

Надежное планирование на основе оптимизации распределения для комплексной энергетической системы, использующей водород, с учетом продаж квот на выбросы вредных газов и управления спросом

Чжичунь Ян^а, Линь Чэнь^б, Хуайдун Минь^а, Ян Лэй^а, Яньфэн Ян^{б,*}

^а *Центр технологий распределительных сетей, Научно-исследовательский институт электроэнергетики Государственной электросетевой компании Хубэй, г. Ухань 430077, Китайская Народная Республика.*

^б *Научно-исследовательский центр энергетического интернета вещей, Усиский НИИ прикладных технологий, Университет Цинхуа, г. Уси 214026, Китайская Народная Республика.*

Аннотация. Решение вопроса изменения климата и содействие крупномасштабной интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) стимулировали развитие водородно-связанных комплексных энергетических систем (HIES), которые повышают энергетическую устойчивость за счет скоординированного использования электроэнергии, тепловой энергии, природного газа и водорода. В данном исследовании предлагается двухэтапный метод планирования на основе распределенно-устойчивой оптимизации (DRO) для повышения экономической эффективности и сокращения углеродосодержащих выбросов в HIES. Предложенная структура включает в себя механизм торговли квотами на выбросы вредных газов ступенчатого типа для регулирования выбросов и реализует программу реагирования на спрос (DR) для корректировки гибких многоэнергетических нагрузок, тем самым отдавая приоритет потреблению ВИЭ. Неопределенности, связанные с генерацией ВИЭ и спросом на нагрузку, устраняются с помощью множества неоднозначностей, что обеспечивает надежное принятие решений. Алгоритм генерации столбцов и ограничений (C&CG) эффективно решает двухэтапную модель DRO. Примеры из практики показывают, что предложенный метод снижает эксплуатационные расходы на 3,56%, увеличивает потребление фотоэлектрической энергии на 5,44% и значительно снижает углеродосодержащие выбросы по сравнению с традиционными подходами. Кроме того, методология DRO обеспечивает превосходный баланс между консервативностью и устойчивостью по сравнению с традиционными стохастическими и устойчивыми методами оптимизации, подчеркивая свой потенциал для развития экономически эффективных низкоуглеродных энергетических систем, одновременно обеспечивая стабильность сети в условиях неопределенности.

Ключевые слова: Водородно-связанная комплексная энергетическая система (HIES); Низкоуглеродная эксплуатация; Распределенно-устойчивая оптимизация (DRO); Торговля углеродными квотами на выбросы вредных газов; Реагирование на спрос (DR); Экономика

0 Введение

По мере обострения вопроса глобального изменения климата необходимость продвижения энергетических переходов и сокращения углеродосодержащих выбросов становится все более актуальной [1]. Комплексная энергетическая система (IES) предлагает эффективное решение, способствуя скоординированному планированию, эксплуатации и управлению различными энергоносителями для результативного удовлетворения разнообразных энергетических потребностей [2]. В стремлении к низкоуглеродному развитию крайне важно продвигать технологии чистой энергии и расширять интеграцию возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [3].

Переход к более чистой, низкоуглеродной и эффективной операционной парадигме должен эволюционировать от традиционных режимов, характеризующихся высоким энергопотреблением, выбросами и загрязнением [4].

Водородная энергия выделяется благодаря своим экологическим преимуществам, высокой плотности энергии и универсальности, что делает ее крайне важным элементом в процессе принятия мер по объединению, хранению и декарбонизации энергии. Интеграция водородной энергии в традиционные системы IES создает водородно-связанную IES (HIES), что представляет собой значительный шаг к повышению эффективности использования возобновляемой энергии и улучшению гибкости энергоснабжения, что, в свою очередь, вызывает значительный научный интерес. Например, исследования привели к разработке динамических моделей для систем хранения водородной энергии (HESS), которые охватывают производство, хранение и высвобождение водорода и внедряются в установки HIES на уровне парка [5]. Такие достижения, как замена традиционных установок преобразования энергии в газ (P2G) водородными топливными элементами (FC), электролизерами и метановыми реакторами, показали потенциал в сокращении углеродосодержащих выбросов в рамках работы HIES [6]. Кроме того, внедрение гибридных систем хранения энергии, сочетающих водород и природный газ, в систему управления HIES на сутки вперед продемонстрировало улучшение экономических и экологических результатов за счет возможности преобразования электроэнергии в более чистые формы энергии [7].

Внедрение механизма торговли квотами на выбросы вредных газов в рамках работы HIES может эффективно повысить потребление возобновляемых источников энергии и сократить выбросы углерода, тем самым способствуя планированию низкоуглеродной экономической системы. Например, в исследовании, упомянутом в [8], использовалось бесплатное распределение квот на выбросы углерода для ограничения выбросов от закупок электроэнергии, газовых турбин и газовых котлов. Для контроля выбросов при планировании IES была разработана модель торговли квотами на выбросы вредных газов на основе вознаграждения, подробно описанная в [9]. Исследование в [10] установило разумные цены на углеродные квоты на выбросы вредных газов, которые превосходят традиционные модели по сокращению выбросов. Кроме того, для IES на уровне парка был предложен сезонный механизм торговли углеродными квотами на выбросы вредных газов, использующий поправку на потери и вознаграждение [11], что привело к значительному сокращению выбросов. Эти механизмы подчеркивают эффективность торговли квотами на выбросы вредных газов в стимулировании внедрения более чистой энергии и наказании высокоуглеродных практик, тем самым способствуя созданию устойчивой энергетической системы.

Кроме того, модели энергопотребления гибких нагрузок, как по времени, так и по интенсивности, могут быть оптимизированы с помощью стратегий реагирования на спрос (DR) для улучшения координации источников и нагрузок. Эта корректировка повышает использование возобновляемых источников энергии и низкоуглеродную эффективность гибридных энергосистем. Например, гибкие нагрузки могут быть перепланированы таким образом, чтобы совпадать с пиками производства возобновляемой энергии, или могут быть сокращены неактуальные нагрузки, что снижает зависимость от ископаемого топлива и увеличивает использование возобновляемой энергии. В [12] была предложена модель DR, которая интегрирует множественные сокращения, передачи и преобразования энергетических нагрузок для увеличения потребления ветровой энергии. В [13] были разработаны модели, ориентированные на гибкие электрические и тепловые нагрузки, и применены к регулированию нагрузки в гибридных энергосистемах для снижения углеродосодержащих выбросов. В [14] была представлена сложная модель DR, учитывающая различные факторы тепловых помех, для оценки возможностей реагирования и потенциала ресурсов со стороны спроса в целях сокращения выбросов. Кроме того, в [15] были реализованы программы DR как на сутки вперед, так и внутрисуточные программы для низкоуглеродного планирования работы гибридной энергосистемы с целью балансировки пиковых и минимальных нагрузок. В заключение, DR позволяет гибким нагрузкам на стороне пользователя активно участвовать в планировании работы системы, тем самым повышая операционную гибкость и обеспечивая экологические преимущества.

В работе HIES существует множество присущих ей неопределенностей, в частности, изменчивость возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и многоэнергетических нагрузок, что влечет за собой дополнительные затраты и увеличивает вероятность нарушения ограничений. Стохастическое программирование (SP) и надёжная оптимизация (RO) — две основные методологии, используемые для управления этими неопределенностями. Метод SP эффективно применялся в различных вариантах моделирования: например, метод оптимальной работы на основе SP был представлен в [16] для учета неопределенностей, связанных с ВИЭ, энергетическими нагрузками и ценами на электроэнергию. Кроме того, SP было использовано в [17] для управления неопределенностями и незапланированными изолированными операциями в рамках IES. Напротив, метод RO фокусируется на минимизации рисков в наихудших вариантах моделирования. Была предложена оптимизационная модель на основе RO для управления спросом, учитывающая невозможность прогнозирования ветровой энергии [18]. В работе [19] была разработана модель планирования, включающая блоки P2G, с использованием RO, что позволило повысить эффективность использования возобновляемых источников энергии и снизить общие системные затраты. Однако метод SP часто зависит от плотности распределения вероятностей (PDF) для генерации потенциальных вариантов моделирования, точное определение которых может быть сложной задачей и потребовать значительных вычислительных ресурсов. С другой стороны, подход RO, фокусируясь на интервалах неопределенности и наихудшем варианте моделирования, может давать чрезмерно консервативные результаты, которые снижают экономическую эффективность. Для решения этих вопросов перспективной альтернативой является распределенно-устойчивая оптимизация (DRO). DRO учитывает распределение вероятностей наихудшего варианта моделирования неопределенностей в заданном множестве неоднозначностей, тем самым уменьшая зависимость от обширных наборов данных и снижая вычислительные затраты. Проекты оптимизации на основе DRO, как правило, менее консервативны, чем проекты на основе RO, эффективно уравнивая экономическую эффективность и устойчивость. Например, модель DRO, представленная в [20], направлена на снижение неопределенности производства возобновляемой энергии, что значительно снижает эксплуатационные расходы и повышает производительность системы. Проект прогнозирующего управления с использованием DRO был предложен в [21] для управления изменчивостью и неопределенностью выходной мощности ВИЭ. Кроме того, в [22] был разработан практический подход к управлению неопределенностями источника и нагрузки в HIES. Учитывая преимущества DRO в решении вопросов неопределенности, разработка метода низкоуглеродного экономического распределения на основе DRO, адаптированного для HIES, представляет собой важнейшую и неотложную исследовательскую задачу.

В данном исследовании мы предлагаем метод планирования на основе DRO для HIES, который включает в себя как торговлю углеродными квотами на выбросы вредных газов, так и управление спросом. Основные результаты данного исследования можно резюмировать следующим образом:

- (1) Была разработана двухэтапная модель планирования низкоуглеродной экономической деятельности на основе DRO для учета неопределенностей в возобновляемых источниках энергии и нагрузках. Для точного представления этих неопределенностей был создан набор неоднозначностей, а для решения модели был разработан алгоритм генерации столбцов и ограничений (C&CG), обеспечивающий равновесие между экономической эффективностью и устойчивостью.
- (2) Были разработаны модели для комбинированного производства тепла и электроэнергии с добавлением водорода (H₂-CHP) и HESS для координации производства, хранения и потребления водорода в рамках HIES.
- (3) Для регулирования углеродосодержащих выбросов в рамках HIES был внедрен механизм торговли углеродными квотами на выбросы вредных газов ступенчатого типа, а также

программа DR, разработанная для максимизации потенциала гибких нагрузок и повышения потребления ВИЭ.

Структура данной статьи следующая: Раздел 1 описывает построение моделей HIES. Раздел 2 рассматривает реализацию механизма торговли квотами на выбросы вредных газов ступенчатого типа и программы DR. Раздел 3 подробно описывает предлагаемую двухэтапную модель DRO и методы ее решения. Практические примеры представлены в Разделе 4. Наконец, Раздел 5 содержит заключение.

1 Моделирование HIES

1.1 Структура HIES

На рис. 1 изображено строение типичной HIES, которая объединяет различные виды энергии, включая электричество, тепловую энергию, водород и природный газ. Элементы HESS, состоящие из электролитической ячейки (EL), водородного бака (HT) и FC, обеспечивают производство, хранение и использование водородной энергии. Установка H₂-CHP повышает эффективность использования водорода и снижает выбросы углерода. HIES также содержит фотоэлектрическую установку (PV), электрический котел (EB), систему хранения электроэнергии (ES) и систему хранения тепловой энергии (TS), все из которых интегрированы в программы управления спросом (DR). Система предназначена для взаимодействия с вышестоящими сетями для осуществления действий с электроэнергией и природным газом, что повышает ее эксплуатационную гибкость и экологическую устойчивость.

Для представления многоэнергетического сопряжения и преобразования между различными энергоносителями в рамках HIES использовалась унифицированная модель на основе энергетического узла [23]. Эта модель способствует эффективному управлению потоками энергии, в частности,

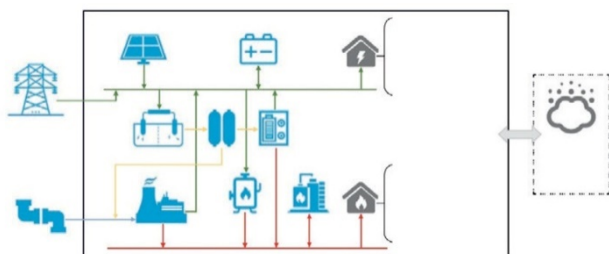


Рис. 1. Структура HIES.

когда фотоэлектрическая установка вырабатывает избыточную электроэнергию, или, когда цены на электроэнергию низкие. В таких условиях избыточная электроэнергия может быть преобразована в водород или собрана в ES и TS. И наоборот, когда выработка электроэнергии фотоэлектрической установкой снижается или цены на электроэнергию растут, сохраненный водород может быть повторно преобразован в электроэнергию. Кроме того, внедрение механизмов торговли квотами на выбросы вредных газов ступенчатой типа и управления спросом стимулирует низкоуглеродную и экономически эффективную работу в рамках HIES.

1.2 Моделирование оборудования

1) Модель H₂-CHP

В отличие от традиционных систем CHP, модель H₂-CHP использует смесь природного газа и водорода в качестве топлива [24]. Эта интеграция улавливает отработанное тепло через теплообменник, которое затем используется для выработки тепловой энергии. Энергоэффективность системы H₂-CHP превышает эффективность традиционных установок CHP, что

приводит к значительному снижению выбросов углерода. Модель H2-CHP можно записать следующим образом:

$$\psi^t = (P_H^t/L_H)/(P_H^t/L_H + P_G^t/L_G) \quad (1)$$

$$0 \leq \psi^t \leq \psi^{\max}, \quad (2)$$

$$P_{\text{CHP_in}}^t = L_{\text{mix}}^t(P_H^t/L_H + P_G^t/L_G), \quad (3)$$

$$L_{\text{mix}}^t = \psi^t L_H + (1 - \psi^t) L_G, \quad (4)$$

$$T_{\text{CHP}}^t = \eta_{\text{CHP_h}} P_{\text{CHP_in}}^t, \quad (5)$$

$$P_{\text{CHP}}^t = \eta_{\text{CHP_e}} P_{\text{CHP_in}}^t, \quad (6)$$

$$0 \leq P_{\text{CHP}}^t \leq U_{\text{on}}^t P_{\text{CHP}}^{\max} \quad (7)$$

where ψ^t is the mixing volume ratio of hydrogen at time t , ψ^{\max} is the maximum mixing volume ratio, and P_H^t and P_G^t are the hydrogen and natural gas input powers, respectively. L_H and L_G denote the lower heating values of hydrogen and natural gas, L_{mix}^t is the lower heating value of the mixed gas, P_{CHP}^t and T_{CHP}^t are the electric and thermal powers generated by H2-CHP at time t , respectively, $\eta_{\text{CHP_e}}$ and $\eta_{\text{CHP_h}}$ are the electricity and thermal energy conversion efficiencies of the H2-CHP unit, P_{CHP}^{\max} is the maximum electric power generated by the H2-CHP unit, and U_{on}^t represents the start-up status of the H2-CHP unit.

2) Модель HESS

В HESS избыточная электроэнергия от фотоэлектрического блока и верхней сети преобразуется в водород посредством электролиза воды в EL. Полученный водород хранится в НТ. По мере увеличения спроса на электроэнергию, накопленный водород высвобождается и преобразуется обратно в электроэнергию через FC [25]. HESS обеспечивает гибкий и низкоуглеродный подход к обеспечению водородом. Модель HESS может быть выражена следующим образом:

$$0 \leq P_{EL}^t \leq P_{EL}^{\max} \quad (8)$$

$$0 \leq P_{FC}^t \leq P_{FC}^{\max} \quad (9)$$

$$T_{FC}^t = \eta_{FC_h} P_{FC}^t, \quad (10)$$

$$S_{HT}^0 - \sum_{t'=1}^t P_{EL}^{t'} / C_{P2H} \Delta t - \frac{\sum_{t'=1}^t P_{FC}^{t'} \Delta t}{\eta_{FC} C_{H2P}} + \frac{\sum_{t'=1}^t P_H^{t'} \Delta t}{C_{H2P}} \leq S_{HT}^{\max} \quad (11)$$

$$S_{HT}^0 = S_{HT}^{N_T}, \quad (12)$$

where P_{EL}^t and P_{FC}^t denote the electric power outputs of the EL and FC at time t , respectively, P_{EL}^{\max} and P_{FC}^{\max} are the upper operational limits for the EL and FC, respectively, T_{FC}^t represents the thermal power output from the FC at time t , η_{FC_h} represents the ratio of thermal energy to electric power output of the FC, S_{HT}^0 represents the initial hydrogen storage in the HT (kg), Δt denotes the time interval for scheduling, S_{HT}^{\min} and S_{HT}^{\max} represent the minimum and maximum permissible levels of hydrogen stored in the HT, η_{EL} and η_{FC} represent the efficiencies of EL and FC, respectively, C_{P2H} is the power-to-hydrogen ratio (kWh/kg), C_{H2P} denotes the hydrogen-to-power ratio (kg/kWh), and N_T represents the number of time intervals during the operational period.

3) Модель PV

Фотоэлектрическая установка — это генератор, использующий возобновляемые источники энергии, который преобразует солнечную энергию в электричество. Потребление электроэнергии фотоэлектрической установкой не превышает прогнозируемую максимальную выходную мощность. Избыточная выходная мощность фотоэлектрической установки должна быть ограничена для поддержания равновесия между спросом и предложением электроэнергии.

$$0 \leq P_{PV}^t \leq \tilde{P}_{PV}^t, \quad (13)$$

$$P_{PV}^t + P_{PV,cur}^t = \tilde{P}_{PV}^t, \quad (14)$$

where P_{PV}^t denotes the consumption power of the PV unit at time t , $P_{PV,cur}^t$ denotes the curtailment power of the PV unit at time t , and \tilde{P}_{PV}^t represents the forecasted maximum output power of the PV unit at time t .

4) Модель EB

Модель EB демонстрирует, как производится тепловая энергия при потреблении электроэнергии. Модель можно отразить следующим образом:

$$0 \leq P'_{EB} \leq P^{max}_{EB}, \quad (15)$$

$$T'_{EB} = \eta_{EB} P'_{EB}, \quad (16)$$

where P'_{EB} represents the electric power consumed by the EB at time t , P^{max}_{EB} is the maximum electric power consumed by the EB, T'_{EB} indicates the thermal power generated by the EB at time t , and η_{EB} is the efficiency of the EB.

5) Модель ES/TS

Системы ES и TS моделируются с использованием обобщенного подхода к хранению энергии, отражающего их схожие механизмы работы [19]. В частности, если взять в качестве примера ES, модель описывается следующим образом:

$$0 \leq P'_{ES_{ch}} \leq (1 - u'_{ES}) P^{max}_{ES}, \quad (17)$$

$$0 \leq P'_{ES_{dis}} \leq u'_{ES} P^{max}_{ES}, \quad (18)$$

$$S_{ES}^{min} - \sum_{t'=1}^t P'_{ES_{ch}} \Delta t \leq S_{ES} \leq S_{ES}^{max} + \sum_{t'=1}^t \frac{P'_{ES_{dis}} \Delta t}{\eta_{ES_{dis}}}, \quad (19)$$

$$S_{ES}^0 = S_{ES}^{N_T}, \quad (20)$$

where $P'_{ES_{ch}}$ and $P'_{ES_{dis}}$ denote the charging and discharging powers of the ES at time t , respectively, u'_{ES} is the binary variable indicating the discharge status of the ES, P^{max}_{ES} represents the maximum power for both charging and discharging of the ES, $\eta_{ES_{ch}}$ and $\eta_{ES_{dis}}$ represent the charging and discharging efficiencies, S_{ES}^0 is the initial state, and S_{ES}^{min} and S_{ES}^{max} are the lower and upper limits of the stored energy, respectively.

6) Модель баланса электрической и тепловой энергии

Равновесие электрической и тепловой энергии имеет решающее значение и регулируется ограничениями, перечисленными ниже:

$$P'_{Grid} + P'_{CHP} + P'_{PV} + P'_{ES_{dis}} + P'_{FC} - P'_{ES_{ch}} - P'_{EB} - P'_{EL} = P'_L, \quad (21)$$

$$T'_{CHP} + T'_{EB} + T'_{FC} + T'_{ES_{dis}} - T'_{ES_{ch}} = T'_L, \quad (22)$$

where P'_{Grid} represents the electric power bought from the upper electricity network, and P'_L and T'_L denotes the electrical and thermal loads, respectively.

2. Модели продаж квот на выбросы вредных газов и управления спросом.

2.1 Ступенчатый механизм продаж квот на выбросы вредных газов

Механизм продаж квот на выбросы вредных газов призван контролировать выбросы углерода путем установления официального разрешения на выбросы, что облегчает рыночную торговлю подобного рода квотами. Регулирующие органы распределяют первоначальные квоты на выбросы среди предприятий, позволяя им соответствующим образом планировать свою деятельность и

выбросы. Участники могут продавать избыточные квоты на углеродном рынке, если их фактические выбросы оказываются ниже выделенных объемов. И наоборот, если выбросы превышают их квоты, они должны приобрести дополнительные квоты.

В данном исследовании используется ступенчатый механизм продаж углеродных квот, состоящий из трех основных элементов: модели квот на выбросы вредных газов, модели фактических выбросов вредных газов и самой ступенчатой модели продаж квот на выбросы вредных газов.

1) Модель квот на выбросы вредных газов

Углеродные выбросы в HIES в основном производят два источника: электроэнергия, получаемая из вышестоящей сети, и природный газ, используемый системой H2-СНР. Некоторые страны, такие как Китай, приняли метод бесплатного распределения квот [26]. Модель может быть выражена следующим образом:

$$\begin{cases} E_{IES} = E_{Grid} + E_{Nat} \\ E_{Grid} = \alpha_{Grid} \sum_{t=1}^{N_T} P_{Grid}^t \\ E_{Nat} = \alpha_{Nat} \sum_{t=1}^{N_T} (P_{CHP}^t + T_{CHP}^t) \end{cases}, \quad (23)$$

где E_{IES} , E_{Grid} , и E_{Nat} представляют собой квоты на выбросы вредных газов для IES, закупаемой электроэнергии и потребления природного газа соответственно, α_{Grid} и α_{Nat} — коэффициенты квот на выбросы вредных газов для электроэнергии, получаемой из вышестоящей сети, и потребления природного газа соответственно.

2) Экспериментальная модель углеродосодержащих выбросов

Модель углеродосодержащих выбросов при закупке электроэнергии из вышестоящей сети и сжигании природного газа может быть выражена следующим образом:

$$\begin{cases} E_{IES,a} = E_{Grid,a} + E_{Nat,a} \\ E_{Grid,a} = \gamma_{Grid} \sum_{t=1}^{N_T} P_{Grid}^t \\ E_{Nat} = \gamma_{Nat} \sum_{t=1}^{N_T} P_G^t \end{cases}, \quad (24)$$

где γ_{Grid} и γ_{gas} обозначают коэффициенты углеродосодержащих выбросов для электроэнергии и природного газа из сети соответственно, а $E_{IES,a}$, $E_{Grid,a}$ и $E_{Nat,a}$ представляют собой фактические выбросы углерода для IES, закупленной электроэнергии и потребления природного газа соответственно.

3) Ступенчатая модель продаж квот на выбросы вредных газов

Объем углерода, торгуемого на рынке, определяется путем сравнения квот на выбросы вредных газов с фактическими выбросами IES:

$$E_{IES,t} = E_{IES,a} - E_{IES}, \quad (25)$$

где $E_{IES,t}$ — объем продаж квот на выбросы вредных газов в рамках HIES.

В отличие от традиционного механизма ценообразования в сфере торговли квотами на выбросы вредных газов, в данном исследовании используется ступенчатый механизм ценообразования, который вводит поэтапные ограничения на углеродосодержащие выбросы. Этот механизм ценообразования делит процесс покупки на несколько этапов, при этом цена покупки увеличивается по мере роста необходимого количества квот на выбросы вредных газов. Затраты,

связанные со ступенчатым механизмом продаж квот на выбросы вредных газов, формулируются следующим образом:

$$C_{CO_2} = \begin{cases} \lambda E_{IES,t} & 0 \leq E_{IES,t} \leq l \\ \lambda(1+a)(E_{IES,t} - l) + \lambda l & l \leq E_{IES,t} \leq 2l \\ \lambda(1+2a)(E_{IES,t} - 2l) + \lambda(2+a)l & 2l \leq E_{IES,t} \leq 3l \\ \lambda(1+3a)(E_{IES,t} - 3l) + \lambda(3+3a)l & 3l \leq E_{IES,t} \leq 4l \\ \lambda(1+4a)(E_{IES,t} - 4l) + \lambda(4+6a)l & 4l \leq E_{IES,t} \end{cases} \quad (26)$$

где C_{CO_2} обозначает стоимость ступенчатой системы продаж квот на выбросы вредных газов, λ обозначает базовую стоимость продаж квот на выбросы вредных газов, l обозначает длительность интервала углеродосодержащих выбросов, a — темп роста стоимости.

2.2 Модель реагирования на спрос

Управление спросом (DR) — это стратегия, которая побуждает потребителей корректировать свои потребности в электроэнергии или тепле в ответ на колебания цен на энергоносители или стимулирующие программы. В данном исследовании NIES внедрила DR для перераспределения или сокращения нагрузки, тем самым оптимизируя проект работы для снижения эксплуатационных расходов и углеродосодержащих выбросов. Например, некоторые нагрузки могут быть перенесены на периоды высокой выработки фотоэлектрической установки, а некоторые некритичные нагрузки могут быть сокращены. Такой подход не только увеличивает потребление возобновляемой энергии, но и минимизирует потери.

Нагрузки классифицируются как фиксированные или гибкие в зависимости от их характеристик. Гибкие нагрузки, которые могут участвовать в управлении спросом, далее делятся на категории с возможностью ограничения и сдвига. Модель управления спросом для электрических нагрузок описывается уравнениями (27)-(30). Уравнения (27)-(28) устанавливают, что нагрузки с ограничением и сдвигом в момент времени t не могут превышать заданные максимальные пределы для нагрузок с ограничением и сдвигом соответственно. Уравнение (29) управляет временными сдвигами переключаемых нагрузок в различных временных интервалах без уменьшения общего объема нагрузки. Уравнение (30) вычисляет нагрузку после корректировки DR. Аналогичная модель DR применяется к тепловым нагрузкам, как описано в (31)-(34).

$$0 \leq P_{\text{cur}}^t \leq P_{\text{cur}}^{\text{max}}, \quad (27)$$

$$0 \leq P_{\text{shift}}^t \leq P_{\text{shift}}^{\text{max}}, \quad (28)$$

$$\sum_{t=1}^{N_T} P_{\text{shift}}^t = 0, \quad (29)$$

$$P_{\text{L,DR}}^t = P_L^t - P_{\text{shift}}^t - P_{\text{cur}}^t, \quad (30)$$

$$0 \leq T_{\text{cur}}^t \leq T_{\text{cur}}^{\text{max}}, \quad (31)$$

$$0 \leq T_{\text{shift}}^t \leq T_{\text{shift}}^{\text{max}}, \quad (32)$$

$$\sum_{t=1}^{N_T} T_{\text{shift}}^t = 0, \quad (33)$$

$$T_{\text{L,DR}}^t = T_L^t - T_{\text{shift}}^t - T_{\text{cur}}^t, \quad (34)$$

where P_{cur}^t and P_{shift}^t are the curtailed and shifted power of the flexible electrical load at time t , respectively, $P_{\text{cur}}^{\text{max}}$ and $P_{\text{shift}}^{\text{max}}$ denote the maximum allowed power for curtailable and shiftable electrical loads, respectively, P_L^t and $P_{\text{L,DR}}^t$ represent the electrical load power before and after DR, T_{cur}^t and T_{shift}^t represent the curtailed and shifted power of the thermal load at time t , respectively, $T_{\text{cur}}^{\text{max}}$ and $T_{\text{shift}}^{\text{max}}$

are the maximum allowed power for curtailable and shiftable thermal loads, respectively, T_L^t and $T_{\text{L,DR}}^t$ are the thermal load power before and after DR.

Для мотивации потребителей к участию в управлении спросом (DR) программа сочетает финансовые стимулы с переменным ценообразованием. Как ограничиваемые, так и перенаправляемые нагрузки могут реагировать на колебания цен на электроэнергию и получать соответствующие стимулы, как показано в (35)-(36). Стимул для ограничиваемых нагрузок обычно выше, чем для перенаправляемых нагрузок.

$$C_{\text{DR,E}} = \sum_{t=1}^{N_T} (c_{\text{shift,e}} P_{\text{shift}}^t + c_{\text{cur,e}} P_{\text{cur}}^t), \quad (35)$$

$$C_{\text{DR,H}} = \sum_{t=1}^{N_T} (c_{\text{shift,h}} T_{\text{shift}}^t + c_{\text{cur,h}} T_{\text{cur}}^t), \quad (36)$$

где $C_{\text{DR,E}}$ и $C_{\text{DR,H}}$ представляют собой общую сумму субсидий, выплачиваемых HIES за гибкие электрические и тепловые нагрузки соответственно, $c_{\text{shift,e}}$ и $c_{\text{cur,e}}$ представляют собой удельные затраты на субсидии для переключаемых и ограничиваемых электрических нагрузок соответственно, а $c_{\text{shift,h}}$ и $c_{\text{cur,h}}$ представляют собой удельные затраты на субсидии для переключаемых и ограничиваемых тепловых нагрузок соответственно.

3 Модель надежного планирования на основе оптимизации распределения для HIES

3.1 Модель неопределенности

Для моделирования неопределенностей в выходной мощности фотоэлектрических систем и изменениях нагрузки мы использовали набор неоднозначностей, основанный на исторических данных. Этот набор был построен путем группирования M фактически собранных выборок в K репрезентативные варианты моделирования. Они отражают потенциальные распределения вероятностей выходной мощности фотоэлектрических систем, а также электрических и тепловых нагрузок. Затем, используя всеобъемлющие ограничения нормы, был сформулирован соответствующий набор неоднозначностей распределения вероятностей.

Для точного отображения неопределенности этих вероятностных распределений в различных вариантах моделирования был принят доверительный интервал на основе составной нормы

вероятности. Этот интервал объединяет 1-норму и ∞ -норму, как показано в (37). Первое условие обеспечивает общее отклонение между фактической и номинальной вероятностями во всех вариантах моделирования с погрешностью не более θ_1 . Второе условие ограничивает максимальное отклонение для любого отдельного варианта моделирования с использованием ∞ -нормы.

$$\begin{cases} Pr\left\{\sum_{k=1}^K |p_k - p_k^0| \leq \theta_1\right\} \geq 1 - 2Ke^{-2M\theta_1/K} \\ Pr\left\{\max_{1 \leq k \leq K} |p_k - p_k^0| \leq \theta_\infty\right\} \geq 1 - 2Ke^{-2M\theta_\infty} \end{cases} \quad (37)$$

где $Pr\{\cdot\}$ представляет собой оператора вероятности, p_k — фактическая вероятность варианта моделирования k , p_k^0 — номинальная вероятность варианта моделирования k после группирования, а θ_1 и θ_∞ — пределы отклонения вероятности при ограничениях 1-нормы и ∞ -нормы соответственно.

Для установления пределов неопределенности для этих вероятностных отклонений в пределах множества неоднозначности доверительные интервалы в правой части были установлены равными θ_1 и θ_∞ :

$$\begin{cases} \theta_1 = \frac{K}{2M} \ln \frac{2K}{1-\alpha_1} \\ \theta_\infty = \frac{1}{2M} \ln \frac{2K}{1-\alpha_\infty} \end{cases} \quad (38)$$

где α_1 и α_∞ представляют собой параметры уровня доверия для ограничений, соответствующих 1-норме и ∞ -норме соответственно. Эти параметры могут быть скорректированы в зависимости от предпочтений лиц, принимающих решения.

Таким образом множество неоднозначностей может быть представлено следующим образом:

$$\Omega = \left\{ p_k \left| \begin{array}{l} p_k \geq 0, k = 1, \dots, K \\ \sum_{k=1}^K p_k = 1 \\ \sum_{k=1}^K |p_k - p_k^0| \leq \theta_1 \\ \max_{1 \leq k \leq K} |p_k - p_k^0| \leq \theta_\infty \end{array} \right. \right. \quad (39)$$

набор неоднозначностей оказался в целом согласованным и устойчивым к экстремальным отклонениям в отдельных вариантах моделирования, обеспечивая более надежное и сбалансированное представление неопределенности.

3.2 Двухэтапная модель, устойчивая к изменению распределения

Для учета неопределенностей в выходной мощности фотоэлектрических систем и многоэнергетических нагрузок с использованием множества неоднозначностей была разработана двухэтапная модель планирования на основе DRO для HIES. Эта модель работает в рамках подхода минимум-максимум-минимум для минимизации общих затрат при наихудшем вероятностном распределении.

Первый этап, называемый этапом прогнозирования на сутки вперед, имеет структуру «минимум», где переменные решения включают состояние запуска/остановки работы установки H2-СНР, состояние зарядки/разрядки накопителя энергии и теплового насоса, а также закупку электроэнергии на рынке на сутки вперед. На этом этапе решающее значение имеют функции и время отклика различного оборудования и механизмов управления.

Второй этап, или внутрисуточный этап, направлен на минимизацию ожидаемых затрат, исходя из вероятностного распределения наихудшего варианта. Переменные решения на этом этапе включают закупку электроэнергии на внутрисуточном рынке, корректировку выходной мощности оборудования, внедрение управления спросом и ограничение производства фотоэлектрической энергии.

Целевая функция направлена на минимизацию общих эксплуатационных затрат, включая закупку энергии, техническое обслуживание, продажи квот на выбросы вредных газов, управление спросом и штрафы за ограничение выработки возобновляемой энергии. Уравнение (40) представляет собой общую структуру для расчета общих эксплуатационных затрат. Эксплуатационные затраты на сутки вперед подробно описаны в (41), и включают в себя затраты на запуск установки H2-CHP и затраты на закупку электроэнергии на сутки вперед. Внутрисуточные затраты для варианта моделирования k выражены в (42). (43)-(47) — затраты, связанные с внутрисуточными закупками электроэнергии, закупками природного газа, техническим обслуживанием, стимулами управления спросом и штрафами за ограничение выработки фотоэлектрической энергии.

$$C = \min \left\{ C_{DA} + \max_{p_k \in \Omega} \sum_{k=1}^K \sum_{ID} p_k \min \{ \} \right\}, \quad (40)$$

$$C_{DA} = \sum_{t=1}^{N_T} \left(c_{on} U_{on}^t + c_{Grid,DA}^t P_{Grid,DA}^{k,t} \right), \quad (41)$$

$$C_{ID}^k = C_{Grid,ID}^k + C_{gas}^k + C_{main}^k + C_{CO_2}^k + C_{DR}^k + C_{pvcur}^k, \quad (42)$$

$$C_{Grid,ID}^k = \sum_{t=1}^{N_T} c_{Grid,ID}^t P_{Grid,ID}^{k,t}, \quad (43)$$

$$C_{gas}^k = \sum_{t=1}^{N_T} c_{gas}^t P_{gas}^{k,t}, \quad (44)$$

$$C_{main}^k = \sum_{t=1}^{N_T} \left\{ \begin{array}{l} C_{CHP} P_{CHP}^{k,t} + C_{EB} P_{EB}^{k,t} + C_{ES} (P_{ES_ch}^{k,t} + P_{ES_dis}^{k,t}) \\ + C_{HESS} (P_{EL}^{k,t} + P_{FC}^{k,t} + P_H^{k,t}) + C_{PV} P_{PV}^{k,t} \\ + C_{TS} (T_{TS_ch}^{k,t} + T_{TS_dis}^{k,t}) \end{array} \right\}, \quad (45)$$

$$C_{DR} = C_{DR,E} + C_{DR,T}, \quad (46)$$

$$C_{pvcur}^k = \sum_{t=1}^{N_T} c_{pvcur}^t P_{PV,cur}^{k,t}, \quad (47)$$

где C_{DA} представляет собой стоимость эксплуатации системы на сутки вперед, C_{ID}^k обозначает внутрисуточные операционные затраты в варианте моделирования k, c_{on} — себестоимость запуска

единицы продукции, $C_{Grid,DA}^t$ и $C_{Grid,ID}^t$ это, соответственно, стоимость электроэнергии на следующий день и внутрисуточная стоимость на момент времени t. C_{CHP} , C_{EB} , C_{ES} , C_{HESS} , C_{PV} и C_{TS} обозначают удельные затраты на техническое обслуживание для H2-CHP, EB, ES, HESS, PV и TS соответственно. c_{pvcur} обозначает удельные штрафные затраты за ограничение выработки электроэнергии фотоэлектрической системой.

Ограничения включают в себя: ограничения на эксплуатацию оборудования, такого как установка H2-CHP, HESS, фотоэлектрическая установка, EB, ES и TS, как показано в (1)-(22), ограничения на продажу квот на выбросы вредных газов (23)-(25) и ограничения на управление спросом (27)-(34). Ограничения на транзакции электроэнергии и баланс мощности.

Ограничения на транзакции электроэнергии выражаются следующим образом:

$$0 \leq P_{\text{Grid,DA}}^t \leq P_{\text{Grid}}^{\max}, \quad (48)$$

$$0 \leq P_{\text{Grid,ID}}^{k,t} \leq P_{\text{Grid}}^{\max}, \quad (49)$$

where P_{Grid}^{\max} represents the maximum electricity purchase power.

The power balance constraints of electricity and thermal energy are defined as follows:

$$P_{\text{Grid,DA}}^t + P_{\text{Grid,ID}}^t + P_{\text{CHP}}^{k,t} + P_{\text{PV}}^{k,t} + P_{\text{ES_dis}}^{k,t} + P_{\text{FC}}^{k,t} - P_{\text{ES_ch}}^{k,t} - P_{\text{EL}}^{k,t} - P_{\text{EB}}^{k,t} = P_{\text{L,DR}}^{k,t} \quad (50)$$

$$T_{\text{CHP}}^{k,t} + T_{\text{EB}}^{k,t} + T_{\text{TS_dis}}^{k,t} + T_{\text{FC}}^{k,t} - T_{\text{TS_ch}}^{k,t} = T_{\text{L,DR}}^{k,t} \quad (51)$$

where $T_{\text{TS_ch}}^{k,t}$ and $T_{\text{TS_dis}}^{k,t}$ represent the charging and discharging powers of the TS at time t under scenario k .

3.3 Методология решения

Предложенная двухэтапная модель планирования на основе DRO для HIES представлена в компактной форме следующим образом:

$$\begin{aligned} \min_x \mathbf{b}^T \mathbf{x} + \max_{p_k \in \Omega} \sum_{k=1}^K p_k \min_{y_k} \mathbf{c}^T \mathbf{y}_k, \\ s.t. \begin{cases} A\mathbf{x} + B\mathbf{y}_k \geq \mathbf{d} \\ D\mathbf{y}_k \geq \mathbf{e} \\ K\mathbf{y}_k = 0 \\ I\mathbf{y}_k = \mathbf{u}_k \end{cases}, \end{aligned} \quad (52)$$

где \mathbf{x} представляет собой переменные решения первого этапа, \mathbf{y}_k — множество переменных решения второго этапа в рамках варианта моделирования k , \mathbf{u}_k обозначает случайные переменные в рамках варианта моделирования k , \mathbf{b} и \mathbf{c} — векторы коэффициентов затрат, а A , B , D , K , I , \mathbf{d} , \mathbf{e} представляют собой матрицы параметров.

Из-за структуры оптимизации «минимум-максимум-минимум» достижение прямого решения представляет собой значительные трудности. Для управления этой сложностью используется алгоритм C&CG. Этот алгоритм разделяет исходную задачу на основную задачу и подзадачу, что позволяет получить оптимальное решение путем повторяющегося решения.

Основная задача формулируется в (53), целью которой является определение оптимального решения, удовлетворяющего ограничениям первого этапа и учитывающего значения неопределенности наихудшего варианта моделирования. η представляет собой стоимость, связанную со вторым этапом в контексте неопределенности наихудшего варианта моделирования. По мере увеличения числа повторов в основную задачу включаются дополнительные переменные и ограничения.

$$\begin{aligned}
& \min_{\mathbf{x}} \mathbf{b}^T \mathbf{x} + \eta \\
& s.t. \begin{cases} \eta \geq \sum_{k=1}^K p_k^{n,*} \min_{\mathbf{y}_k^n} \mathbf{c}^T \mathbf{y}_k^n \\ Ax + B\mathbf{y}_k^n \geq d \\ D\mathbf{y}_k^n \geq e \\ K\mathbf{y}_k^n = 0 \\ I\mathbf{y}_k^n = \mathbf{u}_k \end{cases}, \forall n \leq l
\end{aligned} \quad (53)$$

where l represents the current iteration number, \mathbf{y}_k^n is the optimal solution derived from the subproblem of the n -th iteration, and $p_k^{n,*}$ denotes the worst-case probability of scenario k of the n -th iteration, where $n \leq l$.

Подзадача выражается формулой (54), которая определяет наихудший вариант реализации распределения вероятностей для каждого варианта моделирования k в пределах определенного множества неоднозначности Ω .

$$\begin{aligned}
& \max_{p_k \in \Omega} \sum_{k=1}^K p_k \min_{\mathbf{y}_k} \mathbf{c}^T \mathbf{y}_k, \\
& s.t. \begin{cases} Ax + B\mathbf{y}_k \geq d \\ D\mathbf{y}_k \geq e \\ K\mathbf{y}_k = 0 \\ I\mathbf{y}_k = \mathbf{u}_k \end{cases} .
\end{aligned} \quad (54)$$

Дискретное значение вероятности участка p_k в подзадаче и переменная второго этапа \mathbf{y}_k независимы друг от друга; следовательно, вычисления в подзадаче могут быть выполнены с использованием методов параллельной обработки.

Процесс решения двухэтапной модели планирования на основе DRO с использованием алгоритма C&CG показан на рис. 2 и может быть описан следующим образом:

Этап 1: Инициализируйте распределение вероятностей; установите верхнюю и нижнюю границы: $UB = +\infty$, $LB = -\infty$, счетчик повторов $l = 1$ и задайте начальное распределение вероятностей наихудшего варианта $p^{0,*}$.

Этап 2: Решите основную задачу с использованием распределения вероятностей наихудшего варианта, чтобы получить $x^{l,*}$, и обновите LB .

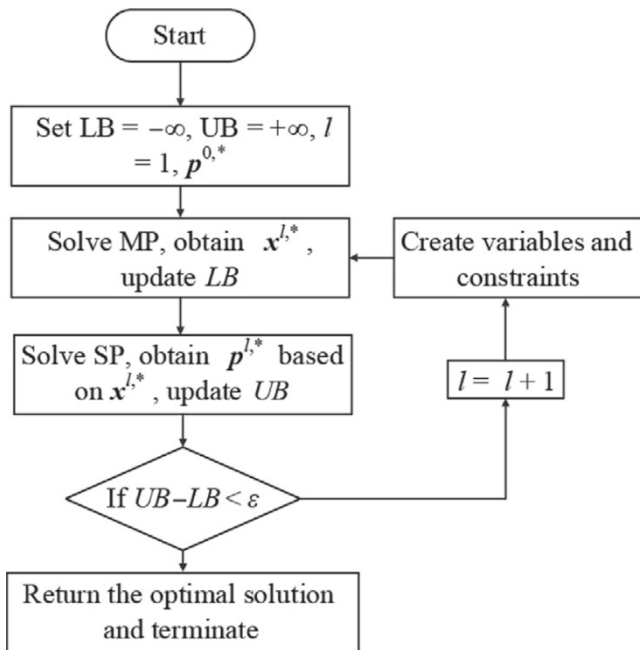


Рис. 2. Процесс решения двухэтапной модели DRO.

Этап 3: Решите подзадачу на основе $x^{l,*}$, определите распределение вероятностей наихудшего варианта $p^{l,*}$ в пределах множества неоднозначности Ω и обновите UB.

Этап 4: Если выполняется условие $UB-LB \leq \varepsilon$, вернитесь к оптимальному решению и завершите

процесс. Или же определите новые переменные y_k^l , включите соответствующие ограничения в основную задачу, обновите $l = l + 1$ и вернитесь к этапу 2.

4 Практические примеры

4.1 Параметры и настройки

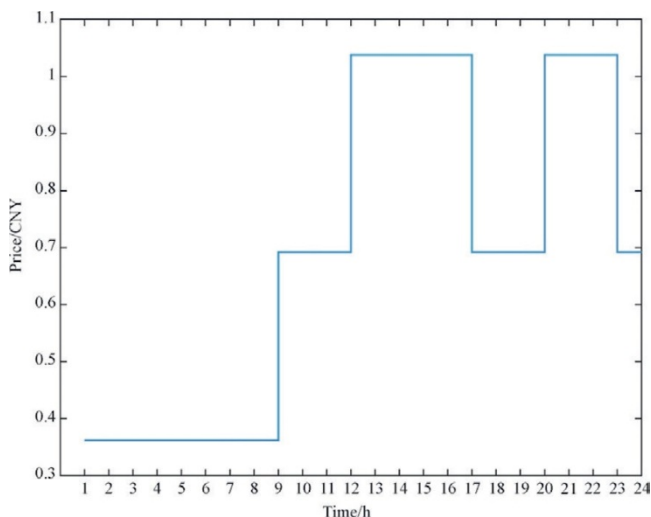


Рис. 3. Цены на электроэнергию на день вперед в зависимости от времени суток.

В качестве объекта моделирования для данного исследования использовалась HIES, изображенная на рис. 1. Параметры оборудования подробно описаны в таблице A1 в Приложении [27,28]. В данном исследовании была принята модель ценообразования электроэнергии в зависимости от времени суток, как показано на рис. 3, где внутрисуточные рыночные цены на электроэнергию в 1,3

раза превышают цены на рынке «на день вперед». Цена природного газа была установлена на уровне 0,35 юаней/кВт·ч. Базовая цена λ для торговли квотами на выбросы вредных газов была установлена на уровне 200 юаней/кг, с темпом роста цены $a = 0,25$ и длиной интервала $l = 2000$ кг. Значения $C_{\text{shift}, e}$ и $C_{\text{shift}, h}$ были установлены на уровне 0,3 юаней/кВт, а значения $C_{\text{cur}, e}$ и $C_{\text{cur}, h}$ — на уровне 0,4 юаней/кВт. В таблице A2 в Приложении приведены параметры углеродосодержащих выбросов. Базовые значения электрической и тепловой нагрузок были установлены на уровне 500 и 600 кВт соответственно, а максимальное соотношение объемов смешивания водорода в установке H2-CHP ψ^{max} было ограничено 10%.

Для учета неопределенностей в выходной мощности фотоэлектрических систем, электрических и тепловых нагрузках был использован метод Монте-Карло для создания 200 вариантов моделирования на основе бета- и нормального распределений. Затем был применен метод кластеризации K-средних для определения репрезентативных вариантов моделирования. Сумма квадратов ошибок (SSE) служила метрикой для оценки эффективности группировки. Как показано на рис. 4, оптимальное число групп было определено равным четырем. Это число представляет собой «точку перегиба», обеспечивающую эффективный баланс между вычислительной эффективностью и точностью.

На рис. 5 показаны четыре типичных зимних дня, где заштрихованные области указывают интервалы прогнозирования для неопределенностей.

4.2 Результаты и анализ

Для оценки результативности предложенного метода планирования для HIES, включающей механизмы DR, HESS и продажи квот на выбросы вредных газов, были сопоставлены три различных проекта:

Проект 1: Сосредоточен на планировании работы HIES, включающей в себя как HESS, так и механизм продажи квот на выбросы вредных газов.

Проект 2: Относится к традиционной IES, использующей системы CHP, но исключающей как H2-CHP, так и HESS.

Проект 3: Предполагает планирование работы для HIES, но без учета механизма продажи квот на выбросы вредных газов.

Результаты предложенного метода

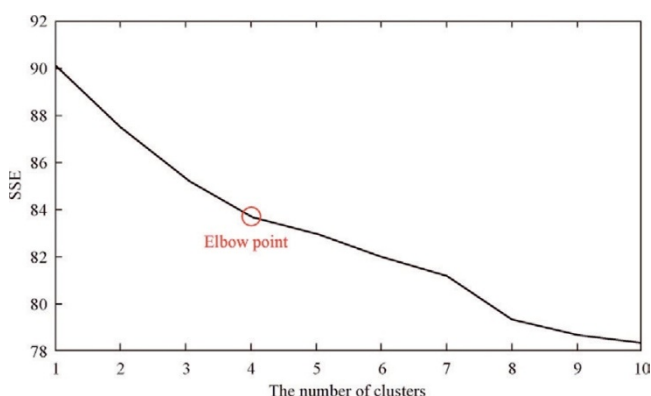


Рис. 4. SSE для различных чисел группировок.

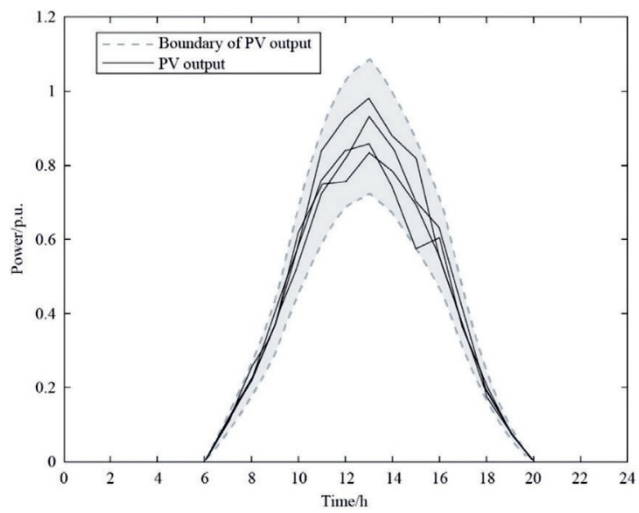
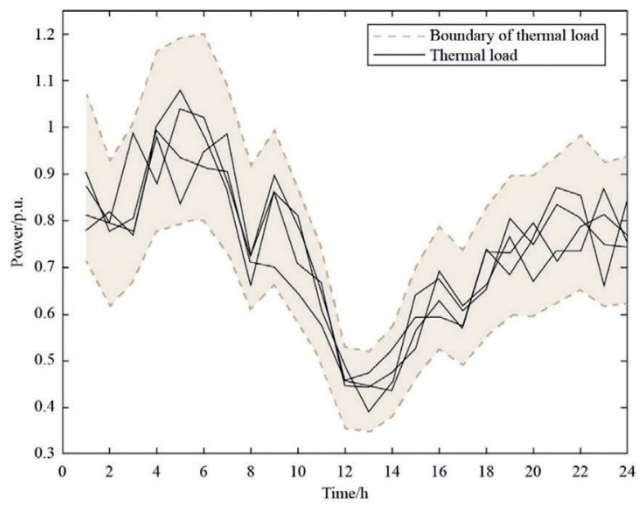
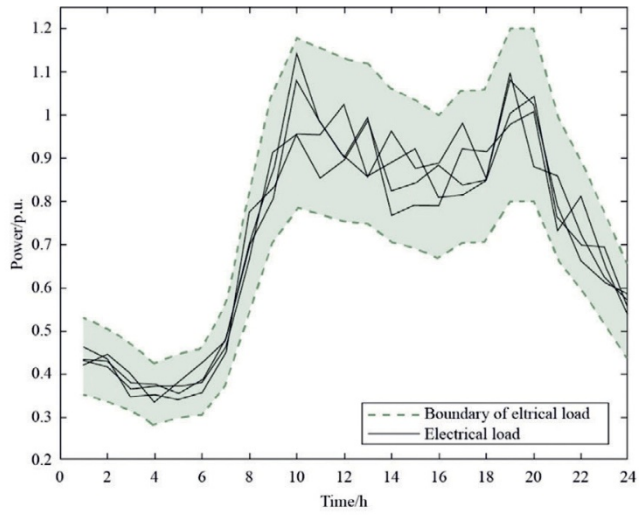


Рис. 5. Кривые зависимости выходной мощности фотоэлектрической системы от нагрузки.

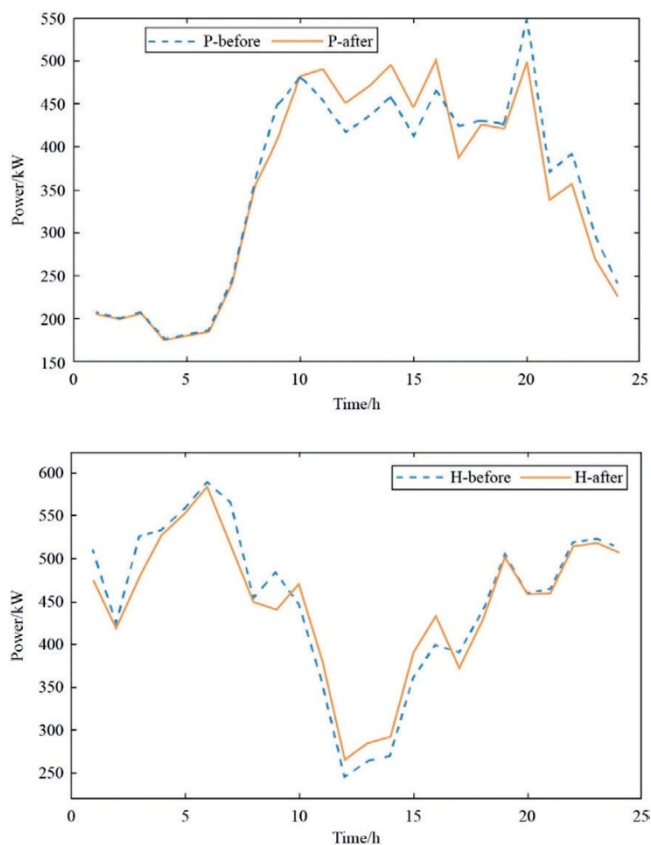


Рис. 6. Результаты DR.

После корректировок в рамках программы управления спросом (DR), как показано на рис. 6, профили электрических и тепловых нагрузок были скорректированы для лучшего соответствия доступности выработки фотоэлектрической энергии и колебаниям цен на электроэнергию. В периоды высокой выработки фотоэлектрической энергии (10:00-16:00) значительная часть электрических и тепловых нагрузок перераспределяется, что увеличивает потребление электроэнергии, вырабатываемой фотоэлектрическими системами, и снижает зависимость от природного газа, что, в свою очередь, уменьшает выбросы углекислого газа. В периоды высоких цен на электроэнергию (19:00-24:00) H2-CHP преимущественно обеспечивает электроэнергией и тепловой энергией, а некоторые некритичные нагрузки сокращаются для уменьшения потребления природного газа, эксплуатационных расходов и выбросов углекислого газа.

Первоначально планирование на сутки вперед было оптимизировано с учетом неопределенностей в возобновляемых источниках энергии и нагрузках. На внутрисуточном этапе, по мере того как эти неопределенности постепенно становились очевидными, внутрисуточное планирование было уточнено с учетом условий реального времени [16]. Предложенный метод планирования оказался эффективным в поддержании баланса между предложением и спросом на энергию, как показано на рис. 7. Эксплуатационные условия HESS и H2-CHP подробно описаны на рис. 8, демонстрируя общую функциональность и эффективность системы.

В периоды низких цен на электроэнергию (с 1:00 до 8:00) стратегии рынка на сутки вперед отдают приоритет закупке электроэнергии из вышестоящей сети для минимизации эксплуатационных расходов. Тепловые нагрузки в эти часы преимущественно обеспечиваются EB, который преобразует электроэнергию в тепловую энергию. Для решения проблемы неустойчивости нагрузки дополнительная электроэнергия закупается на внутрисуточном рынке, особенно в периоды высокой нагрузки. С 10:00 до 16:00, когда выработка фотоэлектрической энергии достигает пика, вся электрическая нагрузка напрямую питается от фотоэлектрической установки. Одновременно EB обеспечивает все тепловые нагрузки, преобразуя электроэнергию,

вырабатываемую фотоэлектрической установкой, в тепловую энергию. Избыточная фотоэлектрическая энергия либо накапливается в системе хранения энергии, либо преобразуется в водород посредством электролиза, что повышает использование возобновляемой энергии и снижает углеродосодержащие выбросы. В периоды пиковых цен на электроэнергию (с 20:00 до 24:00) система H2-CHP в основном производит как электроэнергию, так и тепловую энергию для дальнейшего снижения эксплуатационных расходов. С 20:00 до 22:00, запасенный водород преобразуется обратно в электроэнергию и тепловую энергию с помощью FC и H2-CHP, что способствует передаче возобновляемой энергии и повышает гибкость системы.

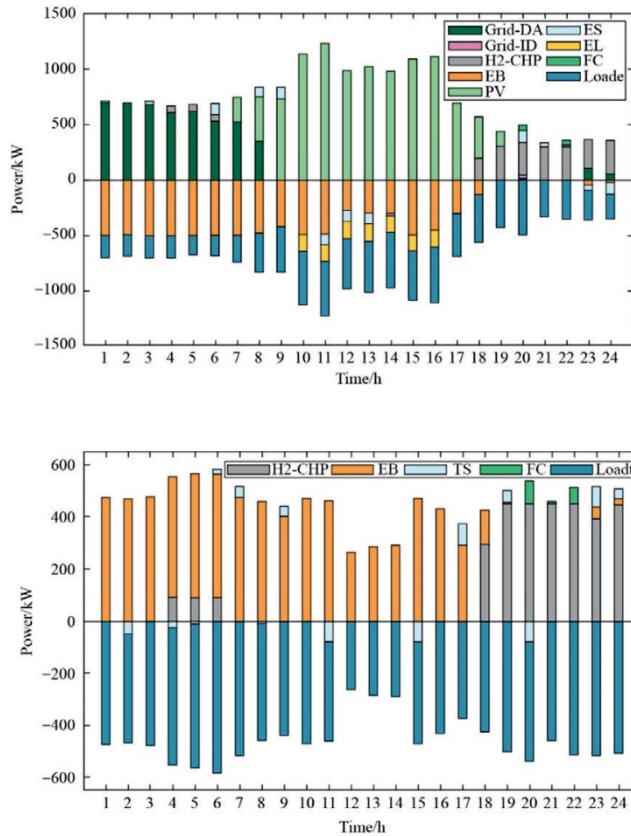


Рис. 7. Результаты энергоснабжения по проекту 1.

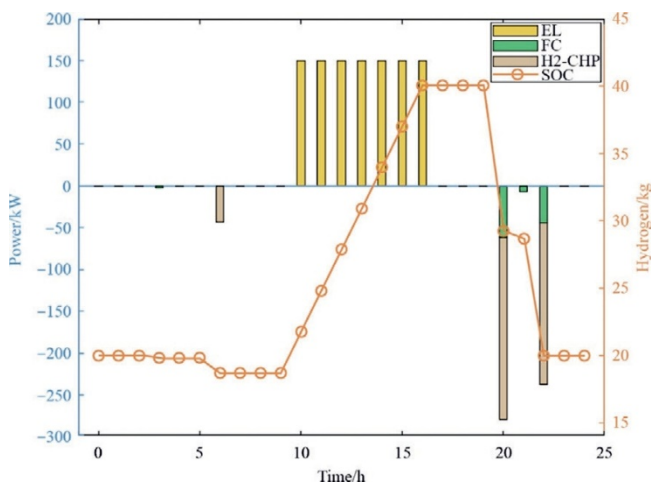


Рис. 8. Условия эксплуатации водородной энергетики.

В целом, интеграция водородных технологий, возобновляемой энергии и систем хранения энергии значительно снижает эксплуатационные расходы HIES и сокращает выбросы углекислого газа.

4.3 Сравнение проектов

Затраты на планирование и углеродосодержащие выбросы по трем проектам подробно описаны в таблицах 1 и 2 соответственно. Результаты оптимизации подчеркивают преимущества использования водородной энергии через HESS и H2-CHP. Проект 1 намного экономичнее, снижая общие эксплуатационные расходы (C_{total}) на 3,56% по сравнению с проектом 2. Системы HESS и H2-CHP в проекте 1 эффективно используют избыточную выработку фотоэлектрической энергии, тем самым повышая коэффициент потребления возобновляемых источников энергии и избегая любых ограничений выработки фотоэлектрической энергии, как показано в проекте 1. В отличие от этого, проект 2 влечет за собой затраты на ограничение выработки фотоэлектрической энергии в размере 86 юаней, что указывает на меньшую эффективность использования энергии. Кроме того, за счет смешивания водорода с природным газом в установке H2-CHP проект 1 не только снижает потребление природного газа, но и существенно сокращает углеродосодержащие выбросы. В результате затраты на закупку газа и продажу квот на выбросы вредных газов в проекте 1 ниже, чем в проекте 2.

Интеграция HESS и H2-CHP в проекте 1 значительно повышает как экономическую эффективность эксплуатации, так и экологическую устойчивость. Этот проект эффективно увеличивает использование возобновляемой энергии и снижает зависимость от ископаемого топлива.

Сравнение проектов 2 и 3 подчеркивает положительное влияние механизма продаж квот на выбросы вредных газов. В частности, проект 1 обеспечивает сокращение углеродосодержащих выбросов на 26 кг в день по сравнению с проектом 3. Ступенчатый механизм продаж квот на выбросы вредных газов активно стимулирует сокращение использования оборудования с высоким уровнем выбросов углерода и способствует внедрению более чистых возобновляемых источников энергии, а также водородных технологий.

4.4 Результативность модели DRO

Для оценки результативности предложенного метода на основе DRO по сравнению с методами SP и RO в управлении неопределенностями, связанными с возобновляемыми источниками энергии и многоэнергетическими нагрузками при планировании работы HIES, был использован метод выборки Монте-Карло для создания 200 неопределенных вариантов моделирования. Результаты выполнения этих вариантов моделирования резюмированы в таблице 3.

Метод DRO продемонстрировал наименьшие средние общие затраты, сопоставимые с затратами метода SP, и при этом оказался экономически более выгодным, чем метод RO. Это преимущество обусловлено тем, что метод DRO избегает чрезмерно консервативных решений, используя набор неопределенностей, учитывающий распределение наихудшего варианта в разумных пределах. В отличие от этого, метод RO должен готовиться к наихудшим вариантам моделирования, не обладая такой гибкостью.

Таблица 1

Стоимость проектов 1-3.

Scheme	C_{total}	C_{grid}	C_{gas}	C_{DR}	C_{pvcur}	C_{CO2}
Scheme 1	7,439	2,175	3,114	125	0	981
Scheme 2	7,714	2,138	3,294	179	86	1,007
Scheme 3	7,494	2,008	3,133	118	0	990

Таблица 2

Углеродосодержащие выбросы в проектах 1-3.

Scheme	Carbon emissions (kg)
Scheme 1	4,273
Scheme 2	4,357
Scheme 3	4,299

Таблица 3

Сравнение DRO, SP и RO.

Method	Average total cost (CNY)	Maximum total cost (CNY)
DRO	6,946	7,699
SP	6,951	7,743
RO	7,032	7,635

Максимальная общая стоимость, наблюдаемая при использовании метода DRO, ниже, чем при использовании метода SP, но немного выше, чем при использовании метода RO, что указывает на то, что метод DRO эффективно уравнивает экономическую эффективность со снижением риска. В то время как устойчивость метода SP ниже, что приводит к более высоким рискам в неблагоприятных вариантах моделирования, метод RO, несмотря на высокую устойчивость, часто снижает экономическую эффективность из-за своей консервативной природы.

Таким образом, метод DRO демонстрирует превосходные результаты в управлении неопределенностями, обеспечивая оптимальный компромисс между экономичностью и риском.

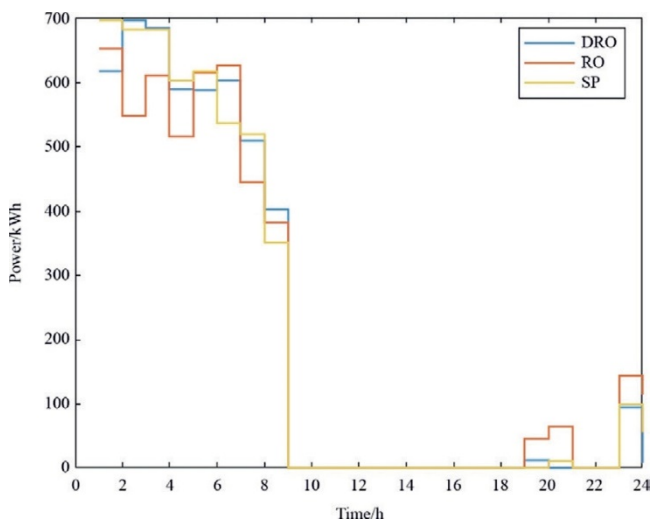


Рис. 9. Структура закупок электроэнергии на день вперед.

Для оценки влияния трех методов оптимизации (DRO, RO и SP) на схему планирования на день вперед был проанализирован объем закупок электроэнергии в периоды низких и высоких цен, как показано на рис. 9. В период низких цен с 0:00 до 9:00 все методы увеличили закупки электроэнергии для минимизации общих эксплуатационных расходов. Среди них метод SP обеспечил наибольший объем закупок электроэнергии, используя более низкие цены для снижения затрат. В отличие от него, метод RO привел к наименьшим закупкам электроэнергии, придерживаясь консервативного подхода к управлению колебаниями нагрузки. Метод DRO, хотя и закупал меньше электроэнергии, чем метод SP, обеспечил баланс между надежностью и экономической эффективностью, отражая свой умеренный подход. В период высоких цен на электроэнергию с 19:00 до 24:00 все методы значительно сократили закупки электроэнергии, чтобы избежать повышения затрат. Однако метод RO поддерживал относительно более высокий уровень закупок по сравнению с другими, стремясь управлять потенциальными наихудшими вариантами моделирования с высокой нагрузкой. Метод SP, с другой стороны, минимизировал закупки электроэнергии, эффективно снижая эксплуатационные расходы. Активность закупок при

использовании метода DRO занимала промежуточное положение между методами SP и RO, демонстрируя сбалансированный компромисс между надежностью и экономической эффективностью.

5 Заключение

В данной статье представлен метод планирования работы HIES на основе DRO, включающий управление спросом и механизм продажи квот на выбросы вредных газов. На основе анализа конкретных примеров были сделаны следующие выводы:

- (1) Интеграция HESS и H₂-CHP в HIES значительно улучшила процессы многоэнергетического сопряжения и преобразования. Эта комбинация улучшила использование более чистых возобновляемых источников энергии и водородной энергии, увеличив долю потребления фотоэлектрической энергии на 5,44% и снизив общие эксплуатационные расходы на 3,56%.
- (2) Внедрение механизма продаж квот на выбросы вредных газов ступенчатого типа наряду с программой DR способствовало переходу системы на более низкоуглеродный режим работы, что привело к сокращению выбросов углерода на 26 кг в день.
- (3) Метод планирования на основе DRO продемонстрировал превосходный баланс между операционной экономичностью и устойчивостью к неопределенностям в возобновляемых источниках энергии и колебаниям нагрузки по сравнению с методами SP и RO.

Водородная энергия, широко используемая в различных секторах, включая транспорт и промышленность, продемонстрировала значительный потенциал для разнообразных применений. В перспективных исследованиях будет изучена универсальность водорода в рамках HIES, с акцентом на такие разработки, как водородные заправочные станции и автомобили на водородных топливных элементах, для дальнейшего повышения эффективности и использования водородной энергии.

О вкладе авторов в проект CRediT

Чжичунь Ян: написание текста – первоначальный вариант, формальный анализ. **Линь Чэнь:** написание текста – обзор и редактирование, проверка. **Хуайдун Минь:** ресурсы, методология, научное исследование. **Ян Лэй:** написание текста – обзор и редактирование, методология. **Яньфэн Ян:** администрация проекта, научное исследование.

О конфликте интересов

Авторы заявляют о следующих финансовых интересах/личных отношениях, которые могут рассматриваться как потенциальный конфликт интересов: Чжичунь Ян, Хуайдун Минь и Ян Лэй в настоящее время работают в Научно-исследовательском институте электроэнергетики Государственной электросетевой компании провинции Хубэй.

Благодарности

Данная работа была поддержана Национальной ключевой программой исследований и разработок (2024YFE0115600).

Приложение А

Таблица А1

Расположение каналов.

Parameter	Value	Parameter	Value
P_{CHP}^{max}	300 kW	P_{ES}^{max}	400 kW
η_{CHP_e}	0.3	$S_{ES}^{min}/S_{ES}^{max}$	40/360 kWh
η_{CHP_h}	0.45	$\eta_{ES_ch}/\eta_{ES_ch}$	1/1
c_{on}	30 CNY	P_{TS}^{max}	200 kW
P_{EL}^{max}	150	$S_{TS}^{min}/S_{TS}^{max}$	1/1
P_{FC}^{max}	200	c_{CHP}	0.05 CNY/kW
η_{FC_h}	0.7	c_{EB}	0.04 CNY/kW
$S_{HT}^{min}/S_{HT}^{max}$	14/126 kg	c_{ES}	0.026 CNY/kW
C_{P2H}	0.0254 kg/kWh	c_{HESS}	0.05 CNY/kW
C_{H2P}	39.4 kWh/kg	c_{PV}	0.039 CNY/kW
η_{EL}	0.8	c_{TS}	0.013 CNY/kW
η_{FC}	0.3	c_{pvcur}	0.2 CNY/kW
P_{PV}^{max}	1800 kW	c_{TS}	0.013 CNY/kW
P_{Grid}^{max}	10000 kW		

Таблица A2

Параметры углеродосодержащих выбросов.

Parameter	Value
α_{Grid}	0.2 kg/kWh
α_{Nat}	0.385 kg/kWh
γ_{grid}	0.798 kg/kWh
γ_{Nat}	0.5647 kg/kWh

Список используемой литературы

- [1] Л. Ге, Дж. Ли, Ч. Ли и др., Обзор технологии оптимальной работы интегрированной энергетической системы для парков с нулевым выбросом углерода, *Power Syst.Technol.* 48 (5) (2024) 1821-1835.
- [2] Х. Цзя, Д. Ван, С. Сюй и др., Исследование некоторых ключевых проблем, связанных с интегрированными энергетическими системами, *Automat.Electric Power Syst.* 39 (7) (2015) 10.
- [3] Дж. Лин, З. Ю, С. Чжан и др., Режим работы в сети/вне сети и экономический анализ системы возобновляемой энергии для производства аммиака, *Proc.CSEE* 44 (1) (2024) 117-127.
- [4] С. Чжан, Д. Ван, Х. Чэн и др., Ключевые технологии и проблемы планирования интегрированной энергосистемы с низким уровнем выбросов углерода для достижения пика выбросов углерода и углеродной нейтральности, *Автоматизация электроэнергетических систем* 46 (8) (2022) 189-207.
- [5] Х. Фан, В. Ю, Л. Лю и др., Координированное распределение электроэнергии между несколькими зданиями в интеллектуальном парке для достижения пика выбросов углерода и углеродной нейтральности с учетом взаимодополняемости электроэнергии и водорода, *Автоматизация электроэнергетических систем* 46 (21) (2022) 42-51.
- [6] Дж. Чен, З. Ху, Ю. Чен и др., Термоэлектрическая оптимизация интегрированной энергетической системы с учетом механизма торговли углеродными квотами ступенчатого типа и производства электрического водорода, *Автоматизированное электроэнергетическое оборудование* 41 (9) (2021) 48-55.
- [7] Дж. Лю, Ч. Чжоу, Х. Гао и др., Модель оптимизации экономического распределения на сутки вперед интегрированной системы электро-природного газа с учетом системы хранения энергии водорода в микросети, *Power Syst.Technol.* 42 (1) (2018) 170-179.

- [8] X. Сунь, В. Дуань, Л. Чен и др., Низкоуглеродное экономическое планирование интегрированной водородной энергетической системы на основе оптимистичного глубокого обучения с подкреплением по принципу «актор-критик», *Power Syst.Technol.* 48 (5) (2024) 1873-1883.
- [9] К.Чжанг, К.Лиу, Дж.Чжонг, Интегрированное планирование энергетической системы с учетом ступенчатой системы вознаграждения и штрафов, продаж квот на выбросы вредных газов и неопределенности нагрузки электротеплового обмена, *Proc.CSEE* 40 (19)(2020) 6132-6142.
- [10] Н.Ян, Г.Ма, К.Ли и др., Метод низкоуглеродного экономического диспетчирования для интегрированной энергетической системы с учетом динамического баланса сезонного потока углерода, *IEEE Trans.Sustain.Energy* 14 (1) (2022)576-586.
- [11] Н. Ян, Г. Ма, С. Ли и др., Низкоуглеродное экономическое распределение интегрированной энергетической системы парка на основе механизма сезонной торговли углеродными квотами, *Proc.CSEE* 44 (3) (2024) 918-932.
- [12] Ю. Гао, Ц. Ван, Ю. Чен и др., Оптимальное распределение интегрированной энергетической системы с водородом с учетом реагирования на спрос и каскадного использования энергии, *Automat.Electric Power Syst.* 47 (4) (2023) 51-59.
- [13] Дж.Дэн, Ф.Цзян, В.Ван и др., Оптимизированная низкоуглеродная работа интегрированной энергетической системы с учетом гибкой нагрузки электро-тепла и уточненного моделирования водородной энергии, *Power Syst.Technol.*46 (5) (2022) 1692-1704, <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1373>.
- [14] Р.Ван, С.Чэн, Ю.Лю и др., Оптимальное планирование работы энергетического узла в игре «ведущий-ведомый» на основе интегрированного реагирования на спрос и механизма торговли углеродными квотами с системой вознаграждения и наказания, *Power Syst.Protect.Control* 50 (8) (2022) 75-85.
- [15] Г.Лиу, Д.Хан, С.Лиу и др., Оптимальное планирование интегрированной энергетической системы с учетом двойного реагирования на спрос и ступенчатых продаж квот на выбросы вредных газов в двух временных масштабах, *Автоматизированное электроэнергетическое оборудование* 43(5)(2023) 218-225.
- [16] З.Ли, Ю.Ксю, Оптимальная работа многоэнергетической микросети с временной координацией в условиях различных неопределенностей, *Appl.Energy* 240 (2019) 719-729.
- [17] Ю.Сао, Ю.Му, Х.Джиа, К.Ю, К.Хоу, Х.Ванг, Многоцелевой стохастический подход к оптимизации для планирования многоэнергетической микросети с учетом незапланированной работы в автономном режиме, *IEEE Trans.Sustain.Energy* 15 (2) (2024) 1300-1314.
- [18] К.Чжоу, С.Кай, Ю.Ли и др., Надежная модель оптимизации для управления реагированием на спрос с учетом взаимодействия источника-сети-нагрузки для потребления энергии ветра, *Global Energy Interconnect.*6 (6) (2023) 738-750.
- [19] Б. Чжан, Ю. Ся, С. Пэн, Надежная стратегия оптимального распределения интегрированной энергетической системы с учетом СНР-Р2G-CCS, *Global Energy Interconnect.*7 (1) (2024) 14-24.
- [20] Дж. Чжун, С. Ван, Ю. Ли и др., Оптимальная работа энергетического узла: интегрированная модель, сочетающая метод распределительно-надежной оптимизации с игрой Штакельберга, *IEEE Trans.Sustain.Energy* 14 (3) (2023) 1835-1848.
- [21] К. Чженг, М. Е. Ходаяр, Дж. Ванг и др., Распределительно устойчивое многоступенчатое распределение с дискретным рекурсом систем хранения энергии, *IEEE Trans.Power Syst.* 39 (6) (2024) 6960-6973.

[22] М. Янг, Ю. Жу, К. Ю и др., Распределенное устойчивое низкоуглеродное планирование интегрированных энергетических систем с учетом совместного сокращения выбросов углерода источником и нагрузкой в многовременных масштабах, *Electric Power Automat. Equipment* (2024), <https://doi.org/10.16081/j.epae.202411012>.

[23] С. Лиу и др., Оптимизированное планирование интегрированных энергетических систем для низкоуглеродной экономики с учетом транзакционных издержек на выбросы углерода, *Global Energy Interconnect.* 7 (4) (2024) 377-390.

[24] Л. де Сантоли, Г. Ло Бассо, Д. Бруски, Энергетическая характеристика ТЭЦ (комбинированного производства тепла и электроэнергии), работающей на смесях природного газа, обогащенного водородом, *Energy* 60 (2013) 13-22.

[25] Дж. Инь и др., Оптимальное планирование парка с нулевым выбросом углекислого газа с учетом вариационных характеристик систем хранения энергии водорода, *Global Energy Interconnect.* 7 (5) (2024) 603-615.

[26] С. Ву, С. Ци, С. Ли и др., Совместное устойчивое распределение электроэнергии и углерода на рынке продаж квот на углеродосодержащие выбросы, *Global Energy Interconnect.* 7 (4) (2024) 391-401.

[27] Ю. Му и др., Метод оценки риска на основе CVaR для интегрированной энергетической системы уровня парка с учетом неопределенностей и корреляции цен на энергию, *Energy* 247 (2022) 123549.

[28] С. Фанг и др., Стратегия управления энергией в нескольких временных масштабах для многоэнергетической микросети на основе водорода, *Appl. Energy* 328 (2022) 120195.

Получено 23 декабря 2024 г.; отредактировано 2 февраля 2025 г.; принято 9 февраля 2025 г.

*** Ответственный автор**

E-mail: yangzhichun3600@163.com (Ч.Ян), chenglin@mail.tsinghua.edu.cn (Л.Чэнь), minhuaidong@foxmail.com (Х.Минь), 304231569@qq.com (Я.Лэй), 785080763@qq.com (Я.Ян).

Эта статья переведена из журнала <Global Energy Interconnection> (ISSN: 2096-5117), выпуск 2, 2025 г. Оригинальное название статьи: <Distributionally robust optimization-based scheduling for a hydrogen-coupled integrated energy system considering carbon trading and demand response>. Перевод предоставляется исключительно для справки; преимущественную силу имеет оригинал: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2025.02.002>

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/>).



Чжичунь Ян получил степень бакалавра, магистра и доктора философии в Уханьском университете в г. Ухане, Китай, в 2013 году. Он работает в Научно-исследовательском институте электроэнергетики Государственной электроэнергетической компании провинции Хубэй в г. Ухане, Китай. Его научные интересы включают в себя защиту активных распределительных сетей, групповое управление распределенными источниками энергии, скоординированное взаимодействие и активную поддержку микросетей, а также характеристики и сетевые технологии интеллектуальных распределительных сетей.



Линь Чэнь получил степень бакалавра и магистра электротехники в Тяньцзиньском университете (Тяньцзинь, Китай) в 1996 году, а также степень доктора философии в Университете Цинхуа (Пекин, Китай) в 2001 году. В настоящее время он является штатным профессором кафедры электротехники Университета Цинхуа. Его научные интересы включают в себя оценку эксплуатационной надежности и применение энергосистем, оптимизацию работы распределительных систем с учетом гибких ресурсов нагрузки, а также восприятие и контроль неопределенности в широкомасштабных измерительных системах.



Хуайдун Минь получил степень магистра в Хуачжунском университете науки и технологий в г. Ухане, Китай, в 2021 году. Он работает в Научно-исследовательском институте электроэнергетики Государственной электроэнергетической компании провинции Хубэй. Его научные интересы включают в себя распределенные источники энергии, микросети, автоматизацию распределительных сетей и характеристики активных распределительных сетей.



Ян Лэй получил степень магистра в Уханьском университете в г. Ухане, Китай, в 2013 году. Он работает в Научно-исследовательском институте электроэнергетики Государственной электроэнергетической компании провинции Хубэй в г. Ухане, Китай. Его научные интересы включают автоматизацию распределительных сетей, Интернет вещей в распределительных сетях, релейную защиту и работы, связанные с автоматизацией.



Янфэн Ян получила степень бакалавра в Южно-Китайском педагогическом университете в Гуанчжоу, Китай, в 2009 году и степень магистра в Университете Тэгу в г. Тэгу, Южная Корея, в 2012 году. Она работает в Усиском научно-исследовательском институте прикладных технологий при Университете Цинхуа. Ее научные интересы включают комплексное управление энергией, эксплуатацию и оптимизацию энергосистем, а также гибкие технологии межсоединений для распределительных сетей.

(Редактор Ю Чжан)