

Двухэтапный метод оптимизации распределения мощности для комплексных энергетических систем на уровне потребителей с учетом их удовлетворенности и тепловой инерции

Шунью Ли^{a,b}, Цзин Чжанг^{a,*}, Ю Хе^a, Ган Лв^c, Ин Лиу^d, Сянси Ху^a, Чжиян Ванг^a, Сюань Ао^a

^a *Электротехнический факультет университета Гуйчжоу, город Гуйян, провинция Гуйчжоу 550025, Китай.*

^b *Бюро электроснабжения Гуйян Джиньян, «Гуйчжоуская электросетевая компания», город Гуйян, провинция Гуйчжоу, 550081, Китай.*

^c *Гуйянский филиал компании по передаче электроэнергии сверхвысокого напряжения, город Гуйян, провинция Гуйчжоу, 550081, Китай.*

^d *Научно-исследовательский центр планирования электросетей, «Гуйчжоуская электросетевая компания», город Гуйян, провинция Гуйчжоу 550002, Китай.*

Аннотация. Комплексные энергетические системы (IES) играют ключевую роль в развитии использования возобновляемых источников энергии и решении экологических проблем. Основные элементы IES включают в себя низкоуглеродное энергоснабжение, экономичное распределение нагрузки и управление спросом, что позволяет максимизировать потребление возобновляемой энергии и поддерживать устойчивые энергетические системы. Участие потребителей является важнейшим фактором в управлении спросом; однако многие потребители не склонны к активному участию, поэтому полный потенциал управления спросом остается нереализованным. При оценке управления спросом необходимо отдавать приоритет удовлетворенности потребителей. В данном исследовании предложен двухэтапный метод оптимизации конфигурации мощности для энергетических систем на уровне потребителей с учетом их удовлетворенности и тепловой инерции. Этот метод решает вопросы координации нагрузки и взаимодополняемости в рамках энергетической системы и направлен на минимизацию общих годовых затрат на определение конфигураций мощности оборудования при одновременном внедрении моделей тепловой инерции системы и удовлетворенности потребителей. Регулировка отопления помещений осуществляется для оптимизации выходной мощности устройств и профилей нагрузки с акцентом на типичные суточные экономические и экологические цели. Результаты исследования показывают, что учет тепловой инерции системы оптимизирует планирование работы энергетической системы с учетом удовлетворенности потребителей. Эта оптимизация снижает экологические проблемы и способствует интеграции чистой энергии.

Ключевые слова: Комплексная энергетическая система; Реагирование на спрос; Удовлетворенность потребителей; Тепловая инерция; Двухэтапный метод оптимизации мощности; Интеграция чистой энергии

0 Введение

Энергетический сектор имеет жизненно важное значение для современного общества, поскольку он обеспечивает энергией, необходимой для повседневной деятельности, промышленности и экономического развития. Однако продолжающаяся зависимость от ископаемого топлива привела к значительным экологическим проблемам. Исследования альтернативных, устойчивых источников энергии приобрели особую актуальность в связи с быстро растущими потребностями населения планеты в энергии. Широкое внедрение возобновляемых источников энергии породило ряд новых проблем. Сочетание традиционных энергосетей с непостоянными возобновляемыми источниками энергии приводит к потерям энергии и нестабильности энергосистемы. Независимая работа различных энергетических второстепенных сетей затрудняет преобразование энергии и адаптацию к колебаниям возобновляемых источников энергии, что ограничивает крупномасштабную интеграцию возобновляемых ресурсов. Комплексные энергетические системы

(IES) [1,2] привлекли широкое внимание как решения с огромным потенциалом, обладающие такими преимуществами, как взаимодополняемость нескольких источников энергии и каскадное использование энергии [3]. IES служат основой для реализации энергетического интернета и повсеместного использования энергии в Интернете вещей, включая преобразование, распределение и координацию различных форм энергии, включая отопление, охлаждение, электричество и газ [4]. Энергетический интернет всесторонне использует передовые технологии силовой электроники и т. д., располагая энергосистемой в центре, и объединяет большое количество энергетических узлов, таких как новые энергетические сети, состоящие из распределенных накопителей энергии и различных типов нагрузок, чтобы реализовать «многоисточниковую взаимодополняемость» электроэнергии, газа, тепла и возобновляемой энергии. Внедрение интеллектуальных энергосистем может привести к повышению энергоэффективности и эффективному решению проблем, связанных с колебаниями в возобновляемых источниках энергии, тем самым повышая стабильность и устойчивость всей цепочки поставок энергии.

Для повышения эффективности энергоснабжения и удовлетворения разнообразных энергетических потребностей IES классифицируются на межрегиональные, региональные и потребительские уровни в зависимости от географического положения и характеристик энергопотребления [5]. Наименьшими пространственными единицами IES являются IES потребительского уровня (UIES), являющиеся основными элементами региональных и межрегиональных IES; они облегчают обмен энергией и напрямую удовлетворяют конкретные энергетические потребности конечных потребителей [6]. Благодаря усовершенствованию соответствующих операционных механизмов и технологий, энергосистемы на уровне потребителей смогут достичь энергетической самодостаточности и станут ключевым элементом развития энергосистем; крупные коммерческие здания, школы и больницы (т.е. здания или комплексы зданий определенного масштаба) будут функционировать как самостоятельные единицы. Следовательно, повышение эффективности интеграции энергии на уровне потребителей, содействие интеграции возобновляемых источников энергии и баланс развития между экономическими и экологическими целями являются текущими важнейшими задачами.

В настоящее время исследователи по всему миру сосредоточены на повышении энергоэффективности систем и эффективности затрат на эксплуатацию. Многие ученые изучают механизмы интеграции возобновляемых источников энергии и операционную экономику, прежде всего с точки зрения спроса. Изучая механизмы реагирования на спрос и уделяя особое внимание тесному взаимодействию с конечными потребителями, они стремятся к более интеллектуальному и гибкому планированию энергопотребления. В работе [7] использовались треугольные функции принадлежности для выражения неопределенности на различных гибких уровнях реагирования на нагрузку, а также изучалась взаимосвязь между уровнями стимулирования и колебаниями в реакции спроса потребителей. Это значительно повышает гибкость системы и экономическую целесообразность. В работе [8] представлен новый механизм интегрированного розничного объединения энергоресурсов для управления реагированием на спрос. Эффективность этого механизма была подтверждена путем построения двухслойной модели оптимизации и разработки пакетов с различными требованиями к реагированию и скидками для разных потребителей. В работе [9] предложен метод анализа потенциала реагирования на спрос со стороны потребителя с учетом взаимосвязей между различными источниками энергии. Цель состоит в оптимизации эксплуатационных расходов на энергию со стороны потребителя для получения существенных экономических выгод.

В цитируемой литературе основное внимание уделяется оптимизации систем посредством ценовых стратегий на энергетическом рынке со стороны реагирования на спрос. Этот подход направлен на стимулирование потребителей к активному участию в управлении спросом, тем

самым достигая равновесия спроса и предложения и эффективного распределения энергии. Однако, помимо стимулирования участия, крайне важно учитывать удовлетворенность потребителей. Ожидается, что такая удовлетворенность приведет к их активному вовлечению. Таким образом, исследователи пришли к консенсусу относительно их удовлетворенности. Неудовлетворенность потребителей учитывается как ограничение путем корректировки выходной мощности энергоустройства и рабочей нагрузки производственного оборудования для создания модели совместной оптимизации для IES [10]. В работе [11] использован комплексный подход, учитывающий удовлетворенность потребителей и интегрирующий субъективные и объективные веса. Цель состоит в минимизации эксплуатационных расходов энергетических систем, максимизации использования потенциала реагирования на спрос и одновременном определении оптимальной схемы планирования. В работе [12] представлена многоцелевая модель оптимизации для реагирования на спрос, основанного на стимулах, в IES. Эта модель учитывает удовлетворенность потребителей с разных точек зрения.

В литературе наблюдается значительная субъективность при оценке общей удовлетворенности потребителей с использованием математических моделей. При рассмотрении интересов и удовлетворенности потребителей в качестве целей оптимизации игнорируются внутренние системные связи. Следовательно, система с большей вероятностью будет отдавать приоритет удовлетворенности потребителей в ущерб энергоэффективности. Определение удовлетворенности потребителей на основе восприятия ими изменений внешней температуры, в сочетании со скоростью реакции системы на тепловые изменения и с учетом ограничений тепловой инерции системы, усиливает интеграцию системы и лучше решает проблемы колебаний передачи энергии, в конечном итоге снижая энергопотребление и затраты [13,14]. Кроме того, в современных исследованиях преимущественно используется одноэтапная оптимизация, и игнорируется применение двухэтапной оптимизации распределения мощностей [15]. Использование синергии между оптимизацией нижнего уровня, операционной оптимизацией, и оптимизацией верхнего уровня, распределением мощностей может улучшить показатели жизненного цикла IES.

В заключение, в данном исследовании предложен двухэтапный метод оптимизации распределения мощностей в комплексных энергетических системах. Этот метод учитывает как удовлетворенность потребителей, так и тепловую инерцию. Особый вклад данного исследования заключается в следующем:

(1) Была предложена двухэтапная оптимизационная модель конфигурации мощности. На первом этапе, посредством долгосрочного планирования, оптимизируются целевые показатели затрат на годовые инвестиции и строительство, эксплуатацию и техническое обслуживание, а также экологические затраты системы. На основе возможных решений, полученных на первом этапе, на втором этапе основное внимание уделяется деталям и тонкой настройке с целью оптимизации минимизации затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание системы. На первом этапе было определено наиболее экономически эффективное решение, а на втором этапе его экономическая эффективность была дополнительно оптимизирована для обеспечения эффективного использования ресурсов.

(2) Удовлетворенность потребителей тепловым режимом определялась на основе их восприятия изменений внешней температуры, потребители находились в центре внимания, их активное участие поощрялось, а стратегии и услуги были лучше скорректированы. В сочетании со скоростью реагирования системы, стабильностью к изменениям температуры и ограничением тепловой инерции системы было установлено, что высокая тепловая инерция снижает потери энергии. Благодаря сочетанию мощности теплового аккумулятора мы смогли снизить выработку некоторых блоков и дополнительно увеличить потребление возобновляемой энергии. На примере жилого здания мы определили оптимальный план работы системы в среднестатистические дни.

1 Моделирование UIES

Конкретная структура системы UIES показана на рис. 1. Система состоит из блока производства электроэнергии, блока хранения энергии и блока потребления энергии. Распределенная фотоэлектрическая (PV) система, система природного газа и блок хранения энергии обеспечивают энергетическую связь между электросетями, газовыми и тепловыми сетями.

1.1 Фотоэлектрические электростанции

В исследуемой здесь комплексной энергетической системе тепловая нагрузка в основном относится к потребностям в отоплении. Тепловая нагрузка от бытового водоснабжения не учитывалась; для обеспечения электропитания системы рассматривалось только фотоэлектрическое оборудование. Фотоэлектрическое устройство использует солнечную энергию для производства электроэнергии, и его выходная характеристика P_{PV} выражается как

$$P_{PV}(t) = A_{PV} \times \eta_{PV} \times I_t \quad (1)$$

где $P_{PV} t$ — количество электроэнергии, которое может произвести фотоэлектрическая панель в момент времени t ; A_{PV} — площадь фотоэлектрической панели в m^2 ; η_{PV} — КПД фотоэлектрической панели, а I — количество солнечной энергии, которое может быть использовано на единицу площади фотоэлектрической панели в момент времени t в kWh/m^2 .

Общая номинальная мощность фотоэлектрической электростанции $E_{PV,r}$ связана с общей установленной площадью A_{PV} следующим образом:

$$E_{PV,r} = A_{PV} \times s \quad (2)$$

где s — коэффициент преобразования между выходной мощностью и площадью на единицу площади фотоэлектрической панели при уровне солнечной радиации $1 kWh \cdot m^{-2}$. Приведенное выше уравнение можно преобразовать в:

$$P_{PV}(t) = E_{PV,r} \times \frac{\eta_{PV}}{s} \times I_t \quad (3)$$

Учитывая ограничения фактической площади на верхнем этаже жилых зданий, существует максимальный предел мощности для фотоэлектрического оборудования:

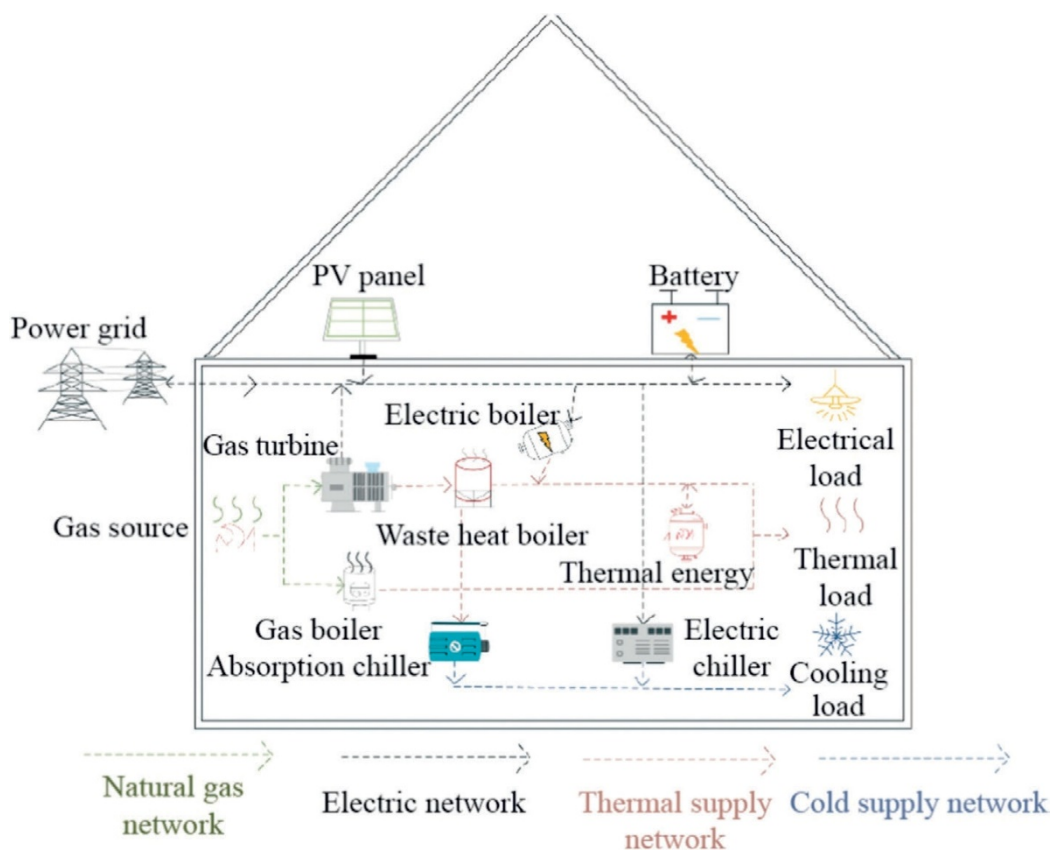


Рис. 1. Структура IES с возобновляемыми источниками энергии на уровне потребителя.

$$0 \leq E_{PV,r} \leq E_{PV,r,max} \quad (4)$$

где $E_{PV,r,max}$ — это суммарная мощность фотоэлектрического оборудования.

1.2 Тригенерация (комбинированное производство электрической, тепловой и холодильной энергии в зданиях)

(1) Модели газовых турбин и утилизации отработанного тепла

В газовых энергоблоках в качестве топлива обычно используется природный газ, который полностью сгорает, образуя высокотемпературный горячий газ, приводящий в движение ротор и вырабатывающий электроэнергию; это обеспечивает жителей их ежедневными потребностями в электроэнергии. Зависимость между P_{GT} и потребляемым объемом природного газа V_{GT} выглядит следующим образом:

$$P_{GT} = \eta_{GT} V_{GT} L \quad (5)$$

где η_{GT} — КПД газовой турбины, а L обозначает низкую теплотворную способность природного газа, которая составляет $9,73 \text{ км} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^3$. В данной статье коэффициент выбросов CO_2 газовой турбины принимается равным $0,52$.

Котел-утилизатор служил связующим звеном между газовой турбиной и абсорбционным водоохладителем. Он производил высокотемпературный пар, используя энергию высокотемпературного отработанного дыма, выходящего из газовой турбины после производства электроэнергии, и направлял его в абсорбционный водоохладитель. Тепловая мощность, поступающая в котел-утилизатор, выражается следующим образом:

$$H_{WNB}^{in} = \frac{P_{GT}(1 - \eta_1 - \eta_{GT})}{\eta_{GT}} \quad (6)$$

где η_1 — коэффициент теплотерь.

Тепловая мощность котла-утилизатора составляет:

$$H_{\text{WHB}}^{\text{out}} = H_{\text{WHB}}^{\text{in}} U_{\text{oph}} \eta_h \quad (7)$$

где U_{oph} — коэффициент теплопередачи, а η_h — коэффициент использования отработанных газов.

(2) Газовый котел

В энергетических системах на уровне потребителя используются стандартные газовые и электрические котлы; они имеют низкие инвестиционные затраты, отличаются гибкостью в эксплуатации, простотой в обслуживании и могут преобразовывать различные источники энергии. Электрические котлы экологичны, поскольку не выделяют вредных газов. Их производительность зависит от их характеристик и условий нагрузки.

$$H_{\text{GB}} = \eta_{\text{GB}} V_{\text{GB}} \quad (8)$$

$$H_{\text{EB}} = \eta_{\text{EB}} P_{\text{EB}} \quad (9)$$

где $\eta_{\text{GB EB}}$ — КПД газового котла; V_{GB} — количество природного газа, подаваемого в газовый котел, в м^3 ; P_{EB} — потребляемая мощность электрического котла, кВт; $H_{\text{GB EB}}$ — тепловая мощность газового/электрического котла. В данной статье коэффициент выбросов CO_2 газовых котлов принимается равным 0,505.

(3) Абсорбционные водоохладители, электрические водоохладители

Абсорбционные и электрические водоохладители, как важные соединительные устройства для энергии охлаждения UIES, могут преобразовывать энергию различного качества, а их эквивалентные модели могут быть описаны формулой (10).

$$P_{\alpha, \text{out}} = \eta_{\alpha} P_{\alpha, \text{in}} \quad (10)$$

где $P_{\alpha \text{ in}}$ и $P_{\alpha \text{ out}}$ — соответственно входная и выходная мощности промежуточного преобразователя α .

1.3 Модель устройства хранения энергии

Устройства хранения энергии играют решающую роль в развитии комплексных энергосистем и обеспечении синергетической работы нескольких источников энергии. В данном исследовании мы рассматриваем устройство хранения энергии и устройство хранения тепла в качестве оборудования хранения энергии в рамках UIES. Такой выбор существенно повысил гибкость плана работы системы в пределах допустимого диапазона мощности. Общие выражения выглядят следующим образом:

$$S_{B,H}(t+1) = S_{B,H}(t)(1 - \varepsilon_{B,H}) + [\eta_{B,H}^{in} P_{B,H}^{in}(t) H_{B,H}^{in}(t) - \frac{1}{\eta_{B,H}^{out}} P_{B,H}^{out}(t) H_{B,H}^{out}(t)] \Delta t \quad (11)$$

$$S_{B,H}^{\min} \leq S_{B,H}(t) \leq S_{B,H}^{\max} \quad (12)$$

$$P_{B,H}^{\min} \leq P_{B,H}^{in}(t), P_{B,H}^{out}(t) \leq P_{B,H}^{\max} \quad (13)$$

$$H_{B,H}^{in}(t) + H_{B,H}^{out}(t) \in (0, 1) \quad (14)$$

where $S_{B,H}(t)$, $S_{B,H}(t+1)$ denote the capacity of the energy-storage device at times t and $t+1$, respectively. Maintained between the lower and upper limits $P_{B,H}^{in}(t)$, $P_{B,H}^{out}(t)$ are the charging and discharging power at the time, respectively. The upper and lower power limits are $P_{B,H}^{\max}$ and $P_{B,H}^{\min}$, respectively; $H_{B,H}^{in}(t)$ and $H_{B,H}^{out}(t)$ are both 0–1 variables indicating the state of charging and discharging energy, and only one condition exists at any given period.

Для обеспечения гибкости в планировании различных циклов емкость накопителя энергии оставалась постоянной как в начальный, так и в конечный моменты времени.

$$S(t_1) = S(t_n), t = t_1, t_2, \dots, t_n \quad (15)$$

где t_1 и t_n обозначают соответственно начальный и конечный моменты цикла планирования. n зависит от разрешения выбранной временной шкалы [16].

2 Характеристики системы отопления UIES

Системы отопления используют такие материалы, как горячая вода или пар, которые медленно распространяют тепло и, следовательно, обладают большой тепловой инерцией [17]; требуется время для передачи тепла от источника тепла к тепловой нагрузке в зданиях-потребителях. Процесс изменения температуры зависит от конструкции здания, температуры наружного воздуха и других факторов; в этом процессе присутствует гистерезис (неоднозначная зависимость). Этот эффект аккумуляции тепловой энергии зависит от тепловой инерции [18]. Поэтому строительные блоки с тепловой инерцией можно рассматривать как ресурсы с гибкостью планирования. Тепловая нагрузка обладает определенной степенью эластичности в пространстве и времени, и тепловая инерция может быть использована в совместной оптимизации электротеплового планирования.

Тепловую сеть можно рассматривать как особую форму устройства для хранения энергии, поскольку в процессе теплопередачи существует задержка по времени, и, как следствие, разница температур горячей воды на входе и выходе из трубопровода в течение этой задержки. Существующие системы теплоснабжения регулируют в основном качество, количество или и то, и другое, когда теплоносителем является горячая вода. Игнорируя небольшие изменения расхода в подающих и обратных трубопроводах из-за разницы температур воды и регулируя качество тепловой сети [19], температуры подающей и обратной воды в момент времени t равны $T_{g,t}$, $T_{h,t}$. Модель авторегрессионного и скользящего среднего (ARMA) временного ряда [20] описывает взаимосвязь между температурами внутри и снаружи зданий $T_{h,in,t}$, $T_{h,out,t}$ во время отопления следующим образом:

$$T_{h,t} = \sum_{j=1}^J \alpha_j T_{h,in,t-j} + \sum_{j=0}^J \beta_j T_{g,t-j} + \sum_{j=0}^J \gamma_j T_{h,out,t-j} \quad (16)$$

$$T_{h,in,t} = \theta_1 T_{h,in,t-1} + \varphi_1 T_{g,t-1} + \omega_1 T_{h,out,t-1} \quad (17)$$

где коэффициенты α_j , β_j , γ_j , θ_1 , ϕ_1 , и ω_1 являются физическими параметрами тепловой инерции системы отопления, которые могут быть получены путем идентификации параметров с использованием измеренных данных, а порядок отражает тепловую инерцию системы отопления. Приведенное выше уравнение описывает многовременную взаимосвязь между тепловой инерцией и температурой внутри отапливаемого здания.

В случае сбоя тепловой сети температура внутри помещения не сразу достигает температуры наружного воздуха. Потребители испытывают некоторую неуверенность в отношении окружающей среды. При интеграции с тепловым комфортом потребителя нагрузка на отопление/охлаждение переходит от фиксированного значения к адаптируемому. Эта регулировка повышает способность системы отопления/охлаждения к накоплению энергии [21].

Показатель ожидаемой средней оценки степени комфорта (PMV) описывает комфорт человека на основе таких факторов, как температура окружающей среды, относительная влажность, скорость потока воздуха, скорость метаболизма человека и одежда потребителя [22]. 7-балльная шкала тепловых ощущений Американского общества инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха представлена в таблице 1 ниже и варьируется от 3 до +3.

Таблица 1
Показатели комфортных условий для человека.

PMV index	Comfort level
-3	freezing
-2	cold
-1	cool
0	moderate
1	warmish
2	balmy
3	blistering

Существующие в Китае стандарты проектирования по отоплению, вентиляции и кондиционированию воздуха [23] устанавливают, что для общего, внутреннего, экологического, теплового комфорта стандартный показатель PMV находится в диапазоне от 1 до +1. Это удовлетворяет требованиям к тепловому комфорту пользователей внутри помещений зимой. ISO-7730 устанавливает, что показатель PMV от 0,5 до 0,5 является более подходящим, что соответствует температуре внутри помещений 24,7-26,5 °C. γ_{PMV} — это значение показателя PMV, а его математическое уравнение [24] выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \gamma_{PMV} = & (0.303e^{-0.036X} + 0.028)\{X - Y - 3.05 \times 10^{-3} \\ & \times [5733 - 6.99(X - Y) - P_a] - 0.42(X - Y - 58.15) \\ & - 1.7 \times 10^{-5}X \cdot (5867 - P_a) - 1.4 \times 10^{-3}X(34 - T_a) \\ & - 3.96 \times 10^{-8}S_{cl}[(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] \\ & - S_{cl}h_c(T_{cl} - T_a)\} \end{aligned} \quad (18)$$

где X и Y представляют собой скорость метаболизма энергии в организме и производимую механическую мощность соответственно, в Вт/м². P_a обозначает частичное давление водяного пара вокруг человеческого тела, в P_a. S_{cl} — отношение площади тела, покрытого одеждой, к площади открытой части тела, в м². h_c — коэффициент теплопередачи поверхности, в Вт/м²/К. T_a, T_{cl} и T_r представляют собой температуру воздуха вокруг человеческого тела, температуру поверхности внешней одежды и среднюю температуру излучения соответственно, в °C. В данном исследовании основное внимание уделялось теплоснабжению, а комфорт в помещении интуитивно

воспринимался через температуру; поэтому, за исключением температуры воздуха вокруг человеческого тела T_a , предполагается, что все остальные параметры имеют заданные значения.

3 Решения для стратегии распределения мощностей и планирования UIES

Оптимальный вариант моделирования распределения мощностей меняется по мере изменения операционной стратегии, и результаты двухуровневой модели влияют друг на друга. В данном исследовании использовался двухэтапный подход к оптимизации для планирования системы UIES. С точки зрения математического планирования была разработана модель смешанного целочисленного линейного программирования для поиска оптимального решения, процесс показан на рис. 2.

3.1 Модель распределения мощностей

3.1.1 Целевая функция

Для определения оптимальной конфигурации мощности различных компонентов системы и графиков работы на почасовой основе необходимо обеспечить оптимальную экономическую эффективность системы в процессе энергоснабжения. Модель направлена на минимизацию годовых эксплуатационных расходов IES, включающих инвестиции и строительство, эксплуатацию и техническое обслуживание, а также экологические издержки. Это можно математически выразить следующим образом:

$$\min_{\text{up}} F(x) = C_{y,b} + C_{y,r} + C_{y,env} \quad (19)$$

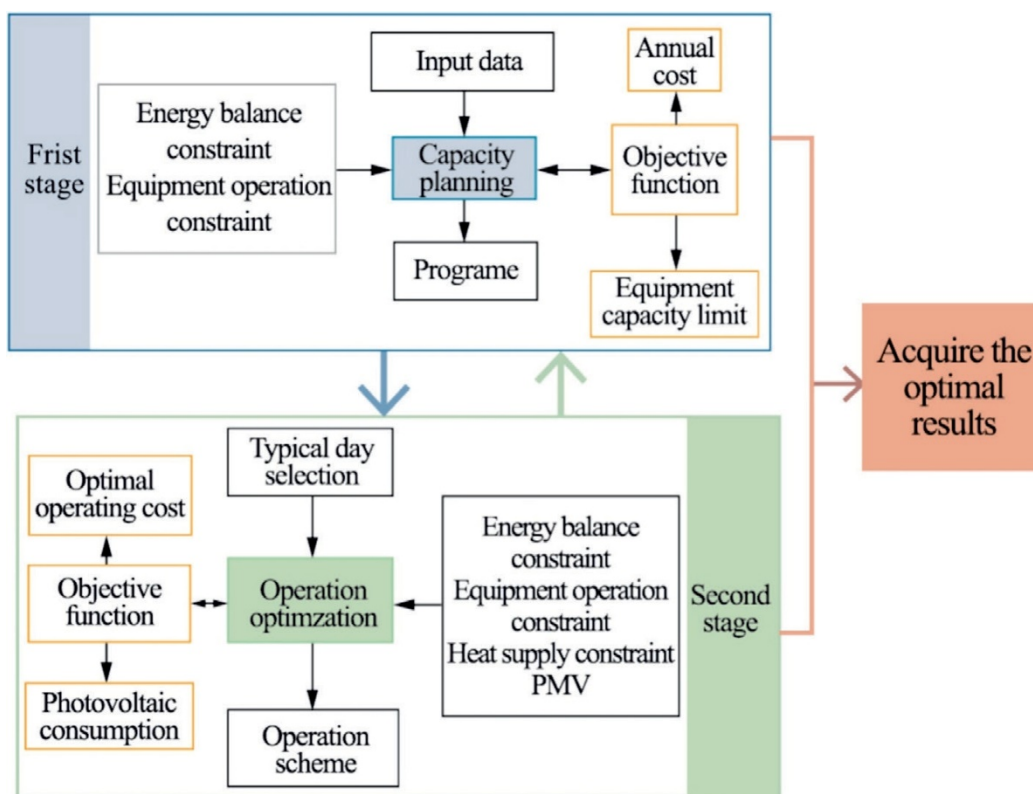


Рис. 2. Процесс оптимизации UIES.

где $C_{y,b}$, $C_{y,r}$ и $C_{y,env}$ соответственно обозначают ежегодные инвестиции, эксплуатацию и техническое обслуживание, а также экологические издержки.

(1) Ежегодные инвестиционные затраты

Инвестиционные и строительные затраты $C_{y,b}$ — это стоимость приобретения и установки оборудования. При оптимизации конфигурации мощности крайне важно учитывать различный срок службы энергетических устройств, таких как фотоэлектрические системы, системы хранения энергии на основе аккумуляторов и газовые турбины. Использование метода чистой приведенной стоимости для преобразования первоначальных инвестиционных затрат в эквивалентные годовые значения позволяет смягчить влияние различных жизненных циклов оборудования на инвестиционные решения. Математическое выражение выглядит следующим образом:

$$C_{y,b} = \sum_{i=1} C_{cap,i} \cdot U_i \cdot \frac{r(1+r)^k}{(1+r)^k - 1} \quad (20)$$

где i — серийный номер типа оборудования в системе; $C_{cap,i}$ — предельная вместимость каждого оборудования; U_i — стоимость приобретения единицы вместимости каждого оборудования; r — ставка дисконтирования для оборудования; и k — срок службы оборудования.

(2) Ежегодные эксплуатационные и технические расходы

Ежегодные эксплуатационные и технические расходы (обозначаемые как $C_{y,r}$), возникающие в результате износа оборудования, технического обслуживания и ручной проверки, зависят от таких факторов, как тип оборудования, производительность, частота использования и режим работы. Эти расходы рассчитываются по следующей формуле:

$$C_{y,r} = \lambda \sum_{i=1} C_{y,b,i} \quad (21)$$

где λ — годовые затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание оборудования системы в процентах от первоначальных инвестиционных затрат; в данном исследовании использовалось значение 0,85.

(3) Ежегодные природоохранные затраты

Природоохранные затраты были проиндексированы с помощью годовой стоимости углеродосодержащих выбросов $C_{y,env}$, которая была добавлена в многоцелевую оптимизационную модель в качестве целевой функции для минимизации. Формула выглядит следующим образом:

$$C_{y,env} = \theta_{CO_2} (P_{buy} \omega_{grid,CO_2} + G_{buy} \omega_{gas,CO_2} + \sum_i P_i \omega_{i,CO_2}) \quad (22)$$

где θ_{CO_2} — коэффициенты выбросов CO_2 на единицу стоимости. P_{buy} и G_{buy} — количество электроэнергии, полученной из сети, и количество газа, полученного из газовой сети, соответственно; P_i представляет мощность оборудования категории i (газовые турбины, газовые котлы). $\omega_{grid, gas, i, CO_2}$ — коэффициенты выбросов на единицу продукции, обусловленные полученной электроэнергией и газом, и удельная мощность, соответственно.

3.1.2 Ограничительное условие

Эксплуатационные ограничения в UIES включают энергетический баланс, работу оборудования и ограничения по хранению энергии, что обеспечивает как энергоснабжение, так и безопасность системы.

- (1) Системные ограничения по электрическому, тепловому, охлаждающему и воздушному балансу.

$$L_e(t) = P_{PV}(t) + P_{net}(t) + P_{dis}(t) + P_{GT}(t) - P_{EC}(t) - P_{cha}(t) - P_{EB}(t) \quad (23)$$

$$L_h(t) = H_{WHB}(t) + H_{GB}(t) + H_{dis}(t) - H_{AC}(t) - H_{cha}(t) + H_{EB}(t) \quad (24)$$

$$L_c(t) = C_{EC}(t) + C_{AC}(t) \quad (25)$$

$$G_{buy}(t) = V_{GT}(t) + V_{GB}(t) \quad (26)$$

где $L_e t$, $L_h t$ и $L_c t$ — соответственно, электрическая, тепловая и холодовая нагрузки на стороне потребителя в момент времени t . $P_{net} t$ — мощность, обмениваемая с более крупной сетью в момент времени t ; $P_{cha} t$ и $P_{dis} t$ — мощность зарядки и разрядки аккумулятора электроэнергии в момент времени t . $P_{EC} t$ и $P_{EB} t$ — входная мощность электрического холодильника и котла в момент времени t ; $H_{cha} t$ и $H_{dis} t$ — мощность зарядки и разрядки теплоаккумулятора в момент времени t соответственно.

(2) Ограничение мощности оборудования

$$\begin{cases} 0 \leq P_{GT}(t) \leq P_{GT_max} \\ 0 \leq H_{GB}(t) \leq H_{GB_max} \\ 0 \leq P_{EB}(t) \leq P_{EB_max} \\ 0 \leq H_{WHB}(t) \leq H_{WHB_max} \\ 0 \leq C_{EC}(t) \leq C_{EC_max} \\ 0 \leq C_{AC}(t) \leq C_{AC_max} \end{cases} \quad (27)$$

where P_{GT_max} , H_{GB_max} , P_{EB_max} , H_{WHB_max} , C_{EC_max} , C_{AC_max} are the upper output limits for gas turbines, gas boilers, electric boilers, waste-heat boilers, electric chillers, and absorption chillers, respectively.

(3) Ограничения, связанные с хранением энергии

Ограничения, касающиеся хранения электрической и тепловой энергии, аналогичны ограничениям, изложенным в разделе 2.3, и повторяются здесь из-за ограниченности места.

3.2 Выбор среднестатистического дня

Как основное место концентрации потребления энергии в городе, спрос на энергию в жилых зданиях включает электроэнергию, тепло и охлаждение, а характеристики нагрузки со стороны потребителей мало различаются в пространственном масштабе, но во времени очевидны. Эти временные изменения варьируются ежедневно и сезонно; и, вероятно, остаются почти одинаковыми в течение нескольких дней. При отсутствии неожиданных изменений погоды спрос на энергию увеличивается, но временные характеристики остаются приблизительно стабильными. Для такой нагрузки типичный вариант моделирования спроса на энергию со стороны жилых домов и потребителей может быть построен с использованием классификации [25].

Исходя из вышеизложенных соображений, в данном исследовании для анализа данных о спросе потребителей на электроэнергию, тепло и охлаждение использовался алгоритм классификации K-средних [26]. Этот алгоритм, являющийся методом разбиения, распределяет объекты по конечному числу групп, чтобы минимизировать расстояние между центрами групп и объектами [27]. Алгоритм классификации K-средних имеет широкое применение в классификации нагрузок, демонстрируя превосходную эффективность в вариантах моделирования с большими наборами данных по

сравнению с другими алгоритмами [28]. Из-за ограничений по объему данное исследование не углубляется в эту тему.

3.3 Оптимизированная модель планирования

3.3.1 Целевая функция

Рассмотрим эксплуатационные расходы системы (включая стоимость покупаемой и продаваемой электроэнергии C_{grid} , стоимость покупаемого газа C_{gas} и стоимость эксплуатации оборудования C_{om}) в среднестатистический день (весна, лето, осень и зима):

$$\min_{down} F(x) = C_{grid} + C_{gas} + C_{om} \quad (28)$$

$$C_{grid} = \sum_t (C_{grid, buy, t} \times P_{buy, t} - C_{grid, sell, t} \times P_{sell, t}) \quad (29)$$

$$C_{gas} = \sum_t (C_{gas, t} \times G_{buy, t}) \quad (30)$$

$$C_{om} = \sum_i (C_i \times P_i) \quad (31)$$

В этой формуле система использует механизмы ценообразования на электроэнергию и газ с разделением времени. $C_{grid, buy, sell, t}$ — тариф на электроэнергию, приобретаемую и продаваемую системой из внешней сети, $P_{buy, sell, t}$ — объем покупки/продажи электроэнергии системой в режиме реального времени за один день, $C_{gas, t}$ — стоимость газа, приобретаемого системой в режиме реального времени, $G_{buy, t}$ — объем закупки газа системой в режиме реального времени за один день, C_i — удельные эксплуатационные и технические затраты оборудования в i ; и P_i — потребляемая мощность оборудования в i .

(1) Ограничения системы отопления

Температура теплоносителя в подающем трубопроводе должна оставаться ниже верхнего температурного предела тепловой сети, чтобы предотвратить повреждение трубопровода от чрезмерного нагрева. В обратном трубопроводе теплоносителя температура теплоносителя должна быть выше нижнего температурного предела для обеспечения нормальной работы теплообменной станции. Важно отметить, что из-за теплотерь самая высокая температура во всей тепловой сети была обнаружена в подающем трубопроводе источника тепла, тогда как самая низкая температура находилась в обратном трубопроводе источника тепла. Следовательно, крайне важно обеспечить, чтобы температура теплоносителя в подающих и обратных трубах источника тепла соответствовала заданным ограничениям. Это гарантирует нормальную работу тепловой сети и предотвращает повреждение трубопроводов, вызванное температурой теплоносителя.

$$\begin{cases} T_{g,t} \leq T_g^{\max} \\ T_{h,t} \geq T_h^{\min} \end{cases} \quad (32)$$

\max_g — это максимальная температура воды, подаваемой в трубопровод тепловой сети;
 \min_h — это минимальная температура обратной воды в трубопроводе тепловой сети.

$$L_h(t) = \alpha(T_{g,t} - T_{h,t}) \quad (33)$$

$$-\beta \leq \gamma_{PMV,t} \leq \beta \quad (34)$$

где α — коэффициент связи между теплоснабжением котла и температурой подающей/возвратной воды тепловой сети (Вт/°C), величина которого зависит от расхода воды в тепловой сети, β — индикатор диапазона PMV, а $\gamma_{PMV t}$ — предел диапазона индикатора PMV за период t .

$$\begin{aligned} \gamma_{PMV} = & (0.303e^{-0.036X} + 0.028)\{X - Y - 3.05 \times 10^{-3} \\ & \times [5733 - 6.99(X - Y) - P_a] - 0.42(X - Y - 58.15) \\ & - 1.7 \times 10^{-5}X \cdot (5867 - P_a) - 1.4] \times 10^{-3}X(34 - T_a) \\ & - 3.96 \times 10^{-8}S_{cl}[(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] \\ & - S_{cl}h_c(T_{cl} - T_a)\} \end{aligned} \quad (35)$$

Остальные ограничения соответствовали изложенным в разделе 4.1.2, за исключением того, что верхний предел выпуска продукции для каждого типа оборудования был заранее установленным значением. Одновременно с этим, это переменная, которую необходимо оптимизировать на этапе распределения мощностей.

3.4 Метод решения

В процессе оптимизации различные типы оборудования определялись с использованием разных типов переменных. Например, для моделей фотоэлектрических систем использовались целочисленные переменные, для емкости батарей и тепловых аккумуляторов — непрерывные переменные, а бинарные переменные определяли логические взаимосвязи между режимами работы подсистем, такими как зарядка или разрядка батареи.

В данном исследовании рассматривался вопрос распределения оборудования, представляющий собой задачу частично-целочисленного линейного программирования с нулевым и единичным делением, сформулированную в стандартной форме:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min F(x) \\ \text{s.t. } h_i(x) = 0, i = 1, 2, \dots, m \\ g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, n \\ x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ x_k \in \{0, 1\} \end{array} \right. \quad (36)$$

где x — оптимизируемая переменная, $\min F x$ — целевая функция, $g_i x 0$ обозначает ограничения уравнения, $h_i x 0$ обозначает неравенство, а x_{\max} и x_{\min} обозначают верхний и нижний пределы переменной соответственно, и x_k указывает, что некоторые переменные являются бинарными переменными 0-1.

4 Пример анализа

4.1 Арифметические варианты моделирования и данные

В данном исследовании в качестве примера для расчетов был выбран жилой дом в южном регионе, где основные энергетические потребности включают в себя электроэнергию, отопление и охлаждение. Годовая интенсивность солнечного света в этом районе, как показано на рис. 3, иллюстрирует сезонные периоды в течение года: весна (с марта по май), лето (с июня по август), осень (с сентября по ноябрь) и зима (с декабря по февраль).

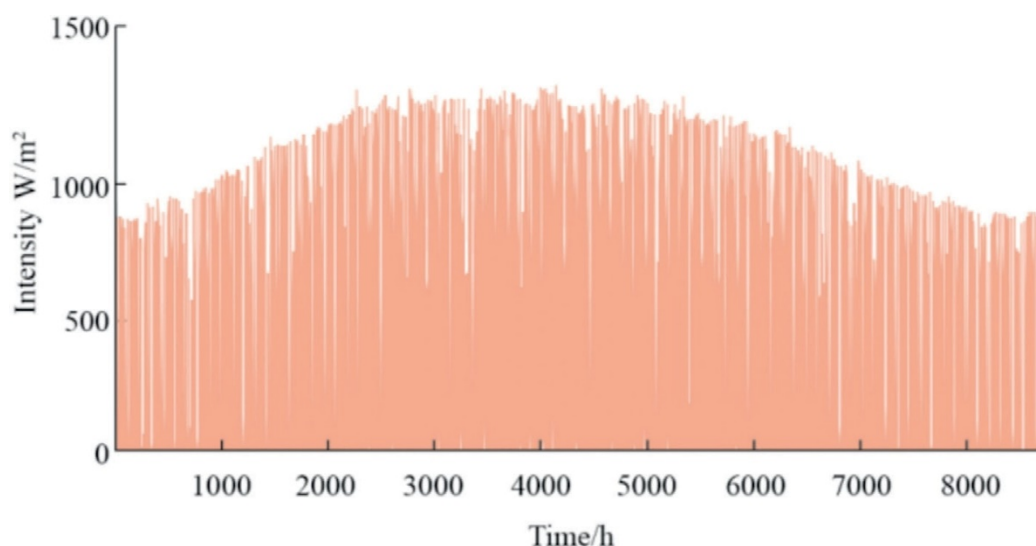


Рис. 3. Годовая интенсивность света.

Таблица 2

Параметры оборудования.

Equipment name	Year	Cost (¥)	Capacity (kW)
PV panel	15	2000	2000
Battery	10	1000	650
Gas turbine	15	1000	1650
Gas boiler	15	550	1200
Electric boiler	15	350	550
Waste-heat boiler	10	730	1500
Thermal-energy equipment	10	505	770
Absorption chiller	15	870	700
Electric chiller	10	670	650

Первый уровень позволяет получить конфигурацию мощности UIES и результат оптимизированного планирования работы системы на весь год путем планирования и решения задач, что позволяет удовлетворить различные типы энергетических потребностей системы и обеспечить экономию. Полученные комплексные затраты составили: годовые инвестиционные и строительные затраты — 1,208 млн юаней, годовые затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание — 1,0268 млн юаней, годовые затраты на экологию — 854 500 юаней, и общая стоимость — 3,0893 млн юаней. Ежегодные затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание, а также экологические издержки составляют значительную часть общей суммы; цена на энергию определяется различными типами эксплуатационных факторов, и это оказывает существенное влияние на оптимизацию и планирование. Например, цены на энергию влияют на предпочтения в отношении методов энергетического сопряжения. UIES, как правило, отдает приоритет выбору периодов с высокоэкономичными формами энергии. Одновременно с этим, изменяющиеся условия использования энергии влияют на выбор энергетического оборудования, что, в свою очередь, влияет на результаты распределения мощностей.

Параметры оборудования конфигурации мощности UIES представлены в таблице 2. Несмотря на высокую стоимость, планируемая мощность фотоэлектрической энергогенерирующей установки составляет 2000 кВт, что отражает акцент UIES на максимальном использовании возобновляемых источников энергии. Компонент хранения энергии, имеющий решающее значение для координации потребления возобновляемой энергии и повышения эффективности системы за счет сглаживания пиков и заполнения провалов, был хорошо спланирован. Однако из-за более высокой удельной стоимости и более короткого срока службы устройств хранения электроэнергии их планируемая мощность была ниже, чем у устройств теплового хранения.

После выполнения задач предварительной обработки, таких как выявление и исправление некорректных данных в нагрузке, нормализация данных и другие процедуры, для классификации был использован алгоритм K-средних, в результате чего были выявлены четыре различных среднестатистических варианта моделирования. В каждом сезоне среднестатистические суточные данные сохраняли исходные характеристики данных и были наиболее близки к общей тенденции изменения в выбранных сезонах. Для упрощения вычислений в качестве примера был использован среднестатистический зимний день. Кривые зависимости температуры наружного воздуха от температуры показаны на рис. 4. Кривые нагрузки электроэнергии, отопления и охлаждения для среднестатистических дней показаны на рис. 5, рис. 6 и рис. 7. Кривая выходной мощности фотоэлектрической системы показана на рис. 8, а таблица цен на электроэнергию в зависимости от времени использования приведена в таблице 3. Период оптимизации составлял 24 часа, а время оптимизации единицы измерения — 1 час.

4.2 Результаты оптимизации и анализ

В данном исследовании мы стремились сравнить и проанализировать влияние комфорта потребителя и тепловой инерции на оптимальную работу UIES для снижения энергопотребления и рассеивания тепла. Для сравнения были разработаны два варианта моделирования: (1) система не учитывала комфорт потребителя и тепловую инерцию, и (2) система учитывала комфорт потребителя и тепловую инерцию.

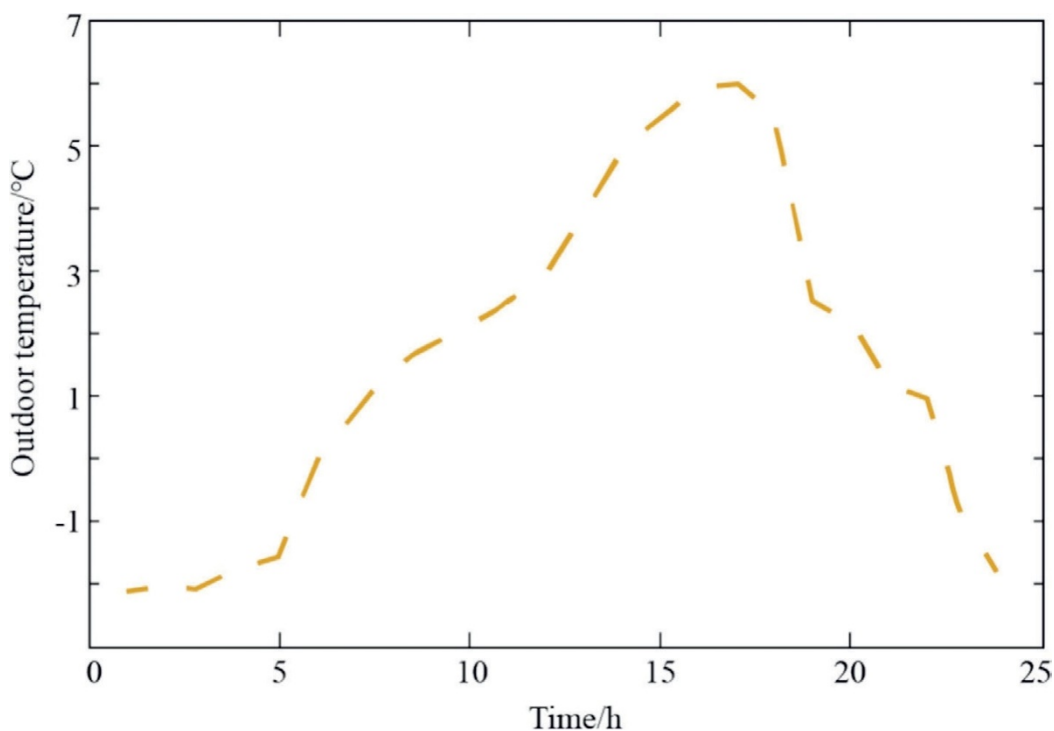


Рис. 4. Кривая показателей температуры наружного воздуха.

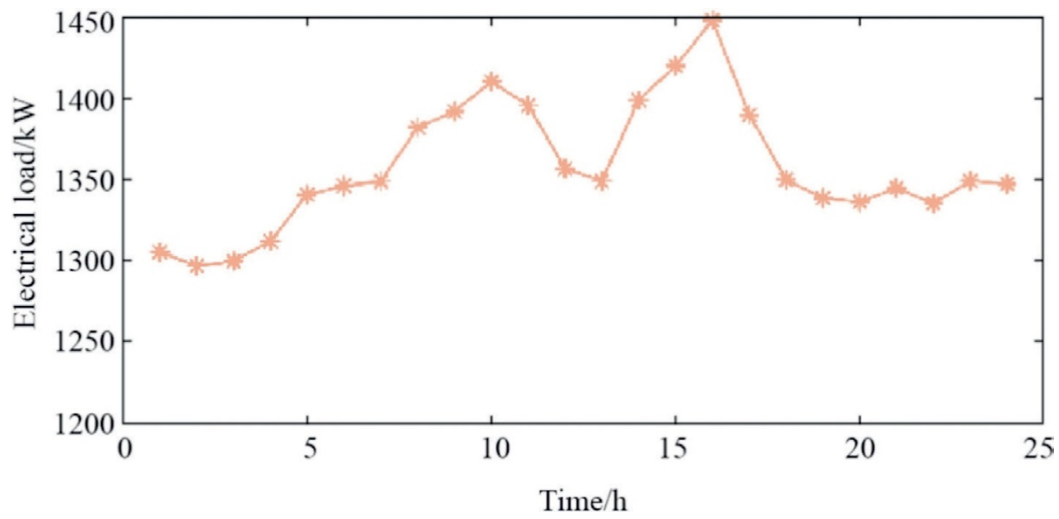


Рис. 5. Кривая показателей среднестатистической суточной нагрузки.

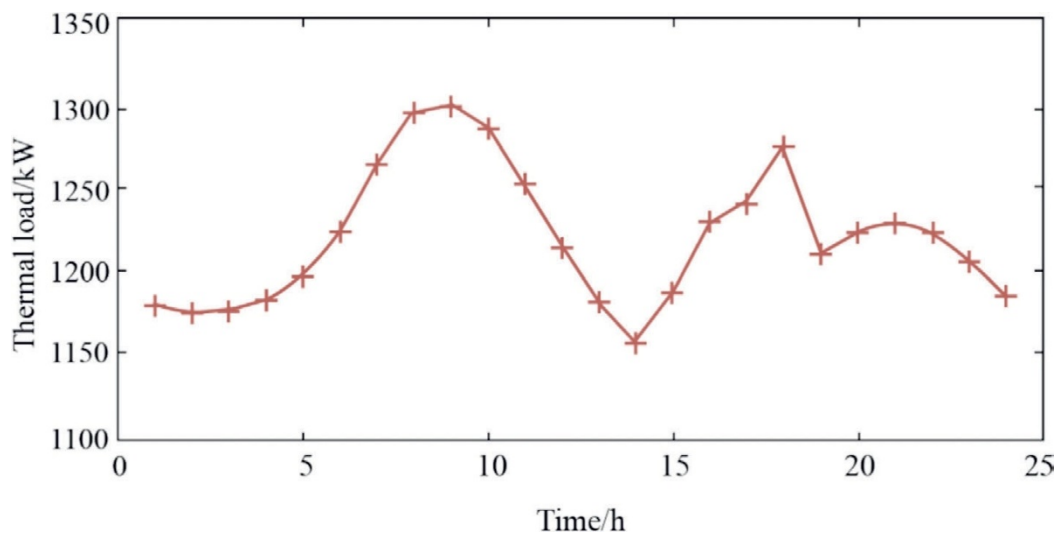


Рис. 6. Кривая показателей среднестатистической суточной тепловой нагрузки.

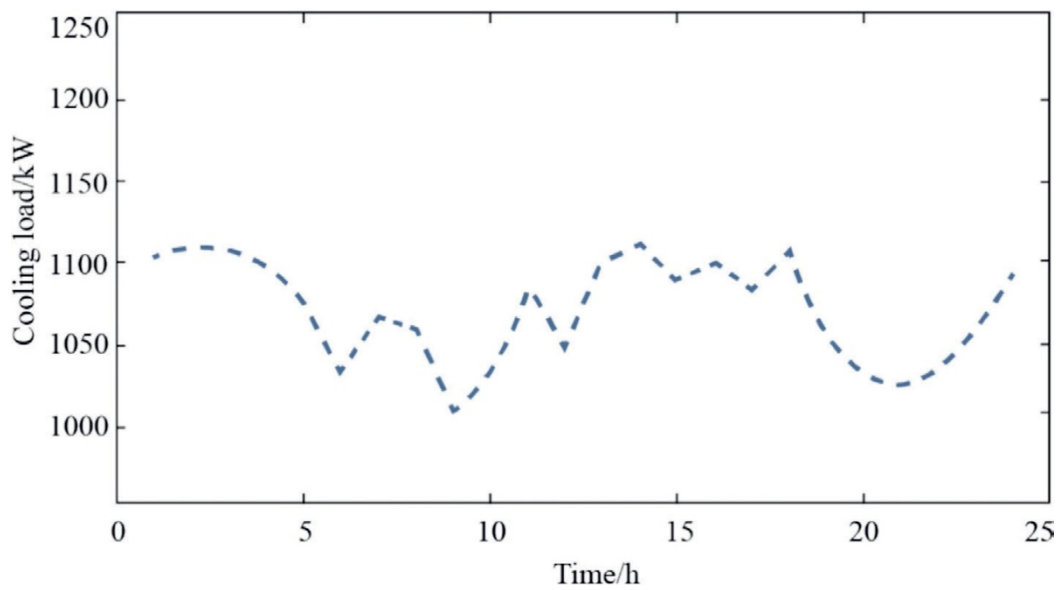


Рис. 7. Кривая показателей среднестатистической суточной нагрузки на систему охлаждения.

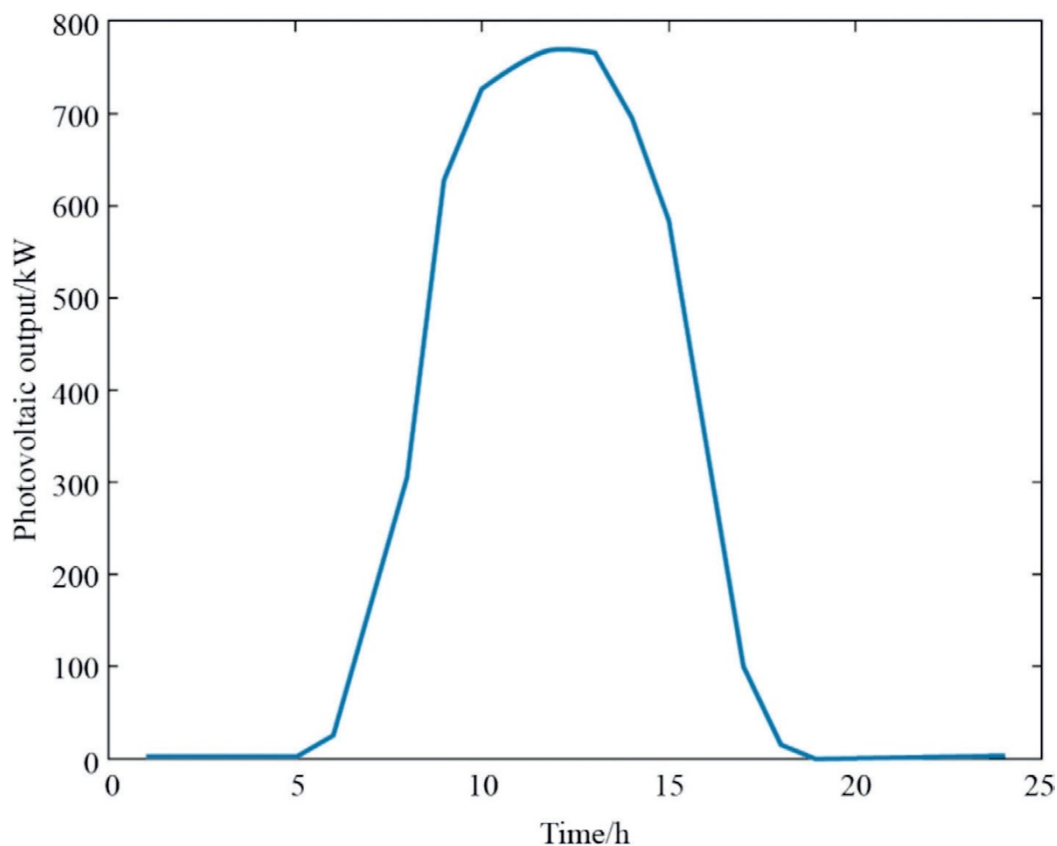


Рис. 8. Кривая прогнозируемой выходной мощности фотоэлектрической системы.

Таблица 3

Сравнение результатов оптимизации при различных вариантах моделирования.

Scene	Probability of abandoning light (The rate of unused light energy)(%)	Operating cost (¥)
1	15.88	8740.5217
2	7.98	7623.1746

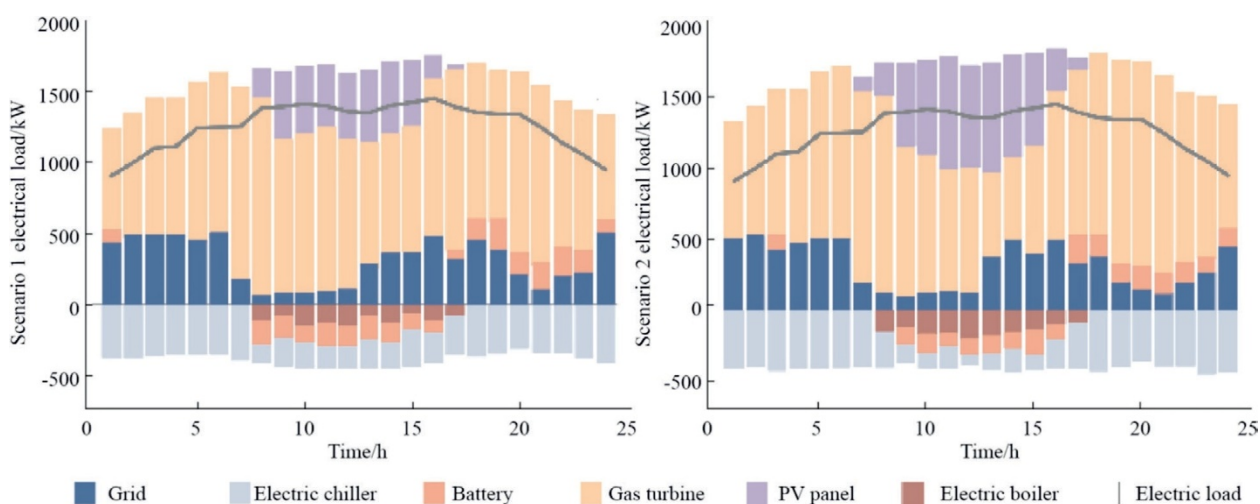


Рис. 9. Схема распределения электроэнергии.

На рис. 9 представлены результаты оптимизации для двух вариантов моделирования балансировки мощности. Электрический котел преобразовывал энергию фотоэлектрических панелей в тепло и аккумулировал ее в тепловом аккумуляторе. Ночью накопленная тепловая энергия высвобождалась из аккумулятора для снижения ССНР, электроэнергии и тепла. Примечательно, что в период с 8:00 до 17:00 наблюдалась высокая интенсивность света. В это время при варианте моделирования 1 — ССНР с ограничением «тепла для производства электроэнергии» — уровень

производства электроэнергии оставался высоким, что приводило к явлению «неиспользованного света». При варианте моделирования 1 существовали ограничения, связанные с соотношением тепловой и электрической мощности ССНР; производство электроэнергии оставалось на высоком уровне, а потребление солнечной энергии сократилось. Одновременно с этим, потребление фотоэлектрической энергии при варианте моделирования 2, составившее 472 кВт, превысило потребление при варианте моделирования 1. Это наблюдение позволяет предположить, что, учитывая тепловой комфорт потребителя и тепловую инерцию здания, можно корректировать тепловую нагрузку установки без ущерба для комфорта потребителя. Следовательно, можно уменьшить электрическую и тепловую связь системы. Диапазон регулирования мощности ССНР можно расширить для учета значительных колебаний нагрузки, а степень потребления фотоэлектрической энергии можно увеличить.

На рис. 10 показано, что количество неиспользуемого света значительно уменьшилось при сравнении результатов оптимизации теплового баланса при вариантах моделирования 1 и 2. С учетом комфорта потребителя и тепловой инерции здания, а также увеличения изменчивости тепловой нагрузки системы, потребность в тепловой нагрузке была снижена. Тепловая мощность ССНР была снижена, чтобы избавиться от ограничений «тепла для определения мощности» при регулировании электрической мощности. Газовый котел в основном обеспечивает отопление помещений, в то время как электрический котел преобразует накопленную электрическую энергию (в накопительном устройстве) в тепло. Это исключает дополнительные затраты и обеспечивает высокую экономическую эффективность за счет учета комфорта потребителя и тепловой инерции здания. Ночью электрический котел высвобождает накопленную тепловую энергию, тем самым снижая теплоотдачу ССНР и повышая эффективность использования фотоэлектрической энергии.

На рис. 11 показаны результаты двух вариантов моделирования оптимизации баланса низких температур. Принимая во внимание тепловую инерцию здания и комфорт потребителя, регулируется тепловая нагрузка, увеличивается потребляемая мощность фотоэлектрических систем и снижается теплоотдача ССНР. Электрическая охлаждающая установка используется преимущественно с 8:00 до 17:00. Электрическая энергия преобразуется в энергию низких температур. Это снижает затраты на охлаждение для потребителя и существенно повышает экономичность системы.

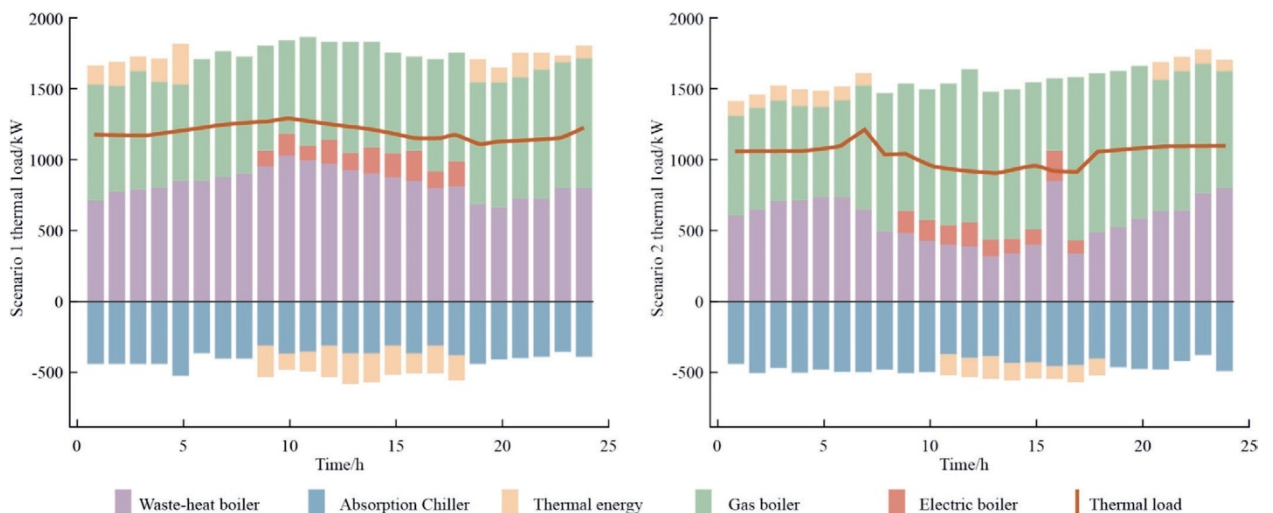


Рис. 10. Схема распределения тепла.

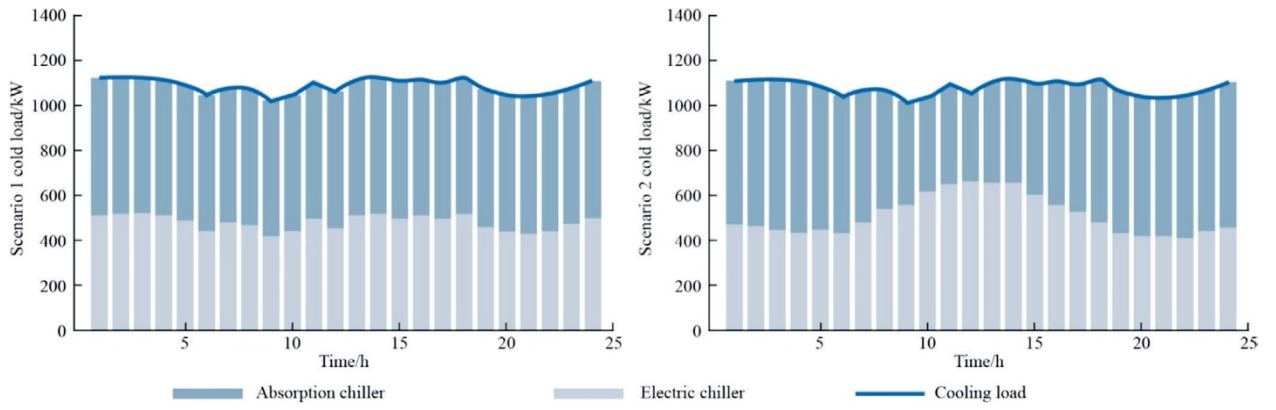


Рис. 11. Схема распределения низких температур.

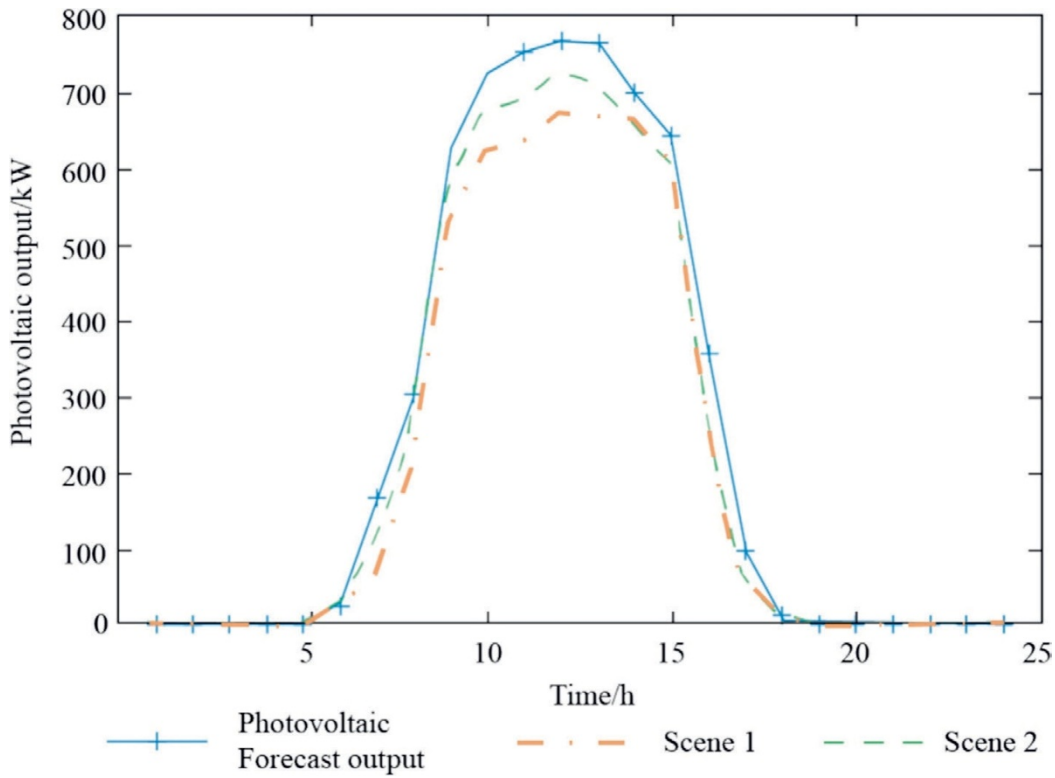


Рис. 12. Сравнение выходной мощности фотоэлектрических систем.

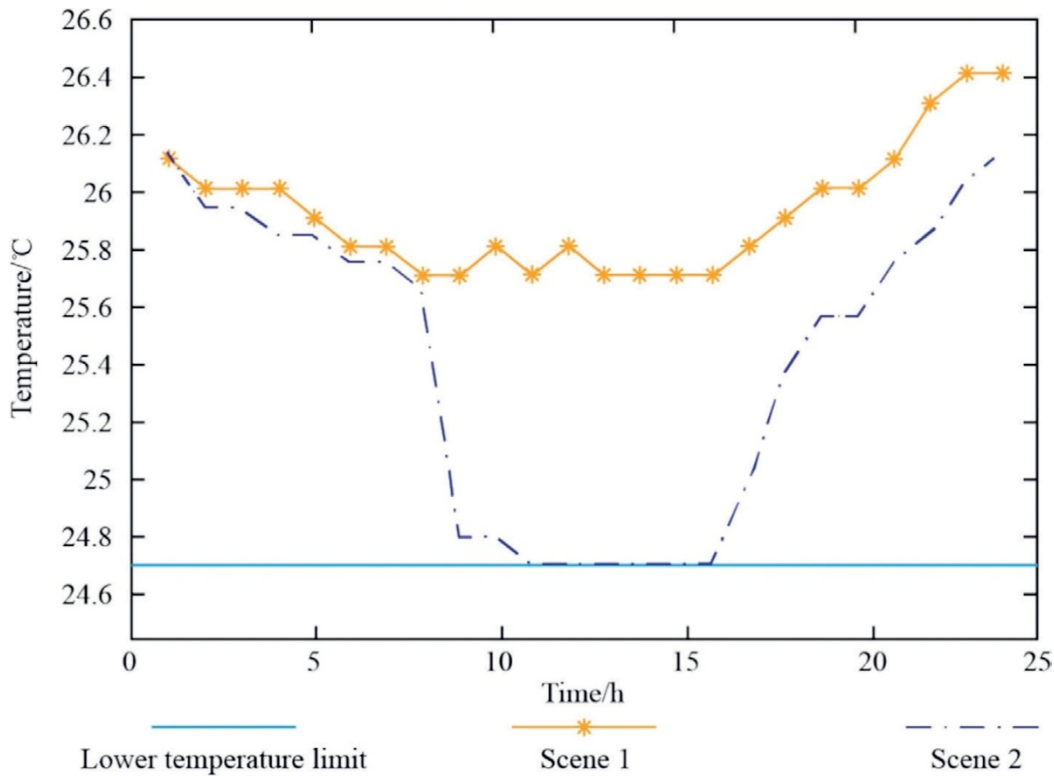


Рис. 13. Схема разницы температур в помещении.

На рис. 12 показано сравнение прогнозируемого производства фотоэлектрической энергии при двух вариантах моделирования. Видно, что потребление фотоэлектрической энергии при втором варианте моделирования выше, чем в первом. Ограничения, связанные с тепловым комфортом потребителя и тепловой инерцией системы, могут значительно снизить потребление солнечной энергии и повысить поглощение фотоэлектрической энергии. Учитывая тепловую инерцию со стороны потребителя, в пиковые периоды производства фотоэлектрической энергии отопление можно регулировать с помощью электрических котлов, используя тепловую инерцию для поддержания температуры в помещении в пределах комфортного для потребителя диапазона в течение определенного периода времени, что незаметно для потребителей. Такой подход позволяет снизить теплоотдачу установок в этот период и достичь цели поглощения ограниченной солнечной энергии.

На рис. 13 показаны изменения температуры в помещении при двух вариантах моделирования. Для алгоритма выбраны ограничения индекса PMV от 0,6 до 0,6, а соответствующие значения

температуры в помещении варьируются от 24,7 С до 27,4 С. При варианте моделирования 2 были учтены ограничения по комфорту потребителя и тепловой инерции здания. В дневное время, когда производство фотоэлектрической энергии увеличивалось, тепловая мощность установки снижалась для регулирования тепловой нагрузки, и температура внутри помещения уменьшалась. Однако она оставалась в пределах зоны теплового комфорта человека. Затем производство фотоэлектрической энергии преобразовывалось в тепловую энергию с помощью электродвигательного оборудования. Впоследствии преобразованная энергия аккумулировалась в устройстве хранения тепловой энергии. Ночью устройство хранения тепловой энергии высвобождало накопленную тепловую энергию. Этот процесс расширил возможности газовых турбин по регулированию их электрической мощности. Одновременно он повысил эффективность использования возобновляемой энергии и способствовал сокращению выбросов CO₂.

В таблице 3 представлено сравнение результатов оптимизации при различных вариантах моделирования. При варианте моделирования 1 процент брака был значительно выше, чем при варианте моделирования 2. Эксплуатационные расходы также были выше. Однако учет комфорта потребителя и тепловой инерции системы привел к заметному снижению процента брака, что, в свою очередь, снизило эксплуатационные расходы.

5 Заключение

В данном исследовании рассматривается проблема оптимизации конфигурации мощности в UIES и предлагается двухэтапный метод оптимизации-конфигурации мощности для таких систем. На первом этапе оптимальный план конфигурации мощности определяется с использованием данных о годовой нагрузке. На втором этапе учитываются среднестатистические суточные, экономические и экологические факторы эксплуатации, включая тепловую инерцию системы и удовлетворенность потребителей. Наконец, предложенная модель и методология проверены на примере UIES, демонстрируя их способность обеспечивать удовлетворенность потребителей, эффективно снижая выбросы CO₂ и способствуя интеграции возобновляемых источников энергии на месте.

О конфликте интересов

Авторы заявляют о следующих финансовых интересах/личных отношениях, которые могут рассматриваться как потенциальный конфликт интересов: в настоящее время Шунью Ли и Ин Лиу работают в «Гуйчжоуской электросетевой компании»; в настоящее время Ган Лв работает в Гуйянском филиале компании по передаче электроэнергии сверхвысокого напряжения.

Благодарности

Данная работа была поддержана научно-техническим фондом провинции Гуйчжоу [2022] 013, научно-техническим фондом провинции Гуйчжоу [2022] 014, научно-техническим фондом провинции Гуйчжоу GCS [2022] 016-1 и фондом образовательных технологий провинции Гуйчжоу [2022]043.

Приложение А

Таблица А1

Описание обозначений

Symbol	Description	Symbol	Description
$P_{PV}(t)$	PV-panel electric-energy generation at time t	$P_{B,H}^{\max}, P_{B,H}^{\min}$	Upper and lower limits of energy-storage capacity
A_{PV}	PV-panel area	$H_{B,H}^{\text{in}}(t), H_{B,H}^{\text{out}}(t)$	0–1 binary variables
η_{PV}	Conversion efficiency of PV panels	$T_{g,t}, T_{h,t}$	Supply- and return-water temperatures of the heating network during time t
I_t	Solar-energy utilization per unit area of PV panels at time t	$T_{\text{in},t}, T_{\text{out},t}$	Indoor and outdoor temperatures of buildings during heating
$E_{PV,r}$	Total rated power of PV equipment	$T_{c,\text{in},t}, T_{c,\text{out},t}$	Indoor and outdoor temperatures of buildings during cooling supply
s	Conversion coefficient between output power and area of PV panels	$Q_{L,t}$	Total cooling power during period t
$E_{PV,r,\max}$	Maximum capacity of PV equipment	V_{GB}	Gas-boiler input natural-gas volume
P_{GT}	Gas-turbine power generation	$P_{\alpha,\text{in}}, P_{\alpha,\text{out}}$	Input and output power of intermediate conversion equipment
V_{GT}	Gas-turbine input natural-gas volume	γ_{PMV}	PMV-indicator value
η_{GT}	Gas-turbine power-generation efficiency	$\alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \theta_1, \varphi_1, \omega_1$	ARMA-model parameters
L	The low heating value of natural gas	η_{α}	Conversion efficiency
H_{GT}^{in}	Input heat of the waste-heat boiler	$S_{B,H}(t)$	The capacity of energy-storage equipment at time t
η_1	Heat-dissipation coefficient	$S_{B,H}^{\max}, S_{B,H}^{\min}$	Upper and lower limits of energy-storage capacity
H_{GT}^{out}	Heating power of waste-heat boiler	$P_{B,H}^{\text{in}}(t), P_{B,H}^{\text{out}}(t)$	Charging and discharging power at time t
U_{oph}	Heating coefficient	Q_{GB}	Gas-boiler output
η_h	Flue-gas recovery rate	η_{GB}	The heating efficiency of gas boilers

Таблица А2
PMV параметры уравнения.

Symbol	Parameter value
$X/(W/m^2)$	75
$Y/(W/m^2)$	0
$P_a/(Pa)$	2500
S_{cl}	1.25
$h_c/(W/m^2 \cdot K)$	4.8
$T_{cl}/(^{\circ}C)$	28
$T_r(^{\circ}C)$	26.7

Таблица А3

Коэффициенты системы отопления по модели ARMA (J = 2).

j	α_j	β_j	γ_j	θ_j	φ_j	ω_j
0	—	0.2230	0.3256	—	—	—
1	0.5720	-0.0243	-0.3168	0.6991	0.1001	0.1998
2	0.0605	-0.0104	0.1741	—	—	—
0	—	0.2230	0.3256	—	—	—

Таблица А4.

Зависимость стоимости от периода времени.

Type	Time period	Price (¥/kWh)
peak	07:00–12:00, 19:00–22:00	1.21
flat	13:00–18:00	0.73
valley	23:00–06:00	0.45

Список используемой литературы

- [1] Э. Родригес-Диас, Дж. К. Васкес, Дж. М. Герреро, Интеллектуальные дома постоянного тока в будущих устойчивых энергетических системах: когда эффективность и интеллект работают вместе, *IEEE Consum. Electron. Mag.* 5 (1)(2016) 74-80.
- [2] А. Кельхас, Э. Гил, Дж. Д. МакКалли и др., Многопериодная обобщенная модель сетевого потока комплексной энергетической системы США: Часть I — Описание модели, *IEEE Trans. Power Syst.* 22(2)(2007)829-836.
- [3] Закон об энергетической независимости и безопасности 2007 года. Архитектурное освещение, 2016(6): 30.
- [4] Дж. Ву, Дж. Ю. Ян, Х. Дж. Цзя и др., Комплексные энергетические системы, *Appl. Energy* 167 (2016) 155-157.
- [5] Ч. З. Ли, Н. Л. Ван, З. Ван и др., Оптимальная структура планирования на основе энергетического узла для комплексных энергетических систем на уровне потребителя: учет синергетических эффектов в условиях множественной неопределенности, *Appl. Energy* 307 (2022) 118099.
- [6] Х.Ю.Чжу, Х.Х.Го, Д.Д.Чжанг и др., Ключевые технологии для интеллектуальных энергетических систем: последние разработки, проблемы и возможности исследований в контексте углеродной нейтральности, *J. Clean. Prod.* 331 (2022) 129809.
- [7] З.С.Ву, В.К.Цян, З.Ю.Джи, Метод транзакций реагирования на спрос для комплексных энергетических систем с тригонометрической моделью неопределенности поведения потребителей, *Sustainability* 14 (24) (2022) 16472.

- [8] Х.Дж. Гао, Ю.Б. Чжао, С.Дж. Хе и др., Управление реагированием на спрос в комплексной энергетической системе сообщества: перспектива многоэнергетического розничного пакета, *Appl.Energy* 330 (2023) 120278.
- [9] В. Чжао, Дж. Т. Ван, Д. М. Цзян, Потенциал реагирования на спрос комплексной энергетической системы со стороны потребителя, *IOP Conf.Ser.: Earth Environ.Sci* 632 (4) (2021) 042026.
- [10] К. Ма, Р. К. Чжан, Дж. Ян и др., Совместное оптимизационное планирование комплексной энергетической системы с учетом неудовлетворенности потребителей, *Energy* 274 (2023) 127311.
- [11] Р.Х.Лю, Т.Ян, Г.П.Сун и др., Оптимальное распределение комплексной энергетической системы сообщества с учетом комплексного метода удовлетворенности потребителей, *IEEE Trans.Electr.Electron.Eng.* 17(11)(2022) 1580-1589.
- [12] К.Лю, К.С.Гуо, В.Дзенг, Оптимизация планирования комплексной системы энергоснабжения в сообществе: двухслойная оптимизационная модель с учетом многоэнергетического реагирования и удовлетворенности потребителей, *Energy* 252 (2022) 124063.
- [13] Дж.Л. Чжан, С.Ф. Конг, Дж.Шен и др., Оптимальное планирование на сутки вперед автономной комплексной энергетической системы на основе солнечной, ветровой и газовой энергии с учетом и без учета тепловой инерции и комфорта потребителей, *J.Storage Mater.*57 (2023) 106187.
- [14] Дж.В.Ль, С.К.Чжанг, Х.З.Чень и др., Оптимальная работа на сутки вперед комплексной энергетической системы на уровне потребителя с учетом динамического поведения тепловых нагрузок и удовлетворенности потребителей теплом, *IET Smart Grid* 2 (3) (2019) 320-326.
- [15] С.Лей, Ю.Хе, Дж.Чжан и др., Оптимальная конфигурация емкости гибридного накопителя энергии в микросети на основе вариационного разложения по модам, *Энергии* 16 (11) (2023) 4307.
- [16] З.М.Ли, Ю.Ксю, Оптимальная работа многоэнергетической микросети с временной координацией в условиях различных неопределенностей, *Appl.Energy* 240 (2019) 719-729.
- [17] Л.Хао, М.С.Вей, Ф.Ксю и др., Исследование стратегий эксплуатации для интеграции систем централизованного охлаждения с использованием льда в распределение электроэнергии для крупномасштабного использования гидроэнергии, *Appl.Energy* 261 (2020) 114477.
- [18] А. Стащук, Т. Кучинский, Влияние теплоемкости пола на температуру воздуха и энергопотребление в зданиях умеренного климата, *Energy* 181 (2019) 908-915.
- [19] С. Яо и др., Динамический оптимальный поток энергии в комплексной энергетической системе тепло- и электроснабжения, *IEEE Trans.Sustain.Energy* 12 (1) (2021) 179-190.
- [20] Ф. Лин, Дж. И, Оптимальная работа ТЭЦ для отопления помещений как установки регулирования пиковой нагрузки, *Energy* 25 (3) (2000) 283-298.
- [21] З.Г.Ли, В.С.Ву, М. Шахидехпур и др., Распределение комбинированного производства тепла и электроэнергии с учетом трубопроводного хранения энергии в сети централизованного теплоснабжения, *IEEE Trans.Sustain.Energy* 7 (1) (2016) 12-22.
- [22] С. Чжан, В.П.Хе, Д.К.Чен и др., Анализ теплового комфорта на основе PMV/PPD в кабинах пилотируемых подводных аппаратов, *Build. Environ.*148 (2019) 668-676.
- [23] Iso (1994).

[24] К.Гонг, Ф.Ли, Б.Сан и др., Совместная оптимизация многоэнергетических комплементарных комбинированных систем охлаждения, отопления и электроснабжения с учетом планируемых нагрузок, *Energies* 13 (4) (2020) 918.

[25] М. Койвисто, П. Хайне, И. Меллин и др., Классификация точек подключения и моделирование нагрузки в распределительных системах, *IEEE Trans.Power Syst.* 28 (2) (2013) 1255-1265.

[26] Х. Хино, Х. Ю. Шен, Н. Мурата и др., Универсальный метод классификации для анализа структуры потребления электроэнергии в домохозяйствах, *IEEE Trans.Smart Grid* 4 (2) (2013) 1048-1057.

[27] К.Ю.Ли, Р.М.Яо, М.Лиу и др., Разработка эталонных городских жилых зданий с использованием кластерного анализа спутниковых изображений, *Energ.Buildings* 169 (2018) 417-429.

[28] М. Чарванд, М. Гитизаде, П. Сиано и др., Классификация моделей электрической нагрузки и временных периодов с использованием многоуровневого порогового значения амплитуды на основе неопределенности, *Int.J.Electr.Power Energy Syst.* 117 (2020) 105624.

Получено 22 ноября 2023 г.; отредактировано 1 января 2024 г.; принято 11 марта 2024 г.

Экспертная оценка проводится под руководством компании Global Energy Interconnection Group Co.Ltd.

* Ответственный автор

Адреса электронных почт: zhangjing@gzu.cn (Ц.Чжанг), yhe7@gzu.edu.cn (Ю.Хе), gs.xxhu21@gzu.edu.cn (С.Ху), gs.xao22@gzu.edu.cn (С.Ао).

Эта статья переведена из журнала <Global Energy Interconnection> (ISSN: 2096-5117), выпуск 2, 2025 г. Оригинальное название статьи:< Two-Stage capacity allocation optimization method for user-level integrated energy systems considering user satisfaction and thermal inertia>. Перевод предоставляется исключительно для справки; преимущественную силу имеет оригинал: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2024.03.001>

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/>).



Шунью Ли получила степень бакалавра инженерных наук в Сихуаском университете, Чэнду, провинция Сычуань, в 2020 году. В настоящее время она учится в магистратуре инженерных наук в Гуйчжоуском университете, Гуйян, провинция Гуйчжоу, в 2023 году. Ее научные интересы сосредоточены на оптимизации и планировании работы комплексных энергетических систем.



Цзин Чжанг получил степень доктора наук в Хуачжунском университете науки и технологий, Ухань, провинция Хубэй, Китай, в 2008 году. В настоящее время он является профессором в Школе электротехники Гуйчжоуского университета, Гуйян, провинция Гуйчжоу, Китай. Его текущие научные интересы включают оптимизацию энергопотребления и искусственный интеллект.



Ю Хе получила степени бакалавра и магистра в Гуйчжоуском университете, Гуйян, Китай. В настоящее время она является профессором в Гуйчжоуском университете.



В настоящее время **Ган Лв** работает в Гуйянском филиале компании по передаче электроэнергии сверхвысокого напряжения, город Гуйян, провинция Гуйчжоу, Китай.



В настоящее время **Ин Лиу** работает в Центре планирования и исследований «Гуйчжоуской электросетевой компании», город Гуйян, провинция Гуйчжоу, Китай.



Сянси Ху получила степень бакалавра инженерных наук в Гуйчжоуском университете, Гуйян, провинция Гуйчжоу, в 2019 году. В настоящее время она учится в магистратуре по инженерным специальностям в Гуйчжоуском университете, Гуйян, провинция Гуйчжоу, в 2023 году. Ее исследовательская работа посвящена применению искусственного интеллекта в релейной защите энергосистем.



Чжиян Ванг получил степень бакалавра инженерных наук в Гуандунском технологическом университете, Гуанчжоу, провинция Гуандун, в 2021 году. В настоящее время он учится в магистратуре по инженерным специальностям в Гуйчжоуском университете, Гуйян, провинция Гуйчжоу, в 2023 году. Направление его научных исследований— применение искусственного интеллекта в принятии решений в области энергосистем.



Сюань Ао получил степень бакалавра инженерных наук в Гуйчжоуском университете в 2022 году и в настоящее время учится в магистратуре. Направление его научных исследований — комплексное низкоуглеродное экономическое распределение энергоснабжения.

(Редактор Юй Чжан)