

Исследование моделей инвестирования и строительства, а также оценки стоимости систем совместного хранения энергии в рамках новой энергетической системы

Юаньин Чи, Цзихан Цзинь, Сюфэн Чжан*, Яньчжао Чжан, Юси У, Цзюньци Ван

Факультет экономики и менеджмента, Пекинский технологический университет, Пекин 100124, Китайская Народная Республика

Введение

Новые системы хранения энергии играют ключевую роль в развитии новой энергетической системы для ускорения энергетического перехода в Китае. В «14-м пятилетнем плане» развития новых систем хранения энергии предлагается расширить модели инвестиций и строительства, содействуя развертыванию объектов хранения энергии посредством самостоятельного строительства, аренды и покупки, а также поощряя развитие систем совместного использования систем хранения энергии. Однако нынешний дефицит моделей инвестиций и строительства систем совместного использования систем хранения энергии существенно ограничивает их развитие, особенно из-за нечетких механизмов распределения затрат и выгод, что также отпугивает потенциальных инвесторов. Для решения этой проблемы в данной статье предлагаются инвестиционные и строительные модели для систем совместного хранения энергии, соответствующие современному этапу развития систем хранения энергии. В частности, представлены три основные модели: (1) централизованная модель самостоятельного строительства системы совместного хранения энергии (CSSES), (2) модель совместного хранения энергии с участием третьих лиц (TISES) и (3) распределенная модель самостоятельного строительства системы совместного хранения энергии (DSSES). Для каждой модели проведен анализ затрат и выгод. Результаты показывают, что модель CSSES обеспечивает самую высокую внутреннюю норму доходности (11,5%) и самый короткий срок окупаемости, в то время как модель DSSES демонстрирует приемлемые показатели с внутренней нормой доходности 9,4%. Напротив, модель TISES показывает самую низкую внутреннюю норму доходности (6,7%) и требует более высокой цены на электроэнергию для своей осуществимости. Кроме того, в исследовании используется метод энтропийного взвешивания и аналитический иерархический процесс (AHP) для оценки показателей, а также интегрируется метод определения предпочтений по сходству с идеальным решением (TOPSIS) для оптимизации схемы. Результаты показывают, что как модель CSSES, так и модель DSSES достигают наивысших показателей близости. В условиях экологических норм эти модели демонстрируют превосходные экономические преимущества за счет оптимизации использования накопителей энергии, снижения затрат пользователей и повышения общей прибыльности.

Ключевые слова: Совместное использование систем хранения энергии; Модель инвестиций и строительства; Метод аналитической иерархии; Метод энтропийного взвешивания.

0 Введение

Традиционные энергосистемы все чаще сталкиваются со сложностями в выполнении требований гибкого распределённого управления, установленных в рамках «целей Китая по достижению пиковой углеродной нагрузки и углеродной нейтральности», и сталкиваются со значительными сложностями в учете изменчивости и неопределенности возобновляемых источников энергии [1-3]. Для решения этих проблем Китай в 2022 году опубликовал «14-й пятилетний план» развития новых систем хранения энергии, в котором отмечается: «Новые системы хранения энергии представляют собой критически важную технологию и базовое оборудование для развития энергосистемы нового типа и служат важнейшей опорой для выполнения целей по достижению пиковой углеродной нагрузки и углеродной нейтральности». План предусматривает изучение и продвижение модели совместного использования систем хранения энергии, поощряя новые электростанции к развертыванию накопительных сооружений за счет собственных инвестиций,

лизинга или покупки, чтобы преумножить комплексные преимущества совместного использования систем хранения энергии при различных вариантах моделирования.

Совместное использование накопителей энергии, которое оптимизирует управление энергией и обеспечивает снижение системных затрат за счет совместного использования ресурсов хранения, рассматривается как жизнеспособный путь для повышения интеграции возобновляемых источников энергии [4,5]. Его развитие не только способствует улучшению использования возобновляемых источников энергии и смягчению экологических последствий, но и оптимизирует распределение энергетических ресурсов в более широких географических масштабах [6]. Однако противоречивые цели заинтересованных сторон и неизбежная неопределенность спроса и предложения создают новые задачи управления и регулирования для крупномасштабного развертывания [7,8]. В рамках этой новой парадигмы снижение затрат на строительство и оптимизация распределения ресурсов имеют решающее значение для преодоления существующих заголовков [9].

Существующие исследования преимущественно сосредоточены на отдельных экономических показателях или отдельных заинтересованных сторонах, предлагая недостаточную поддержку для крупномасштабного внедрения; при этом высокие первоначальные инвестиции и эксплуатационные расходы остаются основным препятствием [10]. Для решения основных задач «многостороннего сотрудничества и достижения замкнутой модели инвестиций и строительства» в этой работе проводится дальнейшее исследование в следующих аспектах:

Во-первых, необходимо провести всестороннее количественное сравнение моделей централизованного, самостоятельно построенного и совместного хранения энергии (CSSES), стороннего инвестиционного подхода к совместному хранению энергии (TISES) и распределенного, самостоятельно построенного и совместного хранения энергии (DSSES) в рамках единой системы анализа затрат и выгод.

Во-вторых, интеграция методологий аналитической иерархии (AHP) на основе энтропийных весов и метода определения предпочтений по сходству с идеальным решением (TOPSIS) для получения устойчивых рейтингов для этих моделей (CSSES/TISES/DSSES).

В-третьих, проведение анализа чувствительности с акцентом на взаимодействие между «разницей цен на электроэнергию в пиковые и спадовые периоды» и «стоимостью хранения энергии», с учетом ценообразования на выбросы углеродосодержащих веществ и доходов от сертификатов возобновляемой энергии (REC), позволит определить пороговые значения внутренней нормы доходности (IRR) для всех моделей совместного использования накопителей энергии.

1. Обзор литературных данных

1.1 Концепция и потенциал совместного хранения энергии

Совместное хранение энергии, как гибкий ресурс, повышает устойчивость энергосистем за счет хранения избыточной энергии в оптимальные периоды, подачи электроэнергии во время высокого спроса или чрезвычайных ситуаций, обеспечения бесперебойного снабжения и снижения зависимости от сети [11]. Существующие исследования сходятся во мнении, что совместное хранение энергии создает взаимную выгоду: владельцы хранилищ могут преумножать прибыль, продавая свою емкость нескольким пользователям, в то время как пользователи без хранилищ все еще могут получить доступ к критически важным услугам по буферизации энергии. Недавние исследования подчеркивают, как эффективная координация между несколькими пользователями повышает операционную эффективность и снижает затраты для обеих сторон.

1.2. Модели инвестиций и строительства, а также операционные стратегии.

Что касается инвестиционных и строительных моделей, было предложено и оценено множество подходов при различных вариантах моделирования. У и др. [14] ввели механизм штрафов за конфигурацию системы хранения энергии и предложили схему совместной оптимизации нескольких режимов прибыли независимой системы хранения энергии для независимых производителей электроэнергии с самоконфигурируемой системой хранения энергии. Опираясь на реальные примеры внедрения в энергосистеме, Ху и др. [15] проанализировали политическую обстановку и реформы энергосистемы в Китае, изложив нормативные рекомендации, которые будут стимулировать здоровый рост крупномасштабных систем совместного хранения энергии. Дальнейшее расширение аналитической перспективы: Чжан и др. [16] представили многопериодную модель сети энергоснабжения, включающую SES, и изучили стратегию ее работы в конкурентной среде, включая планирование, тендеры и определение ключевых параметров хранения энергии. Аналогично, Чжоу и др. [17] предложили метод оценки выгод для собственных, арендованных и совместно используемых режимов хранения энергии на электростанциях, работающих на возобновляемых источниках энергии, который предоставляет количественную основу для рационального выбора режимов хранения энергии в проектах возобновляемой энергетики. В более поздних работах исследователи подчеркивали роль инновационных механизмов финансирования — например, контрактов о разделе доходов и кооперативных фондов — для снижения инвестиционных рисков, связанных с крупномасштабными проектами хранения энергии [18-20]. Аналогичным образом, исследования подчеркивали, что государственные стимулы, ясность политики и координация заинтересованных сторон остаются критически важными для обеспечения справедливого распределения выгод от совместного хранения энергии между различными участниками энергетического рынка.

1.3. Оценка экономической и экологической ценности

Оценка ценности совместного хранения энергии с точки зрения соотношения затрат и выгод остается центральной темой исследований. Режим экономики совместного использования может способствовать оптимальному распределению и использованию ресурсов, а его интеграция с системами хранения энергии и возобновляемыми источниками энергии может повысить коэффициент их использования и уменьшить отклонения в распределении. Для уменьшения отклонений в распределении возобновляемой энергии и повышения прибыли от совместного хранения энергии в данной статье предлагается режим коммерческой эксплуатации совместного хранения энергии, учитывающий удовлетворенность энергетическими транзакциями электростанций, работающих на возобновляемых источниках энергии [21]. Лин и др. [22] предложили модель координации и оптимизации хранения энергии, возглавляемую оператором распределительной системы (DSO) и с участием нескольких VPPS и SES. Ли и др. [29] предложили модель системы совместного хранения энергии, интегрирующую режимы самостоятельного строительства и аренды. Предложенная модель планирования совместного хранения энергии может значительно повысить экономическую эффективность инвестиций в хранение энергии и эксплуатацию системы. Даже в условиях бюджетных ограничений, по сравнению с моделью, основанной только на режимах самостоятельного строительства или аренды, она также снижает зависимость групп микросетей от сетей совместного хранения энергии и распределения. Для научной и обоснованной оценки эффективности работы электростанций с системами хранения энергии на стороне сети Ван и др. [23] предложили метод оценки, основанный на модели TOPSIS с комбинированными весами, и создали относительно полную систему оценочных показателей; Субъективные и объективные веса показателей рассчитываются с использованием метода аналитической иерархии и метода энтропийного взвешивания соответственно. Результаты подтвердили рациональность и эффективность предложенных показателей и методов оценки. Лю и др. [24] предложили модель KPCA-DBO-LSSVM, новый комплексный метод оценки совместного хранения энергии в энергосистемах, который обладает более высокой точностью и надежностью. С точки зрения теории игр, Ян и др. [7] разработали экономическую, социальную и экологическую

структуру оценки совместного хранения энергии и количественно оценили интересы, распределение ответственности и потенциал прибыли заинтересованных сторон с использованием метода аналитической иерархии. Наконец, анализ положительных внешних эффектов политики субсидирования и увеличения разрыва между пиковыми и минимальными значениями дает представление о политике для более чистой, более устойчивой и жизнеспособной энергетической системы. Цуй и др. [25] предложили двухуровневую модель ценообразования для систем совместного хранения энергии на основе теории смешанных игр и метода ее решения, в то время как Хе и др. [26] предложили метод совместного планирования оператора совместного хранения энергии (SESO) и альянса многоэнергетических микросетей (MEMG) на основе динамической игры с полной информацией. По сравнению с другими соответствующими методами планирования, предложенный двухуровневый метод оптимизации может увеличить чистый доход SESO на 1,47% и снизить средние затраты на планирование каждой MEMG как минимум на 1,7%. Недавние исследования дополнительно продемонстрировали, как анализ жизненного цикла — охватывающий производство, эксплуатацию и утилизацию — помогает количественно оценить более широкие экологические и экономические последствия этих систем [27,28]. Интегрируя показатели устойчивости с моделированием затрат, исследователи обеспечивают более целостную оценку совместного хранения энергии, подтверждая его потенциал как ключевой технологии в переходе к более экологичным и устойчивым энергетическим системам.

В целом, ученые все больше сосредотачиваются на моделях инвестирования и строительства, а также на оценке стоимости систем совместного хранения энергии, используя такие методы, как анализ затрат и выгод и комплексные системы оценочных показателей. Они предоставляют ценные справочные материалы и теоретическую поддержку для развития систем совместного хранения энергии; однако ряд задач остается нерешенным:

Во-первых, недостаточное всестороннее рассмотрение. Существующие исследования, как правило, делают акцент на краткосрочных экономических выгодах и технической осуществимости, часто упуская из виду долгосрочные и комплексные факторы, такие как воздействие на окружающую среду и социальные выгоды. Этот пробел препятствует устойчивому развитию систем совместного хранения энергии.

Во-вторых, неясны варианты моделирования применения инвестиционно-строительной модели. Хотя было предложено множество инвестиционных и строительных моделей, определения и классификации для конкретных вариантов моделирования применения еще недостаточно четко определены. По-прежнему отсутствует углубленное исследование и эмпирическая проверка того, какие инвестиционно-строительные модели наиболее подходят для различных контекстов.

В-третьих, неполные механизмы распределения прибыли. Существующие механизмы распределения прибыли между различными заинтересованными сторонами все еще недостаточно развиты. Определение справедливого и эффективного распределения прибыли между различными пользователями и инвесторами остается одной из важнейших задач.

Для преодоления этих ограничений в данной статье проводится ориентированный на ценность анализ совместного хранения энергии в контексте новой энергосистемы и уточняются модели инвестирования и строительства. В частности, рассматриваются три модели: (1) модель централизованного, самостоятельно построенного совместного хранения энергии (CSSES), (2) модель совместного хранения энергии с инвестициями третьих сторон (TISES) и (3) модель распределенного, самостоятельно построенного совместного хранения энергии (DSSES). В исследовании рассматриваются пять механизмов получения прибыли: управление энергией по контракту, двухкомпонентный тариф, рынок вспомогательных услуг, спотовый рынок (рынок на сутки вперед) и комплексная модель, — и оценивается влияние каждого механизма на экономические показатели совместного использования систем хранения энергии. Наконец, для

определения оптимальной комбинации используется подход многокритериального принятия решений: сначала применяется гибридный метод аналитической иерархии с энтропийным взвешиванием (АНР) для получения составных оценочных баллов, а затем используется метод TOPSIS (Методика выбора заказа по сходству с идеальным решением) для окончательного выбора модели. Эта систематическая методология проясняет экономические результаты различных стратегий совместного использования систем хранения энергии и помогает заинтересованным сторонам выбрать наиболее подходящую модель для различных практических вариантов моделирования.

2. Проектирование и анализ экономической эффективности инвестиционных и строительных моделей для систем совместного хранения энергии.

Совместное использование систем хранения энергии — это инновационное коммерческое приложение, сочетающее традиционные технологии хранения энергии с экономикой совместного потребления, предлагающее практические решения для связанных с этим задач. Инвестиционная и строительная модели разрабатываются и анализируются с точки зрения соотношения затрат и выгод, чтобы оптимизировать распределение ресурсов, снизить первоначальные капитальные затраты, сбалансировать интересы всех сторон и предоставить теоретические и практические рекомендации для устойчивого внедрения систем совместного хранения энергии.

2.1. Инвестиционные и строительные модели систем совместного хранения энергии

Инвестиции в системы совместного хранения энергии могут осуществляться одним инвестором, совместными инвесторами или социальным капиталом посредством лизинговых моделей. Различные инвестиционные и строительные модели приводят к различиям в эксплуатации, прибыли и распределении выгод от систем совместного хранения энергии. Поэтому перед разработкой инвестиционной и строительной модели необходимо уточнить субъектов инвестиций в системы совместного хранения энергии и проанализировать соответствующие модели распределения прибыли и выгод. Исходя из взаимосвязи между системами хранения энергии, финансируемыми государством, и пользователями-участниками, инвестиционные и строительные модели для систем совместного использования энергии можно разделить на три типа: централизованные системы совместного использования энергии, построенные собственными силами (CSSES), системы совместного использования энергии, финансируемые третьими сторонами (TISES), и распределенные системы совместного использования энергии, построенные собственными силами (DSSES).

В рамках модели CSSES множество пользователей объединяют свои средства для совместного строительства общественного хранилища энергии, которое предоставляет услуги нескольким пользователям, удовлетворяя их соответствующие потребности в хранении. Эта модель отражает основные принципы ресурсоемкого использования и экономики совместного потребления, как показано на рис. 2-1.

Для бытовых и небольших коммерческих пользователей, чьи потребности в хранении энергии невелики и которые чувствительны к цене, поиск подходящего модуля хранения может быть сложной задачей. Таким образом, модель TISES (как показано на рис. 2-2) предлагает эффективное решение. В этой модели сторонний оператор, действующий как независимая организация, отвечает за инвестиции, строительство, эксплуатацию и техническое обслуживание общественных объектов хранения энергии. Оператор предлагает пользователям емкость хранения и услуги зарядки/разрядки, тем самым обеспечивая оптимальное распределение ресурсов и их эффективное использование.

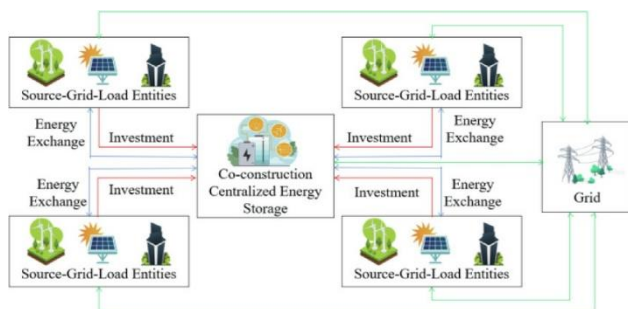


Рис. 2-1. CSSES.

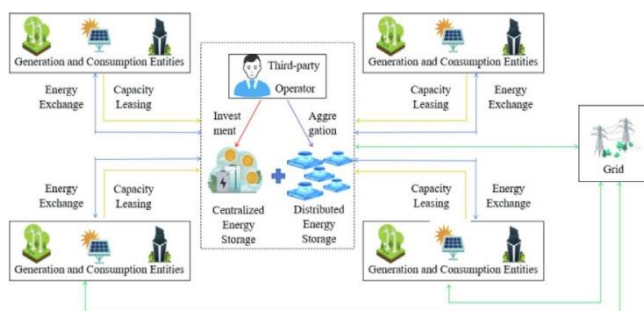


Рис.2-2. TISES.

В модели DSSSES каждый пользователь устанавливает независимое накопительное оборудование и может участвовать в торговле энергией (рис. 2-3). Эту модель можно разделить на два типа: внутреннее совместное использование между группами пользователей, где пользователи могут как делиться своим собственным хранилищем с другими, так и использовать хранилища других, что представляет собой двустороннее совместное использование; и внешнее совместное использование с такими организациями, как энергосеть, где пользователи делятся своим собственным хранилищем с сетью, но не получают от сети совместное хранилище, что представляет собой одностороннее совместное использование.

В таблицах 1-1 обобщены преимущества и недостатки вышеупомянутых моделей [1]. Этот метод классификации четко разъясняет права собственности и использования совместного хранения энергии, а также различия в его физических характеристиках, которые являются ключевыми факторами, влияющими на понимание интересов и стратегических решений участников совместного хранения энергии. Кроме того, на основе различных требований интересов были тщательно выделены три основные категории моделей совместного хранения энергии на стратегическом уровне, с целью более всестороннего и глубокого раскрытия уникальности и сложности каждого типа подхода к совместному хранению энергии.

2.2. Методы и гипотезы для учета затрат и доходов в моделях систем совместного хранения энергии.

Оценка доходов и расходов является важнейшей основой для анализа рентабельности систем совместного хранения энергии. Точность и достоверность этих оценок существенно влияют на целесообразность проекта. Ниже представлены методы учета затрат и учета доходов систем совместного хранения энергии.

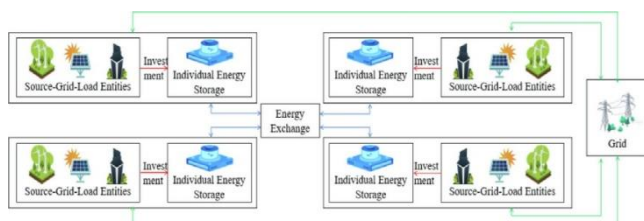


Рис.2-3. DSSSES.

Таблица 1-1. Сравнительный анализ инвестиционных и строительных моделей систем совместного хранения энергии.

Storage Type/ Mode	CSSES	TISES	DSSSES
Contract energy management	Advantages: Clear cost allocation; encourages large-scale investments. Disadvantages: High upfront costs for users; complex agreements.	Advantages: Operators bear costs; shared benefits for users. Disadvantages: Dependence on operator decisions.	Advantages: Full control over usage and costs. Disadvantages: High initial investment and management burden.
Two-part electricity pricing	Advantages: Flexible cost control for users. Disadvantages: Limited incentives for additional services.	Advantages: Consistent cost savings for users. Disadvantages: Limited user control.	Advantages: Direct control of electricity costs. Disadvantages: Lower returns from ancillary markets.
Ancillary services market	Advantages: High efficiency in providing grid stability. Disadvantages: Dependence on market signals for revenue.	Advantages: Efficient coordination of services. Disadvantages: Operators prioritize profitability over service needs.	Advantages: Independence in providing grid services. Disadvantages: Requires expertise in market participation.
Spot market	Advantages: Dynamic profit opportunities. Disadvantages: Market volatility risks.	Advantages: Profit optimization through market dynamics. Disadvantages: Risks of inadequate user benefits.	Advantages: High-profit potential. Disadvantages: Risky for inexperienced users.
Comprehensive mode	Advantages: Combines all benefits for diverse revenue streams. Disadvantages: Complexity in management and operation.	Advantages: Balanced operation for shared user benefits. Disadvantages: Requires advanced management strategies.	Advantages: Flexibility and control for diverse benefits. Disadvantages: High complexity in operation.

2.2.1. Методы выбора и учета показателей затрат для систем совместного хранения энергии

Учет затрат на системы совместного хранения энергии можно разделить на пять компонентов, как показано в (2-1)[21].

$$LCC = C_{IC} + C_{RC} + C_{OC} + C_{DC} \quad (2-1)$$

В формуле C_{IC} представляет собой стоимость установки аккумуляторных батарей; C_{RC} представляет собой стоимость замены аккумуляторных батарей за один случай; C_{OC} представляет собой затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание; а C_{DC} представляет собой возмещаемую стоимость системы хранения энергии.

1) Стоимость установки

Основная составляющая затрат на установку системы совместного хранения энергии — это стоимость установки аккумуляторных батарей. Оборудование для систем хранения энергии в основном состоит из самой батареи, устройств преобразования энергии и необходимых вспомогательных средств. Стоимость установки C_{IC} рассчитывается, как показано в (2-2).

$$C_{IC} = C_{bat} + C_{pcs} + C_{bop} \quad (2-2)$$

В формуле C_{bat} обозначает стоимость батарей, C_{pcs} — стоимость устройств преобразования энергии, а C_{bop} — стоимость необходимых вспомогательных средств.

2) Стоимость замены

Текущий проектный цикл для систем хранения энергии обычно составляет от 5 до 20 лет. Однако срок службы аккумуляторных блоков, как правило, не достигает 20 лет. Следовательно, возникает проблема замены аккумуляторных блоков в рамках проекта. Стоимость замены одного аккумулятора рассчитывается, как показано в (2-3).

$$C_{RC} = (1 - \alpha)^{kn} C_{bat}, k = N/n - 1 \quad (2-3)$$

В формуле α представляет собой среднегодовой темп снижения стоимости установки аккумуляторных батарей; k — количество замен батарей; N — проектный цикл в годах; и n — срок службы аккумуляторных батарей в годах. Если $N/n - 1$ не является целым числом, k округляется до ближайшего целого числа в большую сторону.

3) Ежегодные эксплуатационные и технические расходы

Ежегодные затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание системы совместного хранения энергии можно выразить, как показано в (2-4).

$$C_{OC} = C_{FOC} + C_{VOC} \quad (2-4)$$

Среди них C_{FOC} представляет собой фиксированные эксплуатационные и технические затраты; C_{VOC} представляет собой переменные эксплуатационные и технические затраты. Управленческие затраты и затраты на рабочую силу являются важными компонентами C_{FOC} . Эта часть не связана с процессом эксплуатации и в основном зависит от фиксированных параметров, таких как тип технологии и мощность системы хранения энергии, как показано в (2-5).

$$C_{FOC} = C_{OMC} P_{rate} \quad (2-5)$$

В этом уравнении C_{OMC} — это стоимость эксплуатации и технического обслуживания на единицу мощности, а P_{rate} — номинальная мощность системы хранения энергии.

Кроме того, C_{VOC} включает в себя множество факторов, таких как стоимость электроэнергии, стоимость топлива, субсидии на новые источники энергии, затраты на выбросы CO_2 и т. д. Это приводит к тому, что C_{VOC} изменяется в зависимости от внешней среды системы совместного хранения энергии, а также от ее собственного рабочего состояния. Учитывая множество факторов, в этом разделе в основном выбрана стоимость электроэнергии C_e , которая составляет относительно большую долю в C_{VOC} , для представления размера C_{VOC} , как показано в (2-6).

$$C_e = C_{aec} P_{rate} \quad (2-6)$$

В этом уравнении C_{aec} — это годовая стоимость электроэнергии на единицу мощности общего хранилища энергии, рассчитанная, как показано в (2-7).

$$C_{aec} = C_p \frac{t}{\eta} D \quad (2-7)$$

В этом уравнении C_p — цена электроэнергии для зарядки, t — номинальное время разряда, η — эффективность системы, а D — количество рабочих дней.

Для всей системы в целом зависимость между номинальной мощностью и номинальной производительностью показана следующим образом.

$$E_{rate} = P_{rate} t \quad (2-8)$$

В этом уравнении E_{rate} — номинальная емкость системы совместного хранения энергии.

4) Возмещаемая стоимость

Возмещаемая стоимость относится к затратам на восстановление или вторичное использование, понесенным по окончании срока службы системы хранения энергии. Возмещаемая стоимость часто является параметром, который меняется в зависимости от рынка и котировок. Она рассчитывается с использованием коэффициента стоимости утилизации, который представляет собой отношение стоимости утилизации системы хранения энергии к стоимости, необходимой для ее первоначального строительства. Формула расчета показана в (2-9).

$$C_{Rec} = F_{EOL} \cdot C_{IC} \quad (2-9)$$

В этой формуле F_{EOL} — это ставка стоимости лома. Некоторые материалы и устройства на электростанциях с накопителями энергии имеют ценность для вторичной переработки. Стоимость

вторичной переработки конкретных проектов по хранению энергии может быть рассчитана непосредственно путем суммирования затрат на очистку, разборку, переработку и регенерацию.

2.2.2. Методы выбора и учета показателей рентабельности для систем совместного хранения энергии

К основным показателям рентабельности проектов совместного использования систем хранения энергии относятся операционная прибыль, полученная после реализации проекта, первоначальные инвестиции, внутренняя норма доходности финансовых средств, чистая приведенная стоимость финансовых средств, срок окупаемости и другие. В рамках CSSES и DSSES операционная прибыль представляет собой экономию средств за счет зарядки при низких ценах на электроэнергию и разрядки при высоких ценах. В отличие от этого, в рамках TISES операционная прибыль формируется за счет арендных платежей и арбитражного дохода от пиковых и минимальных цен.

1) Общий объем инвестиций

Оценка общей суммы инвестиций состоит из общей суммы инвестиций многоэнергетического дополнительного проекта и расчета ежегодных инвестиционных расходов, необходимых в течение периода строительства многоэнергетического дополнительного проекта. Формула расчета выглядит следующим образом [29]:

$$I_{TP} = I_C + C_{ID} + C_W \quad (2-10)$$

В этой формуле I_{TP} — это общие инвестиции в проект, I_C — инвестиции в строительство, C_{ID} — проценты за период строительства, а dC_W — оборотный капитал.

2) Операционные расходы

Эксплуатационные расходы и издержки относятся к различным затратам и их компенсационным значениям, понесенным в ходе эксплуатации многоэнергетического взаимодополняющего проекта. Формула расчета выглядит следующим образом:

$$C_O = C_T + C_D + C_{IE} \quad (2-11)$$

В этой формуле C_O — это операционные затраты, C_T — общие затраты и расходы, C_D — амортизация, а C_{IE} — процентные расходы.

$$C_T = C_{PE} + C_M + C_{O\&M} + C_D + C_{IE} + C_{OE} \quad (2-12)$$

В этой формуле C_{PE} — это затраты на персонал, C_M — затраты на материалы, $C_{O\&M}$ — затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание, а C_{OE} — прочие расходы.

3) Операционная прибыль

В централизованной модели совместного инвестирования и модели совместного использования в рамках собственности операционная выручка относится к экономии затрат на электроэнергию, достигаемой за счет низких цен на зарядку и высоких цен на разрядку, как показано в (2-13). В TISES операционная выручка состоит из арендных платежей и арбитражного дохода от пиковых и минимальных цен, как показано в (2-14):

Операционная выручка централизованной компании:

$$\begin{aligned}
& - \text{investment Sharing Model and Self} \\
& - \text{owned Sharing Model} \\
& = \text{Electricity Price Difference} \\
& \quad \times \text{Electricity Consumption}
\end{aligned}
\tag{2-13}$$

Операционная выручка TISES:

$$\begin{aligned}
& = \text{Lease Rate} \times \text{Leased Capacity} \\
& \quad + \text{Electricity Price Difference} \\
& \quad \times \text{Electricity Consumption}
\end{aligned}
\tag{2-14}$$

4) Соответствующие налоги

К соответствующим налогам относятся налоги, уплачиваемые с прибыли, полученной от коммерческой деятельности или предоставления услуг в течение периода эксплуатации проекта. В основном они включают городской налог на содержание и строительство, местный образовательный сбор и т. д., исходя из подлежащего уплате налога на добавленную стоимость.

5) Операционная прибыль

Операционная прибыль всесторонне отражает результаты производственной и хозяйственной деятельности компании. Формула расчета следующая:

$$\begin{aligned}
\text{Operating Profit} &= \text{Operating Revenue} \\
& \quad - \text{Operating Taxes and Surcharges} \\
& \quad - \text{Total Costs and Expenses}
\end{aligned}
\tag{2-15}$$

6) Погашение основного долга и процентов по кредиту.

Погашение кредита, включая основную сумму и проценты, является важным показателем платежеспособности проекта. Оно подразумевает погашение основной суммы кредитов на инвестиции в основные средства в соответствии с требованиями национальных источников финансирования и кредитных учреждений после ввода в эксплуатацию проекта многоэнергетической комплементарной энергетической системы. Совокупные годовые производственные затраты должны учитывать процентные расходы. Формула расчета, основанная на равном погашении основной суммы и выплате процентов, выглядит следующим образом:

$$A_t = \frac{I_c}{n} + I_c \times \left(1 - \frac{t-1}{n}\right) \times i
\tag{2-16}$$

В этом уравнении A_t представляет собой сумму погашения основного долга и процентов в году t ; I_c представляет собой инвестиции в строительство (включая проценты за период строительства); n представляет собой срок кредита в годах; и i представляет собой процентную ставку.

7) Стоимость восстановления

Стоимость восстановления в основном относится к доходу, полученному от утилизации остаточного оборудования после окончания срока эксплуатации системы хранения энергии. Расчет производится, как показано в (2-17).

$$C_{DC} = C_{res} C_{IC}
\tag{2-17}$$

В этом уравнении C_{res} — это коэффициент восстановления остаточной стоимости оборудования для хранения энергии.

8) Внутренняя ставка рентабельности (IRR)

Внутренняя норма доходности, как один из показателей рентабельности проекта, представляет собой ставку дисконтирования, при которой чистая приведенная стоимость денежных потоков равна нулю в течение расчетного периода проекта. Если внутренняя норма доходности является эталонной нормой доходности, проект можно считать финансово приемлемым. Формула расчета выглядит следующим образом:

$$\sum_{t=0}^n (C_I - C_O)_t (1 + F_{IRR})^{-t} = 0 \quad (2-18)$$

В этом уравнении F_{IRR} представляет собой внутреннюю норму доходности финансовых средств; C_I представляет собой приток денежных средств в году t ; C_O представляет собой отток денежных средств в году t ; а n представляет собой расчетный период проекта.

9) Чистая приведенная стоимость (NPV)

Чистая приведенная стоимость также является важным показателем для оценки рентабельности проекта. Она представляет собой сумму приведенных стоимостей чистых денежных потоков за расчетный период проекта, посчитанную с использованием ставки дисконтирования, установленной на основе базовой нормы доходности. Когда финансовая чистая приведенная стоимость равна 0, проект можно считать финансово приемлемым. Формула расчета выглядит следующим образом:

$$F_{NPV} = \sum_{t=0}^n (C_I - C_O)_t (1 + r)^{-t} \quad (2-19)$$

В этом уравнении F_{NPV} — это чистая приведенная стоимость; C_I и C_O представляют собой приток и отток денежных средств в году t соответственно; n — продолжительность проекта; и r — ставка дисконтирования.

10) Текущая стоимость денежных потоков от акционерного капитала

Приведенная стоимость денежных потоков от акционерного капитала представляет собой сумму приведенных стоимостей годовых притоков денежных средств проекта за вычетом оттоков денежных средств за весь срок действия проекта, за исключением периода строительства. Большее значение указывает на лучшую осуществимость проекта. Формула расчета следующая:

$$P_E = \sum_{t=1}^n (C_{It} - C_{Ot}) (1 + r)^{-t} \quad (2-20)$$

11) Соотношение цены к балансовой стоимости (PB)

Соотношение цены к балансовой стоимости — это приведенная стоимость денежных потоков от собственного капитала проекта, деленная на собственные капиталовложения проекта. Он используется для описания рентабельности капитала. Если соотношение цены к балансовой стоимости > 1 , это указывает на хорошую реализацию проекта. Формула расчета выглядит следующим образом:

$$P_B = \frac{\text{Present Value of Equity Cash Flows}}{\text{Equity Contribution Amount}} \quad (2-21)$$

В этом уравнении P_b обозначает отношение цены к балансовой стоимости.

12) Статический период окупаемости

Статический срок окупаемости обычно используется для оценки финансовой целесообразности проекта. Он обозначает время, необходимое для возврата первоначальных инвестиций за счет прибыли проекта с начала строительства. Когда статический срок окупаемости превышает срок жизни проекта, проект считается целесообразным. Формула расчета выглядит следующим образом:

$$P_t = (P_a - 1) + |P_b|/P_c \quad (2-22)$$

В этом уравнении P_a обозначает год, когда совокупный чистый денежный поток становится положительным, P_b обозначает абсолютное значение совокупного денежного потока за предыдущий год, а P_c обозначает денежный поток в году, когда совокупный денежный поток становится положительным.

13) Динамический период окупаемости

Динамический период окупаемости учитывает временную стоимость денег при окупаемости инвестиций. Когда динамический период окупаемости соответствует сроку жизни проекта, проект осуществим. Формула расчета выглядит следующим образом:

$$P'_t = (P_d - 1) + |P_e|/P_f \quad (2-23)$$

В этом уравнении P_d обозначает год, когда приведенная стоимость совокупного чистого денежного потока становится положительной, P_e обозначает абсолютное значение приведенной стоимости совокупного чистого денежного потока за предыдущий год, а P_f обозначает приведенную стоимость чистого денежного потока в году, когда совокупный чистый денежный поток становится положительным.

2.2.3. Предположения относительно значений индикаторов вариантов для трех моделей инвестиций и строительства систем совместного хранения энергии.

1) Основные предположения

Согласно «Уведомлению по вопросам, связанным с разработкой пилотной политики ценообразования на электроэнергию для поддержки развития независимых систем хранения энергии», мощность независимых электростанций с системами хранения энергии, участвующих в конкурсе, должна быть, как правило, не менее 100 МВт, а продолжительность непрерывного разряда на полной мощности — не менее 4 часов. Для более полного и точного измерения эксплуатационной выручки от систем совместного использования энергии предполагается, что номинальная мощность таких систем составляет 100 МВт, номинальная емкость — 400 МВт·ч, время заряда и разряда — 4 часа, глубина заряда и разряда — 90%, а КПД — 90%. Предполагается, что установленная стоимость составляет 1,12 йен/Вт·ч (первоначальные инвестиционные затраты включают затраты на электроэнергию, затраты на PCS, затраты на BMS, затраты на EMS и другие расходы; средняя цена ЕРС-предложения для 4-часового хранения энергии с 1 по 31 марта 2024 года составляет 1,12 йен/Вт·ч), а цена батареи составляет 0,71 йен/Вт·ч (расчет произведен на основе данных, опубликованных в финансовых отчетах 16 компаний, занимающихся системами хранения энергии, акции которых котируются на бирже, при этом цена батареи составляет в среднем приблизительно 58% от установленной стоимости).

2) Предположения о доходах

Согласно «Уведомлению по вопросам, связанным с разработкой пилотной политики ценообразования на электроэнергию для поддержки развития независимых систем хранения энергии», опубликованному Комиссией по развитию и реформам провинции Хэбэй 27 января 2024 года, и «Плану работы по непрерывной пробной эксплуатации рынка на сутки вперёд электроэнергии южной части энергосистемы провинции Хэбэй», опубликованному 24 мая 2024 года, доходы от совместного использования систем хранения энергии в основном включают в себя доход от арбитража пиковых и минимальных нагрузок, доход от платы за электроэнергию по требованию, компенсацию за стоимость мощности, компенсацию за участие в вспомогательных услугах по регулированию частоты и доход от аренды мощности, без учета доходов от динамического расширения мощности, реагирования на спрос и увеличения доли собственного потребления.

В «Уведомлении по вопросам, связанным с разработкой пилотных ценовых политик на электроэнергию для поддержки развития независимых систем хранения энергии» четко определены ценовые политики на зарядку и разрядку для проектов независимых систем хранения энергии. Зарядка электроэнергии «временно осуществляется в соответствии с замещающей закупочной ценой коммерческой и промышленной электроэнергии предприятиями электросетей», а разрядка электроэнергии «временно рассчитывается по средневзвешенной цене (фиксированной цене) ежемесячных централизованных тендерных сделок в пределах провинции». Таким образом, исходя из пиковых и минимальных цен на электроэнергию, указанных в объявлении о закупочной цене компании State Grid Hebei Power Co., Ltd. (Государственная электросетевая компания Хэбэй, Ltd.), предполагается, что разница между пиковыми и минимальными ценами на электроэнергию составляет 0,7234 юаня/кВт·ч, а цена на электроэнергию для коммерческого и промышленного потребления составляет 35 юаней/кВт в месяц. Кроме того, в документе четко установлен верхний предел цен на электроэнергию для мощностей в размере 100 юаней/кВт в год, а цена на электроэнергию для мощностей накопителей энергии, подключенных к сети с июня 2024 года, будет снижаться ежемесячно. Таким образом, предполагается, что цена электроэнергии за мощность составляет в среднем 75 юаней/кВт в год, а в документе указано, что срок действия платы за электроэнергию, полученной от проектов по хранению энергии, составляет 12 месяцев. В «Плане работы по непрерывной пробной эксплуатации спотового рынка электроэнергии Южной энергосети провинции Хэбэй» четко определена компенсация за вспомогательные услуги по регулированию частоты как компенсация за пробег в рамках регулирования частоты. Диапазон ценовых ограничений для заявлений о компенсации за пробег в рамках регулирования частоты составляет 0-15 юаней/МВт. Следовательно, предполагается, что цена за пробег в рамках регулирования частоты для систем хранения энергии составляет 8,85 юаней/МВт (средняя цена клиринга по компенсациям за пробег в рамках регулирования частоты в течение четвертого расчетного периода с апреля по июнь 2021 года в провинции Чжэцзян составила 8,85 юаней/МВт). Согласно результатам более чем 30 тендеров на предоставление услуг по лизингу мощностей хранения энергии, объявленных крупными энергетическими группами, такими как «Пять крупнейших электрогенерирующих компаний», «Три ущелья», «Китайская национальная атомная энергетика», «Китайское энергосбережение», «Китайская энергетическая компания», «Цзиннэн», «Чжэнэн» и «Новая энергетика Цзинькай», с общим объемом лизинга, превышающим 674 МВт/1308 МВт·ч, выигрышные предложения по лизингу мощностей хранения энергии были сосредоточены в диапазоне от 105 до 135 юаней/кВт·ч в год, со средней выигрышной ценой около 109 юаней/кВт·ч в год. Таким образом, предполагается, что цена лизинга совместного использования мощностей хранения энергии составляет 109 юаней/кВт·ч в год.

3) Эксплуатационные и технические расходы

Предположим, что ежегодный темп снижения стоимости батарей составляет 5%, стоимость материалов — 150 йен/кВт, стоимость страхования — 3,5% от общей суммы инвестиций, стоимость

ремонта — 3,5% от общей суммы инвестиций, а прочие расходы — 150 йен/кВт. Количество сотрудников следующее: для CSSES требуется 15 сотрудников, для TISES — 20 сотрудников, а для DSSES — 25 сотрудников. Заработная плата сотрудников составляет 150 000 йен на человека в год, а ставка отчислений в систему социального страхования — 47,5%.

4) Срок службы системы

Срок службы литиевых батарей варьируется от 5 до 15 лет в зависимости от вариантов применения. Предположим, что срок службы литиевой батареи составляет 10 лет, а срок службы системы хранения энергии — 20 лет. Батареи заменяются каждые 10 лет, и их восстановительная способность каждый раз одинакова.

5) Количество операций

Согласно механизму оценки, изложенному в «Уведомлении по вопросам, связанным с разработкой пилотных политик ценообразования на электроэнергию для поддержки развития независимых систем хранения энергии», ежегодное количество полных циклов зарядки и разрядки для систем хранения энергии, как правило, не должно быть меньше 330. Следовательно, предполагается, что системы совместного хранения энергии проходят 400 циклов зарядки и разрядки в год.

6) Эффективность цикла и глубина разряда

Диапазон энергоэффективности литиевых батарей составляет от 85 до 98%. Предположим, что КПД заряда-разряда для хранения энергии равен 90%. Дополнительно предположим глубину разряда 90% и время заряда-разряда 4 часа.

7) Финансовые предположения

Предположим, что доля собственного капитала составляет 30%, ставка дисконтирования — 6%, остаточная стоимость — 5%, процентная ставка по кредиту — 4%, а срок кредита — 15 лет с равными выплатами основного долга и процентов. Ставка налога на добавленную стоимость (НДС) составляет 13%, при этом 50% удерживается немедленно. Ставка налога на содержание и строительство города составляет 5%, ставка образовательного сбора — 3%, а ставка подоходного налога — 25%. Кроме того, предусмотрены налоговые льготы в виде трех освобождений от налогов и трех половинных скидок.

8) Доходы от торговли углеродными квотами и зелеными сертификатами

Исходя из предыдущих предположений — номинальная мощность 100 МВт, номинальная емкость 400 МВт·ч, время зарядки-разрядки 4 ч, глубина разряда 90% и КПД 90% — фактическая емкость за один цикл зарядки-разрядки составляет приблизительно 324 МВт·ч. Каждый цикл зарядки-разрядки приводит к выбросу приблизительно 291,6 тонн углекислого газа. При средней цене 63,5 йен за тонну углекислого газа выручка от торговли углеродными квотами за один цикл зарядки-разрядки составляет приблизительно 18 516,6 йен.

Что касается торговли «зелеными» сертификатами, каждый цикл зарядки-разрядки генерирует 324 «зеленых» сертификата, поскольку торговля ими обычно осуществляется из расчета 1 сертификат на 1 МВт·ч произведенной электроэнергии. Таким образом, доход от торговли «зелеными» сертификатами за один цикл зарядки-разрядки составляет приблизительно 41 666,4 йен.

2.3. Анализ затрат и выгод трех моделей инвестирования и строительства систем совместного хранения энергии.

2.3.1. Анализ показателей затрат и доходов CSSES

В модели CSSES пользователи совместно строят объекты хранения энергии и делят между собой затраты на строительство оборудования для хранения энергии. Затраты включают: стоимость строительства оборудования для хранения энергии, затраты на регулярную замену, а также различные расходы и управленческие издержки. Структура доходов включает: доход от арбитража пиковых и минимальных нагрузок, экономию от платы за потребление электроэнергии, участие в компенсации за вспомогательные услуги по регулированию частоты и компенсацию за мощность. При основных предположениях анализ затрат и выгод представлен в таблицах 2-1.

В соответствии с моделью CSSES и основными предположениями, общая стоимость проекта по хранению энергии составляет 1,415 млрд йен, а общая выручка — 1,51 млрд йен. Внутренняя норма доходности составляет 11,5%, что на 5,5 процентных пункта выше базовой ставки дисконтирования, что указывает на хорошую рентабельность проекта. Чистая приведенная стоимость составляет 95 млн йен, что демонстрирует достаточность денежного потока проекта для покрытия первоначальных инвестиционных затрат и существенную прибыльность. Как статический, так и динамический периоды окупаемости меньше срока эксплуатации проекта, что позволяет окупить инвестиционные затраты на ранних этапах его работы. На основе вышеуказанных показателей анализа затрат и выгод проект CSSES считается инвестиционно целесообразным.

Таблица 2-1. Показатели комплексного анализа затрат и выгод для моделей совместного хранения энергии (CSSES, DSSES, TISES).

Shared energy storage models	Indicator	Unit	Result
CSSES	Total cost	100 million ¥	14.15
	Total revenue	100 million ¥	15.10
	Internal rate of return	%	11.5
	Cost per kWh	¥/kWh	0.77
	Net present value	100 million ¥	0.95
	Static payback period	Years	5.76
	Dynamic payback period	Years	7.43
TISES	Total cost	100 million ¥	14.145
	Total revenue	100 million ¥	14.325
	Internal rate of return	%	6.7
	Cost per kWh	¥/kWh	0.77
	Net present value	100 million ¥	0.18
	Static payback period	Years	11.23
	Dynamic payback period	Years	13.43
DSSES	Total cost	100 million ¥	14.145
	Total revenue	100 million ¥	14.97
	Internal rate of return	%	15.68
	Cost per kWh	¥/kWh	9.4
	Net present value	100 million ¥	0.81
	Static payback period	Years	0.71
	Dynamic payback period	Years	9.08
	Total cost	100 million ¥	10.55
	Total revenue	100 million ¥	14.97

2.3.2 Анализ показателей затрат и доходов компании TISES

В системе TISES сторона спроса на системы хранения энергии не несет затрат на строительство оборудования для хранения энергии. За строительство системы хранения энергии и сдачу в аренду части ее мощности стороне спроса отвечает сторонняя компания. Для сторонней компании структура затрат включает: затраты на строительство оборудования для хранения энергии, затраты на регулярную замену, а также различные затраты и управленческие расходы. Структура доходов включает: доход от аренды мощности, доход от арбитража пиковых нагрузок, экономию от платы за электроэнергию в период пиковой нагрузки и доход от компенсации мощности. При основных предположениях анализ затрат и выгод представлен в таблицах 2-1.

В рамках модели TISES и основных предположений общая стоимость проекта по хранению энергии составляет 1,4145 млрд йен, а общая выручка — 1,4325 млрд йен. Внутренняя норма доходности (IRR) составляет 6,7%, что на 0,7 процентных пункта выше базовой ставки дисконтирования, указывая на относительно низкую окупаемость капитала. Чистая приведенная стоимость (NPV) составляет 18 млн йен, что свидетельствует о том, что денежный поток проекта может покрыть первоначальные инвестиционные затраты. Однако окупаемость капитала низкая. Как статический, так и динамический периоды окупаемости короче срока эксплуатации проекта, что указывает на возможность возмещения инвестиционных затрат в среднесрочной перспективе. На основании вышеуказанных показателей анализа затрат и выгод модель TISES считается малоперспективной.

2.3.3 Анализ показателей затрат и доходов DSSES.

В модели DSSES каждая организация должна построить собственное оборудование для хранения энергии. После удовлетворения собственных потребностей в потреблении, любая избыточная мощность может быть распределена между всеми участниками. В целом, общие затраты пользователей на строительство собственного хранилища энергии включают: затраты на строительство оборудования для хранения энергии, затраты на регулярную замену, а также различные затраты и управленческие расходы. Структура доходов включает: доход от арбитража пиковых нагрузок, экономию от платы за электроэнергию, участие в компенсации за вспомогательные услуги по регулированию частоты и доход от компенсации за мощность. При основных предположениях, с учетом участия в компенсации за вспомогательные услуги по регулированию частоты, анализ затрат и выгод представлен в таблицах 2-1.

Согласно модели DSSES и основным предположениям, общая стоимость проекта по хранению энергии составляет 1,497 млрд йен, а общая выручка — 1,568 млрд йен. Внутренняя норма доходности (IRR) составляет 9,4%, что на 3,4 процентных пункта выше базовой ставки дисконтирования, что указывает на хорошую рентабельность проекта. Чистая приведенная стоимость (NPV) составляет 71 млн йен, что демонстрирует, что денежный поток проекта может покрыть первоначальные инвестиционные затраты и принести прибыль. Это говорит о том, что доходность капитала является благоприятной, а приведенная стоимость после дисконтирования может покрыть первоначальные затраты. Как статический, так и динамический периоды окупаемости короче срока эксплуатации проекта, что указывает на возможность возмещения инвестиционных затрат в среднесрочной перспективе эксплуатации проекта. На основании вышеуказанных показателей анализа затрат и выгод проект DSSES считается инвестиционно целесообразным.

2.4. Анализ чувствительности трех моделей совместного хранения энергии

2.4.1. Анализ чувствительности показателей для CSSES

В анализе чувствительности CSSES разница между пиковыми и минимальными ценами на электроэнергию установлена на уровне 0,72 йен/кВт·ч в качестве базового значения с диапазоном корректировки $\pm 0,05$ йен/кВт·ч. Инвестиции в установленную мощность установлены на уровне 1,12 йен/Вт·ч в качестве базового значения с диапазоном корректировки $\pm 0,05$ йен/Вт·ч. Внутренняя норма доходности (IRR) рассчитывается при корректировке разницы между пиковыми и минимальными ценами на электроэнергию и инвестиций в установленную мощность. Затем проводится анализ чувствительности на основе этих двух факторов.

Поскольку ставка дисконтирования принимается равной 6%, то превышение внутренней нормы доходности над 6% указывает на то, что при таком уровне разницы между пиковыми и минимальными ценами на электроэнергию и инвестициях в установленную мощность система может окупить свои инвестиционные затраты в течение операционного цикла, и проект по

хранению энергии является осуществимым. Анализ чувствительности модели централизованного совместного хранения энергии представлен на рисунке ниже.

Из рисунков 2-4 видно, что при инвестициях в установленную мощность в размере 0,87/Вт·ч, 0,92/Вт·ч, 0,97/Вт·ч, 1,02/Вт·ч, 1,07/Вт·ч, 1,12/Вт·ч, 1,17/Вт·ч, 1,22/Вт·ч, 1,27/Вт·ч, 1,32/Вт·ч и 1,37/Вт·ч, соответствующие

Рис. 2-4. Анализ чувствительности затрат и выгод CSSES. Соответствующие разницы в ценах на электроэнергию в пиковый и спадовый периоды должны составлять не менее 0,57/кВт·ч, 0,57/кВт·ч, 0,62/кВт·ч, 0,62/кВт·ч, 0,67/кВт·ч, 0,67/кВт·ч, 0,72/кВт·ч, 0,72/кВт·ч, 0,77/кВт·ч, 0,77/кВт·ч и 0,82/кВт·ч соответственно, чтобы обеспечить внутреннюю норму доходности, превышающую 6%. В целом, по мере изменения факторов «инвестиции в установленную мощность в расчете разницы в ценах на электроэнергию в пиковый и спадовый периоды», внутренняя норма доходности также изменяется. Чем ниже инвестиции в установленную мощность, тем меньше требуемая разница в ценах на электроэнергию в пиковый и спадовый периоды, и наоборот, что соответствует практическим ожиданиям.

2.4.2 Анализ чувствительности показателей для TISES

В анализе чувствительности TISES разница между пиковыми и минимальными ценами на электроэнергию установлена на базовом уровне в 0,72 йен/кВт·ч с диапазоном корректировки $\pm 0,05$ йен/кВт·ч. Инвестиции в установленную мощность установлены на базовом уровне в 1,12 йен/Вт·ч с диапазоном корректировки $\pm 0,05$ йен/Вт·ч. Внутренняя норма доходности (IRR) рассчитывается при корректировке разницы между пиковыми и минимальными ценами на электроэнергию и инвестиций в установленную мощность. Затем проводится анализ чувствительности на основе этих двух факторов.

Поскольку ставка дисконтирования принимается равной 6%, то превышение внутренней нормы доходности над 6% указывает на то, что при таком уровне разницы между пиковыми и минимальными ценами на электроэнергию и инвестициях в установленную мощность система может окупить свои инвестиционные затраты в течение операционного цикла, и проект по хранению энергии является осуществимым. Анализ чувствительности TISES представлен на рисунке ниже.

Из рисунков 2-5 видно, что при инвестициях в установленную мощность в размере 0,87/Вт·ч, 0,92/Вт·ч, 0,97/Вт·ч, 1,02/Вт·ч, 1,07/Вт·ч, 1,12/Вт·ч, 1,17/Вт·ч, 1,22/Вт·ч, 1,27/Вт·ч, 1,32/Вт·ч и 1,37/Вт·ч соответствующая разница между пиковой и минимальной ценой на электроэнергию должна составлять не менее 0,52/кВт·ч, 0,57/кВт·ч, 0,62/кВт·ч, 0,67/кВт·ч, 0,67/кВт·ч, 0,72/кВт·ч, 0,77/кВт·ч. Для обеспечения внутренней нормы доходности, превышающей 6%, необходимо установить ставку 0,82/кВт·ч, 0,82/кВт·ч, 0,87/кВт·ч и 0,92/кВт·ч или выше. В целом, по мере изменения факторов «разница в ценах на электроэнергию в пиковый и спадовый периоды инвестиций в установленную мощность», внутренняя норма доходности также изменяется. Чем ниже инвестиции в установленную мощность, тем меньше требуемая разница в ценах на электроэнергию в пиковый и спадовый периоды, и наоборот, что соответствует практическим ожиданиям.

2.4.3. Анализ чувствительности показателей для DSSES

В анализе чувствительности DSSES разница между пиковыми и минимальными ценами на электроэнергию установлена на уровне 0,72 йен/кВт·ч в качестве базового значения с диапазоном корректировки $\pm 0,05$ йен/кВт·ч. Инвестиции в установленную мощность установлены на уровне 1,12 йен/Вт·ч в качестве базового значения с диапазоном корректировки $\pm 0,05$ йен/Вт·ч. Внутренняя норма доходности (IRR) рассчитывается при корректировке разницы между пиковыми и

минимальными ценами на электроэнергию и инвестиций в установленную мощность. Затем проводится анализ чувствительности на основе этих двух факторов.

Поскольку ставка дисконтирования принимается равной 6%, то превышение внутренней нормы доходности над 6% указывает на то, что при таком уровне разницы между пиковыми и минимальными ценами на электроэнергию и инвестициях в установленную мощность система может окупить свои инвестиционные затраты в течение операционного цикла, и проект по хранению энергии является осуществимым. Анализ чувствительности DSSSES представлен на рисунке ниже.

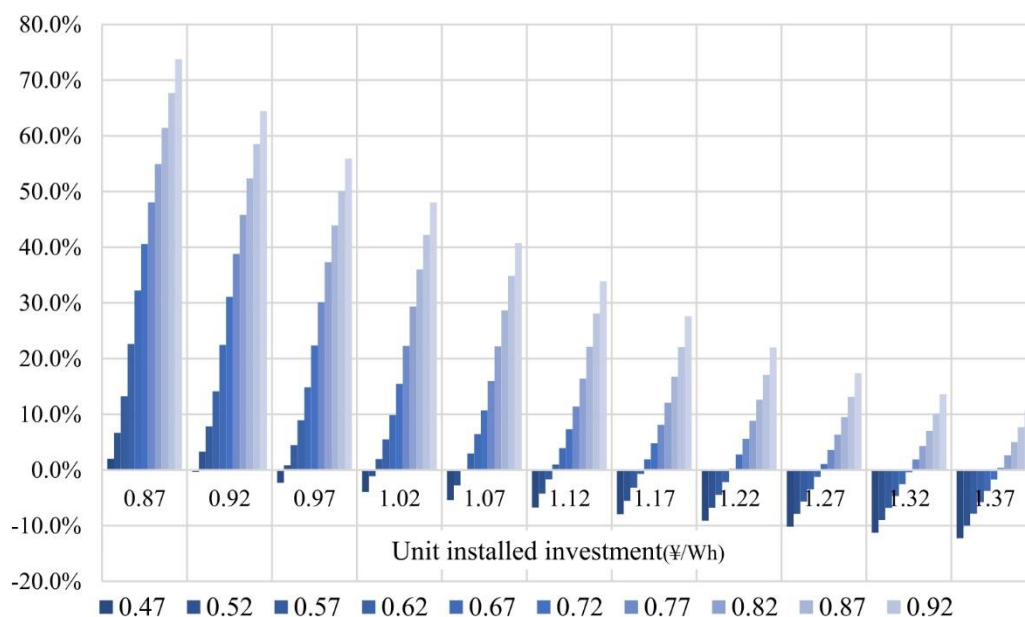


Рис. 2-5. Анализ чувствительности затрат и выгод TISES.

Из рисунков 2-6 видно, что при инвестициях в установленную мощность в размере 0,87/Вт·ч, 0,92/Вт·ч, 0,97/Вт·ч, 1,02/Вт·ч, 1,07/Вт·ч, 1,12/Вт·ч, 1,17/Вт·ч, 1,22/Вт·ч, 1,27/Вт·ч, 1,32/Вт·ч и 1,37/Вт·ч соответствующая разница между пиковой и минимальной ценой на электроэнергию должна составлять не менее 0,57/кВт·ч, 0,57/кВт·ч, 0,62/кВт·ч, 0,62/кВт·ч, 0,67/кВт·ч, 0,72/кВт·ч, 0,72/кВт·ч. Для обеспечения внутренней нормы доходности, превышающей 6%, необходимо установить ставку 0,77/кВт·ч, 0,77/кВт·ч, 0,82/кВт·ч и 0,82/кВт·ч или выше. В целом, по мере изменения факторов «разница в ценах на электроэнергию в пиковый и спадовый периоды инвестиций в установленную мощность», внутренняя норма доходности также изменяется. Чем ниже инвестиции в установленную мощность, тем меньше требуемая разница в ценах на электроэнергию в пиковый и спадовый периоды, и наоборот, что соответствует практическим ожиданиям.

3. Оценка эксплуатационного значения совместного хранения энергии в новой энергосистеме

Комплексная оценка систем совместного хранения энергии представляет собой процесс сравнения различных технологий совместного хранения энергии и оценки целесообразности конкретных проектов на основе их технико-экономических характеристик. Эффективная оценка позволяет выявлять сложности в развитии, уточнять технологические пробелы и впоследствии формулировать меры по продвижению. В настоящее время для оценки обычно используется анализ затрат и выгод. Этот метод рассматривает совместное хранение энергии изолированно, и, хотя его экономическая и техническая осуществимость изучаются отдельно, он игнорирует многогранные характеристики системы и экономическое воздействие проекта на другие социальные субъекты. Он является односторонним и затрудняет полное раскрытие его потенциала. Поэтому комплексные методы оценки должны анализировать осуществимость и эффективность с более широкой точки зрения,

например, изучая мнения различных заинтересованных сторон о строительстве систем хранения энергии или моделируя и прогнозируя социальные выгоды от совместного хранения энергии после инвестиций и эксплуатации. Выделяя сильные стороны и избегая слабых, можно повысить комплексные выгоды, получаемые от хранения энергии, достигая лучших общих показателей и преимуществ.

3.1. Построение системы показателей оценки совместного хранения энергии

3.1.1. Принципы выбора индикаторов

Возможность достижения удовлетворительных экономических результатов при совместном использовании систем хранения энергии определит их широкое распространение и применение, а их положительное влияние на общество и окружающую среду — их устойчивое развитие. Проекты совместного использования систем хранения энергии могут повысить потребление чистой энергии, уменьшить проблему «заброшенных» ветров и солнечных электростанций за счет распределенных источников энергии и получить экономическую выгоду за счет использования разницы в пиковых и спадовых ценах на электроэнергию, что обеспечит им значительные комплексные преимущества. Оценка эксплуатационных преимуществ совместного использования систем хранения энергии включает в себя множество заинтересованных сторон и требует научной и всеобъемлющей системы показателей для оценки. Всеобъемлющая система оценки является нелинейной и сложной, требующей организации множества показателей в соответствующую систему оценки в соответствии с их внутренними взаимосвязями и определенной иерархической структурой. В целом, важно придерживаться принципов всесторонности, научной строгости, иерархической структуры, независимости, системного подхода, операционной практичности и перспективного развития.

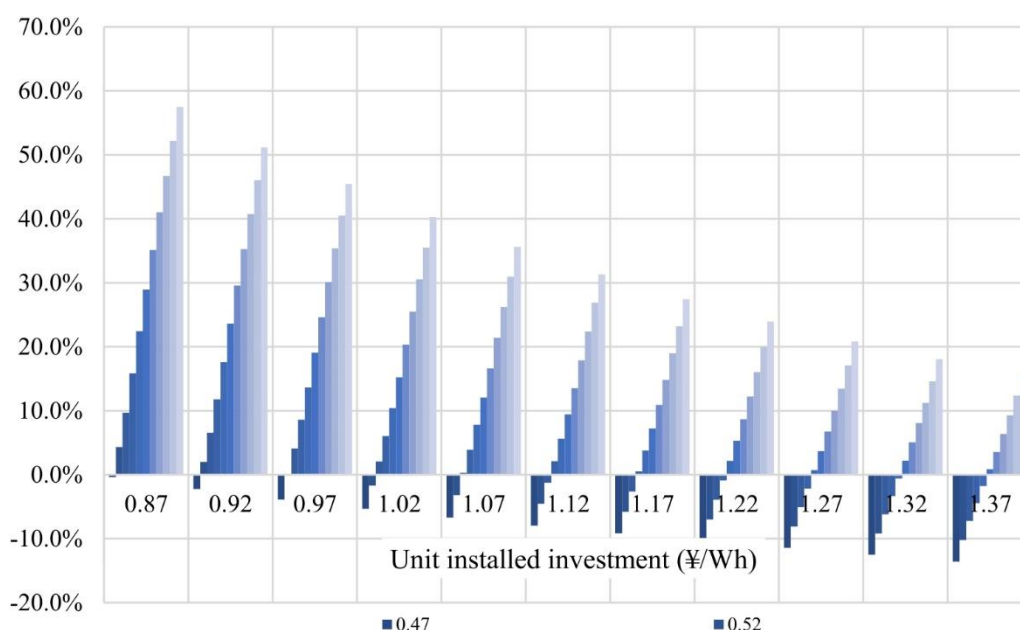


Рис. 2-6. Анализ чувствительности затрат и выгод DSES.

3.1.2 Построение системы оценки показателей

1) Показатели стоимости, выгоды и методы расчета для систем совместного использования накопителей энергии

Сведения о стоимости, показателях эффективности и методах расчета системы совместного хранения энергии см. в разделе 3.2.

2) Экологические показатели и методы расчета для систем совместного хранения энергии

Экологические показатели и методы расчета для системы совместного хранения энергии [30].

1) Формула расчета торговли квотами на выбросы углерода

$$R_C = P_C \times E_{CO_2} \quad (3-1)$$

где R_C обозначает выручку от торговли квотами на выбросы углерода (юани); P_C обозначает выручку за тонну углекислого газа, а E_{CO_2} обозначает выбросы углекислого газа за один цикл зарядки и разрядки (тонны).

2) Формула расчета доходов от зеленых сертификатов

$$R_g = C \times G \times P_g \quad (3-2)$$

где R_g представляет собой доход от торговли зелеными сертификатами; C представляет собой фактическую емкость одного цикла зарядки и разрядки; G представляет собой количество зеленых сертификатов, сгенерированных на МВт·ч (единиц/МВт·ч); P_g представляет собой доход на один зеленый сертификат (юаней/единица).

В соответствии с принципами отбора показателей оценки эффективности эксплуатации систем совместного хранения энергии, необходимо провести углубленный анализ интересов всех сторон, участвующих в системе совместного хранения энергии. С учетом конечных целей и основных характеристик эксплуатации систем совместного хранения энергии, критериальный слой оценки эффективности эксплуатации определяется четырьмя измерениями: экономические показатели, экологические показатели, социальные показатели и технические показатели. На основе этого построена система показателей оценки эффективности работы систем совместного хранения энергии. Конкретная система показателей оценки эффективности работы систем совместного хранения энергии представлена в таблицах 3-1 ниже.

3.2. Предварительная обработка показателей и определение веса

3.2.1. Предварительная обработка показателей

После создания системы показателей оценки эффективности эксплуатации систем совместного хранения энергии, ввиду разнообразия типов и единиц измерения показателей, необходимо провести стандартизованную предварительную обработку показателей для облегчения дальнейших расчетов и сравнительного анализа, заложив основу для всесторонней оценки. В процессе предварительной обработки показатели необходимо нормализовать и сделать безразмерными. При построении комплексной модели оценки преимуществ совместного использования систем хранения энергии важно учитывать, что некоторые значения показателей лучше, когда они больше (так называемые положительные показатели); некоторые значения показателей лучше, когда они меньше (так называемые отрицательные показатели); а также существуют показатели, которые демонстрируют наилучшие результаты при значениях, близких к умеренным (так называемые умеренные показатели). Поэтому перед всесторонней оценкой необходимо стандартизовать все типы показателей, как правило, путем преобразования отрицательных и умеренных показателей в положительные, чтобы привести их тенденции в соответствие. Обычно существует два метода преобразования отрицательных и умеренных показателей в положительные: обратное преобразование и обратное преобразование с наложением штрафа. В данной работе для стандартизации показателей используется метод обратного преобразования с штрафными функциями, при котором отрицательные значения показателей преобразуются в положительные посредством линейного преобразования, что

позволяет унифицировать направленность показателей и сделать комплексную оценку более научной и обоснованной.

Таблица 3-1. Система показателей экономической оценки систем совместного хранения энергии.

Target layer	Indicator layer
Evaluation of the operational value of shared energy storage	Total cost
	Operating profit
	Internal rate of return (IRR)
	Net present value (NPV)
	Price to book ratio (P/B Ratio)
	Payback period (Static)
	Payback period (Dynamic)
	Carbon trading calculation formula
	Green certificate revenue formula

$$y_{it} = \max \{x_{ij}\} - x_{ij} \quad (3-3)$$

Формула положительной трансформации умеренных показателей такова:

$$y_{it} = \max |x_{ij} - k| - |x_{ij} - k| \quad (3-4)$$

где x_{ij} — значения показателя до и после преобразования соответственно, а A — умеренное значение умеренного показателя.

Различные показатели в системе оценки имеют свои единицы измерения и размерности, и прямое сравнение и анализ между ними не имеют практического значения. Поэтому для всестороннего сравнения необходимо преобразовать значения этих показателей в безразмерные относительные числа. Этот процесс преобразования называется безразмерной нормализацией показателей, которая является основой для всесторонней оценки и оказывает существенное влияние на результаты оценки. В данной работе для безразмерной нормализации будет использован метод преобразования диапазона, с применением следующих конкретных операций:

Сначала определите нижнюю границу определенного показателя на основе его минимального значения в исторических данных или среди всех схем; затем возьмите желаемое или фактическое максимальное значение в качестве верхней границы. Далее рассчитайте безразмерные нормализованные значения показателя, используя соответствующую формулу:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (3-5)$$

Метод преобразования диапазона прост и удобен, а обработанные значения показателей находятся в диапазоне 0-1, сохраняя дифференцирующую информацию, что способствует последующей комплексной оценке и анализу.

3.2.2. Определение веса

Метод аналитической иерархии (АИР) — это широко используемый метод субъективного взвешивания, эффективно объединяющий количественный и качественный анализ и подходящий для сложных многофакторных и многоцелевых систем оценки. Ниже приведены подробные этапы этого метода:

1) Постройте модель иерархической структуры

При проведении углубленного исследования заинтересованных сторон, участвующих в системе совместного хранения энергии, факторы, влияющие на эксплуатационные преимущества такой

системы, можно разделить на несколько уровней на основе их логических взаимосвязей. Эти факторы влияют друг на друга на одном уровне или относятся к уровню выше, и подвергаются влиянию или доминированию факторов следующего уровня. В данной статье разработанная ранее многоуровневая система оценочных показателей может рассматриваться как иерархическая структурная модель, поэтому нет необходимости строить новую модель отдельно.

2) Составьте матрицу оценок

Построение матрицы оценок начинается со второго уровня иерархической структурной модели с использованием метода попарного сравнения. Это действие включает в себя сравнение каждого фактора на том же уровне, на который влияют показатели верхнего уровня, и продолжается до последнего уровня. Результаты сравнения представлены значениями шкалы, указывающими степень важности показателей. Для получения более подробной информации см. Таблицы 3-2.

Для определения веса критерия в системе оценки эффективности систем совместного хранения энергии, для m показателей третьего уровня, относящихся к этому критерию, были привлечены эксперты из различных областей для сравнительной оценки важности показателей, в результате чего были получены соответствующие баллы. Путем вычисления среднего балла каждого показателя рассчитывается степень важности и матрица попарного сравнения, как показано ниже:

Таблица 3-2. Шкала значений степеней важности

Scale value	Definition
1	The i factor is equally important compared to the j factor
3	The factor i is slightly more important than the factor j
5	The i factor is more important compared to the j factor
7	The i factor is significantly more important than the j factor
9	The i factor is extremely important compared to the j factor
2, 4, 6, 8	The scale value corresponding to the intermediate state of two adjacent judgments
Count backwards	Judgment value $a_{ij} = 1/a_{ji}$, $a_{ii} = 1$

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (3-6)$$

где a_{ij} представляет собой средний балл, полученный в результате сравнительной оценки фактора i и фактора j .

3) Определите вектора весов для упорядочивания отдельных показателей

Суммирование матрицы оценок построчно для получения вектора весов до нормализации $B = (b_1, b_2, \dots, b_m)^T$, ; верхний индекс T обозначает транспонированную матрицу (используется та же система обозначений), где:

$$b_i = \left(\prod_{j=1}^m a_{ij} \right)^{\frac{1}{m}}, i = 1, 2, \dots, m \quad (3-7)$$

Для получения окончательного вектора весов для одного слоя для m показателей $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$, выполняется нормализация вектора весов, где:

$$w_i = \frac{b_i}{\sum_{i=1}^m b_i}, i = 1, 2, \dots, m \quad (3-8)$$

4) Проверьте согласованность

Для определения окончательного веса при одноуровневой сортировке необходимо провести проверку согласованности, то есть определить степень несогласованности матрицы оценок A_{ij} . Это можно сделать, рассчитав показатель согласованности (C_1). Чем меньше значение C_1 , тем выше согласованность. Собственный вектор, соответствующий наибольшему собственному значению матрицы оценок, используется в качестве вектора весов для показателей на этом уровне. Чем выше степень несогласованности, тем больше погрешность оценки. Собственный вектор, прошедший проверку, может быть использован в качестве окончательного вектора весов; в противном случае необходимо перестроить матрицу оценок.

Несогласованность матрицы оценок A_{ij} измеряется величиной $\lambda_{\max}$ m , а показатель согласованности (C_1) рассчитывается по формуле:

$$C_1 = (\lambda_{\max} - m) / (m - 1) \quad (3-9)$$

Затем рассчитывается коэффициент согласованности (C_R) по следующей формуле:

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad (3-10)$$

В данном контексте R_1 обозначает индекс случайности, который представляет собой средний коэффициент случайной согласованности. Конкретные значения R_1 можно получить, обратившись к таблицам 3-3.

Если коэффициент согласованности (C_R) меньше 0,1, считается, что проверка согласованности пройдена, и результат одноуровневой сортировки удовлетворительный, что может быть использовано в качестве окончательного вектора весов. Впоследствии следует использовать метод энтропийного взвешивания для подтверждения весов показателей третьего уровня. Этапы расчета следующие:

Предположим, что оценка включает m проектов совместного хранения энергии, участвующих в оценке, каждый объект оценки включает n показателей оценки, а исходные данные i -го проекта по j -му показателю обозначаются как x_{ij} . Сначала построим исходную матрицу данных по следующей формуле:

$$X = (x_{ij})_{m \times n} \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (3-11)$$

Затем выполните безразмерную обработку и нормализацию каждого показателя для получения стандартизированной матрицы X . Далее рассчитайте долю каждого показателя в разных проектах, то есть долю y_{ij} j -го показателя в значении показателя i -го проекта, следующим образом:

$$y_{ij} = x_{ij} / \sum x_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (3-12)$$

Таким образом, получается матрица весов $Y = (y_{ij})_{m \times n}$, и значение информационной энтропии e_j j -го показателя вычисляется следующим образом:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m y_{ij} \ln(y_{ij}) \quad (3-13)$$

Среди них $k > 0$, $k = 1/\ln(m)$. Наконец, веса, полученные методом энтропийного взвешивания и методом аналитической иерархии, объединяются для определения веса z_j системы показателей проекта совместного хранения энергии. Метод расчета следующий:

Таблица 3-3. Стандартные значения среднего коэффициента случайной согласованности (R_1).

Matrix order	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_1	0.00	0.58	0.91	1.12	1.24	1.35	1.42	1.45	1.49

$$z_j = \frac{w_j \times u_j}{\sum_{j=1}^n w_j \times u_j} \quad (3-14)$$

В итоге получается комплексная весовая комбинация $Z = (z_1, z_2, z_3, \dots, z_n)$.

3.3. Анализ конкретных случаев оценки модели множественных инвестиций и строительства в сфере совместного хранения энергии

На основе ранее разработанной системы оценочных показателей для проектов совместного использования систем хранения энергии можно сделать вывод, что эти показатели поддаются количественной оценке, легко рассчитываются и идентифицируются. Исходя из характеристик вышеуказанной системы показателей и цели комплексной оценки, в данной работе было проведено исследование с использованием метода АНП-TOPSIS. По сравнению с другими методами многокритериального принятия решений, такими как нечеткая комплексная оценка, алгоритм реляционного анализа "серых" систем или отдельные подходы АНП/TOPSIS, метод АНП-TOPSIS обеспечивает лучшую интеграцию экспертной оценки и объективного анализа данных. АНП обеспечивает логичное и согласованное присвоение весов посредством попарных сравнений, в то время как TOPSIS обеспечивает четкое ранжирование с данными, основанное на расстоянии до идеальных решений. Этот комбинированный подход повышает надежность результатов и особенно подходит для оценки проектов фотоэлектрических систем хранения энергии с использованием как технических, так и стратегических показателей [31,32], что показано в таблицах 3-4:

С помощью метода расчета составных весов на основе энтропийного подхода (АНП) рассчитываются субъективные и объективные веса показателей. Расчет субъективных весов осуществляется на основе анкетирования, в ходе которого собираются мнения экспертов о важности показателей. Важность субъективных и объективных весов устанавливается равной 0,5, а окончательные комплексные веса представлены в таблицах 3-5.

В контексте использования метода энтропийного взвешивания-АНП для определения веса показателей проводится комплексная оценка TOPSIS преимуществ различных схем работы микросети. Во-первых, на основе нормализованных значений показателей рассчитываются положительные и отрицательные идеальные точки преимуществ работы микросети, как показано в таблицах 3-6.

Рассчитайте расстояния между каждой схемой и положительными и отрицательными идеальными точками отдельно, как показано в таблицах 3-7.

Таблица 3-4. Результаты предварительной обработки исходных данных.

	CSSSES	TISES	DSSSES
Total cost	0.327054	0.326939	0.346007
Operating profit	0.334774	0.317592	0.347633
Internal rate of return (IRR)	0.416667	0.242754	0.34058
Net Present value (NPV)	0.32766	0.32766	0.344681
Price to book ratio (P/B Ratio)	0.516304	0.097826	0.38587
Payback period (Static)	0.220944	0.430763	0.348293
Payback period (Dynamic)	0.236549	0.427571	0.33588

Таблица 3-5. Весовые коэффициенты показателей для совместного использования систем хранения энергии.

Index	Objective weight	Subjective weight	Comprehensive weight
Total cost	0.000663	0.000663	0.001326
Operating profit	0.001261	0.001261	0.002522
Internal rate of return (IRR)	0.043046	0.043046	0.086092
Net present value (NPV)	0.000532	0.000532	0.001063
Price to book ratio (P/B Ratio)	0.29981	0.29981	0.59962
Payback period (Static)	0.06438	0.06438	0.128761
Payback period (Dynamic)	0.05145	0.05145	0.102899

Таблица 3-6. Положительные и отрицательные идеальные точки показателей оценки.

Index	Positive ideal point	Negative ideal point
Total cost	0.00079425	0.00075048
Operating profit	0.00151735	0.00138622
internal rate of Return (IRR)	0.06076133	0.03540008
net present value (NPV)	0.0006347	0.00060336
Price to book ratio (P/B Ratio)	0.47486405	0.08997424
Payback period (Static)	0.09300193	0.04770179
Payback period (Dynamic)	0.07419988	0.04105027

Таблица 3-7. Расстояние между каждым планом и положительными и отрицательными идеальными точками.

Index	Distance from the positive ideal point	Distance from the negative ideal point
CSSSES	0.06028435	0.38572447
TISES	0.38588104	0.05719964
DSSSES	0.12282136	0.2681877

Кроме того, рассчитайте относительную близость всех схем для сравнения и оптимального ранжирования, а также получите результаты комплексной оценки TOPSIS, представленные в таблицах 3-8.

На основании результатов комплексной оценки TOPSIS очевидно, что вариант CSSSES является оптимальным решением.

1) В рамках комплексных критериев оценки наиболее важными показателями являются внутренняя норма доходности, чистая приведенная стоимость и срок окупаемости проекта. Это говорит о том, что основная цель эксплуатации проектов по хранению энергии заключается в обеспечении экономических выгод при одновременном повышении финансовых показателей проекта за счет обоснованных инвестиционных и операционных стратегий, тем самым снижая инвестиционные риски. Это соответствует цели и значимости строительства систем совместного хранения энергии и

имеет решающее значение для оценки научной обоснованности схем эксплуатации проектов совместного хранения энергии.

Таблица 3-8. Результаты комплексной оценки TOPSIS.

Case	Closeness	Rank
CSSSES	0.86483596	1
TISES	0.12909531	3
DSSSES	0.68588615	2

Таблица 3-9. Расширенный вариант применения 1.

Scenario	Electricity price differential	Total cost	Total revenue	Internal rate of return	Levelized cost of electricity	Net present value	Simple payback period	Discounted payback period
CSSSES	0.52	14.15	10.92	-11.1%	0.77	-3.23	0	0
TISES	0.52	14.08	12.56	-3.2%	0.76	-1.52	0	0
DSSSES	0.52	14.97	11.87	-8.7%	0.81	-3.10	0	0

Таблица 3-10. Расширенные варианты применения 2.

Scenario	Electricity price differential	Total cost	Total revenue	Internal rate of return	Levelized cost of electricity	Net present value	Simple payback period	Discounted payback period
CSSSES	0.92	14.15	16.19	18.4%	0.77	1.98	3.12	4.96
TISES	0.92	14.08	15.77	27.8%	0.76	1.69	2.17	3.74
DSSSES	0.92	14.97	17.08	17.4%	0.81	2.11	4.45	5.43

2) Метод TOPSIS сортирует варианты на основе расстояния до идеального и отрицательного идеального решений. Более высокий показатель близости указывает на то, что решение ближе к идеалу, что делает его более предпочтительным выбором. Оптимальные решения, CSSSES и DSSSES, занимают первые два места с наивысшими показателями близости, получив оценки 0,86483596 и 0,68588615 соответственно. Это указывает на то, что эти две модели совместного хранения энергии в рамках централизованной и децентрализованной самоорганизующихся систем показывают наилучшие результаты. Решение с более высоким показателем близости, TISES, хотя и имеет более низкий балл, все же обладает определенным уровнем инвестиционной целесообразности.

3) Сравнение результатов, рассчитанных различными методами, выявляет последовательные результаты относительно превосходства или неполноценности вариантов. Явные различия в результатах оценки между разными схемами четко определяют оптимальное решение, демонстрируя эффективность комплексной модели оценки, построенной в этой статье, которая может помочь лицам, принимающим решения, в выборе лучшего оперативного плана.

3.4. Анализ перспектив расширения применения систем совместного хранения энергии

Для анализа перспектив применения систем совместного хранения энергии следует учитывать, что эти варианты моделирования могут меняться в зависимости от колебаний цен на электроэнергию, затрат и доходов. Поэтому модели совместного хранения энергии дополнительно анализируются в различных вариантах применения, как показано в таблицах 3-9 и 3-10.

После корректировки на основе указанных выше цен на электроэнергию результаты комплексной оценки TOPSIS представлены в таблицах 3-11 и 3-12.

Заметно, что, когда разница в ценах на электроэнергию падает ниже 0,52, порядок предпочтения схем следующий: TISES, CSSSES и DSSSES. И наоборот, когда разница в ценах на электроэнергию превышает 0,92, порядок предпочтения меняется на: TISES, DSSSES, а затем CSSSES. В практическом применении систем совместного хранения энергии корректировки могут производиться на основе конкретных параметров.

Таблица 3-11. Комплексные результаты оценки расширенного варианта применения TOPSIS 1.

Case	Closeness	Rank
CSSES	0.83628425	2
TISES	0.85795642	1
DSSSES	0.80355953	3

Таблица 3-12. Комплексные результаты оценки варината расширенного применения TOPSIS 2.

Case	Closeness	Rank
CSSES	0.72954325	3
TISES	0.76569566	1
DSSSES	0.69875662	2

4. Заключение

В данном исследовании разработаны три модели совместного использования систем хранения энергии: централизованная самоорганизующаяся система хранения энергии (CSSES), распределенная самоорганизующаяся система хранения энергии (DSSSES) и система хранения энергии с участием третьих лиц (TISES). Оценена их экономическая целесообразность с точки зрения внутренней нормы доходности (IRR), чистой приведенной стоимости (NPV) и срока окупаемости. Оценка показывает, что CSSES демонстрирует наилучшие финансовые показатели, DSSSES занимает второе место, а TISES — наихудшие. Подробные результаты представлены ниже:

1) CSSES обеспечивает самую высокую доходность инвестиций. Он демонстрирует самую высокую внутреннюю норму доходности (11,5%), наибольшую чистую приведенную стоимость (приблизительно 95 миллионов йен) и самый короткий срок окупаемости. Эти показатели свидетельствуют о более скором возмещении затрат и существенной прибыли, что делает CSSES особенно привлекательным для крупномасштабных проектов и инвесторов, стремящихся к высокой доходности.

2) DSSSES целесообразна, но предлагает более умеренную доходность. Ее внутренняя норма доходности (9,4%) ниже, чем у централизованной модели, однако она все же обеспечивает положительную чистую приведенную стоимость (около 71 млн йен) и достаточно короткий срок окупаемости. Большая гибкость в выборе места размещения подходит для проектов меньшего масштаба или децентрализованных проектов, хотя более низкая прибыльность требует от инвесторов тщательного баланса между ожидаемой прибылью и риском.

3) Инвестиционная привлекательность TISES ограничена. Она демонстрирует самую низкую внутреннюю норму доходности (6,7%) и лишь скромную чистую приведенную стоимость (около 18 миллионов йен). Для достижения удовлетворительной доходности обычно требуется более широкий разброс цен от пика до минимума. Хотя чистая приведенная стоимость покрывает первоначальные затраты, относительно низкая эффективность использования капитала ограничивает привлекательность, делая инвестиционный потенциал доступным для рынков с выраженными тарифными различиями или для инвесторов, готовых смириться с более низкой доходностью.

В итоге, CSSES является наиболее финансово жизнеспособной моделью, DSSSES остается практичным вариантом для небольших или децентрализованных проектов, тогда как TISES менее привлекательна из-за сравнительно низкой доходности и более высокого профиля риска.

О вкладе авторов в проект CRediT

Юаньин Чи: написание текста – рецензирование и редактирование, научное руководство, привлечение финансирования, разработка концепции. **Цзихан Цзинь:** написание текста –

рецензирование и редактирование, методология. **Сюфэн Чжан:** обработка данных, методология, программное обеспечение, проверка достоверности, написание текста – рецензирование и редактирование. **Яньчжао Чжан:** обработка данных. **Юси У:** научное руководство, визуализация, написание текста – первоначальный вариант. **Цзюньци Ван:** визуализация, написание текста – рецензирование и редактирование.

О конфликте интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных конкурирующих финансовых интересов или личных связей, которые могли бы повлиять на результаты работы, представленной в данной статье.

Благодарности

Данная работа выполнена при поддержке Фонда планирования Министерства образования Китая в области гуманитарных и социальных наук (грант № 21YJA790009) и Национального фонда естественных наук Китая (грант № 72140001).

Список используемой литературы

- [1] Ю.Б. Шу, Г.П. Чен, Дж.Б. Хе и др., Создание новой электроэнергетической системы на основе новых источников энергии, Китайский журнал инженерных наук 23 (6) (2021) 61.
- [2] Д.Л. Рен, Л. Лю, К.Дж. Гонг и др., Оценка эффективности экологической компенсации при эксплуатации стратегических минеральных ресурсов на основе модели VIKOR-AISM, Устойчивое развитие 14 (23) (2022) 15969.
- [3] К.З. Ли, Л.Дж. Чен, К.Л. Ду и др., Обзор механизма работы и режима транзакций совместного хранения энергии на стороне генерации, Труды CSEE 18 (01) (2023) 188-200.
- [4] Ю.Дж. Ву, К.Т.Го, К.Л.Чжэн и др., Совместная оптимизированная операция и стратегия торгов кластера ветро-солнечная-накопительная энергия с учетом совместного использования накопителей энергии, Proc.CSEE 18 (01) (2023) 219-227.
- [5] М. Цзэн, Ю. К. Ван, М. Чжан и др., Исследование бизнес-модели и экономических преимуществ независимого хранения энергии в условиях экономики совместного использования, Price (Theor.Pract.) 1 (2023) 179-183.
- [6] Б. Чен, З. К. Ли, Б. Дж. Лю и др., Динамическое кооперативное планирование и адаптивное распределение выгод для многомикросетевых систем с общим хранилищем энергии в условиях неопределенности источника и нагрузки, J.Storage Mater. 128 (2025) 117213.
- [7] С. Х. Ян, С. Л. И, Х. Ю. Ван и др., Общее хранилище энергии в многомикросетях: скоординированное развитие и комплексная экономико-социально-экологическая оценка в условиях неопределенности спроса и предложения, Renew.Energy 249 (2025) 123101.
- [8] В. Ю. Чжан, В. Вэй, Л. Дж. Чен и др., Ценообразование услуг и диспетчеризация нагрузки бытовых устройств общего хранения энергии, Energy 202 (2020) 117543.
- [9] Ч. Чжан, Д. К. Чен, К. П. Чен и др., Анализ экономической выгоды оптимальной конфигурации накопителей энергии в различных сценариях применения, Наука и технология хранения энергии (2024) 1-12.
- [10] Дж.Л.Ли, Ю.Р.Цзян, Л.Дж.Чжан, Рекомендации по политике и исследование бизнес-модели электрохимического хранения энергии в провинции Цинхай, Энергетические технологии 19 (05) (2021) 7-12.

- [11] М. Ходжастех, П. Фариа, З. Вейл, Распределенная надежная оптимизационная модель для анализа устойчивости энергетических сообществ с общими системами хранения энергии, *Energy* 320 (2025) 135337.
- [12] Дж. В. Сяо, Ю. Б. Ян, С. К. Цуй и др., Новая структура совместного использования систем хранения энергии с учетом как емкости хранения, так и мощности, *Appl.Energy* 307 (2022) 118171.
- [13] С. Чен, З. Б. Лю, П. К. Ван и др., Многоцелевая оптимизация емкости батареи подключенной к сети системы PV-BESS в гибридном здании с совместным использованием энергии с учетом тарифа в зависимости от времени суток, *Appl.Energy* 350 (2023) 121727.
- [14] Н. Ву, К. Ву, Х. Б. Рен и др., Иерархическая игровая оптимизация независимой системы совместного хранения энергии с учетом множественных прибылей и штрафов, *Energy* 321 (2025) 135448.
- [15] Дж.Ху, К.Х.Ли, Б.К.Хуан, К.Х.Фэн, Исследование бизнес-модели хранения энергии на стороне сети, адаптированной к требованиям сценариев применения в Китае и политической среде, *Global Energy Interconnect*.2 (04) (2019) 367-375.
- [16] Х. Чжан, Т. Лю, Дж. Л. Цзян, Стратегия равновесной работы для совместного хранения энергии в энергосистеме на основе модели сетевого равновесия, *J.Storage Mater.* 106 (2025) 114831.
- [17] С. К. Чжоу, В. Дж. Ву, Ю. Дж. Сунь и др., Конфигурация системы хранения энергии и метод оценки выгод для новых энергетических электростанций на основе теории игр, *J.Electr.Eng.Technol.* 20 (4) (2025) 1959-1973.
- [18] А. М. Элберри, Дж. Такур, А. Сантасало-Аарнио и др., Крупномасштабное хранение сжатого водорода как часть систем хранения возобновляемой электроэнергии, *Int.J.Hydrogen Energy* 46 (29) (2021) 15671-15690.
- [19] А. Хо, Д. Хилл, Дж. Хеденгрен и др., Гибридная энергетическая система на основе ядерного и водородного топлива с крупномасштабным хранилищем: исследование оптимального распределения и экономической эффективности на реальном рынке, *J.Storage Mater.*51 (2022) 104510.
- [20] С. Би, Ч. Дж. Ли, В. Чжан и др., Перспективы использования метанолового топлива для отопления в северном Китае, *Renew.Energy* 237 (2024) 121663.
- [21] Х.Дж.Янг, З.К.Янг, М.К.Гонг и др., Режим коммерческой эксплуатации системы совместного хранения энергии с учетом удовлетворенности транзакциями электроэнергией электростанций, работающих на возобновляемых источниках энергии, *J.Storage Mater.*105 (2025) 114738.
- [22] М.Х.Лин, Дж.Лю, З.Тан и др., Скоординированная структура работы DSO-VPP с интегрированной энергией и резервом от совместного хранения энергии: метод смешанной игры, *Appl.Energy* 379 (2025) 125006.
- [23] Д.Дж.Ван, Х.Ю.Сун, Ю.М.Ге и др., Оценка эффективности работы электростанции с системой хранения энергии на стороне сети на основе модели TOPSIS с комбинированным весом, *Energy Rep.*11 (2024) 1993-2002.
- [24] Дж. К. Лю, Ю. Н. Сонг, С. Дж. Сюэ и др., Исследование модели оценки ценности совместного хранения энергии, адаптированной к потребностям новой энергосистемы, *Energy* 330 (2025) 136977.

- [25] Дж. Д. Цуй, З.К.Чжу, Г.Л.Цюй и др., Стратегия ценообразования совместного хранения энергии со стороны спроса на основе игры Штакельберга-Нэша, *Int.J.Electr.Power Energy Syst.*164 (2025) 110387.
- [26] К.Б.Хе, К.М.Чен, К.Фу и др., Метод совместного планирования совместного хранения энергии и многоэнергетических микросетей на основе динамической игры с совершенной информацией, *Energies* 17 (19) (2024) 4792.
- [27] Ю.Цзяо, Д.Манссон, Выбросы парниковых газов от гибридных систем хранения энергии в будущих 100% возобновляемых энергетических системах — шведский пример, основанный на оценке жизненного цикла с учетом последствий, *J.Storage Mater.*57 (2023) 106167.
- [28] Х. Кан, С. Юнг, М. Ли и др., Как лучше распределять энергию для достижения углеродно-нейтрального города? Обзор стратегий применения систем хранения энергии на основе батарей в городе, *Renew.Sustain.Energy Rev.*157 (2022) 112113.
- [29] Л.К.Ли, К.Л.Цао, С.Чжан, Система совместного хранения энергии для потребителей-производителей в сообществе: инвестиционное решение, экономическая эффективность и распределение выгод с точки зрения затрат, *J.Storage Mater.*50 (2022) 104710.
- [30] Б.М.Фанг, В.К.Цю, М.К.Ванг и др., Система оценочных показателей рынка совместного хранения энергии в контексте сценария использования возобновляемой энергии: контекст провинции Цинхай в Китае, *Global Energy Interconnect.*5 (1) (2022) 77-95.
- [31] С.Дж.Ли, М.Негневицкий, К.Л.Ванг, Перспективная оценка автомобилей на метаноле в Китае с использованием анализа FANP-SWOT, *Transp.Policy* 96 (2020) 60-75.
- [32] Л.Янг, Ю.Р.Хао, Б.Ван и др., Оценка водоносной способности провинции Шэньси на основе анализа DPSIRM-TOPSIS, *Ecol.Indic.*173 (2025) 113369.

Получено 9 июля 2024 г.; отредактировано 16 июля 2025 г.; принято 22 июля 2025 г.

* Ответственный автор

Адреса электронных почт: goodcyy@bjut.edu.cn(Ю.Чи), JZH20000309@163.com (Ц. Цзинь), xufengzhang@bjut.edu.cn (С. Чжан), pangqianli@emails.bjut.edu.cn (Я. Чжан), wu_yuxii@163.com(Ю.У), 13654606613@163.com (Ц. Ван).

Эта статья переведена из журнала <Global Energy Interconnection> (ISSN: 2096-5117), выпуск 4, 2025 г. Оригинальное название статьи:<Study on the investment and construction models and value assessment of shared energy storage in the context of the new power system>. Перевод предоставляется исключительно для справки; преимущественную силу имеет оригинал: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2025.07.002>

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/>).



Юаньин Чи — профессор и директор кафедры прикладной экономики на Факультете экономики и менеджмента Пекинского технологического университета, Китай. Ее исследования сосредоточены на экономике энергетики и окружающей среды, углеродной нейтральности и новых энергетических технологиях, а также технико-экономических аспектах электроэнергетического сектора. Она руководила многочисленными национальными исследовательскими проектами, финансируемыми Министерством науки и технологий Китая, Национальным фондом естественных наук Китая, Министерством образования Китая, а также региональными проектами, финансируемыми правительством Пекина и др. В области исследований она является автором/соавтором многих рецензируемых статей в научных журналах и редактором ряда научных журналов.