

Исследование скоординированной оптимизации систем хранения энергии и возобновляемых источников энергии в автономных микросетях в рамках новых систем электроснабжения

Чжуоран Сонг^а, Минли Чжанг^а, Юаньин Чи^б, Цзялинь Ли^с, *, И Чжэн^б

^а Государственная электросетевая компания по энергоснабжению «Ляонин», ЗАО, Шэньян 110006, Китайская Народная Республика

^б Школа экономики и менеджмента, Пекинский технологический университет, Пекин 100124, Китайская Народная Республика

^с Школа экономики и менеджмента, Северо-Китайский электроэнергетический университет, Пекин 102206, Китайская Народная Республика

Аннотация. Обеспечение электроэнергией отдаленных регионов представляет собой серьезную проблему в связи с кардинальными изменениями в глобальной энергетической системе. Для решения этой проблемы в данном исследовании предлагается решение в виде автономной микросети, интегрированной с системами хранения энергии. Автономные микросети — это самодостаточные электрические сети, способные эффективно решать проблемы доступа к электроэнергии в отдаленных районах, обеспечивая стабильное и надежное электроснабжение местных жителей. В данном исследовании представлен всесторонний обзор проектирования, стратегий управления, энергоменеджмента и оптимизации автономных микросетей на основе отечественных и международных исследований. Также рассматривается важнейшая роль систем хранения энергии в повышении стабильности и экономической эффективности микросети. Кроме того, анализируются конфигурации мощности систем хранения энергии в автономных сетях. Системы хранения энергии не только смягчают прерывистость и нестабильность выработки возобновляемой энергии, но и обеспечивают поддержку электроснабжения в периоды пикового спроса, тем самым повышая стабильность и надежность сети. Путем сравнения различных технологий хранения энергии, таких как литий-ионные батареи, гидроаккумулирующие электростанции и системы хранения энергии на сжатом воздухе, в данном исследовании предлагаются оптимальные конфигурации мощности систем хранения энергии, адаптированные к различным сценариям применения. Наконец, на примере типичной микросети был проведен эмпирический анализ автономных микросетей и интеграции систем хранения энергии. Определена оптимальная конфигурация систем хранения энергии, а также исследовано влияние интеграции ветровой и солнечной энергии в различных сценариях на баланс сети. Установлено, что рациональная конфигурация систем хранения энергии может значительно повысить коэффициент использования возобновляемой энергии, снизить эксплуатационные расходы системы и повысить устойчивость сети в экстремальных условиях. Данное исследование предоставляет важную теоретическую поддержку и практическое руководство для проектирования и внедрения автономных микросетей в отдаленных районах.

Ключевые слова: Автономная микросеть; Система хранения энергии; Оптимальная конфигурация; Возобновляемая энергия

0 Введение

В условиях глобального энергетического перехода проблема обеспечения надежного электроснабжения в отдаленных районах остается особенно актуальной. Эти регионы сталкиваются со значительными препятствиями в доступе к традиционным централизованным сетям электроснабжения из-за своей географической удаленности, сложного рельефа и низкой плотности населения. Строительство и обслуживание линий электропередачи большой протяженности не только влекут за собой значительные затраты, но и ограничены топографическими и климатическими условиями, которые часто препятствуют стабильности и надежности

электроснабжения. В случае экстремальных погодных явлений или стихийных бедствий могут происходить перебои в электроснабжении, серьезно влияющие на качество жизни местных жителей и препятствующие экономическому развитию.

Интеграция возобновляемых источников энергии, таких как ветровая и солнечная энергия, создает дополнительные проблемы для балансировки мощности в реальном времени. Эти источники энергии характеризуются случайностью, изменчивостью и прерывистостью, при этом выходная мощность часто не совпадает с колебаниями кривой нагрузки. В частности, возобновляемая энергия, как правило, имеет низкую выходную мощность в периоды пиковой нагрузки и высокую выходную мощность в непиковые периоды. Для сглаживания этого дисбаланса системе требуется значительное количество традиционных тепловых электростанций для обеспечения возможности сглаживания пиковых нагрузок. По мере увеличения доли возобновляемой энергии в энергосистеме растет и требуемая резервная мощность пиковых энергоблоков, что осложняет поддержание равновесия спроса и предложения. В экстремальных условиях, таких как неблагоприятные погодные явления, приводящие к минимальной или нулевой выработке электроэнергии ветряными турбинами и фотоэлектрическими системами, недостаточная резервная мощность может привести к дисбалансу спроса и предложения, что потребует ограничения нагрузки для обеспечения безопасности системы.

С углублением рыночной трансформации рыночная динамика, например, в сегментах, расположенных выше по цепочке поставок, стала критически важным фактором, влияющим на баланс спроса и предложения. В настоящее время на угольную энергетику приходится почти 50% установленной мощности электростанций Китая, она обеспечивает примерно 60% выработки электроэнергии в стране и отвечает за более чем 70% пиковых нагрузок системы. Будучи основным источником энергии в Китае и «балластом», обеспечивающим стабильность электроснабжения, угольная энергетика требует значительного потребления угля. Следовательно, надежность поставок угля существенно влияет на равновесие спроса и предложения на электроэнергию. Кроме того, сохраняются слабые места в структуре местных распределительных сетей, что делает их неспособными удовлетворять пиковые потребности в электроэнергии, особенно в старых городских районах, отдаленных регионах и там, где развитие опередило плановые ожидания.

Для решения этих вопросов концепция новых энергетических систем предполагает использование децентрализованных моделей энергоснабжения, в частности, автономных микросетей, основанных на распределенных фотоэлектрических (ФЭ) системах. Эти микросети предлагают инновационные решения этих насущных проблем. Автономная микросеть — это небольшая, самодостаточная энергетическая система, способная работать независимо, без зависимости от внешней сети. Развертывание автономных микросетей в отдаленных регионах эффективно решает проблемы доступа к электроэнергии, обеспечивая стабильное и надежное электроснабжение для местных жителей. Более того, достижения в области технологий, особенно разработка систем хранения энергии, еще больше смягчили непостоянство и нестабильность возобновляемой энергии, заложив прочную основу для создания чистой, низкоуглеродной, безопасной и эффективной энергетической системы.

1 Обзор литературных данных

1.1 Исследования в области автономных микросетей

Исследования в области автономных микросетей в основном сосредоточены на повышении самодостаточности системы и операционной эффективности. Комплексный анализ работ различных ученых позволяет получить глубокое понимание проблем проектирования, стратегий управления, энергоменеджмента и оптимального распределения ресурсов, с которыми сталкиваются автономные микросети.

Суть проектирования автономных микросетей заключается в эффективной интеграции возобновляемых источников энергии с системами хранения для достижения эффективного и стабильного энергоснабжения. Например, Чжао и др. [1] предложили полностью основанную на постоянном токе (DC) схему сети для интеграции фотоэлектрических (PV) систем и устройств хранения энергии, оптимизируя поток энергии и минимизируя потери при преобразовании. Такой подход значительно снижает потери энергии, связанные с преобразованием переменного тока (AC), тем самым повышая общую энергоэффективность. В области стратегий управления Ма [2] подчеркнул использование передовых теорий управления для повышения динамической устойчивости автономных энергосетей. Стратегии модельного прогнозирующего управления (MPC), в частности, демонстрируют способность прогнозировать и корректировать выходную мощность для учета колеблющихся потребностей нагрузки, особенно в условиях высокой нестабильности возобновляемой энергии.

Чжан и др. [3] представили гибридную оптимизационную модель автономных фотоэлектрических и гидроэлектроэнергетических систем, используя географическую информационную систему (ГИС) для городов с обильными водными ресурсами. Эта модель использует водные ресурсы для удовлетворения потребностей в электроэнергии с меньшими экономическими затратами и меньшим количеством накопительных сооружений. Мэн [4] подчеркнул важность инверторной технологии в фотоэлектрических системах, отметив, что оптимизация стратегий управления инвертором имеет решающее значение для повышения эффективности выработки электроэнергии фотоэлектрическими системами. За счет повышения быстродействия инвертора и уточнения алгоритмов настройки можно максимизировать использование солнечной энергии. Хэ и др. [5] эмпирически сравнили различные стратегии работы, подтвердив эффективность стратегий оптимизации в повышении эффективности и надежности системы в практических приложениях. В своем исследовании они изучили экономические и экологические последствия расширения сети по сравнению с автономными системами, подчеркнув преимущества автономных микросетей для населения, не имеющего доступа к электроэнергии. Рассмотренные технологии включали централизованное расширение сети на ископаемом топливе и автономные системы, основанные как правило на солнечных фотоэлектрических элементах и батареях. Ортега-Арриага и др. [6] отметили отсутствие согласованности в методологиях сравнения расширения сети с автономными системами. Однако они отметили, что стоимость электроэнергии в автономных системах колеблется от 0,2 до 1,4 долл./кВт·ч, в то время как стоимость расширения сети сильно варьируется, от менее 0,1 долл./кВт·ч до более 8 долл./кВт·ч. Эта изменчивость предполагает, что автономные системы уже могут быть экономически эффективным вариантом во многих вариантах моделирования.

1.2 Исследование конфигурации емкости накопителей энергии

В области хранения энергии Чжэн [7] был одним из первых, кто исследовал роль в повышении надежности микросетей и снижении эксплуатационных расходов. Правильное распределение емкости накопителей энергии остается критически важным фактором для обеспечения непрерывной работы микросетей. Системы хранения энергии играют ключевую роль в энергосистемах, управляя спросом и предложением энергии, интегрируя возобновляемые источники энергии и обеспечивая быстрое реагирование в чрезвычайных ситуациях. Благодаря своим уникальным функциям сглаживания пиков и заполнения провалов, эти системы высвобождают накопленную энергию в периоды пикового спроса и накапливают избыточную энергию в периоды низкого спроса. Эта гибкость повышает операционную эффективность и экономическую целесообразность сети [8]. Более того, системы хранения энергии играют важную роль в оптимизации цен на электроэнергию, накапливая энергию, когда цена на электроэнергию низкая, и высвобождая ее, когда цена высокая, тем самым максимизируя экономическую эффективность. Эта возможность особенно ценна на нестабильных рынках электроэнергии,

поскольку она использует динамику рынка для снижения нагрузки на сеть и минимизации требований к инвестициям в инфраструктуру.

Системы хранения энергии незаменимы для облегчения интеграции возобновляемых источников энергии в электросети. Поскольку возобновляемые источники энергии, такие как солнечная и ветровая энергия, занимают все большую долю в энергетическом балансе, их присущая нестабильность и прерывистость создают значительные проблемы для управления сетью. Системы хранения энергии решают эти проблемы, накапливая избыточную энергию в периоды высокой выработки и высвобождая ее в периоды высокого спроса [9]. Эта возможность повышает эффективность использования возобновляемой энергии, регулирует баланс между спросом и предложением, а также стабилизирует частоту и напряжение сети. Такие преимущества имеют решающее значение для крупномасштабной интеграции возобновляемой энергии, сокращения потерь от избыточных мощностей и повышения общей эффективности [10]. Роль систем хранения энергии выходит за рамки повседневных аварий в сети. Во время отключений электроэнергии или других сбоев системы хранения энергии обеспечивают быстрое реагирование для поддержания электроснабжения критически важных объектов [11]. Эта возможность значительно повышает устойчивость сети, особенно в экстремальных погодных условиях или при стихийных бедствиях. Кроме того, системы хранения энергии играют ключевую роль в восстановлении сети, поддерживая усилия по перезапуску сети и обеспечивая быстрое возвращение к нормальной работе.

Недавние исследования подчеркнули преимущества передовых конфигураций систем хранения энергии. Чжао и др. [12] продемонстрировали, что оптимизированная конфигурация в системе, сопряженной с ветровым парком и системой хранения, повышает эффективность использования ветровой энергии и общую эффективность системы, демонстрируя преимущества многоэнергетической интеграции. Аналогично, Ши и др. [13] проанализировали конфигурации систем хранения энергии в ветроэнергетических системах с высоким коэффициентом, подчеркнув их влияние на экономичность и надежность эксплуатации. Чен и др. [14] предложили гибридные энергетические стратегии для ветровых электростанций, учитывающие торговлю квотами на выбросы вредных газов для максимизации экономических и экологических выгод. Работа Цзяна и др. [8], с другой стороны, показывает, как высокий процент парков чистой энергии может улучшить производительность системы за счет оптимального распределения накопителей энергии, а также стратегий реагирования на спрос.

Ли и др. [15] исследовали конфигурации накопителей энергии для решения проблемы рассеивания энергии ветра и солнца, обнаружив, что оптимальное распределение мощности снижает отказ от возобновляемой энергии и повышает коэффициенты использования. Чжан и Лю [16] предложили решения для смягчения колебаний мощности и увеличения срока службы накопителей энергии, тем самым улучшив экологические и экономические показатели микросетевых систем. Кроме того, Цзян и др. [17] исследовали зарядные станции для фотоэлектрических накопителей, оптимизируя распределение мощности накопителей с учетом изменчивости выходной мощности фотоэлектрических систем и поведения пользователей электромобилей при зарядке, что в конечном итоге улучшило производительность системы. Чжао и др. [18] Оптимизированная конфигурация общего хранилища энергии в многовиртуальной системе электростанции, исследованная в работе, повышает эффективность работы системы и темпы потребления возобновляемой энергии за счет многоцелевой оптимизации.

1.3 Исследование конфигурации емкости накопителей энергии в автономных микросетях

Исследования конфигурации емкости накопителей энергии в автономных микросетях сосредоточены на повышении стабильности, эффективности и надежности. Ма [19] исследовал передовые системы управления энергией в системах, дополняющих друг друга ветровую, солнечную и накопительную энергию, продемонстрировав их способность смягчать нестабильность

поставок и колебания нагрузки за счет точной оптимизации диспетчеризации. Чжун и др. [20] подчеркнули преимущества гибридных систем хранения энергии, сочетающих литиевые батареи и суперконденсаторы, которые улучшают как экономические показатели, так и надежность электроснабжения. Лян [21] предложил оптимизировать распределение накопителей энергии, используя взаимодополняемость ветровой и солнечной энергии для балансировки спроса и предложения при одновременном снижении зависимости от ископаемого топлива. Ли [22] исследовал потенциал систем производства водорода как новой технологии хранения и преобразования энергии, показав их результативность в повышении эффективности использования энергии в ветро-солнечных системах. Чжу и др. [23] ввели концепцию коэффициента энергетического дисбаланса для оценки корреляций между выходной мощностью ветра и изменениями нагрузки, обеспечив теоретическую поддержку распределения накопителей энергии в автономных системах.

Несмотря на то, что эти исследования демонстрируют значительный прогресс, остаются некоторые пробелы. Большая часть исследований сосредоточена на отдельных энергетических системах или конкретных технологиях, и в них отсутствуют комплексные подходы к интегрированному управлению многоэнергетическими системами. Кроме того, существующие модели часто основаны на предположениях и упрощениях, которые могут не в полной мере отражать сложность реальных условий эксплуатации. Будущие исследования должны уделять приоритетное внимание интегрированной оптимизации, практической применимости системных моделей и передовым стратегиям управления многоэнергетическими системами. Кроме того, снижение стоимости возобновляемой энергии и развитие сетевых технологий, а также оценка экономической эффективности этих технологий будут иметь решающее значение для формирования следующего поколения автономных микросетей.

2 Построение модели оптимизации конфигурации мощности для систем хранения энергии в автономных микросетях

В данном исследовании представлен инновационный подход к построению модели оптимизации конфигурации мощности для систем хранения энергии в автономных микросетях. Модель учитывает такие факторы, как ограничение выработки ветровой и солнечной энергии, сброс нагрузки и изменение структуры потребления электроэнергии в будние и праздничные дни. Для точного количественного определения затрат в различных временных интервалах разработана динамическая целевая функция в сочетании с полным набором ограничений. Такой подход позволяет модели точно отражать общие преимущества системы, тем самым повышая точность оптимизации в сложных энергетических вариантах моделирования. Предложенная методология предлагает эффективное решение для достижения стабильной и эффективной работы автономных микросетей.

В данном исследовании для построения и решения модели используется программирование на языке Python в сочетании с оптимизационным решателем Gurobi.

2.1 Целевая функция

Целевая функция модели заключается в минимизации общих затрат за период времени T . Функция определяет оптимальную емкость хранилища и схему планирования на основе параметров мощности и стоимости ветроэнергетических установок, фотоэлектрических систем и газовых турбин, входящих в состав автономной микросети. Конкретная модель формулируется следующим образом:

$$\text{Min}Z = \sum_{t \in T} (C_{\text{ins}}(t) + C_{\text{om}}(t) + C_{\text{st}}^{\text{mt}}(t) + C_{\text{pl}}(t) + C_{\text{ll}}(t)) \quad (1)$$

В уравнении (1) C_{ins} и $C_{om}(t)$ — это, соответственно, стоимость установки, эксплуатации и технического обслуживания ветроэнергетического хранилища в момент времени t ; $C^{mt} s_t(t)$ — это стоимость запуска газовой турбины в момент времени t ; $C_{pl}(t)$ и $C_{ll}(t)$ представляют собой штрафные издержки за неконтролируемую ветровую энергию и неконтролируемую нагрузку в момент времени t соответственно. Элементы целевой функции подробно описаны ниже:

1) Стоимость установки $C_{ins}(t)$

Стоимость установки на определенный момент времени учитывает совокупные затраты, необходимые для приобретения, строительства и монтажа оборудования. Сюда входят затраты, связанные с проектированием, вводом в эксплуатацию и обеспечением работоспособности всего оборудования для выработки и хранения энергии. Стоимость установки выражается следующим образом:

$$C_{ins}(t) = \sum_{i \in Ng} C_{ins,i}(t) \times I_i + C_{ins,j}(t) \times I_j \quad (2)$$

$$C_{ins,i}(t) = C_{inins,i} \times \left[\frac{r_i}{1 - (1/(1+r_i))^{n_i}} \right] \div 8760$$

$$C_{ins,j}(t) = C_{inins,j} \times \left[\frac{r_j}{1 - (1/(1+r_j))^{n_j}} \right] \div 8760 \quad (3)$$

где $C_{ins,i}(t)$ — стоимость первой i категории генерирующих установок (ветровые, фотоэлектрические, дизельные генераторы) в момент времени t (долл. США/кВт), $C_{ins,j}(t)$ — стоимость накопителя энергии j в момент времени t (юань/кВт). I_i и I_j представляют собой стоимость первой i категории генерирующих установок и накопителей энергии j установленной мощности (кВт). $C_{inins,i}$ и $C_{inins,j}$ — установленная мощность (кВт) i -го типа генерирующих установок и накопителей энергии j , а также первоначальные инвестиционные затраты (юань/кВт). r_i и r_j — начальные инвестиционные затраты (юань/кВт) на генераторные установки и накопители энергии категории i , а j — ставка дисконтирования n_i и n_j , а j — ставка дисконтирования для генераторных установок и накопителей энергии категории i , j — срок службы генераторных установок и накопителей энергии [24].

2) Эксплуатационные и технические затраты $C_{om}(t)$

Эксплуатационные и технические затраты (O&M) представляют собой расходы, понесенные на ремонт и плановое техническое обслуживание для обеспечения нормальной работы генерирующих установок и систем хранения энергии на протяжении всего срока их службы. Эксплуатационные и технические затраты выражаются следующим образом:

$$C_{om}(t) = \sum_{i \in Ng} (C_{om,i}(t) \times I_i) + C_{om,j}(t) \times I_j$$

$$C_{om,i}(t) = C_{yrom,i} \div 8760$$

$$C_{om,j}(t) = C_{yrom,j} \div 8760 \quad (4)$$

$C_{om,i}(t)$, $C_{om,j}(t)$, $C_{yrom,i}$ и $C_{yrom,j}$ обозначают соответственно первый i -й класс генерирующих установок и накопителей энергии j в момент времени t , а также затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание (долл. США/кВт·ч) и годовые затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание (долл. США/кВт·год). I_i и I_j обозначают затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание i -й номинальной мощности (кВт) генерирующих установок и накопителей энергии j класса генераторных установок и накопителей энергии номинальной мощности (кВт).

3) Затраты на запуск C_{st}^{mt} (t)

Затраты на запуск возникают при включении микрогазовой турбины из аварийного состояния и варьируются в зависимости от условий эксплуатации. Затраты на запуск выражаются следующим образом:

$$C_{st}^{mt}(t) = c_{st}^{mt}(t) \times S_{st}^{mt}(t) \quad (5)$$

where $c_{st}^{mt}(t)$ denotes the gas turbine startup cost at time point t (\$/time), and $S_{st}^{mt}(t)$ denotes the start-up cost of the gas turbine at time point t . $S_{st}^{mt}(t)$ is a 0,1 variable. The value is 1 for startup and 0 for shutdown.

4) Штрафные издержки за отказ от ветроэнергетики C_{pl} (t)

Штрафные санкции за превышение мощности ветровых или фотоэлектрических установок возникают, когда выработка электроэнергии превышает максимальную мощность системы, что приводит к ее выводу из эксплуатации. Расчет стоимости производится следующим образом:

$$C_{pl}(t) = C_{pl} \times \sum_{i \in Ng} (PL_i^{pv}(t) + PL_i^{wt}(t)) \quad (6)$$

C_{pl} refers to the penalty cost per unit of abandoned wind power (\$/kW), the $PL_i^{wt}(t)$ and $PL_i^{pv}(t)$ is the amount of abandoned wind and light at the point of time t (kW) [25].

5) Штрафные издержки за отключение электроэнергии C_{ll} (t)

Штрафные санкции за отключения электроэнергии возникают, когда спрос на электроэнергию сокращается из-за нестабильности возобновляемых источников энергии или ошибок прогнозирования. Расчет стоимости производится следующим образом:

$$C_{ll}(t) = C_{ll} \times LL(t) \quad (7)$$

C_{ll} — это стоимость штрафа за единицу неконтролируемой нагрузки (долл. США/кВт); $LL(t)$ — это объем неконтролируемой нагрузки в момент времени t (кВт).

2.2 Функция ограничения

1) Ограничения баланса мощности в реальном времени

Для обеспечения безопасной и стабильной работы система должна сбалансировать выработку энергии, хранение и потребление нагрузки в течение времени планирования работы, учитывая при этом прекращение использования ветровой и солнечной энергии [26]. Ограничение баланса энергии в момент времени t формулируется следующим образом:

$$P_i^{\text{pv}}(t) + P_i^{\text{wt}}(t) + P_i^{\text{mt}}(t) + P_j^{\text{dch}}(t) - P_j^{\text{ch}}(t) - (PL_i^{\text{pv}}(t) + PL_i^{\text{wt}}(t)) + LL(t) = P_{\text{de}}(t) \quad (8)$$

Among them, $P_i^{\text{pv}}(t)$, $P_i^{\text{wt}}(t)$, and $P_i^{\text{mt}}(t)$ respectively represent the output power (kw) of each type of power generating equipment (photovoltaic, wind power, micro-gas turbine) at the moment of t . $P_j^{\text{dch}}(t)$ and $P_j^{\text{ch}}(t)$ denote the discharge and charge power (kW) of energy storage j at time t , and $P_{\text{de}}(t)$ indicates the real-time load demand at time t .

2) Ограничения по ветровому и световому потокам.

Ограничения на выходную мощность вводятся для обеспечения безопасности и стабильности системы путем ограничения выходной мощности генератора и накопителя энергии во избежание перегрузки, недогрузки или возникновения колебаний частоты и напряжения. Эти ограничения определяются требованиями к работе системы и безопасности [27].

$$\begin{aligned} 0 &\leq P_i^{\text{pv}}(t) \leq I_i^{\text{pv}} \\ 0 &\leq P_i^{\text{wt}}(t) \leq I_i^{\text{wt}} \end{aligned} \quad (9)$$

In Eq. (9), I_i^{pv} and I_i^{wt} are the rated power (kW) of photovoltaic and wind power, respectively. This constraint limits the fluctuation range of wind and solar output to ensure the safe and stable operation of the power system.

3) Ограничения на выходную мощность тепловой энергии

$$\begin{aligned} S_{\text{st}}^{\text{mt}}(t) \times P_i^{\text{min mt}}(t) &\leq P_i^{\text{mt}}(t) \leq S_{\text{st}}^{\text{mt}}(t) \times P_i^{\text{max mt}}(t) \\ P_i^{\text{max mt}}(t) &= I_i^{\text{mt}} \end{aligned} \quad (10)$$

In Eq. (10), $P_i^{\text{min mt}}(t)$, $P_i^{\text{max mt}}(t)$ denote, respectively, the t time ignition power minimum and maximum output limits [28].

4) Ограничения состояния накопителя энергии

The state of charge $SOC_j(t)$ describes the ratio of the remaining energy in energy storage device j to its rated capacity at time t . The state-of-charge constraint is used to ensure that excessive or improper use of electricity causes damage to the energy storage system, and is used to guide the charging and discharging strategy of the energy storage system in order to maximize the utilization and extend the service life of the energy storage system. The state-of-charge constraints of the energy storage are limited to a minimum value $SOC_j^{\min}(t)$ and maximum value $SOC_j^{\max}(t)$ between the minimum and maximum values to prevent overcharging and discharging and to extend battery life.

$$E_j \times SOC_j(t) - E_j \times SOC_j(t-1) = \left(P_j^{\text{ch}}(t) \times u_{\text{ch}} - \frac{P_j^{\text{dch}}(t)}{u_{\text{dch}}} \right) \times \Delta t \quad (11)$$

$$SOC_j^{\min}(t) \leq SOC_j(t) \leq SOC_j^{\max}(t) \quad (12)$$

В приведенном выше уравнении u_{ch} и u_{dch} — это, соответственно, эффективность зарядки и разрядки (%) накопителя энергии, а E_j — номинальная ёмкость накопителя энергии (кВт·ч).

$$\begin{aligned} 0 &\leq P_j^{\text{ch}}(t) \leq I_j \\ 0 &\leq P_j^{\text{dch}}(t) \leq I_j \end{aligned} \quad (13)$$

The above equation limits the maximum and minimum values of the charging and discharging power of the energy storage device.

$$P_j^{\text{dch}}(t) \times P_j^{\text{ch}}(t) = 0 \quad (14)$$

Процессы зарядки и разрядки не могут происходить одновременно.

5) Ограничения объёмов неконтролируемой нагрузки, неконтролируемых ветрового и светового потоков

$$\begin{aligned} 0 &\leq PL_i^{\text{pv}}(t) \leq P_i^{\text{pv}}(t) \\ 0 &\leq PL_i^{\text{wt}}(t) \leq P_i^{\text{wt}}(t) \\ 0 &\leq LL(t) \leq P_{\text{de}}(t) \\ (PL_i^{\text{pv}}(t) + PL_i^{\text{wt}}(t)) \times LL(t) &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Приведенное выше уравнение, с одной стороны, ограничивает максимальные и минимальные значения неконтролируемой мощности ветрового потока и нагрузки. С другой стороны, оно гарантирует, что неконтролируемая мощность нагрузки и неконтролируемая мощность ветрового потока не будут возникать одновременно.

6) Ограничения на запуск и остановку газовой турбины

$$0 \leq c_{st}^{mt} \geq \varepsilon_{st}^{mt} (S_{st}^{mt}(t) - S_{st}^{mt}(t-1)) \quad (16)$$

ε_{st}^{mt} is the startup cost of the gas turbine. This constraint indicates that the startup cost of the gas turbine is not significant if and only if $S_{st}^{mt}(t) = 1$, and $S_{st}^{mt}(t-1) = 0$, the gas turbine starts at the t moment startup, there exists t moment-to-moment startup cost $c_{st}^{mt}(t) = \varepsilon_{st}^{mt}$. For other combinations of scenarios $c_{st}^{mt}(t)$ the value of is 0.

7) Назревающие ограничения газового агрегата

Тепловые электростанции подвержены механическим и тепловым ограничениям при корректировке своей генерирующей мощности и не могут сразу достичь заданного целевого значения, что требует постепенного процесса корректировки, то есть так называемых «назревающих ограничений» тепловой энергосистемы.

$$\begin{aligned} P_i^{mt}(t) - P_i^{mt}(t-1) &\leq S_{st}^{mt}(t-1) \times P_i^{up} + P_i^{minmt}(t)(S_{st}^{mt}(t) - S_{st}^{mt}(t-1)) + \\ &P_i^{maxmt}(t)(1 - S_{st}^{mt}(t)) \\ P_i^{mt}(t-1) - P_i^{mt}(t) &\leq S_{st}^{mt}(t) \times P_i^{down} - \\ &P_i^{minmt}(t)(S_{st}^{mt}(t) - S_{st}^{mt}(t-1)) + P_i^{maxmt}(t)(1 - S_{st}^{mt}(t-1)) \end{aligned} \quad (17)$$

P_i^{up}, P_i^{down} are the upward and downward climb capacities of the unit, respectively. The formula ensures that the gas turbine is limited by the upper and lower climbing capacities during continuous startup. When the unit starts

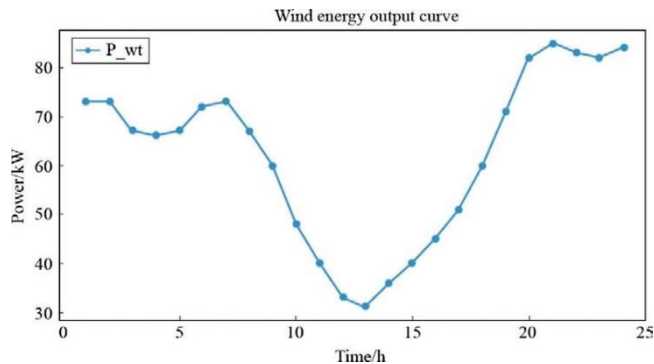


Рис. 1. Кривая производительности ветровой энергии (кВт) [34].

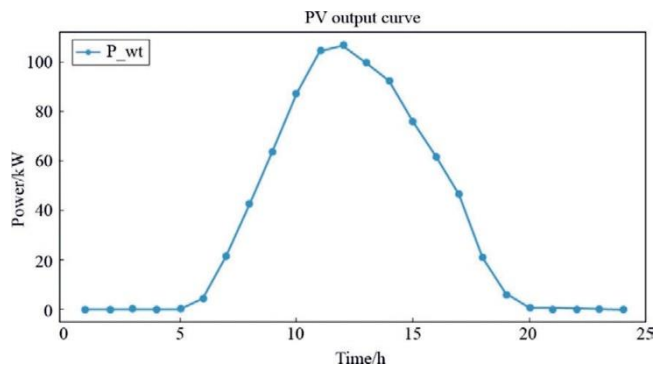


Рис. 2. Кривая производительности фотоэлектрической системы (кВт).

and stops, it is not affected by the climbing capacity, and it is used at the lowest thermal power output power $P_i^{\text{min mt}}(t)$ starting and stopping.

2.3 Переменные, влияющие на принятие решений

В модель в качестве переменных принятия решений входят параметры для угловых маркеров, наборов и переменных принятия решений. Подробные определения параметров и соответствующие данные приведены в таблице 1 и на рисунках 1 и 2.

Таблица 1

Основные данные.

Notation	Hidden meaning	Notation	Hidden meaning
r_i, r_j	Discount rate for wind, PV, and diesel (8 %) [29]	C_{LL}	Cost of abandoned load (\$1/kWh) [30]
n_i, n_j	Operational life of wind, diesel, and storage systems (20 years for wind, 40 years for diesel, 10 years for storage)	$P_i^{\text{PV}}(t), P_i^{\text{WT}}(t)$	Hourly output curves for wind and PV (kW) (Fig. 2,3)
$C_{\text{inins},i}, C_{\text{inins},j}$	Initial investment cost of wind power, diesel fuel and energy storage [31] (yuan/kW): wind power investment cost: 7719, photovoltaic investment cost: 7258, diesel investment cost: 3384, energy storage investment cost: 7960	$P_{\text{dc}}(t)$	Hourly load power demand (kW) for microgrid users (Fig. 4)
I_i , which are respectively I_i^{PV} , I_i^{WT} , I_i^{ST}	Installed capacity (kW) of various types of wind and diesel units (wind 100, PV 120, thermal 20)	$P_i^{\text{min mt}}(t)$	Minimum output limit for thermal power operation (kW): 10
$C_{\text{yrom},i}, C_{\text{yrom},j}$	Annual operation and maintenance cost of wind, diesel and storage (yuan/kW): photovoltaic: 73, diesel: 61, storage: 80, and wind power: 20 [32]	$P_i^{\text{max mt}}(t)$	Maximum output limit during thermal power operation (kW): 20
$\hat{e}_{\text{st}}^{\text{mt}}$	Gas turbine start-up cost: \$2/kW	$u_{\text{ch}}, u_{\text{dch}}$	Energy storage charging and discharging efficiency: 0.86 [32]
C_{pl}	Cost of penalizing abandoned wind power: 1 yuan/kWh	$P_i^{\text{up}}, P_i^{\text{down}}$	Gas turbine up and down climbing capacity at time t , speed (kW/h): 5 [33]

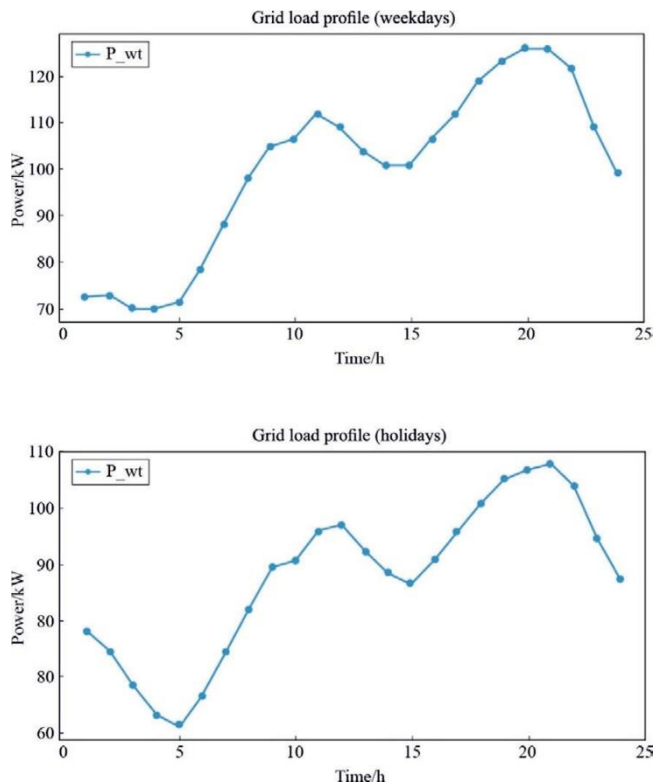


Рис. 3. Профиль нагрузки сети (кВт).

3 Пример анализа

В данном примере оценивается проект автономной микросети в провинции Ляонин, характеризующийся сезонными и колеблющимися энергетическими ресурсами. Характеристики потребления электроэнергии значительно различаются в зависимости от дня недели и праздников.

Цель состоит в том, чтобы проверить эффективность модели в таких сложных сценариях и продемонстрировать ее способность достигать оптимальной конфигурации хранения энергии на основе местных энергетических ресурсов, характеристик нагрузки и структуры затрат. Этот анализ предоставляет ценную информацию для планирования и эксплуатации аналогичных проектов.

3.1 Основные параметры

На рис. 3 показаны существенные различия в характеристиках нагрузки между будними и праздничными днями при ежедневной работе энергосистемы. Структура потребления электроэнергии в будние дни, как правило, более сложная и изменчивая, чем в праздничные дни. В будние дни коммерческая деятельность, промышленное производство и работа коммунальных предприятий достигают своего пика, и спрос на электроэнергию со стороны этих видов деятельности высок и неотложен. Нагрузка на электросеть демонстрирует значительные пиковые колебания в будние дни, особенно в утренние и вечерние часы пик, когда нагрузка быстро возрастает, что приводит к увеличению нагрузки на сеть. В отличие от этого, спрос на электроэнергию в праздничные дни в основном сосредоточен на бытовом потреблении электроэнергии, таком как работа бытовой аудио-, видео и компьютерной техники, приготовление пищи и использование кондиционеров. Хотя эти виды потребления могут увеличиваться в определенные часы (например, вечером), общий спрос на электроэнергию в праздничные дни относительно стабилен и не имеет резких пиковых колебаний, характерных для будних дней. Кроме того, общий спрос на электроэнергию в праздничные дни также, как правило, ниже, чем в будние дни.

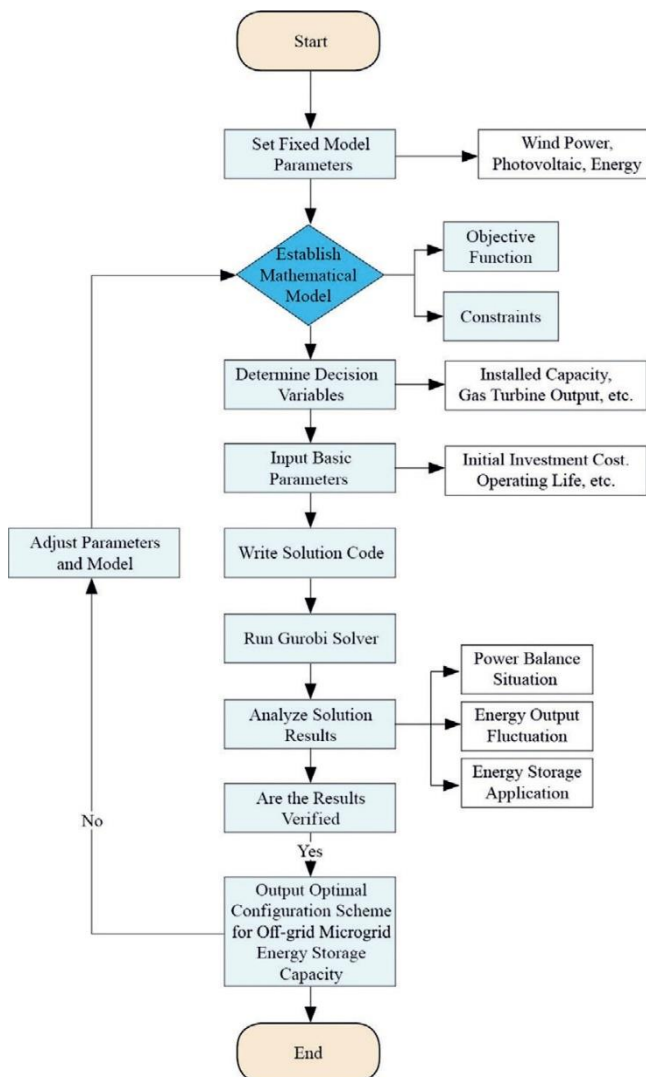


Рис. 4. Процесс оптимизации.

3.2 Анализ результатов

В данном исследовании рассматривается проект автономной микросети в провинции Ляонин для проверки эффективности предложенной модели оптимизации системы хранения энергии. Анализируя варианты моделирования применения систем хранения энергии и режимы совместной работы, исследование изучает различные варианты эксплуатации, включая будние и праздничные дни, варианты моделирования ограничения выработки ветровой и солнечной энергии, а также варианты отключения электроэнергии. Для оптимизации используется метод частично-целочисленного квадратичного программирования ограничений (MIQCP), направленный на оценку влияния интегрированных ветровых и фотоэлектрических систем на баланс сети в течение суток, а также анализ колебаний производительности ветровых и фотоэлектрических систем в разные периоды времени и их влияния на стабильность сети. Результаты и процесс оптимизации были объяснены с помощью Gurobi Optimizer, представленного на рис. 4, следующим образом.

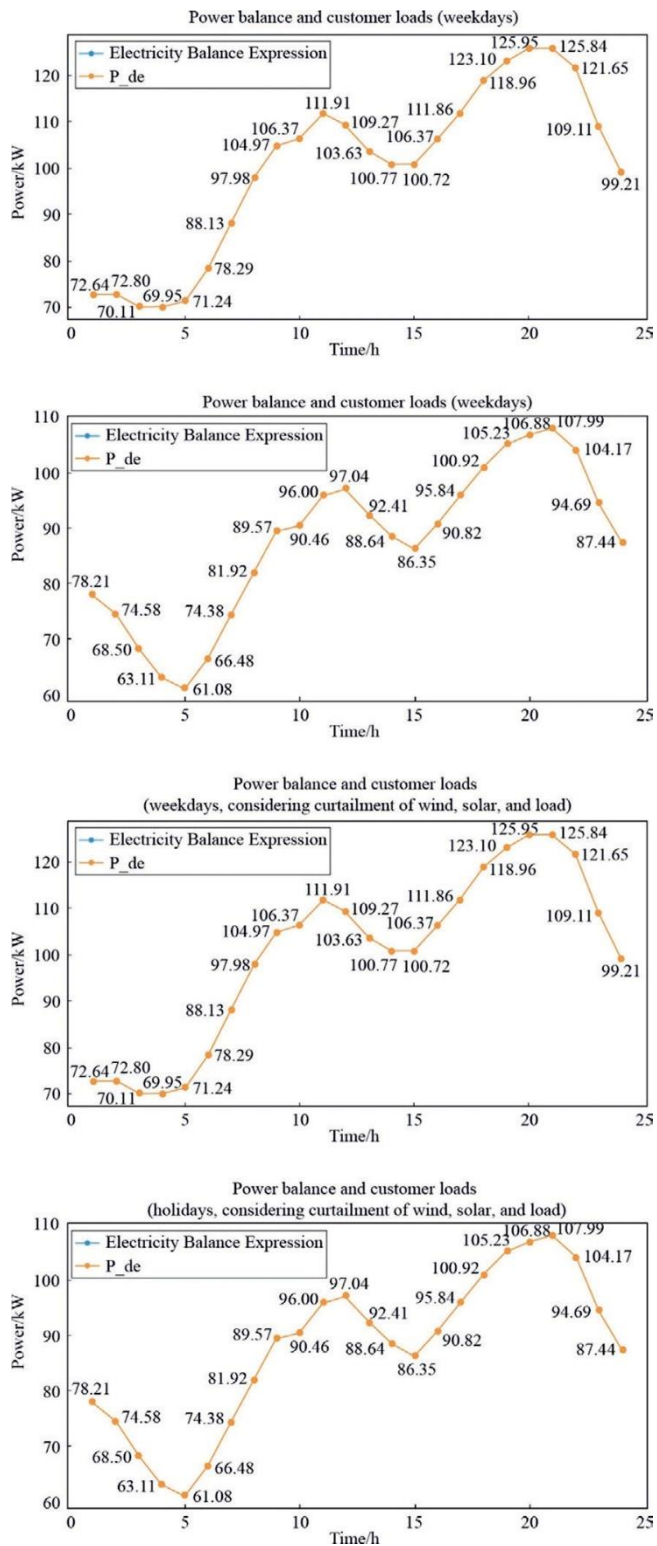


Рис. 5. Баланс мощности и нагрузки потребителей.

На рис. 5 показан процесс оптимизации, демонстрирующий, как система хранения энергии эффективно уравнивает спрос и предложение в различных вариантах моделирования. Графики показывают, что спрос и предложение остаются в основном уравновешенными на протяжении всех временных периодов. Это равновесие достигается за счет рационального применения системы хранения энергии, руководствуясь стратегией оптимизации. Практически совпадающие кривые подчеркивают эффективность модели в достижении равновесия мощности и обеспечении стабильности системы.

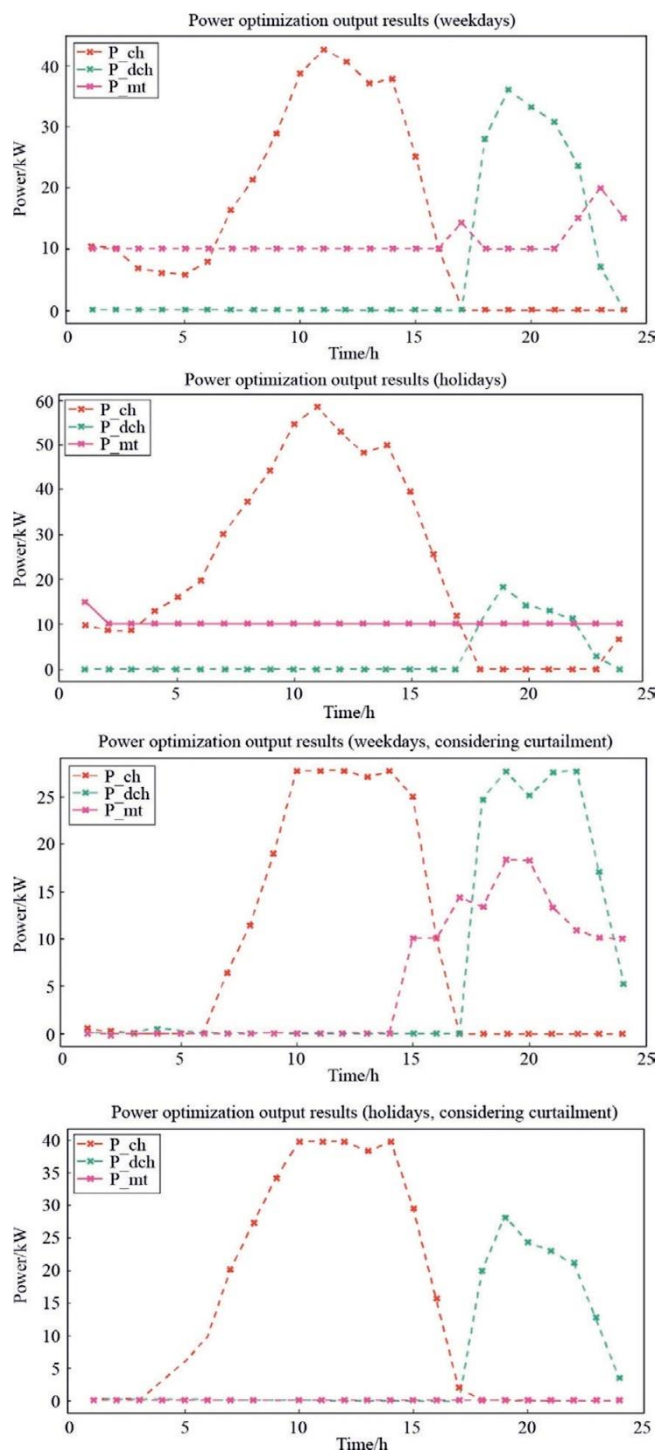


Рис. 6. Результаты оптимизации энергопотребления.

На рис. 6 показана совместная работа различных источников энергии и систем хранения энергии в рамках оптимизационной модели. На ней видно, как система хранения энергии компенсирует колебания производительности каждого источника энергии, особенно в условиях высокой изменчивости выработки ветровой и солнечной энергии, где система хранения энергии играет решающую роль в регулировании.

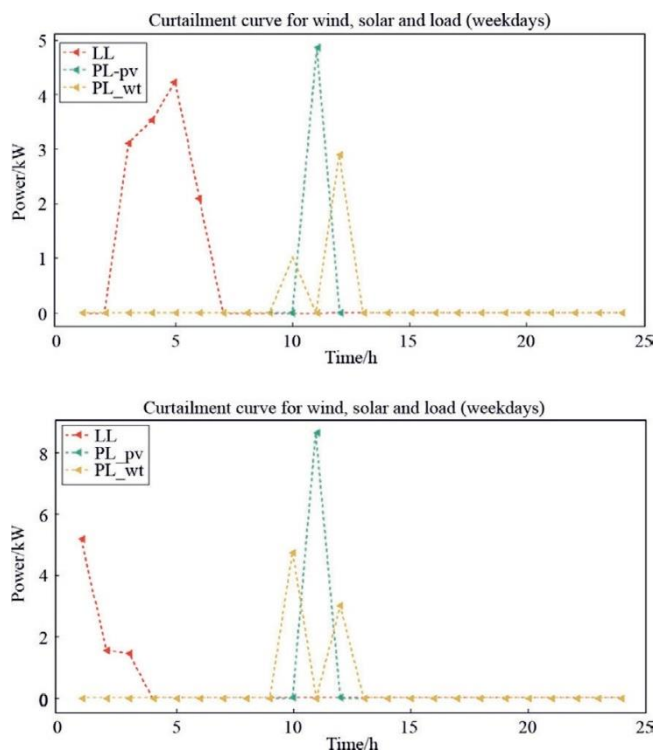


Рис. 7. Кривая ограничений производства ветровой и солнечной электроэнергии, а также общей нагрузки.

Сопоставление данных с четырех диаграмм с окончательными результатами оптимизации показывает, что, учитывая экономические факторы, модель эффективно уравнивает использование возобновляемых источников энергии с экономической работой системы хранения энергии. В частности, на рис. 5 видно, что в будние дни зарядка и разрядка системы хранения энергии относительно уравновешены без учета ограничений производства ветровой и солнечной энергии. Однако в праздничные дни может наблюдаться чрезмерная зарядка и недостаточная разрядка из-за снижения нагрузки, не позволяющей в полной мере использовать энергию ветра и солнца. Если не учитывать ограничения производства электроэнергии, избыток ветровой и солнечной энергии полностью поглощается системой хранения. Это приводит к снижению эффективности использования возобновляемых ресурсов и увеличению затрат на хранение энергии в энергосистеме. Поэтому учет ограничений производства ветровой и солнечной энергии, а также общей нагрузки остается крайне важным. При стремлении к минимизации затрат видно, что как в будние, так и в праздничные дни зарядка накопителей энергии снижается, а равновесие между зарядкой и разрядкой стабилизируется. Это доказывает, что модель эффективно уравнивает затраты на ограничения производства ветровой и солнечной энергии и эксплуатацию накопителей энергии.

Кроме того, газовые турбины работают более стабильно, когда не учитываются ограничения производства электроэнергии. Однако, если ограничения производства энергии учитываются, наблюдается заметное увеличение выработки газовых турбин в будние дни во второй половине дня. Это происходит потому, что после вычета затрат на балансировку модель ограничивает определенное количество производства ветровой и солнечной энергии, что приводит к недостаточному запасу энергии для поддержания равновесия мощности в периоды высокой нагрузки. В праздничные дни, когда нагрузка низкая, нет необходимости в балансировке мощности газовыми турбинами.

Как показано на рис. 7, объем ветровой и солнечной энергии, ограниченной в будние дни, как правило, меньше, чем в праздничные дни, но отключения электроэнергии в ранние утренние часы с 3:00 до 7:00 утра случаются чаще, чем в праздничные дни. Это происходит потому, что

электрическая нагрузка на сеть начинает увеличиваться в ранние утренние часы в будние дни, главным образом из-за начала определенных производственных и хозяйственных видов деятельности. Хотя в большинстве жилых и коммерческих районов в ночное время спрос по-прежнему низкий, в некоторых отраслях, таких как обрабатывающая промышленность и поточное производство, производственная деятельность, возможно, уже началась или вот-вот начнется. Этот первоначальный рост спроса может быть недостаточным для возникновения значительной пиковой нагрузки, но достаточным для нарушения равновесия нагрузки в сети. В этом случае операторы сети должны прогнозировать и корректировать электроснабжение для удовлетворения этого постепенно возрастающего спроса. Однако прогнозирование связано с неизбежными неопределенностями, особенно в периоды вне пиковой нагрузки. Если фактическая нагрузка ниже прогнозируемой, операторам может потребоваться ввести ограничения на подачу электроэнергии для поддержания стабильности сети. Эта операция часто состоит из временного отключения некоторых некритичных нагрузок или снижения подачи электроэнергии для предотвращения проблем с частотой и напряжением в сети из-за избыточной мощности. Поскольку дневная нагрузка в будние дни выше, чем в праздничные дни, как видно из рис. 7, она может поглощать больше энергии ветра и солнца, тем самым уменьшая вероятность ограничений производства электроэнергии.

Кроме того, функционирование рынка электроэнергии также оказывает существенное влияние на отключения электроэнергии в этот период. В будние дни рынок электроэнергии может быть активен уже в ранние утренние часы в ожидании высокого дневного спроса, и колебания цен на электроэнергию могут побудить операторов корректировать поставки электроэнергии с помощью рыночных механизмов. Например, если рыночные цены указывают на то, что сокращение поставок экономически целесообразно, операторы могут предпочесть сократить поставки в экономически обоснованные периоды, даже если это означает введение отключений электроэнергии в периоды низкого спроса.

Как показано в таблице 2, окончательные результаты оптимизации показывают, что без учета ограничений производства ветровой и солнечной энергии и общей нагрузки оптимальная установленная мощность системы хранения энергии (I_{es}) в будние дни составляет 42,61 кВт, а емкость хранилища (E_{es}) — 360,63 кВт·ч. В праздничные дни она составляет 58,52 кВт и 557,23 кВт·ч соответственно. С учетом ограничений производства оптимальная установленная мощность в будние дни составляет 27,75 кВт, а емкость хранилища — 429,58 кВт·ч, а в праздничные дни — 39,88 кВт и 557,72 кВт·ч.

Результаты показывают, что, независимо от того, учитывается ли ограничение потребления электроэнергии в праздничные дни, требуемая емкость накопителей энергии выше из-за снижения хозяйственной и производительной активности, что снижает общий спрос на электроэнергию, а также увеличивает потребление электроэнергии в бытовых и рекреационных целях в определенные периоды, такие как вечера и праздничные мероприятия. Эти факторы обуславливают необходимость системы хранения энергии с большей выходной мощностью и большими резервами для обеспечения стабильного и надежного электроснабжения, особенно в сетях с ограниченной управляемой инфраструктурой, такой как газовые турбины.

Кроме того, согласно выводам, представленным на рис. 6, в праздничные дни поглощается больше энергии ветра и солнца, что требует наличия системы хранения энергии с большей выходной мощностью и большими запасами энергии. Это не только обеспечивает непрерывность и надежность электроснабжения, но и оптимизирует экономическую работу источников электроэнергии, особенно без учета ограничений. Система хранения энергии эффективно поглощает и высвобождает избыточную возобновляемую энергию, такую как энергия ветра и солнца, снижая зависимость от традиционных источников энергии и повышая гибкость сети и экологичность. Эти возможности особенно важны в праздничные дни, когда выработка

возобновляемой энергии может быть более нестабильной, а непредсказуемость спроса на электроэнергию более выражена.

Таблица 2

Результаты оптимизации.

Consideration	Time	Optimal installed capacity (I_{es}) /kW	Storage capacity (E_{es}) /kWh
Without curtailment	Weekdays	42.61	360.63
Without curtailment	Holidays	58.52	557.23
With curtailment	Weekdays	27.75	429.58
With curtailment	Holidays	39.88	557.72

Результаты также показывают, что как в будние дни, так и в праздничные дни требуемая установленная мощность системы хранения энергии значительно снижается после учета ограничений, в то время как изменение емкости хранилища минимально. Стратегия ограничения позволяет операторам системы выборочно избегать поглощения избыточной мощности ветровой и солнечной энергии в периоды низкого спроса, снижая мгновенные потребности системы хранения энергии в электроэнергии. Это делает систему более экономичной и эффективной, сохраняя при этом стабильность сети. Хотя часть энергии может быть сброшена в момент производства, система хранения энергии все равно должна управлять энергией и уравнивать её в разное время. Особенно в периоды, когда возобновляемые ресурсы в изобилии, но спрос относительно низок, система хранения энергии все равно должна поглощать большое количество энергии и накапливать ее для высвобождения в периоды пикового спроса. Даже при применении стратегии ограничения потребления, значительное количество энергии необходимо хранить в хранилищах в течение длительных периодов, чтобы обеспечить быстрое реагирование при росте спроса. Это не только обеспечивает стабильность сети, но и оптимизирует общую эффективность использования ресурсов, поскольку система хранения энергии может высвобождать энергию в периоды высоких цен на электроэнергию, тем самым обеспечивая экономию средств.

В целом, стратегия ограничения выработки электроэнергии позволяет операторам энергосистемы оптимизировать затраты, повысить эффективность использования ресурсов и поддерживать стабильность сети. Таким образом, потребность в электроэнергии для системы хранения энергии может быть снижена, поскольку смягчаются резкие пики спроса. В то же время, спрос на энергию возрастает, поскольку необходимо управлять и уравнивать потоки энергии в сети в течение более длительного периода времени, обеспечивая баланс спроса и предложения и надежную работу в различных условиях. Внедрение этой стратегии способствует развитию энергосистемы в более устойчивом и экономически эффективном направлении.

Эти результаты подтверждают результативность предложенной модели оптимизации в повышении экономической эффективности и стабильности системы. Пики и точки минимума на графиках совпадают с результатами вычислений потребностей в хранении энергии и расчетами затрат, демонстрируя эффективность алгоритма оптимизации на практике. В будущих исследованиях можно было бы дополнительно изучить возможности улучшения, включая более совершенные инструменты прогнозирования, более детальные стратегии управления хранением энергии и модели оптимизации, учитывающие динамику рыночных цен.

4 Заключение

В данной статье представлено углубленное исследование распределения мощности систем хранения энергии в автономных микросетях, с акцентом на анализ энергетической структуры, выходных характеристик и их интеграции с возобновляемыми источниками энергии. Изучение

вариантов моделирования применения и синергетических режимов работы подчеркивает важность оптимизации энергетического баланса для повышения интеграции возобновляемых источников энергии. Кроме того, в статье освещается важнейшая роль передовых решений в области хранения энергии для повышения стабильности и надежности сети, удовлетворяя разнообразные потребности в электроэнергии промышленного и жилого секторов.

На основе детального анализа конфигурации мощностей систем хранения энергии исследование демонстрирует необходимость диверсификации энергетического баланса и увеличения доли возобновляемой энергии в автономных микросетях. Точный анализ выходной мощности и спроса на нагрузку определен как важнейший фактор для оптимального распределения систем хранения энергии. Это не только повышает эффективность работы сети, но и укрепляет адаптивность системы к присущей возобновляемым источникам энергии нестабильности и неопределенности. В контексте глобальных целей углеродной нейтральности и проблем устойчивого развития результаты подчеркивают необходимость инновационных технологий хранения энергии и стратегий управления. Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на интеграции диверсифицированных энергетических ресурсов, использовании передовых инструментов прогнозирования и применении интеллектуальных систем управления для оптимизации хранения и распределения энергии. Эти усилия направлены на достижение сбалансированного, надежного и экологически чистого энергоснабжения.

В данной статье также рассматривается распределение мощности систем хранения энергии в автономных микросетях путем построения модели определения мощности системы хранения энергии и проверки ее достоверности на примере. Вначале в статье анализируются важнейшие факторы, которые необходимо учитывать при распределении мощности системы хранения энергии, включая спрос на электроэнергию, пропускную способность сети, экономические показатели системы хранения, характеристики технологии и политические факторы. Эти анализы обеспечивают целостное представление об оптимальной конфигурации системы хранения энергии. Далее подробно описывается процесс построения модели настройки емкости накопителя энергии, включая целевую функцию модели, переменные решения и ограничения, такие как ограничения баланса мощности в реальном времени, ограничения выходной мощности ветровых электростанций, ограничения выходной мощности тепловых электростанций, а также состояние накопителя энергии. Эти ограничения обеспечивают практическую применимость и возможность реализации модели.

В разделе анализа примеров метод MIQCP используется для анализа оптимальной конфигурации системы хранения энергии на основе фактических данных различных сценариев в регионе Ляонин. Результаты, полученные с помощью оптимизатора Gurobi, показывают оптимальную установленную мощность и схему планирования энергоснабжения при различных вариантах моделирования, эффективно демонстрируя регулируемую роль системы хранения энергии, особенно в области смягчения колебаний производства возобновляемой энергии.

Проведенное в данной работе всестороннее исследование приводит к выводу о том, что экономичность и стабильность энергосистемы могут быть значительно улучшены, а явления ограничения производства ветровой и солнечной энергии могут быть уменьшены за счет рациональной конфигурации системы хранения энергии и оптимального планирования. В дальнейших исследованиях необходимо изучить более совершенные инструменты прогнозирования и стратегии управления системами хранения энергии, а также комплексные модели оптимизации для повышения экономической эффективности и принятия решений. Необходимо разработать модели, объединяющие технические, экономические и экологические аспекты, для поддержки эффективного и устойчивого развития энергосистемы.

О вкладе авторов в проект CRediT

Чжуоран Сонг: написание - первоначальный вариант текста. **Минли Чжанг:** контроль, ресурсы. **Юаньин Чи:** администрирование проекта, концептуализация. **Цзялинь Ли:** контроль, методология. **И Чжэн:** написание-рецензирование и редактирование, курирование данных.

О конфликте интересов

Авторы заявляют о наличии следующих финансовых интересов/личных отношений, которые могут рассматриваться как потенциальный конфликт интересов: Чжуоран Сонг и Минли Чжан в настоящее время работают в Государственной электроэнергетической компании провинции Ляонин. Остальные авторы заявляют, что у них нет известных конкурирующих финансовых интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на результаты работы, представленной в данной статье.

Благодарности

Данное исследование было профинансировано Фондом планирования Министерства образования Китая в области гуманитарных и социальных наук (21YJA790009) и Национальным фондом естественных наук Китая (72140001).

Список используемой литературы

- [1] К.Чжао, К.Пэн, В.Ю, Проектирование и практика автономных фотоэлектрических микросетей постоянного тока, *Sol.Energy* 4 (2022) 102-109, <https://doi.org/10.19911/j.1003-0417.tyn20211221.02>.
- [2] Дж.Ма, Исследование по моделированию автономной интеллектуальной микросетевой системы и стратегии ее управления, *Lanzhou Univ.Technol.*(2022), <https://doi.org/10.27206/d.cnki.ggsgu.2022.000103>.
- [3] Б.Чжан, Р.Цю, К.Ляо и др., Проектирование и оптимизация эксплуатации автономной гидрофотоэлектрической дополнительной системы на уровне города, *Appl.Energy* 306 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118000>.
- [4] К.Мен, З.Ян, С.Ксю и др., Исследование стратегии управления фотоэлектрическими инверторами на основе автономной микросетевой системы, *Электротехнология* 4 (2024) 4-9, <https://doi.org/10.19768/j.cnki.dgjs.2024.04.002>.
- [5] Р.Хе, В.Чжоу, Ю.Лу и др., Исследование оптимизированной стратегии работы автономных микросетей, *Electric.Drives* 51 (12) (2021), <https://doi.org/10.19457/j.1001-2095.dqcd21309> 59-65+80.
- [6] П. Ортега-Арриага, О. Бабакан, Дж. Нельсон и др., Варианты доступа к электроэнергии из сети и вне сети: обзор экономических и экологических последствий, *Renew.Sustain.Energy Rev.*143 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110864> 110864.
- [7] С. Чжэн, Х. Се, Н. Чен и др., Исследование метода распределения мощности накопителей энергии в микросетях вне сети мегаваттного масштаба, в: *Материалы семинара по развитию интеллектуальных сетей 2016 года*, 2016, стр. 5.
- [8] З. Лианг, Ю. Ксианг, З. Тан и др., Оптимальное распределение емкости накопителя энергии в парке чистой энергии с высоким процентом использования энергии с учетом реагирования на спрос. *Китайская электроэнергетика*, 56 (12) (2023) 147-155+163.
- [9] Х. Ванг, Исследование оптимизированной стратегии распределения емкости накопителя энергии в ветро-солнечной системе хранения, *Electric Times* 8 (2023) 32-35.

- [10] К. Ци, Ф. Яо, Т. Чжу и др., Оптимальное распределение емкости гибридного накопителя энергии в энергосистемах с учетом доступа к крупномасштабной ветроэнергетике, *Power Automat. Equipment* 41 (10) (2021) 11-19, <https://doi.org/10.16081/j.epae.202107032>.
- [11] С. Дуань, Исследование оптимизированного метода распределения емкости накопителей энергии для распределенной ветроэнергетики и фотоэлектрических систем, *Автомат. Прил.* 64 (19) (2023) 68-70.
- [12] П. Чжао, Ф. Гоу, В. Сюй и др., Сравнение оптимизации распределения емкости накопителей энергии для сопряженной ветро-пожаро-накопительной системы, *Сианьский университет Цзяотун* (2024).
- [13] Р. Ши, В. Ван, С. Фан и др., Анализ работы и конфигурации накопителей энергии в электроэнергетической системе с высокой долей ветровой энергии, *Гидроэнергетика* (2024).
- [14] Ч. Чен, Ц. Го, З. Сонг и др., Оптимальное распределение емкости гибридных накопителей энергии на ветровых электростанциях с учетом углеродной выгоды, *Китайская электроэнергетика* 55 (12) (2022) 22-33.
- [15] З.Ли, Д.Фан, К.Зенг и др., Исследование оптимизации распределения мощности и стратегии эксплуатации системы хранения энергии с учетом потребления энергии ветра, *Energy Storage Sci.Technol.*(2024), <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0165>.
- [16] Ю. Чжанг, В. Лиу, Оптимальное распределение емкости накопителя энергии для микросети с учетом колебаний мощности и срока службы накопителя, *Electric.Meas.Instrum.* 58 (10) (2021) 59-66, <https://doi.org/10.19753/j.issn1001-1390.2021.10.009>.
- [17] Ю. Джианг, Г. Лу, Д. Жиа и др., Оптимальное распределение емкости накопителя энергии зарядной станции фотоэлектрических систем с учетом поведения пользователя при зарядке и неопределенности фотоэлектрической системы, *Zhejiang Electric Power* (2024).
- [18] Ю. Чжао, В. Сонг, В. Ли и др., Метод оптимальной работы многовиртуальной электростанции с учетом распределения общей емкости накопителя энергии, *Чистая энергия энергосети*, 40 (1) (2024) 92-101.
- [19] З.Ма, С.Гао, Ю.Танг и др., Исследование управления энергией в автономной системе ветро-солнечного хранения энергии, *Журнал Хубэйского национального университета (естественные науки)* 38(4)(2020) 459-463, <https://doi.org/10.13501/j.cnki.42-1908/n.2020.12.021>.
- [20] Ю.Чжонг, К.Ге, В.Чжоу, Оптимальное распределение емкости гибридного накопителя энергии в автономной микросети, *Наука, техника, инновации, приложения* 13 (17) (2023) 98-101, <https://doi.org/10.19981/j.CN23-1581/G3.2023.17.024>.
- [21] Л. Ран, Ю. Т. Фейсци и др., Оптимальное распределение мощности автономной ветроэнергетической комбинированной системы с учетом природного углеродного цикла, *Журнал солнечной энергии* 44 (1) (2023) 509-515, <https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2021-0958>.
- [22] Ц. Ли, Ю. Хан, З. Бай и др., Скоординированная стратегия эксплуатации и оптимизация распределения мощности автономной ветроэнергетической комбинированной системы генерации водорода, *Китайский журнал электротехники* (2024), <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231183>.
- [23] Ю. Чжу, К. Чжанг, К. Лиу и др., Метод распределения емкости накопителей энергии в автономной микросети ветроэнергетики с учетом корреляции, *Новые технологии. Электроэнергетика. Электроэнергетика* 38 (9) (2019) 11-16.

- [24] Ю. Лиу и др., Метод совместного планирования новых источников энергии и накопителей энергии для новых энергосистем, *Smart Power* 50 (10) (2022) 1-8.
- [25] К. Ву, К. Ву, Ц. Чжи и др., Распределенная кооперативная оптимизация полевой станции новых источников энергии и электростанции с накопителями энергии с учетом неопределенности новых источников энергии, *Электроэнергетика Чжэцзяна* 41 (6) (2022) 54-61.
- [26] Ю. Конг и др., Оптимальная работа изолированной микросети с накопителем энергии в режиме «день-в сутки», *Appl. Energy Efficiency Manag. Technol.* 2 (2021) 65-74.
- [27] К. Янг, З. Юан, Дж. Сяо и др., Оптимальная конфигурация гибридной микросети с накопителем энергии с учетом срока службы батареи, *Power Syst. Protect. Control* 51 (4) (2023) 22-31.
- [28] Ю. Ху, Ю. Чи, В. Чжоу и др., Взаимодействие между стандартами возобновляемых источников энергии и торговлей квотами на выбросы вредных газов в Китае: перспектива эволюционной теории игр, *Energy* (2023).
- [29] Дж. Вэнь, Н. Лю, Дж. Пей и др., Анализ стоимости электроэнергии за весь жизненный цикл для технологии хранения энергии, *Тепловая энергетика* 50 (8) (2021) 24-29.
- [30] Ф. Го, Ю. Ван, С. Лу и др., Экономичная эксплуатация и конфигурация системы хранения энергии новой энергосистемы с высокой долей ветровой энергии, *Интеллектуальная энергетика* 51 (11) (2023) 76-82.
- [31] З. Ли, С. Чень, В. Донг и др., Исследование пути перехода к низкоуглеродной энергетике в условиях углеродных ограничений, *Китайский журнал электротехники* 41 (12) (2021) 3987-4001.
- [32] К. Ванг, Б. Хонг, Л. Гуо, Стратегии планирования для микросетей с легкими накопителями энергии в различных сценариях, *Grid Technol.* 37 (7) (2013) 1775-1782.
- [33] З. Чжоу, Е. Ду, Н. Чжанг и др., Увеличение затрат на электроснабжение для достижения углеродной нейтральности в Китае, *Nat. Commun.* 13(2022) 3172.
- [34] П. Рой, Дж. Хе, Ю. Лиао, Минимизация затрат на гибридное хранение энергии с использованием батарей и суперконденсаторов для почасовой диспетчеризации ветро-солнечной гибридной энергетической системы, *IEEE Access* 8 (2020) 2169-3536, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3037149>.

Получено 12 августа 2024 г.; отредактировано 1 декабря 2024 г.; принято 26 декабря 2024 г.

Рецензирование осуществляется под руководством Global Energy Interconnection Group Co.Ltd.

* Ответственный автор

Адреса электронных почт: zml@ln.sgcc.com.cn (М. Чжанг), goodcyy@126.com (Ю. Чи), iceyljl@126.com (Ц. Ли), zy444763866@163.com (И. Чжэн).

Эта статья переведена из журнала <Global Energy Interconnection> (ISSN: 2096-5117), выпуск 2, 2025 г. Оригинальное название статьи: <Research on the coordinated optimization of energy storage and renewable energy in off-grid microgrids under new electric power systems>. Перевод предоставляется исключительно для справки; преимущественную силу имеет оригинал: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2024.12.004>

2096-5117/© 2025 Global Energy Interconnection Group Co.Ltd. Издательские услуги предоставлены Elsevier B.V. от имени KeAi Communications Co.Ltd. Данная статья находится в открытом доступе и распространяется по лицензии CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



Чжуоран Сонг окончил Шанхайский университет Цзяотун по специальности «Энергетические системы и автоматизация». В настоящее время он работает в Отделе новых типов энергетических систем Департамента развития Государственной электроэнергетической компании Ляонин.



Минли Чжанг окончил Северо-восточный электроэнергетический университет по специальности «Энергетические системы и автоматизация». В настоящее время он занимает должность заместителя директора Департамента развития в Государственной электроэнергетической компании Ляонин.



Юаньин Чи окончила Цзилиньский университет по специальности «Экономика и управление технологиями». В настоящее время она занимает должность директора Пекинского научно-исследовательского центра промышленной энергетической политики.



Цзялинь Ли — аспирантка Школы экономики и менеджмента Северо-Китайского электроэнергетического университета, её научные интересы лежат в области экономики энергетики, управления и устойчивого развития энергетики.



И Чжэн — аспирант Школы экономики и менеджмента Пекинского технологического университета, специализирующийся на низкоуглеродной экономике и экономике энергетики.

(Редактор Яджун Цзоу)