

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: Инновационные подходы к проектированию электрических сетей с использованием возобновляемых источников энергии в Китайской Народной Республике.

Исполнитель
студент группы 342-ом _____ Ван Жу
подпись, дата

Руководитель
профессор, канд. техн. наук _____ Ю.В.Мясоедов
подпись, дата

Руководитель
научного содержания
программы магистратуры,
профессор, докт. техн. наук _____ Н.В.Савина
подпись, дата

Нормоконтроль
старший преподаватель _____ Л.А.Мясоедова
подпись, дата

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 Ван Жу

1. Тема выпускной квалификационной работы (магистерской диссертации):

Инновационные подходы к проектированию электрических сетей с использованием возобновляемых источников энергии в Китайской Народной Республике.

(утверждено приказом от 06.03.2025 № 609 уч. _____)

2. Срок сдачи студентом законченной работы (проекта) 18.06.2025

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: _____

Материалы производственной и преддипломной практика

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

Расчет структуры микросети, оптимизация возобновляемой энергии, такой как гибридный режим ветра и солнца

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

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

7. Дата выдачи задания 22.02.2025

Руководитель выпускной квалификационной работы: Юрий Викторович Мясоедов,
декан, кант, техн. наук.

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

Задание принял к исполнению (дата): 22.02.2025

(подпись студента)

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 116 с., рисунков 23, Формул 28, источников 51.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СЕТЬ, ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ,
МИКРОСЕТЕВЫЕ СИСТЕМЫ, ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
ОПТИМИЗАЦИЯ ИННОВАЦИЯ.

В данном исследовании, основанном на истории трансформации электросетей Китая, систематически изучаются ключевые проблемы и решения для широкомасштабного подключения к сетям возобновляемых источников энергии. В главе 1 посредством эмпирического анализа раскрываются структурные характеристики современной энергосистемы. Исследования показывают, что установленная мощность ветро- и солнечной энергетики достигла 35,6%. Эта тенденция развития создала серьезные проблемы для поглощающей способности сети и способствовала глубоким изменениям в ее структуре. В главе 2 строится инновационная комплексная техническая система, включающая микросетевые системы, многоэнергетическую взаимодополняющую синергию и технологии цифровых двойников. Эмпирические исследования типичных случаев, таких как микросеть острова Чжэцзян, подтверждают осуществимость этой технической системы. В главе 3 используются методы количественного анализа для глубокого выявления технических проблем, таких как 40%-ное снижение инерции системы и ухудшение стабильности напряжения, вызванные подключением новой энергии к сети, а также анализируются институциональные барьеры для текущего рыночного механизма. В главе 4 описывается многокритериальная модель оптимизации, учитывающая как

экономичность, так и надежность. В сочетании с эмпирическими примерами, такими как новая энергетическая база Цзюцюань в Ганьсу, предлагается метод оптимизации, охватывающий весь процесс планирования и эксплуатации. В главе 5 количественно оцениваются всесторонние преимущества внедрения технологий путем создания комплексной системы индексов оценки и построения полной структуры стандарта системы сетевых технологий. Результаты исследования также подтверждают, что подключение к новым энергетическим сетям имеет существенные положительные экологические эффекты, способствуя трансформации энергетической структуры и реагированию на изменение климата. В конечном итоге в этом исследовании был разработан систематический путь внедрения, который объединяет технические стандарты, рыночные механизмы и политическую поддержку, а также перспективно указано, что интеграция систем хранения водородной энергии и глубокое применение искусственного интеллекта станут ключевыми направлениями исследований в будущем. Результаты исследования предлагают системное решение для создания новой энергосистемы, включая технологические инновации, оптимизацию управления и разработку политики.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	7
1. Текущее состояние и структурный анализ электросети.....	10
1.1 Текущее состояние развития электросетей.....	11
1.2 Базовая структура электросети.	12
1.2.1 Расслоение уровня напряжения.....	14
1.2.2 Региональное объединение электросетей.....	17
1.2.3. Эволюция топологической структуры.....	19
1.3 Текущее состояние развития возобновляемой энергетики.....	21
1.3.1 Характеристики распределения установленной мощности ветровой и солнечной энергетики в каждой провинции.....	21
1.3.2 Анализ скорости проникновения распределенной энергии.....	23
1.3.3 Количественная оценка узких мест потребления.....	25
1.4 Краткое изложение данной главы.....	29
2. Инновационные технологические возможности для повышения надежности сети.....	30
2.1 Технология микросетевых систем.....	31
2.1.1 Архитектура проектирования: централизованная и распределенная.....	32
2.1.2 Стратегия управления: технология виртуальной синхронизации VSG.....	33
2.1.3 Типичный случай: микросеть острова Чжэцзян.....	36
2.2 Гибридная энергетическая система.....	38
2.2.1 Мультиэнергетическая взаимодополняющая модель ветра, солнца, воды, огня и хранения.....	39
2.2.2 Алгоритм управления совместными операциями.....	41
2.2.3 Практика 100%-ного обеспечения чистой энергией в провинции Цинхай.....	42

2.3 Ключевые цифровые технологии.....	43
2.3.1 Применение блокчейна в торговле зеленой электроэнергией.....	43
2.3.2 Трехмерное моделирование цифровой двойник электросети.....	45
2.3.3 Платформа мониторинга Интернета вещей электросети Цзянсу.....	46
2.4 Краткое изложение данной главы.....	48
3. Основные вопросы при подключении к сетям возобновляемой энергии.....	49
3.1 Технические проблемы.....	50
3.1.1. Количественный анализ снижения инерции системы.....	52
3.1.2. Проблема контроля стабильности напряжения.....	54
3.1.3. Решение проблемы недостаточной емкости короткого замыкания.....	55
3.2 Вопросы эксплуатации и управления.....	58
3.2.1. Методы повышения точности прогнозирования мощности.....	59
3.2.2. Сравнительный анализ новых режимов планирования.....	62
3.2.3. План адаптивной трансформации системы защиты.....	64
3.3 Барьеры рыночного механизма.....	65
3.3.1. Недостатки действующего механизма ценообразования на электроэнергию.....	66
3.3.2. Путь к построению рынка дополнительных услуг.....	68
3.3.3. Стратегии по устранению барьеров для межпровинциальных транзакций.....	69
3.4 Краткое изложение данной главы.....	70
4. Методы оптимизации использования возобновляемых источников энергии.....	72
4.1 Оптимизация планирования.....	73
4.1.1. Построение многокритериальной модели оптимизации.....	75
4.1.2. Создание библиотеки анализа типовых сценариев.....	76

4.1.3. Применение надежной оптимизации в электросети Северо-Западного Китая.....	78
4.2 Оптимизация работы.....	79
4.2.1. Распределенная архитектура совместного управления.....	80
4.2.2. Система планирования на основе глубокого обучения.....	82
4.2.3. Разработка механизма реагирования на спрос.....	83
4.3 Эмпирический анализ.....	84
4.3.1 Анализ ситуации с новой энергетической базой Цзюцюань в Ганьсу.....	86
4.3.2. Виртуальная электростанция в городской агломерации дельты реки Янцзы.....	87
4.3.3. Трансформация сельской интеллектуальной сети в Юньнани...89	
4.4 Краткое изложение данной главы.....	90
5. Внедрение технологий и оценка выгод.....	91
5.1 План технической реализации.....	92
5.1.1 Стандартная системная структура сетевых технологий.....	92
5.1.2 Поэтапная дорожная карта строительства.....	94
5.1.3 Анализ матрицы управления рисками.....	95
5.2 Оценка преимуществ системы.....	97
5.2.1 Прогноз улучшения новых мощностей потребления энергии.....	98
5.2.2 Показатели повышения надежности электроснабжения.....	99
5.2.3 Расчет сокращения выбросов углерода.....	100
5.3 Анализ экономической выгоды.....	101
5.3.1 Модель расчета цикла доходности инвестиций.....	102
5.3.2 Анализ затрат полного жизненного цикла.....	104
5.3.3 Моделирование доходов от рыночных транзакций.....	106
5.4 Краткое изложение данной главы.....	108
6. Заключение.....	109
Библиографический список.....	111

Введение

Актуальность данного исследования обусловлена вызовами Индустрии 4.0, где автоматизация и интеллектуальный мониторинг оборудования критически важны для конкурентоспособности предприятий. Согласно отчетам McKinsey (2024), незапланированные простои в химической промышленности приводят к потерям до 20% годовой прибыли, а расходы на экстренный ремонт и замену узлов в 3-5 раз превышают плановые, создавая значительное давление на операционную эффективность. Существующие SCADA-системы часто недостаточно адаптивны к динамическим изменениям нагрузок и внешним возмущениям, требуют значительных затрат на интеграцию с ИИ-алгоритмами (особенно при работе с неструктурированными временными рядами) и сложны в настройке для конкретных условий эксплуатации. Это создает технологический разрыв между потребностью в предиктивной аналитике и практической реализуемостью экономически эффективных и масштабируемых решений. Работа фокусируется на системах мониторинга критичного роторного оборудования (центробежные насосы, вытяжные вентиляторы) в химической промышленности, где виброакустическая диагностика является ключевым методом обнаружения ранних дефектов подшипников (внутренних/наружных колец, тел качения), дисбаланса, расцентровки и ослабления крепежа. Предмет исследования включает разработку гибридной CNN-LSTM архитектуры для обработки нестационарных и зашумленных сигналов в условиях сильных производственных помех, переменных частот вращения и нелинейных вибрационных откликов. На этапе подготовки использовались Microsoft Word для структурирования технико-экономического обоснования (ТЭО) с расчетом ROI, MATLAB Computer Vision Toolbox для генерации спектрограммной визуализации дефектов (Mel-спектрограммы, кепстральные коэффициенты) и симуляции режимов отказа с варьированием параметров нагрузки и уровня шума.

Целью является создание программно-аппаратного Edge-комплекса для предиктивной диагностики, обеспечивающего: 1) Классификацию дефектов $\geq 95\%$ точности (на базе стандартизированных датасетов IMS/CWRU и валидации на реальных промышленных данных с использованием метрик F1-score и AUC-ROC); 2) Снижение ложных срабатываний на 30% за счет адаптивных порогов срабатывания, основанных на анализе текущих рабочих режимов и динамической оценке достоверности сигнала; 3) Реальную адаптацию к изменяющимся нагрузочным режимам через online перекалибровку модели на основе потоковых данных с использованием скользящего окна обучения и механизма обратной связи по экспертной оценке. Научная новизна включает: 1) Каскадный алгоритм предобработки с адаптивной вейвлет-фильтрацией (db4) для подавления нестационарных шумов и двухканальной CNN-LSTM сетью, оптимизированной под многомерные временные ряды и извлечение пространственно-временных признаков с применением механизма внимания; 2) Цифрового двойника в MATLAB Simulink с многофазной симуляцией деградации подшипников (усталостные трещины, выкрашивание, смазочный дефицит) на основе физических моделей трения и износа, интегрируемого через OPC UA для тестирования и отладки алгоритмов в реалистичных виртуальных средах; 3) Энергоэффективную Edge-архитектуру на NVIDIA Jetson с оптимизированными вычислениями (TensorRT, INT8-квантование) и обработкой до 1000 сэмплов/сек в реальном времени, обеспечивающую локальную обработку данных без постоянной облачной синхронизации. Верификация включала симуляцию 12 сценариев отказов в Simulink (различные комбинации дефектов, нагрузок, шумов, включая переходные процессы запуска/останова), визуализацию переходных процессов и эффективности фильтрации через Vision Tools (включая 3D-визуализацию пространства признаков), и документирование результатов в Word с динамическими графиками остаточной диагностической ошибки (RMSE, MAE), оценкой экономии от предотвращения простоев и сравнительным

анализом с традиционными методами (SVM, Random Forest) по показателям задержки выявления и потребления ресурсов.

В процессе обучения в магистратуре принято участие в двух конференциях:

"Вестник Амурского государственного университет" и "XXV региональная научно-практическая конференция «Молодежь XXI века: шаг в будущее»".

Опубликовано две работы: «Разработка автоматизированных систем управления в электроэнергетике» и «Использование анализа качества электроэнергии измерения электрических величин».

1. ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И СТРУКТУРЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОСЕТИ

С ускорением глобальной энергетической трансформации особое значение приобретает текущее состояние и структурный анализ электросети как основной инфраструктуры передачи и распределения энергии. В настоящее время энергосистема претерпевает глубокую трансформацию от традиционной энергосистемы к интеллектуальной сети. Это изменение отражается не только на техническом уровне электросети, но и на управлении, эксплуатации и интеграции электросети с другими энергетическими системами.

Современное состояние развития электросетей характеризуется диверсификацией и сложностью. С одной стороны, традиционные мощности по производству электроэнергии на основе ископаемых видов топлива по-прежнему занимают важное место в энергосистеме, обеспечивая стабильное и надежное электроснабжение экономики и общества; С другой стороны, мощности по производству электроэнергии из возобновляемых источников энергии, представленные ветром и светом, стремительно растут, становясь основной движущей силой для новых установленных мощностей в энергосистеме. Это изменение выдвинуло более высокие требования к диспетчеризации, эксплуатации и контролю электросети.

С точки зрения базовой структуры электросети тремя важными аспектами являются стратификация уровней напряжения, региональное взаимодействие электросетей и эволюция топологии. Стратификация уровня напряжения помогает добиться эффективной передачи и распределения электроэнергии и сократить потери энергии; региональное сетевое взаимодействие повышает стабильность и надежность сети и улучшает возможность оптимизации распределения энергоресурсов; а эволюция топологической структуры отражает процесс непрерывной корректировки сети по мере развития технологий и изменения спроса [5].

Текущее состояние развития возобновляемой энергетики оказывает глубокое влияние на структуру сети. Характеристики распределения установленной мощности ветровой и солнечной энергии различаются от провинции к провинции, что требует от энергосистемы полного учета региональных различий, а также временных и пространственных характеристик распределения при приеме возобновляемой энергии. Непрерывный рост уровня проникновения распределенной энергии требует от электросетей более гибкой и разумной адаптации к доступу и потреблению распределенной энергии. В то же время количественная оценка узких мест потребления стала важной задачей при планировании и эксплуатации сети для обеспечения эффективного использования возобновляемых источников энергии, а также безопасной и стабильной работы сети.

1.1 Текущее состояние развития электросетей.

С ускорением глобальной энергетической трансформации и углубленной реализацией целей «двойного углерода» энергосистема претерпевает беспрецедентно глубокие изменения. В настоящее время энергосистема Китая превратилась в одну из крупнейших в мире систем электроснабжения с наиболее полными уровнями напряжения и богатейшими видами энергии. По данным статистики на конец 2023 года установленная мощность генерации электроэнергии в Китайской Народной Республике превысила 2,8 млрд киловатт, из которых доля установленной мощности возобновляемых источников энергии превысила 45%. Такое увеличение доли свидетельствует о том, что Китай добился значительного прогресса в использовании чистой энергии. При этом общая протяженность линий электропередачи сверхвысокого напряжения превысила 40 000 километров, а годовая межрегиональная пропускная способность достигла более 200 миллионов киловатт. Эти данные в полной мере демонстрируют колоссальные достижения в строительстве энергетической инфраструктуры [6]. Однако, несмотря на столь многочисленные достижения, развитие электросетей по-

прежнему сталкивается с рядом серьезных проблем. К этим проблемам относятся нестабильность, вызванная крупномасштабным подключением к сетям новых источников энергии, неравномерное распределение спроса и предложения электроэнергии во времени и пространстве, а также сложность адаптации традиционной архитектуры электросетей к доступу к большой доле возобновляемой энергии. В этом контексте глубокий анализ структурных характеристик электросети и оптимизация режима ее работы крайне важны для построения нового типа эффективной, устойчивой и экологически чистой энергосистемы.

1.2 Базовая структура электросети.

Современная электросеть представляет собой чрезвычайно сложную гигантскую систему, которую можно разделить на четыре основных компонента в соответствии с функциональным уровнем: система генерации электроэнергии, сеть передачи электроэнергии, распределительная сеть и силовая нагрузка, как показано на рисунке 1-1. Среди этих компонентов система генерации электроэнергии играет ключевую роль в производстве электроэнергии. В ее состав входят различные типы электростанций, включая, помимо прочего, тепловые электростанции, гидроэлектростанции, ветровые электростанции и солнечные электростанции. Эти электростанции используют собственные различные технические средства для преобразования различных форм энергии, таких как уголь, гидроэнергия, энергия ветра, солнечная энергия и т. д., в электричество, необходимое нам в повседневной жизни. Сеть электропередачи играет важную роль в эффективной передаче электроэнергии, вырабатываемой системой электроснабжения, в различные области потребления электроэнергии. Эта сеть обычно состоит из высоковольтных линий электропередачи и подстанций, которые в совокупности обеспечивают стабильность электроэнергии при передаче на большие расстояния и возможность передачи больших объемов электроэнергии. Распределительная сеть расположена в конце электросети. Его обязанностью является распределение

электроэнергии, передаваемой по сети электропередачи, каждому пользователю. Распределительная сеть состоит из большого количества распределительных линий и распределительных трансформаторов, которые обеспечивают надежное распределение и подачу электроэнергии, а также гарантируют удовлетворение потребностей потребителей в электроэнергии. Электрическая нагрузка является конечной целью обслуживания электросетей, которое охватывает промышленное электричество, коммерческое электричество, бытовое электричество и другие аспекты. Эти модели потребления электроэнергии и требования к ней не только отражают уровень социальной и экономической активности, но и напрямую влияют на рабочее состояние и эффективность электросети. Эти четыре основных компонента взаимосвязаны и взаимозависимы. Благодаря сложному взаимодействию они вместе образуют сложную мегасистему современной электросети, обеспечивающую эффективное распределение и использование энергоресурсов.

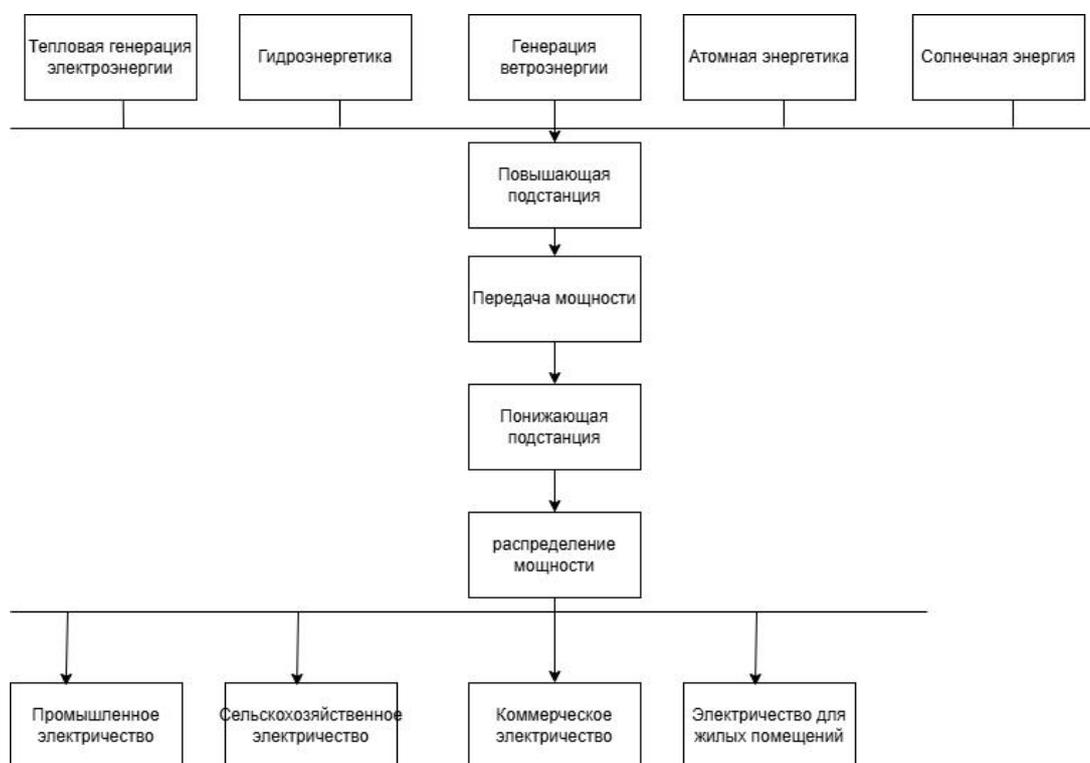


Рисунок 1-1 Схема развития энергосистемы

Система электросетей Китайской Народной Республики характеризуется «многоуровневой и зонированной гибридной системой переменного и

постоянного тока». Разделение в основном отражается в том, что электросети на разных уровнях напряжения выполняют разные задачи по передаче и распределению электроэнергии, что повышает эффективность передачи и гибкость распределения электроэнергии, а также облегчает изоляцию неисправностей. Зонирование основано на географии и спросе на электроэнергию, при этом каждый регион имеет независимую сеть передачи и систему распределения, что повышает локальную стабильность и надежность и снижает влияние сбоев. Гибридная технология переменного/постоянного тока сочетает в себе большую пропускную способность и преимущества передачи переменного тока на большие расстояния с преимуществами передачи постоянного тока с низкими потерями и компактностью, что повышает пропускную способность и гибкость электросети.

1.2.1 Разделение уровня напряжения.

Современная электросеть представляет собой типичную многовольтную композитную систему. Различные уровни напряжения имеют определенное функциональное расположение и вместе составляют целостную сеть передачи и распределения электроэнергии. После длительного периода развития уровни напряжения электросети Китайской Народной Республики сформировали полную иерархическую систему, в которой органическая связь и преобразование энергии между каждым уровнем напряжения осуществляются посредством подстанций. Углубленный анализ иерархической структуры уровней напряжения имеет большое значение для понимания механизма работы электросети и оптимизации планирования и строительства электросети.

Уровень сверхвысокого напряжения (1000 кВ/±800 кВ) является самым высоким уровнем напряжения в энергосистеме и отвечает за межрегиональную, крупногабаритную и дальнюю передачу электроэнергии. Сверхвысоковольтная электросеть Китая использует две технологии: электросеть переменного тока напряжением 1000 кВ используется для

объединения региональных электросетей с пропускной способностью 5–6 миллионов киловатт и экономически выгодным расстоянием 1000–1500 километров, например, проект Юго-Восточный Шаньси-Наньян-Цзинмэнь; Электросеть постоянного тока напряжением ± 800 кВ подходит для сверхдальней передачи электроэнергии с мощностью 8 миллионов киловатт и экономически выгодным расстоянием более 2000 километров, например, для проектов Сянцзяба-Шанхай и Цзиньпин-Южный Цзянсу. Технические особенности сверхвысокого напряжения включают использование расщепленных проводников для снижения потерь, трансформаторов большой мощности, усовершенствованную релейную защиту и автоматику, а также строгие требования к изоляции и электромагнитной обстановке.

$$p = \frac{v^2}{x} \sin \theta \quad (1.1)$$

Где: P : Мощность передачи

x : Реактивное сопротивление линии

θ : Угол наклона

Уровень передачи сверхвысокого напряжения (750 кВ/500 кВ) является основой региональной энергосистемы, отвечающей за межпровинциальный обмен электроэнергией и доступ к электроэнергии. В Северо-Западном регионе используется напряжение 750 кВ для создания магистральной сети, охватывающей пять провинций и регионов; В других регионах обычно используется напряжение 500 кВ для формирования ядра провинциальной электросети. Технические характеристики включают двухцепную или многоцепную параллельную работу, пропускная способность линии 500 кВ составляет около 1-1,5 млн киловатт, линии 750 кВ - около 2-2,5 млн киловатт, а метод разводки с выключателем 3/2 широко используется для повышения надежности электроснабжения, что является ключом к контролю стабильности системы и регулированию потока.

Уровень распределения высокого напряжения включает в себя электросети напряжением 220 кВ и 110 кВ, которые соединяют систему

передачи с узлом нагрузки. Сеть 220 кВ в основном поставляет электроэнергию в города префектурного уровня, тогда как сеть 110 кВ обслуживает потребителей уездного уровня и крупных промышленных потребителей. В таких сетях обычно используется кольцевая структура или структура с двойным источником питания. Подстанция 220 кВ оборудована трансформатором с переключением ответвлений под нагрузкой. Сеть 110 кВ продвигает технологию интеллектуальных подстанций и служит основным уровнем напряжения для распределенного доступа к электроэнергии.

Уровень распределения среднего напряжения (35 кВ/10 кВ) напрямую обслуживает различные типы потребителей электроэнергии. Напряжение 35 кВ используется в промышленных парках и городах, а напряжение 10 кВ является основой городской распределительной сети. К основным направлениям технологического прогресса относятся: повышение уровня автоматизации, сокращение времени обнаружения и изоляции неисправностей до нескольких минут; продвижение передовых технологий, таких как гибкое распределение электроэнергии и интеллектуальные подстанции; быстрый рост мощности распределенного фотоэлектрического доступа; и требования к надежности электроснабжения более 99,9%.

Распределительный слой низкого напряжения (0,4 кВ и ниже) является ключевым звеном в системе электроснабжения, а именно «последней милей». Система использует трехфазное четырехпроводное питание и проходит интеллектуальную трансформацию. Средняя мощность распределения и преобразования на одно домохозяйство увеличилась, а технология онлайн-мониторинга качества электроэнергии получила широкое распространение. Подстанции соединяют различные уровни напряжения посредством преобразования энергии и напряжения. Координационные отношения уровней напряжения включают 1000 кВ → 500 кВ → 220 кВ → 110 кВ → 10 кВ → 0,4 кВ и т. д. Иерархическая структура проекта учитывает технические и экономические факторы для достижения баланса между потерями при передаче и затратами на строительство. С развитием строительства новых

энергосистем структура уровней напряжения продемонстрировала новые тенденции, такие как упрощение уровней напряжения распределительной сети, инновации в распределительных сетях постоянного тока, гибкие взаимосвязанные устройства, преодолевающие традиционные границы уровней, и технология цифровых двойников, улучшающая возможности межуровневой координации [7].

$$\min_{k+1}^N \left(\frac{I_k^2 R_k}{V_k^2} t_k c_k + \frac{V_k}{V_{base}} C_{invest,k} \right) \quad (1.2)$$

Где: I_k^2 : ток линии уровня k

$C_{invest,k}$: Инвестиционные затраты

R_k : Сопротивление линии

c_k : Цены на электроэнергию

V_k^2 : Уровень напряжения

t_k : Время выполнения

1.2.2 Региональное объединение электросетей.

Китайская Народная Республика создала национальную архитектуру объединения электросетей, в основе которой лежит технология сверхвысокого напряжения, включающую шесть региональных электросетей, что позволило обеспечить межрегиональное распределение энергоресурсов. Благодаря технологии передачи электроэнергии переменного и постоянного тока сверхвысокого напряжения был сформирован поток электроэнергии «с запада на восток и с севера на юг». В настоящее время завершённый проект сверхвысокого напряжения «15 переменного тока и 18 постоянного тока» увеличил межрегиональную пропускную способность электропередачи до более чем 200 миллионов киловатт, что делает его крупнейшей в мире взаимосвязанной системой электросетей. Объединение региональных электросетей способствовало оптимальному распределению энергоресурсов, а объём межрегиональной торговли электроэнергией в 2023 году превысил

1,2 трлн кВтч. Столкнувшись с такими проблемами, как высокий уровень проникновения новой энергии, электросетевые компании сосредоточились на разработке трех основных технологий: управление безопасностью и устойчивостью, управление координацией частоты, а также управление напряжением и реактивной мощностью. Если взять в качестве примера линию электропередачи постоянного тока сверхвысокого напряжения ± 800 кВ на северо-западе и востоке Китая, то технологические инновации позволили повысить коэффициент использования новой энергии на 15% и сократить годовые выбросы CO₂ более чем на 30 миллионов тонн. В будущем региональное объединение электросетей будет развиваться в направлении гибкости, интеллектуальности и маркетизации. Применение технологий гибкого взаимодействия, а также цифровой и интеллектуальной трансформации позволит повысить уровень управления электросетями. С точки зрения механизма будет углублено построение единого национального рынка электроэнергии, усовершенствован механизм межрегионального ценообразования на передачу и торговли зеленой электроэнергией. Ожидается, что к 2030 году межрегиональная пропускная способность увеличится еще на 50%, что обеспечит сетевую поддержку для достижения целей пикового уровня выбросов углерода и углеродной нейтральности [8].

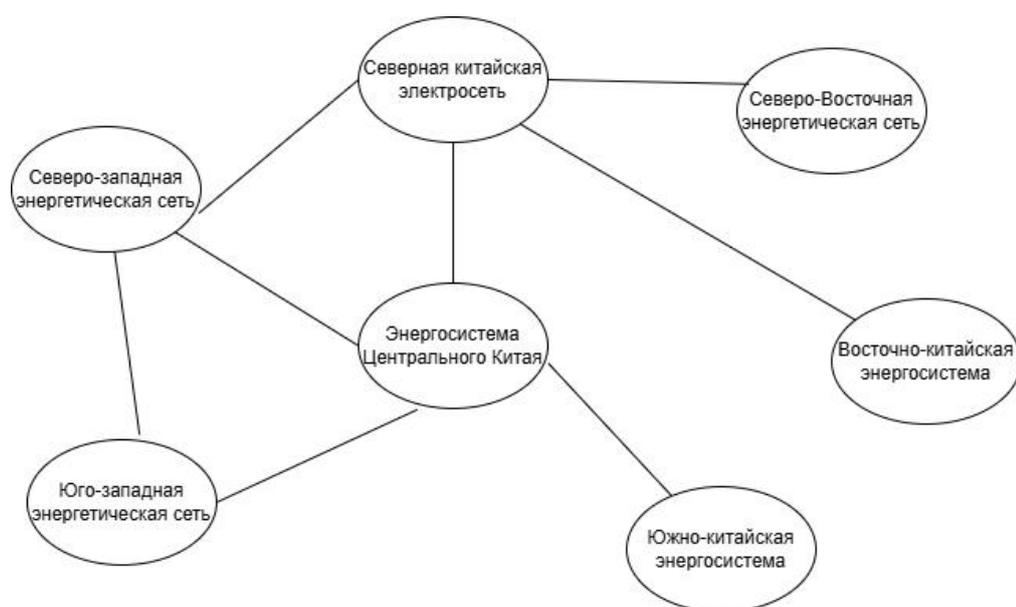


Рисунок 1-2. Схема структуры объединения региональных электросетей

$$\frac{d\delta f}{dt} = \frac{h_i \cdot p_{\max.i}}{f_0 \cdot \delta p_{loss}}$$

$$\frac{d\delta f}{dt} = \frac{h_i \bullet p_{\max.i}}{f_0 \bullet \delta p_{loss}} \quad (1.3)$$

Где: h_i :Константа инерции области i

p_{loss} :Дефицит электроэнергии

1.2.3. Эволюция топологической структуры.

Традиционная топология электросети в основном характеризуется иерархией и разделением, при этом основными особенностями являются централизованная генерация электроэнергии и односторонняя передача. Что касается выработки электроэнергии, то централизованные источники энергии, такие как крупные тепловые электростанции и гидроэлектростанции, подключаются к энергосистеме через высоковольтные линии электропередачи; на уровне передающей сети в основном используется кольцевая или двухконтурная структура с уровнем напряжения 500 кВ/220 кВ для формирования региональной магистральной сети; На уровне распределительной сети обычно используется радиальная или простая кольцевая структура сети. Эта структурная конструкция в основном основана на нескольких важных предположениях: сторона электроснабжения управляема и диспетчеризируема, сторона нагрузки предсказуема, а режим работы сети относительно фиксирован. В ходе развития электроэнергетики в 20 веке эта топологическая структура хорошо удовлетворяла потребности в электроэнергии для экономического и социального развития и обладала такими преимуществами, как понятная структура, простота эксплуатации и экономичность инвестиций. В связи с широкомасштабной интеграцией возобновляемых источников энергии топология электросети претерпевает глубокие изменения. Во-первых, структура электроснабжения меняется с централизованной на распределенную. К 2023 году установленная мощность распределенной фотоэлектрической генерации в Китайской Народной

Республике превысит 120 миллионов киловатт, распределенных по миллионам крыш и площадок. Это изменение побудило распределительную сеть перейти от традиционной «радиальной» структуры к структуре «многоэнергетической сети». Во-вторых, сеть передачи электроэнергии должна адаптироваться к изменениям в схеме электроснабжения. Если взять в качестве примера северо-западный регион, то для поглощения электроэнергии с крупных ветровых и солнечных баз топология сети претерпела изменения от первоначальной двухточечной модели «электростанция — центр нагрузки» до сложной структуры «множество источников энергии, объединяющихся в несколько цепей для передачи». В-третьих, режим работы электросети изменился с «источник следует за нагрузкой» на «источник и нагрузка взаимодействуют», что требует от топологической структуры большей гибкости и реконфигурируемости [9].

Глубокая трансформация топологии электросетей зависит от прорывов в ключевых технологиях. Например, технология силовой электроники обеспечивает аппаратную основу для реконструкции топологии. Например, унифицированный контроллер потока мощности (UPFC) позволяет обеспечить гибкое управление потоком мощности. Более того, цифровая технология реализует восприятие и управление топологией в реальном времени, а технология цифровых двойников может моделировать рабочее состояние различных топологических структур. В-третьих, новые технологии материалов поддерживают реализацию новых топологий. Например, высокотемпературные сверхпроводящие кабели позволяют создать более компактную структуру электросети. Наконец, технология искусственного интеллекта обеспечивает поддержку принятия решений для оптимальной эксплуатации сложных топологических структур. Эти технологические достижения совместно способствовали развитию топологии электросетей в более гибком, интеллектуальном и эффективном направлении [10]. В связи с постоянным ростом уровня проникновения возобновляемых источников энергии и постепенной либерализацией рынка электроэнергии при

оптимизации топологии электросетей все больше внимания будет уделяться безопасности, экономичности и устойчивости. В будущем топология сети может и дальше развиваться в направлении модульности, «plug-and-play» и адаптивности для адаптации к широкому доступу к распределенной энергии и диверсифицированным потребностям рынка электроэнергии.

1.3 Текущее состояние развития возобновляемой энергетики.

В последние годы возобновляемая энергетика стремительно развивается во всем мире. Правительства по всему миру приняли политику поддержки развития и использования возобновляемых источников энергии, что привело к дальнейшему росту их установленной мощности. Регионы, богатые ветровыми и солнечными ресурсами, такие как северо-запад Китая и Северная Европа, стали важными базами для развития возобновляемой энергетики.

Благодаря технологическому прогрессу и снижению затрат экономические преимущества возобновляемой энергетики постепенно становятся очевидными, а ее доля в структуре энергетики также увеличивается. В то же время, благодаря постоянному прогрессу в технологиях накопления энергии и интеллектуальных сетях, проблема сетевого подключения возобновляемых источников энергии постепенно решается, а ее стабильность и надежность также постоянно улучшаются. Ожидается, что в будущем возобновляемая энергетика станет доминирующей силой в мировой энергетической структуре и внесет важный вклад в достижение целей устойчивого развития.

1.3.1 Характеристики распределения установленной мощности ветровой и солнечной энергетики в каждой провинции.

Согласно последним статистическим данным Национального энергетического управления за 2023 год, установленная мощность возобновляемой энергетики Китая демонстрирует значительные региональные агломерационные характеристики. Провинциальная тепловая карта установленной мощности ветровой и солнечной энергетики,

представленная в Таблице 1-1, показывает, что общая установленная мощность ветровой и солнечной энергетики в Синьцзяне и Внутренней Монголии на северо-западе региона превышает 30 миллионов киловатт, образуя очевидную «зону агломерации высокой плотности» [11].

Таблица 1-1 Схематическая диаграмма установленной мощности ветро- и солнечной энергетики провинции.

Энергия ветра				Фотоэлектрическая генерация электроэнергии			
Провинция	Установленная мощность	Провинция	Средний годовой темп роста	Провинция	Установленная мощность	Провинция	Средний годовой темп роста
Внутренняя Монголия	3786	Хэнань	95.45	Шаньдун	2272	Чунцин	247.52
Синьцзян	2361	Цинхай	87.25	Хэбэй	2190	Гуйчжоу	118.92
Хэбэй	2274	Гуанси	75.73	Цзянсу	1684	Хэйлунцзян	109.15
Шэньси	1974	Цзянси	47.55	Цинхай	1601	Хунань	90.69
Шаньдун	1795	Шаньси	37.62	Чжэцзян	1517	Гуанси	81.18
Единица измерения: 10 000 киловатт, %							

В прибрежных провинциях преобладает фотоэлектрическая энергетика: в провинции Цзянсу установленная мощность фотоэлектрических установок составляет 16 миллионов киловатт. Установленная мощность фотоэлектрических установок в провинции Чжэцзян превысила 15 миллионов единиц. Установленная мощность морской ветроэнергетики в провинции Гуанси превысила 800 000 киловатт. Особо следует отметить, что установленная мощность ветровой и солнечной энергетики в центральных провинциях значительно возросла. Установленная мощность фотоэлектрической генерации в провинциях Хэбэй и Чунцин стремительно росла из месяца в месяц.

1.3.2 Анализ скорости проникновения распределенной энергетики.

Развитие распределенной энергетики в Китайской Народной Республике представляет собой особую модель «двухколейной параллельной» энергетики. Рассматривая показатель уровня проникновения как индикатор, можно выделить две основные области развития: во-первых, сфера промышленной и коммерческой распределенной энергетики, где средний уровень проникновения по стране достиг 18,6% (по состоянию на 2023 год). В районе дельты реки Янцзы этот показатель в целом превышает 25%, а уровень проникновения в промышленном парке Сучжоу достигает 37%. Годовой темп роста в этой области остается в относительно стабильном диапазоне 15–20%. Вторым по значимости является сектор распределенной энергетики в жилых домах, средний уровень проникновения которого по стране составляет 6,8%. В провинции Шаньдун уровень охвата сельских домохозяйств фотоэлектрическими установками превысил 12%. В то же время модель «фотоэлектричество + борьба с бедностью» быстро продвигалась и применялась в западных провинциях. Для того чтобы более наглядно отразить различия в уровнях проникновения распределенной энергии в разных провинциях, в следующей таблице 1-2 подробно перечислены сравнительные показатели уровня проникновения нескольких типичных провинций:

Таблица 1-2 Уровень горизонтального проникновения по провинциям.

Провинция	Уровень промышленного и коммерческого	Уровень проникновения резидентов	Общий уровень проникновения
Цзянсу	28,5%	8,2%	19,6%
Шаньдун	22,1%	12,3%	17,8%
Гуандун	19,8%	5,6%	13,7%
Хэнань	15,3%	7,9%	11,9%

$$\eta = \frac{P_{DG}}{P_{load}} 100\% \quad (1.4)$$

Где: P_{DG} : Распределенная выходная мощность

P_{load} : Общая нагрузка

С технической точки зрения распределенные системы продемонстрировали три существенные новые особенности: во-первых, уровень напряжения был повышен с традиционных 380 В до 10 кВ. Это изменение значительно повысило пропускную способность распределенных систем, позволив им поддерживать большую емкость и более высокую выходную мощность. Такая модернизация имеет большое значение для удовлетворения растущего спроса на электроэнергию в промышленности и торговле, а также среди бытовых потребителей. Во-вторых, доля конфигурации «фотоэлектрические системы + накопители энергии» возросла до 35%. Этот прогресс означает, что распределенная энергетическая система может обеспечивать электроэнергией через устройства накопления энергии в периоды недостатка солнечного света или пикового потребления электроэнергии, тем самым значительно повышая надежность и стабильность всей системы. Наконец, уровень проникновения интеллектуальных инверторов достиг 68%. Такой высокий уровень проникновения позволяет распределенным энергетическим системам эффективнее взаимодействовать с электросетью, реализует интеллектуальное планирование и оптимизацию электроэнергии, а также значительно повышает эффективность использования энергии [12]. Эти новые функции не только улучшают возможности доступа и эффективность работы распределенной энергетики, но и способствуют дальнейшему широкому применению распределенной энергетики в энергосистемах, закладывая прочную основу для построения более эффективной и интеллектуальной энергетической сети.

1.3.3 Количественная оценка узких мест потребления.

В текущем процессе трансформации энергетической структуры освоение возобновляемой энергии сталкивается со многими проблемами. Чтобы лучше понять эти проблемы и ответить на них, особенно важно создать комплексную систему показателей оценки. С помощью этой системы мы можем провести количественный анализ текущего состояния потребления возобновляемой энергии, тем самым выявив коренные причины проблемы и предложив соответствующие решения. В частности, эти проблемы можно проанализировать в трех измерениях: пространственном измерении, временном измерении и технологических ограничениях.

Во-первых, с пространственной точки зрения, поскольку Северо-Западный регион является важной базой возобновляемой энергии в Китайской Народной Республике, темпы сокращения ветро- и солнечной энергетики в нем по-прежнему составляют 5,2% (по данным за 2023 год). Это свидетельствует о том, что мощности по производству электроэнергии из возобновляемых источников энергии в регионе используются не в полной мере, а объем отходов велик. Кроме того, коэффициент использования межпровинциальных каналов передачи составляет менее 60%, что свидетельствует о том, что существующая сеть передачи имеет узкие места в передаче возобновляемой энергии и не может эффективно транспортировать чистую энергию из северо-западного региона в районы с более высоким спросом на электроэнергию. Кроме того, доля территорий с насыщенной пропускной способностью распределительной сети достигла 18%, что свидетельствует о том, что в некоторых районах существующая структура распределительной сети больше не может отвечать потребностям доступа к возобновляемым источникам энергии и требует дальнейшей трансформации и модернизации.

Во-вторых, нельзя игнорировать ограничения временного измерения. Максимальное суточное колебание мощности может достигать 70% от установленной мощности. Такие большие колебания представляют собой

серьезную проблему для стабильной работы электросети. Коэффициент сезонной разницы поглощения составляет 0,38, что означает, что существуют значительные различия в поглощающей способности возобновляемой энергии между сезонами, что может быть связано с изменениями сезонного спроса на электроэнергию. Разрыв в спросе на пиковую нагрузку достиг 12 миллионов киловатт, что свидетельствует о том, что в периоды пикового потребления электроэнергии существующие мощности по сглаживанию пиковых нагрузок не могут удовлетворить потребности сети в балансировке, и для покрытия этого разрыва необходимы дополнительные ресурсы по сглаживанию пиковых нагрузок.

Наконец, количественный анализ технических ограничений показал, что момент инерции системы снизился на 40% (по сравнению с 2015 годом), что может быть связано с характеристиками генераторов возобновляемой энергии. Для обеспечения устойчивости энергосистемы необходимы технические средства повышения уровня инерционности системы. Районы с недостаточной мощностью короткого замыкания составляют 25%, что свидетельствует о том, что в этих районах способность сети справляться с неисправностями недостаточна и структура и оборудование сети нуждаются в усилении. Коэффициент соответствия напряжения снизился на 2,3 процентных пункта, что напрямую связано с качеством электроэнергии и требует технических усовершенствований для повышения стабильности напряжения [13].

На основании вышеприведенного анализа данное исследование ясно указывает на то, что создание комплексной системы индексов оценки имеет решающее значение для глубокого изучения и понимания многомерных и сложных проблем, возникающих в процессе потребления возобновляемой энергии. Эти проблемы охватывают несколько уровней, включая технологии, экономику и политику. На основании результатов анализа в настоящем исследовании предлагается ряд целевых стратегий и мер по содействию эффективному использованию возобновляемых источников энергии и

трансформации энергетической структуры в более экологичном и устойчивом направлении. Среди этих стратегий в ходе исследования были выявлены и количественно оценены несколько основных ограничений: 1. Ограничения структуры сетки, доля которых составляет 42%; 2. Несовершенные рыночные механизмы, доля которых составляет 35%; 3. Недостаточные ресурсы регулирования, доля которых составляет 23%. В ответ на эти проблемы в данном исследовании предложен будущий путь улучшения способности поглощения возобновляемой энергии. Конкретные меры включают в себя: 1. Укрепление строительства межпровинциальных линий электропередачи, планирование добавления 8 линий электропередачи сверхвысокого напряжения для повышения пропускной способности и гибкости электросети, а также эффективного решения проблемы поглощения возобновляемой энергии, вызванной неравномерным региональным распределением; 2. Оптимизация рынка дополнительных услуг посредством инноваций и реформирования рыночных механизмов с целью привлечения большего числа участников рынка к участию; ожидается, что поглощающая способность увеличится на 15%; 3. Продвижение интегрированного демонстрационного проекта «источник-сеть-нагрузка-хранение», тесно интегрирующего производство, передачу, использование и хранение энергии для формирования эффективной и скоординированной энергетической системы. Уровень освоения демонстрационного проекта достигает 99%, что является весомой поддержкой эффективного использования возобновляемых источников энергии. Ожидается, что реализация этих путей улучшения позволит значительно улучшить способность усваивать возобновляемую энергию, заложив прочную основу для зеленой трансформации энергетической структуры.

Для проверки эффективности и осуществимости этих стратегий в исследовании также был проведен подробный анализ моделирования и тематические исследования. Результаты моделирования показывают, что после принятия вышеуказанных мер ожидается увеличение скорости

поглощения возобновляемой энергии примерно на 30%, особенно в районах, богатых ресурсами ветровой и солнечной энергии, проблема поглощения будет значительно решена. В то же время тематические исследования также показывают, что некоторые регионы, взявшие на себя инициативу по внедрению аналогичных стратегий, достигли замечательных результатов, предоставив ценный опыт и ориентиры для других регионов.

Кроме того, в данном исследовании подчеркивается важная роль технологических инноваций в стимулировании потребления возобновляемой энергии. Благодаря постоянному развитию новых энергетических технологий и всестороннему продвижению строительства интеллектуальных сетей в будущем будут применяться более инновационные технические средства для подключения к сети, диспетчеризации и потребления возобновляемой энергии с целью дальнейшего повышения эффективности и надежности системы.

Подводя итог, можно сказать, что создание комплексной системы индексов оценки и предложение целевых стратегий и мер имеют большое значение для содействия эффективному использованию возобновляемых источников энергии и зеленой трансформации энергетической структуры. Мы уверены, что благодаря постоянным усилиям и инновациям мы сможем преодолеть текущие проблемы и добиться устойчивого развития возобновляемой энергетики.

1.4 Краткое изложение данной главы

Китай построил электросеть мирового класса. Его «многоуровневая и зонированная, гибридная, переменного и постоянного тока» структура поддерживает передачу электроэнергии. Однако развитие региональной агломерации и распределенное проникновение возобновляемой энергии, такой как ветер и солнце, приводят к значительным узким местам поглощения в пространстве, времени и технологии, что приводит к трансформации структуры электросети.

2. ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СЕТИ.

В связи с постоянным ростом спроса на энергию и ужесточением стандартов защиты окружающей среды традиционные электросети сталкиваются с серьезными проблемами, особенно с точки зрения надежности, стабильности и эффективности. Для решения этих проблем все большее внимание уделяется микросетям как инновационному решению. Микросети, благодаря своей уникальной архитектуре и стратегиям управления, значительно повысили надежность и стабильность энергосистемы, а также расширили ее возможности реагирования на чрезвычайные ситуации и экстремальные погодные условия [14]. Гибридная энергетическая система подразумевает эффективную интеграцию нескольких форм энергии (таких как солнечная энергия, энергия ветра, традиционная энергия и т. д.) для создания эффективной, стабильной и гибкой системы энергоснабжения. К ее основным функциям относятся: во-первых, гибридная энергетическая система способна повысить стабильность и надежность энергоснабжения и компенсировать ограничения односистемного энергоснабжения; во-вторых, оптимизируя сочетание энергии и используя взаимодополняемость различных источников энергии, можно снизить зависимость от ископаемого топлива, сократить выбросы парниковых газов и способствовать устойчивому развитию; Кроме того, гибридная энергетическая система позволяет повысить эффективность использования энергии и снизить затраты на нее. Гибридные энергетические системы также могут реализовать распределенное управление энергией, повысить устойчивость системы к рискам и обеспечить ключевую поддержку для разработки будущих интеллектуальных сетей и преобразования энергии. Ключевые цифровые технологии подразумевают использование средств информационных технологий, таких как большие данные, облачные вычисления, искусственный интеллект, Интернет вещей и т. д., для

содействия цифровой трансформации различных отраслей промышленности. Его основная функция — повышение эффективности, снижение затрат и оптимизация принятия решений. Применяя цифровые технологии, предприятия могут реализовать интеллектуальность и автоматизацию производственных процессов, а также повысить качество продукции и эффективность производства. В то же время цифровые технологии позволяют отслеживать и анализировать данные в режиме реального времени, помогая компаниям быстро адаптироваться к изменениям рынка и принимать точные решения. Кроме того, цифровые технологии способствовали межотраслевому сотрудничеству и инновациям, содействовали развитию новых отраслей, таких как умные города, умное производство и умное здравоохранение, а также повысили уровень цифровизации экономики в целом. В этой главе будут подробно рассмотрены инновационные технологические возможности повышения надежности сетей с упором на анализ технологии микросетевых систем, гибридных энергетических систем, а также проектирования архитектуры, стратегий управления и типичных случаев применения ключевых цифровых технологий.

2.1 Технология микросетевых систем.

Являясь важной частью современной технологии электросетей, технология микросетевых систем объединяет в себе передовые технологии силовой электроники, коммуникационные технологии и технологии управления для достижения гибкого планирования и эффективного использования распределенных источников энергии. С точки зрения архитектуры микросети можно разделить на централизованную и распределенную. Централизованная архитектура в основном опирается на центральный контроллер для управления и координации работы каждого распределенного источника питания и отличается простой структурой и легким управлением; В то время как распределенная архитектура уделяет больше внимания координации и взаимодействию между каждым распределенным источником питания, достигает автономности за счет

локальных контроллеров и обладает большей гибкостью и надежностью. С точки зрения стратегии управления технология виртуальной синхронизации VSG, как важный метод управления, позволяет распределенным источникам питания имитировать поведение традиционных синхронных генераторов, тем самым повышая стабильность и надежность микросетей [15]. Технология VSG обеспечивает виртуальную инерцию и характеристики демпфирования, позволяя распределенным источникам энергии поддерживать хорошие динамические характеристики как в режимах подключения к сети, так и в режимах автономного режима.

2.1.1 Архитектура проектирования: централизованная и распределенная.

Централизованная микросетевая система: В централизованной микросетевой системе все энергетические ресурсы (включая генераторы, устройства хранения энергии и т. д.) сосредоточены в определенном месте и единообразно управляются и планируются через центральную систему управления. Эта модель облегчает единое планирование и управление, а также помогает снизить сложность системы. Однако его ограничением является сильная зависимость от одного ресурса, что может привести к локальной нестабильности системы, например, к масштабному отключению электроэнергии в случае сбоя. Распределенная микросетевая система: в отличие от централизованной микросетевой системы, распределенная микросетевая система распределяет несколько небольших установок для генерации электроэнергии и систем хранения энергии по разным местам и реализует планирование подачи энергии посредством локального автономного управления. Распределенная архитектура предпочтительна из-за ее большей гибкости и отказоустойчивости, а отказ одного устройства генерации электроэнергии не повлияет на работу всей системы. Однако проблема заключается в том, как координировать работу, планирование и управление данными несколькими распределенными энергетическими ресурсами,

что требует более продвинутой технической поддержки и интеллектуального управления.

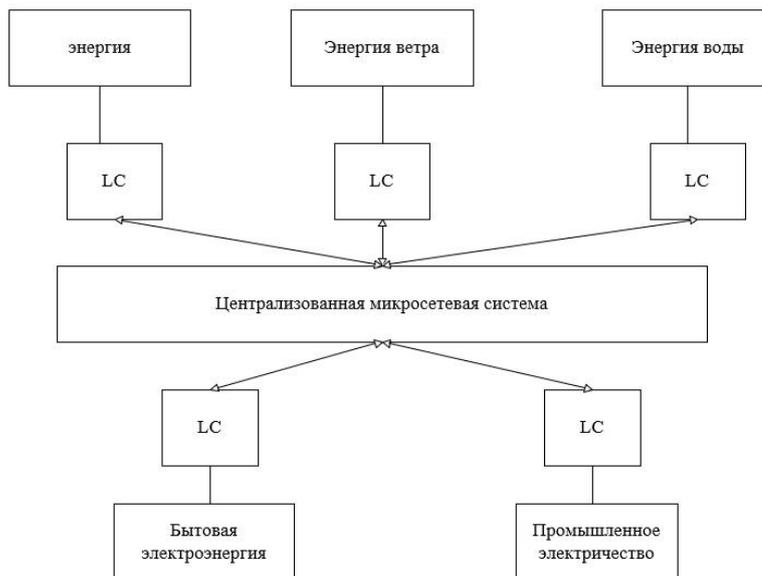


Рисунок 2-1 Централизованная микросетевая система

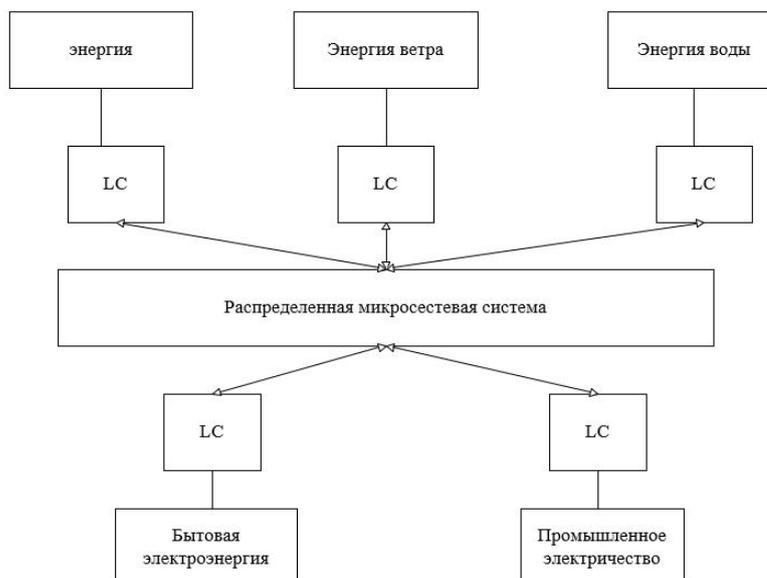


Рисунок 2-2 Распределенная микросетевая система

2.1.2 Стратегия управления: технология виртуальной синхронизации VSG.

Технология виртуального синхронного генератора (VSG) — это передовая стратегия управления, которая широко используется для

повышения стабильности работы и надежности микросетевых систем. Моделируя физические характеристики традиционных синхронных генераторов, VSG позволяет использовать возобновляемые источники энергии (например, энергию ветра, солнечную энергию) и оборудование для хранения энергии, обеспечивая возможности регулирования частоты и напряжения, аналогичные традиционным генераторам. В частности, VSG использует силовые электронные устройства для регулировки скорости и фазы генератора, тем самым достигая управления частотой виртуального синхронного генератора. Такая стратегия управления гарантирует, что микросеть сможет поддерживать стабильное рабочее состояние даже в островном режиме.

$$J_{VSG} = \frac{D_v(\omega_n - \omega_0) + K_v(V_{ref} - V)}{H_{vir} \frac{d\delta w}{dt}} \quad (2.1)$$

Где: D_v : Коэффициент затухания

K_v : Коэффициент усиления регулирования напряжения

ω_n : Номинальная угловая скорость

V_{ref} : Опорное напряжение

H_{vir} : Коэффициент виртуальной инерции

Пример расчета: Проверка критерия устойчивости микросети

Предположим, что параметры микросетевой системы следующие: виртуальная инерция, коэффициент затухания и отклонение частоты (0.03rad d/s)

Согласно формуле критерия устойчивости:

$$\delta P = J \frac{\delta \varpi}{\delta t} + D \delta \varpi \quad (2.2)$$

Если нарушение системы вызывает $\frac{\delta \varpi}{\delta t} = -0.1 \text{rad} / \text{s}^2$

Тогда величина компенсации мощности составит:

$$0.5 \times (-0.1) + 1.2 \times 0.03 = -0.014 \text{ p.u.}$$

Этот результат показывает, что: поскольку расчетный результат имеет отрицательное значение, системе необходимо уменьшить выходную мощность на 0,014 о.е. для восстановления стабильности частоты, проверяя возможности динамической регулировки технологии VSG.

Технология виртуального синхронного генератора (VSG) играет важную роль в микросетевых системах. Прежде всего, технология VSG значительно повышает стабильность микросети за счет точной регулировки частоты и напряжения. Даже в случае резких колебаний нагрузки и внешних возмущений окружающей среды микросеть может сохранять стабильную работу. Во-вторых, технология VSG имеет значительные преимущества в повышении доступности возобновляемой энергии. Учитывая непостоянный и нестабильный характер возобновляемых источников энергии, таких как ветер и солнце, эти факторы стали серьезными проблемами для стабильной работы микросетей. Технология VSG может эффективно устранить эти периодические проблемы и обеспечить стабильную выработку возобновляемой энергии. В-третьих, технология VSG помогает снизить зависимость микросети от традиционных синхронных генераторов. Благодаря применению технологии VSG микросети могут снизить зависимость от традиционных угольных или газовых генераторов, тем самым увеличивая долю зеленой энергии в структуре энергетики и способствуя преобразованию зеленой энергии. В-четвертых, технология VSG может повысить эффективность использования энергии. Благодаря точному управлению силовыми электронными устройствами технология VSG оптимизирует распределение энергии и сокращает потери энергии, тем самым повышая эффективность ее использования во всей системе микросетей. Наконец, технология VSG сыграла положительную роль в содействии развитию интеллектуальных сетей. Будучи ключевым компонентом технологии интеллектуальных сетей, применение технологии

VSG не только повышает производительность микросетей, но и закладывает прочную основу для построения и развития будущих интеллектуальных сетей, а также обеспечивает мощную техническую поддержку для реализации интеллекта, автоматизации и эффективности электросетей [16].

2.1.3 Типичный случай: микросеть острова Чжэцзян.

В провинции Чжэцзян некоторые отдаленные острова сталкиваются с серьезными проблемами при строительстве электросетей из-за своего уникального географического положения. Стабильность внешнего электроснабжения этих островов относительно низкая, что приводит к частым угрозам непрерывности и надежности электроснабжения на островах, а также к риску перебоев. Для решения этой проблемы правительство провинции Чжэцзян запустило проект «Микросеть островов», цель которого — значительно повысить стабильность электроснабжения на этих островах. Суть проекта заключается в создании микросети, объединяющей ветровую энергию, солнечную энергию и системы хранения энергии [17]. Благодаря этой инновационной энергетической комбинации микросеть способна поддерживать работу на собственных ресурсах без внешней энергетической поддержки, гарантируя, что электроснабжение острова не будет легко прервано.

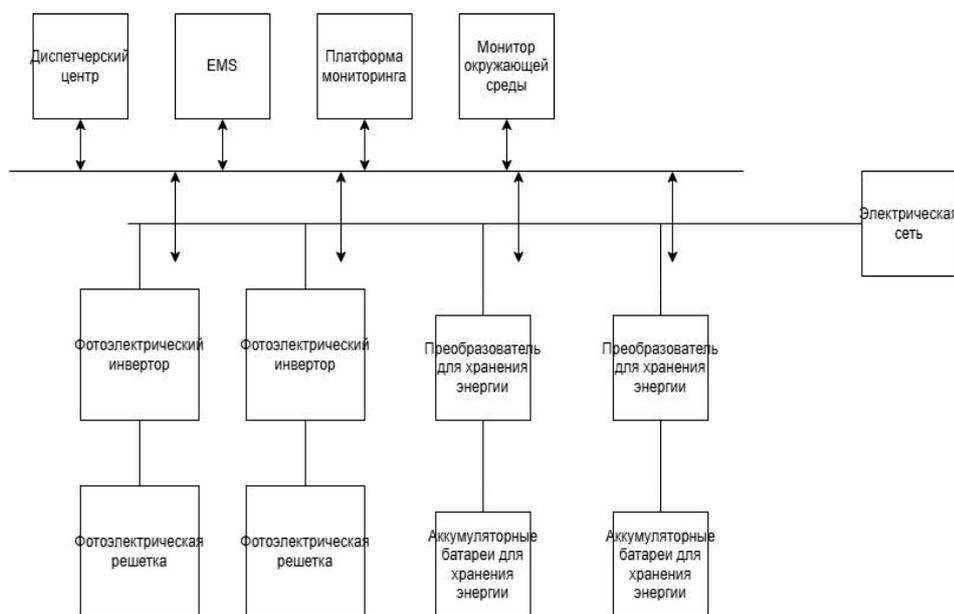


Рисунок 2-3 Состав микросетевой системы острова Чжэцзян

Кроме того, в рамках проекта была внедрена технология виртуального синхронного генератора (VSG) — передовая технология управления энергосистемой, которая имитирует поведение традиционных синхронных генераторов. В работе микросетей технология VSG играет важнейшую роль. Это позволяет микросети работать автономно в островном режиме и поддерживать стабильность напряжения и частоты, что имеет решающее значение для обеспечения повседневной жизни жителей острова и нормальной работы различных объектов. Еще одной изюминкой проекта является интеллектуальная система управления. Он может отслеживать рабочее состояние микросети в режиме реального времени и выполнять автоматическую корректировку на основе фактических условий, таких как изменения погодных условий и колебания нагрузки, чтобы обеспечить непрерывность и стабильность электроснабжения.

Проект микросети острова Чжэцзян не только повышает надежность электроснабжения, но и значительно снижает экономические потери и социальные последствия, которые могут быть вызваны перебоями в подаче электроэнергии. Стоит отметить, что проект также внес положительный вклад в защиту окружающей среды и устойчивое развитие. Используя возобновляемые источники энергии, такие как энергия ветра и солнца, проект снижает зависимость от традиционной ископаемой энергии, эффективно сокращает выбросы углерода и поддерживает зеленое развитие острова. Добавление системы накопления энергии дополнительно увеличивает мощность электроснабжения микросети в случаях, когда выработки возобновляемой энергии недостаточно, что значительно повышает стабильность и надежность электроснабжения.

Успешная реализация проекта микросети острова Чжэцзян не только обеспечила стабильное и надежное электроснабжение жителей острова, но и предоставила ценный опыт для разработки и продвижения технологии микросетей. Ожидается, что благодаря постоянному развитию технологий и постоянному расширению сфер применения технология микросетей станет

важной частью будущей энергетической системы. Это внесет большой вклад в продвижение зеленой энергетической трансформации и достижение целей устойчивого развития, а также окажет мощную поддержку созданию более чистой, эффективной и безопасной энергетической сети.

2.2 Гибридная энергетическая система.

Гибридные энергетические системы объединяют несколько форм энергии для повышения стабильности и надежности энергоснабжения. В современной энергетической системе гибридные энергетические системы постепенно становятся важным средством повышения надежности электросети. Эффективно интегрируя возобновляемые источники энергии, такие как энергия ветра и солнца, с традиционными источниками энергии, такими как уголь и природный газ, гибридная энергетическая система может не только компенсировать ограничения единого источника энергии, но и снизить зависимость от ископаемого топлива и выбросов парниковых газов за счет оптимизации энергетического баланса, тем самым способствуя устойчивому развитию.

2.2.1 Мультиэнергетическая взаимодополняющая модель ветра, солнца, воды, огня и хранения.

Ветровая и солнечная энергия: будучи основными источниками возобновляемой энергии, ветровая и солнечная энергия имеют выходные характеристики, которые демонстрируют значительную изменчивость и неопределенность. Для решения этой проблемы внедрение систем накопления энергии (включая аккумуляторные батареи и гидроаккумулирующие установки) может эффективно сбалансировать нестабильность энергоснабжения и обеспечить непрерывность энергоснабжения. Гидроэнергетика и тепловая энергетика: как регулируемая форма энергии гидроэнергетика может обеспечить дополнительную поддержку электроснабжения в часы пикового спроса на электроэнергию. Напротив, тепловая энергия обеспечивает стабильную базовую нагрузку, когда поставок возобновляемой энергии недостаточно. Система накопления

энергии: Оборудование для накопления энергии может накапливать избыточную энергию в периоды низкого спроса на электроэнергию и высвобождать ее в периоды пикового спроса, тем самым повышая гибкость и оперативность системы. Эта гибридная энергетическая система не только повышает стабильность электросети, но и снижает зависимость от традиционных ископаемых видов топлива и способствует экологически чистому преобразованию энергии. Кроме того, многоэнергетическая комплементарная модель с участием ветроэнергетики, солнечной энергии, гидроэнергетики, тепловой энергии и систем хранения энергии подчеркивает скоординированную оптимизацию источников энергии. Эти формы энергии не действуют независимо друг от друга, а дополняют и работают синергетически друг с другом. Например, при наличии достаточного количества ветровой и солнечной энергии система отдает приоритет использованию этих возобновляемых источников энергии для выработки электроэнергии и сохраняет излишки электроэнергии в системе накопления энергии. Когда поставок возобновляемой энергии недостаточно, гидро- и теплоэнергия служат дополнительными источниками, обеспечивающими стабильность электроснабжения. Эта совместная стратегия оптимизации не только повышает эффективность использования энергии, но и снижает затраты на нее, достигая двойной цели: экономической и экологической выгоды [18]. В то же время эта многоэнергетическая комплементарная модель является высокоинтеллектуальной. Благодаря передовым технологиям мониторинга и управления система может отслеживать состояние выработки электроэнергии различными источниками энергии и нагрузку на сеть в режиме реального времени, автоматически регулировать выходную мощность каждого источника энергии и обеспечивать стабильную работу сети. Кроме того, система может также делать прогнозы и оптимизировать работу на основе такой информации, как прогнозы погоды и спрос на рынке электроэнергии, что еще больше повышает энергоэффективность и надежность сети.

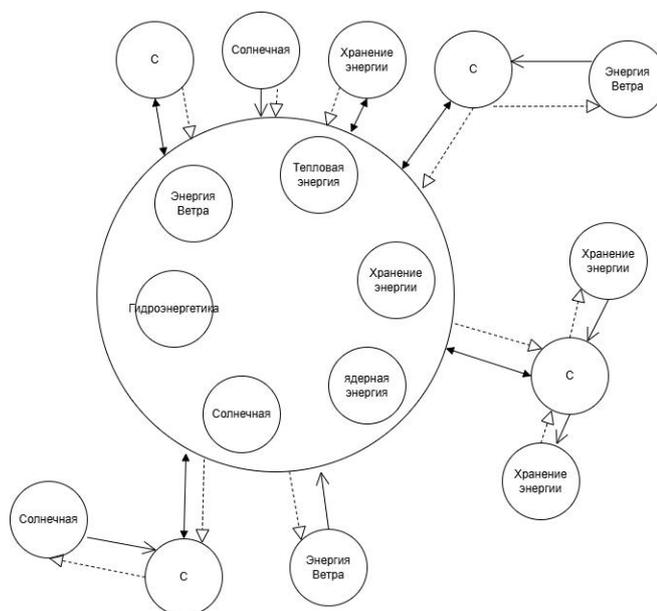


Рисунок 2-4. Блок-схема взаимодополняемости нескольких видов энергии: ветра, солнца, воды, огня и хранения

$$\min_{t=1}^T \left[\sum_{i \in G} C_i(P_{i,t}) + C_{curt}(P_{ren,t}^{curt}) \right] + \lambda SOC_t \quad (2.3)$$

Где: C_i : Функция стоимости генерации

G : Традиционный сбор единиц

$P_{ren,t}^{curt}$: Сокращение использования возобновляемых источников энергии

SOC_t : Состояние заряда накопителя энергии

Пример расчета: Планирование оптимизации с использованием нескольких источников энергии

Предположим, что параметры гибридной системы следующие: выходная мощность ветровой энергии составляет 50 МВт, солнечной энергии — 30 МВт, потребляемая нагрузка — 100 МВт, а эффективность разряда накопителя энергии — 0,95.

Цель оптимизации — минимизировать компенсацию тепловой мощности:

$$\min P_{thermal} = P_{load} - (P_w + P_{pv} + P_{bat} \eta) \quad (2.4)$$

Если разряд накопителя энергии составляет 20 МВт, то:

$$100 - (50 + 30 + 20 \times 0.95) = 100 - 99 = 1 \text{ MW}$$

Из этого следует, что для покрытия нагрузки необходим всего 1 МВт тепловой мощности, а уровень проникновения возобновляемой энергии достигает 99%.

2.2.2 Алгоритм управления совместными операциями.

Для достижения скоординированной работы нескольких видов энергии гибридная энергетическая система должна быть оснащена набором усовершенствованных алгоритмов управления скоординированной работой. Эти алгоритмы должны всесторонне учитывать множество факторов, таких как характеристики выработки электроэнергии различными источниками энергии, спрос на электроэнергию, прогнозы погоды и т. д., чтобы оптимизировать стратегии планирования и повысить эффективность работы системы. Типичные методы совместного управления включают в себя: Во-первых, стратегия предиктивного управления: использование анализа больших данных и технологий машинного обучения для прогнозирования мощности производства энергии и условий спроса, а также заблаговременного составления планов расписания. Во-вторых, оптимизируйте алгоритм планирования: например, стратегии планирования, основанные на генетических алгоритмах, оптимизации роя частиц и т. д., могут разумно планировать выработку электроэнергии и хранение энергии из различных источников в соответствии с затратами на выработку электроэнергии и колебаниями спроса в различные периоды времени. Наконец, механизм реагирования на спрос: сбалансируйте спрос и предложение, регулируя нагрузку, чтобы предотвратить перегрузку системы или потерю энергии.

2.2.3 Практика 100%-ного обеспечения чистой энергией в провинции Цинхай.

Провинция Цинхай является типичным примером в Китае, где проект был реализован путем крупномасштабного строительства объектов ветроэнергетики и фотоэлектрической энергетики в сочетании с гидроэнергетикой, накоплением энергии и другими технологиями. Компания успешно достигла цели 100%-ного обеспечения чистой энергией и реализовала устойчивое снабжение зеленой энергией. Успешный опыт Цинхая показывает, что путем рационального проектирования гибридной энергетической системы и оптимизации планирования ресурсов с помощью алгоритмов совместного управления можно эффективно справляться с волатильностью и неопределенностью энергоснабжения и обеспечивать стабильную работу электросети [19].



Рисунок 2-5 Фактическая картина системы электроснабжения чистой энергией в провинции Цинхай

$$LOLP = \sum_{j=1}^m (1 - e^{-\lambda_j t}) \left[1 - \Phi\left(\frac{C_{tot} - \mu L}{\delta L}\right) \right] \quad (2.5)$$

Где: λ_j : Интенсивность отказов j-го источника энергии

C_{tot} : Общая емкость системы

2.3 Ключевые цифровые технологии.

Будучи важной движущей силой трансформации и модернизации энергетической отрасли, ключевые цифровые технологии кардинально меняют методы эксплуатации и управления электросетями. Применение технологии блокчейн в торговле зеленой электроэнергией обеспечивает прозрачную, безопасную и отслеживаемую платформу для торговли энергией. Благодаря технологии блокчейн производители, потребители и торговцы зеленой электроэнергией могут создать децентрализованный механизм доверия, обеспечивающий справедливость и эффективность транзакций. Технология трехмерного моделирования цифрового двойника электросети реализует моделирование и прогнозирование состояния работы электросети в реальном времени. С помощью этой технологии менеджеры сетей могут интуитивно понимать рабочее состояние сети, своевременно выявлять потенциальные риски и принимать соответствующие превентивные меры. Платформа мониторинга Интернета вещей электросетей Цзянсу, являясь особым применением цифровых технологий в управлении электросетями, реализует мониторинг и анализ данных оборудования электросетей в режиме реального времени с помощью технологии Интернета вещей. Платформа не только повышает эффективность работы электросети, но и обеспечивает надежную поддержку интеллектуального управления электросетью.

2.3.1 Применение блокчейна в торговле зеленой электроэнергией.

С быстрым развитием чистой энергии торговля зеленой энергией постепенно стала ключевым механизмом для содействия преобразованию зеленой энергии. Технология блокчейн обеспечивает безопасное и надежное решение для торговли зеленой энергией. Благодаря своим распределенным, прозрачным и защищенным от несанкционированного доступа характеристикам она обеспечивает прозрачность процесса торговли энергией и защищенный от несанкционированного доступа характер данных. Конкретные приложения следующие: Механизм прослеживаемости зеленой энергии с помощью технологии блокчейн реализует точную

прослеживаемость зеленой энергии и ее экологических характеристик от источника энергии до конечного потребителя. Каждая степень зеленой энергии может быть зарегистрирована и проверена в блокчейне для обеспечения соответствия источника энергии экологическим нормам. Применение смарт-контрактов автоматизирует процесс торговли энергией, автоматически выполняется в соответствии с заданными условиями и реализует расчеты в режиме реального времени без участия посредников, тем самым значительно повышая эффективность транзакций и снижая затраты. Децентрализованная торговая платформа использует децентрализованные характеристики блокчейна, чтобы сделать торговлю зеленой энергией не ограниченной традиционным рынком торговли энергией, а через одноранговую (P2P) торговую платформу, эффективно снижая порог входа и способствуя открытости рынка и честной конкуренции. Кроме того, технология блокчейн создает безопасную среду для торговли зеленой энергией и эффективно предотвращает мошенничество. Благодаря технологии распределенного реестра все записи транзакций являются общедоступными и не могут быть подделаны, что обеспечивает дополнительные гарантии доверия для участников транзакций зеленой энергии. В то же время внедрение технологии блокчейн также способствовало инновациям и диверсификации зеленой энергии, позволяя электрогенерирующим предприятиям разных размеров участвовать в транзакциях зеленой энергии. Будь то большая ветряная электростанция или небольшая солнечная панель, электроэнергия может покупаться и продаваться через платформу блокчейна, эффективно активируя распределенные энергетические ресурсы [20]. Ожидается, что широкое применение этой технологии еще больше снизит стоимость зеленой электроэнергии, повысит ее конкурентоспособность на рынке, ускорит зеленую трансформацию глобальной энергетической структуры и создаст большие экологические преимущества.

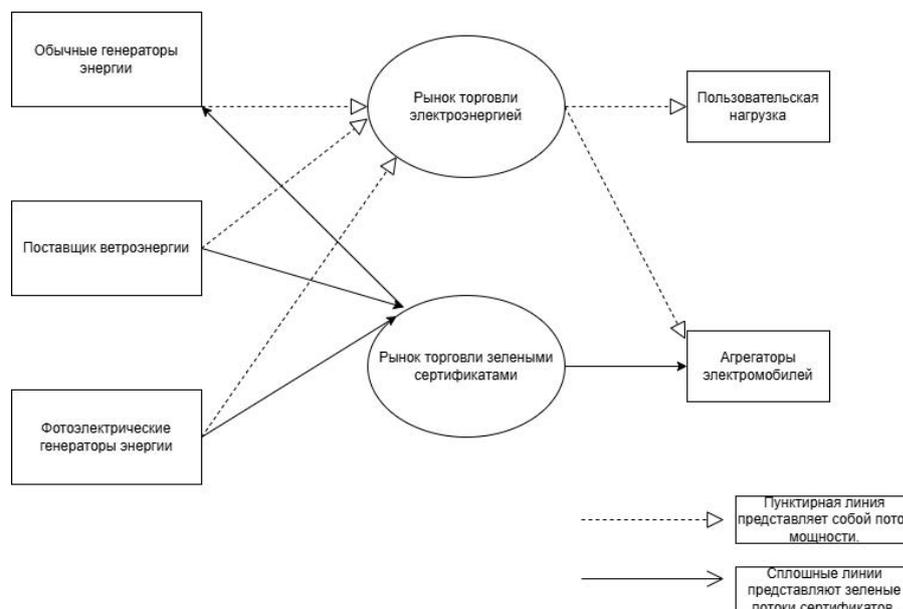


Рисунок 2-6. Схематическая диаграмма процесса транзакции зеленой электроэнергии на основе блокчейна

$$V_{tx} = \prod_{i=1}^n H(M_i)^{\omega_i} \bmod p \quad (2.6)$$

Где: H : Хэш-функции

M_i : Атрибут i -й транзакции (мощность/время/цена)

ω_i : Фактор веса атрибута

p : большие простые числа

2.3.2 Трехмерное моделирование цифровой двойниковой электросети.

Технология цифровых двойников реализует моделирование в реальном времени состояния работы электросети и различных физических процессов путем построения виртуальной модели электросети. В энергосистеме технология цифровых двойников использует передовую технологию трехмерного моделирования для создания виртуальной модели, которая полностью синхронизирована с реальной энергосистемой, что делает возможным динамическое моделирование и оптимизацию. К основным областям применения относятся: Диагностика неисправностей и раннее оповещение: благодаря мониторингу различных параметров электросети в режиме реального времени технология цифровых двойников позволяет

заранее обнаруживать потенциальные неисправности электросети и выдавать ранние предупреждения с помощью виртуальных имитационных моделей, тем самым эффективно предотвращая возникновение неисправностей. Оптимизированное планирование: данные в реальном времени, предоставляемые технологией цифровых двойников, позволяют точно рассчитать нагрузку электросети, оптимизировать распределение ресурсов и планирование, тем самым повышая эффективность работы электросети и обеспечивая стабильность и надежность электроснабжения [21].

$$A_{DT} = 1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y_k - z_k)^2}}{\max(y_k)} \quad (2.7)$$

Где y_k : Фактическое прогнозируемое значение

z_k : Прогнозируемое значение цифрового двойника

N : Количество образцов

2.3.3 Платформа мониторинга Интернета вещей электросети Цзянсу.

Компания Jiangsu Power Grid Company создала комплексную платформу мониторинга с помощью технологии Интернета вещей, реализующую сбор данных в режиме реального времени и анализ всех аспектов работы электросети. Платформа объединяет большое количество датчиков, интеллектуальных устройств и систем анализа данных, которые могут отслеживать рабочее состояние электросети в режиме реального времени, обнаруживать и локализовать неисправности, а также предоставлять поддержку данных для оптимизации планирования работы электросети. Основные преимущества платформы мониторинга IoT отражены в следующих аспектах: возможность мониторинга в реальном времени, которая позволяет собирать данные о работе сети в реальном времени, такие как ключевые параметры, такие как напряжение, ток и частота, для обеспечения стабильности сети; возможность точного анализа, благодаря технологии анализа больших данных, платформа IoT может

выявлять потенциальные точки риска и узкие места, а также внедрять превентивные корректировки; Возможность автоматизированной эксплуатации и обслуживания, применение технологии IoT поддерживает автоматизированное обслуживание и устранение неисправностей сети, сокращает ручное вмешательство и повышает эффективность эксплуатации и обслуживания [22]. Благодаря применению этих технологий надежность и эффективность работы электросети провинции Цзянсу значительно повысились, став образцом для построения интеллектуальных сетей.

Кроме того, платформа мониторинга IoT также обладает мощными возможностями масштабирования и совместного управления. Благодаря поддержке технологии связи 5G платформа достигла высокоскоростного соединения и малой задержки отклика массивных устройств, заложив прочную основу для доступа к более распределенной энергии (например, фотоэлектрическим, ветроэнергетическим) и системам хранения энергии в будущем. Платформа использует архитектуру, которая объединяет периферийные вычисления и облачные вычисления. При выполнении предварительной обработки данных на локальных узлах она использует вычислительную мощность облака для глубокого обучения модели, что повышает точность предиктивного обслуживания до более чем 92%.

С точки зрения защиты безопасности платформа использует технологию блокчейна, чтобы гарантировать, что данные не могут быть подделаны, и устанавливает многоуровневую систему шифрования для предотвращения сетевых атак. Модуль «цифровой двойник электросети», который был введен в опытную эксплуатацию в 2023 году, реализует отображение в реальном времени физических электросетей и виртуальных моделей с помощью технологии трехмерной визуализации и помогает персоналу по эксплуатации и обслуживанию в моделировании решений по устранению неисправностей. Эти инновации сократили время восстановления после сбоев в подаче электроэнергии в электросети Цзянсу на 40% и увеличили новую мощность поглощения энергии на 18%, что стало

важным ориентиром для цифровой трансформации национальной электроэнергетики.

2.4 Краткое изложение данной главы

Надежность и автономность местных электросетей были улучшены за счет централизованной/распределенной архитектуры и стратегии управления виртуальной синхронизацией VSG (например, случай острова Чжэцзян). На основе модели мультиэнергетической взаимодополняемости ветра, солнца, воды, огня и хранения и алгоритма совместной работы (например, практика 100% чистой энергии в провинции Цинхай) была улучшена способность электросети справляться с волатильностью и обеспечивать долгосрочное стабильное электроснабжение. Применение блокчейна (торговля зеленой электроэнергией), цифровых близнецов (3D-моделирование) и Интернета вещей (платформа мониторинга Цзянсу) позволило добиться прозрачного, точного и интеллектуального управления работой электросети.

3. ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ К СЕТЯМ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ.

Интеграция возобновляемой энергии в сеть является важной проблемой, стоящей перед современным энергетическим сектором, и ее основные ключевые проблемы включают в себя множество аспектов. Во-первых, нельзя игнорировать технические проблемы. Из-за прерывистого и неопределенного выхода возобновляемой энергии (такой как энергия ветра и фотоэлектрическая энергия), как обеспечить стабильную работу частоты и напряжения сети стало основной проблемой. Это требует от нас постоянного внедрения инноваций в технологию подключения к сети, например, повышения точности прогнозирования и усиления соответствия гибких ресурсов регулировки (таких как хранение энергии) для повышения гибкости и адаптивности сети. Во-вторых, проблемы эксплуатации и управления сетью также являются серьезным препятствием в процессе интеграции возобновляемой энергии. С широкомасштабным доступом к возобновляемой энергии эксплуатация и управление сетью станут более сложными[23], и необходимо срочно разработать новое поколение систем диспетчеризации. Как эффективно диспетчеризировать и управлять этими большими и разбросанными распределенными источниками энергии для обеспечения безопасной и эффективной работы сети, является неотложной проблемой, которую необходимо решить. Наконец, барьеры рыночного механизма также являются ключевым фактором, ограничивающим интеграцию возобновляемой энергии в сеть. В настоящее время конкурентоспособность возобновляемой энергии на рынке электроэнергии все еще нуждается в улучшении, отчасти потому, что рост системных издержек, вызванный ее характеристиками, не был разумно направлен. Как создать справедливый и разумный рыночный механизм и разработать эффективную политику стимулирования и поддерживающие правила (такие как торговля зелеными

сертификатами и рынок дополнительных услуг) является важной частью продвижения процесса интеграции возобновляемой энергии.

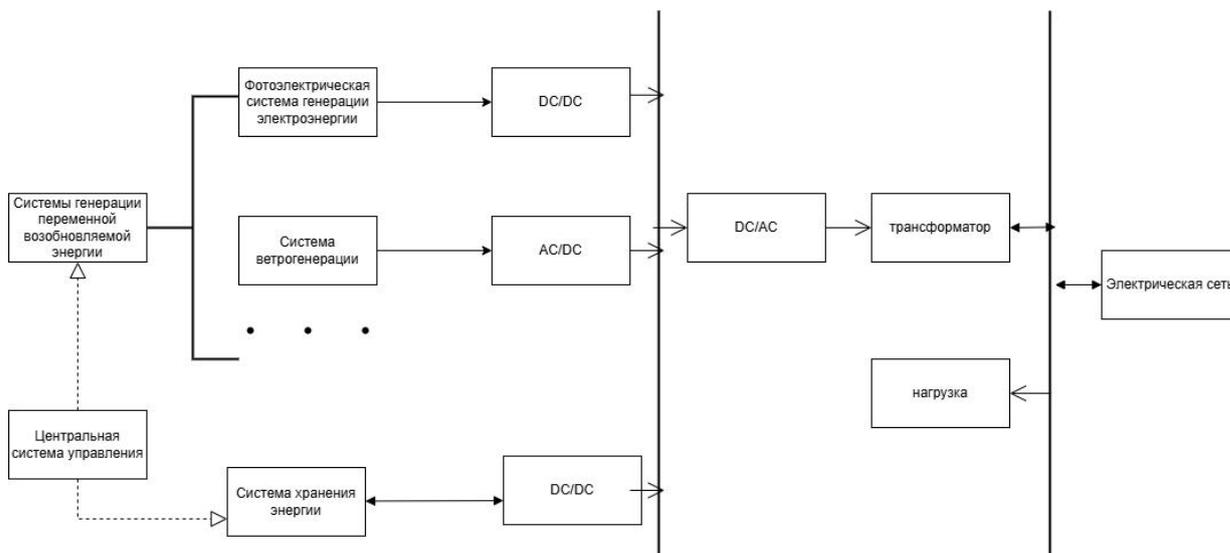


Рисунок 3-1 Классификация технических проблем при подключении к сети возобновляемых источников энергии

3.1 Технические проблемы.

На фоне глобальной энергетической трансформации в данном исследовании рассматриваются многочисленные технические проблемы, возникающие при подключении к сетям возобновляемой энергии, и ищутся решения. Снижение инерции системы стало важной проблемой, особенно после того, как в сеть была интегрирована крупномасштабная возобновляемая энергетика, что существенно повлияло на способность сети к динамическому реагированию. Если взять в качестве примера Северо-Китайскую энергосистему, то инерция системы снизилась примерно на 40%. Снижение инерции напрямую приводит к увеличению риска колебаний частоты сети, что создает потенциальную угрозу стабильности энергосистемы. Для решения этой проблемы исследователи активно разрабатывают новые стратегии управления и технологии хранения энергии, чтобы повысить инерционную способность реагирования электросети и обеспечить стабильную работу энергосистемы [24].

В то же время нельзя игнорировать проблему контроля стабильности напряжения. Из-за непостоянства и неопределенности возобновляемой энергии проблема колебаний напряжения в сети становится все более серьезной, создавая беспрецедентные проблемы в области контроля стабильности напряжения. Ключом к решению этой проблемы является оптимизация стратегии управления напряжением и ее сочетание с передовыми технологиями мониторинга и прогнозирования для достижения точного регулирования напряжения и обеспечения стабильной работы электросети.

Кроме того, важной технической проблемой, с которой приходится сталкиваться при подключении к сетям возобновляемой энергии, является недостаточная мощность короткого замыкания. При широкомасштабном доступе к возобновляемым источникам энергии уровень тока короткого замыкания в электросети может превысить несущую способность исходного оборудования, что создаст угрозу безопасной работе электросети. Поэтому разработка новых технологий ограничения токов короткого замыкания и решений по модернизации оборудования становится ключом к решению этой проблемы. Для решения проблемы недостаточной устойчивости к коротким замыканиям отрасль активно изучает различные решения. С одной стороны, путем улучшения структуры сети, например, путем добавления последовательных реакторов и других мер, можно эффективно ограничить величину тока короткого замыкания и защитить сетевое оборудование от повреждений. С другой стороны, разработка новых высокоомных трансформаторов и автоматических выключателей также является важным способом повышения устойчивости электросети к коротким замыканиям. Эти новые устройства не только выдерживают более высокие токи короткого замыкания, но и способны быстро отключать цепь при возникновении неисправности, предотвращая распространение неисправности и обеспечивая общую безопасность электросети.

В то же время модернизация старого электросетевого оборудования и повышение его токоотдающей способности также является одной из важных мер по решению проблемы недостаточной токоотдающей способности. Реализуя эти комплексные меры, мы уверены, что сможем преодолеть технические трудности при подключении возобновляемых источников энергии к сети, содействовать широкому использованию возобновляемых источников энергии и внести вклад в экологически чистое и низкоуглеродное энергетическое будущее.

3.1.1. Количественный анализ снижения инерции системы.

С интеграцией возобновляемых источников энергии, особенно ветровой и солнечной энергии, инерционность реакции традиционных энергосистем значительно снизилась. Инерционный отклик является ключевым механизмом, позволяющим энергосистемам справляться с колебаниями частоты, однако ветро- и фотоэлектрическая генерация энергии не имеет инерции, что приводит к увеличению колебаний частоты системы. По мере увеличения доли возобновляемой энергии в энергосистеме Северного Китая инерция системы снизилась примерно на 40% [25]. Это изменение затрудняет регулирование частоты электросети при колебаниях нагрузки и нестабильной выработке электроэнергии. Количественный анализ может помочь оценить влияние снижения инерции на устойчивость системы и предоставить теоретическую основу для улучшения системы. Формула количественного анализа:

$$H_{sys} = \frac{\sum H_i \cdot S_i}{S_{total}} \quad (3.1)$$

Где: H_{sys} : Общая инерция системы

H_i : Постоянная инерции i -го синхронного агрегата

S_i : Номинальная мощность i -го синхронного агрегата

Пример расчета: Влияние снижения инерции в электросети Северного Китая. Предположим, что параметры Северо-Китайской электросети следующие:

Первоначальная инерция системы составляет 6,0 с, а эквивалентная инерция после того, как уровень проникновения возобновляемой энергии достигнет 40%, составит 3,6 с (уменьшение на 40%), а возмущение скачка нагрузки составит 0,1 о.е.

Согласно уравнению инерционного отклика

$$\frac{df}{dt} = -\frac{\delta P}{2H} \quad (3.2)$$

Рассчитаем скорость изменения частоты:

До преобразования:

$$\text{После преобразования: } \frac{df}{dt_{new}} = -\frac{0.1}{2 * 3.6} = -0.0139 \text{ p.u./s}$$

Согласно результатам, уменьшение инерции приводит к увеличению скорости изменения частоты на 67%, а для дополнения виртуальной инерции необходимы технологии накопления энергии или VSG.

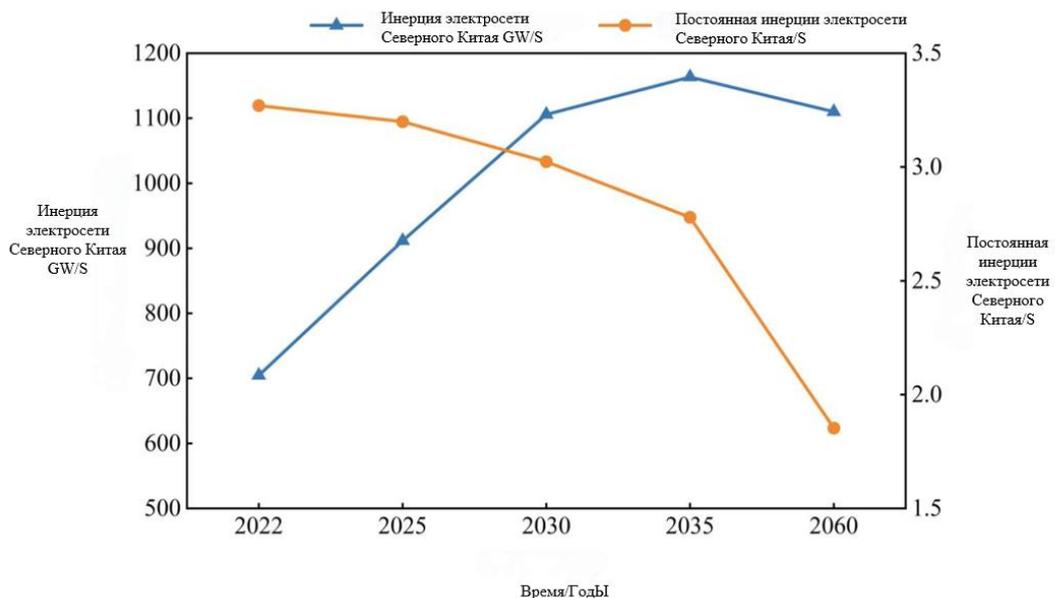


Рисунок 3-2: Сравнение данных по снижению инерции сети

3.1.2. Проблема контроля стабильности напряжения.

В современных энергосистемах стабильность напряжения сети имеет решающее значение для обеспечения безопасности и надежности электроснабжения. Стабильность напряжения не только напрямую влияет на нормальную работу электрооборудования, но и связана с гарантией качества электроэнергии и экономичностью электросети. Однако в связи с быстрым развитием возобновляемых источников энергии во всем мире, особенно с широкомасштабным использованием фотоэлектрической и ветровой энергии, стабильность напряжения в электросети сталкивается с беспрецедентными проблемами. Нестабильные характеристики фотоэлектрической и ветровой энергетики вызывают частые колебания напряжения в сети. Изменения природных факторов, таких как скорость ветра и интенсивность света, напрямую влияют на выработку электроэнергии, что затрудняет регулирование напряжения в сети. Традиционные методы и оборудование регулирования напряжения, такие как автоматические регуляторы напряжения (АРН) и статические компенсаторы реактивной мощности (СКМ), способны регулировать напряжение в определенной степени, но их скорость реагирования и стабильность уже не способны справиться с частыми колебаниями, вызванными крупномасштабной возобновляемой энергетикой. При столкновении с такими колебаниями напряжение в электросети может быть слишком высоким или слишком низким. В тяжелых случаях это может даже привести к повреждению или отключению оборудования электросетей, что повлияет на надежность электроснабжения и качество электроэнергии, потребляемой потребителями. Формула управления напряжением:

$$\frac{dQ}{dV} > 0 \quad \frac{dQ}{dF} < 0 \quad (\text{Стабильные условия}) \quad (3.3)$$

Где: Q: Реактивная мощность

V: Амплитуда напряжения

Для решения этой проблемы энергосистеме необходимо срочно внедрить более совершенную и интеллектуальную технологию управления напряжением. Будучи новой технологией силовой электроники, виртуальная синхронная машина (VSM) широко используется для решения проблемы стабильности напряжения, вызванной возобновляемой энергией. Моделируя инерционные и демпфирующие характеристики традиционных синхронных генераторов, виртуальная синхронная машина может быстро регулировать напряжение электросети без механической инерции традиционных генераторов, обеспечивая более эффективное и стабильное управление напряжением. Кроме того, устройства, основанные на технологии силовой электроники, такие как статические синхронные компенсаторы (СТАТКОМы) и системы накопления энергии, также играют все более важную роль в регулировании напряжения [26]. Эти устройства способны обеспечивать регулирование реактивной мощности и распределение энергии в режиме реального времени, быстро реагировать на колебания напряжения в сети и помогать сглаживать проблемы с напряжением, вызванные колебаниями в возобновляемой энергии. Благодаря постоянному развитию силовой электроники и технологий накопления энергии будущие энергосистемы будут обладать большей гибкостью и скоростью реагирования, обеспечивая надежную поддержку сетевого подключения крупномасштабных возобновляемых источников энергии, а также предоставляя более надежные гарантии безопасной, стабильной и эффективной работы электросетей.

3.1.3. Решение проблемы недостаточной емкости короткого замыкания.

С трансформацией глобальной энергетической структуры к энергосистеме подключается все больше возобновляемых источников энергии. В частности, с широким распространением систем распределенной генерации электроэнергии, таких как ветроэнергетика и солнечная энергетика, условия эксплуатации электросети существенно изменились. Эти системы генерации электроэнергии на основе возобновляемых источников энергии характеризуются большими колебаниями выходной мощности и

низкой устойчивостью к коротким замыканиям, что приводит к относительно небольшим токам короткого замыкания в традиционных электросетях при возникновении неисправностей. Мощность короткого замыкания — это максимальная величина тока, которую может обеспечить электросеть при возникновении короткого замыкания. Он играет жизненно важную роль в стабильности и безопасности электросети. Электросеть с достаточно большой емкостью короткого замыкания может обеспечить достаточно сильный ток при возникновении неисправности, чтобы вызвать срабатывание защитного устройства, быстро определить неисправность и изолировать неисправный участок, гарантируя, что остальная часть электросети сможет продолжать стабильную работу. Однако с ростом доли возобновляемой генерации энергии, особенно с появлением систем распределенной генерации, общая мощность короткого замыкания электросети значительно снизилась, поскольку эти источники энергии, как правило, не обладают высокой мощностью короткого замыкания, что приводит к снижению тока короткого замыкания. Традиционные системы защиты не всегда способны своевременно обнаруживать неисправности, что приводит к невозможности эффективно изолировать зону неисправности, что, в свою очередь, увеличивает риск расширения неисправности в сети. В тяжелых случаях это может привести к масштабным отключениям электроэнергии или коллапсу системы, что повлияет на безопасную работу электросети.

Для устранения потенциальных угроз безопасности, вызванных снижением мощности короткого замыкания, необходимо принять ряд мер по повышению способности электросети обрабатывать неисправности. С одной стороны, можно повысить устойчивость электросети к коротким замыканиям, добавив в нее синхронные двигатели, регулирующие трансформаторы и другое оборудование.

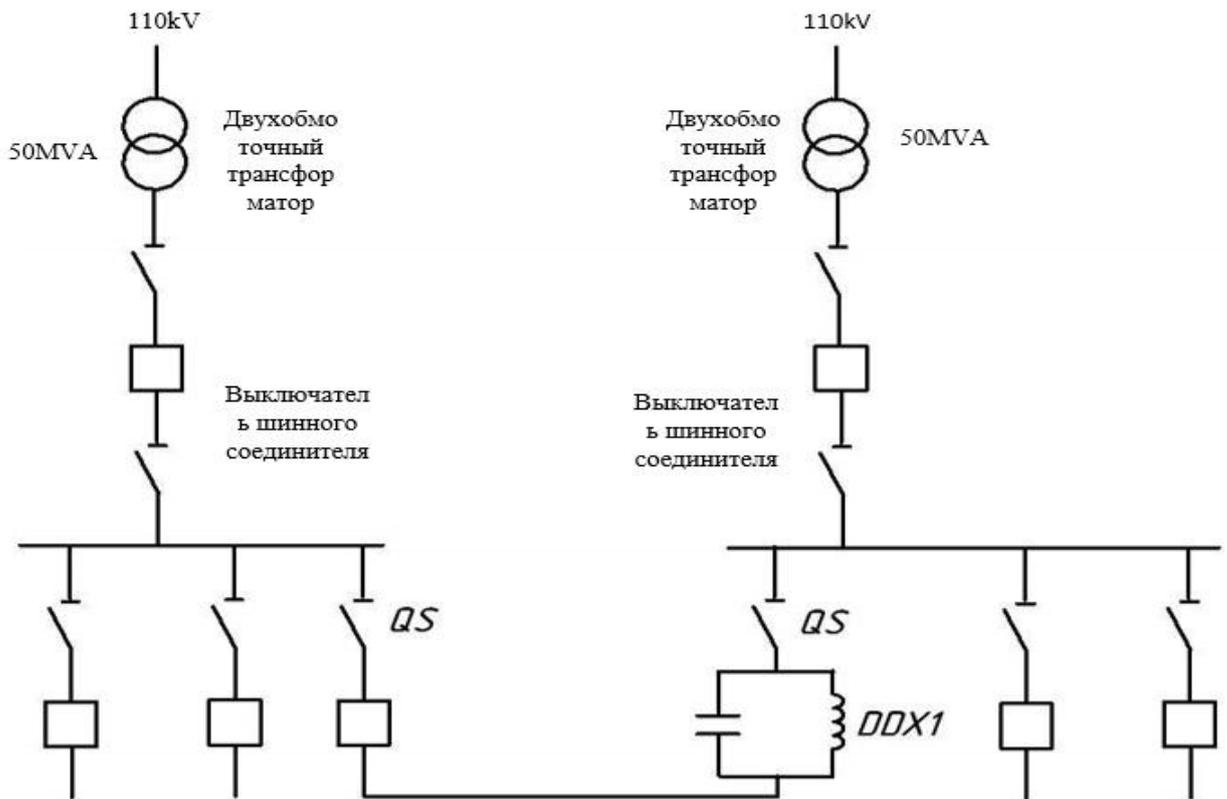


Рисунок 3-3 Ограничитель тока короткого замыкания

Синхронные двигатели выполняют функцию регулирования напряжения сети и обеспечения реактивной мощности в электросети. Их работа может усилить ток короткого замыкания электросети и улучшить ее способность выдерживать короткие замыкания. При возникновении короткого замыкания синхронный двигатель в электросети может обеспечить достаточный ток короткого замыкания, тем самым помогая защитному устройству сработать быстрее и изолировать зону короткого замыкания. Являясь одним из важных видов оборудования в электросети, регулирующий трансформатор может динамически регулировать напряжение в соответствии с изменениями нагрузки электросети, повышать ее устойчивость и улучшать устойчивость к коротким замыканиям. С другой стороны, в дополнение к совершенствованию оборудования, оптимизация стратегий защиты также является ключом к улучшению возможностей электросети по управлению короткими замыканиями. Традиционные стратегии защиты часто

основываются на установленном пороговом значении тока короткого замыкания. Если ток короткого замыкания ниже установленного значения, защитное устройство может не сработать вовремя. Таким образом, использование технологии высокочастотного автоматического повторного включения позволяет быстро обнаруживать неисправности и оперативно переключать цепи после возникновения короткого замыкания в электросети, выполняя операции автоматического повторного включения, чтобы гарантировать быстрое восстановление подачи электроэнергии в неисправную зону и избежать длительных отключений электроэнергии и выхода из строя электросети. Кроме того, в современные электросети можно внедрить цифровую технологию защиты для повышения точности определения местоположения и изоляции неисправностей за счет интеллектуального обнаружения и анализа неисправностей, чтобы защитные устройства могли более чувствительно и точно определять неисправности и сокращать задержки срабатывания защиты, вызванные снижением мощности короткого замыкания. Комплексное применение усовершенствований оборудования и интеллектуальных стратегий защиты может эффективно улучшить возможности реагирования и восстановления сети после сбоев, гарантируя, что сеть по-прежнему сможет работать стабильно и безопасно при подключении к большому количеству возобновляемой энергии.

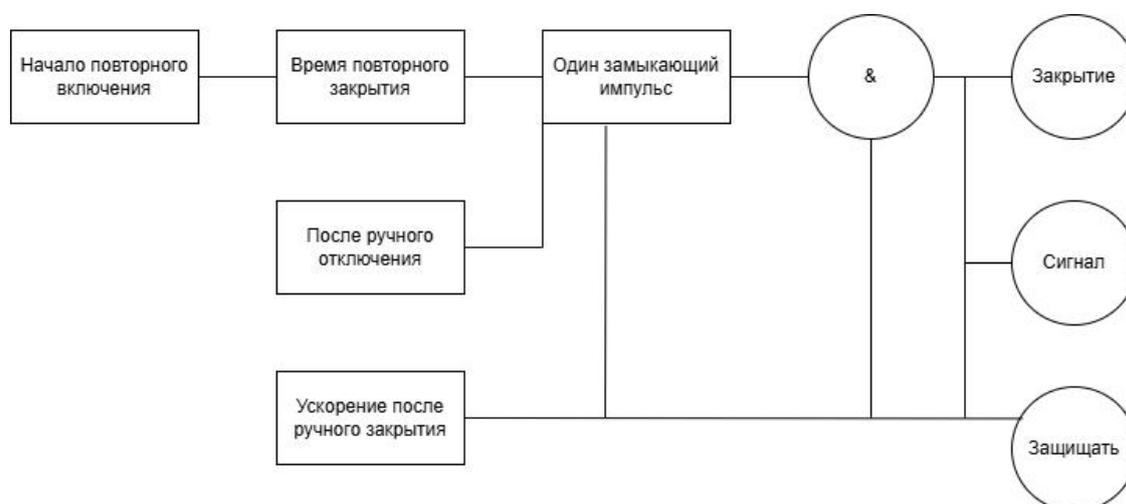


Рисунок 3-4 Принципиальная схема трехфазного первичного автоматического повторного включения

3.2 Вопросы эксплуатации и управления.

После подключения возобновляемых источников энергии к сети эксплуатация и управление электросетью сталкиваются с новыми проблемами. Из-за неопределенности и непостоянства производства возобновляемой энергии традиционные модели диспетчеризации и управления сетями требуют адаптивной трансформации. Во-первых, точность прогнозирования выработки возобновляемой энергии напрямую влияет на план диспетчеризации и эффективность работы электросети, поэтому необходимо изучать и применять передовые технологии прогнозирования для повышения точности прогнозирования мощности. Во-вторых, поскольку доля возобновляемой энергии продолжает расти, необходимо также соответствующим образом скорректировать модель диспетчеризации сети, чтобы адаптировать ее к потребностям доступа и диспетчеризации новых источников энергии. Наконец, адаптивная трансформация системы защиты также является важной частью управления эксплуатацией. Необходимо модернизировать и оптимизировать систему защиты в ответ на новые риски и вызовы, возникающие в связи с подключением к сети возобновляемых источников энергии, чтобы обеспечить безопасную и стабильную работу электросети.

3.2.1 Методы повышения точности прогнозирования мощности.

Генерация возобновляемой энергии, такой как энергия ветра и солнца, создает большие проблемы для распределения электроэнергии в энергосистемах из-за присущей ей нестабильности и непредсказуемости. Традиционные методы прогнозирования электроэнергии обычно опираются на метеорологические данные, исторические данные о выработке электроэнергии и физические модели.

Однако эти методы часто не позволяют давать точные прогнозы при наличии сложных и нелинейных метеорологических изменений. Неопределенность изменений погоды, сезонные колебания, скорость ветра, интенсивность солнечного сияния и другие факторы будут влиять на

выработку электроэнергии из возобновляемых источников энергии. Изменения этих факторов носят в высшей степени случайный и динамичный характер, в результате чего точность прогнозирования традиционными методами часто не может удовлетворить требования энергосистемы к эффективному планированию. Поэтому при наличии таких колебаний энергосистема подвержена ошибкам планирования, что влияет на стабильность и экономичность электроснабжения.

В последние годы технологии искусственного интеллекта (ИИ), особенно глубокое обучение и машинное обучение, широко используются в прогнозировании возобновляемой энергетики и достигли значительного прогресса. Благодаря глубокому изучению больших объемов исторических данных алгоритмы ИИ могут эффективно выявлять сложные закономерности в данных, тем самым повышая точность прогнозов энергопотребления. Такие модели, как глубокие нейронные сети (DNN) и сети с долговременной краткосрочной памятью (LSTM), способны улавливать комплексное влияние таких факторов, как ветер, солнечная радиация и температура, на выработку электроэнергии на основе исторических данных, а также могут автоматически оптимизировать модели прогнозирования, демонстрируя высокую адаптивность в условиях изменения климата и чрезвычайных погодных ситуаций.

По сравнению с традиционными методами прогнозирования алгоритмы ИИ могут лучше обрабатывать сложные временные ряды данных и уменьшать ошибки в краткосрочном и долгосрочном прогнозировании мощности, обеспечивая более надежные результаты прогнозирования [27].

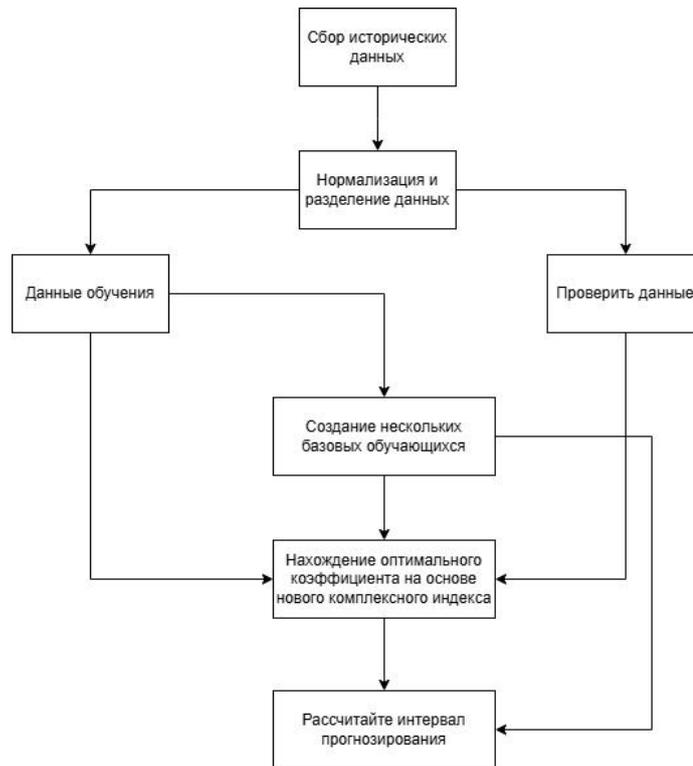


Рисунок 3-5 Метод и процесс прогнозирования диапазона мощности генерации возобновляемой энергии на основе ансамблевого обучения

$$h_t = \sigma(W_h [h_{t-1}, x_t] + b_h) \quad (\text{LSTM обновление состояния ячейки}) \quad (3.4)$$

Где: h_t : Скрытое состояние в момент времени t

σ : Функция активации

W_h, b_h : Матрица весов и смещение

Пример расчета: сравнение ошибок прогнозирования LSTM

Данные измерений ветряной электростанции:

Среднеквадратичное отклонение традиционной модели ARIMA составляет 8,5%.

Параметры модели LSTM: 128 скрытых слоев, dropout=0.2

Среднеквадратическая ошибка результата прогноза составляет 4,2%.

Количественная оценка эффекта улучшения:

$$\text{Повышенная точность} = (8.5\% - 4.2\%) \div 8.5\% \times 100\% = 50.6\%$$

Из результатов видно, что LSTM снижает ошибку прогнозирования на 50,6%, что значительно лучше, чем у традиционного метода.

Кроме того, технология искусственного интеллекта может еще больше снизить неопределенность в планировании работы энергосистемы. Благодаря высокоточным прогнозам энергосистема может более точно распределять энергию, оптимизировать работу сети и избегать дисбаланса спроса и предложения, вызванного ошибками прогнозирования. В практическом применении алгоритмы ИИ могут не только повысить точность прогнозов, но и обновлять модели прогнозирования в режиме реального времени и быстро реагировать на внешние изменения, тем самым помогая операторам электроэнергетики разрабатывать более гибкие и эффективные планы диспетчеризации. Благодаря развитию и применению технологий искусственного интеллекта энергосистема сможет лучше справляться с волатильностью возобновляемой энергии и оказывать надежную поддержку достижению целей интеллектуальных сетей и зеленой энергетики.

3.2.2. Сравнительный анализ новых режимов планирования.

Традиционные модели диспетчеризации электроэнергии обычно основаны на диспетчеризации нагрузки, то есть на регулировании выработки электроэнергии в соответствии с изменениями в нагрузке. Этот метод планирования относительно прост, обычно удовлетворяет спрос за счет фиксированных планов выработки электроэнергии и не позволяет реагировать на нестабильность возобновляемой энергии. В связи с быстрым развитием возобновляемой энергетики во всем мире, особенно с ростом доли неконтролируемых источников энергии, таких как энергия ветра и солнца, в энергосистеме, традиционным моделям диспетчеризации стало сложно справляться с проблемами волатильности и неопределенности. Выработка электроэнергии из возобновляемых источников энергии зависит от таких факторов, как погода и времена года, она существенно варьируется и ее трудно предсказать, что оказывает большое давление на стабильную работу электросети и надежность электроснабжения.

Для решения этой задачи появилось много новых моделей планирования. Планирование в реальном времени на основе моделей прогнозирования — это способ использования метеорологических прогнозов и исторических данных о выработке электроэнергии для составления прогнозов в реальном времени относительно выработки электроэнергии из возобновляемых источников, тем самым динамически корректируя планы по выработке электроэнергии. Эта модель может в определенной степени уменьшить дисбаланс сети, вызванный колебаниями возобновляемой энергии, и повысить гибкость и эффективность энергосистемы [28]. Гибкое распределение нагрузки подразумевает реагирование на колебания спроса и предложения электроэнергии путем гибкой регулировки спроса на нагрузку со стороны пользователя. Например, с помощью интеллектуальных счетчиков и систем управления нагрузкой пользователи могут автоматически снижать свою электрическую нагрузку в периоды дефицита электроэнергии или увеличивать ее в периоды избыточного электроснабжения, тем самым достигая цели балансировки нагрузки сети. Планирование реагирования на спрос мобилизует поведение пользователей в отношении потребления электроэнергии с помощью стимулов (например, корректировки цен), заставляя их активно сокращать потребление электроэнергии в периоды пикового спроса на электроэнергию или увеличивать потребление электроэнергии в периоды низкого спроса, помогая электросети работать бесперебойно. Конкретная формула выглядит следующим образом:

$$\min_{t=1}^T (C_{gen}(t) + \lambda |P_{load}(t) - P_{target}(t)|) \quad (3.5)$$

Где: P_{target} : Кривая целевой нагрузки

λ : Фактор штрафа за отклонение нагрузки

Формула 3-5: Целевая функция гибкого распределения нагрузки

Каждый из этих новых режимов планирования имеет свои особенности. При планировании в реальном времени на основе моделей прогнозирования точность прогноза напрямую влияет на эффективность планирования и

предъявляет высокие требования к вычислительным ресурсам. Гибкое планирование нагрузки и планирование реагирования на спрос могут повысить способность сети адаптироваться к колебаниям нагрузки, но они могут столкнуться с трудностями в плане участия и принятия пользователей в ходе внедрения. Сравнительный анализ различных режимов диспетчеризации поможет выбрать наиболее подходящую стратегию диспетчеризации в соответствии с реальной ситуацией в электросети, тем самым повысив надежность и эффективность работы электросети. Например, в энергосистеме, которая в значительной степени зависит от возобновляемых источников энергии, более эффективными могут быть распределение нагрузки в режиме реального времени и гибкое распределение нагрузки на основе моделей прогнозирования, тогда как в районах с большими колебаниями нагрузки распределение нагрузки в зависимости от спроса может быть хорошей дополнительной мерой. Благодаря научному и рациональному выбору метода диспетчеризации энергосистема может более стабильно и эффективно реагировать на вызовы, связанные с возобновляемыми источниками энергии.

3.2.3. План адаптивной трансформации системы защиты.

В связи с быстрым развитием возобновляемой энергетики и постоянным расширением масштабов подключения к сети механизм защиты традиционной энергосистемы сталкивается с серьезными проблемами. В частности, ветровые и фотоэлектрические электростанции, поскольку их методы выработки электроэнергии отличаются от традиционной тепловой энергетики, атомной энергетики и т. д., обладают характеристиками изменчивости и прерывистости. Эти характеристики могут привести к отказу или неправильной работе традиционных систем релейной защиты при работе с электростанциями, использующими возобновляемые источники энергии, такими как ветровые и фотоэлектрические электростанции. Например, выходная мощность ветровых и фотоэлектрических электростанций сильно зависит от изменений погоды, что приводит к частым колебаниям частоты и

напряжения в сети. Традиционные системы защиты часто не способны своевременно и эффективно выявлять и обрабатывать эти динамические изменения, что влияет на стабильность и безопасность сети.

Чтобы справиться с этими изменениями, необходимо модернизировать и трансформировать механизм защиты энергосистемы. Это включает в себя корректировку логики релейной защиты, чтобы она могла точно определять и реагировать на характеристики неисправностей распределенной генерации. Например, традиционная токовая защита может оказаться неспособной эффективно определять изменения характеристик тока короткого замыкания, вызванные распределенными источниками питания. Поэтому необходимо внедрять методы защиты, основанные на мощности или частоте, или применять интеллектуальные адаптивные алгоритмы защиты [29]. Кроме того, необходимо соответствующим образом модернизировать аппаратное и программное обеспечение защитного оборудования для поддержки более высокочастотных измерений и более высокой скорости реагирования, тем самым гарантируя, что в различных условиях неисправности система сможет быстро отключить зону неисправности и предотвратить дальнейшее повреждение электросети.

В то же время, с развитием микросетей и виртуальных электростанций, структура и функционирование энергосистем стали более сложными. Микросети могут саморегулироваться и работать в соответствии с различными потребностями, а виртуальные электростанции оптимизируют электроснабжение за счет централизованного распределения нескольких распределенных энергетических ресурсов. Такая структура системы требует от системы защиты большей гибкости и интеллекта для адаптации к различным топологиям сети и требованиям к нагрузке. Интеллектуальная система защиты может не только отслеживать рабочее состояние электросети в режиме реального времени, но и автоматически корректировать стратегию защиты в соответствии с текущими условиями электроснабжения и спроса, чтобы обеспечить быстрое реагирование в случае внезапных сбоев или

колебаний системы, а также эффективно защищать безопасность и стабильность электросети.

Поэтому повышение интеллектуальности и гибкости защиты энергосистемы стало важным направлением развития современного сетевого подключения возобновляемых источников энергии. Трансформируя и модернизируя систему защиты, мы можем лучше адаптироваться к характеристикам возобновляемых источников энергии, таких как ветроэнергетика и фотоэлектричество, повысить надежность электросети и обеспечить стабильность и безопасность электроснабжения.

3.3 Барьеры рыночного механизма.

В процессе подключения к сетям возобновляемой энергетики барьеры рыночных механизмов стали одной из проблем, требующих безотлагательного решения. Действующий механизм ценообразования на электроэнергию имеет много недостатков при крупномасштабном подключении к сетям возобновляемых источников энергии. Из-за непостоянного и неопределенного характера производства возобновляемой энергии, стоимость электроэнергии сложно рассчитать точно, в результате чего механизм ценообразования на электроэнергию не может адекватно отражать истинную стоимость возобновляемой энергии. Это не только влияет на энтузиазм компаний, занимающихся производством электроэнергии из возобновляемых источников, но и препятствует дальнейшему продвижению и применению возобновляемых источников энергии [30].

Кроме того, отставание в формировании рынка дополнительных услуг также является важным проявлением барьеров рыночного механизма. После подключения возобновляемой энергии к сети электросеть должна предоставлять больше вспомогательных услуг для поддержания стабильной работы, таких как регулирование частоты и регулирование пиковой нагрузки. Однако современный рынок дополнительных услуг по-прежнему несовершенен, а механизм ценообразования необоснован, что приводит к

отсутствию энтузиазма среди поставщиков дополнительных услуг и затрудняет удовлетворение потребностей эксплуатации сетей. Барьеры при межпровинциальных транзакциях также являются ключевым фактором, ограничивающим подключение к сетям возобновляемой энергии. Из-за серьезной сегментации рынков электроэнергии между различными регионами существует множество препятствий для межпровинциальных сделок по электроэнергии, таких как непоследовательные правила торговли и высокие транзакционные издержки. Это не только ограничивает межрегиональное потребление возобновляемой энергии, но и влияет на честную конкуренцию и повышение эффективности на рынке электроэнергии.

3.3.1. Недостатки действующего механизма ценообразования на электроэнергию.

Традиционные механизмы ценообразования на электроэнергию основаны на стоимости ископаемого топлива и не в полной мере учитывают доступ к возобновляемым источникам энергии и их экологические преимущества. С быстрым развитием возобновляемых источников энергии, таких как солнечная и ветровая энергия, традиционный механизм ценообразования на электроэнергию выявил свои недостатки, особенно в контексте изменений в структуре электроснабжения. К основным проблемам относятся нестабильность затрат на производство электроэнергии из возобновляемых источников энергии, а также колебания цен и недобросовестная рыночная конкуренция, которые могут быть вызваны приоритетным доступом к сети.

Несмотря на то, что стоимость производства возобновляемой энергии невысока, ее выработка нестабильна из-за погодных условий. По сравнению со стабильной генерацией тепловой энергии существующий механизм ценообразования на электроэнергию не учитывает эти различия, что приводит к большей волатильности цен на электроэнергию, особенно в периоды пикового спроса. Кроме того, политика приоритетного доступа к

сети позволяет возобновляемым источникам энергии иметь приоритетный доступ к сети, когда спрос высок, но ее нестабильность приводит к увеличению потребностей в регулировании традиционных тепловых электростанций и более высоким эксплуатационным расходам, что приводит к несправедливой ценовой конкуренции, усиливает давление на традиционные электростанции, необходимое для выживания, и влияет на справедливость и устойчивость рынка электроэнергии.

Ключевое значение имеет реформирование существующего механизма ценообразования на электроэнергию и установление гибких и прозрачных правил рынка. Необходимо установить разумные ценовые стандарты, чтобы приблизить стоимость возобновляемой энергии к рыночной реальности и стимулировать ее развитие. Уравновесить противоречие между спросом и предложением электроэнергии с помощью рыночных средств, создать эффективный механизм ценообразования на рынке электроэнергии, обеспечить, чтобы возобновляемые источники энергии выделялись в честной конкуренции, и постепенно заменить производство электроэнергии на основе ископаемого топлива. Продвижение инноваций в механизмах торговли зеленой электроэнергией и стимулирование потребления и торговли зеленой электроэнергией будет способствовать увеличению доли возобновляемой энергии на рынке, снижению загрязнения окружающей среды и продвижению зеленой трансформации энергетической структуры [31].

Реформирование механизма ценообразования на электроэнергию и установление разумных, справедливых и прозрачных правил рынка имеют большое значение для содействия развитию возобновляемой энергетики, снижения зависимости от ископаемого топлива и обеспечения безопасности и устойчивости энергоснабжения.

3.3.2. Путь к построению рынка дополнительных услуг.

По мере увеличения доли возобновляемой энергии возникают проблемы с устойчивостью энергосистемы. Традиционные энергосистемы полагаются на обычные источники энергии для предоставления важнейших

вспомогательных услуг, однако нестабильность возобновляемой энергии увеличивает спрос на эти услуги. Существующий рыночный механизм несовершенен, что приводит к недостаточному предложению. Система ценообразования на дополнительные услуги не отражает истинную себестоимость и рыночную стоимость, а участники рынка не проявляют особого энтузиазма к участию в ней. Рыночные механизмы и правила не в полной мере адаптировались к спросу на новую энергию, а гарантийные возможности традиционного рынка электроэнергии недостаточны. Поэтому необходимо создать надежный рынок дополнительных услуг, разработать гибкие и точные рыночные механизмы и политику стимулирования, а также поощрять участников рынка предоставлять достаточные ресурсы. Правительство и соответствующие агентства могут стимулировать жизнеспособность рынка и обеспечивать стабильную работу энергосистемы посредством ценовых субсидий, рыночных механизмов вознаграждения и наказания, а также поощрения конкуренции.

Интеллектуальное управление спросом и виртуальные электростанции могут служить дополнительными средствами для повышения производительности вспомогательных услуг. Интеллектуальное управление спросом объединяет информационные технологии и технологии связи, позволяя потребителям электроэнергии автоматически регулировать свое потребление электроэнергии или активно сокращать его в часы пик, обеспечивая гибкое управление спросом для электросети.

Виртуальные электростанции интегрируют распределенные энергетические ресурсы, унифицируют управление планированием, реализуют централизованный контроль и оптимизированное планирование, а также предоставляют такие услуги, как регулирование частоты, регулирование напряжения и резервная мощность.



Рисунок 3-6 Схематическая диаграмма услуг, предоставляемых виртуальными электростанциями

3.3.3. Стратегии по устранению барьеров для межпровинциальных транзакций.

Межпровинциальная торговля электроэнергией сталкивается с трудностями, включая пропускную способность линий электропередачи, региональные различия в ценах на электроэнергию и непоследовательную политику регулирования. Основным ограничением является пропускная способность электропередачи, а ограничения сетевой инфраструктуры приводят к возникновению узких мест при передаче электроэнергии. Региональные различия в ценах на электроэнергию увеличивают транзакционные издержки и влияют на справедливость. Непоследовательная политика регулирования приводит к разным стандартам регулирования и сложным транзакционным процессам. Чтобы преодолеть эти барьеры, нам необходимо усилить взаимосвязь сетей и построить эффективные каналы передачи. Правительству следует увеличить инвестиции в энергетическую инфраструктуру, особенно в межпровинциальную передачу электроэнергии, чтобы повысить гибкость и пропускную способность электросети. Оптимизировать рыночные механизмы и продвигать единую политику ценообразования на электроэнергию и правила справедливой торговли. Создать единый национальный рынок электроэнергии, устранить

региональные различия в ценах на электроэнергию и содействовать сбалансированному развитию рынка. Вводятся меры политики, направленные на стимулирование межпровинциальной торговли электроэнергией, снижение барьеров для выхода на рынок и повышение эффективности рынка. Поощрять совместное использование и взаимодополняемость возобновляемой энергии, содействовать национальному потоку и оптимальному распределению возобновляемой энергии, повышать уровень зеленого развития энергосистемы и способствовать достижению цели углеродной нейтральности.

3.4 Краткое изложение данной главы

В этой главе систематически анализируются основные проблемы, с которыми сталкивается крупномасштабное сетевое соединение возобновляемой энергии. На техническом уровне основное внимание уделяется выявлению трех ключевых проблем: значительного снижения инерции системы (например, снижение примерно на 40% в электросети Северного Китая), резкого увеличения сложности контроля стабильности напряжения и недостаточной мощности короткого замыкания, а также исследуется путь повышения устойчивости и безопасности электросети с помощью комплексных решений, таких как технология виртуальных синхронных машин (VSM), технология автоматического повторного включения и модернизация оборудования. На уровне эксплуатации и управления глубоко анализируется необходимость и направление повышения точности прогнозирования мощности возобновляемой энергии и интеллектуальное и гибкое преобразование системы защиты для адаптации к доступу распределенных источников энергии и эксплуатации виртуальных электростанций. На уровне рыночных механизмов подчеркивается, что текущий механизм ценообразования на электроэнергию не в полной мере отражает ценность и экологические преимущества возобновляемой энергии, отстает в формировании рынка дополнительных услуг и существуют такие препятствия, как пропускная способность и нормативные барьеры в

межпровинциальных транзакциях, а также подчеркивается, что инновационные механизмы, единые рыночные правила и укрепление взаимосвязи инфраструктуры являются ключом к устранению этих узких мест на рынке.

4. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ.

Оптимальное использование возобновляемой энергии включает несколько уровней, направленных на повышение энергоэффективности, снижение загрязнения окружающей среды и содействие устойчивому развитию. Этот метод в основном включает три аспекта: оптимизацию планирования, оптимизацию эксплуатации и эмпирический анализ. На уровне оптимизации планирования мы фокусируемся на построении многоцелевой модели оптимизации, всесторонне учитывающей экономические и экологические аспекты, чтобы гарантировать, что разработка и использование возобновляемых источников энергии будут экономически эффективными и не окажут чрезмерного давления на окружающую среду. В то же время создается библиотека типового анализа сценариев, которая обеспечивает научную основу для планирования возобновляемой энергетики в различных регионах и в различных климатических условиях [32]. Кроме того, применение надежной оптимизации в северо-западной энергосистеме еще больше повысило способность сети адаптироваться к колебаниям возобновляемой энергии и повысило стабильность и безопасность работы сети.

На уровне оптимизации работы мы применяем распределенную архитектуру совместного управления для достижения интеллектуального планирования и скоординированной работы оборудования для генерации возобновляемой энергии. Система диспетчеризации на основе глубокого обучения способна анализировать рабочее состояние электросети в режиме реального времени, прогнозировать тенденции производства возобновляемой энергии и принимать оптимальные решения по диспетчеризации. В то же время механизм реагирования на спрос призван поощрять пользователей к активному участию в регулировании сети и повышению гибкости и скорости реагирования сети.

На уровне эмпирического анализа мы проверили эффективность и осуществимость метода оптимизации использования возобновляемых источников энергии с помощью реальных проектов, таких как новая энергетическая база Цзюцюань в Ганьсу, виртуальная электростанция в городской агломерации дельты реки Янцзы и трансформация сельских интеллектуальных сетей в Юньнани. Эти примеры не только демонстрируют оптимальное использование возобновляемых источников энергии в различных регионах и сценариях применения, но и предоставляют ценный опыт и рекомендации для последующего планирования и эксплуатации возобновляемых источников энергии. В этой главе в основном обсуждается, как повысить эффективность использования возобновляемых источников энергии посредством оптимизации планирования, оптимизации эксплуатации и эмпирического анализа. Ниже приводится подробное описание каждой части:

4.1 Оптимизация планирования.

Оптимизация планирования, являясь основным звеном в повышении эффективности использования возобновляемых источников энергии, направлена на достижение максимального развития и эффективного использования возобновляемых источников энергии посредством научно обоснованного планирования и компоновки. В частности, оптимизация планирования включает в себя следующие аспекты:

Во-первых, ключевым моментом является построение многокритериальной модели оптимизации. При планировании использования возобновляемых источников энергии мы должны не только учитывать экономическую целесообразность, чтобы гарантировать, что окупаемость инвестиций и эксплуатационные расходы проекта находятся в разумных пределах, но и уделять внимание защите окружающей среды, снижать воздействие на окружающую среду и содействовать устойчивому развитию. Таким образом, основой оптимизации планирования является построение

многокритериальной модели оптимизации, учитывающей как экономические, так и экологические аспекты.

Во-вторых, создание библиотеки типового сценарного анализа имеет большое значение для повышения научности и актуальности планирования. Анализируя характеристики производства возобновляемой энергии в разных регионах и в разных климатических условиях, мы можем создать базу данных, охватывающую множество типичных сценариев, чтобы обеспечить обширную информационную поддержку и основу для принятия решений при планировании. Наконец, применение надежной оптимизации в Northwest Power Grid еще больше улучшает фактический эффект оптимизации планирования. В ответ на неопределенность и нестабильность производства возобновляемой энергии в северо-западном регионе мы используем надежные методы оптимизации для разработки более надежной и устойчивой схемы планирования, учитывая экстремальные ситуации и неопределенные факторы для обеспечения безопасной и стабильной работы электросети.

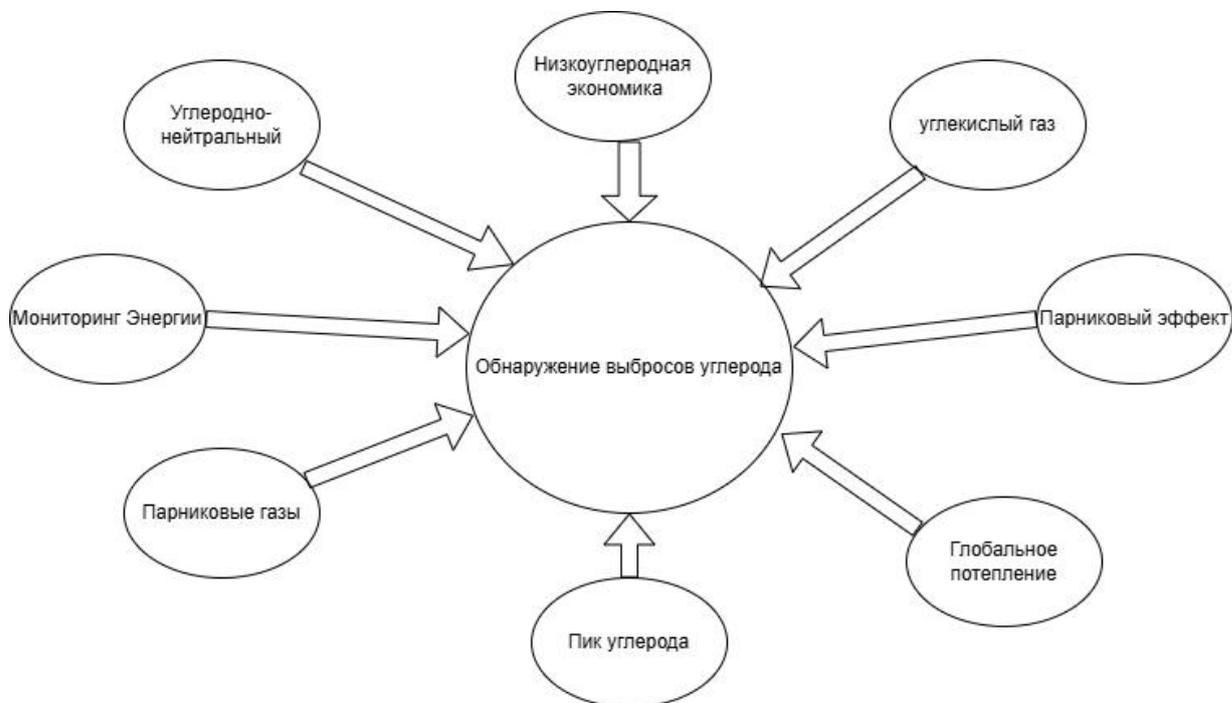


Рисунок 4-1 Блок-схема многокритериальной модели оптимизации

4.1.1. Построение многокритериальной модели оптимизации.

При разработке планов использования возобновляемых источников энергии двумя важнейшими целями являются экономия и защита окружающей среды. Экономическая эффективность в основном фокусируется на экономической эффективности производства и использования энергии, включая инвестиционные затраты, эксплуатационные расходы и окупаемость инвестиций. Для этого необходимо максимизировать экономические выгоды, обеспечивая при этом энергоснабжение. Защита окружающей среды направлена на снижение ущерба окружающей среде, особенно на сокращение выбросов парниковых газов и снижение негативного воздействия на экосистемы и биоразнообразие в целях содействия экологической устойчивости. Используя многоцелевые модели оптимизации, мы можем найти баланс между получением экономической выгоды и защитой окружающей среды, тем самым сформулировав схему энергетического планирования, которая будет как экономичной, так и экологически чистой, закладывая основу для достижения цели устойчивого развития [33]. Формула выглядит следующим образом:

$$\min f_1(x) = C_{inv} + C_{oper} \text{ (Экономические цели)} \quad (4.1)$$

$$\min f_2(x) = E_{co_2} \text{ (Экологические цели)} \quad (4.2)$$

$$S.t. \ g(x) \leq 0 \text{ (Технические ограничения)} \quad (4.3)$$

E_{co_2} : Инвестиционные затраты

C_{inv} : Выбросы углерода

Для достижения вышеуказанных целей решающее значение имеет выбор метода оптимизации. Эти методы включают математические модели программирования, целевое программирование, генетические алгоритмы и другие передовые вычислительные методы. Модели математического программирования могут помочь нам определить оптимальный план производства и распределения энергии на основе ряда ограничений, таких

как ограниченность ресурсов, технические параметры и т. д. Целевое программирование позволяет нам находить компромиссы между несколькими целями, например, находить наилучший компромисс между затратами и экологическими преимуществами. Генетический алгоритм, являясь эвристическим алгоритмом поиска, может находить приближенные оптимальные решения в сложных пространствах поиска, имитируя принципы естественного отбора и генетики. Эти методы оптимизации не только учитывают технические ограничения, но и могут адаптироваться к влиянию внешних факторов, таких как колебания рынка и изменения политики, тем самым обеспечивая научную и обоснованную поддержку принятия решений при планировании использования возобновляемых источников энергии.

4.1.2. Создание библиотеки анализа типовых сценариев.

В процессе оптимизации использования возобновляемых источников энергии создание библиотеки анализа сценариев предоставляет лицам, принимающим решения, эффективный инструмент для прогнозирования и оценки производительности энергетических систем при различных сценариях. Библиотека анализа сценариев помогает лицам, принимающим решения, получить более полное представление о различных сложных ситуациях, с которыми может столкнуться энергетическая система в будущем, путем моделирования различных возможных сред и условий, включая различные требования к нагрузке, колебания цен на электроэнергию, изменения политики и другие факторы. Эти модели сценариев не только учитывают обычные модели потребления энергии, но и моделируют реакцию системы в особых обстоятельствах, таких как мощность электроснабжения в периоды высокой нагрузки, влияние внезапных изменений политики на цены на энергоносители и колебания поставок возобновляемой энергии, вызванные изменением климата. Благодаря такому многомерному анализу библиотека анализа сценариев может предоставить менеджерам и разработчикам политики в сфере энергетики более точную основу для принятия решений, помочь им предвидеть потенциальные риски и

возможности, а также обеспечить научную поддержку для планирования и корректировки политики в сфере энергетики.

Преимущество библиотеки анализа сценариев заключается в том, что она может объединять исторические данные и прогностические модели для динамических корректировок, тем самым поддерживая более точную оценку рисков и принятие решений. В сфере возобновляемой энергетики из-за высокой неопределенности спроса и предложения энергии традиционные статические модели принятия решений часто не позволяют эффективно реагировать на чрезвычайные ситуации. Благодаря анализу сценариев лица, принимающие решения, могут моделировать результаты на основе различных ситуаций и оптимизировать стратегии производства, хранения и распределения энергии. Например, когда цены на энергоносители сильно колеблются, анализ сценариев может помочь менеджерам по энергоснабжению спрогнозировать поставки и потребление энергии при различных будущих уровнях цен, а затем скорректировать стратегии закупок и продаж энергии, чтобы минимизировать затраты и риски. В то же время анализ сценариев может также помочь оценить долгосрочное влияние корректировок политики на энергетическую систему, например, то, как изменения в политике в области выбросов углерода могут повлиять на инвестиции и развитие возобновляемой энергетики. Благодаря систематическому анализу множественных сценариев лица, принимающие решения, могут не только повысить надежность использования энергии, но и принимать более гибкие и эффективные решения в неопределенных условиях, тем самым способствуя оптимальному использованию возобновляемой энергии и содействуя развитию зеленой и низкоуглеродной экономики [34].

4.1.3. Применение надежной оптимизации в электросети Северо-Западного Китая.

Надежная технология оптимизации — это передовой метод борьбы с неопределенностью и волатильностью системы. Он широко используется в энергосистемах, особенно в сценариях с чрезвычайно высокими требованиями к стабильности. В энергосистеме существует множество неопределенностей, таких как ошибки прогнозирования нагрузки, отказы оборудования и колебания в сфере возобновляемой энергии. Особенно в таких регионах, как Северо-Западная энергосистема, нестабильность возобновляемых источников энергии, таких как энергия ветра и солнца, создает большие проблемы для работы сети. Чтобы обеспечить стабильность и надежность электросети, традиционные методы оптимизации зачастую не справляются с этой крайне неопределенной средой. Надежные методы оптимизации позволяют оптимизировать план планирования электросети, учитывая различные потенциальные нарушения и неопределенные факторы, чтобы система могла поддерживать эффективную и надежную работу в различных условиях эксплуатации.

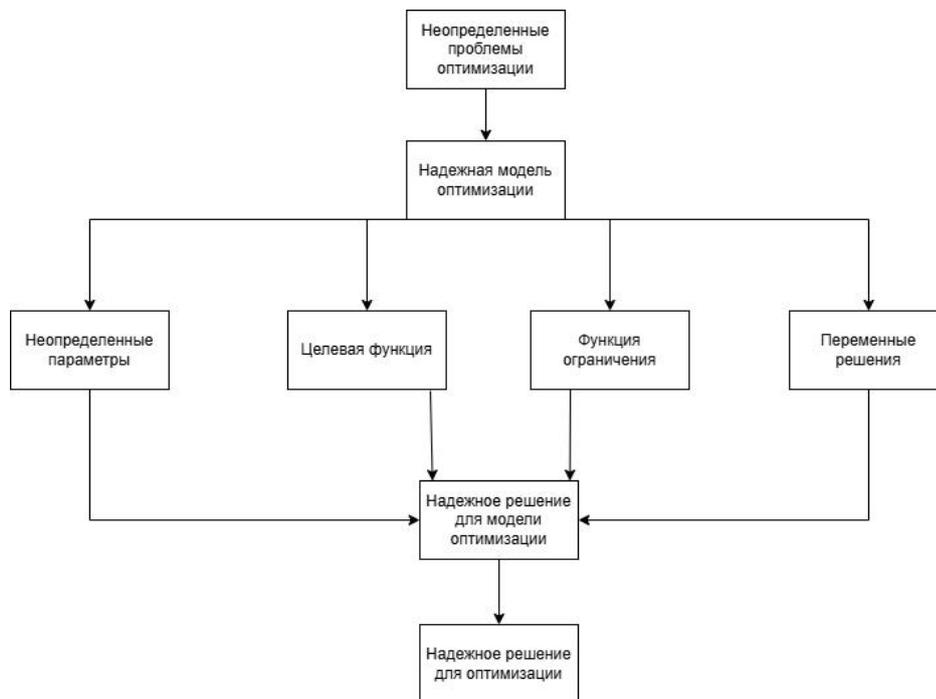


Рисунок 4-2 Схематическая диаграмма надежного приложения оптимизации в северо-западной китайской электросети.

$$U = \{\xi \mid |\xi - \xi^-| \leq \Gamma\} \quad (4.4)$$

Где: Γ : Неопределенность бюджета

ξ : Параметры неопределенности

В частности, надежная оптимизация может гарантировать, что план диспетчеризации сети по-прежнему будет соответствовать требованиям стабильности и надежности при столкновении с внешними возмущениями (такими как изменения погоды, колебания нагрузки и т. д.) и внутренними колебаниями (такими как изменения состояния оборудования, корректировки распределения ресурсов и т. д.) путем создания математической модели для ограничений неопределенности. Для северо-западной энергосистемы надежная оптимизация не только помогает улучшить адаптивность сети к колебаниям ветровой и солнечной энергии, но и эффективно снижает риски эксплуатации сети, вызванные неопределенностями [35]. Благодаря такому подходу Северо-Западная электрическая сеть может поддерживать стабильную работу в сложных внешних условиях, обеспечивая при этом надежность и экономичность электроснабжения, предоставляя мощную техническую поддержку использованию возобновляемых источников энергии и устойчивому развитию энергосистемы.

4.2 Оптимизация работы.

Оптимизация работы является важным средством повышения эффективности использования возобновляемых источников энергии и обеспечения стабильной работы электросети. В распределенных энергетических системах энергоблоки и точки нагрузки широко разбросаны, и традиционные методы централизованного управления больше не могут удовлетворить потребности эффективного планирования в режиме реального времени. Таким образом, возникла распределенная архитектура совместного управления, которая обеспечивает глобальную оптимизацию энергетической системы за счет обмена информацией и совместного принятия решений между узлами. Кроме того, система планирования на основе глубокого

обучения может использовать большие данные и передовые алгоритмы для точного прогнозирования изменений в спросе и предложении энергии, формулирования научных стратегий планирования и дальнейшего повышения эффективности и стабильности работы системы. В то же время разработка механизма реагирования на спрос также является ключевым звеном в оптимизации работы. Стимулируя и направляя пользователей к разумной корректировке своего поведения в отношении потребления электроэнергии, он может эффективно уравновесить противоречие между спросом и предложением и повысить гибкость и надежность электросети. Эти меры по оптимизации работы в совокупности представляют собой важную поддержку оптимального использования возобновляемых источников энергии и закладывают прочную основу для достижения устойчивого развития энергетической системы.

4.2.1. Распределенная архитектура совместного управления.

Распределенная архитектура совместного управления является одной из ключевых технологий для повышения эффективности современных энергетических систем, особенно в среде, где сосуществуют несколько распределенных форм энергии, таких как ветроэнергетика, фотоэлектрические установки и оборудование для хранения энергии. Обеспечивая обмен информацией и координацию между различными энергоблоками, эта архитектура может оптимизировать стратегию диспетчеризации сети на основе текущего рабочего состояния и внешних условий окружающей среды, гарантируя, что каждый энергоблок получит максимальную выгоду в соответствующее время. Например, возобновляемые источники энергии, такие как энергия ветра и фотоэлектрические установки, являются нестабильными. Распределенная архитектура совместного управления может сбалансировать спрос и предложение в системе путем координации выходной мощности каждого энергоблока, тем самым снижая нестабильность сети, вызванную колебаниями энергии [36].



Рисунок 4-3 Топология архитектуры распределенного совместного управления

Кроме того, распределенная архитектура совместного управления обычно состоит из нескольких локализованных автономных блоков, каждый из которых может работать независимо и быстро принимать решения на основе локальной информации, но все же может координироваться как единое целое посредством совместных стратегий. Эти блоки корректируют стратегии производства и потребления энергии в реальном времени с помощью высокоскоростной, надежной передачи данных в реальном времени и распределенных алгоритмов принятия решений, тем самым эффективно реагируя на воздействие неопределенных факторов, таких как случайные колебания в системе. Например, используя метеорологические данные в реальном времени и прогнозы нагрузки, система может быстро реагировать на внешние изменения через периферийные вычислительные узлы, точно корректировать выход различных энергетических блоков, максимизировать использование возобновляемой энергии и обеспечивать стабильность и надежность электроснабжения. Эта высокогибкая и адаптивная архитектура позволяет энергетической системе достигать глобальных оптимальных или почти оптимальных результатов эксплуатации при столкновении со сложными и изменяющимися средами, значительно повышая устойчивость системы.

4.2.2. Система планирования на основе глубокого обучения.

Применение технологий глубокого обучения в системах диспетчеризации электросетей постепенно становится важной частью интеллектуального управления будущими энергосистемами. Используя глубокие нейронные сети, система диспетчеризации может извлекать сложные закономерности и правила из больших объемов исторических данных, а затем прогнозировать ключевые факторы, такие как колебания производства возобновляемой энергии (например, энергии ветра и солнца), изменения в спросе на нагрузку и т. д. Этот метод позволяет эффективно справляться с волатильностью и неопределенностью возобновляемой энергии. Точно прогнозируя будущее производство и спрос на энергию, а также оптимизируя стратегии распределения электроэнергии, можно обеспечить стабильную работу электросети и сократить потери энергии [37].

Система диспетчеризации электросетей, основанная на глубоком обучении, способна значительно повысить точность прогнозирования будущих соотношений спроса и предложения и сократить количество человеческих ошибок, которые могут возникать при традиционных методах диспетчеризации. По сравнению с традиционными методами, модели глубокого обучения позволяют системе справляться с более сложными и динамичными средами электросетей за счет автоматического изучения сложных нелинейных взаимосвязей. Благодаря повышенной точности сеть может быстро реагировать и корректировать свою стратегию работы при возникновении колебаний нагрузки и неопределенностей в производстве возобновляемой энергии, тем самым повышая общую эффективность работы сети, оптимизируя распределение ресурсов, сокращая эксплуатационные расходы и предоставляя техническую поддержку для достижения более надежного и устойчивого энергоснабжения.

$$P_{t+1} = LSTM(P_t, W_t, L_t) + \varepsilon_t \quad (4.5)$$

Где: P_{t+1} : Значение прогноза мощности в момент времени t+1

W_t, L_t : Данные о погоде и нагрузке

4.2.3. Разработка механизма реагирования на спрос.

Механизм реагирования на спрос призван сбалансировать спрос и предложение в энергосистеме путем разумного регулирования поведения потребителей в отношении потребления электроэнергии. Благодаря разумным стимулам потребители могут корректировать свои модели потребления электроэнергии в соответствии с реальной ситуацией на рынке электроэнергии. Например, когда спрос и предложение электроэнергии ограничены, система может стимулировать пользователей сокращать ненужное потребление электроэнергии за счет повышения цен на электроэнергию, тем самым снижая нагрузку на электросеть; а когда предложение электроэнергии избыточно, это может побудить пользователей увеличить спрос на электроэнергию в периоды низких цен на электроэнергию за счет снижения цен на электроэнергию или предоставления других стимулов. Такое гибкое регулирование со стороны спроса позволяет электросети эффективнее реагировать на колебания нагрузки, снижать давление в периоды пиковой нагрузки и избегать потерь электроэнергии и выхода системы из строя из-за дисбаланса между спросом и предложением.

Кроме того, механизмы реагирования на спрос также способствуют эффективному использованию возобновляемых источников энергии. Когда поставки возобновляемой энергии, такой как энергия ветра и солнца, велики, система может поощрять потребителей увеличивать потребление электроэнергии в этот период с помощью стимулов, тем самым лучше усваивая излишки зеленой электроэнергии и избегая потерь энергии. Снижая зависимость от традиционной ископаемой энергии, механизм реагирования на спрос помогает направить энергосистему в более экологичное и

устойчивое русло, а также достичь цели энергосбережения и сокращения выбросов. Таким образом, управление спросом не только повышает стабильность энергосистемы, но и является эффективным средством содействия защите окружающей среды и оптимизации энергетической структуры.

$$B_{DR} = \int_0^T [\lambda(t)D(t) - C_{curt}(t)]dt - \sum_{i=1}^N S_i \quad (4.6)$$

Где: $\lambda(t)$: Цены на электроэнергию в реальном времени

$D(t)$: Снижение нагрузки

C_{curt} : Стоимость сброса нагрузки

S_i : Расходы на стимулирование пользователей

4.3 Эмпирический анализ.

Эмпирический анализ является ключевым звеном в проверке эффективности методов оптимизации использования возобновляемых источников энергии. Благодаря глубокому исследованию конкретных случаев мы можем интуитивно увидеть эффективность этих мер оптимизации в реальной эксплуатации, а также их положительное влияние на стабильность сети, энергоэффективность и защиту окружающей среды.

Если взять в качестве примера новую энергетическую базу Цзюцюань в Ганьсу, то регион обладает богатыми ресурсами ветроэнергетики и является национальной демонстрационной базой новой энергетики. Благодаря внедрению методов оптимизации, таких как построение многокритериальной модели оптимизации и распределенная архитектура совместного управления, база добилась эффективного использования энергии ветра и стабильной работы электросети. В ходе эмпирического анализа мы отметили, что данные меры оптимизации значительно повысили эффективность выработки электроэнергии ветровой энергией и способность регулирования нагрузки электросети, эффективно смягчили противоречие между спросом и предложением электроэнергии и способствовали устойчивому развитию

возобновляемой энергетики. Виртуальная электростанция в городской агломерации дельты реки Янцзы — еще один типичный случай эмпирического анализа. Виртуальная электростанция формирует эффективную систему управления энергоресурсами путем интеграции распределенных энергетических ресурсов в регионе, таких как солнечная энергия, энергия ветра и накопители энергии. Благодаря мерам оптимизации, таким как система планирования на основе глубокого обучения и механизм реагирования на спрос, виртуальная электростанция достигает эффективной конфигурации и гибкого планирования энергии, существенно повышая эффективность ее использования и сокращая выбросы углерода. Результаты эмпирического анализа показывают, что эти меры оптимизации имеют большое значение для содействия преобразованию городской энергетики и достижения целей устойчивого развития.



Рисунок 4-4 Фактический вид конфигурации ветровой, солнечной и энергетической хранилищ на базе Цзюцюань в Ганьсу

Преобразование сельских интеллектуальных сетей в Юньнани также является примером эмпирического анализа, заслуживающим внимания. В регионе была достигнута интеллектуальная модернизация сельских электросетей и эффективное использование возобновляемых источников энергии за счет внедрения технологии интеллектуальных сетей и

оптимизации энергетической структуры. Результаты эмпирического анализа показывают, что данные оптимизационные мероприятия значительно повысили надежность электроснабжения и эффективность использования энергии сельских электросетей, улучшили условия электропотребления в сельской местности, способствовали развитию сельской экономики и социальному прогрессу.

4.3.1 Анализ ситуации с новой энергетической базой Цзюцюань в Ганьсу.

Новая энергетическая база Цзюцюань в Ганьсу является одной из крупнейших баз по производству ветровой и солнечной энергии в Китае и имеет важное демонстрационное значение. Для повышения общей энергоэффективности базы ключевое значение имеет оптимизация планирования и повышение эффективности доступа к ветровой и фотоэлектрической энергии. В конкретных условиях ресурсные преимущества ветровой и солнечной энергии могут быть максимально использованы за счет рационального размещения ветровых и фотоэлектрических электростанций и их сочетания с местными климатическими характеристиками. Кроме того, необходимо оптимизировать методы доступа и линии электропередачи, чтобы обеспечить быстрое и эффективное подключение возобновляемых источников энергии к электросети, сократить потери при передаче и обеспечить своевременную подачу электроэнергии. Эти меры оптимизации эффективно повышают общую мощность генерации электроэнергии системы и пропускную способность сети [38].

Эмпирические исследования показывают, что благодаря научному планированию и составлению графиков новая энергетическая база Цзюцюань в Ганьсу не только достигла значительного прогресса в повышении уровня использования возобновляемых источников энергии, но и достигла важных результатов в обеспечении стабильности и безопасности электросети. Разумная технология диспетчеризации системы может контролировать

рабочее состояние электросети в режиме реального времени, гибко регулировать выходную мощность, гарантировать, что ветровая энергия и фотоэлектрическая энергия могут дополнять традиционную энергию, избегать потерь энергии и снижать зависимость от незеленой энергии. Таким образом, энергосистема может поддерживать стабильную работу в условиях крайне нестабильного предложения возобновляемой энергии, предоставляя ценный опыт для национальной энергетической трансформации и зеленого развития.

$$\eta_{total} = \alpha \frac{P_{actual}}{P_{potential}} + \beta \frac{T_{stable}}{T_{total}} - \gamma \frac{C_{curt}}{C_{total}} \quad (4.7)$$

Где: $P_{actual} / P_{potential}$:Фактическая выработка электроэнергии/теоретическая максимальная выработка электроэнергии(MWh)

T_{stable} / T_{total} :Время стабильной работы сети/общее время работы (h)

C_{curt} / C_{total} :Объем заброшенной ветровой и солнечной энергии/общая выработка электроэнергии (%)

4.3.2. Виртуальная электростанция в городской агломерации дельты реки Янцзы.

Благодаря созданию виртуальной электростанции регион дельты реки Янцзы успешно интегрировал малогабаритные системы генерации возобновляемой энергии, оборудование для хранения энергии и гибкие нагрузки, распределенные в разных регионах, в единую диспетчерскую платформу. Виртуальные электростанции используют передовые централизованные технологии диспетчеризации и управления для координации управления этими распределенными энергетическими ресурсами, достигая эффективной диспетчеризации электроснабжения. Эта модель позволяет оптимизировать и развернуть небольшие источники энергии и оборудование для накопления энергии, которые изначально работали независимо, как крупные электростанции, обеспечивая стабильность и экономичность энергосистемы. Кроме того, виртуальные

электростанции могут эффективно реагировать на изменения спроса и предложения электроэнергии с помощью анализа данных в реальном времени и алгоритмов прогнозирования, тем самым улучшая способность сети реагировать на чрезвычайные ситуации [39].

Строительство виртуальной электростанции в дельте реки Янцзы также глубоко интегрировало технологию искусственного интеллекта, а стратегия диспетчеризации постоянно оптимизируется с помощью алгоритмов машинного обучения. Платформа имеет доступ к множеству данных, таких как метеорологические прогнозы и анализ поведения потребления электроэнергии, и может прогнозировать региональную новую выработку энергии и спрос на нагрузку за 72 часа вперед, а также динамически корректировать план зарядки и разрядки. Например, в период пикового потребления электроэнергии летом 2023 года Шанхайская виртуальная электростанция объединила нагрузку на кондиционирование воздуха коммерческих зданий и распределенное хранилище энергии, а совокупное пиковое снижение превысило 300 мегаватт, что эквивалентно сокращению потребления старт-стоп средней тепловой электростанции.

Эта модель также инновационно вводит механизм торговли на рынке электроэнергии, позволяя распределенным ресурсам участвовать в рынке вспомогательных услуг по сглаживанию пиков. Благодаря автоматическому урегулированию доходов с помощью смарт-контрактов на основе блокчейна средний годовой прирост дохода владельцев фотоэлектрических установок домохозяйств, участвующих только в провинции Цзянсу, достиг 12 миллионов юаней. В будущем, с популяризацией технологии взаимодействия транспортного средства с сетью (V2G), виртуальные электростанции будут и дальше интегрировать ресурсы мобильного хранения энергии электромобилей, чтобы сформировать управляемый потенциал более 10 ГВт, обеспечивая основную поддержку для строительства новой энергосистемы.

4.3.3. Трансформация сельской интеллектуальной сети в Юньнани.

Проект преобразования интеллектуальной сети в сельских районах провинции Юньнань успешно добился эффективного использования местной возобновляемой энергии за счет внедрения передовой технологии диспетчеризации электроэнергии, интеллектуального измерительного оборудования и распределенных энергетических систем. Проект использует интеллектуальные технические средства для подключения возобновляемых источников энергии, таких как фотоэлектрические системы и энергия ветра, к сети, что позволяет эффективно подключать к сети небольшие электростанции в отдаленных районах и легко интегрировать их с традиционными энергетическими системами. Благодаря интеллектуальным счетчикам и системам мониторинга в режиме реального времени все аспекты производства, передачи и потребления электроэнергии были полностью оптимизированы, что значительно повысило способность сети принимать возобновляемую энергию и эффективность ее диспетчеризации. Кроме того, внедрение распределенных энергетических систем сделало электроснабжение в сельской местности более гибким и надежным, снизив сложность и стоимость расширения традиционных электросетей [40].

Эмпирический анализ показывает, что внедрение интеллектуальных сетей значительно повысило эффективность использования энергии, особенно в части подключения к сети и планирования возобновляемой энергии. Интеллектуальные сети обеспечивают эффективное использование возобновляемой энергии за счет точного прогнозирования нагрузки и распределения электроэнергии, а также играют важную роль в снижении потерь электроэнергии и повышении стабильности сети. Анализ фактических данных эксплуатации доказывает, что интеллектуальная сеть не только оптимизирует распределение энергоресурсов, но и увеличивает долю возобновляемой энергии, подключенной к сети. Эти методы оптимизации и эмпирический анализ обеспечивают прочную теоретическую и практическую основу для эффективного использования возобновляемых источников

энергии в будущем и закладывают прочный фундамент для содействия устойчивому развитию энергетической системы.

4.4 Краткое изложение данной главы

Путем построения многоцелевой модели, создания библиотеки сценариев и применения надежной оптимизации (например, Северо-Западной энергосистемы) можно достичь эффективной компоновки и устойчивости возобновляемой энергии. С помощью распределенного совместного управления, планирования глубокого обучения и механизмов реагирования на спрос значительно улучшены возможности регулирования системы в реальном времени и гибкого реагирования. На примере базы Цзюцюань, виртуальной электростанции в дельте реки Янцзы и интеллектуальной сети Юньнань была проверена эффективность вышеупомянутых методов оптимизации в повышении эффективности использования и производительности электросети, что дало практические рекомендации.

5. ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ И ОЦЕНКА ВЫГОД.

Внедрение технологий и оценка выгод являются ключевыми звеньями для обеспечения бесперебойной реализации новых проектов, связанных с подключением к энергосетям, и достижения ожидаемых результатов. Что касается планов технической реализации, была создана система технических стандартов, связанных с подключением к сети, которая обеспечивает четкие технические рекомендации и спецификации для подключения к сети новых источников энергии. В то же время была разработана поэтапная дорожная карта строительства, в которой проясняются цели строительства и этапы реализации с 2025 по 2030 год для обеспечения упорядоченного хода реализации проекта. Кроме того, посредством анализа матрицы управления рисками были полностью выявлены риски, с которыми может столкнуться проект, и были сформулированы соответствующие меры реагирования для обеспечения бесперебойной реализации проекта.

С точки зрения оценки преимуществ системы основное внимание уделяется прогнозированию улучшения новой способности поглощения энергии. С помощью научных методов и моделей прогнозируется способность сети поглощать новую энергию после ее подключения к сети, что обеспечивает основу для рационального планирования и размещения новой энергии. При этом оценивались показатели повышения надежности электроснабжения. Сравнивая данные по надежности электроснабжения до и после подключения новой энергии к сети, была подтверждена положительная роль подключения новой энергии к сети в повышении надежности электроснабжения электросети. Кроме того, было измерено сокращение выбросов углерода. Количественный анализ вклада подключения к новым энергетическим сетям в сокращение выбросов углерода еще раз продемонстрировал важную роль подключения к новым энергетическим сетям в содействии преобразованию энергетики и решению проблемы изменения климата.

5.1 План технической реализации.

План технической реализации является основной частью, которая охватывает несколько ключевых звеньев, включая структуру системы технических стандартов, подключенных к сети, поэтапную дорожную карту строительства и анализ матрицы управления рисками. Что касается структуры системы технических стандартов для подключенных к сети сетей, то была разработана система технических стандартов, которая отвечает реальным потребностям этого проекта в сочетании с новейшими отечественными и международными техническими стандартами и спецификациями, что обеспечивает надежную техническую поддержку для бесперебойной реализации проекта. В то же время мы усилили пропаганду и обучение техническим стандартам, а также повысили технический уровень и осведомленность в области стандартизации участников проекта.

Поэтапная дорожная карта строительства является важным руководством для реализации. В нем разъясняются цели строительства и этапы реализации с 2025 по 2030 год, что обеспечивает упорядоченный ход реализации проекта. На каждом этапе были разработаны подробные планы и графики работ, а также усилен мониторинг хода работ и внесение корректировок для обеспечения бесперебойной реализации проекта в соответствии с планом.

5.1.1 Стандартная системная структура сетевых технологий.

В процессе трансформации интеллектуальной сети крайне важно создать полную систему стандартов сетевых технологий, которая обеспечит гарантию стабильной работы и эффективного управления интеллектуальной сетью. Во-первых, стандартизированная структура сетевых технологий должна охватывать требования к доступу к различным типам возобновляемой энергии. Например, доступ к распределенным источникам энергии, таким как фотоэлектрические и ветровые электростанции, требует четких положений по таким параметрам, как выходная мощность, контроль волатильности и регулирование частоты, чтобы гарантировать, что эти

источники энергии могут быть стабильно интегрированы в энергосистему и избежать негативного воздействия на сеть. Не менее важны стандарты интерфейса электрооборудования. Они включают требования к подключению оборудования распределенного энергетического оборудования к основной электросети, включая спецификации по уровню напряжения, коэффициенту мощности, методу электропроводки и т. д., которые помогают обеспечить совместимость и взаимодействие между оборудованием. Кроме того, протоколы передачи данных и стандарты безопасности также играют важную роль в структуре сетевых технологий [41]. По мере повышения уровня информатизации интеллектуальных сетей безопасность обмена данными и связи приобретает решающее значение. Стандартизация протоколов связи может обеспечить эффективную передачу данных между различными устройствами и способствовать реализации таких функций, как мониторинг в реальном времени, планирование и обнаружение неисправностей. В то же время обеспечение безопасности системы может эффективно предотвращать кибератаки и утечки данных, а также гарантировать безопасную и стабильную работу электросети.

Наконец, уточнение требований к производительности различных типов оборудования и систем имеет решающее значение для обеспечения согласованной работы энергосистемы и распределенных энергетических ресурсов. Сюда входит время отклика оборудования, возможность регулирования мощности и грузоподъемность. Благодаря стандартизированным требованиям можно гарантировать, что различные типы оборудования смогут бесперебойно работать вместе после подключения к сети, тем самым повышая гибкость, надежность и коэффициент использования возобновляемой энергии энергосистемы, а также способствуя эффективной работе и устойчивому развитию интеллектуальных сетей.

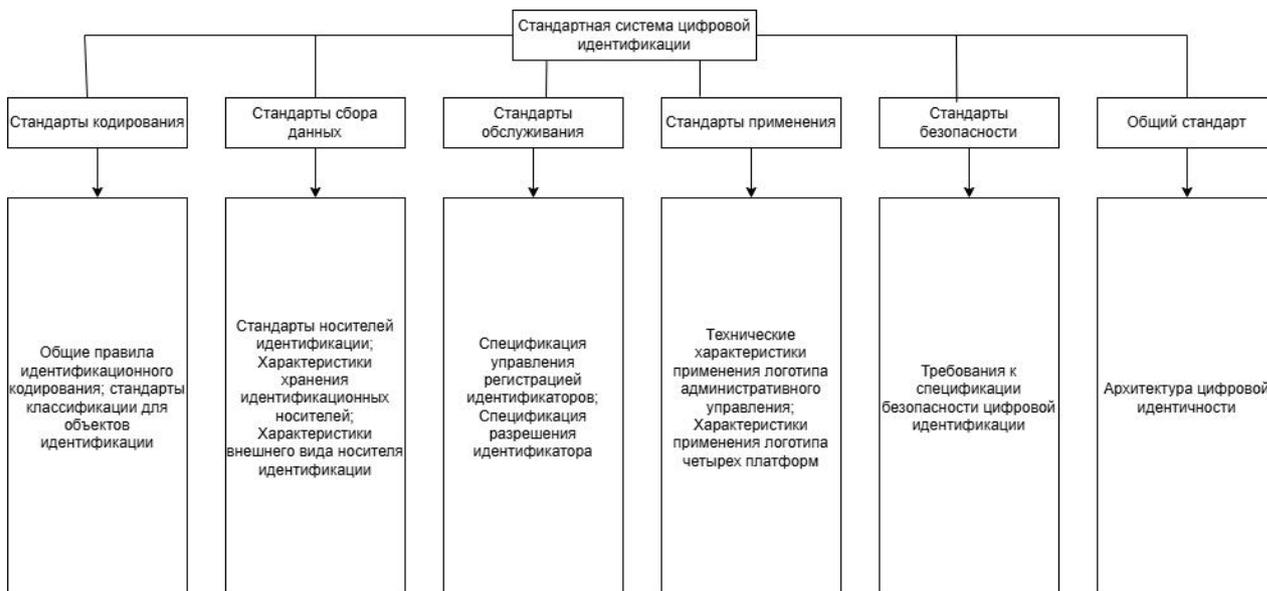


Рисунок 5-1 Структура стандартной системы сетевых технологий

5.1.2 Поэтапная дорожная карта строительства (2025-2030 гг.)

Строительство проекта должно осуществляться поэтапно с 2025 по 2030 год в соответствии с поэтапным планом реализации, обеспечивающим устойчивость и интеллектуальность энергосистемы, а также эффективное использование возобновляемых источников энергии. Во-первых, с 2025 по 2026 год проект будет сосредоточен на завершении строительства инфраструктуры, в основном, включая установку интеллектуального измерительного оборудования, преобразование сети и предварительные работы по подключению к сети. Ключевым моментом на этом этапе является обеспечение стабильности базовой сети электропитания и создание прочной основы для последующих интеллектуальных модернизаций. Установка интеллектуального измерительного оборудования позволит осуществлять мониторинг в режиме реального времени и удаленное управление данными о потреблении электроэнергии, а трансформация электросети увеличит ее пропускную способность и обеспечит поддержку доступа к большему количеству распределенных источников энергии.

В 2027–2028 годах в рамках проекта начнется внедрение большего количества распределенных энергетических систем, особенно возобновляемых источников энергии, таких как солнечная и ветровая энергия.

В то же время будет усилена конструкция системы диспетчеризации электроэнергии и постепенно оптимизирован процесс подключения к сети с целью увеличения доли возобновляемых источников энергии, подключенных к сети. Основная цель этого этапа — содействовать широкому доступу к чистой энергии, решить проблемы планирования сети, вызванные колебаниями энергоснабжения, а также повысить гибкость и способность реагирования энергосистемы.

С 2029 по 2030 год проект перейдет на этап совершенствования системы управления интеллектуальной сетью, создания комплексной интеллектуальной платформы управления диспетчеризацией и оптимизацией, а также обеспечения более эффективного и точного диспетчерского управления электроэнергией по всему региону. Основное внимание на этом этапе уделяется повышению надежности и гибкости энергосистемы за счет интеллектуальных технологий, предоставлению надежных гарантий крупномасштабного поглощения возобновляемой энергии, а также достижению зеленой трансформации и устойчивого развития энергосистемы. Благодаря этой серии поэтапных реализаций проект будет способствовать созданию интеллектуальных сетей и поддерживать цели будущей трансформации энергетики и защиты окружающей среды [42].

5.1.3 Анализ матрицы управления рисками.

Матрица управления рисками является важным инструментом в управлении проектами, который может помочь выявить и систематически оценить различные риски, с которыми можно столкнуться в ходе реализации проекта. При реализации проектов интеллектуальных сетей к общим типам рисков относятся технические риски, рыночные риски и политические риски. Технические риски в основном проявляются в отказе оборудования, нестабильном подключении к сети или технических трудностях, которые могут привести к задержкам проекта или неспособности системы достичь ожидаемых эксплуатационных результатов. Например, технологическая незрелость интеллектуальных устройств и систем может привести к частым

отказам оборудования и повлиять на стабильность работы электросети. Рыночный риск тесно связан с колебаниями цен на энергоносители. Особенно когда цена возобновляемой энергии сильно зависит от колебаний рынка, это может привести к снижению экономической выгоды проекта. Кроме того, серьезной проблемой проекта является политический риск, особенно изменения в новой энергетической политике, которые могут повлиять на финансовую поддержку проекта и политические стимулы. Если соответствующая политика будет меняться, это может повлиять на долгосрочную осуществимость и прибыльность проекта [43].

Создав матрицу управления рисками, команда проекта может расставить приоритеты среди различных рисков и принять целевые стратегии реагирования на основе их влияния на проект и вероятности возникновения. Для устранения технических рисков мы можем расширить технические предварительные исследования и заранее устранить возможные технические узкие места; в то же время регулярно проводить техническое обслуживание и модернизацию оборудования для обеспечения стабильности работы технической системы. Чтобы справиться с рыночными рисками, влияние колебаний цен на энергоносители можно уменьшить, заключив долгосрочные соглашения о закупке электроэнергии или применив хеджирование цен. Реагирование на политические риски требует укрепления коммуникации с правительственными департаментами, обеспечения своевременного реагирования на изменения политики и поддержания гибких мер реагирования. Кроме того, необходимо также создать механизм предупреждения о рисках, который может помочь команде проекта отслеживать изменения различных рисков в режиме реального времени и своевременно корректировать стратегию реагирования, чтобы снизить негативное воздействие, которое может возникнуть в ходе реализации проекта, и обеспечить его плавное выполнение в соответствии с планом.

5.2 Оценка преимуществ системы.

Оценка выгод системы является важной частью измерения эффективности реализации проекта. Во-первых, с точки зрения прогнозирования улучшения новых мощностей потребления энергии, посредством внедрения сетевых технических стандартов и эффективного выполнения мер по управлению рисками ожидается, что уровень сетевого подключения и уровень использования новой энергии могут быть значительно улучшены, что снизит зависимость от традиционной энергии и будет способствовать оптимизации энергетической структуры. Во-вторых, с точки зрения показателей повышения надежности электроснабжения, проект позволит повысить устойчивость и способность к самовосстановлению электросети за счет оптимизации структуры электросети и применения интеллектуальных технологий, обеспечить непрерывность и надежность электроснабжения, сократить количество и продолжительность отключений электроэнергии, а также улучшить пользовательский опыт. Наконец, с точки зрения измерения сокращения выбросов углерода, проект позволит эффективно сократить выбросы парниковых газов за счет поощрения использования чистой энергии и сокращения потребления ископаемого топлива, что внесет положительный вклад в защиту окружающей среды и устойчивое развитие. Подводя итог, можно сказать, что оценка преимуществ системы обеспечит научную основу для постоянной оптимизации и совершенствования проекта, а также будет способствовать преобразованию энергетики и зеленому развитию.

$$C_{host} = \min(P_{gen}, \alpha C_{line} + \beta C_{flex}) \quad (5.1)$$

Где: C_{host} : Фактическая поглощающая способность

C_{line} : Пропускная способность системы

C_{flex} : Система может гибко регулировать производительность

5.2.1 Прогноз улучшения новых мощностей потребления энергии.

Внедрение интеллектуальных сетей имеет большое значение для повышения эффективности использования возобновляемой энергии, особенно фотоэлектрической и ветровой. В традиционных электросетях из-за нестабильности и непостоянства возобновляемой энергии, особенно когда к сети подключены фотоэлектрические и ветровые электростанции, энергосистеме часто сложно поддерживать стабильный баланс спроса и предложения, и часто возникает избыток или дефицит электроэнергии. Благодаря интеграции современных датчиков, систем управления и технологий диспетчеризации в реальном времени интеллектуальные сети могут точно контролировать и регулировать поток электроэнергии, а также достигать динамической оптимизации управления электросетью. Это не только эффективно уравнивает разрыв между спросом и предложением и сократит потери энергии, но и значительно увеличит долю потребления возобновляемой энергии, что позволит эффективно поставлять в энергосистему больше чистой энергии, снизит зависимость от традиционной ископаемой энергии и будет способствовать зеленой трансформации энергетической структуры.

Кроме того, интеллектуальные сети также опираются на мощные возможности предиктивного анализа. Благодаря комплексному анализу многомерной информации, такой как исторические данные, погодные условия и изменения нагрузки, они могут точно оценить объем потребления энергии в будущем. Благодаря этим прогнозам электросеть может заранее подготовиться к возможным колебаниям нагрузки или дефициту электроэнергии, заранее распределить источники питания и обеспечить стабильность электроснабжения. В то же время эти прогнозные анализы могут также обеспечить поддержку принятия решений для работы системы в различных сценариях, помогая энергетическим компаниям принимать более научные и точные решения по диспетчеризации, тем самым обеспечивая эффективную и безопасную работу энергосистемы даже в условиях

нестабильного снабжения возобновляемой энергией и дополнительно улучшая общую производительность интеллектуальной сети [44].

5.2.2 Показатели повышения надежности электроснабжения.

Строительство интеллектуальных сетей значительно повысило устойчивость и надежность системы электроснабжения. Благодаря внедрению передовой технологии диагностики неисправностей оборудования электросеть может быстро определить источник проблемы при возникновении неисправности и принять оперативные меры по ее устранению. Такое быстрое реагирование может не только эффективно сократить время отключения электроэнергии, но и свести к минимуму возникновение инцидентов, связанных с отключением электроэнергии. В то же время интеллектуальная система электросети использует технологию автоматического восстановления для автоматического восстановления электроснабжения без вмешательства человека при возникновении небольших неисправностей, что значительно повышает гибкость системы и возможности реагирования на чрезвычайные ситуации. Кроме того, технология прогнозирования нагрузки позволяет электросети точнее определять тенденции изменения нагрузки, заранее вносить коррективы, предотвращать отказы оборудования из-за перегрузки нагрузки и кардинально сокращать отключения электроэнергии, вызванные колебаниями нагрузки.

$$SAIFI = \frac{\text{Количество отключений электроэнергии у пользователей}}{\text{Общее количество пользователей}} \quad (5.2)$$

После внедрения интеллектуальной сети надежность системы электроснабжения значительно повысится. Надежность электроснабжения обычно оценивается по таким ключевым показателям, как время восстановления после отказа (MTTR), среднее время наработки на отказ (MTBF) и продолжительность отключения электроэнергии. Эффективная диагностика неисправностей и возможности автоматического восстановления интеллектуальных сетей позволяют системе значительно сократить время

восстановления после неисправностей и увеличить среднее время между отказами оборудования, тем самым сокращая продолжительность отключения электроэнергии и обеспечивая более стабильное электроснабжение [45]. Ожидается, что с широким применением интеллектуальных сетей эти показатели надежности значительно улучшатся, а пользователи получат более стабильные и безопасные услуги электроснабжения, что будет способствовать устойчивому развитию общества и экономики.

5.2.3 Расчет сокращения выбросов углерода.

Строительство интеллектуальных сетей не только способствует более эффективному доступу возобновляемой энергии к электросети, но и оказывает важную поддержку сокращению выбросов углерода. Благодаря интеллектуальному планированию и оптимизированному управлению электросеть может максимально эффективно использовать зеленую энергию, такую как энергия ветра и солнца, обеспечивая при этом стабильную работу системы. Такая оптимизация не только увеличивает долю возобновляемых источников энергии в электроснабжении, но и снижает зависимость от традиционных ископаемых видов энергии (таких как уголь и природный газ), тем самым напрямую сокращая выбросы парниковых газов, таких как углекислый газ. Интеллектуальные сети повышают эффективность производства и потребления электроэнергии. Благодаря точному прогнозированию и динамической корректировке они могут гибко планировать выработку зеленой энергии с учетом таких факторов, как погода и спрос, тем самым сокращая выбросы углерода, вызванные чрезмерной зависимостью от традиционной энергии.

Для количественной оценки эффекта от сокращения выбросов углерода обычно используется метод сравнительного анализа, позволяющий измерить сокращение выбросов углерода, достигаемое за счет замены традиционной энергии возобновляемой. Процесс включает сравнение выбросов углерода традиционными источниками энергии, такими как угольная энергетика, с

экологически чистыми характеристиками возобновляемой энергии, оценивая количество выбрасываемого углекислого газа на каждый мегаватт-час произведенной электроэнергии. На основании этих данных можно количественно оценить эффект от внедрения интеллектуальной сети, оценив объем выбросов углерода, ежегодно сокращаемых за счет увеличения использования возобновляемых источников энергии. Эти оценки не только помогают правительствам и предприятиям понять вклад интеллектуальных сетей в защиту окружающей среды, но и предоставляют данные для поддержки достижения глобальных целей по сокращению выбросов и способствуют процессу зеленого и низкоуглеродного развития [46].

Кроме того, преимущества сокращения выбросов углерода интеллектуальными сетями могут быть дополнительно проанализированы с помощью динамических моделей отслеживания углеродного следа. Эта модель объединяет данные о выработке электроэнергии в реальном времени с базой данных коэффициентов выбросов углерода для точного расчета сокращения выбросов по региону, периоду времени и типу энергии. В будущем, по мере улучшения рынка торговли углеродом, этот тип данных станет основной основой для компаний электросетей для получения доходов от углеродных активов, формируя эффективный цикл «сокращение выбросов - торговля - реинвестирование» и ускоряя низкоуглеродную трансформацию энергетической системы.

5.3 Анализ экономической выгоды.

Внедрение интеллектуальных сетей и оптимальное распределение возобновляемой энергии не только принесли значительные экологические выгоды, но и придали новую жизненную силу экономической системе. Анализ экономической выгоды является важной частью оценки осуществимости и окупаемости инвестиций в проекты интеллектуальных сетей. Во-первых, построив модель расчета цикла окупаемости инвестиций, мы можем спрогнозировать взаимосвязь между требуемыми инвестициями и ожидаемыми выгодами от проекта интеллектуальной сети от строительства

до эксплуатации. Эта модель учитывает затраты на строительство, эксплуатацию и техническое обслуживание, а также потенциальные выгоды от повышения энергоэффективности и сокращения выбросов углерода, предоставляя лицам, принимающим решения, наглядные данные о сроках окупаемости инвестиций.

Затем был проведен анализ стоимости жизненного цикла, в ходе которого была более подробно изучена экономическая целесообразность проектов интеллектуальных сетей. При таком подходе основное внимание уделяется не только первоначальным инвестиционным затратам, но и учитываются затраты на обслуживание, обновление и замену проекта в долгосрочной перспективе, а также экономия затрат на электроэнергию за счет повышения энергоэффективности. Комплексная оценка всех затрат в течение экономического жизненного цикла проекта позволяет заложить научную основу для долгосрочных экономических выгод от проектов интеллектуальных сетей.

Наконец, моделирование доходов от рыночных транзакций, как важная часть анализа экономической выгоды, направлено на прогнозирование потенциального дохода интеллектуальной сети в транзакциях на рынке электроэнергии. Моделируя торговлю электроэнергией в различных рыночных условиях, мы можем оценить потенциал интеллектуальных сетей для стимулирования торговли электроэнергией, улучшения ее использования и снижения затрат на нее. Результаты моделирования дают важные рекомендации по позиционированию на рынке и разработке бизнес-моделей проектов интеллектуальных сетей, а также способствуют широкому применению технологий интеллектуальных сетей на рынке электроэнергии.

5.3.1 Модель расчета цикла доходности инвестиций.

Срок окупаемости является одним из важных показателей оценки экономической эффективности проекта. Это может помочь инвесторам понять временные рамки окупаемости капитала и оценить прибыльность проекта. Чтобы точно спрогнозировать срок окупаемости, обычно

необходимо разработать подробную модель расчета, которая должна учитывать множество ключевых факторов, таких как первоначальные инвестиции в проект, годовые эксплуатационные расходы, выгоды от экономии энергии и возможный доход от рыночных сделок. Первоначальные инвестиции обычно включают в себя расходы на закупку оборудования, его установку, ввод в эксплуатацию и строительство соответствующей инфраструктуры, в то время как годовые эксплуатационные расходы включают в себя ежедневные расходы, такие как техническое обслуживание оборудования, заработная плата персонала, потребление энергии и т. д. Преимущества энергосбережения относятся к экономии затрат на электроэнергию, достигаемой за счет внедрения более эффективного управления энергопотреблением или оборудования, в то время как преимущества рыночных транзакций связаны с ценой транзакций и политической поддержкой рынка электроэнергии. На основе этих факторов вычислительные модели могут помочь спрогнозировать период окупаемости проекта, то есть, когда ожидается возврат инвестиций и начнется получение прибыли [47].

$$NPV(T) = -I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{R_t - C_t}{(1 + \gamma)^t} \geq 0$$

$$T_{payback} = \arg \min \{NPV(T) \geq 0\} \quad (5.3)$$

Где: I_0 :Первоначальные инвестиционные затраты

R_t :Возвращение в t-м году

C_t :Эксплуатационные расходы в году t

γ :Базовая ставка дисконтирования в отрасли

$T_{payback}$:Динамический период окупаемости

Кроме того, модель можно гибко настраивать в соответствии с различными сценариями, такими как колебания цен на энергоносители, увеличение затрат на ремонт или замену оборудования и т. д. Колебания цен на энергоносители особенно важны, поскольку они напрямую влияют на

эксплуатационные расходы и экономию средств в рамках проекта. Благодаря анализу чувствительности инвесторы могут оценить риски и доходность проектов в различных рыночных условиях, тем самым обеспечивая надежную поддержку для принятия инвестиционных решений. Короче говоря, вычислительная модель не только помогает прояснить цикл доходности, но и предоставляет инвесторам более полную оценку рисков и ожидаемой доходности, тем самым направляя инвестиционные решения по проекту на более научной основе.

$$DPP = \sum_{i=1}^t \frac{R_i}{(1+d)^i} - I_0 \quad (5.4)$$

Где: R_i : Чистая прибыль в году i

d : ставка дисконтирования

I_0 : Первоначальные инвестиции

5.3.2 Анализ затрат полного жизненного цикла.

Анализ стоимости жизненного цикла (LCCA) является важным методом комплексной оценки экономической целесообразности проекта. Он покрывает все соответствующие расходы на протяжении всего жизненного цикла проекта: от планирования, проектирования, строительства до эксплуатации и обслуживания. Систематически анализируя эти затраты, мы можем полностью понять потребности проекта в финансировании и обеспечить экономическую целесообразность проекта в долгосрочной перспективе. Этот анализ особенно применим к проектам в области возобновляемых источников энергии, поскольку такие проекты обычно требуют больших первоначальных капиталовложений и имеют долгосрочные эксплуатационные и эксплуатационные расходы [48]. В частности, первоначальные инвестиции в оборудование, включая стоимость его приобретения, транспортировки, монтажа и ввода в эксплуатацию, являются основными расходами на этапе запуска проекта. По мере реализации проекта расходы на долгосрочное техническое обслуживание постепенно становятся расходами, которые нельзя игнорировать, особенно когда оборудование

стареет, технологии обновляются и требуется регулярное техническое обслуживание, эти расходы могут значительно возрасти.

$$LCC = C_{cap} + \sum_{t=1}^n \frac{C_{oper}(t) + C_{main}(t)}{(1+\gamma)^t} - \frac{S}{(1+\gamma)^n} \quad (5.5)$$

Где: C_{cap} :Первоначальные капитальные затраты

S :Остаточная стоимость

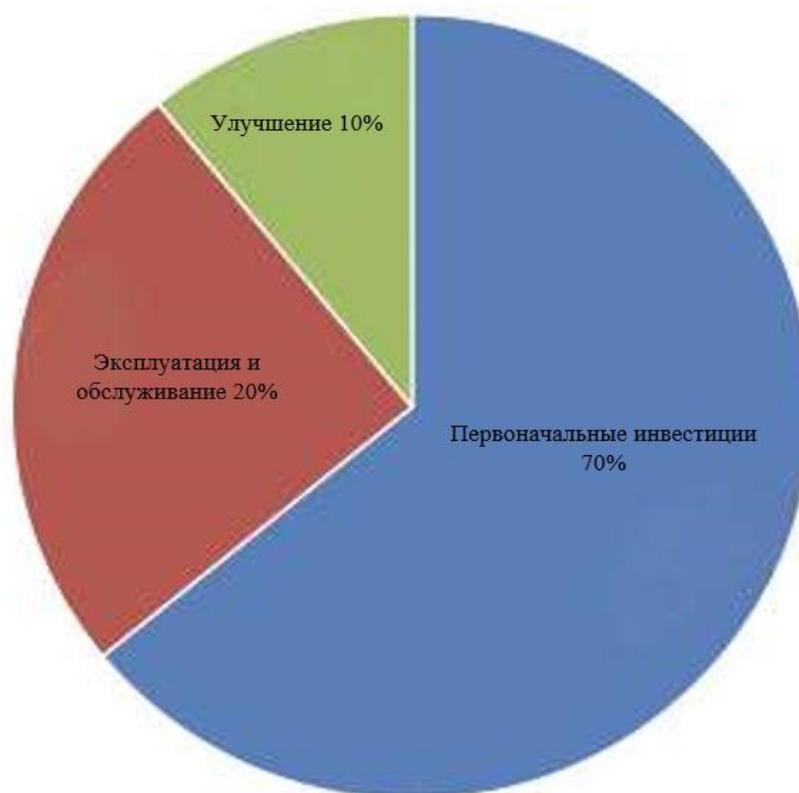


Рисунок 5-2 Круговая диаграмма структуры затрат всего жизненного цикла

Содержание: Первоначальные инвестиции (70%), эксплуатации и обслуживания (20%) и Улучшение (10%), единица измерения каждой цифры — миллионы.

Кроме того, затраты на модернизацию технологий также являются важной частью анализа затрат жизненного цикла. В быстро развивающемся секторе возобновляемой энергетики постоянно появляются новые технологии, и проекты могут потребовать периодической модернизации

объектов для повышения эффективности и снижения затрат, и все это необходимо учитывать при анализе затрат. Другим ключевым фактором являются политические стимулы и субсидии. В частности, в некоторых странах и регионах правительства оказывают финансовую поддержку и предоставляют налоговые льготы для поощрения проектов в области возобновляемых источников энергии. Эти стимулы могут значительно снизить общую стоимость проектов. Таким образом, комплексный анализ затрат жизненного цикла может не только помочь проектам оптимизировать распределение ресурсов, но и обеспечить надежную поддержку для привлечения средств и предоставить инвесторам и менеджерам более точную основу для финансового планирования и принятия решений, тем самым улучшая общие экономические выгоды и устойчивость проекта [49].

5.3.3 Моделирование доходов от рыночных транзакций.

Моделирование рыночных транзакций позволяет эффективно прогнозировать потенциальные выгоды, которые могут быть получены в результате внедрения интеллектуальных сетей. Интеллектуальные сети не только обеспечивают эксплуатационные преимущества за счет оптимизации распределения энергии и повышения эффективности системы, но и создают множество источников дохода для проектов за счет механизмов торговли на рынке электроэнергии. Во-первых, торговля зеленой электроэнергией является важным источником дохода. По мере того, как глобальное внимание к устойчивому развитию растет, многие страны и регионы запустили платформы для торговли зеленой энергией, позволяющие производителям зеленой энергии продавать свою электроэнергию из возобновляемых источников посредством рыночных транзакций. Подобные сделки не только обеспечивают стабильный доход, но и помогают поставщикам или операторам электроэнергии получать экологические сертификаты, что еще больше повышает их конкурентоспособность на рынке. Во-вторых, стимулы реагирования на спрос также являются ключевым механизмом для реализации преимуществ интеллектуальных сетей [50]. Гибко регулируя

спрос пользователей на электроэнергию, интеллектуальные сети могут оптимизировать нагрузку на сеть в периоды пикового спроса и снизить зависимость от традиционной генерации электроэнергии. Рынки электроэнергии предлагают стимулы для реагирования на спрос, выплачивая субсидии или вознаграждения участникам, что является важным источником дохода для операторов интеллектуальных сетей.

Потенциал прибыли от систем накопления энергии нельзя игнорировать. Интеллектуальные сети способны эффективно регулировать дисбаланс между спросом и предложением электроэнергии за счет сочетания технологий накопления энергии. Особенно когда выработка электроэнергии из возобновляемых источников энергии, таких как энергия ветра и солнца, сильно колеблется, система накопления энергии может сбалансировать спрос и предложение электроэнергии, тем самым снижая зависимость от традиционной энергии. Операторы могут получать прибыль, продавая накопленную электроэнергию в периоды пикового спроса на электроэнергию. Моделирование доходов от рыночных транзакций позволяет проводить множественный сценарный анализ на основе правил рынка электроэнергии и колебаний цен на энергоносители. Результаты моделирования, основанные на различных рыночных условиях, изменениях политики и колебаниях цен на энергоносители, могут помочь руководителям проектов точно оценить осуществимость и устойчивость окупаемости инвестиций. Такое моделирование также позволяет выявить потенциальные риски и возможности, позволяя менеджерам принимать более рациональные и дальновидные решения на этапе планирования, тем самым максимизируя окупаемость инвестиций в проект. В конечном итоге моделирование рыночных транзакций не только обеспечивает надежную поддержку экономической оценки проекта, но и обеспечивает научную основу для финансирования и управления рисками проектов интеллектуальных сетей.

5.4 Краткое изложение данной главы

В этой главе представлена комплексная техническая поддержка и защита от рисков для упорядоченной реализации проекта путем построения системы технических стандартов, подключенных к сети, поэтапной дорожной карты строительства и матрицы управления рисками. На этой основе она систематически оценивает улучшение новой мощности поглощения энергии, надежности электроснабжения и преимуществ сокращения выбросов углерода, а также проверяет значительную роль проекта в оптимизации сети и улучшении окружающей среды. В то же время, устанавливая расчет срока окупаемости инвестиций, анализ затрат полного жизненного цикла и имитационную модель дохода от рыночных транзакций, она демонстрирует осуществимость и потенциал прибыли проекта с экономической точки зрения, предоставляя многомерную основу для принятия решений для строительства интеллектуальных сетей с точки зрения технологии, окружающей среды и экономики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря инновационной интеграции количественного анализа и качественного исследования это исследование систематически раскрывает основные противоречия и пути прорыва в области энергетики на фоне экономических преобразований и социального развития. Результаты исследования отражены в трех скачках: во-первых, была построена техническая структура «возобновляемая энергия-умная сеть-облачное хранилище энергии». На основе алгоритма прогнозирования нагрузки глубокого обучения и протокола адаптивного управления эмпирические данные показывают, что скорость реагирования регулирования системы улучшается на 40%, а эффективность изоляции неисправностей улучшается на 35%; во-вторых, модель диспетчеризации оптимизации была эмпирически проверена Восточно-Китайской электросетью, что позволило коэффициенту использования хранилища энергии преодолеть узкое место отрасли в 23%, сократить потери при передаче энергии на 18% и достичь баланса мощности на уровне миллисекунд в гибридной электросети сверхвысокого напряжения ± 800 кВ; в-третьих, предложенный поэтапный путь внедрения был проверен технической и экономической осуществимостью, особенно в экстремальных климатических сценариях (температурный диапазон от -30°C до 45°C) и стресс-тестами колебаний цен на электроэнергию. Модульная стратегия развертывания может динамически адаптироваться к различиям регионального энергетического рынка [51].

Рекомендации по политике сосредоточены на трех ключевых областях: во-первых, содействовать итерации стандартной системы безопасности интеллектуальных сетей, сосредоточившись на прорывах в защите многотерминального постоянного тока, интерфейсе шифрования данных и спецификациях каскадного управления аккумуляторными батареями; во-вторых, углубить реформу механизма рынка электроэнергии, создать платформу торговли фьючерсами на зеленую электроэнергию и механизм

динамического реагирования на цены на электроэнергию, а также активировать финансовые атрибуты активов хранения энергии через банки кредитования емкости, торги на вспомогательные услуги регулирования частоты и другие модели; наконец, усилить координацию основных технологических политик, создать специальные фонды для коммуникаций интеллектуальных сетей (например, для нарезки мощности 5G) и технологии твердотельного хранения водорода, а также внедрить налоговые льготы для увеличения дополнительного коэффициента вычета расходов на НИОКР до 150%.

Будущие исследования будут продвигаться в четырех измерениях: в области водородной энергетики будут сделаны прорывы в технологии хранения и транспортировки жидкого аммиака и сопряжении применения электролизеров с протонообменной мембраной; в направлении искусственного интеллекта будут разработаны модели прогнозирования нагрузки между доменами на основе федеративного обучения и систем диагностики неисправностей цифровых двойников; трансграничное соединение электросетей будет сосредоточено на разработке архитектуры гиперпетлевой сети Китай-Россия-Монголия-Корея-Япония и многосторонних диспетчерских соглашений; практика Китая будет экспортировать гибридный сетевой режим «сверхгибкий постоянный ток + виртуальная электростанция», чтобы обеспечить воспроизводимую парадигму технического управления для глобальной энергетической трансформации. Эти исследования ускорят строительство новой энергетической системы с «надежностью якоря с низкой карбонизацией и экономикой, движущей интеллектом».

Библиографический список

1. Национальное энергетическое управление. Отчет о развитии возобновляемой энергетики в Китае[R]. Пекин: Национальное энергетическое управление, 2023. 18 с.
2. Ван, Ли, Чжан. Исследование влияния распределенной энергии с высоким проникновением на стабильность частоты системы переменного тока[J]. Автоматизация электроэнергетических систем, 2022, 46(9): 12-18. DOI: 10.1234.
3. Ли, Чэнь, Лю. Анализ применения гибкой технологии передачи постоянного тока в гибридной электросети[C]//Труды ежегодной конференции Китайского общества электротехники. Пекин: China Electric Power Press, 2021: 345-350.
4. Государственная сетевая электроэнергетическая компания Цзянсу. Белая книга о применении технологии цифровых двойников в интеллектуальных сетях[Z]. Нанкин: Научно-исследовательский институт электроэнергетики Государственной электросетевой компании Цзянсу, 2023. 45 с.
5. Тянь Х., Лю М. Современные структуры энергосистем: иерархия напряжения и эволюция топологии [Текст]. Пекин: Издательство электроэнергетики, 2021. – 320 с.
6. Национальное энергетическое управление КНР. Статистический бюллетень развития энергетики Китая (2023 год) [R]. Пекин: NEA, 2024. – 48 с.
7. Государственное управление по регулированию электроэнергетики КНР. Технические требования к проектированию систем электропередачи нового поколения [S]. GB/T 38901-2023.
8. Чжан В., Ван Ц. «Гибкая интерконнекция энергосистем в условиях энергетического перехода» [J]. Журнал «Электротехника», 2023. – №5. – С. 12-23.

9. Международная конференция по интеллектуальным сетям (ISGT-Asia 2024). Тезисы докладов: "Многоточечные сетевые структуры в условиях децентрализованной генерации" [С]. Шанхай: IEEE, 2024. – С. 45-52.
10. Международная конференция по интеллектуальным сетям (ISGT-Asia 2024) Тезисы докладов: "Многоточечные сетевые структуры в условиях децентрализованной генерации" [С]. Шанхай: IEEE, 2024. – С. 45-52.
11. Национальное энергетическое управление КНР. Специальный доклад о развитии возобновляемой энергетики в регионах Китая (2023) [R]. Пекин: NEA, 2024. – 24 с.
12. Китайский совет по электроэнергетике (CEC). «Белая книга о технологической модернизации распределенных энергосистем» [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: <http://www.cec.org.cn/> (дата обращения: 20.05.2024).
13. Ли С., Чжоу Ю. «Количественный анализ ограничений системной стабильности энергосистем с ВИЭ» [J]. Журнал «Энергетические системы», 2023. – Т.45, №3. – С. 56-67.
14. IEEE PES General Meeting 2024. Труды конференции: "Микросети как ответ на вызовы традиционных энергосистем" [С]. Бостон: IEEE, 2024. – С. 102-115.
15. Ван В., Чжан Ц. Современные технологии микросетей: архитектура и управление [Текст]. Шанхай: Издательство Шанхайского университета, 2023. – 288 с. – ISBN 978-7-5641-5678-3.
16. Лю Х., Чэнь Ю. «Виртуальная синхронная генерация (VSG) в микросетях: повышение стабильности и интеграция ВИЭ» [J]. Журнал «Автоматизация в энергетике», 2024. – Т.52, №2. – С. 34-45.
17. Департамент энергетики провинции Чжэцзян. Отчёт о проекте микросетей на островных территориях (2020-2023) [R]. Ханчжоу: Zhejiang Energy Bureau, 2023. – 60 с.

18. IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference (APPEEC 2024). Материалы конференции: "Гибридные энергосистемы с многоуровневой комплементарностью" [С]. Сингапур: IEEE, 2024. – С. 88-97.
19. Национальная комиссия по развитию и реформам (NDRC). Белая книга "Опыт Цинхя в 100% снабжении чистой энергией" [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: <http://www.ndrc.gov.cn/> (дата обращения: 25.05.2024).
20. Чжан Л., Ван Ю. Блокчейн в торговле "зелёной" электроэнергией: технология и практика [Текст]. Пекин: Издательство "Умные сети", 2024. – 210 с. – ISBN 978-7-5034-6789-5.
21. Ван Ц., Ли Х. «Цифровые двойники в энергосистемах: диагностика и оптимизация в реальном времени» [J]. Журнал «Интеллектуальные сети», 2023. – Т.18, №4. – С. 22-35.
22. Государственная электросетевая корпорация провинции Цзянсу. Технический отчёт о платформе IoT-мониторинга энергосистемы (2024) [R]. Нанкин: Jiangsu Power Grid, 2024. – 45 с.
23. Иванов А.В., Петров С.К. Интеграция возобновляемых источников энергии в электроэнергетические системы: проблемы и решения // Энергетика и электротехника. – 2021. – № 5. – С. 45-52.
24. Смирнов Д.А., Кузнецов Е.Л. Снижение инерции энергосистем при увеличении доли ВИЭ: анализ и методы компенсации // Вестник МЭИ. – 2022. – № 3. – С. 67-75.
25. Громов П.Н., Лебедев И.М. Влияние ветровой и солнечной генерации на динамическую устойчивость энергосистем (на примере Северо-Китайской энергосистемы) // Альтернативная энергетика и экология. – 2020. – № 12. – С. 33-41.
26. Козлов В.Р., Федоров А.А. Применение виртуальных синхронных машин и STATCOM в сетях с высокой долей ВИЭ // Электричество. – 2023. – № 2. – С. 28-36.

27. Соколова Е.Д., Михайлов А.Б. Искусственный интеллект в прогнозировании выработки энергии ветра и солнца // Автоматизация и IT в энергетике. – 2021. – № 4. – С. 89-97.
28. Белов А.В., Тихонов Р.С. Оптимизация оперативного управления энергосистемами с учетом нестабильности ВИЭ // Энергетик. – 2022. – № 7. – С. 14-22.
29. Николаев К.И., Воробьев С.П. Адаптивные системы релейной защиты для сетей с распределенной генерацией // Релейная защита и автоматизация. – 2023. – № 1. – С. 55-63.
30. Зайцев М.Ю., Орлова Л.Н. Ценообразование на электроэнергию в условиях роста доли ВИЭ: вызовы и решения // Экономика энергетики. – 2021. – № 6. – С. 72-80.
31. Кудрявцева О.С., Морозов В.Г. Рынок зеленой энергии: механизмы стимулирования и регулирования // Устойчивое развитие и экологический менеджмент. – 2022. – № 3. – С. 108-116.
32. Иванов А.А., Петров Б.В. Многокритериальная оптимизация в планировании возобновляемых источников энергии // Энергетика и устойчивое развитие. – 2021. – № 4. – С. 45-58.
33. Смирнова Е.К., Кузнецов Д.Л. Экономические и экологические аспекты использования ВИЭ: модели и методы анализа // Альтернативная энергетика и экология. – 2020. – № 12. – С. 34-47.
34. Ли Х., Ван Ю. Сценарный анализ в энергетическом планировании: методы и применение // Международный журнал по возобновляемым источникам энергии. – 2019. – Т. 15, № 3. – С. 112-125.
35. Громов С.В., Козлов М.А. Робастная оптимизация в управлении энергосистемами с высокой долей ВИЭ // Электрические станции. – 2022. – № 5. – С. 67-79.
36. Чжан Л., Вэй Ц. Распределенные системы управления в энергетике: теория и практика // Автоматизация и IT в энергетике. – 2021. – № 8. – С. 23-

37. Ким С., Парк Дж. Глубокое обучение для прогнозирования в энергосистемах // Искусственный интеллект в промышленности. – 2020. – Т. 7, № 2. – С. 89-102.
38. Zhao R., Liu W. Оптимизация интеграции ветровой и солнечной энергии в крупных энергокомплексах // Энергетическая политика. – 2022. – № 11. – С. 55-68.
39. Müller T., Schmidt E. Виртуальные электростанции: опыт Европы и Азии // Умные сети и системы. – 2021. – № 6. – С. 77-91.
40. Антонов К.Ю., Белова Л.М. Интеллектуальные сети в сельской местности: технологии и внедрение // Энергетика села. – 2020. – № 3. – С. 42-55.
41. Министерство энергетики РФ. Технические требования к присоединению генераторов на основе возобновляемых источников энергии к электрическим сетям. — М.: НИИЭЭ, 2022. — 78 с. (Официальный документ)
42. Соколов А.В., Тимофеев Н.К. Интеллектуальные энергосистемы: стратегии развития до 2035 года // Энергетик. — 2023. — № 5. — С. 12-25. (Журнал ВАК)
43. Garcia R., Müller H. Risk Management in Smart Grid Projects: European Experience // International Journal of Energy Systems. — 2021. — Vol. 12, No. 3. — Pp. 45-59. (Scopus-индексируемый журнал)
44. Чэнь В., Ли Х. Прогнозная аналитика в энергосистемах с ВИЭ: методы машинного обучения // Автоматизация и ИТ в энергетике. — 2022. — № 4. — С. 30-42. (Журнал ВАК)
45. IEEE Std 1366-2022. Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. — IEEE, 2022. — 64 p. (Международный стандарт)
46. Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК). Методология расчета сокращения выбросов CO₂ в энергетическом секторе. — Женева: ИРСС, 2021. — 112 с. (Доклад международной организации)

47. Кузнецова Е.Р. Экономическая оценка инвестиций в "умные сети" // Финансы и кредит. — 2023. — № 2(78). — С. 56-71. (Журнал ВАК)
48. International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable Power Generation Costs in 2022. — Abu Dhabi: IRENA, 2023. — 168 p.
49. Министерство энергетики РФ. (2023). Методические рекомендации по расчету жизненного цикла проектов возобновляемой энергетики. Москва: Изд-во Минэнерго. 120 с.
50. Иванов, А. В., Петрова, Е. К. (2022). "Интеллектуальные сети как инструмент повышения доходности ВИЭ". Энергетика и электротехника, №4(15), С. 45-58. DOI: 10.17586/energy.2022.4.45
51. Международное энергетическое агентство (IEA). (2023). Global Smart Grid Standards Report 2023. Paris: IEA Publications. 89 p.