояний, расчёт показателей LLR, VQR, SAIFI/SAIDI/CAIDI), цифрового моделирования распределительных сетей в среде MATLAB/Simulink, а также методы обработки больших данных и элементов искусственного интеллекта для прогнозирования генерации и оптимального управления. Системное объединение архитектур интеллектуальной сети и моделей подключения возобновляемых источников для единой методологии интеграции. Предложение цифровых алгоритмов выбора узлов и адаптивного управления с учётом динамики генерации и нагрузки. Комплексная оценка влияния возобновляемых источников на ключевые показатели надёжности и качества сети.

Практическая значимость - теоретическая значимость заключается в развитии моделей адаптивного управления распределительными сетями и расширении методик анализа надёжности при высокой доле распределённой генерации. Практическая ценность работы состоит в рекомендациях по построению и модернизации сетевой инфраструктуры, внедрению систем мониторинга и управления, а также в алгоритмах оценки и оптимизации режимов работы при присоединении солнечных и ветровых электростанций и накопителей.

Работа состоит из четырёх разделов.

Первый раздел посвящён характеристике - характеристика традиционных и интеллектуальных распределительных сетей — их структуры, схемы

(радиальная, кольцевая, сетчатая) и показатели эксплуатационной эффективности.

Во втором разделе рассмотрены типы возобновляемых источников - типы возобновляемых источников и накопителей, их архитектуры, принципы работы и области применения.

В третьем разделе показаны принципы выбора - принципы выбора точек подключения и разработка методов интеграции с цифровыми системами управления, а также анализ особенностей работы сетей с распределённой генерацией.

В четвёртом разделе проанализировано влияние - влияние возобновляемых источников на планирование нагрузки, эффективность, надёжность и качество электроснабжения, с предложением соответствующих мер компенсации и оптимизации.

В процессе обучения в магистратуре принято участие в двух конференциях: "Вестник Амурского государственного университет" и "XXXIV «День науки»". Опубликовано две работы: «Применение возобновляемых источников энергии в интеллектуальных сетях» и «Разработка гибридных энергетических комплексов с возобновляемыми источниками энергии».

1. ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

1.1 Характеристика распределительных электрических сетей и эффективности их функционирования

Распределительная сеть — это ключевое звено в системе электроснабжения, обеспечивающее передачу электроэнергии от подстанций к конечным потребителям (таким как жилые дома, коммерческие предприятия и промышленные объекты). Она представляет собой конечный уровень электросети, соединяющий системы высоковольтной передачи с низковольтным оборудованием потребителей. Эффективность работы распределительной сети напрямую влияет на безопасность, надежность и экономическую эффективность всей энергосистемы, являясь важной основой её стабильной эксплуатации.

С точки зрения технологического развития распределительные сети подразделяются на традиционные и интеллектуальные.

Традиционные распределительные сети характеризуются однонаправленным потоком мощности и централизованным управлением. Электроэнергия напряжением 110 кВ понижается до среднего напряжения (например, 10 кВ, 35 кВ) на подстанциях, а затем понижается до 220 В/380 В через распределительные трансформаторы и, наконец, распределяется по промышленным городам, домохозяйствам и сельским жителям. Для обеспечения качества напряжения в системе устанавливаются трансформаторы распределения и устройства компенсации реактивной мощности, которые поддерживают стабильное напряжение на выходе, предотвращая влияние его колебаний на оборудование.

Недостатки традиционных распределительных сетей включают:

1) Электроэнергия традиционных распределительных сетей поступает с рынка электроэнергии или из других энергосистем, а затем передается конечному пользователю после прохождения через систему передачи;

2) Отсутствие системы оперативного мониторинга и быстрого реагирования на аварии, высокий уровень зависимости от традиционной топологии электрической сети;

3) Источники энергии исключительно централизованные, крупномасштабные электростанции, основная задача сети — транспортировка и распределение;

4) Слабая телекоммуникационная инфраструктура, низкий уровень дистанционного управления и автоматизации;

5) Трудности при интеграции возобновляемых или распределённых источников энергообъектов.

С ростом потребления электроэнергии и диверсификацией источников энергии традиционные распределительные сети сталкиваются с серьёзными вызовами, особенно на фоне широкого внедрения возобновляемых источников энергии. Их режимы работы, регулирования и структурные особенности требуют обновления и перестройки. Интеграция распределительных сетей в интеллектуальные (Smart Grid) системы уже доказала свою эффективность. Smart Grid представляет собой автоматизированную систему, обеспечивающую поток двусторонней электрической энергии и коммуникативную информацию между энергообъектами и потребителями за счет применения новейших технологий, инструментов, которые позволяют повысить эффективность работы электросетевого комплекса [2].

Современные распределительные сети развиваются в направлении «умных» решений. Интеллектуальные «умные» сети — это комплекс технических средств, которые в автоматическом режиме позволяют выявить наиболее слабые и аварийно-опасные участки сети, а затем изменяют характеристики и схему сети с целью снижения потерь и предотвращения аварийных ситуаций. Интеллектуальная сеть для повышения эффективности

передачи и распределения быть само контролирующейся и автоматически балансирующей энергосистемой, обладать возможностями самодиагностики и самовосстановления и включать в свой состав передовые инновационные коммуникационные и управляющие технологии [3].

Интеллектуальная распределительная сеть — это новое поколение электрических сетей, в которое интегрированы технологии связи, автоматизации и цифрового управления. Она обеспечивает двусторонний поток мощности, возможность оперативного контроля и оптимизации в режиме реального времени, что значительно повышает надежность и гибкость всей системы электроснабжения.

Преимущества интеллектуальной распределительной сети:

1) Электроэнергия может не только подаваться от сети к потребителю, но и от потребителя к сети (например, от распределённой генерации, солнечных батарей);

2) Возможность автоматического обнаружения аварий, быстрого изолирования повреждённых участков и восстановления электроснабжения (функция самовосстановления);

3) Использование большого количества датчиков, интеллектуальных выключателей, автоматизированных устройств и системы управления распределением (ADMS);

4) Поддержка подключения возобновляемых и распределённых источников энергии;

5) Умные счётчики и домашние автоматизированные системы позволяют пользователям контролировать потребление и реагировать на изменения тарифов, что повышает энергоэффективность;

6) Благодаря постоянному мониторингу и динамической настройке сокращается время отключений, повышается стабильность и качество электроснабжения.

С точки зрения структуры распределительные сети делятся на радиальную, кольцевую и сетевую. Каждая из них имеет особенности по затратам, надёжности и области применения.

Радиальная структура характеризуется низкими затратами и простой схемой, но имеет низкую надёжность (широкая зона отключения при одной неисправности), поэтому подходит для районов с низкой плотностью нагрузки.

Радиальная структура напоминает древовидную схему: магистральная линия начинается от подстанции и последовательно разветвляется. Поток энергии однонаправлен, каждый узел получает питание только с одной стороны. Преимущества: низкая стоимость строительства, простота проектирования, удобство технического обслуживания. Недостатки: одна авария может вызвать отключение большого участка, отсутствует резервное питание, сложность расширения. Поэтому она чаще применяется в сельских районах. Радиальная структура представлена на рисунке 1.1.

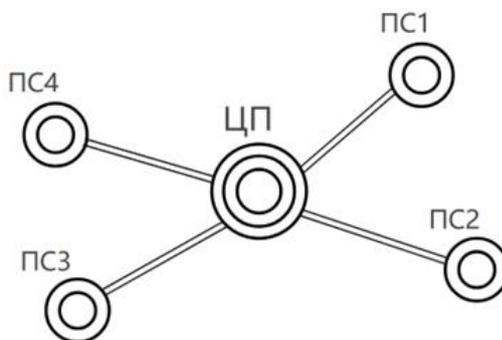


Рисунок 1.1 Радиальная структура

Кольцевая структура более сложна и гибка. С помощью соединительных выключателей образуются замкнутые цепи, обеспечивая взаимное резервирование между подстанциями. Электроэнергия может подаваться с разных направлений, что облегчает изменение структуры при аварии или необходимости расширения.

Кольцевая схема подразумевает, что начало и конец распределительных линий соединены в замкнутый контур, а потребители подключаются к кольцу

через выключатели. Обычно используется в разомкнутом режиме (один из выключателей открыт для предотвращения циркуляции тока). При аварии быстро замыкается резервный выключатель для переключения питания. Преимущества: отказ одной линии не приводит к полной потере питания, возможна работа под напряжением и техническое обслуживание, двойное питание снижает колебания напряжения. Недостатки: высокая стоимость, большее количество выключателей и систем управления, сложность в обеспечении защиты при двустороннем питании. Кольцевая структура применяется в критических зонах, таких как больницы или центры обработки данных. В зависимости от этапа развития городской электросети кольцевая структура может быть одно-, C(U) или двухконтурной, с возможностью поэтапного перехода. Структура кольца представлена на рисунке 1.2.

Характерными особенностями ячеистой структуры распределительной сети являются короткие линии, высокая способность взаимной поддержки и прочная сетевая архитектура, что облегчает многоточечное подключение источников питания. Однако её недостатком является трудность контроля короткого замыкания и ограниченность возможности локализации аварии с помощью мер по расцеплению сети.

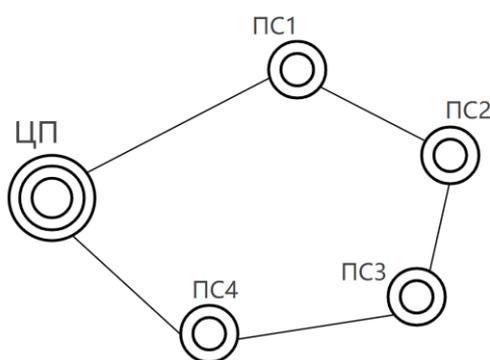


Рисунок 1.2 Кольцевая структура сети

Сложнозамкнутая структура распределительной сети формируется за счёт взаимного соединения множества источников питания и линий, образуя плотную сетевую конфигурацию. Электроэнергия в такой сети может

передаваться по нескольким путям, а нагрузка получать питание из разных направлений. Режим работы такой системы — типичный кольцевой, при котором в сети отсутствует чёткое разделение на магистрали и ответвления. При нормальной эксплуатации система может автоматически перераспределять потоки энергии по разным маршрутам в зависимости от уровня нагрузки, улучшая балансировку. В случае аварии повреждённый участок может быть быстро изолирован, а нагрузка автоматически переключена на резервные линии.

Основные преимущества сложноразветвленной структуры включают: практически полное исключение масштабных отключений при одиночных отказах, гибкость в управлении нагрузками и потоками мощности, малые колебания напряжения и эффективное распределение токов короткого замыкания. Основные недостатки: чрезвычайно высокие капитальные затраты, большое количество линий и коммутационного оборудования, высокая сложность строительства и обслуживания. Кроме того, такая структура требует высокого уровня автоматизации, поддержки системами реального мониторинга и координационного управления. По этой причине сложноразветвленной структуры в основном применяются на критически важных объектах оборонной промышленности и в центральных районах мегаполисов с повышенными требованиями к надёжности электроснабжения. Схема сетчатой структуры представлена на рисунке 1.3.

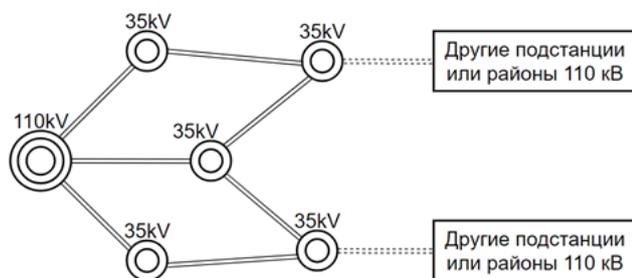


Рисунок 1.3 Схема сложноразветвленной структуры сети

В последние годы, по мере изменения спроса на энергию, гибридные системы и структуры с координацией нескольких источников стали основным направлением развития. Таким образом, гибридные системы можно считать оптимальными системами возобновляемой энергии. Системы электроснабжения, соединенные с фотоэлектрической установкой, ветровой и гидроэлектростанциями и дополненные гидроаккумулирующим хранилищем энергии, позволяют максимизировать использование энергии, снизить закупки энергии из сети и выбросы углекислого газа. Они экологичнее и экономически эффективнее, чем энергосистемы на ископаемом топливе или сетевые конфигурации на одном типе возобновляемой энергии [4]. По сравнению с системами на основе ископаемого топлива или единственного источника возобновляемой энергии, такие многозарядные связанные структуры обладают большей экологичностью и экономической эффективностью. Их основными характеристиками являются межсоединение нескольких источников, двусторонний поток мощности и способность к динамическому управлению, особенно подходящая для сценариев с высокими требованиями к надёжности электроснабжения (например, в центральных районах городов). Эта тенденция также способствует развитию координации нескольких источников и интеграции «источник–сеть–нагрузка–накопление».

С точки зрения уровней напряжения распределительная сеть обычно делится на следующие три уровня:

1) Распределительная сеть высокого напряжения (35 кВ~110 кВ): обычно используется как структура городских сетей города, подаёт электроэнергию от подстанций в крупные городские районы. Характеризуется широкой зоной охвата, большой длиной передачи и высокой нагрузочной способностью. Обычно используется кольцевая структура с двумя источниками питания. Электроэнергия передаётся в распределительные подстанции среднего напряжения или крупным потребителям.

2) Распределительная сеть среднего напряжения (6 кВ~35 кВ): является переходным звеном между высоковольтной и низковольтной

распределительной сетью, охватывает районы среднего размера, обслуживает жилые комплексы, торговые центры, средние заводы и т.д. Часто используется радиальная, кольцевая или гибридная структура. Основная функция — соединение высоковольтных подстанций с трансформаторами низкого напряжения и обеспечение электроснабжения многочисленных малых и средних потребителей.

3) Распределительная сеть низкого напряжения (220 В~380 В): наиболее приближенный к конечным потребителям уровень сети, охватывает небольшую территорию с высокой плотностью потребителей. В основном используется радиальная структура, также имеются отдельные небольшие кольцевые участки. Обеспечивает подачу безопасного, стабильного и качественного низковольтного электропитания для бытовых, малых коммерческих и малых промышленных потребителей.

В первой части разделов были системно рассмотрены основные характеристики распределительных сетей, которые определяют их применимость и надёжность работы в различных условиях. Для дальнейшей комплексной оценки общей эффективности распределительной сети необходимо глубже проанализировать её фактические показатели с точки зрения эксплуатационной эффективности.

Эффективность эксплуатации является важной основой для оценки уровня развития распределительной сети. Она имеет различные ключевые показатели, такие как коэффициент потерь линии (LLR), коэффициент квалификации напряжения (VQR), показатели надёжности электроснабжения (такие как MTTF, MTTR), коэффициент нагрузки и индекс средней частоты отключений системы (SAIFI), а также связанные с ними показатели среднее время отключения системы (SAIDI) и индекс средней продолжительности отключения пользователя (CAIDI).

LLR (уровень потерь) отражает долю потерь электроэнергии в процессе передачи и распределения из-за сопротивления проводов, электрооборудования и других внутренних факторов по отношению к общему объёму поставленной

энергии. В сетях передачи (высокое напряжение, большие расстояния) LLR составляет, как правило, 3%~7%; в распределительных сетях (среднее и низкое напряжение) — 5%~15%. В эффективно управляемых системах распределения LLR может быть ниже 5%. Формула расчёта:

$$LLR = \frac{m - s}{m} \times 100\% \quad (1.1)$$

m — общая поставка мощности, а s — проданная мощность.

VQR — это доля времени, в течение которого значение напряжения находится в пределах указанного стандартного диапазона в течение определенного периода времени. В нормальных условиях колебания напряжения на клеммах поддерживаются в пределах ± 10 . Формула расчета коэффициента квалификации напряжения (Vq) имеет вид:

$$Vq = \frac{t}{T} \times 100\% \quad (1.2)$$

t — квалифицированное время напряжения, а T — общее время обнаружения.

Показатели надежности электроснабжения включают среднее время наработки на отказ (MTTF) и среднее время ремонта (MTTR). При системных сбоях для компонентов, которые могут быть восстановлены после повреждения, используется модель «двойного состояния», которая имитирует фактическое рабочее состояние компонентов, при этом рассматриваются только нормальное рабочее состояние и состояние устранения неисправности. Как показано на рисунке 1.4, λ представляет собой интенсивность отказов компонента, а μ представляет собой интенсивность восстановления после отказов компонента.

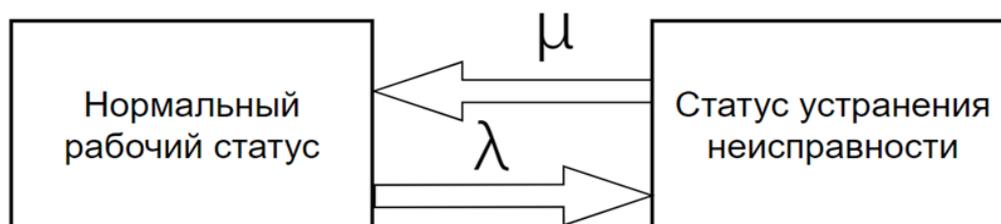


Рисунок 1.4 Модель двух состояний компонента

Учитывая, что отказы компонентов происходят и подчиняются экспоненциальному распределению, а интенсивность отказов данного компонента равна λ , то вероятность того, что компонент не выйдет из строя в течение времени t , равна:

$$P_{\lambda} = e^{-\lambda t} \quad (1.3)$$

Тогда время отказа компонента следует экспоненциальному распределению, а его функция плотности вероятности имеет вид:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, t \geq 0 \quad (1.4)$$

MTTF — это ожидаемое значение времени отказа, и его формула имеет вид:

$$MTTF = E[T] = \int_0^{\infty} t f_T(t) dt \quad (1.5)$$

Подстановка формулы (1.4) в формулу (1.5) дает:

$$E[T] = \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt \quad (1.6)$$

Результат можно получить методом интегрирования по частям:

$$MTTF = E[T] = \frac{1}{\lambda} \quad (1.7)$$

Процесс ремонта компонента также соответствует экспоненциальному распределению. Скорость ремонта компонента составляет μ . Аналогично плотность распределения времени ремонта можно получить как:

$$f_R(t) = \mu e^{-\mu t} \quad (1.8)$$

MTTR — среднее время ремонта:

$$MTTR = E[T_{repair}] = \int_0^{\infty} t \mu e^{-\mu t} dt = \frac{1}{\mu} \quad (1.9)$$

Коэффициент нагрузки — это отношение средней нагрузки к максимальной нагрузке электросети или оборудования за определенный период времени. Чем выше уровень нагрузки, тем она стабильнее, тем выше эффективность работы электросети и тем разумнее использование ресурсов. В городских распределительных сетях идеальный уровень нагрузки составляет

40–60%. В таких местах, как промышленные парки, идеальная загрузка составляет 50–80%. В сельской местности и других районах идеальная норма нагрузки составляет 20–40%.

SAIFI измеряет количество устойчивых отключений электроэнергии, с которыми сталкивается каждый пользователь в системе электроснабжения в течение года. Он фокусируется на частоте отключений электроэнергии, а не на продолжительности каждого отключения электроэнергии. SAIFI является основным показателем в оценке надежности энергосистемы. Его формула расчета:

$$SAIFI = \frac{\sum p}{q} \quad (1.10)$$

Где p представляет собой количество пользователей, затронутых каждым отключением электроэнергии, а $\sum p$ представляет собой общее количество пользователей, затронутых каждым отключением электроэнергии во всех зарегистрированных непрерывных событиях отключения электроэнергии (в отличие от мгновенных сбоев, обычно превышающих запланированное время), которые произошли в системе в течение года. q представляет собой общее количество пользователей в системе, как правило, общее количество пользователей, обслуживаемых системой электроснабжения.

SAIFI является одним из самых основных и важных показателей для измерения непрерывности или доступности электроснабжения пользователей системой электроснабжения. Чем ниже значение, тем надежнее система и тем меньше отключений электроэнергии испытывают пользователи. Его можно использовать для сравнения показателей надежности электроснабжения разных компаний-поставщиков электроэнергии, разных регионов и разных лет. Анализируя значения SAIFI разных регионов и разных фидеров, он может помочь энергетическим компаниям выявить области с низкой надежностью, чтобы сделать целевые инвестиции и преобразования.

SAIDI является еще одним основным показателем в оценке надежности энергосистем. SAIDI представляет собой среднее время отключения

электроэнергии на пользователя в регионе в год. Оно отражает степень воздействия на пользователей электроснабжения, поэтому чем меньше значение, тем лучше в теории. Формула его расчета:

$$SAIDI = \frac{\sum(p * t)}{q} \quad (1.11)$$

Где t продолжительность отключения электроэнергии. $\sum(p*t)$ представляет собой диапазон воздействия (количество пользователей) каждого отключения электроэнергии, умноженный на продолжительность отключения электроэнергии во всех зарегистрированных непрерывных событиях отключения электроэнергии, которые произошли в системе в течение года, а затем произведение всех событий суммируется.

CAIDI — это средний индекс продолжительности отключения электроэнергии для пользователей. Он измеряет среднюю продолжительность отключения электроэнергии, с которой столкнулись затронутые пользователи в каждом событии отключения электроэнергии, и его формула расчета выглядит следующим образом:

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI} \quad (1.12)$$

В условиях развития интеллектуальных технологий эксплуатационные характеристики распределительных сетей значительно улучшаются. Снижаются потери, повышаются показатели надёжности, резко уменьшается время реагирования диспетчерских служб. Особенно важно то, что такие сети обладают высокой адаптивностью и гибкостью при колебаниях генерации со стороны ВИЭ [5].

Характеристики распределительных сетей определяют необходимость поддержания эффективной и стабильной передачи и распределения электроэнергии в сложных и изменяющихся эксплуатационных условиях. Благодаря разумному проектированию структуры, научному управлению эксплуатацией и применению современных интеллектуальных технологий, эффективность работы распределительной сети может быть постоянно повышена, обеспечивая чистое, эффективное и безопасное электроснабжение.

Таким образом, структурные характеристики распределительных сетей и эксплуатационная эффективность являются важной основой для оценки уровня их развития и степени интеллектуализации. Реализация строительства интеллектуальных распределительных сетей способствует не только повышению эффективности использования электроэнергии и стабильности системы, но и предоставляет необходимую основу для создания электроэнергетической системы, дружественной к возобновляемым источникам энергии.

1.2 Выбор технологической инфраструктуры для распределительных электрических сетей, обеспечивающей ее адаптивность и управляемость

На фоне энергетической трансформации и глубоких изменений в энергосистеме распределительные сети эволюционируют от традиционных пассивных систем электроснабжения до сложных сетевых структур с интеллектуальными, адаптивными и управляемыми возможностями. Столкнувшись с новыми условиями эксплуатации, такими как доступ из нескольких источников, частые колебания нагрузки и двунаправленный поток электроэнергии, традиционная техническая инфраструктура оказалась неспособной удовлетворить требования высокой надежности, высокой гибкости и высокой управляемости. Изменения в сфере энергетики, включая внедрение возобновляемых источников энергии, предъявляют новые требования к подстанциям в электроэнергетических системах, что направлено на улучшение их эффективности, безопасности и производительности [6]. Поэтому необходимо создать полную и передовую систему технической инфраструктуры для все более сложной интеллектуальной распределительной сети.

Интеллектуальные распределительные сети обеспечивают мониторинг в режиме реального времени и интеллектуальное управление состоянием сети за счет использования современных датчиков, эффективных коммуникационных технологий и гибких технологий автоматизации, тем самым значительно

повышая гибкость и надежность. Инфраструктура интеллектуальной распределительной сети включает в себя интеллектуальные подстанции, распределенные системы автоматизации (DAS), интеллектуальные терминалы и централизованные платформы управления и т. д. Эти технические средства могут поддерживать сбор и анализ данных в реальном времени, удаленно управлять распределительной сетью и выполнять такие функции, как анализ неисправностей и самовосстановление, делая распределительную сеть более экологически адаптируемой и динамически управляемой.

Для достижения вышеуказанных целей техническая инфраструктура интеллектуальной распределительной сети должна быть совместно построена на нескольких уровнях, включая физическую архитектуру, коммуникационные и сенсорные технологии, а также системы управления.

С физической точки зрения современные распределительные сети должны иметь возможность дополнять несколько источников энергии и иметь доступ к нескольким источникам питания, что предъявляет более высокие требования к базовой структуре и конфигурации оборудования электросети. Приоритет следует отдать использованию открытых сетевых структур, поддерживающих распределенные источники энергии (такие как фотоэлектрические и ветроэнергетические установки) и системы накопления энергии. Распределительные трансформаторы, устройства компенсации реактивной мощности, коммутационные устройства и т. д. должны иметь возможности дистанционного управления и контроля состояния, закладывая основу для интеллектуальной работы на аппаратном уровне.

В распределительной сети распределительные трансформаторы и устройства компенсации реактивной мощности являются важным оборудованием, обеспечивающим эффективную и стабильную передачу электроэнергии. Трансформатор представляется в виде ряда функциональных (под) систем, состояние которых обеспечивает выполнение главных функций: передачу электромагнитной энергии, сохранения электрической прочности изоляции, механической прочности обмоток и целостности токоведущей

системы [7]. Они играют ключевую роль в повышении качества электроэнергии, снижении потерь, оптимизации уровней напряжения и обеспечении надежности системы.

Распределительный трансформатор — это трансформатор, используемый в электросетях с более низкими уровнями напряжения (обычно 10 кВ и ниже) для понижения высокого напряжения до низкого напряжения (например, 0,38 кВ), которое может напрямую использоваться пользователями. Распределительные трансформаторы могут преобразовывать электрическую энергию высокого напряжения из системы передачи в электрическую энергию среднего и низкого напряжения, пригодную для распределительной сети. Это позволяет снизить потери при передаче и обеспечить стабильность и качество электропитания. Обычные распределительные трансформаторы можно разделить на следующие категории в зависимости от их использования и конструкции:

1) Масляный распределительный трансформатор: хорошие изоляционные характеристики, высокая способность рассеивания тепла, широко используется на открытом воздухе.

2) Сухой распределительный трансформатор: в качестве охлаждающей среды используется воздух, он экологически безопасен и подходит для использования в помещениях или местах массового скопления людей.

3) Интеллектуальный распределительный трансформатор: он имеет встроенные датчики и модули мониторинга, а также функции обнаружения состояния, предупреждения о неисправностях и удаленной связи для удовлетворения потребностей интеллектуальных распределительных сетей.

Устройства компенсации реактивной мощности используются для регулирования реактивной мощности в распределительных сетях, поддержания стабильного уровня напряжения в системе, снижения линейных токов и повышения эффективности передачи. Устройства компенсации реактивной мощности могут улучшить коэффициент мощности, снизить потери в линии и нагрев оборудования, стабилизировать напряжение в сети, предотвратить падения или колебания напряжения, увеличить пропускную способность и

снизить нагрузку на трансформатор и линию. К распространенным устройствам компенсации реактивной мощности относятся:

1) Устройство фиксированного типа компенсации:

а) Шунтирующая конденсаторная батарея (ШК): путем ввода емкостной реактивной мощности в электросеть компенсирует индуктивные реактивные потери, тем самым повышая уровень напряжения, снижая потери и улучшая коэффициент мощности.

б) Шунтирующий реактор (ШР): используется для поглощения избыточной емкостной реактивной мощности в электросети, в основном для решения проблемы перенапряжения промышленной частоты, когда сверхвысоковольтная линия или кабельная сеть слабо нагружены, и для подавления повышения напряжения, одновременно снижая риск рабочего перенапряжения, тем самым обеспечивая безопасность изоляции оборудования.

2) Устройство динамического типа регулировки:

а) Статический компенсатор реактивной мощности (SVC): путем быстрой регулировки емкостной или индуктивной реактивной мощности (скорость отклика ≤ 40 мс) он динамически подавляет колебания и мерцание напряжения и особенно подходит для управления качеством электроэнергии при ударных нагрузках.

б) Статический синхронный компенсатор (SVG): Он использует полностью управляемые устройства для достижения реактивной точности регулирования на уровне миллисекунд (скорость отклика ≤ 5 мс) и может по-прежнему выдавать емкостную/индуктивную реактивную мощность на полную мощность, когда напряжение системы внезапно падает, что значительно улучшает переходную устойчивость и качество электроэнергии электросети.

3) Устройства специального назначения:

а) Синхронный конденсатор (СК): Обеспечивает динамическую поддержку реактивной мощности и инерцию вращения за счет вращения

ротора, повышает емкость короткого замыкания и переходную устойчивость электросети и особенно подходит для предотвращения провала напряжения и черного запуска электросетей с высокой долей возобновляемой энергии.

б) Статический генератор реактивной мощности (гибридное устройство APF+SVG). Синхронно реализует динамическую компенсацию реактивной мощности и фильтрацию гармоник высокого порядка и объединяет одно устройство для решения проблемы качества электроэнергии в нелинейных областях концентрации нагрузки.

Устройства компенсации реактивной мощности имеют разные приоритеты использования в разных условиях, как показано на рисунке 1.5. Необходимо выбрать правильное устройство при разумных требованиях.

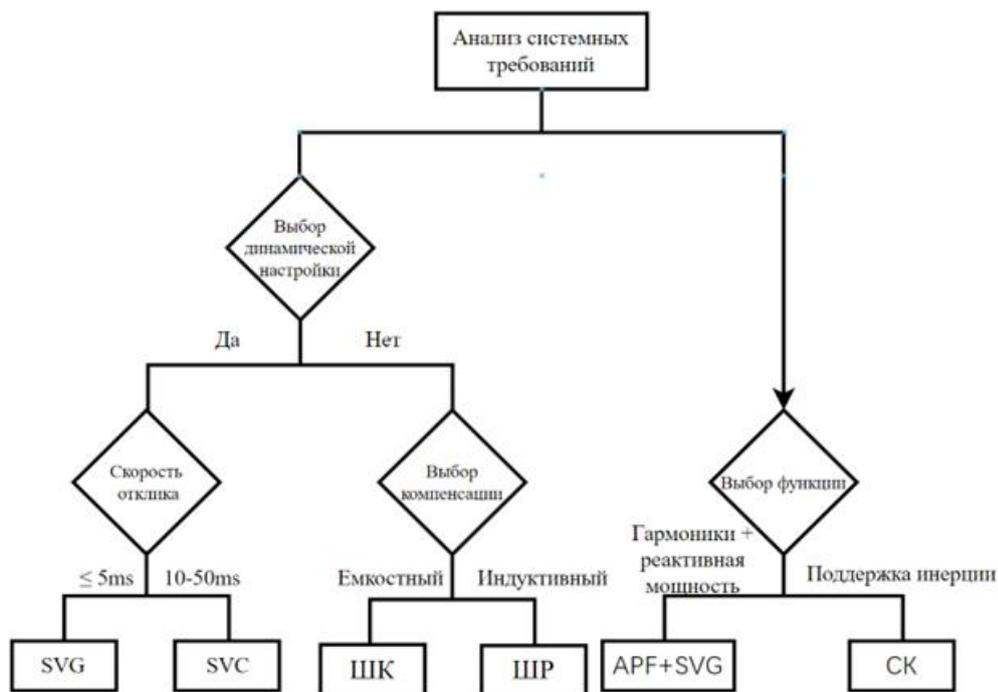


Рисунок 1.5 Схема выбора оборудования

Распределительные трансформаторы и устройства компенсации реактивной мощности часто работают вместе, обеспечивая с помощью интеллектуальных систем управления (таких как системы автоматизации распределительных сетей, ADMS) следующее:

1) Динамически регулировать распределение напряжения и реактивной мощности в соответствии с изменениями нагрузки.

2) Напряжение в узлах распределительной сети можно точно регулировать, связав регулирование напряжения под нагрузкой трансформатора с оборудованием компенсации реактивной мощности.

3) Снизить энергопотребление системы распределения электроэнергии и повысить общую экономичность и безопасность эксплуатации.

4) Поддержка напряжения и баланса мощности при подключении возобновляемой энергии к сети, а также повышение гибкости и способности к самовосстановлению распределительной сети.

Устройства продольной компенсации (УПК) устанавливаются для повышения пропускной способности вл и обеспечения более эффективной работы существующих линий электропередач. Большое разнообразие мощных генерирующих источников, а также ВЛ, в особенности передающих электроэнергию на дальние расстояния, приводит к увеличению требований по экономичности и надежности работы энергосистем в целом [8].

При рассмотрении вопроса доступа к возобновляемым источникам энергии обычно выбираются высокопроизводительные интеллектуальные трансформаторы, поддерживающие динамическое регулирование реактивной мощности, а также устанавливаются устройства динамической компенсации реактивной мощности и активные фильтры мощности (APF) для адаптации к нестабильности фотоэлектрических, ветровых и других источников энергии, балансировки прерывистых нагрузок и контроля гармоник.

На уровне восприятия и сбора данных технология интеллектуального восприятия является необходимым условием для достижения визуализации и точного контроля состояния распределительной сети. Развертывание интеллектуальных счетчиков, индикаторов неисправностей, устройств измерения фаз (PMU) и беспроводных сенсорных сетей (WSN) в распределительной сети позволяет осуществлять мониторинг ключевых

параметров в режиме реального времени, таких как напряжение, ток, частота, нагрузка и качество электроэнергии.

На уровне системы управления и информации необходимо создать высоко интегрированную систему автоматизации распределения (DAS) и систему управления энергопотреблением (EMS), которые будут объединены с географическими информационными системами (ГИС), системами ADMS и системами устранения неисправностей (FLISR) и т. д., чтобы сформировать замкнутую систему от сбора данных до анализа и принятия решений, исполнения и контроля. Такая структура системы помогает улучшить общую управляемость сети, наблюдаемость и эффективность работы.

Современные системы автоматизации распределения включают в себя автоматизацию фидеров, контроллеры терминалов, главные станции связи и другие каналы связи, позволяющие быстро локализовать неисправность, изолировать ее и восстановить подачу электроэнергии. Особенно в условиях распределенного доступа к энергии распределительная сеть должна иметь возможность двухуровневого управления: «распределенная автономия + централизованная координация». Используя локальные блоки управления (ЛБУ) для совместной работы с главным центром управления, можно значительно повысить скорость реагирования на неисправности.

Энергосистема состоит из подстанций, реле, токопроводов, различной сложной аппаратуры, которой стало сложно управлять. Для эксплуатации и обслуживания требуется много квалифицированных кадров. С ростом количества энергосистем, с появлением возобновляющейся или, как ее называют, зеленой энергетики возникла необходимость в микросетях нового поколения на основе 5G. С помощью 5G можно построить модель прогнозирования объемов производства и потребления энергии [9]. Двусторонняя связь между оборудованием цифровой распределительной сети и центром управления строится с использованием новых коммуникационных технологий, таких как частные сети 5G, оптоволоконная связь, Интернет вещей (IoT) и беспроводные сети.

Подводя итог, можно сказать, что создание технической инфраструктуры с высокой степенью адаптивности и управляемости является не только гарантией нормальной работы интеллектуальной распределительной сети, но и техническим ядром для поддержки доступа к большой доле возобновляемой энергии и реализации гибкой диспетчеризации и интеллектуального управления энергосистемой.

1.3 Характеристика цифровых технологий, применяемых в распределительных электрических сетях

Современная электросеть обеспечивает электропитанием современные жизненные сети, состоящие из электромобилей, устройств «умного дома», центров обработки данных и т. д., и спрос на электроэнергию со стороны этих устройств также растет. Традиционные распределительные сети не способны адаптироваться к экстремальным изменениям окружающей среды, аномальному пиковому потреблению электроэнергии или предотвращать перебои в подаче электроэнергии. Революционное значение интеллектуальных распределительных сетей заключается в том, что они являются цифровыми. Цифровизация может сделать распределительные сети более надежными, устойчивыми, адаптивными и безопасными.

Прогнозируется, что к 2035 году мировое потребление энергии и электроэнергии значительно возрастет, тенденция показана на рисунке 1.6. С помощью цифровизации интеллектуальных сетей можно еще больше увеличить выработку электроэнергии. Сегодня инженеры разрабатывают различные интеллектуальные счетчики, интеллектуальные подстанции и другую инфраструктуру для удовлетворения растущего спроса на энергию. Чем больше цифровых технологий мы будем использовать в распределительных сетях, тем проще будет определять и разумно управлять потреблением энергии. Из рисунка 1.6 видно, что темпы роста спроса на электроэнергию в ближайшие десять лет останутся высокими, однако темпы спроса на энергию в ближайшие десять лет снизятся. Это свидетельствует о том, что большая доля возобновляемой энергии подключена и в процессе производства

электроэнергии используются передовые цифровые технологии. Коэффициент преобразования энергии значительно повышается, а потери энергии эффективно сокращаются.

В основе применения цифровых технологий в интеллектуальных распределительных сетях лежит интегрированный механизм взаимодействия «обнаружение-коммуникация-вычисление-управление», который требует, чтобы выбор цифровых технологий был совместим с интеграцией. Использование в качестве такой перспективной модели развития именно цифровых платформ получает в последнее время широкое распространение по всему миру. В современной практике есть примеры промышленных платформ, использующих такие технологии, как интернет вещей, искусственный интеллект, умное производство, блокчейн и их сочетание и др [10].

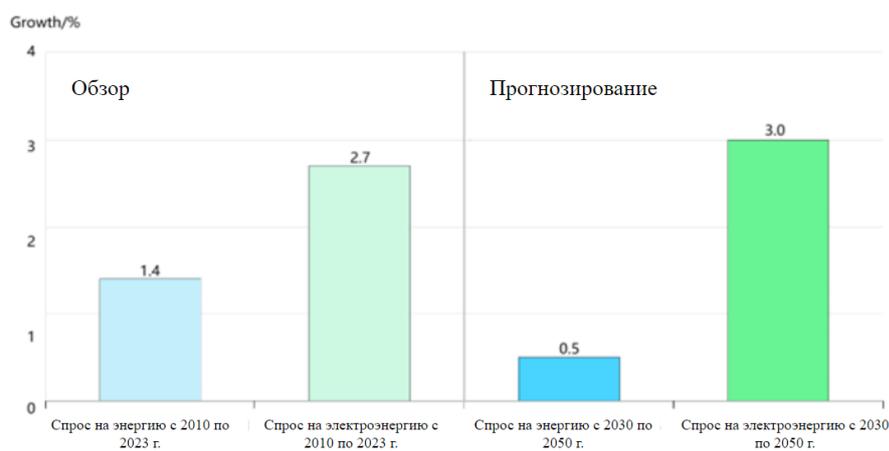


Рисунок 1.6 Обзор и прогнозирование спроса на электроэнергию

Объем данных, генерируемых в интеллектуальной распределительной системе, огромен, а традиционную ИТ-архитектуру сложно поддерживать. С этой целью распределительные компании постепенно строят большие центры обработки данных на основе облачных платформ и используют распределенные вычисления и облачное хранилище для прогнозирования нагрузки и оптимизации энергопотребления на основе данных об эксплуатации электросетей. Такая модель снимает нагрузку с основной сети и повышает своевременность устранения неисправностей и корректировки нагрузки.

В последние годы российское правительство уделяет большое внимание модернизации и цифровой трансформации энергетического сектора, особенно в распределительной сети. Применение цифровых технологий стало ключевым средством повышения эффективности, надежности и уровня интеллектуальности электросетей. Согласно «Проекту энергетической стратегии России на период до 2050 года» (ЭС-2050), к 2050 году Россия планирует добиться комплексной модернизации и цифровизации энергетической инфраструктуры и содействовать всестороннему применению искусственного интеллекта в управлении национальной электросетевой системой.

В распределительной сети электропитания применение цифровых технологий в основном отражается в следующих аспектах:

1) Интеллектуальная система учета (ИСУ): Россия широко развернула интеллектуальные счетчики для достижения мониторинга в реальном времени и сбора данных о потреблении электроэнергии, поддержки выставления счетов по времени использования и динамического механизма ценообразования на электроэнергию, а также повышения прозрачности потребления электроэнергии и мощности управления нагрузкой электросети. Интеллектуальная система распределения широко использует различное цифровое измерительное оборудование, такое как интеллектуальные счетчики, интеллектуальные датчики и устройства онлайн-мониторинга. Эти устройства могут осуществлять высокочастотный сбор параметров, таких как напряжение, ток, активная/реактивная мощность, качество электроэнергии, температура и т. д., и предварительно обрабатывать их с помощью вычислительной технологии периферийных устройств, что значительно улучшает обработку данных в реальном времени и эффективность. Интеллектуальные датчики имеют такие функции, как самотестирование, сигнализация и удаленная связь; периферийные устройства находятся близко к концу устройства для предварительного анализа и предварительной обработки, что снижает нагрузку на связь.

2) Расширенная система управления распределением (ADMS): Интегрируя оборудование автоматизации и коммуникационные технологии, она реализует мониторинг в реальном времени, обнаружение и локализацию неисправностей, прогнозирование нагрузки и оптимизированное планирование распределительной сети, повышая способность к самовосстановлению и эффективность работы электросети. Современные распределительные системы объединяют несколько систем, таких как системы сбора и мониторинга данных (SCADA), ADMS, GIS и т. д., в единую платформу, достигая стандартизации и модуляризации данных, функций и интерфейсов, снижая сложность системы и улучшая эффективность эксплуатации и обслуживания, а также возможности координации. Кроме того, развертывание на основе облачной платформы также стало основной тенденцией, повышая масштабируемость и возможности гибкого планирования системы.

3) Искусственный интеллект и анализ больших данных: Используя алгоритмы искусственного интеллекта и технологии анализа больших данных, углубленный анализ данных об эксплуатации электросети повысил точность прогнозирования нагрузки и предсказуемость обслуживания оборудования, поддерживая принятие решений и конфигурацию оптимизации ресурсов. Внедрение технологии ИИ в управление распределительными сетями постепенно переходит от «планирования на основе опыта» к «интеллектуальному планированию на основе данных». Алгоритмы машинного обучения могут изучать правила эксплуатации на основе исторических данных для повышения точности прогнозирования и возможностей реагирования. В то же время они также могут выявлять потенциальные опасности неисправностей с помощью моделей обнаружения аномалий, оптимизировать планы эксплуатации и обслуживания и распределение ресурсов. Они широко используются в интеллектуальных распределительных сетях. Среди них текущая высокоинтеллектуальная система ИИ (DeepSeek, ChatGPT и т. д.) оснащена для управления распределительной сетью, что может значительно

повысить способность интеллектуальной распределительной сети противостоять рискам помех.

4) Инфраструктура связи: Эффективная и надежная система связи является ключевой инфраструктурой для реализации цифровизации распределительных сетей. С помощью новых коммуникационных технологий, таких как частные сети 5G, оптоволоконная связь, узкополосный Интернет вещей (NB-IoT) и беспроводные сети, цифровая распределительная сеть создала двустороннюю связь между оборудованием и центром управления. NB-IoT — это новая узкополосная технология связи, которая была построена на базе существующих сетей LTE. Разработка стандарта этой технологии была завершена консорциумом, разрабатывающим спецификации для мобильной телефонии, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), в 2016 г [11]. Эта возможность не только позволяет центру управления осуществлять удаленный мониторинг и диспетчеризацию, но и обеспечивает терминальным устройствам возможность получения данных обратной связи и оповещения о неисправностях.

5) Кибербезопасность и защита данных: с ростом степени цифровизации электросети Россия усилила защиту кибербезопасности энергосистемы, используя передовые межсетевые экраны, системы обнаружения вторжений и технологии шифрования данных для обеспечения безопасной и стабильной работы электросети.

Кроме того, Россия и Китайская государственная сетевая корпорация подписали соглашение о сотрудничестве для совместного содействия цифровизации российской электросети, планируют реализовать пилотный проект цифровой электросети в Уральском регионе и содействовать сотрудничеству между двумя сторонами в области технического обмена и локализованного производства оборудования.

Все вышеперечисленные технологии позволяют реализовывать моделирование, прогнозирование и интеллектуальное принятие решений по оптимизации сложных систем распределения и обладают многими характеристиками, такими как комплексное восприятие, быстрое реагирование,

совместный интеллект, прозрачная работа, безопасность и надежность. Он также обеспечивает базовую поддержку широкомасштабного доступа и эффективного планирования возобновляемой энергии.

1.4 Выводы

Систематически проанализированы различные структуры и основные эксплуатационные показатели традиционных и интеллектуальных распределительных сетей. Показано, что внедрение интеллектуальных технологий способствует значительному повышению эффективности их функционирования.

Рассмотрено оборудование, необходимое для построения интеллектуальных распределительных сетей, включая интеллектуальные подстанции, распределительные трансформаторы и устройства компенсации реактивной мощности. Раскрыты методы комплексного и согласованного управления данными компонентами в условиях цифровизации электросетевого комплекса.

Указан интегрированный путь «обнаружение – коммуникация – вычисление – управление» в рамках интеллектуальных распределительных сетей. Представлены ключевые цифровые технологии, такие как облачно-периферийное взаимодействие, искусственный интеллект, большие данные, автоматизированная система управления распределением, технологии блокчейн и информационной безопасности, которые формируют технологическую основу современного распределительного электроснабжения.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА И АНАЛИЗ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ, НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

2.1 Виды возобновляемых источников энергии, архитектура и области их применения

По мере роста мирового спроса на электроэнергию все большее развитие получают электрифицированные системы возобновляемой энергии. За последнее десятилетие спрос на электроэнергию рос в два раза быстрее общего спроса на энергию; На Китай, крупнейшую развивающуюся страну мира, приходится 60% роста мирового спроса на электроэнергию. Прогноз мирового спроса на электроэнергию в 2050 году на 6% выше прошлогоднего прогноза, или на 2200 тераватт-часов. В ближайшие несколько лет темпы роста спроса на электроэнергию еще больше возрастут, а годовой прирост мирового спроса на электроэнергию будет эквивалентен общему спросу на электроэнергию Японии; Резкий рост спроса на энергию неизбежно приведет к ее истощению. Проблему истощения ресурсов можно решить двумя способами: использованием альтернативных источников энергии и энергосбережением. Согласно исследованиям, 72% используемых в настоящее время в мире источников энергии поступают из альтернативных источников энергии. 54% из них приходится на страны Азии. За последние годы в США и Европе было закрыто множество электростанций, работающих на ископаемом топливе [12]. Поэтому крайне необходимо повышать долю возобновляемой энергии.

2.1.1 Основная классификация возобновляемых источников энергии

Возобновляемая энергия относится к энергетическим ресурсам, которые поступают из природы, могут быть естественным образом восполнены за относительно короткий период времени и теоретически не истощатся. В условиях постоянного роста мирового спроса на энергию и ужесточения требований по охране окружающей среды доля возобновляемых источников энергии в структуре энергетики продолжает увеличиваться, становясь важным направлением будущего развития энергетики. В зависимости от источника

энергии возобновляемая энергия в основном включает солнечную энергию, энергию ветра, гидроэнергетику, энергию биомассы, геотермальную энергию и энергию океана. Возобновляемые источники энергии, такие как солнечная энергия, энергия ветра, биомассы и гидроэнергия, известные как экологические источники энергии, обладают значительными преимуществами по сравнению с традиционными источниками энергии с точки зрения экологической устойчивости [13].

Генерация солнечной энергии — это процесс преобразования энергии солнечного излучения в электрическую энергию. Основные методы производства электроэнергии делятся на две категории: фотоэлектрическая генерация электроэнергии и солнечная тепловая генерация электроэнергии. Преимущества солнечной энергетики в том, что она чистая, экологичная и возобновляемая. В процессе выработки электроэнергии не происходит выброса вредных газов. Применимо к распределенной генерации электроэнергии и крупномасштабной централизованной генерации электроэнергии. Однако именно «распределенная энергетика» с ее оптимизацией источников и потоков может помочь в условиях износа и низкой эффективности централизованной энергетики обеспечить повышение надежности и качества энергоснабжения потребителей [14]. Генерация солнечной энергии стала важной частью глобальной энергетической трансформации, поэтому эта эффективная и чистая энергия будет более подробно рассмотрена в последующих главах.

Генерация энергии ветра — это процесс преобразования механической энергии в электрическую с использованием энергии ветра. Основные методы производства электроэнергии делятся на наземную ветроэнергетику и морскую ветроэнергетику. Генерация энергии ветра также является чистой и возобновляемой и может эффективно сократить выбросы парниковых газов. Это важный вид возобновляемой энергии. Генерация энергии ветра особенно подходит для регионов с богатыми ресурсами ветроэнергетик. С развитием технологий себестоимость ветроэнергетики постоянно снижается, а ее доля в

возобновляемой энергетике также увеличивается. Поэтому он также будет подробно представлен в последующих главах.

Гидроэнергетика — это возобновляемый источник энергии, который вырабатывает электроэнергию путем преобразования энергии воды в электричество. При производстве гидроэлектроэнергии обычно используются сила тяжести и скорость течения построенных плотин, рек и других водоемов для вращения водяных колес, которые, в свою очередь, приводят в действие генераторы, вырабатывающие электроэнергию. Основными способами получения гидроэлектроэнергии являются гидроаккумулирующие электростанции и русловые электростанции (которые не требуют строительства водохранилищ, а используют естественный сток рек).

Гидроэнергетику можно разделить на режим централизованной крупномасштабной генерации электроэнергии и режим распределенной маломасштабной генерации электроэнергии. Среди них ГЭС «Три ущелья» в Китае и Саяно-Шушенская ГЭС в России являются типичными централизованными крупномасштабными ГЭС. Каскадные ГЭС Болгарии являются распределенными ГЭС.

Крупнейшей в мире гидроэлектростанцией является китайская плотина «Три ущелья», которая занимает первое место в мире по масштабу, установленной мощности и выработке электроэнергии. ГЭС «Три ущелья» имеет в общей сложности 34 гидротурбинных агрегата (32 основных агрегата по 700 МВт + 2 энергоблока по 50 МВт) общей установленной мощностью 22 500 МВт. В 2020 году был установлен рекорд по выработке электроэнергии — 111,8 млрд кВт·ч. Этого достаточно для обеспечения электроэнергией 150 млн домохозяйств. Высота плотины ГЭС «Три ущелья» составляет 181 метр, длина плотины — 2335 метров, а емкость водохранилища — 39,3 миллиарда кубометров. Однако строительство ГЭС привело к затоплению 632 квадратных километров земли, переселению 1,3 миллиона человек из своих домов и блокированию путей миграции некоторых редких видов (китайского осетра).

Крупнейшая гидроэлектростанция России — Саяно-Шушенская ГЭС, расположенная в верховьях реки Ангары. Общая установленная мощность станции составляет 6400 МВт, она оснащена 10 турбогенераторными установками мощностью 640 МВт. Годовая выработка электроэнергии составляет 25 млрд кВтч, что обеспечивает население России большим объемом чистой и возобновляемой энергии. Высота плотины составляет 242 метра, и это одна из самых высоких арочных плотин в мире. Она также может регулировать сток рек, снижать риски наводнений и оказывать поддержку орошаемому земледелию и управлению водными ресурсами.

Эти гидроэлектростанции являются типичными крупномасштабными централизованными электростанциями, которым требуется концентрированная энергия и высокая эффективность, но которые имеют большие потери при передаче и требуют высокой стабильности сети, что подходит для богатых ресурсами районов. В отличие от централизованных электростанций, распределенные электростанции имеют рассредоточенную энергию, что может снизить потери при передаче, повысить надежность электроснабжения и полагаться на интеллектуальные счетчики и технологии управления спросом.

Болгарская каскадная электростанция (Санданска Бистрица) построена вдоль рек гор Пирин. Она состоит из трех гидроэлектростанций (общей установленной мощностью 56 МВт) и реализует эффективное использование водных ресурсов за счет развития водоотвода с низкой плотинной. Проект не только поставляет электроэнергию в город и близлежащие деревни и поселки, но также учитывает сельскохозяйственное орошение и экотуризм, становясь важным моноэнергетическим дополнительным центром на юго-западе Болгарии. В будущем планируется объединить модернизацию аккумуляторных батарей для усиления пиковой мощности региональной электросети и продолжить координацию энергоснабжения и экологической защиты национального парка Пирин в режиме низкого возмущения. Каскадная электростанция является моделью развития малой гидроэнергетики Болгарии и важной частью распределенных электростанций.

Возобновляемые гидроэнергетические ресурсы, появляющиеся благодаря экономии топлива, и сопутствующие затраты на его добычу, переработку и транспортировку. Топливный эффект от установок ВИЭ составляет значительную часть общего экономического эффекта, ежегодно возрастая [15]. Гидроэнергетика также является важной частью сектора возобновляемой энергетики.

Поскольку биомасса непрерывно производится природой, она также считается возобновляемым источником энергии. Производство биоэнергии — это процесс использования биомассы (например, растений, останков животных, отходов и т. д.) в качестве сырья и преобразования ее в электрическую энергию посредством сжигания, газификации или других технологий. Биоэнергетика в основном включает в себя производство электроэнергии путем прямого сжигания (эффективность производства электроэнергии составляет 25%), производство электроэнергии путем газификации биомассы (газификация с получением $\text{CO} + \text{H}_2$ или CH_4 , эффективность производства электроэнергии составляет 60%), производство электроэнергии из жидкого топлива биомассы (ферментативный гидролиз целлюлозы для получения этанола) и т. д.

Биоэнергия не ограничена, как традиционные ископаемые виды топлива; это устойчивый и возобновляемый ресурс. Для производства биоэнергии в основном используются сельскохозяйственные отходы, городской мусор и т. д., что позволяет эффективно снижать загрязнение окружающей среды и обеспечивать чистую энергию. Производство биоэнергии является перспективным методом использования энергии, особенно в плане содействия устойчивому развитию и сокращения выбросов парниковых газов. Ожидается, что с развитием технологий производство биоэнергии станет важной частью будущей энергетической структуры.

Геотермальная энергетика — это метод производства электроэнергии с использованием тепловой энергии недр Земли. Он использует пар, горячие камни и горячую воду из геотермальных источников для приведения в действие генераторов, вырабатывающих электроэнергию. Геотермальная энергетика в

основном подразделяется на генерацию неглубокой геотермальной энергии, генерацию энергии из горячих сухих пород и гидротермальную энергетику. Геотермальная энергия — это возобновляемая и чистая энергия. При разработке новых технологических решений в области добычи и преобразования геотермальной энергии данные источники смогут уменьшить срок окупаемости, увеличить производительность и понизить тариф на тепловую энергию для потребителей ввиду полного отказа от углеводородов на территории регионов с труднодоступной транспортной ситуацией [16]. Однако только в 30 странах мира имеются условия для коммерческого развития. Геотермальная энергетика — это стабильная и эффективная технология возобновляемой энергии с большим потенциалом развития.

Генерация энергии океана — это технология, которая использует различные формы энергии океана для производства электроэнергии. Поскольку океаны покрывают около 70% поверхности Земли, энергия океана считается огромным возобновляемым энергетическим ресурсом. Генерация энергии океана имеет такие преимущества, как чистота, стабильность и долгосрочная устойчивость, и является важной частью будущей трансформации энергетической структуры. Приливная энергия является регулярной и предсказуемой и может обеспечивать стабильную выработку электроэнергии. Однако для производства приливной энергии требуется строительство крупных объектов в определенных приливных зонах, большие первоначальные инвестиции, сложное обслуживание оборудования в условиях высококоррозионной морской воды и низкая плотность энергии (плотность мощности волновой энергии составляет всего 2–3 кВт/м²). Ожидается, что благодаря постепенному сокращению затрат на техническую поддержку и оборудование энергия океана станет важной частью мировой возобновляемой энергетики.

Каждый возобновляемый источник энергии имеет различные характеристики распределения ресурсов, плотность энергии и условия использования. Поэтому в практических приложениях обычно необходимо делать обоснованный выбор, основанный на региональных особенностях и

энергетических характеристиках. После краткого обсуждения солнечная и ветровая энергетика считаются высокоэффективными, устойчивыми, экологически чистыми, возобновляемыми и чистыми источниками энергии. Как показано на рисунке 2.1, современная структура энергетики постоянно меняется, а спрос на возобновляемые источники энергии (фотоэлектрические и ветровые) растет и, как ожидается, превысит спрос на традиционную энергию к 2035 году.

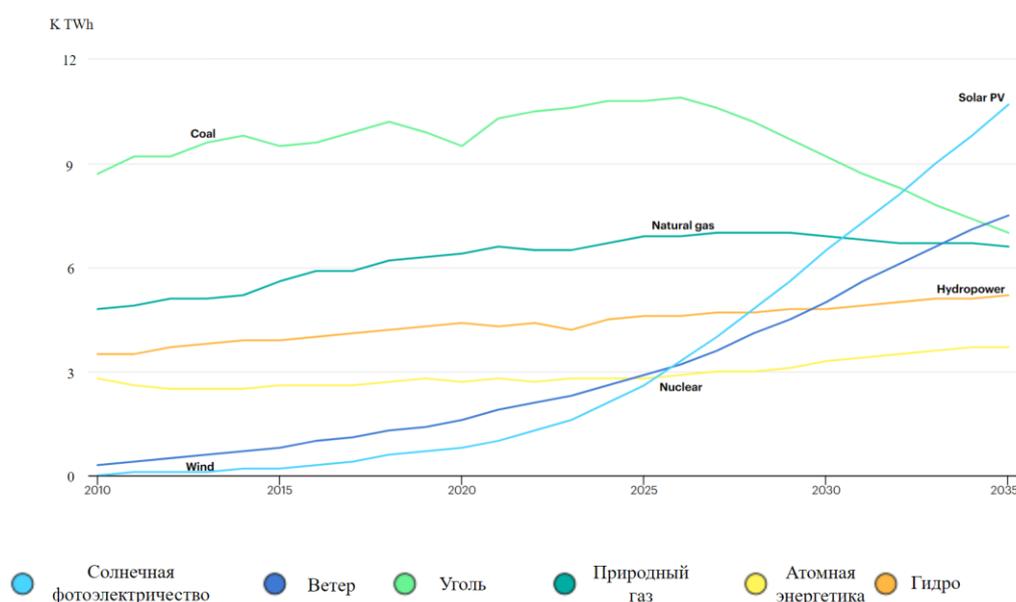


Рисунок 2.1 Обзор и прогноз спроса на возобновляемые и традиционные виды энергии

Ветер и солнечная энергия являются наиболее быстро развивающимися ресурсами ВИЭ, при этом их глобальная мощность увеличивается более чем на 20% ежегодно в последние годы. ВИЭ становятся все более конкурентоспособными по сравнению с ископаемым топливом и в настоящее время являются наиболее экономически эффективным вариантом для новой генерации электроэнергии [17]. Поэтому в следующих разделах особое внимание будет уделено этим двум источникам энергии.

2.1.2 Архитектура систем возобновляемой энергетики

Структурные модели систем возобновляемой энергетики можно разделить

на множество типов в зависимости от вида энергии, сценария применения и способа подключения к сети.

По способу подключения к главной электросети системы возобновляемой энергетики обычно делятся на следующие три типичные архитектуры:

1) Автономные системы (Off-grid Systems, OGS):

а) Структура энергетики: OGS в основном использует фотоэлектрические панели, ветряные турбины, малые гидроэлектростанции и другое оборудование для выработки электроэнергии и хранит электроэнергию в литиевых батареях, свинцово-кислотных аккумуляторах и т. д. Система управления энергоснабжением, состоящая из контроллеров, инверторов и систем управления нагрузкой, осуществляет управление ресурсами.

б) Особенности: OGS полностью независима от электросети и подходит для отдаленных районов. Для решения проблемы перебоев в энергоснабжении необходимы накопители энергии большой емкости.

2) Системы, подключенные к сети (Grid-connected Systems, GCS):

а) Структура энергетики: GCS использует крупные фотоэлектрические электростанции, ветряные электростанции, гидроэлектростанции и другое оборудование для выработки электроэнергии и передает выработанную электроэнергию непосредственно в общественную электросеть через подключенную к сети систему, состоящую из инверторов, трансформаторов, синхронных контроллеров и другого оборудования.

б) Особенности: для стабильной работы GCS требуется электросеть, она не требует хранения энергии и работает в режиме генерации электроэнергии для собственных нужд и подключения излишков электроэнергии к сети. Подходит для городских распределенных фотоэлектрических установок, централизованных ветровых электростанций, крупных гидроэлектростанций и т. д.

3) Гибридные системы (Hybrid Systems, HS):

а) Энергетическая структура: HS часто использует дополнительный режим использования энергии ветра, фотоэлектрической энергии и накопления энергии, а также оптимизирует координацию работы нескольких источников и интеллектуальное управление посредством EMS.

б) Особенности: HS снижает влияние колебаний в одном источнике энергии за счет синергии нескольких источников энергии и снижает зависимость от накопления энергии или резервного копирования ископаемого топлива.

Системы возобновляемой энергии по масштабу и функциям обычно делятся на следующие три архитектуры:

1) Централизованная система:

а) Энергетическая структура: в основном включает крупные электростанции (сверхкрупные фотоэлектрические/ветровые электростанции) + высоковольтные сети передачи данных с вспомогательными крупными накопителями энергии, такими как гидроаккумулирующие установки и накопители энергии на сжатом воздухе.

б) Характеристики: Производство энергии концентрированное и эффективное, но потери при передаче велики, что требует высокой стабильности сети и подходит для регионов, богатых ресурсами. Централизованным сетям — такой вариант целесообразен при мощности электростанции на ВИЭ от нескольких десятков киловатт до нескольких мегаватт, при небольшой мощности источника энергии, его лучше установить в непосредственной близости от потребителя [18].

2) Распределенные системы:

а) Структура энергетики: в основном используются распределенные источники энергии, такие как фотоэлектрические установки на крышах, небольшие ветровые электростанции и коммунальная энергия биомассы. Доступ к распределительной сети в основном осуществляется на основе близлежащего потребления.

б) Особенности: близость к стороне пользователя, снижение потерь при передаче, повышение надежности электроснабжения, использование интеллектуальных счетчиков и технологий управления спросом. Его можно использовать в городских зданиях, промышленных парках и сельских микросетях.

3) Микросеть:

а) Энергетическая структура: использует местную энергию (ветер, солнце и накопители) + центр управления + нагрузку, может работать автономно или в составе сети, оснащена основным оборудованием, таким как система накопления энергии, двунаправленный преобразователь, контроллер микросети и т. д.

б) Особенности: он способен работать на изолированном острове, справляться с отказами основной сети и поддерживать высокую долю доступа к возобновляемым источникам энергии. Обычно он используется в университетских городках, на военных базах, в системах аварийного электроснабжения и других местах.

Для систем фотоэлектрической генерации используются высокомошные фотоэлектрические источники питания. Их инверторная топология обычно делится на одноступенчатую и двухступенчатую. Среди них инвертор с двухступенчатой структурой разделяет отслеживание точки максимальной мощности и стратегию управления, подключенную к сети, что упрощает сложность проектирования системы управления, поэтому он широко используется на практике. Топология фотоэлектрического источника питания показана на рисунке 2.2. Фотоэлектрическая батарея генерирует постоянный ток, который подключается к шине постоянного тока после усиления цепью постоянного тока, а затем подключается к сети через преобразователь постоянного тока в переменный и схему фильтра. Среди них, в дополнение к функции усиления, цепь постоянного тока также используется для управления выходным напряжением фотоэлектрической батареи для достижения стабильности фотоэлектрического источника питания.

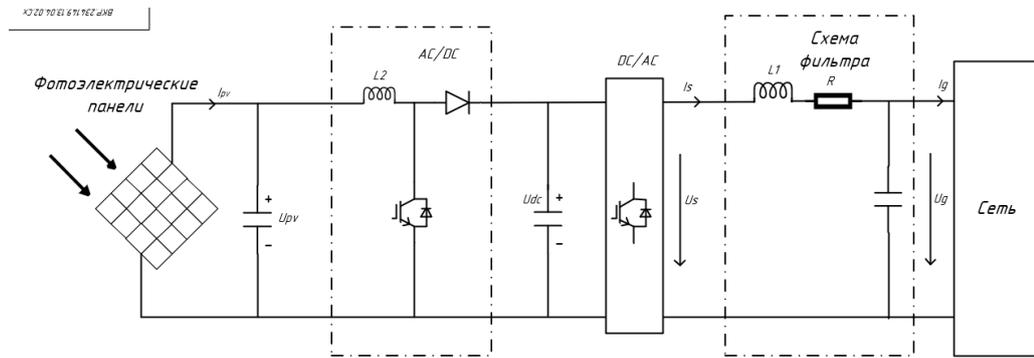


Рисунок 2.2 Принципиальная схема фотозлектрического источника питания

Выходная мощность фотозлектрического источника питания обычно рассчитывается с использованием метода векторной развязки управления, а его уравнение выходной мощности выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} P = u_{gd}i_{gd} + u_{gq}i_{gq} = u_g i_{gd} \\ Q = u_{gq}i_{gd} - u_{gd}i_{gq} = -u_g i_{gq} \end{cases} \quad (2.1)$$

Где P и Q — активная и реактивная выходная мощность фотозлектрического источника питания соответственно; u_{gd} и u_{gq} — компоненты напряжения по осям d и q точки подключения к сети соответственно; i_{gd} и i_{gq} — компоненты выходного тока по осям d и q соответственно; u_g — напряжение точки подключения к сети.

Для систем ветрогенерации, когда скорость ветра достигает 3-5 м/с, ветряная турбина может начать вырабатывать электроэнергию. Механическая кинетическая энергия, вырабатываемая вращением лопастей, увеличивается через систему передачи до уровня, достаточного для приведения в действие генератора, а затем преобразуется в электрическую энергию. Топология выработки электроэнергии ветряной турбиной показана на рисунке 2.3. Эта электрическая энергия передается на повышающий трансформатор на базовой станции по кабелям и, наконец, подключается к электросети. Ветряная турбина также оснащена приборами для измерения скорости и направления ветра, а также электронными контроллерами и двигателями рыскания для регулировки направления ветряной турбины, чтобы гарантировать, что она всегда обращена

к направлению ветра, чтобы получить максимальную эффективность выработки электроэнергии.

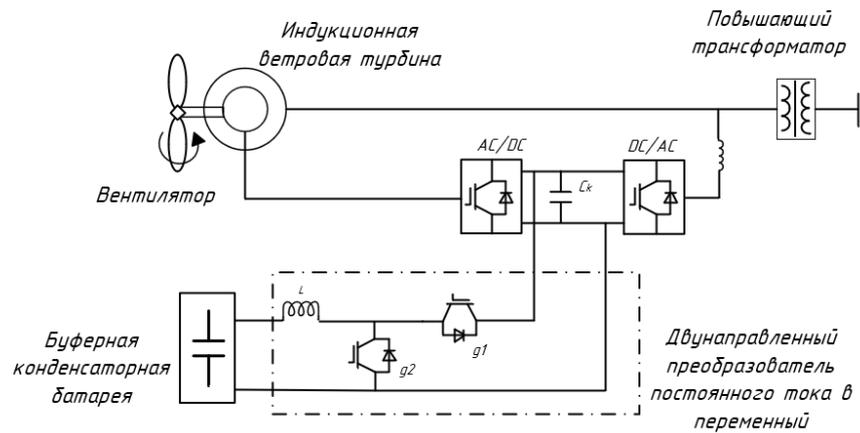


Рисунок 2.3 Принципиальная схема ветрового источника питания

Гибридная система генерации электроэнергии с использованием ветра и солнца, которая построена с использованием естественной взаимодополняемости ветровых и солнечных энергетических ресурсов, может компенсировать низкую надежность, вызванную прерывистой нестабильностью ветровых и солнечных энергетических ресурсов, и обеспечить стабильную и надежную электроэнергию в определенной степени. Ветровые турбины и фотоэлектрические генераторы являются основными режимами генерации электроэнергии. Как показано на рисунке 2.4.

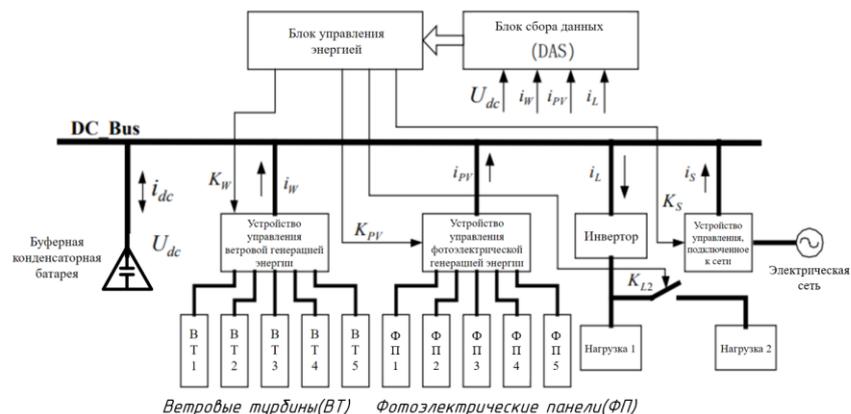


Рисунок 2.4 Принципиальная схема структуры гибридной системы генерации электроэнергии с использованием ветра и солнца

С развитием интеллектуальных распределительных сетей все больше систем возобновляемой энергии переходят на гибридную архитектуру генерации электроэнергии «распределенная + подключенная к сети». Такие малогабаритные гибридные силовые установки Строительство и использование альтернативных источников энергии в регионе станет серьезным изменением в развитии отрасли, а ввод в эксплуатацию таких электростанций в отдаленных районах обеспечит бесперебойную подачу электроэнергии в этих районах [19]. Ее основная цель — добиться стабильного, экономичного и низкоуглеродного снабжения большой долей возобновляемой энергии за счет технологических инноваций и оптимизации систем.

2.1.3 Области применения возобновляемых источников энергии

Возобновляемая энергия, обладающая чистыми и устойчивыми характеристиками, широко используется в различных областях, включая:

1) Жилые и коммерческие площади: солнечные фотоэлектрические системы на крышах домов, небольшие ветровые электростанции, геотермальные системы отопления и т. д. постепенно становятся популярными, увеличивая долю самостоятельной генерации и использования электроэнергии пользователями и снижая затраты на электроэнергию.

2) Промышленная сфера: Крупные ветровые электростанции, геотермальные электростанции и проекты по производству энергии из биомассы широко используются в энергоемких отраслях, таких как сталелитейная, химическая и бумажная промышленность, способствуя энергосбережению и защите окружающей среды.

3) Сельскохозяйственная сфера: фотоэлектрические теплицы, ветро-солнечные дополнительные системы орошения, производство биогаза и т. д. повысили уровень энергетической самообеспеченности и уровень защиты окружающей среды сельскохозяйственного производства.

4) Транспорт: быстро развиваются новые экологически чистые транспортные проекты, такие как фотоэлектрические магистрали, судоходство

с использованием ветроэнергетики и транспортировка на водородной энергии, способствуя преобразованию транспортной энергетики.

5) Электроснабжение отдаленных и изолированных районов: в районах, где экономически невозможно получить доступ к основной электросети, используются небольшие независимые солнечные и ветровые энергосистемы в сочетании с технологией накопления энергии для обеспечения стабильного и надежного электроснабжения.

С достижением целей в области защиты окружающей среды и энергосбережения возобновляемые источники энергии играют все более важную роль в построении городского энергетического Интернета, микросетей и интеллектуальных распределительных сетей, становясь ключевым фактором достижения энергетической трансформации и устойчивого развития.

2.2 Структурные схемы и конструктивное исполнение солнечных электростанций и характеристика их режимов работы

Генерация солнечной энергии — это процесс преобразования энергии солнечного излучения в электрическую энергию. Это один из наиболее широко используемых возобновляемых источников энергии, который отличается экологичностью, экологичностью и богатством ресурсов. Генерация солнечной энергии основана на принципе фотоэлектрического эффекта или теплового эффекта. Технологии производства солнечной энергии можно разделить на две категории: фотоэлектрическая генерация энергии и солнечная тепловая генерация энергии.

В фотоэлектрической энергетике это относится к процессу преобразования солнечного света непосредственно в электрическую энергию с предложен солнечных элементов. Солнечные панели (фотоэлектрические элементы) являются основными компонентами производства солнечной энергии. Они состоят из нескольких полупроводниковых материалов. Когда солнечный свет падает на фотоэлектрический элемент, фотоны взаимодействуют с атомами полупроводниковых материалов. Возбужденные электронно-дырочные пары образуют электрическое поле внутри фотоэлектрического элемента, заставляя

электроны и дырки разделяться. Это создает электрический ток [20]. Фотоэлектрическая система генерации электроэнергии в настоящее время является наиболее распространенным способом получения солнечной энергии и широко применяется в жилых и коммерческих зданиях, на сельскохозяйственных угодьях и т. д. Как показано на рисунке 2.5, это простая схематическая диаграмма принципа фотоэлектрической генерации электроэнергии.

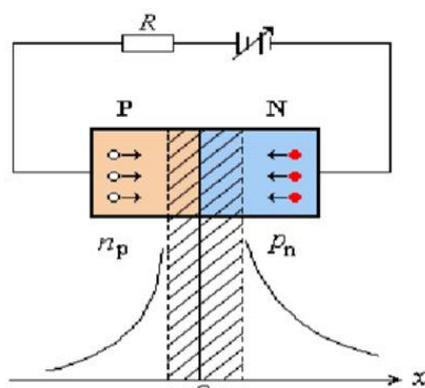


Рисунок 2.5 Простая принципиальная схема фотоэлектрической генерации электроэнергии

К основным типам фотоэлектрической генерации относятся:

1) Монокристаллические кремниевые фотоэлектрические элементы: изготовленные из высокочистого монокристаллического кремния, они обладают высокой эффективностью преобразования и подходят для мест, где требуется эффективная генерация электроэнергии.

2) Поликристаллические кремниевые фотоэлектрические элементы: изготовленные из поликристаллического кремния, они имеют более низкую стоимость, но их эффективность преобразования относительно ниже, чем у монокристаллического кремния.

3) Тонкопленочные фотоэлектрические элементы: изготовленные из аморфного кремния, селенида меди-галлия и других материалов, они характеризуются малым весом и низкой стоимостью, но низкой эффективностью и подходят для крупномасштабных применений.

При производстве солнечной тепловой энергии солнечная энергия собирается солнечными тепловыми коллекторами, а тепловая энергия используется для работы генераторов, вырабатывающих электроэнергию. Существует три основных типа технологий:

1) Генерация солнечной тепловой энергии: параболические коллекторы используются для концентрации солнечного света, а собранная тепловая жидкость используется для выработки пара, приводящего в действие турбины для выработки электроэнергии.

2) Башенная солнечная тепловая генерация электроэнергии: ряд плоских зеркал (называемых гелиостатами) концентрируют солнечный свет на приемнике наверху башни, который преобразует тепловую энергию в пар для привода генератора.

3) Генерация солнечной тепловой энергии: используйте концентрирующий диск для фокусировки солнечного света на приемнике и преобразования его в электричество посредством тепловой энергии.

Солнечные тепловые электростанции в основном используются в крупных централизованных проектах по производству электроэнергии и подходят для районов с интенсивным солнечным светом.

Солнечная энергетика — это чистая энергия, которая не выделяет вредных веществ в процессе производства электроэнергии и соответствует мировой тенденции низкоуглеродного развития. Солнечная энергия — практически неограниченный источник энергии, который можно получать непрерывно, пока светит солнце. Системы генерации солнечной энергии можно гибко устанавливать в разных местах, поэтому масштабное применение и установка солнечных электростанций особенно важны.

Характеристики фотоэлектрической генерации электроэнергии в основном зависят от интенсивности света и температуры солнечной фотоэлектрической батареи, поэтому можно вывести идеальную модель мощности фотоэлектрической системы генерации электроэнергии. Мощность фотоэлектрической системы генерации электроэнергии составляет (2.2):

$$P_T = P_0 \left(\frac{I_T}{I_0} \right) [1 + \alpha_p (T - T_0)] \quad (2.2)$$

Где P_T представляет собой выходную мощность фотоэлектрической системы, P_0 представляет собой номинальную выходную мощность фотоэлектрической системы, I_0 представляет собой интенсивность света при стандартных условиях, I_T представляет собой фактическую интенсивность света, α_p представляет собой температурный коэффициент фотоэлектрической батареи, T_0 представляет собой температуру солнечной фотоэлектрической батареи при стандартных условиях, а T представляет собой температуру солнечной фотоэлектрической батареи.

Таким образом, можно сделать вывод, что по мере увеличения фактической интенсивности света и температуры фотоэлектрических панелей можно увеличить мощность выработки солнечной энергии.

Различные типы солнечных электростанций имеют свои особенности с точки зрения конструктивного исполнения, режима работы, области применения и т. д. Типичная распределенная фотоэлектрическая система генерации электроэнергии обычно включает в себя следующие основные части:

1) Система сбора солнечной энергии: в случае фотоэлектрических электростанций она состоит из большого количества фотоэлектрических модулей, которые обычно соединяются последовательно или параллельно, образуя фотоэлектрическую батарею. Каждый модуль состоит из фотоэлектрических элементов, которые преобразуют солнечный свет непосредственно в постоянный электрический ток. На солнечных тепловых электростанциях концентраторы используются для концентрации солнечного излучения, которое затем используется для получения высокотемпературной жидкости (например, пара) через теплообменник для приведения в действие паротурбинной генераторной установки для выработки электроэнергии.

2) Система преобразования и управления электроэнергией: поскольку ток, вырабатываемый фотоэлектрической установкой, является постоянным, постоянный ток необходимо преобразовать в переменный ток с помощью

инвертора, чтобы адаптировать его к стандартам передачи электроэнергии в сети. Оснащены распределительными шкафами постоянного тока, распределительными шкафами, шкафами управления и т. д. для обеспечения сбора электроэнергии, защиты и интеллектуального управления.

3) Система накопления энергии: непостоянный и нестабильный характер генерации солнечной энергии приводит к тому, что на ее выработку влияют интенсивность солнечного света и изменения погоды. Путем настройки оборудования для накопления энергии можно добиться временного хранения и плавной выдачи энергии, тем самым повышая стабильность электроснабжения. Система хранения возобновляемой энергии будет подробно рассмотрена в следующих главах.

4) Система мониторинга и сбора данных: реализация мониторинга в реальном времени, регистрация данных и оповещение о неисправностях таких параметров, как выработка электроэнергии, состояние компонентов и метеорологические условия, для обеспечения безопасной и эффективной работы системы.

5) Объекты, подключенные к сети: включая повышающие трансформаторы, коммутационные станции, защитное оборудование, подключенное к сети, и т. д., для обеспечения того, чтобы электростанция могла безопасно передавать электроэнергию в соответствии со стандартами сети.

Простой принцип распределенной фотоэлектрической генерации электроэнергии, подключенной к сети, показан на рисунке 2.6.

При проектировании солнечной электростанции приоритет следует отдать оценке запасов ресурсов, а при выборе места следует в полной мере учитывать районы с богатыми ресурсами солнечной энергии, подходящим климатом и хорошими земельными условиями, обычно требующими более 1500 часов солнечного сияния в год. На этапе проектирования и строительства выбираются высокоэффективные фотоэлектрические модули с низким затуханием или устройства преобразования тепловой энергии для повышения общей эффективности преобразования энергии системы. Модульная конструкция

облегчает расширение, эксплуатацию и обслуживание, а также последующие модернизации, повышая ремонтпригодность и гибкость системы. При проектировании необходимо учитывать внешние факторы окружающей среды, такие как высокая температура, ветер и песок, коррозия и удары молний, чтобы обеспечить долгосрочную стабильную работу. Оснащен передовыми системами автоматизации и интеллектуального управления для обеспечения работы без участия человека, автоматического обнаружения неисправностей и интеллектуального планирования.



Рисунок 2.6 Распределенная система фотоэлектрической генерации, подключенная к сети

В реальной эксплуатации солнечные электростанции весьма предсказуемы, но сильно подвержены влиянию окружающей среды. На солнечную радиацию существенно влияют смена дня и ночи, сезонные изменения и погодные условия (например, облачность и дожди), что приводит к колебаниям и непостоянству выработки фотоэлектрической энергии. Благодаря моделированию исторических данных и краткосрочным прогнозам погоды, а также доступу к ИИ, можно в определенной степени предсказать тенденцию изменений в производстве электроэнергии.

Традиционные фотоэлектрические системы генерации электроэнергии не могут гибко регулировать выработку электроэнергии в соответствии с изменениями в электрической нагрузке и нуждаются в улучшении адаптивности за счет систем накопления энергии или дополнительной работы с другими источниками энергии (например, фотоэлектрические системы + накопление энергии). Частота отказов самих фотоэлектрических модулей относительно невелика, однако силовое электронное оборудование, такое как инверторы, комбайнеры и системы мониторинга, представляет собой звенья с высокой частотой отказов и требует регулярных проверок и обслуживания. Процесс производства солнечной энергии не сопровождается выбросами углерода, потреблением воды, выбросами загрязняющих веществ и оказывает минимальное воздействие на окружающую среду, что отвечает потребностям глобального перехода энергетики в сторону экологичности и устойчивости.

Солнечная фотоэлектрическая генерация электроэнергии является одной из самых перспективных технологий чистой энергии в настоящее время. Однако после длительного использования фотоэлектрические панели будут накапливать пыль, что снизит пропускание света и, таким образом, повлияет на количество излучения. Кроме того, пыль и другие загрязнения будут образовывать тени и вызывать эффект горячих точек, снижая эффективность выработки электроэнергии и срок службы компонентов. В серьезных случаях это может даже привести к пожару. По неполным оценкам, если вовремя не очистить солнечные панели, потери выработки электроэнергии могут составить 25% и даже больше [21].

По мере износа оборудования вопрос о замене или ремонте приобретает всё большее значение, превращаясь в один из ключевых факторов эффективного управления бизнесом [22]. Поэтому необходимо использовать разумные методы очистки солнечных панелей. Традиционная ручная уборка сложна и энергозатратна, но для очистки фотоэлектрических панелей можно использовать роботов-уборщиков на солнечных батареях. Фотоэлектрический робот-уборщик может очищать фотоэлектрические панели, не отключая

электропитание, с высокой эффективностью очистки, избегая остановки генерации фотоэлектрической энергии из-за очистки. Робот-уборщик может адаптироваться к различным типам фотоэлектрических панелей, в том числе с различной толщиной, шероховатостью поверхности и формой. Робот-уборщик не повреждает фотоэлектрические панели в процессе уборки и отличается высокой безопасностью. Во время использования робот-уборщик может питаться от собственных солнечных панелей или может быть подключен к системе накопления солнечной энергии для получения электроэнергии, что повышает удобство. Роботы-уборщики имеют умеренную стоимость и, как ожидается, будут широко использоваться и продвигаться. Как показано на рисунках 2.7 и 2.8, ожидается, что гусеничные роботы для очистки фотоэлектрических панелей и самоходные роботы для очистки фотоэлектрических панелей будут активно развиваться под влиянием отрасли фотоэлектрической энергетики.



Рисунок 2.7 Гусеничный робот для очистки фотоэлектрических панелей



Рисунок 2.8 Самоходный робот для очистки фотоэлектрических панелей

Благодаря постоянному совершенствованию и снижению стоимости таких технологий, как солнечная фотоэлектричество и преобразование тепловой энергии, солнечные электростанции получили широкое распространение во всем мире, став важной силой в содействии оптимизации энергетической структуры и реализации целей углеродной нейтральности. В будущем солнечные электростанции будут использовать более продвинутые модели,

такие как интеллектуальные технологии, интеграция накопителей энергии и региональное микросетевое взаимодействие, чтобы повысить стабильность системы и общие преимущества.

2.3 Структурные схемы и конструктивное исполнение ветряных электростанций и характеристика их режимов работы

Ветряная энергия — это способ использования силы ветра для производства электричества. Ветряные турбины, установленные на высоте, начинают вращаться под действием ветра, который приводит в движение лопасти турбин. Это вращение генерирует электрический ток, который может быть использован для питания различных электрических устройств и систем.[23]

Ветроэнергетика не потребляет ископаемое топливо и практически не производит выбросов углерода. Глобальный потенциал ветроэнергетики намного превышает потребности человечества в энергии. По сравнению с тепловой и атомной энергетикой не требуется большого количества охлаждающей воды. По мере развития технологий затраты продолжают снижаться (в 2023 году затраты на наземную ветроэнергетику составят всего 0,03–0,05 долл. США/кВт·ч). К 2023 году мировая установленная мощность ветроэнергетики превысит 900 ГВт, что составит около 7% мирового производства электроэнергии. К основным странам с установленной мощностью относятся Китай (на долю которого приходится 40% мировой мощности), США, Германия и т. д. Однако она зависит от скорости ветра (обычно среднегодовая скорость ветра составляет ≥ 6 м/с) и требует накопления энергии или резервного электропитания.

И, наконец, ветроэнергетика является относительно постоянным способом получения энергии. С восходом солнца поверхность планеты нагревается, с заходом остывает, это постоянный непрерывный процесс. Воздушные массы вследствие неравномерной температуры начинают смешиваться, эти движения мы и называем ветром [24]. С развитием технологий ветряные электростанции

постоянно совершенствуются по масштабу, компоновке и уровню интеллекта, становясь важной частью мирового развития возобновляемой энергетики.

Существует два основных типа ветряных турбин. Одним из них является ветряная турбина с горизонтальной осью, которая является наиболее распространенным типом, с лопастями, вращающимися вокруг горизонтальной оси. Он отличается высокой эффективностью и продуманной технологией. Однако его необходимо ориентировать по направлению ветра, а крупные блоки сложны в установке. Другой тип — ветряная турбина с вертикальной осью вращения, в которой лопасти вращаются вокруг вертикальной оси. Его не нужно ориентировать по направлению ветра, он подходит для городских и небольших территорий. Однако его эффективность низкая, а коммерческое применение ограничено. На рисунке 2.9 представлена принципиальная схема конструкции обычной ветровой турбины.

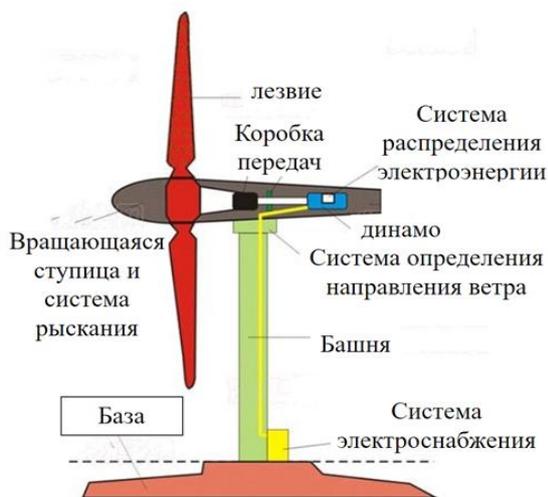


Рисунок 2.9 Структура системы ветрогенерации

В зависимости от различных сценариев применения они включают в себя:

1) Береговая ветроэнергетика: это основная отрасль, которая в основном строится на открытых территориях, таких как равнины, холмы и Гоби.

2) Морская ветроэнергетика: скорость ветра выше и стабильнее, а выработка электроэнергии на 20–40 % выше, чем на суше. Коррозионная

стойкость, глубоководная инфраструктура, высокие затраты на эксплуатацию и обслуживание.

3) Распределенная генерация электроэнергии: небольшие ветровые турбины используются для обеспечения электроэнергией отдаленных районов, островов или домов.

4) Гибридная энергетическая система: в сочетании с солнечной энергией и накопителями энергии повышается стабильность электроснабжения.

С развитием технологий ветровая энергетика становится всё более доступной и эффективной. Инновации, такие как создание плавучих ветровых платформ и интеграция с системами хранения энергии, открывают новые горизонты для её применения. Энергия ветра представляет собой один из наиболее перспективных источников возобновляемой энергии, способный существенно сократить зависимость от ископаемых видов топлива. Однако для максимального использования её потенциала необходимо решить существующие технические и экологические проблемы [25]. Генерация энергии ветра является одной из основных технологий для достижения цели углеродной нейтральности. Несмотря на такие проблемы, как нестабильность и адаптация к окружающей среде, его конкурентоспособность по стоимости и варианты применения будут продолжать расширяться благодаря технологическим инновациям и политической поддержке. В будущем ветроэнергетика может стать основой мировой энергетической системы наряду с солнечной энергетикой и накопителями энергии.

Характеристики ветрогенерации в основном зависят от скорости ветра, поэтому можно вывести идеальную модель мощности системы ветрогенерации. Мощность системы ветрогенерации следующая (2.3):

$$P_W = \begin{cases} 0 & v < v_i \text{ or } v > v_{out} \\ P_{w0} \cdot \frac{v - v_i}{v_{out} - v_i} & v_i \leq v < v_0 \\ P_{w0} & v_0 \leq v \leq v_{out} \end{cases} \quad (2.3)$$

Где P_w представляет собой выходную мощность ветряной турбины, P_{w0} — номинальная мощность ветряной турбины, v — фактическая скорость ветра, v_i

представляет собой скорость включения ветра, v_{out} — скорость отключения ветра, а v_0 — номинальная скорость ветра. Таким образом, можно сделать вывод, что когда фактическая скорость ветра близка к предельной скорости ветра, выходная мощность максимальна.

Различные типы ветроэлектростанций имеют свои особенности с точки зрения конструктивного исполнения, режима работы, области применения и т. д. Типичная система ветрогенерации обычно включает в себя следующие основные части:

1) Ветряная турбина: в основном состоит из лопастей, ступицы, гондолы, генератора и башни.

Лопастни улавливают энергию ветра и приводят во вращение ротор, а механическая энергия передается на генератор через главный вал для выработки электроэнергии. Ветровые турбины обычно имеют три лопасти и имеют аэродинамическую конструкцию, обеспечивающую максимально эффективное использование энергии ветра. В кабине размещены генераторы, редукторы, системы управления и другое оборудование для поддержания основных операций. Оснащен башней для поддержки лопастей и гондолы. Чем выше башня, тем стабильнее скорость ветра.

Современные ветряные турбины часто оснащаются системами управления шагом и рысканием для повышения эффективности выработки электроэнергии. Система рыскания регулирует лопасти в соответствии с направлением ветра. Система управления отслеживает скорость ветра, регулирует углы наклона лопастей и обеспечивает безопасность оборудования.

2) Инфраструктура: ветряные турбины устанавливаются на фундаментах из бетона или стальных конструкций для обеспечения общей устойчивости, особенно при сильном ветре или экстремальных погодных условиях. Настройка оборудования для накопления энергии может обеспечить временное хранение и плавную выдачу энергии, повышая стабильность электроснабжения. Система хранения возобновляемой энергии будет подробно рассмотрена в следующих главах.

3) Электрическая система: инвертор, который регулирует выходной ток и адаптируется к частоте и напряжению сети. Трансформаторы ящичного типа повышают выходную электроэнергию среднего напряжения (обычно 690 В), вырабатываемую ветряными турбинами, до 35 кВ и выше для передачи на большие расстояния. Коллекторная линия соединяет каждую ветряную турбину с подстанцией повышения давления.

4) Повысительная станция: электроэнергия, собранная на ветряной электростанции, дополнительно повышается до напряжения региональной сети (например, 110 кВ), а затем подключается к основной сети через линии электропередачи.

5) Система мониторинга и управления: реализация мониторинга в реальном времени, сбора данных, управления работой и диагностики неисправностей каждой ветряной турбины, а также повышение уровня интеллекта и эффективности эксплуатации и обслуживания ветряных электростанций.

Ветроэлектростанции следует проектировать в районах с обильными и стабильными ветровыми ресурсами, как правило, в прибрежных зонах, горных хребтах или на равнинах.

Простой принцип генерации ветровой энергии показан на рисунке 2.10.



Рисунок 2.10 Схема подключения ветряной турбины к сети

Необходимы оценка ветровых ресурсов (например, среднегодовая скорость ветра, плотность энергии ветра), геологическая разведка и оценка воздействия

на окружающую среду. Необходимо разумно расположить агрегаты в соответствии с распределением частоты направления ветра, чтобы избежать помех между агрегатами и обеспечить общую эффективность выработки электроэнергии. Обычно используемый стандарт компоновки — это поперечное расстояние, в 5–7 раз превышающее диаметр рабочего колеса, и продольное расстояние, в 7–10 раз превышающее диаметр рабочего колеса. Коллекторные линии расположены по кольцевой или радиальной схеме, что обеспечивает локальную изоляцию и общую надежность в случае неисправности. Установите необходимые устройства компенсации реактивной мощности и оборудование регулирования напряжения для поддержания стабильности сети. Определите уровень напряжения доступа, размер подстанции и схему защиты, а также гибко распределяйте нагрузку, чтобы справиться с изменчивостью и непостоянными характеристиками.

При реальной эксплуатации ветряных электростанций их мощность генерации электроэнергии колеблется в зависимости от изменений скорости ветра, и для стабилизации выработки их необходимо координировать с системами накопления энергии или эксплуатировать совместно с другими источниками энергии. Доверьтесь высокоточным системам прогнозирования ветроэнергетики и планирования нагрузки для достижения оптимального управления ветроэнергетикой. Система SCADA может использоваться для мониторинга в режиме реального времени, профилактического обслуживания и интеллектуального устранения неисправностей ветряных электростанций, тем самым повышая доступность электростанций и сокращая расходы на эксплуатацию и обслуживание. Современные ветровые турбины обладают возможностями поддержки низкого и высокого напряжения, что соответствует требованиям сети к качеству электроэнергии и стабильности системы.

Ветроэлектростанция — это высоко интегрированная, интеллектуальная и сложная система. Его конструкция не только требует полного использования природных ресурсов, но и обеспечивает безопасность, стабильность и эффективность процесса выработки электроэнергии. Благодаря сочетанию

технологий ветроэнергетики и цифровых технологий будущие ветровые электростанции станут более интеллектуальными и модульными, а также будут лучше интегрированы с интеллектуальными сетями.

2.4 Выбор типов накопителей электроэнергии для включения их в состав объектов возобновляемых источников энергии

При широкомасштабном доступе к распределительной сети возобновляемых источников энергии (например, фотоэлектрических, ветроэнергетических и т. д.) выходная мощность становится непостоянной и непредсказуемой, поскольку ее характеристики генерации в значительной степени зависят от природных условий. Во всем мире ведутся научные исследования по совершенствованию режимов и методов работы, направленных на повышение энергетической, экономической и экологической эффективности электростанций на основе возобновляемых источников энергии при отдельном и комбинированном использовании [26]. Таким образом, эффективная система накопления энергии способна обеспечить стабильность и надежность работы электросети. Разумный выбор оборудования для накопления энергии стал ключевым звеном в проектировании и эксплуатации интеллектуальных распределительных сетей.

Системы накопления энергии (такие как литиевые батареи, суперконденсаторы и т. д.) могут вырабатывать электроэнергию в периоды пиковой нагрузки и хранить электроэнергию в периоды низкой нагрузки, уравнивая спрос и предложение и снижая затраты на закупку электроэнергии. Он также может быстро реагировать и подавлять колебания напряжения и отклонения частоты. Он может обеспечить кратковременное электроснабжение в случае отключения электроэнергии или отказа цепи. Что касается доступа к возобновляемой энергии, то системы накопления энергии могут смягчить нестабильное электроснабжение таких источников энергии, как фотоэлектрические и ветровые установки, и избежать воздействия на электросеть. К основным технологическим типам систем накопления энергии относятся:

1) Электрохимическое хранение энергии (основное направление):

а) Литий-ионный аккумулятор (Li-ion Battery): высокая плотность энергии, высокая эффективность (более 90%), длительный срок службы (более 5000 циклов), быстрый отклик, в основном используется в распределенных энергосетях.

б) Натрий-серная батарея (NaS Battery): подходит для крупномасштабного хранения энергии, обладает высокой плотностью энергии, но рабочая среда должна быть выше 300 °С. Централизованная система хранения энергии, подходящая для ветряных электростанций и крупных солнечных электростанций.

в) Свинцово-кислотный аккумулятор (Lead-acid Battery): недорогая, отработанная и надежная технология, но низкая плотность энергии и короткий срок службы. Применимо для резервного электропитания и небольших систем хранения энергии.

2) Механическое хранение энергии: маховиковое хранение (Flywheel Storage) может быстро заряжаться и разряжаться, но его плотность энергии низкая, что подходит для энергетического баланса и регулирования качества электроэнергии за короткий промежуток времени.

3) Электромагнитное хранение энергии: суперконденсаторы (Supercapacitor) заряжаются и разряжаются очень быстро и подходят для мгновенной поддержки питания и стабилизации частоты. Суперконденсаторы называют еще ионисторами. Эти элементы состоят обычно из двух погруженных в электролит электродов и сепаратора. Последний нужен для того, чтобы не допустить перемещение заряда между двумя электродами с противоположной полярностью [27].

Типичная структурная классификация систем накопления энергии в распределительных сетях включает:

1) Монолитный накопитель энергии: напрямую подключен к распределительному трансформатору, поддерживает регулирование

напряжения и управление нагрузкой на местах, а также реализует управление энергопотреблением региональной электросети.

2) Интегрированная станция хранения энергии: несколько блоков хранения энергии образуют централизованную систему управления, обычно размещаемую вблизи центров нагрузки или централизованных точек доступа к возобновляемой энергии.

3) Мобильная система хранения энергии: (например, устанавливаемое на транспортном средстве транспортное средство хранения энергии): имеет гибкие возможности планирования и используется в таких сценариях, как обеспечение временного электроснабжения и реагирование на чрезвычайные ситуации.

4) Гибридная система накопления энергии: объединение различных типов устройств накопления энергии (например, литиевых батарей + суперконденсаторов) с учетом как плотности энергии, так и плотности мощности, а также повышение общей производительности системы.

Системы накопления энергии в современных распределительных сетях обычно оснащаются модулями EMS и управления в реальном времени, которые могут динамически управлять состоянием заряда (SOC), автоматически переключать режимы зарядки и разрядки и взаимодействовать с системами автоматизации распределения для участия в контроле напряжения узлов, регулировании реактивной мощности, самодиагностике неисправностей, а также удаленной эксплуатации и обслуживании. Выбор оборудования для накопления энергии для различных возобновляемых источников энергии представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 Применимость возобновляемой энергии к различным методам хранения энергии

Особенности и методы	Фотоэлектрическая генерация электроэнергии	Энергия ветра
Время хранения энергии	4-6 часов	6-12 часов

Продолжение таблицы 2.1

Частота заряда и разряда	1-2 раза в день	10-20 раз в день
Li-ion Battery	Обычный выбор, быстрый отклик (секунды), подходит для ежедневных циклов зарядки и разрядки	Применимые, плавные колебания минутного уровня, а также справляются с кратковременным штилем ветра
Lead-acid Battery	Постепенно выводится из эксплуатации, короткий срок службы, частое техническое обслуживание, используется только в небольших автономных системах	Постепенно выводится из эксплуатации, короткий срок службы, не рекомендуется для сценариев с подключением к сети
Supercapacitor	Вспомогательная частотная модуляция для устранения колебаний мощности, вызванных резкими изменениями облачности в течение нескольких секунд.	Вспомогательное регулирование частоты может сгладить колебания скорости ветра за считанные секунды и уменьшить сбои в работе сети.
Flywheel Storage	Менее используемый, подходит для высокочастотного кратковременного регулирования, высокая стоимость	Подходит для частой зарядки и разрядки (например, для компенсации колебаний второго уровня на ветряных электростанциях).

В распределенных солнечных электростанциях выбирайте гибридные системы литий-ионных аккумуляторов (например, литий-железо-фосфатных аккумуляторов) + суперконденсаторов. Избыток электроэнергии накапливается в течение дня и разряжается в течение 2–4 часов вечером, а суперконденсаторы способны справиться с кратковременными затенениями. В распределенных ветровых электростанциях выбирайте комбинацию литиевой батареи и маховика для хранения энергии. Маховик справляется с изменениями скорости

ветра за считанные секунды, а литиевая батарея перекрывает небольшие колебания. Однако в зонах с высокими температурами, чтобы избежать риска теплового разгона литий-ионных аккумуляторов, в холодных зонах необходимо установить систему отопления или выбрать аккумуляторы, устойчивые к низким температурам.

При выборе системы хранения возобновляемой энергии необходимо всесторонне учитывать первоначальные инвестиции, расходы на эксплуатацию и обслуживание, а также срок окупаемости. Приоритет отдается достижению основных целей, таких как бесперебойная выработка и аварийное резервирование. В случае электрохимического хранения энергии необходимо строго контролировать температуру, чтобы предотвратить тепловой пробой и соответствовать местным стандартам безопасности. Отдавайте приоритет экологически чистым материалам и технологиям, чтобы сократить выбросы загрязняющих веществ в течение жизненного цикла. Конструкция системы накопления энергии должна обеспечивать бесшовную интеграцию с системой управления сетью и системой управления энергопотреблением (EMS) для облегчения последующего расширения мощности.

2.5 Выводы

Рассмотрены основные возобновляемые источники энергии и представлены их принципы генерации электроэнергии, преимущества ресурсов, характеристики применения и экологические преимущества соответственно. Были подробно описаны типичные случаи, такие как ГЭС «Три ущелья», Саяно-Шушенская ГЭС и каскадная гидроэлектростанция Болгарии.

Обобщены три способа подключения к сети объектов ВИЭ (автономная, подключенная к сети, гибридная система) и три вида классификации масштабов электрической сети (централизованная, распределенная, микросеть), рассмотрены структура и функциональная схема ВМЭ, приведены схемы топологии фотоэлектрических и ветровых источников энергии.

Описаны различные сценарии применения возобновляемой энергии в жилых, коммерческих, промышленных, сельскохозяйственных и отдаленных

районах, показана область их реализации, такая как фотоэлектрические крыши, биогазовое орошение и интеллектуальный транспорт.

Проанализирована роль систем накопления энергии в пиковом регулировании, сглаживании колебаний и аварийном электроснабжении; были подробно описаны электрохимические, механические и электромагнитные технические решения, а также была описана адаптация сценария для типичных комбинаций (таких как литиевая батарея + суперконденсатор, литиевая батарея + маховик).

3. ИНТЕГРАЦИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНУЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ СЕТЬ И ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТАКОЙ СЕТИ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

3.1 Выбор узлов электрической сети для подключения объекта возобновляемых источников энергии

В связи с широкомасштабным доступом к распределенной возобновляемой энергии (например, фотоэлектрической, ветровой и малой гидроэнергетике) вопрос разумного выбора узлов сети для подключения к ней стал важным вопросом при планировании и эксплуатации распределительных сетей. Выбор узла не только связан с коэффициентом использования выработки электроэнергии системой возобновляемой энергии, но и напрямую влияет на стабильность, экономичность и уровень интеллекта распределительной сети. Таким образом, научное и рациональное определение точек доступа к возобновляемым источникам энергии является основой для достижения оптимальной работы интеллектуальной распределительной сети. Распределенная генерация и возобновляемая энергетика сегодня являются основными направлениями развития энергетики во всем мире, играют существенную роль в повышении надежности и качества поставляемой электроэнергии [28].

При выборе узлов сети необходимо отдавать приоритет высоковольтным узлам, обеспечивать долгосрочное хранение энергии и гибкие ресурсы регулировки, фокусироваться на совместимости распределительной сети, обращать внимание на локальное потребление и качество электроэнергии, а будущее направление будет больше полагаться на цифровые инструменты (такие как оптимизация выбора участка ИИ) и инновации рыночных механизмов.

Будут изучены стратегии выбора узлов доступа, основанные на таких факторах, как минимизация потерь мощности, надежность узлов и мощность аварийного электроснабжения.

В первую очередь, основные принципы выбора узлов доступа делятся на:

1): Минимизация потерь мощности: выбирайте узлы доступа, чтобы минимизировать общие потери активной мощности системы.

2): Повышение надежности узлов: отдавайте приоритет узлам доступа с более низкой надежностью, чтобы повысить стабильность их электроснабжения за счет доступа к распределенной энергии.

3): Повышение мощности аварийного электроснабжения: в ситуациях технического обслуживания или аварийных ситуациях узлы доступа должны иметь возможность обеспечивать необходимую поддержку электропитания для обеспечения непрерывного электроснабжения критических нагрузок.

Вышеуказанные основные принципы могут оказать поддержку при выборе распределенной энергии в электросети. Выбирайте узлы со стабильным напряжением, относительно высокой нагрузкой и разумной сетевой структурой в электросети. Благодаря минимизации потерь мощности можно избежать колебаний напряжения и обратного потока мощности, вызванных неправильными местами доступа. Распределенные источники питания должны регулировать выходное напряжение и частоту, чтобы они соответствовали электросети. Если отклонение выходного напряжения/частоты велико, это может вызвать проблемы с качеством электроэнергии или даже защитное отключение. Качество электроэнергии следует выбирать с небольшими колебаниями напряжения, без мерцания напряжения, подавления гармоник и т. д. После подключения к распределенному источнику питания необходимо скорректировать исходную стратегию защиты. Для решения проблем со сложным определением места неисправности, неисправностью или отказом защиты обычно необходимо внедрять селективную защиту, микрокомпьютерную релейную защиту и т. д.

При выборе узлов доступа необходим комплексный анализ. Различные топологии, такие как кольцевое сетевое электроснабжение и радиальное электроснабжение, оказывают существенное влияние на пропускную способность и гибкость возобновляемой энергии. В целом кольцевая структура сети может обеспечить более высокую пропускную способность и надежность работы. Необходимо исследовать остаточную мощность и состояние работоспособности распределительных трансформаторов, коммутационных устройств, устройств компенсации реактивной мощности и т. д. вблизи узла доступа, чтобы убедиться, что они могут выдержать дополнительную подачу мощности. Масштаб, волатильность и категория потребления электроэнергии (промышленная, коммерческая, жилая и т. д.) нагрузки в узловой зоне играют решающую роль в локальной поглощающей способности электроэнергии от возобновляемых источников энергии. Районы с большими колебаниями нагрузки подходят для доступа к системам поддержки накопления энергии с хорошими возможностями регулирования. Совмещение технологий хранения энергии с умными сетями представляет собой перспективную модель для создания более гибкой и устойчивой энергетической системы [29].

Ограничения модели стратегии стимулирования потребления возобновляемой энергии включают: ограничение баланса мощности, ограничение угла фазы напряжения, ограничение потока мощности, ограничение выхода условного блока, ограничение выхода блока возобновляемой энергии, ограничение пропускной способности линии, ограничение устройства хранения энергии и ограничение реагирования спроса и т. д.

Ограничение баланса мощности:

$$\begin{aligned}
 P_{t,i} = & \sum_{g \in \Omega_G} P_{G,t,g} + \sum_{e \in \Omega_{WP}} P_{WP,t,e} + \sum_{f \in \Omega_{PV}} P_{PV,t,f} \\
 - & \sum_{L \in \Omega_{LOAD}} P_{LOAD,t,L} + \sum_{c \in \Omega_{ES}} P_{ES,t,c} + \sum_{c \in \Omega_{ES}} P_{ES,t,s}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Где: $P_{t,i}$ — введенная мощность узла i в период t ; Ω_G , Ω_{WP} , Ω_{PV} , Ω_{LOAD} и Ω_{ES} — наборы условных блоков, ветряных турбин, фотоэлектрических блоков, нагрузок и узлов устройств хранения энергии, смежных с узлом i ; $P_{G,t,g}$, $P_{WP,t,e}$ и $P_{PV,t,f}$ — активные выходы g -го теплового энергоблока, e -го ветряного блока и f -го фотоэлектрического блока в период t ; $P_{LOAD,t,L}$ — активная нагрузка после реагирования в период t ; $P_{ES,t,c}$ и $P_{ES,t,s}$ — мощности разряда и зарядки c -го накопителя энергии в период t соответственно.

Ограничение угла фазы напряжения

$$\theta_{t,min} \leq \theta_{i,t} \leq \theta_{t,max} \quad (3.2)$$

$$\theta_{rep,t} = 0 \quad (3.3)$$

Где: $\theta_{i,t}$ — угол фазы напряжения узла i в период t ; $\theta_{t,min}$ и $\theta_{t,max}$ — нижний и верхний пределы угла фазы напряжения узла i в период t ; $\theta_{rep,t}$ — угол фазы напряжения опорного узла в период t .

Ограничение мощности условного блока

$$P_{G,min} \leq P_{g,t} \leq P_{G,max} \quad (3.4)$$

Где: $P_{G,max}$ и $P_{G,min}$ — верхний и нижний пределы выходной мощности условных блоков.

Ограничения на потребление возобновляемой энергии

$$P_{WP,t} = (P_{WP,tu} - P_{WP,ts})x_{WP,tu} + (P_{WP,t1} - P_{WP,ts})(1 - x_{WP,tu}) + P_{WP,ts} \quad (3.5)$$

$$x_{WP,tu} + x_{WP,t1} \leq 1 \quad (3.6)$$

$$P_{PV,t} = (P_{PV,tu} - P_{PV,ts})z_{PV,tu} + (P_{PV,t1} - P_{PV,ts})(1 - z_{PV,tu}) + P_{PV,ts} \quad (3.7)$$

$$x_{PV,tu} + x_{PV,t1} \leq 1 \quad (3.8)$$

Где: $P_{WP,t}$ — выходная мощность ветряной турбины в период t ; $P_{WP,tu}$ и $P_{WP,t1}$ — максимальная и минимальная выходная мощность ветряной турбины в период t соответственно; $P_{WP,ts}$ — прогнозируемая выходная мощность ветряной турбины в период t ; $x_{WP,tu}$ и $x_{WP,t1}$ — переменные 0-1, представляющие верхнюю и нижнюю выходную мощность ветряной турбины в период t соответственно; $P_{PV,t}$ — выходная мощность фотоэлектрического блока в

период t ; $P_{PV,tu}$ и $P_{PV,tl}$ представляют максимальную и минимальную выходную мощность фотоэлектрического блока в период t соответственно; $P_{PV,ts}$ — прогнозируемая выходная мощность фотоэлектрического блока в период t ; $X_{PV,tu}$ и $X_{PV,tl}$ — переменные 0-1, представляющие верхнюю и нижнюю выходную мощность фотоэлектрического блока в период t соответственно.

Среди населения, расширение использования возобновляемых источников энергии также имеет большое значение для развития этого сектора. В таких областях необходимо строить небольшие электростанции как с ветряными генераторами, так и с солнечными батареями, и в то же время развивать использование альтернативных источников энергии [30]. Солнечная радиация, скорость ветра и обилие водных ресурсов в различных регионах напрямую влияют на мощность генерации электроэнергии. Приоритет следует отдавать точкам доступа с обильными ресурсами и стабильными выходными характеристиками. Интеллектуальные узлы должны иметь высокоскоростные и надежные условия передачи данных, такие как частные сети 5G, оптоволоконная связь и возможности доступа к Интернету вещей, для поддержки интеллектуального обнаружения и автоматического управления.

Для достижения систематического и научного выбора узлов доступа обычно предпринимаются следующие шаги:

1) Предварительный отбор: определение нескольких потенциальных узлов доступа на основе топологии сети, распределения нагрузки и информации об оборудовании.

2) Оценка технической осуществимости: анализ узлов-кандидатов с точки зрения электробезопасности, потока энергии, уровней тока короткого замыкания и влияния колебаний напряжения.

3) Экономический анализ: оцените необходимые вспомогательные инвестиции после доступа к узлу (например, преобразование линии, настройка защиты, модернизация системы связи) и их экономическую отдачу, а также рассчитайте удельную стоимость доступа.

4) Проверка с помощью моделирования: используйте программное обеспечение для моделирования распределительной сети, чтобы динамически моделировать различные схемы доступа с целью проверки стабильности системы, распределения потока мощности и возможностей реагирования на неисправности.

5) Определение окончательного узла и оптимизация конструкции: определение наилучшего узла доступа на основе комплексного рассмотрения множества факторов и дальнейшая оптимизация метода проводки точки доступа, настроек защиты и стратегии управления.

По сравнению с традиционными распределительными сетями доступ к возобновляемой энергии в интеллектуальных распределительных сетях имеет новые характеристики.

Интеллектуальные сети трансформируются в многоузловые сети с распределенным доступом. Доступ больше не сосредоточен на одной подстанции, а распределен по нескольким точкам в небольших масштабах, что повышает гибкость и способность системы противостоять рискам. Динамическая реконфигурируемость узлов доступа обеспечивает динамическую оптимизацию структуры сети с помощью программных коммутаторов, оборудования автоматической сегментации и т. д., а также позволяет гибко настраивать узлы доступа к возобновляемым источникам энергии в соответствии с эксплуатационными потребностями. Интеллектуальный мониторинг и управление узлами: каждый узел доступа оснащен интеллектуальным терминалом для осуществления мониторинга в реальном времени и удаленного управления ключевыми данными, такими как напряжение, ток, активная/реактивная мощность и частота. Работая в координации с системой хранения энергии, некоторые узлы интегрируются с локальной системой хранения энергии для сглаживания колебаний выработки возобновляемой энергии, повышения надежности электроснабжения и возможностей реагирования узлов на нагрузку.

После разумного выбора узлов возобновляемой энергии для электросети с десятью узлами добавляются централизованный большой ветрогенераторный агрегат, распределенный фотоэлектрический генераторный агрегат и блок аккумуляторной батареи. Простая структурная схема показана на рисунке 3.1.

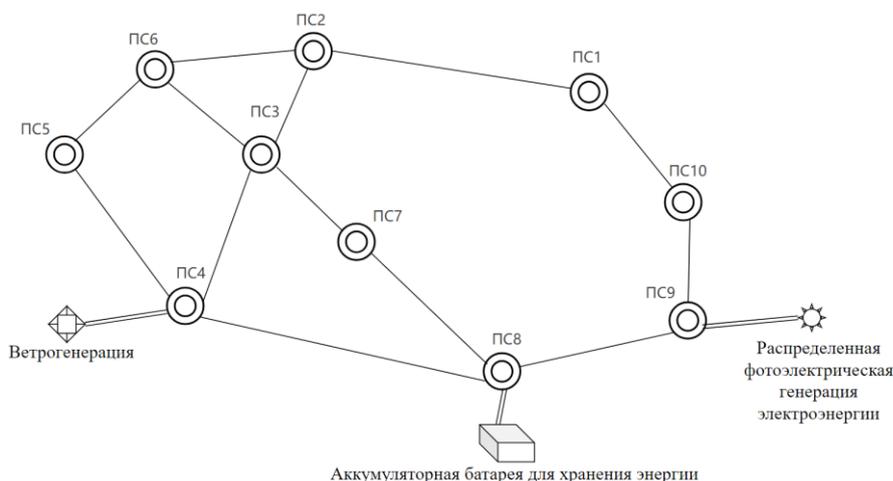


Рисунок 3.1 Структурная схема доступа возобновляемой энергии к электрической сети с 10 узлами

Взяв в качестве примера распределительную сеть на рисунке 3.1, программное обеспечение для анализа энергосистемы (такое как MATLAB/Simulink) используется для моделирования и имитации. В этой модели возобновляемая энергия подключена к разным узлам соответственно, и рассчитывается общая потеря активной мощности системы при каждой схеме доступа. Например, предположив, что ветровая энергия подключена к узлу 4, фотоэлектрическая энергия подключена к узлу 9, а аккумуляторная батарея подключена к узлу 8, общая рассчитанная потеря активной мощности равна P_{loss1} ; ветровая энергия и фотоэлектрическая энергия подключены к другим узлам, и общая рассчитанная потеря активной мощности равна P_{loss2} . Сравнивая значения P_{loss} при разных схемах, выбирается схема доступа с наименьшими потерями. Формула потери мощности:

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n G_{ij} [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (3.9)$$

Где: P_{loss} — общая потеря активной мощности системы, G_{ij} — действительная часть проводимости линии между узлом i и узлом j , V_i, V_j — увеличение напряжения между узлом i и узлом j , θ_i, θ_j — фазовый угол напряжения между узлом i и узлом j .

При выборе узлов доступа следует также учитывать показатели надежности узлов, такие как частота отказов и время восстановления. Отдавайте приоритет доступу к узлам с более низкой надежностью, чтобы повысить стабильность их электроснабжения за счет поддержки возобновляемой энергии.

Путем всестороннего рассмотрения потери мощности, надежности узла и мощности аварийного электроснабжения, а также рационального выбора узлов доступа для возобновляемой энергии можно значительно повысить эффективность работы и надежность электроснабжения распределительной сети. В практических приложениях следует проводить детальное моделирование и имитацию в сочетании с программным обеспечением для анализа энергосистемы, чтобы сформулировать оптимальную стратегию доступа.

3.2 Разработка принципов и способов включения объектов возобновляемых источников энергии в распределительную электрическую сеть

В условиях постоянного роста установленной мощности возобновляемых источников энергии распределительная сеть, как ключевое звено в потоке энергии, должна адаптироваться к широкомасштабному доступу к источникам распределенной генерации. Для обеспечения безопасной, стабильной, экономичной и эффективной работы электросети необходимо сформулировать научные принципы доступа и разработать разумные и эффективные методы включения. Цифровые характеристики интеллектуальных распределительных сетей обеспечивают техническую поддержку для упорядоченного доступа к возобновляемой энергии, делая возможным динамическое регулирование и гибкое управление.

Для обеспечения общей производительности и эксплуатационной безопасности распределительной системы при внедрении возобновляемых источников энергии необходимо соблюдать следующие основные принципы:

1) Принцип приоритета безопасности: доступ к возобновляемым источникам энергии не должен ставить под угрозу стабильную работу распределительной системы. Он должен гарантировать, что напряжение, частота и защитные действия остаются в допустимых пределах при нормальной работе, коротком замыкании, сбоях в работе системы и других условиях.

2) Принцип локального потребления: поощрять локальное потребление в узлах нагрузки вблизи источников энергии, чтобы сократить потери энергии и нагрузку на сеть, вызванные передачей на большие расстояния, а также повысить эффективность использования возобновляемой энергии.

3) Принцип гибкости и управляемости: система доступа должна обладать возможностями быстрого реагирования и регулирования, а также иметь возможность гибко корректировать стратегии работы в соответствии с изменениями нагрузки и колебаниями выработки ресурсов, чтобы избежать дисбаланса спроса и предложения из-за неопределенности в производстве электроэнергии.

4) Принцип обеспечения качества электроэнергии: после доступа не должно возникать проблем с качеством электроэнергии, таких как мерцание напряжения, отклонение частоты и чрезмерные гармоники. При необходимости настраиваются соответствующие устройства компенсации реактивной мощности, фильтрации и регулирования напряжения.

5) Принцип системной экономии: всесторонне рассмотрите инвестиции в оборудование, расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание, доходы от электроэнергии и эффект оптимизации системы, выберите экономически обоснованное и технически осуществимое решение по доступу, чтобы обеспечить наилучшую общую экономическую эффективность.

6) Принцип масштабируемости и совместимости: вновь подключаемые системы возобновляемой энергии должны резервировать определенный объем

мощности расширения и быть совместимыми с существующими информационными и автоматизированными системами распределительной сети для обеспечения единого управления и модернизации в будущем.

Для достижения вышеуказанных принципов объекты возобновляемой энергетики должны соответствовать определенным техническим стандартам и спецификациям при подключении к распределительной сети, в том числе:

1) Стандарты инверторов: инверторы, подключенные к сети, должны иметь функции поддержки низкого напряжения (LVRT), функции регулирования напряжения/частоты, функции управления реактивной мощностью и т. д., чтобы гарантировать поддержание бесперебойной подачи электроэнергии и стабильности при аномальных состояниях сети.

2) Система защиты и управления: необходимо установить полноценное устройство релейной защиты, включая такие меры защиты, как обнаружение перенапряжения, пониженного напряжения, повышенной частоты, пониженной частоты и эффекта изолирования, чтобы избежать работы в режиме изолирования и системных рисков, вызванных неисправностями. Эффект изолирования относится к явлению, при котором при отключении электросети из-за неисправности или технического обслуживания в энергосистеме или системе распределенной генерации электроэнергии оборудование для генерации электроэнергии (такое как фотоэлектрические инверторы) не в состоянии вовремя обнаружить отключение электроэнергии и продолжает подавать электроэнергию на локальную нагрузку, образуя остров электроснабжения, независимый от основной электросети. Это явление может представлять серьезную угрозу оборудованию, стабильности сети и безопасности персонала.[31]

3) Стандарты интерфейса связи и данных: Системы возобновляемой энергии должны быть оснащены модулями связи, которые могут взаимодействовать со SCADA, DMS и другими системами распределительной сети в режиме реального времени для реализации таких функций, как удаленный мониторинг, обновление статуса и ответы на команды.

4) Возможность контроля качества электроэнергии: в соответствии с условиями точки доступа разумно настройте динамические компенсаторы реактивной мощности (SVG/SVC), фильтры (APF) и другие устройства для обеспечения стабильности напряжения и контроля гармоник в стандартном диапазоне.

В дополнение к вышеперечисленным основным принципам также возможно интегрировать и поддерживать возобновляемые источники энергии, такие как солнечная энергия и энергия ветра, оснащать системы хранения энергии и управления спросом (DSM) для формирования скоординированного управления в различных временных масштабах. Например, программы регулирования спроса могут использоваться для снижения зависимости от основной сети и сокращения затрат на закупку энергии, в то время как системы накопления энергии могут использоваться для сглаживания перебоев в подаче возобновляемой энергии [32].

Объединяя вышеизложенные основные принципы и методы, схема установки основных объектов, таких как возобновляемые источники энергии, инверторы, повышающие трансформаторы, шины подстанции и соединения распределительной сети в распределительной сети, показана на рисунке 3.2.

В контексте интеллектуальных распределительных сетей особенно важно разработать и применять систематический и интеллектуальный метод доступа. Метод оценки пропускной способности доступа на основе моделирования использует платформу моделирования энергосистемы для выполнения анализа потоков мощности, коротких замыканий и динамической устойчивости в целевой распределительной сети, оценки верхнего предела пропускной способности доступа к возобновляемой энергии в каждом узле и определения оптимального масштаба и местоположения доступа. На основе иерархического метода управления зонированием распределительная сеть делится на несколько зон управления, а мощность доступа к возобновляемым источникам энергии планируется отдельно. Распределенная система управления энергопотреблением (DEMS) используется для достижения баланса мощности

и оптимального планирования в регионе, тем самым повышая местную автономию и эффективность глобальной координации.



Рисунок 3.2 Подключение фотоэлектрических и ветровых источников к электрическим сетям

На основе метода совместной оптимизации структуры «источник-сеть-нагрузка-накопитель» в сочетании с совместным моделированием и оптимизационным управлением источником (возобновляемая энергия), сетью (распределительная сеть), нагрузкой (управление со стороны нагрузки) и накопителем (система накопления энергии) формулируется динамическая стратегия доступа, например, регулировка выходной мощности или переключение режимов работы в соответствии с текущими прогнозами нагрузки и погоды. Метод динамического доступа на основе искусственного интеллекта применяет машинное обучение, глубокое обучение и другие технологии для прогнозирования и анализа выходных характеристик возобновляемой энергии, тенденций изменения нагрузки и состояния работы сети, оптимизации стратегии управления доступом в режиме реального времени и повышения адаптивности системы. На основе механизма скользящего обновления и динамической оценки среда распределительной сети часто меняется, и план доступа к возобновляемым источникам энергии должен принять механизм скользящей оценки для регулярного обновления пропускной способности доступа, прогноза мощности и пропускной способности сети,

чтобы обеспечить соответствие схемы планирования фактическим условиям эксплуатации.

Под влиянием развития интеллектуальных распределительных сетей и новых источников энергии методы доступа к возобновляемым источникам энергии будут и дальше меняться.

Доступ к возобновляемым источникам энергии перешел от статичного планирования к динамическому управлению с опорой на большие данные, облачные платформы и анализ ИИ для достижения динамической корректировки и оптимизации доступа к возобновляемым источникам энергии в реальном времени, а не принятия единовременных решений, основанных исключительно на исходных данных планирования. Благодаря высокоинтегрированной и стандартизированной системе доступа формулируются единые технические стандарты и протоколы интерфейса для достижения быстрого доступа и взаимосвязи различных типов систем возобновляемой энергии. Благодаря системам доступа с функцией самовосстановления будущие интеллектуальные распределительные сети будут обладать возможностями самодиагностики и самовосстановления, а также смогут быстро переключаться и автоматически ремонтироваться при колебаниях доступа к возобновляемым источникам энергии или возникновении локальных сбоев, тем самым повышая непрерывность и надежность электроснабжения.

3.3 Характеристика и анализ работы электрической сети с объектами возобновляемых источников энергии

К интеллектуальной распределительной сети подключено большое количество возобновляемых источников энергии, таких как фотоэлектрические и ветровые электростанции, а режим работы, логика диспетчеризации и характеристики устойчивости электросети претерпели существенные изменения. В связи с такими естественными свойствами возобновляемой энергии, как хаотичность и прерывистость, электросеть должна адаптироваться к новым рабочим механизмам, чтобы обеспечить надежность энергоснабжения

и качество электроэнергии. Поэтому углубленный анализ эксплуатационных характеристик сетей возобновляемой энергетики является важной предпосылкой для достижения высокой доли нового потребления энергии и обеспечения безопасной и стабильной работы электросети.

На выработку фотоэлектрической энергии влияет интенсивность солнечного света, а на выработку ветровой энергии — изменения скорости ветра. Оба показателя демонстрируют сильные временные изменения и их трудно точно предсказать. Выходная мощность может существенно колебаться в течение короткого периода времени, создавая проблемы для баланса мощности и стабильности напряжения в электросети.

В традиционных распределительных сетях поток электроэнергии однонаправленный — сверху вниз (от подстанции к потребителю). Однако после подключения к распределенным возобновляемым источникам энергии поток электроэнергии приобретает двунаправленную характеристику. Электросеть не только подает электроэнергию на нагрузку, но и распределенные источники питания могут также подавать электроэнергию вверх по течению, вызывая динамические изменения направления потока мощности.

Фотоэлектрические и ветровые электростанции в основном подключаются к сети через инверторы. По сравнению с традиционными источниками питания типа вращающегося генератора (например, тепловой энергией) источники питания инверторного типа не обладают возможностями инерционной поддержки, что приводит к снижению стабильности частоты системы и возможностей поддержки напряжения.

Когда основной источник питания выше по течению отключен, но распределенная возобновляемая энергия продолжает работать, в локальной зоне может сформироваться режим работы «островка». При отсутствии эффективного обнаружения и контроля легко могут возникнуть несчастные случаи и проблемы с качеством электроэнергии.

Из-за неопределенности в сфере производства возобновляемой энергии такие операции, как прогнозирование нагрузки распределительной сети, планирование подачи энергии и устранение неисправностей, стали более сложными, что предъявляет более высокие требования к мониторингу в реальном времени, интеллектуальному управлению и гибкому планированию.

Случайный характер возобновляемых источников энергии может вызывать проблемы в процессе передачи электроэнергии, поэтому необходимо применять специальные меры, такие как внедрение систем накопления энергии и технологий преобразования избыточной энергии, чтобы повысить долю ВИЭ в энергетической системе [33]. Определенные проблемы возникнут и после подключения возобновляемых источников энергии к интеллектуальной распределительной сети.

Доступ к высокой доле возобновляемой энергии приводит к снижению общей инертности системы и увеличению скорости изменения частоты (увеличению RoCoF). После внезапного возмущения (например, отключения генератора) частота подвержена резким колебаниям или даже нестабильности.

Источники распределенной генерации электроэнергии широко распространены и динамично изменяются. Традиционный метод управления напряжением, основанный на регулировке ответвлений главного трансформатора и управлении устройством компенсации реактивной мощности, с трудом соответствует требованиям и может легко привести к превышению предельного значения напряжения в узле или к значительным колебаниям напряжения.

Изменение направления потока электроэнергии и динамический доступ к распределенным источникам питания делают неэффективными защиту от сверхтоков, направленную защиту и другие стратегии традиционных распределительных сетей. Необходимо переработать схему защиты, чтобы обеспечить быстрое устранение неисправностей и безопасность системы.

Использование большого количества источников питания инверторного типа приводит к таким проблемам, как гармонические искажения, колебания

реактивной мощности и трехфазный дисбаланс, что создает новые проблемы для управления качеством электроэнергии в распределительных сетях.

Обнаружение эффекта изолирования должно быть быстрым и точным, чтобы избежать пропуска обнаружения или ложного срабатывания. Однако из-за разнообразия стратегий управления инверторами и сложности среды доступа сложность обнаружения изолирования значительно возрастает.

Для решения различных проблем в работе сетей возобновляемой энергии можно принять меры по оптимизации.

Для повышения инерционности системы и возможностей быстрого частотного отклика внедрена технология виртуального синхронного генератора (VSG), которая позволяет моделировать характеристики инерции и демпфирования традиционного синхронного генератора в инверторном управлении для повышения стабильности частоты; Система накопления энергии может использоваться как ресурс с быстрым частотным откликом для обеспечения краткосрочной энергетической поддержки.

Многоуровневая стратегия управления напряжением объединяет регулирование напряжения на стороне источника, реакцию на стороне нагрузки и скоординированное управление устройствами компенсации реактивной мощности для создания многоуровневой, регионально распределенной системы управления напряжением для всей сети, обеспечивая быстрое и точное регулирование напряжения в узлах.

На основе стратегии зонирования распределительная сеть делится на несколько защитных зон, и для адаптации к изменениям направления потока мощности и динамическим характеристикам доступа распределенных источников питания применяются новые технологии защиты, такие как защита микросетей, распределенная защита и адаптивная защита.

Развертывайте оборудование активной фильтрации и динамической компенсации реактивной мощности, устанавливайте активные фильтры мощности (APF), статические генераторы реактивной мощности (SVG) и другое оборудование в узлах доступа к возобновляемым источникам энергии

или центрах нагрузки для эффективного подавления гармоник, повышения коэффициента мощности и оптимизации качества электроэнергии.

Технология обнаружения и быстрого устранения эффекта изолирования использует передовые методы обнаружения эффекта изолирования, такие как скачок фазы, дрейф частоты, анализ скорости изменения напряжения и т. д., а также объединяет обнаружение с помощью связи (например, функцию обнаружения неисправностей в системе автоматизации распределительной сети) для повышения надежности обнаружения и скорости реагирования. Автоматизированная распределительная сеть (англ. Distribution Automation — DA) — это система, которая позволяет электросетям контролировать, координировать и управлять распределительными СЭС в режиме реального времени из удаленных мест. Одним из ключевых факторов внедрения DA является увеличение мирового потребления электроэнергии с последующим повышением её стоимости, в результате которого энергоснабжающие организации стали всё больше обращать внимание на эффективность систем электроснабжения, на их надежность и качество электроэнергии. Другим фактором является появление возобновляемых источников энергии и распределенной энергетики, которые требуют автоматизации их работы для согласованной работы с энергосетями [34].

Применение интеллектуальной системы планирования и управления энергопотреблением создает интеллектуальную платформу управления энергопотреблением и планирования на основе анализа больших данных и алгоритмов искусственного интеллекта для прогнозирования нагрузки, скоординированного управления распределенной энергией и оптимизации работы в реальном времени, тем самым повышая общую эффективность работы и экономичность системы.

Накопитель энергии обладает характеристиками пространственной и временной передачи энергии и считается наиболее прямым и эффективным решением для крупномасштабной интеграции возобновляемых источников энергии. Однако высокая стоимость и низкая масштабируемость становятся

препятствиями для крупномасштабного применения накопителей энергии. Суть совместного хранения энергии заключается в разделении владения, контроля и использования ресурсов хранения энергии. Для общего хранилища энергии основными субъектами могут являться владельцы, операторы и пользователи [35]. Продвигая новые методы хранения энергии, такие как совместное хранение энергии, можно значительно повысить гибкость ее использования. В будущем, с дальнейшим развитием новых систем хранения энергии, передовой силовой электроники, интеллектуальных систем диспетчеризации и других технологий, эксплуатация и управление сетями возобновляемой энергии станут более интеллектуальными и адаптивными.

С завершением создания энергосистемы с высокой долей возобновляемой энергии, энергосистема сможет обеспечить стабильную и безопасную работу в условиях высокой доли возобновляемой энергии.

Полная цифровизация и самовосстановление обеспечивают комплексное восприятие, интеллектуальное прогнозирование и быстрое самовосстановление состояния электросети с помощью Интернета вещей, больших данных и алгоритмов искусственного интеллекта.

Пользовательская сторона широко вовлечена в управление энергопотреблением, и посредством реагирования на спрос, накопления энергии пользователем, зарядки и разрядки электромобилей и других средств достигается высокая степень координации между источником, сетью, нагрузкой и хранилищем, что способствует глубокому потреблению и экономичной эксплуатации возобновляемой энергии.

3.4 Повышение управляемости электрической сети с возобновляемых источников энергии с помощью цифровых технологий

Поскольку доля возобновляемой энергии в распределительных сетях продолжает расти, традиционные электросети сталкиваются с такими проблемами, как возросшая сложность эксплуатации и управления, возросшая потребность в реагировании в режиме реального времени и возросшая

сложность управления качеством электроэнергии. Для обеспечения безопасной, стабильной и эффективной работы электросети в условиях высокой доли возобновляемой энергии необходимо в полной мере внедрять и применять передовые цифровые технологии, повышающие восприимчивость, управляемость и адаптивность электросети.

Цифровые технологии расширяют возможности каждого звена электросети посредством сбора, обработки, анализа и принятия решений в режиме реального времени на основе огромных объемов данных об электросети. С помощью интеллектуальных датчиков, интеллектуальных терминалов (таких как интеллектуальные счетчики, оборудование для мониторинга состояния) и т. д. собираются данные в режиме реального времени, такие как напряжение, ток, мощность, частота, фаза, информация о неисправностях и т. д. в электросети, для достижения комплексной визуализации рабочего состояния распределительной сети. Используйте анализ больших данных, искусственный интеллект (ИИ), машинное обучение и другие технологии для принятия разумных решений по прогнозированию генерации возобновляемой энергии, прогнозированию нагрузки, обнаружению неисправностей, идентификации островов и т. д., а также для быстрой разработки и реализации оптимальных стратегий управления. Благодаря цифровым двойникам, предиктивному обслуживанию и другим средствам можно добиться моделирования в реальном времени и управления состоянием оборудования, что позволит снизить частоту отказов, продлить срок службы оборудования и повысить эффективность эксплуатации и обслуживания.

Архитектура совместной работы на границе облака — это архитектура, сочетающая в себе облачные вычисления и периферийные вычисления. В этой архитектуре некоторые вычислительные задачи могут выполняться в облаке, а некоторые — на пограничных устройствах или пограничных узлах, обеспечивая более распределенную и интеллектуальную вычислительную нагрузку. Более того, облачный и пограничный уровни могут осуществлять двустороннюю передачу данных снизу вверх и сверху вниз для завершения

командной координации бизнес-сервисов и сервисов приложений. Этот механизм двусторонней передачи данных позволяет облачному и пограничному уровням обмениваться информацией в режиме реального времени, а также корректировать и оптимизировать ее по мере необходимости [36]. Благодаря периферийным вычислениям и технологии распределенного совместного управления локальные неисправности могут быть быстро изолированы, а подача электроэнергии может быть автоматически восстановлена, тем самым повышая адаптивность сети и возможности ее самовосстановления.

К основным цифровым средствам относятся:

1) Система автоматизации распределения (DAS) и усовершенствованная система управления распределением (ADMS): DAS может осуществлять дистанционное управление и мониторинг состояния оборудования распределительной сети (такого как автоматические выключатели, переключатели, устройства компенсации реактивной мощности и т. д.), улучшать локализацию неисправностей, изоляцию и скорость восстановления электропитания; ADMS интегрирует расширенные прикладные функции, такие как прогнозирование нагрузки, оптимизация напряжения/реактивной мощности, реконструкция сети, управление неисправностями и т. д., а также обеспечивает интеллектуальное планирование и оптимизацию для сложной рабочей среды после подключения возобновляемой энергии к сети.

2) Интеллектуальные датчики и Интернет вещей (IoT): установите интеллектуальные счетчики электроэнергии, блоки мониторинга трансформаторов, датчики окружающей среды и т. д. в ключевых узлах и используйте технологию IoT для обеспечения взаимосвязи между устройствами, формируя сеть сбора данных с полным покрытием от стороны генерации электроэнергии до стороны пользователя.

3) Технологии больших данных и искусственного интеллекта: благодаря глубокому анализу исторических данных об эксплуатации, погодных данных и данных о состоянии оборудования создаются новые высокоточные модели прогнозирования выработки электроэнергии, модели поведения нагрузки и

модели прогнозирования неисправностей, обеспечивающие поддержку принятия решений для оптимизированной работы и активной защиты электросети.

4) Облачная платформа и технология периферийных вычислений: платформа облачных вычислений централизованно обрабатывает большие объемы данных электросети и обеспечивает мощные вычислительные возможности и возможности хранения; Периферийные вычислительные узлы развертываются в близлежащих местах, таких как подстанции и распределительные пункты, чтобы обеспечить оперативность и надежность выполнения ключевых задач управления и снизить нагрузку на главный центр управления.

5) Технология цифровых двойников: на основе данных о работе реальной электросети в реальном времени в виртуальном пространстве создается цифровая модель электросети для синхронизации состояния физической электросети в реальном времени. Его можно использовать для имитационного анализа, прогнозирования неисправностей, оптимизированного планирования и принятия вспомогательных решений для улучшения возможностей управления и контроля сложных систем.

После внедрения цифровых технологий уровень эксплуатации и управления сетями распределения возобновляемой энергии значительно повысился. Точно прогнозируя выработку новой энергии и изменения нагрузки, а также заранее распределяя ресурсы по хранению энергии, управлению нагрузкой и другим средствам, мы можем смягчить проблему дисбаланса мощности, вызванную колебаниями новой энергии, и максимально использовать зеленую энергию. Интеллектуальная система управления способна динамически регулировать уровни напряжения, распределение реактивной мощности и потоки электроэнергии в соответствии с данными в реальном времени, улучшать способность сети адаптироваться к колебаниям выработки возобновляемой энергии и обеспечивать безопасность и стабильность работы системы. Технология мониторинга в реальном времени и

быстрой регулировки позволяет эффективно контролировать гармоники, подавлять колебания напряжения, балансировать трехфазные нагрузки и улучшать качество электроэнергии. В то же время функция самовосстановления может сократить время отключения электроэнергии из-за неисправности и повысить надежность электроснабжения пользователя.

Цифровой удаленный мониторинг и предиктивное обслуживание значительно сокращают количество ручных проверок и аварийных ремонтов, снижают затраты на эксплуатацию и обслуживание, а также продлевают срок службы оборудования.

В управлении сетями возобновляемой энергии цифровые технологии будут продолжать углубляться и развиваться, а будущее направление развития имеет широкие перспективы.

Благодаря глубокому обучению, адаптивным алгоритмам и т. д. возможности самообучения и самооптимизации распределительной сети будут еще больше улучшены, что позволит достичь более высокого уровня автоматизации и интеллектуального функционирования.

Содействовать применению технологии блокчейн в торговле энергией, использовать технологию блокчейн для реализации распределенных транзакций по принципу «точка-точка» в сфере энергетики, повышать уровень рыночного потребления новой энергии, а также содействовать взаимодополняемости различных видов энергии и совместному использованию ресурсов. В 2020 году в России запущена программная платформа управления распределенной энергетикой на блокчейне [37]. Активное продвижение распределенной энергетики поддерживается на национальном уровне, что повышает удобство ее использования для пользователей.

Изучите технологию распределенного автономного управления (DAC) на уровне распределения, чтобы дать каждому узлу сети возможность принимать автономные решения и работать в режиме сотрудничества, что еще больше повысит гибкость и устойчивость сети. Создайте интеллектуальную платформу управления полным жизненным циклом, чтобы реализовать цифровизацию

управления полным жизненным циклом от планирования, проектирования, строительства, эксплуатации до вывода из эксплуатации, а также повысить уровень управления сетевыми активами и окупаемость инвестиций.

Для того чтобы более наглядно продемонстрировать типы цифровых технологий, рассматриваемых в этой разделов, и их применение в подключении к сети возобновляемой энергии, в таблице 3.1 обобщены основные цифровые технологии и их функции, упомянутые в этой статье, что удобно для справки при последующем проектировании и исследовании системы. Подводя итог, можно сказать, что процесс доступа возобновляемой энергии к интеллектуальной распределительной сети включает не только сопоставление физической структуры и электрических параметров, но и опирается на комплексное применение нескольких передовых цифровых технологий. Благодаря научному выбору узлов доступа, разумной настройке оборудования для хранения и защиты энергии и созданию визуальной и интеллектуальной операционной платформы современные распределительные системы могут эффективно решать проблемы неопределенности и волатильности, вызванные новым подключением к сети энергии, и оказывать надежную поддержку для создания безопасной, эффективной и гибкой энергетической системы.

Таблица 3.1 Цифровые технологии, используемые в работе

Название технологии	Функция и область	Ожидаемый эффект
Интеллектуальная система учета (AMI)	Мониторинг потребления энергии на стороне пользователя и выставление счетов	Фиксация колебаний мощности, анализ поведения потребления энергии и удаленный сбор данных
Расширенная система управления распределением (ADMS)	Диспетчеризация распределительной сети и управление эксплуатацией	Мониторинг в реальном времени, обнаружение неисправностей и управление самовосстановлением

Продолжение таблицы 3.1

Алгоритм искусственного интеллекта (ИИ)	Прогнозирование и оптимизация решений	Применение для прогнозирования нагрузки, диагностики неисправностей и прогнозирования возобновляемой мощности
Платформа анализа больших данных	Анализ данных энергосистемы	Анализ данных о потерях электроэнергии для оптимизации планирования и стратегий обслуживания оборудования.
Технология Интернета вещей (IoT)	Взаимодействие оборудования и мониторинг состояния	Обмен информацией между терминальным оборудованием сбора данных и центром управления
Цифровой двойник	Моделирование и прогнозирование данных	Виртуальный образ распределительной системы для поддержки отработки неисправностей и испытаний на эксплуатацию и техническое обслуживание
Система онлайн-мониторинга	Мониторинг состояния линии передачи/распределения	Обнаружение в реальном времени температуры, напряжения, тока и других параметров для повышения надежности
Периферийные вычисления	Локальная обработка данных и предварительное принятие решений	Повышение скорости отклика на изменение нагрузки на центральный сервер

Удаленный терминал (RTU)/телеметрическое оборудование	Управление распределенным оборудованием	Реализация функции удаленной работы, удаленной сигнализации и телеметрии
Сеть связи (оптоволокно, 5G, PLC и т. д.)	Поддержка системной связи	Обеспечение эффективной, малозадерживаемой и безопасной передачи команд сбора/управления
Распределенная система управления энергопотреблением (DERMS)	Координация и диспетчеризация энергии из нескольких источников	Оптимизация скоординированной работы возобновляемой энергии, хранения энергии и нагрузок
Фазорный измерительный блок (PMU)	Высокоскоростное получение напряжения/тока/фазового угла	Поддержка оценки состояния, подавления колебаний и управления связью на большой площади

3.5 Выводы

Выбор узла должен основываться на минимальных потерях мощности, повышенной надежности и расширенных возможностях аварийного электроснабжения, а компоновка узла оптимизируется с помощью математических моделей (баланс мощности, напряжение, поток мощности и другие ограничения) в сочетании с моделированием.

Приняты шесть принципов реализации интеллектуальной сети, включая безопасность доступа, локальное потребление, гибкое управление, качество электроэнергии, экономичность и совместимость с расширением, а также предлагаются технические требования и интеграция методов, таких как стандарты инверторов, системы защиты, интерфейсы связи и координация хранения энергии.

Проанализированы проблемы двунаправленного потока мощности, отсутствия инерции, рисков самоизоляции, нестабильности напряжения и

частоты, гармонического загрязнения и т. д., вызванные высокой долей доступа возобновляемой энергии к электросети, и предлагаются такие решения, как VSG, иерархическое управление напряжением, адаптивная защита, активная фильтрация, координация хранения энергии и интеллектуальное планирование.

Внедряется комплекс технологии DAS/ADMS, зондирование IoT и большие данные, для создания полнофункционального цифрового замкнутого цикла от обнаружение-решения-исполнения-самовосстановления для улучшения возможностей мониторинга, прогнозирования, оптимизации и управления активами.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

4.1 Регулирование графиков нагрузки электрических сетей с возобновляемыми источниками энергии

С широкомасштабным доступом к распределительным сетям возобновляемых источников энергии, таких как солнечная энергия и энергия ветра, характеристики нагрузки и модели спроса энергосистемы существенно изменились. Из-за непостоянного характера этих источников энергии традиционные методы планирования нагрузки не могут удовлетворить потребности интеллектуальных сетей. Чтобы обеспечить стабильную и безопасную работу электросети при подключении к большой доле возобновляемых источников энергии, необходимо принять более гибкую и интеллектуальную стратегию регулирования нагрузки. Регулирование нагрузки должно не только адаптироваться к нестабильности генерации электроэнергии из возобновляемых источников энергии, но и учитывать эксплуатационную эффективность, экономичность и надежность электроснабжения электросети.

Благодаря технологии прогнозирования мощности можно повысить точность прогнозирования выработки возобновляемой энергии, обеспечивая динамическую поддержку данных для планирования нагрузки. Например, путем объединения метеорологических данных с историческими кривыми выработки электроэнергии можно оптимизировать краткосрочные, среднесрочные и долгосрочные балансы мощности, а также сократить отклонения в расписании.

Для имитационных и цифровых моделей при различных условиях нагрузки сети из [38] видно, что в процессе переключения различных нагрузок возобновляемой энергии используется специальная логическая функция (T, A, B), называемая функцией подключения, которая может иметь от одного до трех

параметров, каждый из которых может быть скалярным номиналом или векторным номиналом.

$$T = (t_1, t_2 \dots t_n), A = (\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n), B = (\beta_1, \beta_2 \dots \beta_n) \quad (4.1)$$

Количество и тип каждого параметра показаны в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Количество и тип функций подключения

Вариант	Кол. аргументов	Формат функции
1	1	$s(t)$
2	1	$s(T)$
3	2	$s(t, \alpha)$
4	2	$s(T, \alpha)$
5	2	$s(T, A)$
6	3	$s(t, \alpha, \beta)$
7	3	$s(T, \alpha, \beta)$
8	3	$s(t, A, B)$
9	3	$s(T, A, B)$

Для скалярной независимой переменной функция пропорциональна значению независимой переменной следующим образом:

$$s(t) = \eta(t) \quad (4.2)$$

Где η — единичная функция изменения.

Когда функция имеет два скалярных параметра, формула для ее функции вариации имеет вид:

$$s(t, a) = \begin{cases} 1 & t \geq a \\ 0 & t < a \end{cases} \quad (4.3)$$

Когда функция имеет три переменных параметра, два из которых являются скалярными параметрами, а один — векторным параметром, ее формула корректировки нагрузки имеет вид:

$$s(T, A) = \begin{bmatrix} s(t_1, \alpha_1) & s(t_2, \alpha_1) & \dots & s(t_n, \alpha_1) \\ s(t_1, \alpha_2) & s(t_2, \alpha_2) & \dots & s(t_n, \alpha_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s(t_1, \alpha_p) & s(t_2, \alpha_p) & \dots & s(t_n, \alpha_p) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Когда функция имеет один скалярный параметр и два векторных параметра среди трех переменных, и два вектора имеют одинаковую размерность, формула изменения нагрузки имеет вид:

$$s(T, A, B) = \begin{bmatrix} s(t_1, \alpha_1, \beta_1) & s(t_2, \alpha_2, \beta_2) & \cdots & s(t_n, \alpha_p, \beta_p) \\ s(t_1, \alpha_1, \beta_1) & s(t_1, \alpha_2, \beta_2) & \cdots & s(t_1, \alpha_p, \beta_p) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ s(t_n, \alpha_1, \beta_1) & s(t_n, \alpha_2, \beta_2) & \cdots & s(t_n, \alpha_p, \beta_p) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Различные условия параметров приведенной выше формулы изменения нагрузки можно получить, просто изменив различные переменные в соответствии с таблицей. Различные форматы функции могут найти различные применения при моделировании устройств регулирования и преобразовательной техники [39]. Приведенная выше формула представляет собой теоретическую математическую модель для изучения регулирования нагрузки возобновляемой энергии.

Возобновляемая энергия, особенно энергия ветра и солнца, характеризуется большими колебаниями и неопределенностями выходной мощности из-за влияния погоды, времен года и смены дня и ночи. Особенно в условиях нестабильного ветра или недостаточного количества солнца выработка возобновляемой энергии в сети может резко сократиться, что приведет к дисбалансу нагрузки системы. Кроме того, поскольку эти колебания обычно происходят случайным образом, традиционные методы прогнозирования нагрузки испытывают трудности с учетом таких резких колебаний нагрузки. Поэтому вопрос о том, как смягчить влияние этих колебаний на электросеть с помощью эффективного механизма регулирования нагрузки, стал проблемой, которую нельзя игнорировать в интеллектуальных распределительных сетях.

В распределительной сети, подключенной к возобновляемым источникам энергии, основными задачами регулирования нагрузки являются:

- 1) Обеспечить баланс нагрузки электросети, убедиться, что мощность электроснабжения и спрос в электросети сбалансированы, а также не допустить колебаний частоты или отключений электроэнергии, вызванных

недостаточным электроснабжением. В то же время излишки электроэнергии необходимо своевременно утилизировать, чтобы не допустить перегрузки электросети.

2) Повысить гибкость диспетчеризации системы. В связи с нестабильностью генерации возобновляемой энергии электросеть должна иметь гибкие возможности диспетчеризации и иметь возможность быстро оптимизировать диспетчеризацию на основе изменений нагрузки в реальном времени и условий энергоснабжения для поддержания бесперебойной работы энергосистемы.

3) Сокращение потерь энергии. В процессе регулирования нагрузки мы должны стараться избегать чрезмерной зависимости от традиционных методов генерации электроэнергии, сокращать использование ископаемого топлива и энергетических отходов, а также добиваться поставок экологически чистой и низкоуглеродной электроэнергии.

4) Оптимизировать структуру затрат. Регулирование нагрузки также должно учитывать экономическую целесообразность рынка электроэнергии и рационально выбирать различные типы источников питания и устройств накопления энергии для снижения эксплуатационных расходов и повышения экономической выгоды системы.

Для достижения вышеуказанных целей интеллектуальным распределительным сетям необходимо использовать ряд современных технических средств для оптимизации процесса регулирования нагрузки.

Интеллектуальное прогнозирование нагрузки является основой для достижения точного регулирования нагрузки. Внедряя такие технологии, как анализ больших данных, машинное обучение и глубокое обучение, мы можем точно прогнозировать тенденции изменения энергетической нагрузки на основе исторических данных, информации о погоде, сезонных изменениях и других факторов. Анализируя данные о выработке электроэнергии на основе возобновляемых источников энергии, можно прогнозировать мощность генерации возобновляемых источников энергии и тенденции ее колебаний, тем

самым предоставляя точные результаты прогнозирования нагрузки для диспетчеров электросетей и обеспечивая поддержку принятия решений для последующего регулирования нагрузки и распределения ресурсов.

Системы накопления энергии играют важную роль в регулировании нагрузки возобновляемых источников энергии. Благодаря контролю заряда и разряда оборудования для хранения энергии можно эффективно компенсировать несоответствие между спросом и предложением возобновляемой энергии. При избыточной выработке электроэнергии за счет возобновляемых источников энергии оборудование для хранения энергии может хранить излишки электроэнергии. При недостаточной выработке электроэнергии за счет возобновляемых источников энергии система накопления энергии может высвободить накопленную электроэнергию, чтобы обеспечить бесперебойную работу нагрузки сети. Планирование и управление системами хранения энергии основаны на современных системах управления энергопотреблением (EMS) и платформах мониторинга в реальном времени, которые могут динамически корректировать стратегию работы систем хранения энергии в соответствии с реальным спросом на нагрузку сети.

Реагирование на спрос является важным средством регулирования спроса на нагрузку пользователей. С помощью таких терминальных устройств, как интеллектуальные счетчики и системы управления бытовой техникой, можно отслеживать потребление электроэнергии пользователями в режиме реального времени и осуществлять управление спросом. Когда электросеть перегружена, можно использовать ценовые стимулы, контроль оборудования и другие средства, чтобы помочь пользователям своевременно скорректировать свои привычки потребления электроэнергии и избежать перегрузки электросети. Кроме того, реагирование на спрос можно также объединить с механизмом ценообразования на электроэнергию. В зависимости от изменений цен на электроэнергию в различные периоды времени, пользователи могут быть мотивированы увеличивать потребление электроэнергии в периоды низких цен на электроэнергию и сокращать потребление электроэнергии в периоды

высоких цен на электроэнергию, тем самым эффективно регулируя нагрузку на сеть.

Технология микросетей обеспечивает более гибкое решение для регулирования нагрузки. Микросети могут осуществлять двунаправленный поток энергии при подключении к основной сети и работать независимо после отключения от основной сети. Распределенная энергия в микросетях может саморегулироваться в соответствии с изменениями спроса на нагрузку, чтобы обеспечить стабильность сети. В интеллектуальных распределительных сетях микросети могут не только повысить надежность сети, но и снизить зависимость от традиционной электроэнергии и способствовать более масштабному доступу к зеленой энергии.

В современных микросетях распределенная генерация является ее основным компонентом, в основном включающим солнечные панели, ветряные турбины, установки на биомассе и системы хранения энергии. Распределенные источники питания обычно располагаются вблизи пользовательских нагрузок и подключаются к локальной сети через инверторы. Они могут работать независимо или параллельно с основной сетью. Ее структура имеет преимущества высокой гибкости, локального производства и потребления энергии и повышенной надежности электроснабжения. Из-за большого количества типов и методов конфигурации распределенных источников питания на рисунке 4.1 показана базовая структура распределенной генерации в типичной микросети.

Виртуальная электростанция (ВЭС) — это метод планирования, объединяющий несколько распределенных источников энергии, накопителей энергии и управляемых нагрузок на основе информационно-коммуникационных технологий. С помощью виртуальных электростанций можно централизованно управлять системами возобновляемой энергии и хранения энергии, распределенными в разных регионах, для оптимизации общей стратегии регулирования нагрузки сети. Виртуальные электростанции могут регулировать выработку каждой распределенной энергетической

установки в режиме реального времени в соответствии со спросом и предложением электроэнергии, тем самым достигая оптимального управления нагрузкой сети.



Рисунок 4.1 Принципиальная схема структуры микросети

Динамическая балансировка нагрузки в гибридных сетях представляет собой сложную научнотехническую задачу особенно сложными моментами решения которой являются определение класса сложности по ступившей задаче построение схемы переадресации задач в гибридной сети отслеживание доступной производительности вычислительных серверов поступление потока вычислительных заявок [40].

Основной задачей регулирования нагрузки является обеспечение стабильной работы электросети. При подключении большого количества возобновляемой энергии регулирование нагрузки должно не только соответствовать требованиям баланса спроса и предложения в режиме реального времени, но и учитывать долгосрочную стабильность и надежность электросети. Благодаря интеллектуальной технологии регулирования нагрузки распределительная сеть может быстро реагировать на колебания возобновляемой энергии, избегать перепадов напряжения, отклонений частоты и других проблем, а также обеспечивать нормальную работу электросети.

Кроме того, регулирование нагрузки может также помочь снизить нагрузку на электросеть в условиях высокой нагрузки или аварий, а также улучшить способность электросети к самовосстановлению и скорость реагирования на аварийные ситуации.

4.2 Влияние возобновляемых источников энергии на экономичность функционирования электрических сетей

По мере интеграции возобновляемых источников энергии распределительные сети играют важную роль в повышении устойчивости и снижении зависимости от традиционных ископаемых видов топлива. Однако из-за нестабильности и неопределенности возобновляемой энергии эффективность электросети сталкивается с новыми проблемами. В традиционных электросетях стабильность и надежность электроснабжения гарантируются централизованными системами генерации электроэнергии и единым механизмом диспетчеризации. Однако после повсеместного доступа к возобновляемым источникам энергии ключом к оптимизации эффективности энергосистемы стал вопрос о том, как в полной мере раскрыть потенциал возобновляемых источников энергии, обеспечив при этом эффективную работу энергосистемы.

Возобновляемая энергия оказывает большое влияние на эффективность сети. Сначала обсудим негативные последствия.

Колебания напряжения в электросети представляют серьезную проблему для стабильности сети. Возобновляемая энергетика, ввиду ее непостоянного и нестабильного характера, может претерпеть существенные изменения в выработке электроэнергии за короткий промежуток времени. В частности, фотоэлектрические системы генерации электроэнергии вряд ли смогут обеспечить электроэнергией в пасмурные дни или ночью, а ветроэнергетика также имеет колебания выходной мощности, вызванные изменениями скорости ветра. Эти факторы заставляют энергосистему часто корректировать баланс между выработкой электроэнергии и нагрузкой, что увеличивает неопределенность работы энергосистемы. Для компенсации этих колебаний

электросеть должна полагаться на быстродействующие резервные источники питания (системы накопления энергии и т. д.). Если их не удастся вовремя отрегулировать, эффективность системы может снизиться.

Частые остановки и повторные запуски системы также могут привести к значительным потерям. Из-за непостоянного характера возобновляемой энергии традиционные генераторы в электросети могут нуждаться в частом запуске и остановке или работе при низких нагрузках, чтобы справиться с колебаниями в выработке возобновляемой энергии. Частые пуски-остановки и работа с переменной нагрузкой не только увеличивают механический износ оборудования, но и приводят к более высоким пусковым потерям и снижению общей эффективности выработки электроэнергии. Значительное влияние оказывает также старение основного оборудования. Старение любого энергетического оборудования приводит, как правило, к ухудшению энергетических характеристик. Старение изоляции приводит к увеличению потерь в стали магнитопровода трансформатора. Это наиболее вероятная причина выявленных расхождений. В пользу такого предположения говорят результаты измерений потерь холостого хода, выполненные в Российской Федерации [41]. Кроме того, координированное планирование работы традиционных тепловых электростанций и возобновляемых источников энергии является относительно сложным. В некоторых случаях необходимо поддерживать определенный уровень резервных мощностей по выработке электроэнергии, что приводит к дополнительным потерям энергии.

Колебания напряжения и качество электроэнергии, вырабатываемой возобновляемыми источниками энергии, также представляют собой проблемы, особенно когда фотоэлектрические и ветровые электростанции динамически соединены, колебания напряжения в электросети могут усиливаться, что влияет на стабильную работу пользовательского оборудования. Это не только влияет на качество электроснабжения, но и усложняет эксплуатацию сети, что приводит к снижению эффективности. Таким образом, передача электрической энергии от источников питания к потребителям связана с потерей части

мощности и энергии в системе электроснабжения (трансформаторах, линиях, реакторах) [42]. Электросети необходимо постоянно регулировать напряжение для обеспечения качества электроснабжения. Этот процесс не только потребляет энергию, но и легко приводит к потерям в другом оборудовании и дисбалансу нагрузки.

Широкомасштабный доступ к возобновляемым источникам энергии оказывает более положительное влияние на эффективность сети. Хотя нестабильность и неопределенность возобновляемой энергии создают проблемы для эффективности сети, посредством научного управления и технических средств эти проблемы можно также превратить в возможности для повышения эффективности сети и эффективного повышения стабильности распределительной сети.

Доступ к возобновляемым источникам энергии сокращает потребление традиционной ископаемой энергии, напрямую снижая зависимость от традиционного ископаемого топлива при производстве электроэнергии, тем самым снижая потребление энергии в общем процессе производства электроэнергии. Особенно в условиях обилия возобновляемой энергии система может значительно снизить рабочую нагрузку угольных или газовых электростанций, сокращая расход топлива и выбросы парниковых газов. Это не только повышает энергоэффективность электросети, но и помогает защитить окружающую среду.

Интеллектуальная диспетчеризация может повысить эффективность выработки электроэнергии. Благодаря интеллектуальной системе диспетчеризации распределительной сети распределение возобновляемой энергии и координация традиционных источников энергии становятся более эффективными. Интеллектуальные сети способны точно прогнозировать изменения в выработке возобновляемой энергии на основе анализа данных в реальном времени, прогнозирования нагрузки, прогнозирования погоды и другой информации, а также оперативно корректировать работу других генерирующих установок для максимального повышения эффективности

работы системы. В то же время доступ к системам хранения энергии может также сохранять электроэнергию при наличии избытка возобновляемой энергии и высвобождать ее при недостатке возобновляемой энергии, тем самым сокращая потери энергии.

Повысить гибкость и способность к самовосстановлению диспетчеризации электросетей. Интеллектуальные распределительные сети могут не только повысить эффективность работы электросетей за счет гибких механизмов диспетчеризации, но и улучшить способность электросетей к самовосстановлению. При возникновении сбоев оборудования, колебаний нагрузки или аномальной выработки возобновляемой энергии интеллектуальные распределительные сети могут автоматически выявлять проблемы и осуществлять диспетчеризацию, сокращая вмешательство человека и повышая скорость реагирования сети. Такая гибкость и способность к самовосстановлению не только повышают эффективность сети, но и сокращают время отключения электроэнергии и затраты на техническое обслуживание, вызванные неисправностями.

Скоординированная оптимизация распределенной генерации электроэнергии и доступ к распределенной возобновляемой энергии (например, фотоэлектрические установки на крышах домов, бытовая ветровая энергия и т. д.) приближают производство электроэнергии к центру нагрузки и сокращают потери при передаче на большие расстояния. Благодаря оптимизации согласованной работы оборудования распределенной генерации и накопления энергии электросеть может гибко регулировать распределение мощности каждого узла в соответствии с фактической нагрузкой, тем самым снижая потери при передаче и повышая общую эффективность выработки электроэнергии. Кроме того, диверсификация распределенной генерации делает энергоснабжение электросети более надежным и эффективным.

Для эффективного повышения эффективности работы электросети и решения проблемы волатильности и нестабильности возобновляемой энергии можно принять ряд технических средств и контрмер для повышения уровня

интеллектуальной диспетчеризации электросети, технологии интеллектуальной диспетчеризации, в частности алгоритмы диспетчеризации на основе больших данных и искусственного интеллекта (ИИ). Математическое моделирование режима работы электрической сети с помощью компьютера позволяет выполнять расчеты в реальном времени (ежемесячно) и по фактическим данным электропотребления вместо неких усредненных показателей [43]. Он может отслеживать и прогнозировать нагрузку на сеть и выработку возобновляемой энергии в режиме реального времени, а также динамически корректировать режим работы сети. На основе этих данных система может более точно прогнозировать тенденции выработки электроэнергии возобновляемыми источниками энергии и своевременно принимать корректирующие меры для обеспечения эффективной работы электросети.

Повышение эффективности использования систем накопления энергии. Эффективное использование систем накопления энергии имеет решающее значение для повышения эффективности электросети. Оптимизируя стратегии зарядки и разрядки системы хранения энергии, можно эффективно сбалансировать колебания спроса и предложения, сократить частоту включения резервного питания, сократить потери энергии и минимизировать зависимость от традиционной выработки электроэнергии на основе ископаемого топлива. Интеллектуальное управление системами накопления энергии также может повысить эффективность их использования и сократить потери, вызванные чрезмерной зарядкой и разрядкой. Повышение уровня строительства инфраструктуры электросетей, а также модернизация и обновление инфраструктуры электросетей имеют решающее значение для решения проблем эффективности после доступа к возобновляемым источникам энергии. Например, строительство более современного оборудования подстанций, укрепление автоматизированной системы управления сетью и добавление устройств регулирования напряжения являются важными средствами повышения эффективности работы сети. Кроме того, укрепление взаимосвязанности электросети и улучшение потоков энергии между

различными регионами также может оптимизировать эффективность работы всей электросети.

Интеграция возобновляемых источников энергии оказывает комплексное влияние на эффективность сети. Хотя ее нестабильность и неопределенность создают проблемы, с помощью таких мер, как интеллектуальное планирование, приложения для хранения энергии и модернизация инфраструктуры, можно существенно повысить эффективность работы электросети и достичь целей в области зеленой и низкоуглеродной энергетики. Интеллектуальность, гибкость и скоординированная оптимизация электросетей станут ключом к решению проблемы влияния нестабильности возобновляемых источников энергии на эффективность сетей.

4.3 Влияние возобновляемых источников энергии на надежность электроснабжения

Интеграция возобновляемых источников энергии принесла новые проблемы и возможности для надежности электроснабжения энергосистемы. Надежность традиционных электросетей обычно обеспечивается за счет централизованной генерации электроэнергии, когда электростанции непрерывно вырабатывают стабильную электроэнергию при определенной нагрузке. Однако в связи с широким распространением непостоянного доступа к возобновляемым источникам энергии надежность электроснабжения от электросети становится все более неопределенной. Обеспечение стабильности и надежности электроснабжения, особенно в электросетях с высокой долей возобновляемой энергии, стало важным вопросом в современных эксплуатационных характеристиках электросетей. Надежность электрических сетей является важнейшим влияющим фактором на всех этапах их жизненного цикла [44].

Аналогичным образом возобновляемая энергия оказывает негативное влияние на надежность электроснабжения.

Нестабильность и непостоянство возобновляемой энергии влияют на стабильность электроснабжения, а ее выходная мощность подвержена

значительным колебаниям. На выработку солнечной энергии влияют смена дня и ночи, погодные условия и сезонность, в то время как на выработку ветровой энергии влияют такие факторы, как скорость ветра и изменение климата. Эта нестабильная характеристика генерации электроэнергии приводит к периодическим колебаниям напряжения в электросети и даже к значительным изменениям мощности за короткий промежуток времени. Эти колебания могут привести к нестабильности частоты и напряжения в сети, что может вызвать дефицит электроэнергии и в серьезных случаях снизить надежность электроснабжения.

Сложность прогнозирования нагрузки усугубляет риск перебоев в электроснабжении. Из-за непредсказуемости возобновляемой энергии традиционные методы прогнозирования нагрузки часто не могут точно отражать спрос на электроэнергию и выработку возобновляемой энергии. Эта неопределенность создает большую нагрузку на диспетчеров сетей и требует более сложных систем для внесения корректировок в режиме реального времени. Без точных прогнозов сеть может столкнуться с нехваткой или избытком резервных мощностей, что повлияет на надежность электроснабжения, особенно в периоды пикового спроса или при сокращении поставок возобновляемой энергии.

Влияние проблем с качеством электроэнергии на стабильность работы оборудования. Интеграция возобновляемых источников энергии может привести к колебаниям напряжения, изменениям частоты и возникновению гармоник в электросети. Эти проблемы с качеством электроэнергии могут повлиять на нормальную работу электрооборудования и увеличить риск выхода из строя электрооборудования. Например, колебания в выработке ветровой и фотоэлектрической энергии могут привести к быстрым изменениям напряжения в сети, что, в свою очередь, может повлиять на электрооборудование и повысить риск отключения электроэнергии или повреждения оборудования. Сетевому оборудованию, такому как трансформаторы и выключатели, может потребоваться часто справляться с этими колебаниями, что снижает надежность

сети. Повышение надежности распределительных трансформаторов является главной задачей для качественного электроснабжения различных потребителей [45].

Для снижения негативного влияния возобновляемых источников энергии на надежность электроснабжения и повышения надежности электроснабжения могут быть приняты соответствующие меры. Хотя внедрение возобновляемых источников энергии сопряжено с определенными трудностями, надежность электросети можно существенно повысить, приняв ряд технических мер.

Повышение гибкости и способности к самовосстановлению электросети. Применение технологии интеллектуальных сетей может значительно повысить гибкость и способность к самовосстановлению электросети. Благодаря системам мониторинга и обнаружения неисправностей в режиме реального времени электросеть может быстро выявлять нештатные ситуации в электроснабжении и своевременно вносить коррективы. Например, электросеть может заранее скорректировать спрос на электроэнергию на основе прогнозов погоды в режиме реального времени и прогнозов выработки электроэнергии из возобновляемых источников, что снижает проблемы с надежностью, вызванные дисбалансом спроса и предложения. Кроме того, интеллектуальные сети могут также использовать автоматизированные механизмы переключения для быстрого переключения электроснабжения на другие области в случае возникновения сбоя, что сокращает время отключения электроэнергии и повышает надежность электроснабжения.

Широкое применение систем накопления энергии и доступ к ним могут эффективно смягчить влияние колебаний возобновляемой энергии на надежность электроснабжения. Благодаря накоплению избыточной возобновляемой энергии система накопления энергии может высвобождать накопленную электроэнергию в периоды пиковой нагрузки сети или при недостаточном поступлении возобновляемой энергии, обеспечивая бесперебойную подачу электроэнергии. Устройства хранения энергии, такие как литий-ионные аккумуляторы и натрий-серные аккумуляторы, могут быстро

реагировать на колебания спроса на электроэнергию и повышать способность сети справляться с изменениями в короткие сроки, тем самым повышая ее надежность.

Диверсифицированный доступ к электроэнергии и микросетевые системы позволяют повысить надежность электроснабжения, а распределительная сеть может рассеивать риски за счет доступа к большому количеству видов возобновляемой энергии (например, солнечной энергии, энергии ветра, геотермальной энергии и т. д.). Диверсифицированная структура энергетики может снизить влияние колебаний одного источника энергии на энергосистему, тем самым повышая устойчивость энергосистемы. В то же время микросеть, как новый тип архитектуры распределительной сети, может обеспечить независимое энергоснабжение и управление на локальных территориях. В случае отказа основной электросети микросеть может работать автономно, обеспечивая локальное электроснабжение и повышая надежность электроснабжения.

Оптимизация диспетчеризации сети и управления нагрузкой является важным средством обеспечения надежности электроснабжения. Благодаря интеллектуальной системе диспетчеризации сети можно осуществлять точное диспетчерское управление в соответствии с текущим спросом и условиями генерации возобновляемой энергии, чтобы максимально повысить эффективность сети. Например, при наличии избытка возобновляемой энергии электроэнергию можно экспортировать для хранения или отправлять в другие районы; При недостаточном электроснабжении можно задействовать резервные мощности по выработке электроэнергии или быстро задействовать системы накопления энергии для ее пополнения. В то же время система управления нагрузкой может помочь сбалансировать нагрузки различных пользователей и избежать перебоев в электроснабжении, вызванных резкими изменениями нагрузки.

Управление качеством электроэнергии и его оптимизация. Для решения проблем с качеством электроэнергии, особенно колебаний напряжения и

изменений частоты, можно принять ряд мер по управлению качеством электроэнергии. Оборудование динамической компенсации реактивной мощности (такое как статический компенсатор реактивной мощности SVC, статический генератор реактивной мощности SVG) может регулировать реактивную мощность в электросети в режиме реального времени, стабилизировать колебания напряжения и предотвращать повреждение оборудования и отказы системы, вызванные нестабильностью напряжения. В то же время активные фильтры мощности (APF) могут эффективно контролировать гармоники в электросети, улучшать качество электроэнергии и снижать частоту отказов оборудования.

Надежность системы при контроле затрат, необходимых для производства электроэнергии, показана на рисунке 4.2. Таким образом, выбрав оптимальную точку надежности, можно управлять энергосистемой, чтобы обеспечить более высокую частоту производства и более низкую себестоимость производства. По этому критерию, определяющим выбор варианта, являются технико-экономические показатели. К ним относятся частота, продолжительность и общее количество перерывов электроснабжения, а также вероятность безопасной работы, отнесенных к 1 году [46].

Благодаря применению вышеперечисленных технических средств значительно повысилась надежность электросетей, особенно в электросетях с высокой долей возобновляемой энергии. В долгосрочной перспективе эти меры не только обеспечат стабильное и надежное электроснабжение, но и повысят эффективность работы электросети, сократят количество отключений и сбоев в подаче электроэнергии, а также сократят расходы на техническое обслуживание и устранение неисправностей. Кроме того, с постепенным развитием возобновляемых источников энергии и непрерывным развитием технологий стабильность и надежность энергосистемы будут еще больше повышаться, обеспечивая надежную гарантию устойчивого развития будущих энергетических систем.

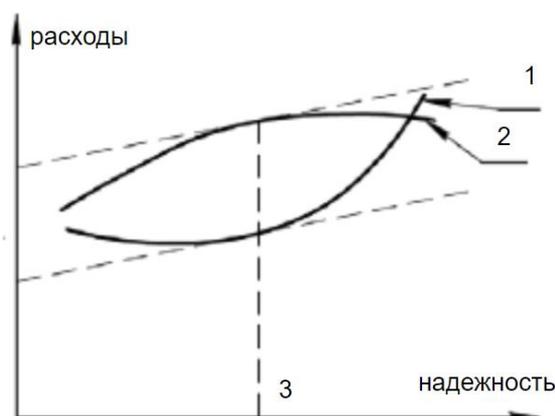


Рисунок 4.2 Диаграмма изменения функции надежности

1- Стоимость повышения надежности, 2- Эффективность производства электроэнергии, 3- Оптимальная надежность

Доступ к возобновляемым источникам энергии создал новые проблемы для надежности электроснабжения, но с помощью таких технических средств, как интеллектуальные сети, системы накопления энергии, диверсифицированный доступ к источникам энергии и управление качеством электроэнергии, надежность электросети может быть значительно повышена. Эффективное применение этих технологий позволит энергосистеме стабильно и надежно обеспечивать электроснабжение потребителей, закладывая основу для развития будущих интеллектуальных сетей.

4.4 Влияние возобновляемых источников энергии на качество электроэнергии

Поскольку доля возобновляемых источников энергии в энергосистеме продолжает расти, доступ к ним предъявляет более высокие требования к качеству электроэнергии. Качество электроэнергии является ключевым фактором, определяющим надежность и эффективность работы современных энергетических систем. В условиях растущего спроса на электроэнергию, интеграции возобновляемых источников энергии и цифровизации энергетической инфраструктуры проблема обеспечения стабильности параметров электрической энергии становится особенно актуальной [47].

Качество электроэнергии определяет, соответствует ли электроэнергия, поставляемая электросетью, эксплуатационным требованиям электрооборудования, включая напряжение, частоту, форму волны и другие аспекты. Нестабильные и нестабильные характеристики возобновляемой энергии создают ряд проблем для энергосистемы в плане поддержания стабильного качества электроэнергии. В этом контексте важным вопросом при проектировании и эксплуатации энергосистем стало обеспечение качества электроэнергии и обеспечение бесперебойной работы энергосистемы в условиях нестабильного электроснабжения.

Выходная мощность возобновляемой энергии часто существенно колеблется из-за факторов окружающей среды (таких как скорость ветра, интенсивность солнечного света и т. д.). Эти колебания напрямую приводят к нестабильности напряжения и частоты сети. В течение короткого периода времени напряжение может колебаться из-за резких изменений мощности. Подобные колебания не только влияют на устойчивость энергосистемы, но и могут оказать неблагоприятное воздействие на работу электрооборудования. Колебания частоты также являются ключевой проблемой, особенно когда в электросети наблюдается дисбаланс между спросом и предложением. Отклонение частоты может привести к нестабильности системы или даже к отключению электроэнергии.

Эксплуатация оборудования для производства возобновляемой энергии (особенно ветряных турбин и фотоэлектрических инверторов) может привести к гармоническому загрязнению. Гармоники — это формы волн тока или напряжения с частотами выше основной частоты, существующие в энергосистеме. Их присутствие может вызвать искажение формы сигнала в энергосистеме и повлиять на нормальную работу электрооборудования. Хотя влияние гармоник невелико, если их не подавлять, длительное накопление гармоник может привести к перегреву оборудования, снижению производительности и даже выходу оборудования из строя. Кроме того,

гармоники увеличивают потери электроэнергии и снижают эффективность электросети.

Из-за нестабильности генерации возобновляемой энергии для поддержания стабильного напряжения и частоты в сети может потребоваться дополнительная компенсация реактивной мощности. Избыточная реактивная мощность может привести к снижению коэффициента мощности. Низкий коэффициент мощности означает, что в энергосистеме потребляется меньше эффективной электроэнергии, что снижает эффективность электроснабжения и увеличивает нагрузку на сетевое оборудование (такое как трансформаторы, линии и т. д.). Снижение коэффициента мощности также может привести к перегреву и повреждению оборудования, что повлияет на долгосрочную стабильность системы.

Хотя возобновляемые источники энергии создают определенные проблемы с качеством электроэнергии, передовые технологии управления качеством электроэнергии способны эффективно подавлять эти негативные воздействия и обеспечивать стабильную работу энергосистемы.

Использование оборудования компенсации реактивной мощности (ОКМ, КРМ) позволяет регулировать реактивную мощность в электросети в режиме реального времени. Быстро реагируя на изменения напряжения в сети и динамически компенсируя реактивную мощность в сети, эти устройства могут эффективно подавлять проблемы нестабильности напряжения, вызванные колебаниями выработки возобновляемой энергии, и обеспечивать стабильное качество электроэнергии. Благодаря точному контролю реактивной мощности можно предотвратить явление чрезмерно высокого или слишком низкого напряжения, тем самым повышая надежность и стабильность работы электросети.

Активные фильтры питания (APF) являются ключевыми устройствами, используемыми для устранения гармоник в электросети и повышения качества электроэнергии. Когда системы возобновляемой энергии (например, фотоэлектрические инверторы и ветряные турбины) подключены к сети, они

могут создавать гармонические помехи. Активные фильтры отслеживают текущую форму волны в сети, корректируют и устраняют эти гармонические компоненты в режиме реального времени и восстанавливают чистую форму волны сети. APF может не только снизить потери электроэнергии, вызванные гармониками, но и повысить эффективность электросети, защитить энергетическое оборудование и избежать отказов и повреждений оборудования из-за гармонического загрязнения.

Использование регуляторов напряжения и трансформаторов в системе регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) позволяет регулировать уровень напряжения в режиме реального времени при колебаниях нагрузки сети. Таким образом, регуляторы напряжения обеспечивают поддержание стабильного уровня напряжения в сети, несмотря на изменения нагрузки и колебания выработки возобновляемой энергии. Эти устройства способны быстро реагировать, особенно когда мощность ветра и солнца сильно колеблется, обеспечивая стабильность напряжения в сети и предотвращая проблемы с качеством электроэнергии.

Использование систем накопления энергии может сбалансировать нестабильность производства возобновляемой энергии. Системы хранения энергии способны сбалансировать изменения в спросе и предложении электроэнергии и снизить колебания в сети, сохраняя излишки электроэнергии в периоды ее переизбытка и высвобождая накопленную энергию при пиковом спросе на электроэнергию или недостаточном производстве возобновляемой энергии. Это не только помогает повысить стабильность сети, но и улучшает качество электроэнергии, гарантируя, что сеть всегда сможет поставлять высококачественную электроэнергию в различных условиях эксплуатации.

Развитие технологии интеллектуальных сетей позволяет осуществлять мониторинг и автоматическую настройку электросетей в режиме реального времени во время эксплуатации. Благодаря использованию современных датчиков и коммуникационных технологий электросеть может автоматически принимать меры по корректировке при получении информации об аномальных

колебаниях. Система автоматизации распределительной сети (DMS) способна динамически оптимизировать сеть на основе данных в реальном времени и выполнять такие функции, как регулирование коэффициента мощности и стабилизация напряжения в сети с помощью автоматизированного оборудования, тем самым повышая качество электроэнергии.

При этом правительством рассматриваются различные методы стимулирования потребителей для проведения таких работ с целью повышения общего качества электрической энергии. Так на уровне энергоснабжающих организаций может выражаться путем снижения тарифов на электроэнергию, а в разрабатываемых на данный момент проектах рассматриваются также и иные варианты стимулирования, например, снижения налоговой нагрузки. При этом при надлежащем проведении работ по улучшению качества электрической энергии в рамках одного объекта его влияние может оказать положительный эффект на всю энергосеть региона. Поэтому необходимо ответственно подходить к вопросу повышения качества электрической энергии в рамках выделенных объектов для достижения наилучших показателей [48].

По мере увеличения доли возобновляемых источников энергии управление качеством электроэнергии в энергосистемах будет сталкиваться с все большими трудностями. Для решения этой проблемы будущие технологии управления качеством электроэнергии станут более интеллектуальными и эффективными. Например, использование больших данных и искусственного интеллекта для мониторинга и прогнозирования качества электроэнергии позволит электросетям более точно прогнозировать проблемы с качеством электроэнергии и решать их в режиме реального времени. Кроме того, популяризация систем распределенной генерации и микросетей также позволит сделать управление качеством электросети более совершенным и диверсифицированным для достижения комплексной оптимизации качества электроэнергии.

Доступ к возобновляемым источникам энергии, особенно к непостоянным источникам энергии, таким как энергия ветра и солнца, привел к проблемам с

качеством электроэнергии, которые нельзя игнорировать. Такие проблемы, как колебания напряжения, отклонения частоты, гармонические искажения и снижение коэффициента мощности, могут повлиять на стабильность энергосистемы и нормальную работу оборудования. Однако благодаря применению таких технологий, как компенсация реактивной мощности, активные фильтры, системы накопления энергии и регулирование напряжения под нагрузкой трансформатора, эти проблемы можно эффективно решить и гарантировать качество электроэнергии в электросети. Благодаря постоянному развитию технологий меры по управлению качеством электроэнергии станут более совершенными, а работа электросетей — более эффективной и стабильной.

Влияние возобновляемых источников энергии на качество электроэнергии нельзя игнорировать, но с помощью различных передовых технических средств электросеть может эффективно решать проблемы качества электроэнергии, вызванные доступом к возобновляемым источникам энергии. С развитием интеллектуальных и автоматизированных технологий управление качеством электроэнергии будет продолжать оптимизироваться для обеспечения стабильной работы энергосистемы и гарантированного качества электроэнергии.

4.5 Ожидаемые эффекты от включения возобновляемых источников энергии в интеллектуальную распределительную электрическую сеть

Поскольку мир уделяет все больше внимания устойчивому развитию и экономике с низким уровнем выбросов углерода, интеллектуальные распределительные сети стали одной из основных технологий, способствующих преобразованию энергетики. Интеллектуальные распределительные сети не только являются ключевым компонентом современных энергосистем, но и обеспечивают поддержку широкомасштабной интеграции возобновляемых источников энергии. Особенно в контексте того, что возобновляемые источники энергии, такие как энергия ветра и солнца,

постепенно становятся важной частью электроснабжения, интеграция этих источников энергии в интеллектуальные распределительные сети может принести множество положительных эффектов. Далее будут проанализированы ожидаемые эффекты, которые могут быть достигнуты после включения возобновляемых источников энергии в интеллектуальную распределительную сеть. Повышение доли чистой энергии и применение систем хранения энергии обеспечивают переход на низкоуглеродную энергетику в распределительных электрических сетях [49].

Возможности автоматизации и мониторинга в режиме реального времени интеллектуальных распределительных сетей позволяют энергосистемам быстро адаптироваться к нестабильности возобновляемой энергии. Благодаря интеллектуальному планированию электросеть может динамически регулировать распределение нагрузки в соответствии со спросом на электроэнергию и выработкой возобновляемой энергии. При наличии достаточного объема возобновляемой энергии энергосистема может отдать приоритет использованию этих чистых видов энергии, тем самым снижая зависимость от традиционной ископаемой энергии. Когда выработка возобновляемой энергии недостаточна, электросеть может оперативно задействовать оборудование для хранения энергии или ввести электроэнергию из других областей электросети, чтобы обеспечить непрерывность и стабильность электроснабжения.

Значительным преимуществом интеллектуальных распределительных сетей является их способность к самовосстановлению. Интеллектуальное оборудование способно в режиме реального времени отслеживать состояние электросети, выявлять неисправности и автоматически принимать меры по ее восстановлению. При использовании возобновляемых источников энергии в электросети может возникнуть риск отклонения напряжения или мгновенного отключения электроэнергии из-за особенностей колебаний ее мощности. Однако благодаря передовым интеллектуальным системам управления распределительная сеть может быстро выявлять эти проблемы и автоматически

устранять их, значительно сокращая частоту и масштабы отключений электроэнергии и повышая надежность электросети.

Благодаря эффективной системе мониторинга качества электроэнергии интеллектуальная распределительная сеть может эффективно устранять проблемы с качеством электроэнергии, такие как напряжение и частота, вызванные колебаниями выработки возобновляемой энергии. Устройства компенсации реактивной мощности и устройства динамического регулирования напряжения в распределительной сети способны обеспечить поддержание в энергосистеме стабильного уровня напряжения и частоты электроэнергии при масштабном подключении возобновляемых источников энергии, тем самым обеспечивая нормальную работу электрооборудования.

Возобновляемая энергия имеет очевидную нестабильность и непостоянство, особенно в процессе генерации ветровой и солнечной энергии, что может привести к переизбытку или дефициту электроэнергии. Умные распределительные сети могут эффективно компенсировать эти колебания и сократить сокращение ветровой и солнечной энергии за счет оптимизации планирования систем накопления энергии. При избыточной выработке электроэнергии за счет возобновляемых источников энергии интеллектуальная сеть может хранить излишки электроэнергии; При недостаточном производстве электроэнергии из возобновляемых источников сеть может быстро высвободить накопленную электроэнергию, чтобы обеспечить стабильность электроснабжения. Благодаря этому механизму интеллектуальная распределительная сеть не только повышает эффективность использования возобновляемой энергии, но и улучшает экономичность всей энергосистемы.

Интеллектуальная распределительная сеть обеспечивает надежную поддержку доступа и управления распределенными системами генерации электроэнергии. Благодаря точному прогнозированию нагрузки, мониторингу данных о выработке электроэнергии в режиме реального времени и эффективному планированию потоков энергии интеллектуальные сети могут интегрировать объекты возобновляемой энергетики из разных регионов и типов

(например, фотоэлектрические установки на крышах, ветряные электростанции и т. д.) для повышения их общей синергии. Это не только повышает коэффициент использования распределенной энергии, но и делает работу электросети более гибкой и эффективной. Наконец, при проектировании интеллектуальных систем важно уделять внимание политике хранения и резервирования данных, чтобы в случае сбоя или повреждения оборудования оставалась возможность быстрого восстановления и продолжения работы без серьезных потерь. В дополнение к снижению загрязнения, производство электроэнергии с использованием экологически чистой энергии предлагает налоговые вычеты и кредиты, доступные для тех, кто использует экологически чистую энергию [50].

Интеграция возобновляемых источников энергии, особенно при поддержке интеллектуальных распределительных сетей, помогает снизить зависимость сети от традиционной ископаемой энергии. Благодаря интеллектуальным системам управления электросеть может более эффективно использовать зеленую энергию, такую как энергия ветра и солнца, а также сократить потребление ископаемого топлива, такого как уголь и природный газ. Это преобразование не только поможет сократить выбросы парниковых газов, но и будет способствовать оптимизации энергетической структуры и достижению цели углеродной нейтральности. [51]

Неконтролируемость и нестабильность возобновляемой энергии требуют от энергосистемы большей гибкости и скорости реагирования при широкомасштабном доступе. Благодаря мониторингу данных в режиме реального времени и динамическому планированию интеллектуальная распределительная сеть может своевременно корректировать рабочее состояние системы и компенсировать колебания нагрузки и изменения в выработке электроэнергии из возобновляемых источников энергии. Такая гибкая способность реагирования позволяет электросети лучше адаптироваться к нестабильности возобновляемой энергии, увеличивать долю доступа к возобновляемой энергии и обеспечивать стабильность электросети.

Интеллектуальные распределительные сети могут не только способствовать широкомасштабному доступу к возобновляемым источникам энергии, но и усилить взаимодействие и управление со стороны пользователей. Благодаря таким технологиям, как интеллектуальные счетчики и системы управления домашним энергообеспечением (HEMS), пользователи могут отслеживать потребление электроэнергии в своих домах или на предприятиях в режиме реального времени и корректировать стратегии использования электроэнергии в соответствии с потребностями электросети. Например, пользователи могут увеличить потребление электроэнергии в периоды, когда цены на электроэнергию ниже или возобновляемые источники энергии имеются в изобилии, снизить нагрузку в часы пик и максимально использовать возобновляемые источники энергии.

Технология VPP использует интеллектуальные распределительные сети для соединения распределенного энергетического оборудования и оборудования для его хранения, а также обеспечивает скоординированное планирование распределенных энергетических ресурсов с помощью централизованных систем анализа данных и управления. Виртуальные электростанции могут реагировать на пиковые нагрузки в сети, используя системы хранения энергии или объекты распределенной генерации на стороне потребителя для предоставления вспомогательных услуг. Регулирование спроса (DR) позволяет регулировать потребление электроэнергии пользователями в соответствии с нагрузкой электросети и дополнительно оптимизировать распределение энергоресурсов.

Благодаря постоянному развитию технологий интеллектуальных сетей доступ к возобновляемым источникам энергии и управление ими в будущем станут более эффективными и гибкими. Более совершенные технологии мониторинга данных в режиме реального времени, автоматизированной диспетчеризации и хранения энергии обеспечат более надежную поддержку интеллектуальных распределительных сетей. В то же время постепенное открытие рынка электроэнергии также предоставило потребителям больше

возможностей участвовать в производстве и потреблении энергии, что еще больше способствует глубокой интеграции распределенной энергетики и интеллектуальных распределительных сетей.

Одной из целей активного продвижения возобновляемой энергии в мире является содействие глобальной защите окружающей среды. Традиционная одноразовая энергия представлена ископаемыми ресурсами, такими как уголь, нефть и природный газ. Теперь отрасль пытается замедлить чрезмерное потребление таких ресурсов. Ветроэнергетика и фотоэлектрическая генерация энергии являются возобновляемыми источниками энергии. Энергосберегающие преимущества этих методов генерации энергии относятся к общему количеству потребляемых ими ископаемых ресурсов для замены эквивалентной генерации энергии одноразовой энергией. Годовая экономия энергии, то есть энергия, вырабатываемая возобновляемой энергией, может быть преобразована в энергию, вырабатываемую при сжигании угля. Формула расчета:

$$P_j = P_s \cdot Q_q \quad (4.6)$$

Среди них: P_j — годовая экономия энергии возобновляемой энергии, P_s — подключенная к сети электроэнергия года, а Q_q — потребление электроэнергии, сжигаемой на угле, года. Его значение составляет 307,6 грамма на киловатт-час.

В 2018 году подключенная к сети ветровая генерация P_{sf} китайских предприятий составила 2707,8 млн киловатт-часов, а подключенная к сети фотоэлектрическая генерация P_{sg} — 460,56 млн киловатт-часов. Подставим значения в формулу (4.6):

$$P_{jf} = P_{sf} \cdot Q_q = (270780 \times 10^4) \times (307.6 \times 10^{-3}) = 832919280 \text{ (кг)} \quad (4.7)$$

$$P_{jq} = P_{sg} \cdot Q_q = (46056 \times 10^4) \times (307.6 \times 10^{-3}) = 141668256 \text{ (кг)} \quad (4.8)$$

В 2018 году годовая экономия энергии ветрогенерации P_{jf} составила 833 000 тонн, а годовая экономия энергии фотоэлектрической генерации P_{jq} составила 142 000 тонн. За один год компания сэкономила 970 000 тонн угля, используя возобновляемую энергию.

Сокращение выбросов возобновляемой энергии относится к массе всех загрязняющих веществ и парниковых газов, выбрасываемых во внешний мир

(атмосфера, водная среда, почвенная среда и т. д.) при замене ее выработки электроэнергии на угольную электрогенерацию. В целом, при замене выбросов дымовых газов угольной электрогенерации учитывается только сокращение выбросов диоксида серы (SO₂), оксидов азота (NO_x) и парниковых газов диоксида углерода (CO₂). Основными парниковыми газами, вырабатываемыми угольной электрогенерацией, являются SO₂, NO_x и CO₂. Интенсивность ее выбросов (R_q) показана в Таблице 4.2.

Таблица 4.2 Удельный вес выбросов загрязняющих веществ угольных электростанций в 2018 г. (г/(кВт·ч))

Загрязнители	SO ₂	NO _x	CO ₂
R _q	0.2	0.19	841

Формула расчета сокращения выбросов возобновляемой энергии:

$$P_q = P_s \cdot R_q \quad (4.9)$$

После расчета можно сделать вывод, что сокращение выбросов предприятий соответствует приведенному в Таблице 4.3.

Таблица 4.3 Сокращение выбросов загрязняющих газов от ветра и света (тонн)

Загрязнители	SO ₂ (кг)	NO _x (кг)	CO ₂ (кг)
ВТ	5416000	5145000	2277260000
ФГ	921000	875000	387331000

В 2018 году предприятия активно развивали возобновляемую энергетику и сократили выбросы парниковых газов на 2,6 млн тонн. Значительно снизилось загрязнение окружающей среды.

Интеграция возобновляемых источников энергии в интеллектуальные распределительные сети может не только повысить эффективность работы, гибкость и надежность электросети, но и увеличить коэффициент

использования возобновляемых источников энергии, способствовать преобразованию энергии, снизить зависимость от ископаемой энергии и достичь целевых показателей по выбросам углерода. Благодаря интеллектуальным распределительным сетям энергосистемы могут более эффективно интегрировать распределенную энергию, улучшать возможности самовосстановления электросети, обеспечивать качество электроэнергии и предоставлять пользователям более интеллектуальные методы управления электропитанием. Благодаря постоянному развитию технологий интеллектуальные распределительные сети станут важной платформой для доступа к возобновляемым источникам энергии и оптимизации энергосистем в будущем, способствуя экологичному, интеллектуальному и устойчивому развитию энергетической отрасли.

4.6 Выводы

Разработана математическая модель на основе динамической функции связи $s(t, \alpha, \beta)$ для преобразования связи между возобновляемой энергией и нагрузкой сети в управляемую функциональную форму для эффективного планирования и управления нагрузкой. Реализуется интеллектуальное прогнозирование совместно с мультиагентной координацией хранения энергии, реагирования на спрос, микросети, виртуальной электростанции для достижения согласования нагрузки, планирования в реальном времени и регулирования нагрузки в условиях колебаний возобновляемой энергии.

Анализируются проблемы снижения эффективности после подключения возобновляемой энергии к сети: колебания выработки электроэнергии, частые запуски и остановки традиционных блоков, потери напряжения и энергии и т. д. Предлагаются три технических пути: интеллектуальное планирование + оптимизация хранения энергии и модернизация инфраструктуры для смягчения колебаний, повышения эффективности планирования и сокращения потерь энергии.

С помощью систем накопления энергии, многоэнергетической структуры, интеллектуального самовосстановления, динамического планирования и

средств оптимизации мощности (компенсация, фильтрация, механизм переключения) решаются угрозы нестабильности мощности, ошибки прогнозирования нагрузки и помехи качества электроэнергии для обеспечения надежности поставок.

Определите проблемы качества, такие как колебания напряжения, отклонения частоты, гармонические загрязнения и снижение коэффициента мощности. Следует внедрять системы управления качеством электроэнергии в реальном времени, такие как SVG/SVC, APF, регулирование напряжения под нагрузкой, накопление энергии и DMS. Это составляет основной механизм обеспечения качества интеллектуальных распределительных сетей, поддерживает высокую долю доступа к возобновляемой энергии и обеспечивает соответствие ключевым показателям.

В результате интеграции интеллектуальных распределительных сетей и возобновляемой энергии можно снизить зависимость от ископаемой энергии и выбросы. Регулировка структуры потребления энергии в реальном времени, сокращение отказа от ветровой и солнечной энергии и повышение эффективности координации накопления энергии. Механизм управления самовосстановлением совместно с накоплением энергии от нескольких источников синергетически улучшается способность электросети справляться с авариями.

Заключение

В условиях глобальной энергетической трансформации и ускорения реализации стратегии углеродной нейтральности традиционные распределительные сети постепенно переходят к интеллектуальному развитию, одновременно увеличивая возможности интеграции возобновляемых источников энергии. В настоящей работе, посвящённой теме «Интеллектуальные распределительные сети и интеграция возобновляемой энергетики», системно проанализированы структурные особенности, технические системы и эксплуатационные характеристики интеллектуальных распределительных сетей, подробно рассмотрены виды и характеристики возобновляемых источников энергии и систем накопления, а также изучены технологические пути их интеграции и эксплуатационные особенности. Оценено влияние подключения возобновляемых источников энергии на эффективность работы, надёжность и качество электроэнергии в распределительных сетях. На основе теоретического анализа и практических примеров получены следующие основные выводы:

1. Структура и эксплуатационные характеристики интеллектуальных распределительных сетей обладают высокой гибкостью и адаптивностью. По сравнению с традиционными сетями, интеллектуальные распределительные сети значительно превосходят их по уровню восприятия, коммуникации, автоматизации управления и вовлечению пользователей, что обеспечивает единое подключение и координацию работы разнородных источников энергии и является важной основой для построения современной энергетической системы.

2. Системы возобновляемой энергии характеризуются распределённостью, изменчивостью и зависимостью от местных условий. Солнечная и ветровая энергетика как основные виды достигли значительного развития, однако их интеграция предъявляет повышенные требования к управлению и стабильности сетей. В связи с этим критически важна совместная реализация технологий накопления энергии, прогнозирования и управления.

3. При интеграции возобновляемых источников энергии в интеллектуальные распределительные сети особое внимание следует уделять выбору точек подключения и стратегиям подключения. Правильный выбор точек подключения влияет не только на локальные уровни напряжения и распределение потоков мощности, но и на устойчивость и управляемость всей системы. Использование комбинированных схем с централизованным и распределённым подключением способствует повышению надёжности и эффективности работы системы.

4. Цифровые технологии являются ключевой поддержкой для эффективной интеграции возобновляемой энергетики. Использование передовых технологий измерения, связи, периферийных вычислений и искусственного интеллекта позволяет точно прогнозировать и активно реагировать на колебания возобновляемой генерации. Виртуальные электростанции, микросети и механизмы реагирования спроса создают новую парадигму мультиагентного и многомасштабного управления.

5. Интеграция возобновляемой энергетики оказывает значительное влияние на работу распределительных сетей. С одной стороны, она способствует переходу сетей от централизованной к распределённой структуре, повышает экологическую устойчивость системы. С другой стороны, вызывает сложности в регулировании нагрузки, ухудшение качества электроэнергии и снижение надёжности электроснабжения. Внедрение систем накопления, гибких стратегий управления и средств повышения качества электроэнергии эффективно решает указанные проблемы и повышает комплексные показатели системы.

Таким образом, развитие интеллектуальных распределительных сетей в сочетании с глубокой интеграцией возобновляемых источников энергии является неизбежным направлением развития энергетической системы будущего и важным условием обеспечения её безопасности, экологичности и эффективности. Перспективные направления дальнейших исследований включают: повышение оперативности и интеллектуальности систем

многовидовой комплементарной регуляции; разработку более точных моделей прогнозирования и алгоритмов управления нагрузкой; углубленную координацию интеллектуальных распределительных сетей и региональных энергетических интернетов; а также совершенствование нормативно-правового и рыночного обеспечения для комплексного стимулирования технологического и институционального развития.

Библиографический список

1. Energy Information Administration. "International Energy Outlook 2017"; 14 September 2017. CSIs Headquarters, U.S.; 2017. Доступно по: [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf).
2. Манусов В.З., Хасанзода Н.. "Построение холонической инфраструктуры интеллектуальных сетей в концепции Smart Grid с учетом двустороннего потока энергии" Проблемы региональной энергетики, no. 3 (35), 2017, pp. 84-93.
3. Малицына А.И.. "Интеллектуальные электрические сети - важный элемент повышения надежности электроснабжения существующих потребителей и комплексного развития распределительных электрических сетей 10 кВ" Форум молодых ученых, no. 11-2 (27), 2018, pp. 16-21.
4. Дакум Т. К., Тягунов М. Г. Экономическая и экологическая эффективность применения комбинированной системы регулирования режимов работы гидроэлектростанций // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2025. №1-3 (100). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomicheskaya-i-ekologicheskaya-effektivnost-primeneniya-kombinirovannoy-sistemy-regulirovaniya-rezhimov-raboty>.
5. Дурдыев Р., Егенсейидов Я., Халадова А. "Электроэнергетика: Важность, современные технологии и перспективы развития" Наука и мировоззрение, vol. 1, no. 30, 2024, pp. 250-253.
6. Аласханов Р. А. Модернизация электрических подстанций с применением современного оборудования и технических решений // Вестник науки. 2025. № 4 (85).
7. Кунцевич М. В. Диагностика трансформаторов // Наука и техника Казахстана. 2010. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/diagnostika-transformatorov>.
8. Шкурко Н. В., Таран А. В. Устройства компенсации реактивной мощности // НАУ. 2015. №10-1 (16). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ustroystva-kompensatsii-reaktivnoy-moschnosti>.
9. Яронова Н.В., Аметова А. А. Построение smart-электросети с применением технологии 5G // Universum: технические науки. 2021. №10-2 (91). URL: <https://>

[//cyberleninka.ru/article/n/postroenie-smart-elektroseti-s-primeneniem-tehnologii-5g](https://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-smart-elektroseti-s-primeneniem-tehnologii-5g).

10. Ковалев В. Е., Ярошевич Н. Ю., Комарова О. В. Цифровое будущее машиностроения: оценка потенциала формирования платформенных рынков // Управление. 2025. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoe-budushee-mashinostroeniya-otsenka-potentsiala-formirovaniya-platformennyh-rynkov>.
11. Standardization of NB-IoT completed. Доступно по: http://www.3gpp.org/news-events/3gppnews/1785-nb_iot_complete.
12. Вербрюгген, А., Фишедик, М., Мумо, В., Вейр, Т., Надай, А., Нильссон, Л. Дж., ... Сатайе, Дж. (2010). Стоимость, потенциал и барьеры возобновляемой энергии: концептуальные вопросы. политика, 38(2), 850-861. Энергетическая <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.036>.
13. Дакалов М.В. Программы ЕС по развитию возобновляемых источников энергии: структура и источники их финансирования // Экономика и управление с системами управления. — 2012.- № 4.3(6). -С. 360-368.—0,5 балла. л.
14. Любимова Н. Г. Определение понятия «Распределенная энергетика» // Вестник ГУУ. 2014. №5.
15. Mukhammadiyev M., Urishev B., Kan E., Juraev K. New methods of application of micro hydroelectric power plants at existing hydraulic structures: Schemes, parameters, efficiency // E3S Web of Conferences. -2021.-Vol. 320, N 04009.-DOI:10.1051/e3sconf/202132004009.
16. Сафронова А. Ю. Использование геотермальной энергии // Вестник науки и образования. 2020. №11-3 (89). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-geotermalnoy-energii>.
17. Renewable Cost Database. Renewable Power Generation Costs in 2020: Executive Summary. IRENA, 2021. – 12 p.
18. P. P. Barker and B. "Power system modeling requirements for rotating machine interfaced distributed resources" Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, Chicago, USA, Vol. 1, 21-25 July 2002, pp. 161 -166.

- 19.Тулкинов М. А. Э. Использование гибридных станций низкой мощности альтернативных источников энергии // Экономика и социум. 2021. №12-2 (91). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-gibridnyh-stantsiy-nizkoy-moschnosti-alternativnyh-istochnikov-energii>.
- 20.Юй Хан. Применение возобновляемых источников энергии в интеллектуальных сетях / Н.В.Савина, Юй Хан // Вестник Амурского государственного университета, 107(27), 10 Сентябрь2024 года.-благовещенск:амурский государственный университет,2024.-с.41-48.
- 21.Чжан Шаодун. Автомобиль для очистки солнечных фотоэлектрических панелей[P]. Провинция Шаньдун: CN105797993B, 2018-12-21.
- 22.Банк данных угроз безопасности информации ФСТЭК. [Электронный ресурс] , URL: <https://bdu.fstec.ru/threat>.
- 23.Что такое возобновляемая энергия? Организация Объединенных Наций // <https://w.un.org/ru/climatechange/what-is-renewable-energy>.
- 24.Тяглин Д. В. Неиссекаемая «Энергия ветра» // Региональное развитие. 2017. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/neissekaemaya-energiya-vetra>.
- 25.Мулкиев Ч., Батыров С., Акыммаев Я., Чарыяров Б. Использование энергии ветра // Инновационная наука. 2024. №12-1-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-energii-vetra>.
- 26.Mukhammadiev M., Urishev B., Abduaziz uulu A., Almardanov O., Karimova N., Murodov H. The role of renewable energy sources in providing the efficiency of the power system in the conditions of digital energy transformation // AIP Conference Proceedings. - 2023. - Vol.2552, N 050019. DOI: 10.1063/5.0111764.
- 27.Петров М. А., Шимарова А. М., Пионтковская С. А. Обзор существующих технологий хранения электроэнергии на примере аккумуляторных батарей и суперконденсаторов // Вестник науки. 2024. №9 (78). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-suschestvuyuschih-tehnologiy-hraneniya-elektroenergii-na-primere-akkumulyatornyh-batarey-i-superkondensatorov>.
- 28.Климов П. Л., Разумец Е. А. Распределенная генерация на базе нетрадиционных возобновляемых источников энергии // Форум молодых ученых. 2017.

- №12 (16). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raspredeleonnaya-generatsiya-na-baze-netraditsionnyh-vozobnovlyaemyh-istochnikov-energii>.
29. Сапарова О., Эсенова А., Аннаев А., Ахмедов Й. Хранение энергии и умные сети // Символ науки. 2024. №11-1-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/hranenie-energii-i-umnye-seti>.
30. Шарипбаев Н.Ю., М.Тургунов, Моделирование энергетического спектра плотности состояний в сильно легированных полупроводниках, Теория и практика современной науки №12(42), 2018 с.513-516.
31. Hua, M., Ji, T., Gao, X. (2015). Application of fault-tolerant control technology in islanding effect detection using frequency shift method. Journal of Power Delivery Engineering and Technology, 4(4). <https://doi.org/10.12677/TDET.2015.44012>.
32. K. Johnson . Robust distribution networks reconfiguration considering the improvement of network resilience considering renewable energy resources. Scientific Reports, 14, 23041. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73928-1>.
33. Арапов М. А., Попель О. С., Тарасенко А. Б. Возобновляемая энергетика: вклад в декарбонизацию российской энергетики // Теплоэнергетика. — 2024. — Т. 71, № 11. — С. 827–834. — DOI: 10.1134/S0040601524700423.
34. Большев В. Е., Виноградов А. В. Перспективные коммуникационные технологии для автоматизации сетей электроснабжения // Вестник КГЭУ. 2019. №2 (42). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnye-kommunikatsionnye-technologie-dlya-avtomatizatsii-setey-elektrosnabzheniya>.
35. Ахмедова О. О., Копейкина Т. В., Сошинов А. Г., Атрашенко О. С. Интеграция экономики совместного использования электроэнергии с интеллектуальными сетями // МНИЖ. 2024. №1 (139). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/integratsiya-ekonomiki-sovmestnogo-ispolzovaniya-elektroenergii-s-intellektualnymi-setyami>.
36. Ершов Р. В., Чэн Хаодун, Владимирович М. А., Кожубаев Ю. Н., Милицын А. А. Оптимизация режимов энергосистем и электростанций // Известия ТулГУ. Технические науки. 2025. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-rezhimov-energосistem-i-elektrostantsiy>.

37. В России строится платформа управления энергетикой на блокчейне / CNews. —2021. URL: https://www.cnews.ru/news/top/2021-12-21_v_rossii_stroitsya_platforma.
38. Голубкин А. В., Панкратов М. В., Юдин В. В. Моделирование переменной нагрузки электрической сети // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2013. №9. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-peremennoy-nagruzki-elektricheskoy-seti>.
39. Семенова С. Э., Юдин В. В. Вычисления в MATLAB : учеб. пособие. Рыбинск: РГАТА, 2009. 144 с.
40. Привалов А. Н., Клепиков А. К. Разработка балансировщика нагрузки в гибридных сетях // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. №9-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-balansirovschika-nagruzki-v-gibridnyh-setyah>.
41. Цищорин А.Н. О потерях холостого хода силовых трансформаторов 6-10 кВ. Электрические станции, 2011, №3, стр.48-51.
42. Стенин В. А. Термодинамический анализ эффективности сети электроснабжения // МНИЖ. 2015. №2-1 (33). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/termodinamicheskiy-analiz-effektivnosti-seti-elektrosnabzheniya>.
43. Грицай М. А. Мероприятия по повышению эффективности работы электрической сети // Проблемы региональной энергетики. 2011. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/meropriyatiya-po-povysheniyu-effektivnosti-raboty-elektricheskoy-seti>.
44. Майоров А. В., Шунтов А. В. О характеристиках надежности элементов электрической сети 20 кВ // Энергобезопасность и энергосбережение. 2016. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-harakteristikah-nadezhnosti-elementov-elektricheskoy-seti-20-kv>.
45. Семенов Д. А. Повышение надежности трансформаторов в распределительных сетях // Вестник НГИЭИ. 2011. №5 (6). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-nadezhnosti-transformatorov-v-raspredelitelnyh-setyah>.

46. Черкасова Н. И. Экономическая оценка надежности сельских электрических сетей // Вестник АГАУ. 2013. №8 (106). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomicheskaya-otsenka-nadezhnosti-selskih-elektricheskikh-setey>.
47. Черепанова В. Д., Баранов Н. О., Чебаков С. А. Качество электроэнергии в энергетических системах // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2025. №1-3 (100). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kachestvo-elektroenergii-v-energeticheskikh-sistemah>.
48. Хижняк Ю. В. Методика повышения качества электроэнергии // Теория и практика современной науки. 2021. №8 (74). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-povysheniya-kachestva-elektroenergii>.
49. Юй Хан. Разработка гибридных энергетических комплексов с возобновляемыми источниками энергии / Н. В. Савина, Юй Хан // «День науки»: материалы XXXIV научной конференции Амурского государственного университета (13 марта 2025 г., Благовещенск). - Благовещенск: АмГУ, 2025. – 108 с.
50. Никонов А. А. Информационная безопасность при внедрении умных сетей на базе микроконтроллеров и ПЛК // Вестник науки. 2025. №1 (82). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnaya-bezopasnost-pri-vnedrenii-umnyh-setey-na-baze-mikrokontrollerov-i-plk>.
51. Энергоэффективные дома: способы выработки электроэнергии. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://solgenpower.com/2022/10/26/ways-of-generating-electricity-in-2022>.
52. IEA (2024), Annual energy and electricity demand growth, historical and in the Stated Policies Scenario, 2010-2035, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/annual-energy-and-electricity-demand-growth-historical-and-in-the-stated-policies-scenario-2010-2035>.
53. IEA (2024), World electricity generation in the Stated Policies Scenario, 2010-2035, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-electricity-generation-in-the-stated-policies-scenario-2010-2035>.
54. Савина, Н.В. Современные электроэнергетические системы [Электронный ресурс] : метод. указания к практ. занятиям для магист. направления подготовки

- ки «Электроэнергетика и электротехника» / Н. В. Савина ; АмГУ, Эн. ф. – 2-е изд., испр. и доп. Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2017. 48 с.– Режим доступа http://irbis.amursu.ru/DigitalLibrary/AmurSU_Edition/9635.pdf
55. Савина, Н.В. Современные электроэнергетические системы [Электронный ресурс] : метод. указания для самостоятельной работы студентов магист. направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника» / Н. В. Савина ; АмГУ, Эн. ф. – 2-е изд., испр. и доп. Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2017. 30 с. – Режим доступа http://irbis.amursu.ru/DigitalLibrary/AmurSU_Edition/9636.pdf
56. Савина, Н.В. Надежность систем электроэнергетики [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Н.В. Савина – Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2011. – 268 с., 1898 Кб. - Режим доступа http://irbis.amursu.ru/DigitalLibrary/AmurSU_Edition/3060.pdf
57. Электротехническое оборудование последнего поколения [Электронный ресурс] : учеб. пособие для магист. программы "Электроэнергет. системы и сети" / сост. А. Н. Козлов, В. А. Козлов, А. Г. Ротачева; АмГУ, Эн. ф. - 2-е изд., испр. - Благовещенск: Изд-во Амур. гос. ун-та, 2017. - 165 с.