

Оптимальное извлечение энергии гибридной ФЭ-ТЭГ системы с помощью оптимизации на основе баланса расстояния и приспособленности белухи

Бо Ян^a, Босяо Лианг^a, Шаоцун Ву^a, Хунбяо Ли^b, Денгке Гао^b, Линь Цзян^c, Цзинбо Ван^{c*}

^a Институт электроэнергетики, Куньминский университет науки и технологий, Куньмин 650500, Китайская Народная Республика

^b Компания Shanghai KeLiang Information Technology Co., Ltd., Шанхай, 201103, Китай

^c Кафедра электротехники и электроники, Ливерпульский университет, Ливерпуль L69 3GJ, Великобритания

Аннотация. В данном исследовании отдельные фотоэлектрические (ФЭ) и термоэлектрические генераторы (ТЭГ) объединены в гибридную ФЭ-ТЭГ систему для повышения общей выходной мощности за счет повторного использования отработанного тепла, выделяемого во время производства электроэнергии с помощью ФЭГ, что повышает ее эксплуатационную надежность. Однако вероятностные условия окружающей среды часто приводят к частичному затенению и неравномерному распределению тепла по модулям ФЭ-ТЭГ, что негативно влияет на выходные характеристики системы, представляя собой серьезную проблему для поддержания ее оптимальной производительности. Для решения этих проблем была разработана новая стратегия оптимизации на основе баланса расстояния и приспособленности белухи (FDBBWO) для максимизации выходной мощности гибридной ФЭ-ТЭГ системы в динамических сценариях работы. В тематических исследованиях был рассмотрен более широкий спектр сложных и реалистичных условий эксплуатации для изучения эффективности и осуществимости FDBBWO. Для этого были использованы реальные наборы данных, собранные в разные сезоны в Гонконге, для проверки практической жизнеспособности предложенной стратегии. Результаты моделирования показывают, что FDBBWO метод отслеживания точки максимальной мощности, основанный на алгоритме FDBBWO, превосходит конкурирующие методы, достигая наибольшего выхода энергии, с заметным увеличением до 134,25% при минимальных колебаниях мощности. Например, энергия, полученная с помощью FDBBWO, на 47,45% и 58,34% выше, чем у методов оптимизации на основе алгоритма белухи (АБ) и ВиН соответственно, в зимний период.

©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/>).

Ключевые слова: Гибридная ФЭ-ТЭГ система; отслеживание точки максимальной мощности; условия частичного затенения; оптимизация поведения белухи на основе баланса расстояния и приспособленности; платформа SimuNPS.

0 Введение

Энергетическая отрасль переживает масштабную эволюцию, переходя к новой парадигме, которая делает акцент на распределенных и модульных системах наряду с экологически устойчивыми практиками. Этот сдвиг соответствует принципам Третьей промышленной революции, которая выступает за устойчивую и взаимосвязанную энергетическую структуру [1-4]. Расширение исследований и внедрения альтернативных источников энергии, включая ветровую, морскую, фотоэлектрическую (ФЭ) и тепловую энергию, представляет собой важный шаг к снижению нашей зависимости от традиционного ископаемого топлива. Эти устойчивые альтернативы предлагают многообещающий путь к более экологичному энергетическому ландшафту. Одновременно с этим, современные инфраструктуры энергосистем все больше ориентируются на гибридные методы производства электроэнергии, которые направлены на улучшение различных аспектов, таких как плотность мощности, точность управления и эффективность в режиме реального времени [5-9].

Быстрое расширение производства электроэнергии с использованием фотоэлектрических систем в значительной степени обусловлено многочисленными присущими им преимуществами, включая низкие эксплуатационные расходы, простые требования к техническому обслуживанию и минимальные выбросы углерода [10,11]. Однако практическое внедрение фотоэлектрических технологий сталкивается с рядом проблем, таких как высокие первоначальные затраты на установку, чувствительность к изменениям погоды и снижение выходной мощности в условиях высоких температур [12]. Для эффективного использования солнечной энергии большие фотоэлектрические батареи обычно проектируются для бесшовной интеграции с электросетью и часто устанавливаются в районах с обильным солнечным светом [13]. Крайне важно понимать, что условия окружающей среды в этих установках могут сильно различаться, особенно природные и искусственные препятствия, которые могут вызывать частичное затенение (ЧЗ) фотоэлектрических батарей. ЧЗ не только снижает эффективность производства энергии, но и могут приводить к повышению температуры фотоэлектрических элементов. В тяжелых случаях повышенная температура может вызвать необратимое повреждение элементов, что ставит под угрозу долгосрочную надежность и производительность всей фотоэлектрической системы. Это динамическое взаимодействие между факторами окружающей среды и производительностью фотоэлектрических систем подчеркивает сложность максимизации преимуществ солнечной энергии в практическом применении [14]. Более того, фотоэлектрические модули в основном преобразуют видимый спектр солнечного света в электричество, оставляя значительную часть солнечного излучения неиспользованной. Это неиспользованное тепло не только снижает эффективность работы модулей, но и со временем представляет риск для структурной целостности фотоэлектрических модулей из-за их постепенного износа [15,16]. Интеграция термоэлектрического генератора (ТЭГ) в существующие фотоэлектрические системы для создания гибридной установки предлагает практическое решение для рекуперации тепла, которое в противном случае было бы потрачено впустую. Эта гибридная установка разработана для оптимального использования тепловой энергии, т. е. тепла, генерируемого фотоэлектрическими элементами, а также остаточного тепла от солнечного излучения [17,18]. Синергетический эффект в этой гибридной структуре не только повышает эффективность выработки электроэнергии, но и улучшает эксплуатационную надежность фотоэлектрических модулей, в значительной степени благодаря охлаждающему эффекту, обеспечиваемому ТЭГ. Исследования показали, что использование гибридной системы ФЭ-ТЭГ может повысить эффективность выработки электроэнергии гибридной системы примерно на 10 % по сравнению с обычной автономной фотоэлектрической системой [19,20].

В области исследований гибридных систем ФЭ-ТЭГ ученые в основном сосредоточились на двух ключевых стратегиях повышения и точной настройки производительности этих систем. Первая стратегия включает размещение фотоэлектрических панелей непосредственно на модулях ТЭГ, как показано в [21], которая была дополнительно усовершенствована с использованием хорошо известного уравнения теплопроводности для точной оценки тепловых изменений на модулях ТЭГ, как обсуждается в [22]. Второй подход использует спектральный светоразделитель, описанный в [23], для перенаправления фотонов, не поглощенных фотоэлектрическими элементами, к системе ТЭГ, тем самым повышая возможности генерации энергии гибридной системы ФЭ-ТЭГ.

В предыдущих исследованиях был описан широкий спектр стратегий объединения фотоэлектрических и термоэлектрических систем, все они направлены на оптимизацию одновременного использования солнечной и тепловой энергии. В соответствии с этой технологической траекторией в [24] были проведены испытания и анализ двух примеров с одной интенсивностью излучения и одной температурой без сравнения их результатов с результатами, полученными с помощью таких методов, как постепенно возрастающая проводимость (ПВП) и метод возмущения и наблюдения (ВиН). В литературе был предложен улучшенный метод управления пропорционально-интегрально-дифференциальным управлением дробного порядка

[25], но он сравнивался только с методом ВиН. В другом исследовании [26] для гибридной фотоэлектрической системы с термоэлектрическим генератором была разработана методика отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ) на основе алгоритма арифметической оптимизации (ААО), где оператор алгоритма использовался для обновления положения. Однако ААО является алгоритмом локальной оптимизации и часто испытывает трудности с несколькими локальными точками максимальной мощности (ЛТММ), что делает его склонным к попаданию в локальные оптимумы. В [27] было проведено оценочное исследование. Оценка производительности гибридной системы ФЭ-ТЭГ проводилась путем сложной физической интеграции фотоэлектрической и термоэлектрической систем и ее оптимизации с использованием метода поиска атомных орбиталей (ПАО). Однако для сравнения использовался только традиционный алгоритм ВиН, а метод ПАО не обеспечивает стабильно высокую эффективность выработки энергии во всех случаях.

Стратегическое размещение модулей ТЭГ под фотоэлектрическими установками неизбежно приводит к проблеме ЧЗ в фотоэлектрических системах, вызывающей неравномерное распределение тепловой энергии по модулям ТЭГ, известное как неравномерное распределение тепла (НРТ). Подобно ЧЗ, вызывающему множественные пики на кривой зависимости мощности от напряжения (М-Н), НРТ приводит к появлению различных ЛТММ на кривой зависимости мощности от температуры (М-Т), что указывает на различную эффективность работы системы. Однако выходная кривая системы обычно имеет одну идеальную глобальную точку максимальной мощности (ГТММ), которая имеет решающее значение для определения оптимальной рабочей точки [28,29]. В этом контексте надежная и стабильная технология ОТММ необходима для оптимизации выходной мощности системы, особенно в динамических условиях с колеблющейся интенсивностью излучения и температурой.

До настоящего времени для отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ) в фотоэлектрических и термоэлектрических системах применялись традиционные аналитические методы, такие как подход ПВП и метод ВиН [30,31]. Однако эти методы созданы для работы на основе одной точки максимальной мощности (ЛТММ), что делает их менее эффективными при наличии нескольких ЛТММ, приводя к снижению сбора энергии, и, следовательно, требуются более надежные и мощные методы. Метаэвристические алгоритмы (МЭА) демонстрируют сильные возможности глобального поиска, быструю сходимость и заметное снижение вычислительных затрат, что делает их идеальными инструментами для эффективного управления динамическими и сложными эксплуатационными характеристиками гибридных фотоэлектрических систем с термоэлектрическими генераторами [32]. Однако исследования по оптимизации выработки электроэнергии гибридными фотоэлектрическими системами с термоэлектрическими генераторами все еще находятся на ранней стадии, и исследований их производительности ОТММ не так много. Три ключевые области требуют дальнейшего улучшения: (1) в текущих исследованиях часто отсутствуют разнообразные сценарии эксплуатации и данные из реального мира. (2) Хотя существующие методы в некоторой степени повысили выходную мощность фотоэлектрических систем с термоэлектрическими генераторами, все еще есть возможности для дальнейшего улучшения с помощью более совершенных методов стратегии ОТММ. (3) Предыдущие исследования в основном фокусировались на выходной мощности и эффективности как показателях производительности системы и игнорировали другие важные аспекты, такие как равномерность и стабильность.

Учитывая вышеупомянутые аспекты, в данной работе представлен новый алгоритм оптимизации на основе алгоритма белухи (АБ), улучшенный за счет баланса расстояний между элементами системы (FDB), известный как FDBBWO, который направлен на оптимизацию ОТММ гибридной системы ФЭ-ТЭГ по нескольким параметрам. Основные результаты данной работы можно сформулировать следующим образом:

1) Когда фотоэлектрическая система работает автономно, неиспользованное тепло не только снижает ее эффективность, но и постепенно приводит к износу компонентов. Интеграция фотоэлектрической системы и термоэлектрического генератора позволяет повысить энергоэффективность, увеличить выработку электроэнергии и эффективно использовать отработанное тепло. Эта гибридная система предлагает перспективное решение для высокоэффективного, надежного и устойчивого производства энергии, используя преимущества обеих технологий для удовлетворения растущего мирового спроса на чистую энергию.

2) Большинство ранее предложенных алгоритмов отслеживания точки максимальной мощности (OTMM) для гибридных систем страдают от низкой стабильности и локальных оптимумов. Для решения этой проблемы была разработана усовершенствованная стратегия OTMM на основе FDBBWO, которая стратегически интегрирует метод FDB в три различных аспекта AB, тем самым повышая разнообразие решений и значительно уменьшая раннюю сходимость и колебания мощности в процессе OTMM.

3) Многие существующие исследования использовали простые тестовые среды, что ограничивает их практическую значимость. Для тщательной проверки эффективности предложенного метода FDBBWO в управлении OTMM для гибридной системы ФЭ-ИЭГ в различных условиях эксплуатации были тщательно разработаны и проведены три тематических исследования. Для проверки практической применимости предложенного подхода OTMM были использованы реальные наборы данных, собранные в течение четырех сезонов в Гонконге.

4) Для более тщательной оценки был принят более широкий спектр критериев, ориентированных не только на улучшение общей выходной мощности, но и на колебания сходимости (обозначаемые V^{avg} и ΔV^{max}).

1 Математическое моделирование гибридной системы ФЭ-ТЭГ

Учитывая доказанную эффективность и частое применение в аналогичных исследованиях, в данном исследовании в основном используется стратегия из [20] и [21], рассматривая ее как основополагающую модель для будущих исследовательских работ и инициатив по развитию. Структурная схема гибридной системы ФЭ-ТЭГ, используемой в данном исследовании, показана на рис. 1.

Тепловые связи возникают в основном из-за присущих им физических взаимосвязей. Тщательное исследование [33] методически анализирует сложное взаимодействие между рабочей температурой ячеек и такими переменными, как условия окружающей среды, динамика ветра и уровни солнечного облучения. В этом исследовании предлагаются методы корреляции, варьирующиеся от простых до сложных анализов. В литературе [20] выделено линейное уравнение, разработанное на основе обширных экспериментальных исследований, с акцентом на детальную взаимосвязь между изменениями температуры в фотоэлектрических модулях, окружающими атмосферными условиями и интенсивностью получаемого солнечного света. Аналогично, в [34] тщательно разработана модель, направленная на точное определение диапазона рабочих температур фотоэлектрических модулей, с учетом таких важнейших факторов, как температура окружающей среды, интенсивность солнечного излучения и скорость ветра.

1.1 Частичные затемнения (ЧЗ)

В контексте реальных инженерных работ быстрое движение облаков и потенциальные препятствия со стороны соседних зданий могут вызывать ЧЗ на крупных фотоэлектрических установках. Предложенная в данном исследовании гибридная система ФЭ-ТЭГ использует отработанное тепло, придерживаясь фундаментальных принципов физической теплопередачи. Следовательно, массивы ТЭГ в гибридной системе неизбежно подвержены отрицательному току из-за каскадных

эффектов, вызванных ЧЗ. Другими словами, в гибридной системе влияние ЧЗ имеет решающее значение для кривой характеристик мощности, что может привести к неравномерному распределению мощности по сложной конструкции гибридного модуля. Это, в свою очередь, может нарушить согласованность электрического профиля гибридной системы, а также усугубить проблемы, связанные с отслеживанием точки максимальной мощности (ОТММ).

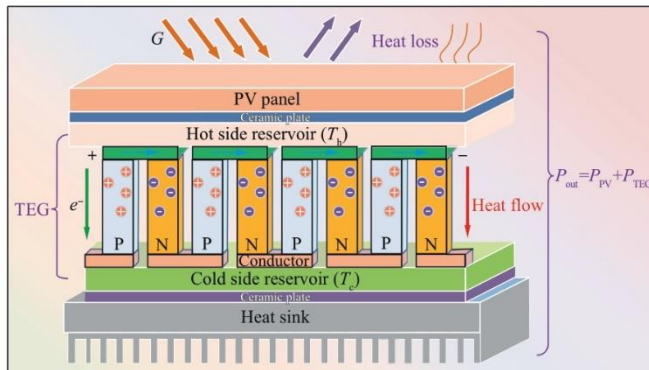


Рис. 1. Схема гибридной системы ФЭ-ТЭГ.

1.2 Моделирование фотоэлектрической батареи и математическая модель системы термоэлектрического генератора при ЧЗ.

Для оптимизации выходной мощности и напряжения ячейки фотоэлектрических модулей часто располагаются последовательно и параллельно, что известно как полностью перекрестно-связанные (ППС) соединения [35]. Воздействие ЧЗ приводит к возникновению характерных токов короткого замыкания внутри каждого фотоэлектрического модуля в заданной матрице [36]. Если ток в модуле отклоняется от ожидаемых токов цепочки, его напряжение смещается, превращая его в электрическую нагрузку, которая отнимает энергию у соседних модулей и преобразует ее в тепло. Широко распространенная стратегия смягчения этого неблагоприятного явления включает в себя интеграцию обходных диодов в каждый фотоэлектрический модуль, тактика, графически изображенная на рис. 2(а). Эти диоды, в своей функциональной способности, предотвращают обратный ток, особенно при изменяющихся уровнях освещенности. В случаях, когда каждая фотоэлектрическая ячейка подвергается воздействию ЧЗ, диоды сохраняют свою неактивность, как показано на рис. 2(б). Что еще более важно, когда одна фотоэлектрическая ячейка задействует обходные диоды, последующая фотоэлектрическая матрица способна демонстрировать многочисленные ЛТММ вдоль своей М-Н кривой. Частота возникновения ЛТММ напрямую соотносится с количеством частично затененных элементов, как показано на рис. 2(с) и 2(д). Напряжение, исходящее от затененного фотоэлектрического элемента, работает в пределах заданных границ, которые можно выразить следующим образом:

$$V_{\text{reverse}} = nV_{\text{oc}} + V_{\text{Bdiode}} \quad (1)$$

где V_{oc} представляет собой напряжение холостого хода, n — количество фотоэлектрических элементов, не защищенных от излучения, а V_{Bdiode} — переменная, указывающая на падение напряжения на диоде. Учет этих параметров имеет фундаментальное значение для всестороннего понимания эффективности работы и общей производительности фотоэлектрических элементов.

1.3 Модель ТЭГ системы при ЧЗ

Соединение нескольких модулей ТЭГ в массиве различной конфигурации является распространенной практикой для обеспечения оптимальной выходной мощности. При использовании в качестве источников напряжения эти модули ТЭГ увеличивают свою выходную мощность за счет структуры параллельных и последовательных соединений [37]. Аналогично

фотоэлектрическим массивам, по мере увеличения размера массива каждый модуль может подвергаться различным режимам работы из-за ЧЗ, что приводит к потенциальным потерям мощности. Эта разница температур может спровоцировать потери мощности, и для смягчения этого стратегически использовались обходные диоды, чтобы минимизировать пагубные последствия повреждения отдельного модуля ТЭГ, как показано на рис. 3. Одновременно были включены последовательные диоды для предотвращения циркуляции тока между столбцами массива.

Применение единого подхода к размещению N-ТЭГ модулей в методичной последовательной и параллельной конфигурации, математически выраженной формулой (2), позволяет не только эффективно производить электроэнергию, но и впоследствии ее совершенствовать.

$$I_i = \begin{cases} (V_{oci} - V_{Li}) \frac{I_{sci}}{V_{oci}} = I_{sci} - \frac{V_{Li}}{R_{TEGi}} & \text{if } 0 \leq V_{Li} \leq \frac{I_{sci}}{V_{oci}} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

где $i=1,2,...,N$, и все вышеупомянутые переменные указаны в разделе номенклатуры.

Выходные данные, полученные от i -го модуля, можно выразить следующим образом.

$$P_{TEGi} = \begin{cases} V_{Li} I_i = I_{sci} V_{Li} - \frac{I_{sci}}{R_{TEGi}} & \text{if } 0 \leq V_{Li} \leq \frac{I_{sci}}{V_{oci}} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

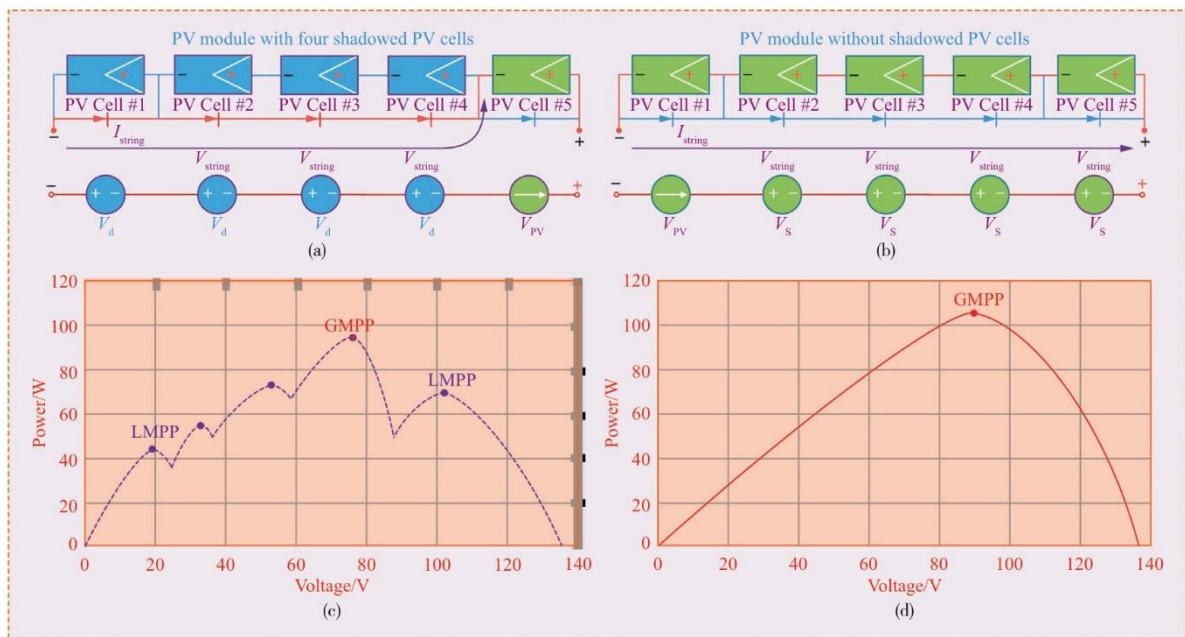


Рис. 2. Схема фотоэлектрических элементов в (а) затененном и (б) незатененном состоянии. Характеристическая кривая фотоэлектрических элементов (в) в условиях ЧЗ или (г) без него.

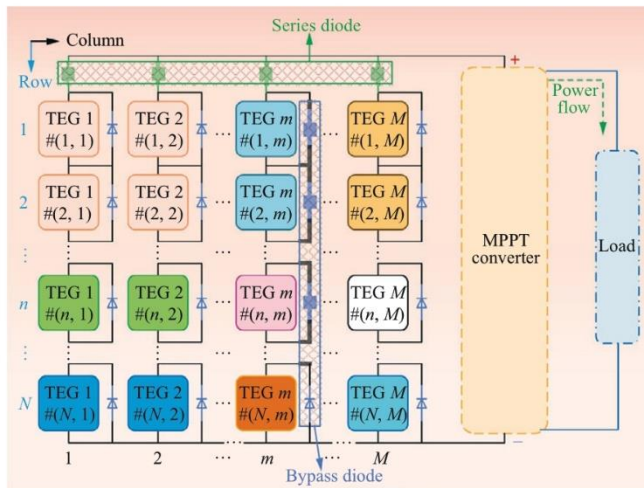


Рис. 3. Схема конструкции термоэлектрического генератора с параллельным и последовательным соединениями,

где P_{TEGi} обозначает выходную мощность i -го термоэлектрического генератора.

Суммарную выходную мощность всего термоэлектрического генератора, по сути равную сумме выходной мощности отдельных модулей, можно записать следующим образом:

$$P_{TEG\Sigma} = \sum_{i=1}^N P_{TEGi} \quad (4)$$

1.4 Гибридная система ФЭ-ТЕГ

При детальном изучении инженерной практики использование последовательно-параллельных (ПП) соединений, широко распространенных и применяемых в фотоэлектрических системах генерации электроэнергии, показало заметные ограничения, особенно при воздействии ЧЗ, из-за фундаментальной зависимости от равномерного солнечного излучения по всей матрице. В отличие от этого, матрицы, состоящие из ТЭГ, демонстрируют заметную устойчивость в аналогичных условиях, подтверждая тем самым их адаптируемость и пригодность в средах, характеризующихся НРТ. Важно подчеркнуть, что в данном исследовании для стратегического проектирования их конфигураций было преднамеренно выбрано ППС соединение для фотоэлектрической матрицы и ПП соединений для матрицы ТЭГ [38]. Кроме того, в гибридную систему, помимо повышающих цепей, была тщательно интегрирована пара контроллеров ОТММ для достижения синергетической интеграции энергии, получаемой от обоих типов матриц, как подробно показано на рис. 4. Стоит отметить, что внутренние параметры гибридной системы мало влияют на результаты оптимизации предлагаемого метода и имеют широкую область применения. Выходная мощность гибридной системы в основном зависит от количества фотоэлектрических и термоэлектрических панелей, входящих в ее состав, а также от внешних факторов окружающей среды, таких как изменение солнечной радиации, температуры и ЧЗ.

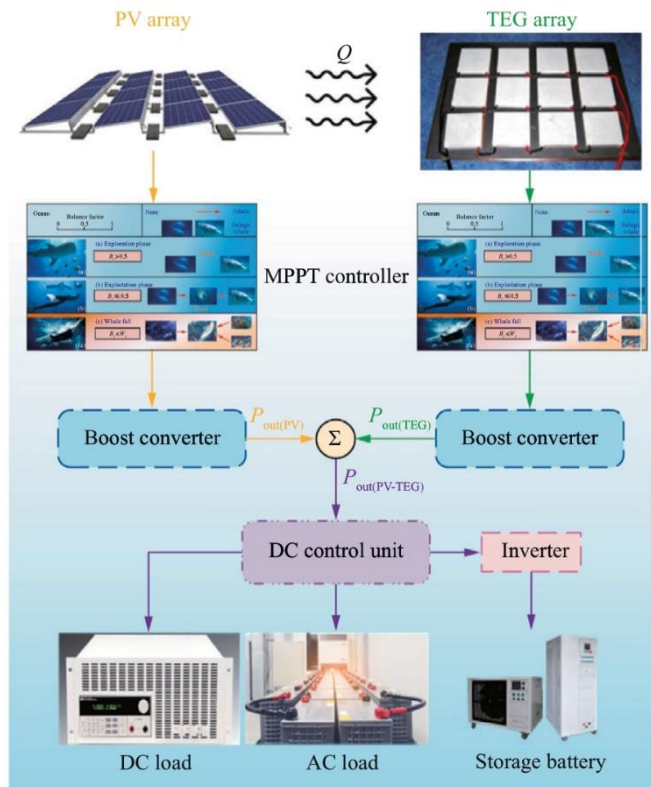


Рис. 4. Схема работы гибридной системы ФЭ-ТЭГ с контроллером ОТММ.

Благодаря интеграции фотоэлектрических и термоэлектрических систем, неиспользованное тепло, генерируемое фотоэлектрической системой, может быть эффективно использовано повторно, в то время как термоэлектрическая система предлагает способ повышения эффективности работы фотоэлектрических модулей за счет механизма охлаждения. Для управления тепловым взаимодействием между двумя модулями в предыдущем исследовании [33] объясняется, что влажность на нагретой стороне термоэлектрического генератора зависит от комбинации факторов, включая температуру окружающей среды (T_{am}), скорость ветра (W_s) и интенсивность солнечного излучения (G_T). Это многофакторное влияние математически может быть представлено следующим образом:

$$T_{am} = 0.943T_a + 0.028G_T - 1.528W_s + 4.3 \quad (5)$$

На рис. 1 показано, что модуль термоэлектрического генератора стратегически настроен таким образом, что его нагретая сторона расположена под фотоэлектрическим модулем, что, следовательно, обеспечивает температуру холодной стороны, эквивалентную температуре T_{am} .

Суммарная выходная мощность включает в себя суммарную энергию, вырабатываемую фотоэлектрическими и термоэлектрическими установками, и может быть выражена следующим образом:

$$P_{PV-TEG} = P_{PV} + P_{TEG} \quad (6)$$

Кроме того, существует четкая связь между эффективностью преобразования энергии гибридной системы и эффективностью двух изолированных систем, которая выражается следующим образом:

$$\eta_{PV-TEG} = \frac{P_{PV} + P_{TEG}}{G_T \times A_{PV}} \quad (7)$$

где A_{PV} — площадь фотоэлектрической панели.

2 FDBBWO

Глобальная способность алгоритма оптимизации на основе алгоритма белухи к поиску решений обеспечивается разнообразием и бессистемностью поиска на этапе исследования. На этапе эксплуатации основными целями являются оптимизация найденных решений и дальнейшее повышение вероятности приближения к глобальной точке максимальной мощности (ГТММ) путем применения стратегии улучшения FDB. Способность предотвратить попадание решения в локальный оптимум при ЧЗ зависит от эффективного управления на этапе поиска решений. Ввиду превосходства алгоритма FDBBWO в поиске ГТММ, в данном исследовании в качестве условия завершения было принято максимальное количество повторов.

2.1 Математическая модель алгоритма оптимизации на основе алгоритма белухи

Алгоритм оптимизации на основе алгоритма белухи, представленный в 2022 году в работе, описанной в [39], черпает вдохновение из особенностей поведения белух в океане, в частности, их плавания, хищного образа жизни и падения кита. На рис. 5 визуальны представлены три характерных типа поведения белух, интегрированные в алгоритм оптимизации на основе алгоритма белухи, где этапы плавания, поиска пищи и падения кита соответственно связаны с фазами исследования, эксплуатации и падения кита. Критерии завершения алгоритма оптимизации на основе алгоритма белухи обычно устанавливаются в двух случаях: значение приспособленности между несколькими повторами меньше определенного значения или достигнуто максимальное количество повторов.

Алгоритм оптимизации на основе алгоритма белухи включает три ключевых этапа: глобальное исследование, локальную эксплуатацию и отлов китов. Для разумного регулирования равновесия между всеобъемлющим глобальным исследованием и детальной локальной эксплуатацией в рамках алгоритмического процесса была введена переменная B_f , определяемая как коэффициент симметрии:

$$B_f = B_0 \left(1 - \frac{T}{2T_{\max}} \right) \quad (8)$$

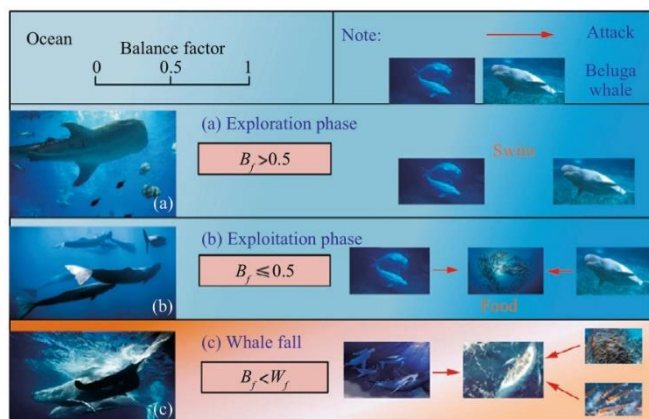


Рис. 5. Поведенческие характеристики белух, а именно: (а) плавание, (б) поиск пищи и (в) падение кита, включенные в алгоритм оптимизации на основе алгоритма белухи.

где T обозначает текущее число повторов, $T_{\max}$ — максимальное число повторов, а B_0 — случайное числовое значение в интервале $(0,1)$, с помощью которого можно исследовать динамику функциональности алгоритма оптимизации на основе алгоритма белухи. Когда значение B_f превышает пороговое значение 0,5, алгоритм оптимизации на основе алгоритма белухи выполняет макроскопическую стратегию глобального поиска. И наоборот, если оно падает ниже этого порога, алгоритм переходит к выполнению локальной, более точной эксплуатации.

(1) Этап исследования

Уточнение местоположения каждой белухи во время плавания определяется двумя уравнениями. Уравнение (9) используется, когда параметры, подлежащие оптимизации, составляют менее одной пятой от общего числа параметров, тогда как уравнение (10) используется для поиска новых точек решения, когда это условие не выполняется. Процесс обновления выглядит следующим образом:

$$X_{i,p_1}^{T+1} = X_{i,p_1}^T + (X_{r,p_1}^T - X_{i,p_1}^T)(1 + r_1) \sin(2\pi r_2) \quad (9)$$

$$X_{i,p_2}^{T+1} = X_{i,p_2}^T + (X_{r,p_2}^T - X_{i,p_2}^T)(1 + r_1) \sin(2\pi r_2)$$
$$X_{i,j}^{T+1} = \begin{cases} X_{i,p_j}^T + (X_{r,p_1}^T - X_{i,p_j}^T)(1 + r_1) \sin(2\pi r_2) & j = \text{even} \\ X_{i,p_j}^T + (X_{r,p_2}^T - X_{i,p_j}^T)(1 + r_1) \sin(2\pi r_2) & j = \text{odd} \end{cases} \quad (10)$$

Определения всех параметров в вышеупомянутых уравнениях совпадают с определениями в [39].

(2) Этап эксплуатации

В основе этапа эксплуатации алгоритма оптимизации на основе алгоритма белухи лежат принципы, заложенные в результате тщательного наблюдения за стратегиями хищного образа жизни, применяемыми белугами в их естественной среде обитания. Для повышения сходимости алгоритм использует стратегию полета Леви, которая моделируется следующим образом:

$$X_i^{T+1} = r_3 X_{\text{best}}^{T+1} - r_4 X_i^T + C_1 L_F (X_r^T - X_i^T) \quad (11)$$

$$L_F = 0.05 \times \frac{u \times \sigma}{|v|^{1\beta}} \quad (12)$$

$$\sigma = \left(\frac{\tau(1 + \beta) \times \sin(\pi\beta/2)}{\tau((1 + \beta)/2) \times \beta \times 2^{(\beta-1)/2}} \right)^{1\beta} \quad (13)$$

где определение каждой переменной такое же, как в [39].

(3) Падение кита

К сожалению, при двух других поведенческих особенностях белухи могут погибнуть и опуститься на морское дно, образуя так называемый «китовый массив», поддерживающий новую экологическую систему. Этот процесс падения одной белухи и появления на её месте новой особи, пополняющей популяцию, можно математически представить следующим образом:

$$X_i^{T+1} = r_5 X_i^T - r_6 X_r^T + r_7 X_{\text{step}} \quad (14)$$

$$X_{\text{step}} = (u_b - l_b) \exp(-(2W_f nT)/T_{\max}) \quad (15)$$

$$W_f = 0.1 - \frac{0.05T}{T_{\max}} \quad (16)$$

где определения всех переменных такие же, как в [39].

2.2 Математическая модель FDB

В предыдущем исследовании [40] показатель FDB использовался в качестве стратегии на этапе уточнения МЭА с целью нахождения оптимального варианта. В рамках подхода FDB используются две ключевые метрики: значение приспособленности, которое получается путем оценки различных функций приспособленности каждого решения-кандидата, и пространственное евклидово расстояние, которое измеряет расстояние между заданными решениями. Как и в случае с

условиями завершения алгоритма оптимизации на основе алгоритма белухи, для условий завершения FDB массово используются два случая.

Для успешного объединения FDB в рамках МЭА был применен систематический подход. Сначала были определены точное положение и соответствующее значение пригодности каждого объекта в пределах области исследования. Затем, упорядочив показатели пригодности, был выявлен объект с наиболее благоприятной пригодностью. На заключительном этапе была проведена оценка относительного расстояния, отделяющего каждый объект от этого идентифицированного оптимального аналога.

$$D_{pi} = \sqrt{\sum_{j=1}^d (P_{i,j} - P_{best,j})^2} \quad (17)$$

где P_{best} — оптимальное индивидуальное значение, P_i — позиция индивидуального значения, для которого рассчитывается расстояние, а d — количество неизвестных параметров.

Перед вычислением оценки FDB для каждой точки решения необходимо было нормализовать вектор D_p следующим образом.

$$\text{norm}D_p = \frac{D_p - \min(D_p)}{\max(D_p)} \quad (18)$$

Аналогичным образом, значение функции пригодности F , соответствующее точке решения, также было нормализовано следующим образом:

$$\text{norm}F = \frac{F - \min(F)}{\max(F)} \quad (19)$$

Показатель FDB определялся с использованием коэффициента влияния w . При проведении исследовательских тестов FDB значение w обычно принималось равным 0,5. Вектор S_p показателя FDB можно выразить следующим образом:

$$S_{p_i} = w\text{norm}F_i + (1 - w)\text{norm}D_{p_i} \quad (20)$$

После вычисления вектора S_p в данном исследовании был использован метод выбора с помощью рулетки. Этот выбор отличается от традиционного метода выбора точки решения с наивысшим баллом FDB.

3 Принцип работы ОТММ на основе FDBBWO для гибридной системы ФЭ-ТЭГ

3.1 Модель ФЭ-ТЭГ с ОТММ-контроллером под управлением ЧЗ

При определенных метеорологических условиях выходное напряжение, получаемое от фотоэлектрических и термоэлектрических систем, становится переменной, подлежащей оптимизации. Механизм управления ОТММ играет важную роль в определении оптимального коэффициента заполнения, параметра, неразрывно связанного с пиковым значением выходного напряжения [41]. Впоследствии этот определенный коэффициент заполнения направляется на биполярный транзистор с изолированным затвором (БТИЗ), правильно подготавливая его к следующему циклу управления. Конечная пригодность в каждой точке управления может быть точно определена путем объединения реальных данных о напряжении и токе следующим образом:

$$\min f(V_{PV}) = -P_{out}(V_{PV}) = -V_{PV}I_{PV}(V_{PV}) \quad (21)$$

$$\text{s.t. } V_{PV}^{\min} \leq V_{PV} \leq V_{PV}^{\max} \quad (22)$$

где P_{out} представляет собой активную мощность, совместно вырабатываемую всеми фотоэлектрическими установками.

$$V_{PV}^{min} \text{ и } V_{PV}^{max}$$

представляют собой, соответственно, минимальные и максимальные ограничения выходного напряжения фотоэлектрической установки, определяющие граничные условия, в рамках которых работает выходное напряжение.

Процедура расчета функции пригодности для термоэлектрических генераторов аналогична той, что используется для фотоэлектрических систем, и может быть выражена следующим образом:

$$\min f(V_{TEG}) = -P_{out}(V_{TEG}) = -V_{TEG}I_{TEG}(V_{TEG}) \quad (23)$$

$$\text{s.t. } V_{TEG}^{min} \leq V_{TEG} \leq V_{TEG}^{max} \quad (24)$$

Здесь P_{out} — активная мощность, получаемая от комплексного термоэлектрического генератора.

$$V_{TEG}^{min} \text{ и } V_{TEG}^{max}$$

Параметры представляют собой, соответственно, минимальные и максимальные ограничения выходного напряжения системы ТЭГ и устанавливают допустимый рабочий диапазон электрического выходного напряжения.

3.2 Повышающий преобразователь

Повышающий преобразователь, часто характеризуемый как неизолированный преобразователь, специально предназначенный для усиления входного напряжения, имеет важное значение в области технологии ОТММ [42], что особенно заметно в двухфазных системах фотоэлектрических и термоэлектрических генераторов. Причины его признания включают в себя его простую структурную конфигурацию и беспрецедентную эффективность преобразования, как указано в [43]. Для дальнейшего пояснения этих свойств на рис. 6 представлена схема архитектуры ОТММ, основанная на подходе FDBBWO, с акцентом на ее работу в фотоэлектрической системе с термоэлектрическим генератором, подверженной воздействию ЧЗ, с использованием возможностей повышающего преобразователя.

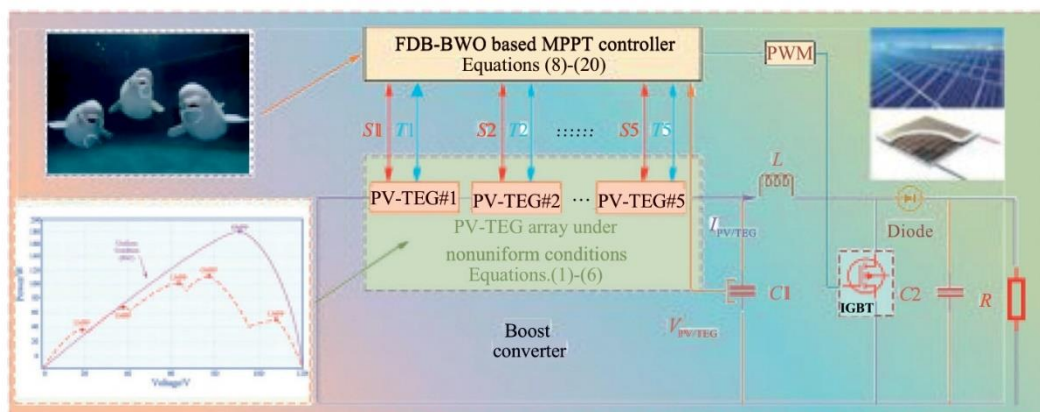


Рис. 6. Схема, демонстрирующая принцип работы гибридной системы ФЭ-ТЭГ, включающей FDBBWO с контроллером ОТММ в рамках ЧЗ.

Визуальное представление принципа работы гибридной системы ФЭ-ТЭГ показано на рис. 6. На этом рисунке $V_{PV/TEG}$ представляет напряжение, возникающее в результате работы конфигурации ФЭ/ТЭГ. V_{out} представляет напряжение, связанное с усилением цепи. Параметры f и T обозначают частоту переключения, соответствующую БТИЗ и последующему циклу управления, соответственно.

I_p и $I_{p \max}$ представляют собой стандартный и максимальный токи, протекающие через индуктор L . Следующий подход, используемый для определения значений V_{out} , индуктора L и емкости фильтра C_1 , выраженных уравнениями (25)-(27), подробно описан в последующих разделах:

$$V_{out} = \frac{V_{PV/TEG}}{1 - DC} \quad (25)$$

$$L = \frac{V_{out}}{4I_{p \max} \times f} \quad (26)$$

$$C_1 = L \times \frac{(I + I_{p \max}/2)^2 - (I - I_{p \max}/2)^2}{(V_{in} + 0.005V_{in})^2 - (V_{in} - 0.005V_{in})^2} \quad (27)$$

Следует подчеркнуть, что конструкция фильтрующего конденсатора в первую очередь направлена на уменьшение влияния пульсаций тока, побочного эффекта работы индуктора, на производительность фотоэлектрического блока [44]. Подробный анализ параметров, связанных с цепью усиления, специально разработанной для двух подсистем, присущих гибридной установке ФЭ-ТЭГ, можно увидеть в таблице 1. В целом, нельзя игнорировать тот факт, что DC-DC преобразователи по своей природе сталкиваются с рассеиванием мощности. КПД, связанный с ОТММ, можно выразить как

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{PV-TEG}(t)}{P_{max}(t)} \times 100\% \quad (28)$$

В заданный момент времени t гибридная система достигает определенной выходной мощности, $P_{PV-TEG}(t)$. Максимальная мощность, достижимая гибридной системой в этот конкретный момент времени, представлена другим параметром.

Таблица 1. Настройка параметров цепи усиления.

Parameter	PV system	TEG system
Capacitor	$C_1 = C_2 = 1 \mu F$	$C_1 = 66 \mu F, C_2 = 200 \mu F$
Inductor (L)	500 mH	250 mH
Resistive load (R)	200 Ω	10 Ω
Switching frequency	100 kHz	$f_s = 20$ kHz

3.3 Общая процедура

В рамках гибридной системы ФЭ-ТЭГ, работа ОТММ органично интегрирует различные методы, присущие каждой подсистеме. Такой подход подчеркивает важность стратегии ОТММ, не основанной на моделях, которая опирается на точное измерение двух критически важных параметров, а именно напряжения и тока, что требует отдельных, но совместимых контроллеров ОТММ для компонентов ФЭ и ТЭГ. Стоит отметить, что после тестирования третья стратегия улучшения показала наиболее желаемые результаты оптимизации, поэтому все исследования проводились в рамках случая 3 в FDBBWO.

4 Практические примеры

В этом разделе оценки представлены четыре различных теста: (i) оценка влияния ступенчатых изменений солнечной радиации при постоянной температуре, (ii) исследование влияния постепенных изменений солнечной радиации и температуры, (iii) анализ производительности гибридной системы при случайных колебаниях солнечной радиации и (iv) использование реальных данных, отражающих типичные условия солнечной радиации и температуры в Гонконге. Кроме того, для тщательного сравнительного анализа были использованы традиционные методологии, а именно ПВП, ВиН, гибридный метод оптимизации «мотылек-пламя» и постепенно возрастающей

проводимости (ОМП-ПВП), а также четыре других алгоритма МЭА, включая оптимизатор экспоненциального распределения (ОЭР), многокольцевой алгоритм (МКА), алгоритм поиска рептилий (АПР) и алгоритм оптимизации на основе алгоритма белухи. В экспериментальном моделировании комбинации модели и алгоритмов использовалась платформа SimuNPS, реализованная в виде скрипта на языке Python. Оптимальные параметры для всех сравниваемых методов были гарантировано тщательно проверены. Для проверки достоверности решения был выполнен ряд комплексных экспериментальных процедур. Эта мера обеспечила целостность решения и скорость вычислений.

Кроме того, для более наглядной оценки результатов оптимизации, полученных с помощью различных методологий в гибридной системе ФЭ-ТЭГ, были введены два индекса, описанные ниже и предназначенные для вычисления колебаний мощности [45]: где определения параметров совпадают с определениями в [46]. В практических приложениях метод ОТММ на основе FDBBWO не требует больших инвестиций в оборудование или сложной программной среды, а сложность разработки умеренная. FDBBWO и контроллер ОТММ были разработаны на платформе SimuNPS, проектирование выполнил Shanghai KeLiang, а встроенный алгоритм ОТММ был реализован с использованием Arduino в качестве контроллера ОТММ.

$$\Delta v^{\text{avg}} = \frac{1}{T} \sum_{t=2}^T \frac{|P_{\text{out}}(t) - P_{\text{out}}^{\text{avg}}|}{P_{\text{out}}^{\text{avg}}} \quad (29)$$

$$\Delta v^{\text{max}} = \max_{t=2,3,\dots,T} \frac{|P_{\text{out}}(t) - P_{\text{out}}^{\text{avg}}|}{P_{\text{out}}^{\text{avg}}} \quad (30)$$

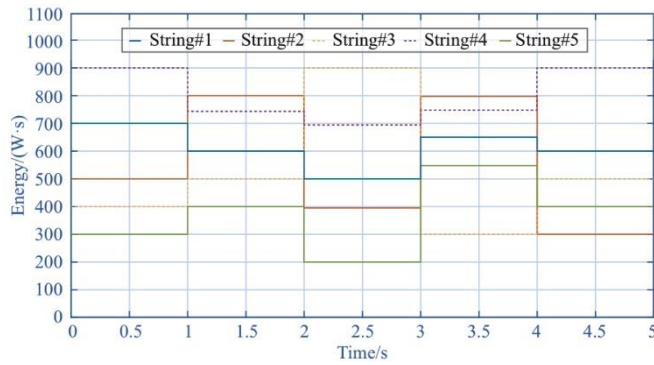


Рис. 7. Изменение солнечной радиации под воздействием ЧЗ.

4.1 Изменение солнечной радиации при постоянной температуре

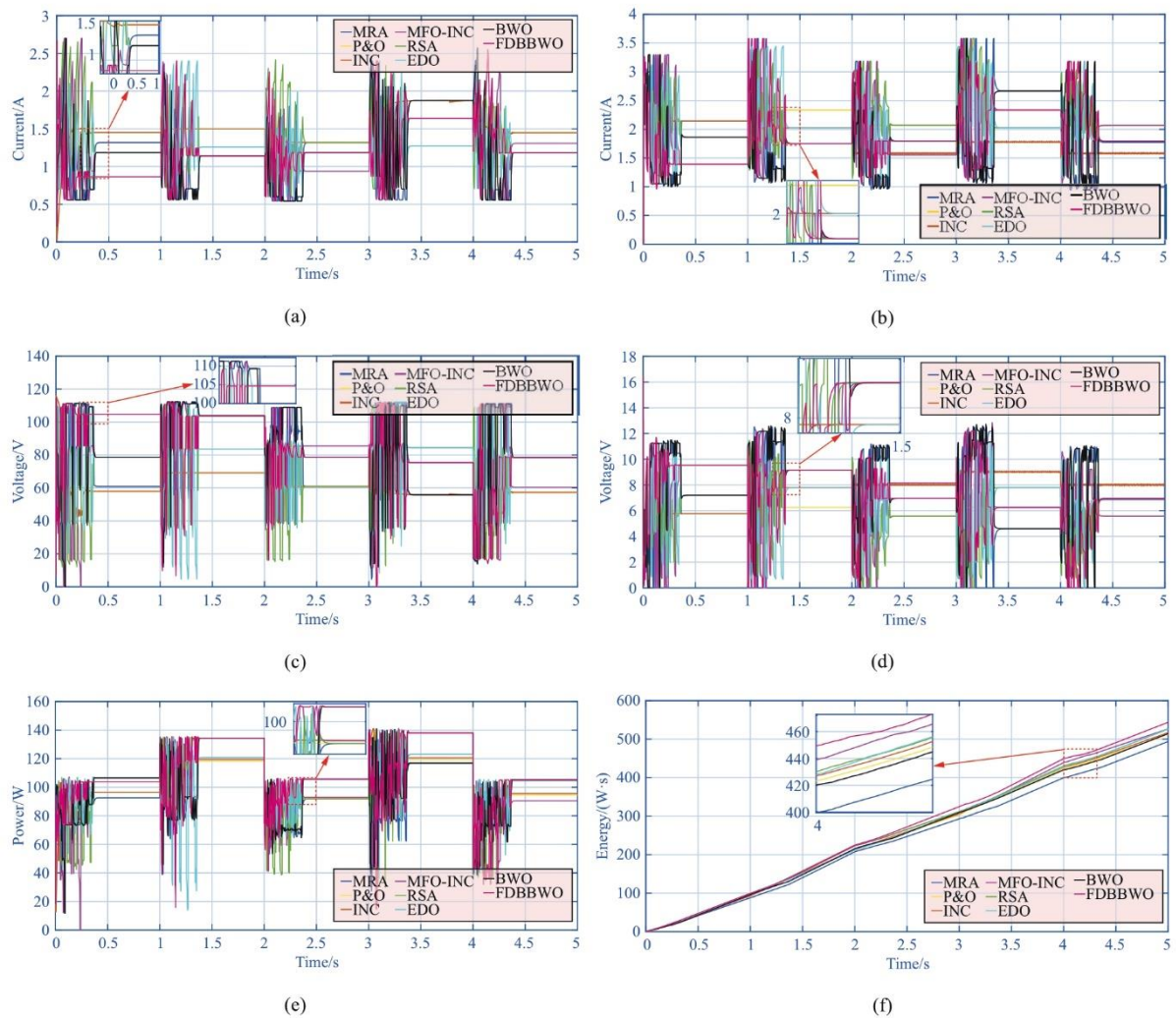


Рис. 8. Результаты проверки запуска с использованием восьми методов на основе гибридной системы ФЭ-ТЭГ: (а) токовые кривые фотоэлектрической и (b) термоэлектрической генераторной систем, (с) кривые напряжения фотоэлектрической и (d) термоэлектрической генераторной систем, и (е) мощность и (f) энергия, генерируемые гибридной системой ФЭ-ТЭГ.

В этом разделе описываются результаты моделирующих исследований, изучающих влияние изменений облачного покрова на эффективность выработки электроэнергии фотоэлектрической

25 °C

термоэлектрической батареей при постоянной температуре окружающей среды. Как показано на рис. 7, каждый фотоэлектрический блок испытывает отчетливое ступенчатое изменение солнечной радиации в соответствии с (5). Скорость ветра (W_s) была зафиксирована на уровне 1,5 м/с на протяжении всех этих наблюдений. Результаты оптимизации, наблюдаемые в условиях ступенчатого освещения, представлены на рис. 8. Тщательный анализ рис. 8(a) – 8(d) показывает, что каждый конкретный график подтверждает наблюдение, что FDBBWO демонстрирует замечательную скорость сходимости и стабильность, превосходя другие оцененные методы. Кроме того, рис. 8(e) показывает, что FDBBWO удается достичь оптимальной выходной мощности при различных входных условиях на пяти этапах. В дополнение, рис. 8(f) ясно демонстрирует, что среди всех оцененных методов FDBBWO достигает наивысшей выходной энергии, регистрируя пиковую энергию 542,12 Вт·с. Это превосходит выходные показатели алгоритма оптимизации на основе алгоритма белухи и МКА на 3,6% и 11,41% соответственно. Одновременно, как показано в таблице 2, колебания мощности (ΔV^{avg} и ΔV^{max}), демонстрируемые FDBBWO, наименее выражены среди всех методов, протестированных в данном исследовании, при

этом ΔV^{avg} составляет всего 14,37% от АПР. Кроме того, FDBBWO обладает наименьшими колебаниями мощности: ΔV^{avg} и ΔV^{max} составляют 0,0144 % и 0,0057 % соответственно, и после сходимости не наблюдается проблем с колебаниями или качаниями мощности вблизи глобальной точки максимальной мощности. Эти превосходные показатели в генерации энергии, наряду с уменьшенными колебаниями мощности, обусловленными FDBBWO, в совокупности подчеркивают эффективность подхода FDBBWO в приложениях ОТММ.

4.2 Резкие изменения солнечной радиации и температуры

В условиях практического проектирования иногда возникают сценарии, когда движение слоев облаков происходит постепенно, что приводит к медленному изменению света и температуры окружающей среды, поглощаемых гибридной системой ФЭ-ТЭГ. Для того чтобы достоверно имитировать этот эффект ЧЗ, изменения интенсивности излучения и температуры окружающей среды рассматривались как постепенные, восходящие сдвиги, чтобы смоделировать реакцию FDBBWO на такие обстоятельства. В этом тесте скорость ветра W_s была зафиксирована на уровне 1,5 м/с. Кроме того, температура горячей стороны ТЭГ также претерпевала ступенчатое изменение, рассчитанное с использованием (5), в то время как температура холодной стороны была

25 °C

зафиксирована на уровне . На рис. 9 показана конфигурация интенсивности света и температуры для гибридной системы, а на рис. 10 — результаты оптимизации в реальном времени, полученные с помощью семи различных методов. Локальные прямоугольные диаграммы на рис. 10(a) — 10(d) показывают, что FDBBWO имеет более высокую скорость сходимости, а на рис. 10(f) показано, что FDBBWO достигает максимальной выходной энергии 1440,09 Вт·с, что составляет 105,05 % от алгоритма оптимизации на основе алгоритма белухи и 106,63 % от ОЭР соответственно. Кроме того, результаты в таблице 2 показывают, что FDBBWO имеет наименьшие колебания мощности (ΔV^{avg} и ΔV^{max}), что указывает на большую способность к глобальному поиску и большую стабильность этого метода по сравнению с другими методами.

4.3 Влияние вероятностного солнечного излучения

Для моделирования сценариев, типичных для летних условий в течение 12-часового светового дня, были протестированы модели, включающие непрерывное и, казалось бы, спонтанное излучение, и полученные результаты показаны на рис. 11. На горячей стороне модуля ТЭГ в течение 12 часов наблюдались постоянные и случайные температурные колебания, обусловленные параметрами

25 °C

(5), при этом обеспечивалась стабильная температура на его холодной стороне. На рис. 11 показана кривая случайного изменения пяти групп входной солнечной радиации в гибридной системе ФЭ-ТЭГ. При более внимательном рассмотрении рис. 12(b) отчетливо видно, что мощность и энергия, генерируемые методом FDBBWO, всегда превосходят другие конкурирующие методы. Более того, метод FDBBWO обеспечивает максимальную выходную мощность, превосходящую показатели ПВП и МКА на 10,90% и 12,21% соответственно. Разброс выходной мощности указывает на то, что FDBBWO способен достигать намного более высокой выходной мощности даже при незначительных колебаниях мощности, вызванных текущими, случайными и непрерывными изменениями радиации. Следует отметить, что колебания мощности,

ΔV^{avg} и ΔV^{max}

т.е., в методе FDBBWO не всегда демонстрирует самые низкие значения в данных условиях. Последовательные, постепенные изменения интенсивности излучения позволяют другим методам более плавно сходиться к точке максимальной мощности, в то время как FDBBWO непрерывно ищет точку пиковой мощности, движимый своим механизмом усиления на основе FDB.

Таблица 2. Статистические данные о результатах операций в четырех тематических исследованиях, полученные с использованием восьми различных методов, сравниваемых в данном исследовании.

Scenes	Indices	EDO	INC	MFOINC	MRA	P&O	RSA	BWO	FDBBWO
Variations in solar irradiation at constant temperature	Energy / (W·s)	526.37	516.99	527.00	493.95	512.04	527.57	514.41	542.12
	$\Delta V^{\max} / \%$	0.0204	0.0402	0.0235	0.0744	0.0256	0.1002	0.0213	0.0144
	$\Delta V^{\text{avg}} / \%$	0.0065	0.0059	0.0066	0.0068	0.0059	0.0069	0.0063	0.0057
Climbing changes in irradiation and temperature	Energy / (W·s)	1,369.42	1,360.22	1,248.54	1,229.74	1,349.65	1,133.55	1,426.93	1,429.32
	$\Delta V^{\max} / \%$	44.24	50.11	49.32	49.63	48.99	43.57	42.39	40.23
	$\Delta V^{\text{avg}} / \%$	0.0099	0.0102	0.0120	0.0149	0.0135	0.0121	0.0097	0.0081
Stochastic change in solar irradiation	Energy / (10 ⁻⁶ kW·h)	150.29	147.03	148.35	145.31	133.84	138.47	160.51	163.05
	$\Delta V^{\max} / \%$	82.31	78.42	70.93	80.40	85.14	96.21	77.20	75.74
	$\Delta V^{\text{avg}} / \%$	17.91	19.67	18.97	20.22	19.60	28.74	20.19	18.95
Measured temperature and solar radiation information for representative days in Hong Kong	Spring	Energy / (10 ⁻⁶ kW·h)	35.69	32.84	34.55	25.58	23.96	35.58	50.28
		$\Delta V^{\max} / \%$	191.44	379.43	194.57	253.00	251.98	182.83	185.21
		$\Delta V^{\text{avg}} / \%$	17.06	26.13	17.17	20.21	19.52	16.29	16.99
	Summer	Energy / (10 ⁻⁶ kW·h)	98.73	95.26	99.26	87.41	93.34	97.73	101.17
		$\Delta V^{\max} / \%$	165.65	215.72	168.05	203.78	236.39	163.03	196.12
		$\Delta V^{\text{avg}} / \%$	22.62	27.25	22.94	23.53	28.64	22.91	27.41
	Autumn	Energy / (10 ⁻⁶ kW·h)	101.46	97.23	105.16	91.40	96.63	95.52	107.19
		$\Delta V^{\max} / \%$	166.26	144.05	125.58	149.17	194.18	344.44	263.43
		$\Delta V^{\text{avg}} / \%$	17.23	14.09	12.80	12.62	14.87	28.18	19.99
	Winter	Energy / (kW·h)	74.03	69.27	103.54	62.54	59.80	74.10	75.44
		$\Delta V^{\max} / \%$	217.72	302.35	240.49	272.59	354.68	210.27	216.72
		$\Delta V^{\text{avg}} / \%$	19.47	24.29	20.74	27.26	23.97	21.33	20.20

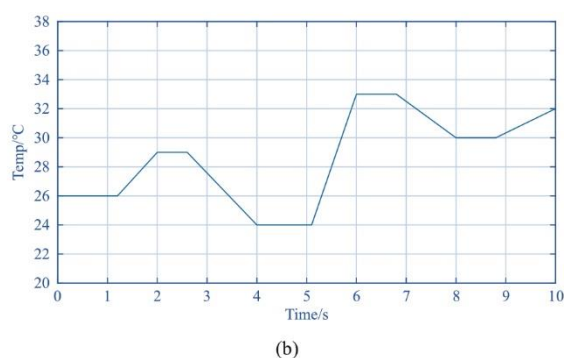
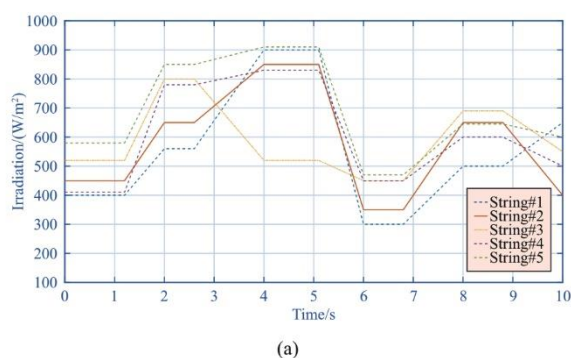


Рис. 9. Скачкообразное изменение (а) солнечного излучения и (б) температуры окружающей среды, вызванное ЧЗ.

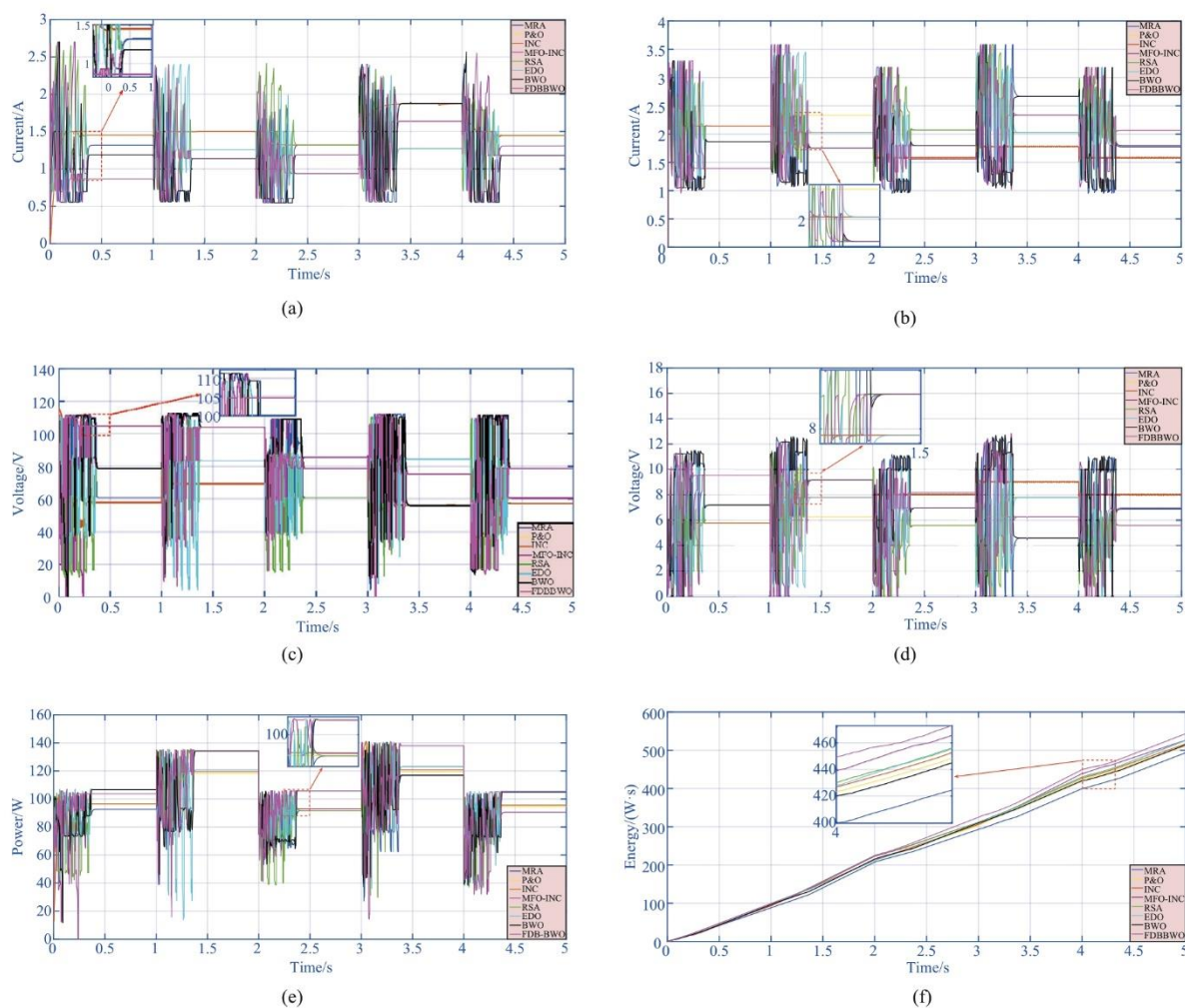


Рис. 10. Сравнительные результаты работы гибридной системы ФЭ-ТЭГ при ступенчатом изменении температуры с использованием семи различных методов: (а) токовые кривые фотоэлектрической системы и (б) термоэлектрического генератора, (с) кривые напряжения фотоэлектрической системы и (д) термоэлектрического генератора, (е) собранная мощность и (ф) энергия, полученная гибридной системой ФЭ-ТЭГ.

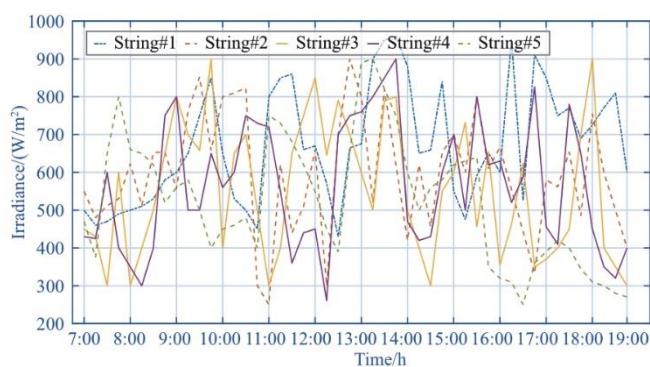
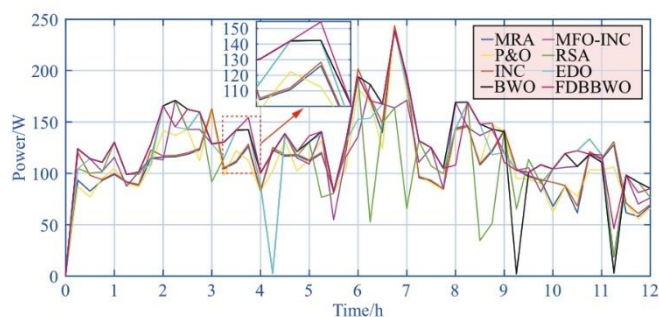
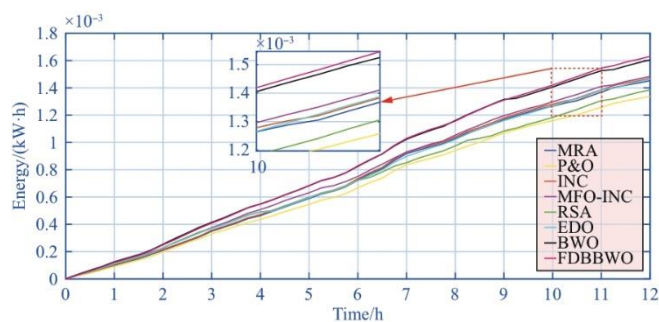


Рис. 11. Вероятностная интенсивность излучения в гибридной системе ФЭ-ТЭГ.



(a)



(b)

Рис. 12. Реакция гибридной системы ФЭ-ТЭГ, полученная при вероятностной интенсивности излучения с помощью восьми методов: (а) собранная мощность и (б) энергия, полученная гибридной системой ФЭ-ТЭГ.

4.4 Подробные данные о температуре и солнечной радиации, полученные в полевых условиях в течение стандартных дней в регионе Гонконга.

Для проверки применимости гибридной системы ФЭ-ТЭГ в реальных условиях эксплуатации был проведен сравнительный анализ восьми различных методов с использованием данных о солнечной энергии из Гонконга, расположенного в восточной части дельты реки Чжуцзян в Китае. Климат Гонконга характеризуется субтропическим муссонным режимом с дождливым летом и

температурой от 27 до $33\text{ }^{\circ}\text{C}$, и относительно сухие зимы со средней температурой

приблизительно $22.8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Этот район особенно подвержен воздействию тайфунов с

июля по сентябрь, часто зарождающихся в тропических циклонах. Для проведения этого анализа были собраны данные за четыре разных дня, соответствующих разным сезонам, с интервалом выборки данных в 10 минут. На рис. 13(а) показано географическое расположение точки сбора

данных 22.3° северной широты. На рис. 13(б) показаны измерительные приборы,

использованные в данном исследовании. Для имитации эффекта ЧЗ уровни освещенности для пяти фотоэлектрических панелей были установлены на уровне 100, 70, 50, 40 и 30 % относительно измеренных данных из Гонконга, отражая долгосрочные, последовательно уменьшающиеся изменения. Кроме того, модули ТЭГ подвергались воздействию НРТ, как описано в (5), при этом скорость ветра W рассматривалась в диапазоне 1-10 м/с.

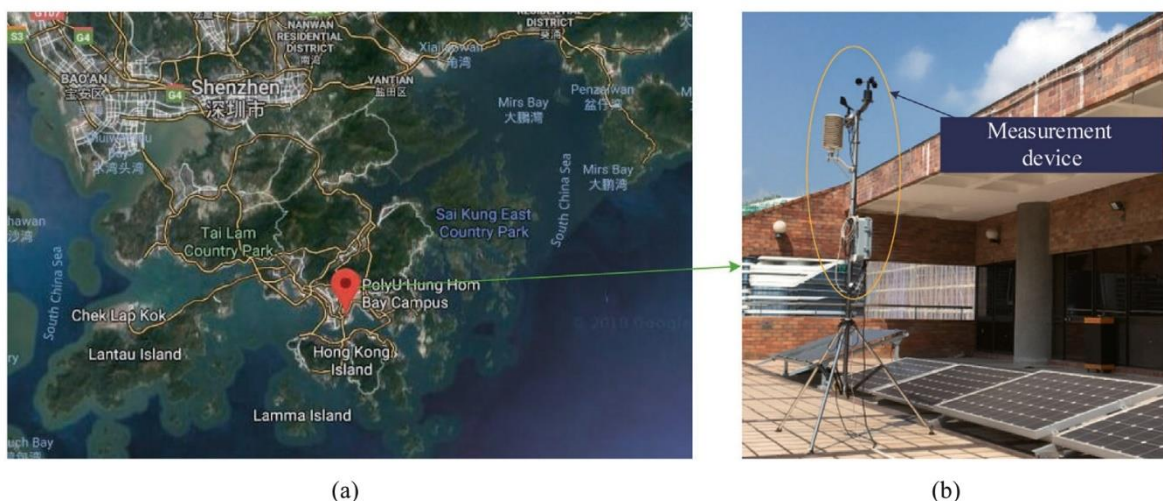


Рис. 13 (а) Географическое местоположение, откуда были собраны данные для измерения, и (б) фотография измерительного прибора.

На рис. 14(а) представлены собранные данные об освещенности, зарегистрированные в течение четырех обычных дней в районе Гонконга, а на рис. 14(б) показаны окружающие температурные условия, которые имеют решающее значение для понимания условий окружающей среды.

На рисунках 15 и 16 наглядно показаны оптимальные выходная мощность и выработка энергии, достигнутые восемью различными методами на основе реальных данных из Гонконга. Из рисунков видно, что мощность и энергия, полученные методом FDBBWO, являются самыми высокими, что подчеркивает значительные преимущества этого метода. Как видно из таблицы 2, метод МЭА демонстрирует способность достигать превосходной выходной энергии в сочетании с уменьшенными колебаниями мощности (как ΔV^{avg} , так и ΔV^{max}) по сравнению с методами ПВП и ВиН в большинстве сценариев. В частности, метод FDBBWO выделяется тем, что обеспечивает самую высокую выходную мощность во все четыре различных сезонных дня, а также демонстрирует наименьшие колебания мощности в обычные осенние и зимние дни.

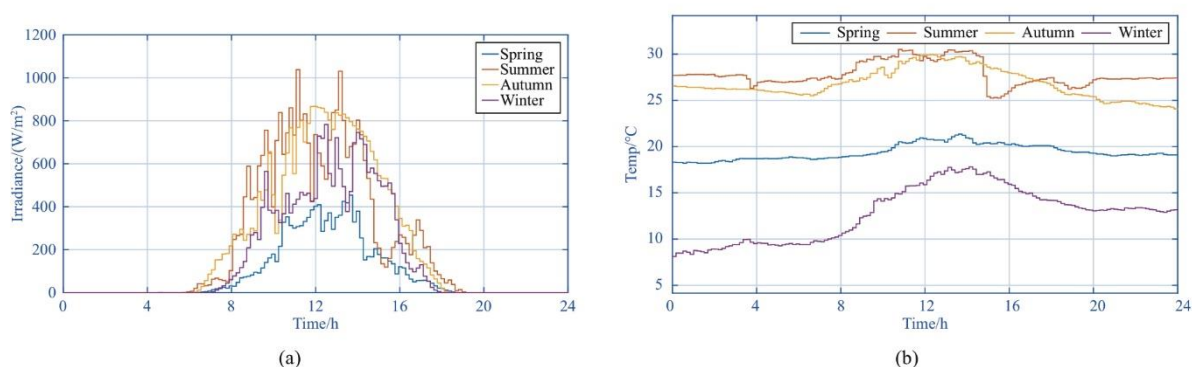


Рис. 14. Измеренные данные (а) солнечной радиации и (б) температуры в классические дни разных сезонов в районе Гонконга.

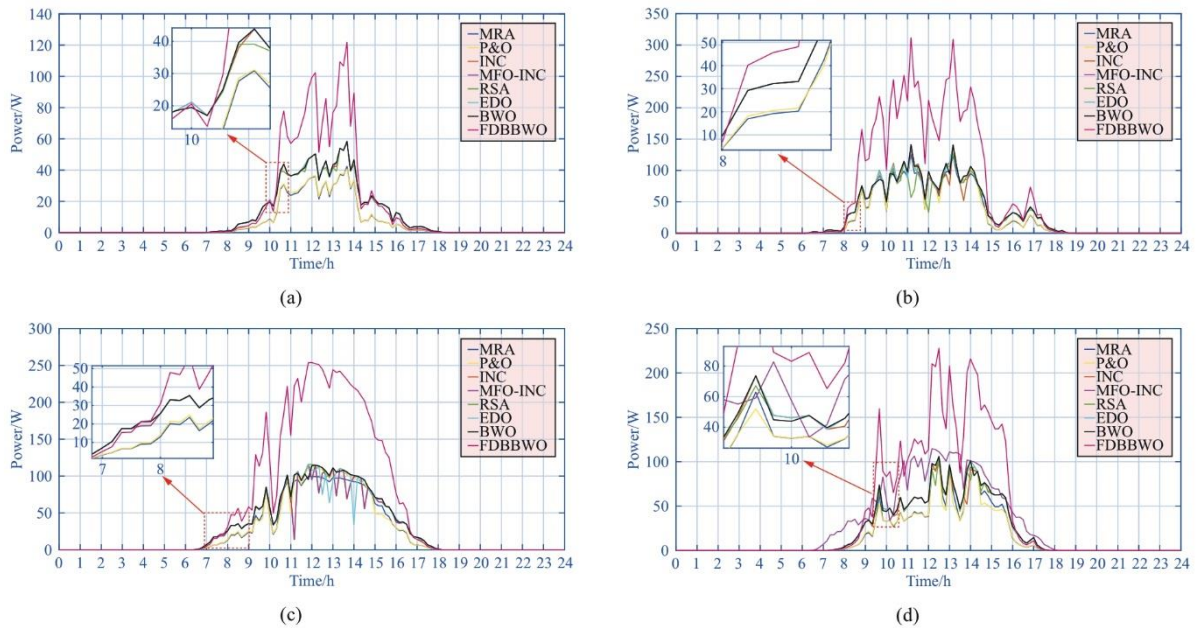


Рис. 15. Электроэнергия, вырабатываемая гибридной системой ФЭ-ТЭГ с использованием восьми методов в типичные дни весеннего, летнего, осеннего и зимнего сезонов.

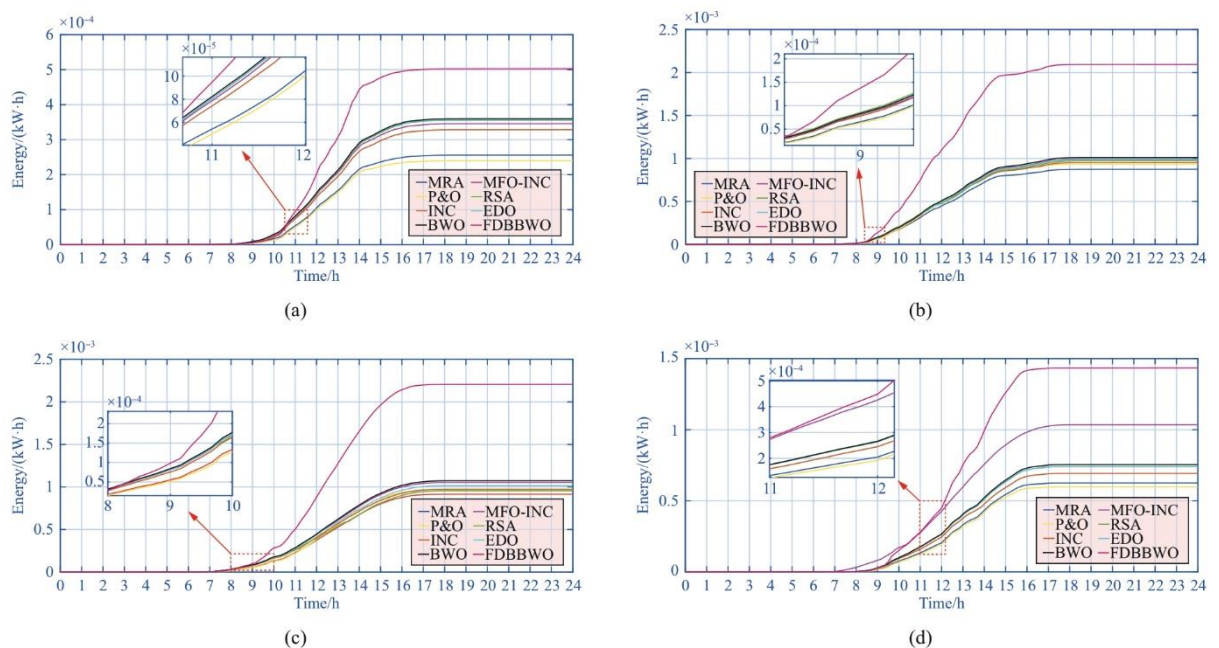


Рис. 16. Энергия, собранная гибридной системой ФЭ-ТЭГ с использованием восьми методов в типичные дни весеннего, летнего, осеннего и зимнего сезонов.

На рис. 17 показаны диаграммы размаха энергии, полученной различными методами в типичные дни четырех сезонов, среди которых FDBBWO демонстрирует эффективный и стабильный эффект оптимизации. Хотя ВиН более стабилен, чем FDBBWO в классические летние дни, получаемая им энергия значительно меньше, чем у FDBBWO, что указывает на его склонность к попаданию в ЛТММ. Кроме того, ОМП-ПВП показывает лучшие результаты, чем ПВП, с точки зрения устойчивости и оптимизации, но все же уступает FDBBWO. В сценариях с долгосрочными фактическими входными данными МЭА демонстрирует превосходные результаты по сравнению с ПВП и ВиН. Однако результаты, получаемые каждым вариантом МЭА, могут значительно различаться. Среди них FDBBWO неизменно демонстрирует наиболее высокие показатели оптимизации на протяжении

четырёх классических дней всех сезонов, подтверждая тем самым свою заметную стабильность и практичность в реальных инженерных приложениях.

4.5 Анализ чувствительности

Анализ чувствительности в основном применяется для проверки влияния изменений рабочей температуры и солнечной радиации на выходные параметры ОТММ гибридной системы, полученные с использованием различных методов. Для этой цели в данном исследовании были введены три показателя, а именно средняя выходная мощность, максимальная изменчивость и средняя изменчивость, для оценки эффективности каждого алгоритма.

Анализ чувствительности между температурой и мощностью был проведен путем установки отношения температур (0-100 %) с интервалом 5 % между отношениями интенсивности температур. На рис. 18 представлены характеристики чувствительности восьми подходов в зависимости от изменений отношения интенсивности температур, из которых видно, что выходная мощность увеличивается с увеличением отношения температур. Кроме того, при различных отношениях температур средняя и максимальная изменчивость FDBBWO показывают относительно небольшие изменения, что указывает на его высокую стабильность.

Анализ чувствительности между солнечной радиацией и мощностью был проведен путем установки диапазона от 0 до 1000 Вт/м² с интервалом интенсивности излучения 5%. Характеристики чувствительности восьми методов в зависимости от солнечной радиации показаны на рис. 19, где выходная мощность, полученная с помощью FDBBWO, всегда демонстрирует наилучшие результаты при различных соотношениях интенсивности излучения. Кроме того, средняя и максимальная изменчивость, полученная с помощью FDBBWO, превосходит другие алгоритмы. В целом, FDBBWO демонстрирует твердые результаты с точки зрения выходной мощности и колебаний мощности.

Как показано на рис. 18(а) и рис. 19(а), выходная мощность ОМП-ПВП превосходит ПВП при обоих соотношениях интенсивностей. Однако, в отличие от увеличения выходной мощности FDBBWO с увеличением соотношения, ОМП-ПВП испытывает резкое падение выходной мощности при высоких соотношениях интенсивности излучения и температуры (70-100 %), что указывает на плохую адаптивность ОМП-ПВП в реальных условиях. Хотя улучшенный ПВП демонстрирует относительно заметное улучшение выходной мощности по сравнению с ПВП, он все еще легко попадает в локальный оптимум. Кроме того, на рис. 18 и 19 простые методы, такие как ПВП и ВиН, имеют низкую выходную мощность и небольшие колебания средней и максимальной изменчивости, что подразумевает попадание решений в локальные оптимумы низкого качества при поиске оптимальных решений.

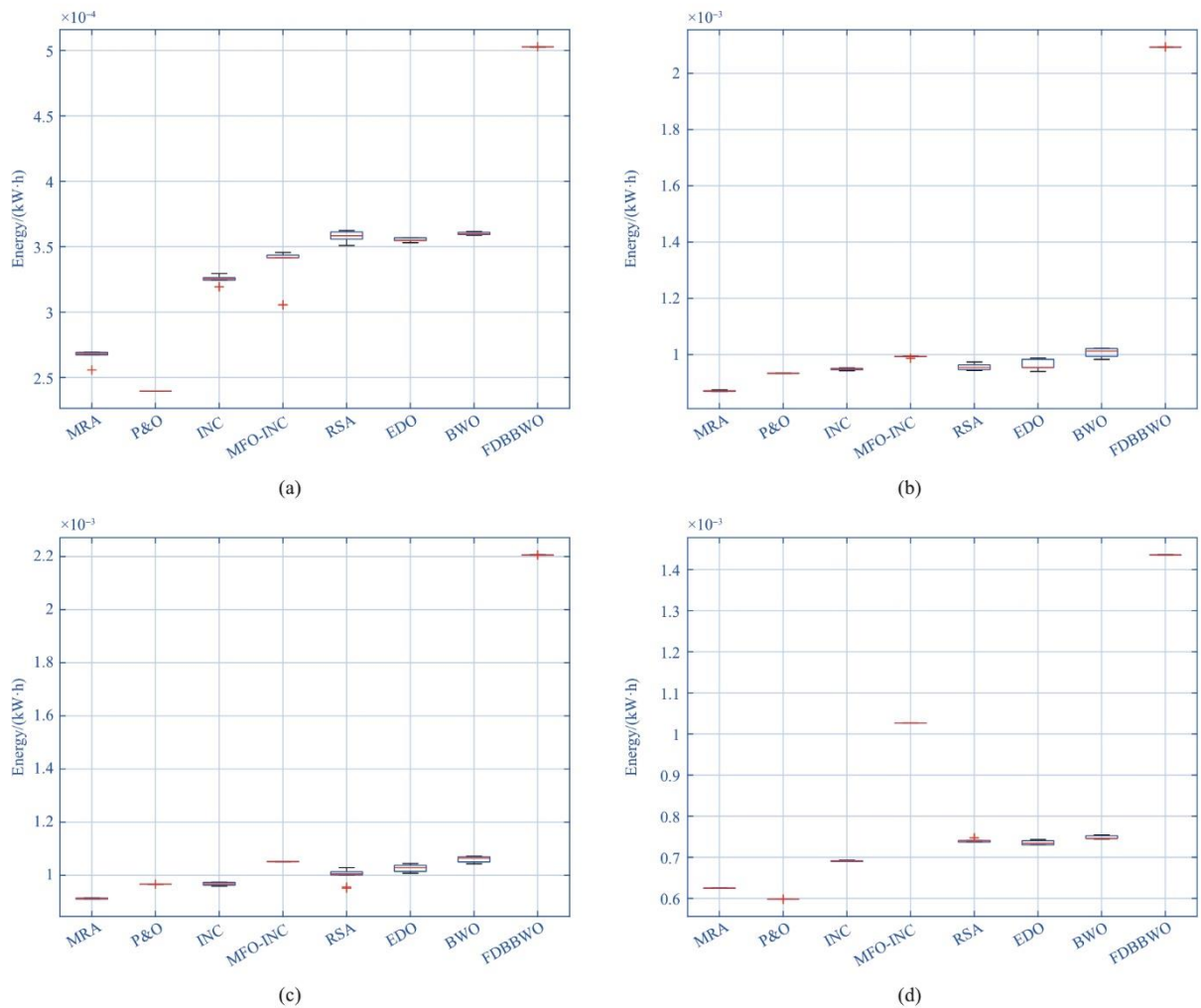


Рис. 17. Коробчатая диаграмма энергии, полученной с использованием восьми методов в (а) весенний, (б) летний, (в) осенний и (г) зимний сезоны.

4.6 Статистические результаты

В таблице 2 представлены статистические результаты, полученные при применении ОТММ к гибридной системе ФЭ-ТЭГ с использованием восьми различных подходов в разных условиях тестирования, при этом лучшие результаты выделены жирным шрифтом для наглядности. Данные показывают, что алгоритм FDBBWO равномерно обеспечивает наивысшую выработку энергии во всех условиях тестирования, что характеризуется наименьшей изменчивостью мощности (как ΔV^{avg} , так и ΔV^{max}) при ступенчатых изменениях освещенности, постепенных изменениях освещенности и температуры, а также в классические осенние и зимние дни в Гонконге. Например, в весенний день в Гонконге выработка энергии, достигнутая с помощью FDBBWO, на 139,74, 141,32, 209,85, 196,56, 145,53, 153,11 и 140,88 % выше, чем у алгоритмов оптимизации на основе алгоритма белухи, АПР, ВиН, МКА, ОМП-ПВП, ПВП и ОЭР соответственно. Эффективность оптимизации алгоритма дополнительно подтверждается при длительных интервалах времени и различных сценариях входных данных, что особенно заметно при колебаниях уровня освещенности и при анализе реальных данных из Гонконга. Методы ПВП, ВиН и четыре дополнительных метода МЭА, как правило, преждевременно сходятся к ЛТММ, что приводит к увеличению колебаний мощности (ΔV^{avg} и ΔV^{max}). В отличие от них, FDBBWO эффективно отслеживает ГТММ с наименьшими колебаниями мощности в различных условиях. Кроме того, FDBBWO не только превосходит алгоритм оптимизации на основе алгоритма белухи по выработке энергии в каждом случае, но и демонстрирует снижение колебаний мощности во всех протестированных сценариях. Например,

используя фактические данные из Гонконга, выработка энергии в FDBBWO значительно превышает выработку в алгоритме оптимизации на основе алгоритма белухи, удваиваясь в классические летние и осенние дни и почти удваиваясь в классические зимние дни. Это подчеркивает эффективность интеграции схемы FDB с алгоритмом оптимизации на основе алгоритма белухи, демонстрируя тот факт, что превосходные возможности глобальной оптимизации FDBBWO хорошо подходят для сложных требований ОТММ гибридных систем ФЭ-ТЭГ.

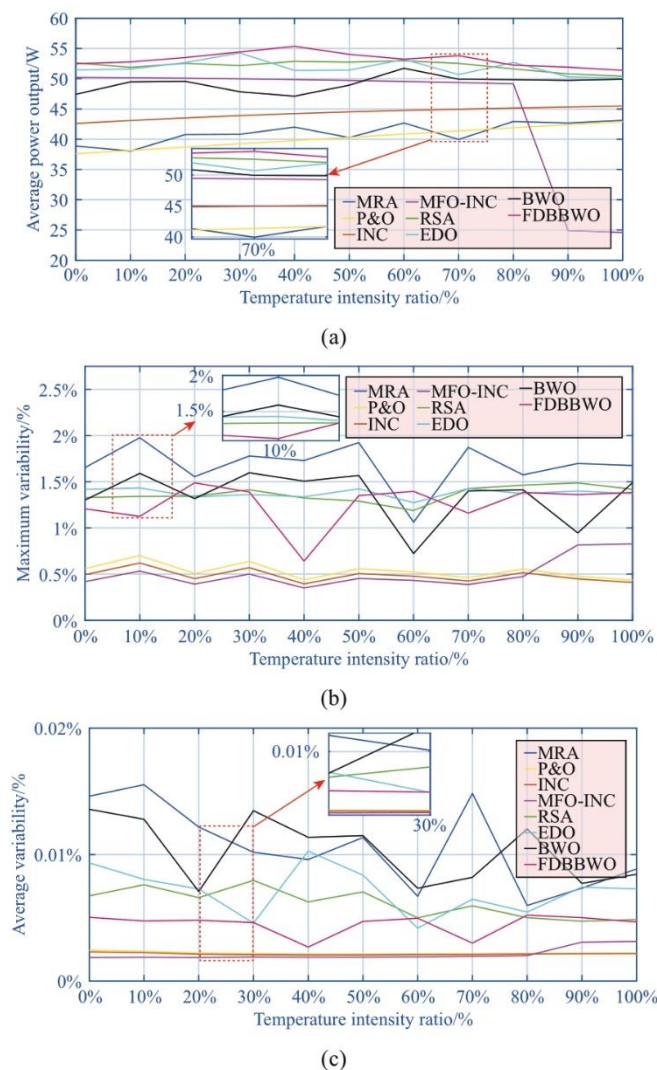


Рис. 18. Зависимость чувствительности восьми подходов от отношения интенсивности температуры, представленная в виде (а) средней выходной мощности, (б) максимальной изменчивости и (в) средней изменчивости.

5 Заключение

В данном исследовании была представлена гибридная конфигурация ФЭ-ТЭГ для решения проблем, связанных с ограничениями автономных ФЭ и ТЭГ систем. Кроме того, была разработана новая стратегия отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ) на основе FDBBWO для смягчения негативного влияния ЧЗ и извлечения оптимальной выходной мощности из гибридной системы ФЭ-ТЭГ в динамических условиях эксплуатации. Ключевые результаты данной работы можно резюмировать следующим образом:

- Для обеспечения надлежащего повторного использования отработанного тепла, образующегося при выработке электроэнергии с помощью фотоэлектрических систем, интеграция фотоэлектрических и термоэлектрических технологий эффективно повышает общую выработку

энергии и способствует созданию более устойчивого и эффективного режима производства энергии.

- Была разработана усовершенствованная стратегия динамического управления ОТММ на основе FDBBWO, в которой механизм FDB был интегрирован в алгоритм оптимизации на основе алгоритма белухи для достижения более высокой эффективности оптимизации. Это снизило риск застревания алгоритма в ЛТММ и улучшило его стабильность сходимости.

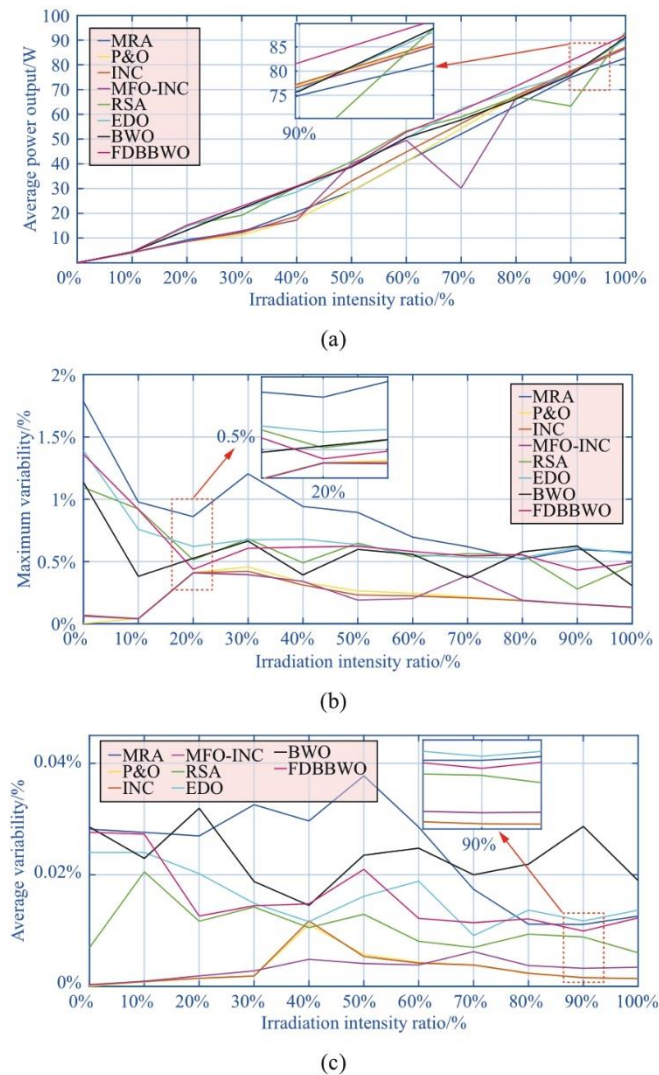


Рис. 19. Зависимость чувствительности восьми подходов от отношения интенсивности излучения, представленная в виде (а) средней выходной мощности, (б) максимальной изменчивости и (в) средней изменчивости.

- Для всесторонней оценки были использованы четыре экспериментальных сценария, включающих различные условия изменения температуры и освещенности. Для проверки практичности и эффективности разработанной схемы управления ОТММ в реальных условиях использовались реальные атмосферные данные, собранные в Гонконге. Например, на основе данных за весенний день в Гонконге, выходная мощность, обеспечиваемая FDBBWO, достигла 139,74, 141,32, 209,85, 196,56, 153,11 и 140,88 % от мощности, производимой алгоритмом оптимизации на основе алгоритма белухи, АПР, ВиН, МКА, ПВП и ОЭР соответственно. В целом, FDBBWO не только превзошла своих конкурентов по выходной мощности, но и стабильно обеспечивала эффективное и стабильное отслеживание точки максимальной мощности в динамических условиях эксплуатации.

· Для выполнения количественного многомерного анализа производительности были введены два дополнительных показателя, ΔV^{avg} и ΔV^{max} , для оценки колебаний мощности в целях анализа стабильности. FDBBWO показал наименьшие значения ΔV^{avg} и ΔV^{max} среди восьми подходов. Кроме того, FDBBWO получил наименьшие значения ΔV^{avg} , равные 22,36%, 11,73% и 18,95% летом, осенью и зимой соответственно. В заключение, FDBBWO продемонстрировал отличную устойчивость к внешним возмущениям и значительно снизил колебания мощности.

В будущих исследованиях следует сосредоточиться на следующих четырех аспектах:

a) Достижение бесшовной электрической интеграции фотоэлектрических и термоэлектрических блоков для создания единой гибридной системы, что приводит к экономии средств за счет устранения необходимости в отдельных преобразователях постоянного тока.

b) Внедрение двухвходовой цепи с высоким коэффициентом усиления в гибридную систему позволит повысить эффективность выработки электроэнергии и снизить затраты, связанные с процессом повышения напряжения.

c) Расширение применения OTMM-контроллеров на основе FDBBWO для крупномасштабных фотоэлектрических систем с термоэлектрическими генераторами, направленное на совершенствование разработки комплексных решений для энергоснабжения, подключенных к сети и оптимизированных для гибридных систем ФЭ-ТЭГ.

d) Исследование влияния моделей смешанных систем различных размеров, состоящих из различных типов фотоэлектрических элементов и материалов термоэлектрических генераторов, на их характеристики отслеживания точки максимальной мощности (OTMM). Для достижения оптимальной производительности необходимы дальнейшие исследования в практических приложениях.

О вкладе авторов в проект CRediT

Бо Ян: написание первоначального варианта текста. **Босяо Лианг:** Методология. **Шаоцун Ву:** Утверждение. Программное обеспечение. **Хунбяо Ли:** Обработка данных. **Денгке Гао:** Ресурсы. **Линь Цзян:** Визуализация. **Цзинбо Ван:** Написание текстов - 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 Национального фонда естественных наук Китая (62263014) и базового исследовательского проекта провинции Юньнань (202401AT070344, 202301AT070443).

Список используемой литературы

[1] Л. Лу, М. Вэй, Ю. Тао и др., Планирование скоординированного расширения генерации, передачи, ресурсов со стороны спроса и хранения энергии на основе вероятностного программирования с учетом системы передачи постоянного тока, Global Energy Interconnect.7 (1) (2024) 25-37.

[2] Ю. Х. Сунь, Ю. Чжоу, С. Ван и др., Непараметрическое вероятностное прогнозирование региональных выходных мощностей фотоэлектрических систем на основе кластеризации на основе гранул и прямого оптимизационного программирования, J.Mod Power Syst.Clean Energy 11 (4) (2023) 1450-1461.

- [3] С. Али Арефифар, М. Шахин Алам, А. Хамади, Обзор самовосстановления в современных системах распределения электроэнергии, *J.Mod Power Syst.Clean Energy* 11 (4) (2023) 1719-1733.
- [4] У.Р. Мудули, А.Р. Бейг, Р.К. Бехера и др., Прогнозирующее управление со схемой распределения энергии батареи для электромобиля с полным приводом на базе двух двигателей с открытой обмоткой, *IEEE Trans.Ind.Electron.*69 (6) (2021) 5557-5568.
- [5] С. Махмуд, Дж.К. Дхеяа, С. Мохамед и др., Исследование и прогнозирование роли фотоэлектрической, ветровой и водородной энергии в устойчивой глобальной энергетической эволюции, *Global Energy Interconnect.*7(4) (2024) 429.
- [6] Y.J.Chen, B.Yang, Z.X.Guo и др., Динамическая реконфигурация для систем ТЭГ при неоднородном распределении температуры с помощью адаптивного скоординированного искателя, *Prot.Control Mod.Power Syst.* 7(38)(2022) 1-19.
- [7] M.M.Gulzar, Разработка надежной стабилизации частоты с использованием оптимизированного контроллера MPC-(1+PIDN) для высокопорядковых взаимосвязанных энергосистем на основе возобновляемых источников энергии, *Prot.Control Mod.Power Syst.* 5 (1) (2023) 180-193.
- [8] Б. Ян, М. Т. Чжан, С. С. Чжан и др., Быстрое оптимизированное поисковое решение атомов для проектирования MPPT централизованной системы термоэлектрической генерации при неоднородной разности температур, *J.Clean.Prod.*248 (2020) 119301.
- [9] Р. Кахани, М. Джамил, М. Тарик Икбал, Улучшенный алгоритм отслеживания точки максимальной мощности с учетом возмущений и наблюдений для фотоэлектрических энергетических систем, *J.Mod Power Syst.Clean Energy* 11 (4) (2023) 1165-1175.
- [10] Б. Ян, Т. Ю, С. С. Чжан и др., Динамический лидер на основе коллективного интеллекта для отслеживания точки максимальной мощности фотоэлектрических систем, подверженных частичному затенению, *Energy Conver.Manag.*179 (2019) 286-303.
- [11] Б. Ян, Р. Се, З. Х. Го, Технология отслеживания точки максимальной мощности для фотоэлектрических систем: текущее состояние и перспективы, *Energy Eng.* 121 (8) (2024) 2009-2022.
- [12] Б. Ян, Р. Ю. Чжэн, Ю. М. Хан и др., Последние достижения в методах диагностики неисправностей фотоэлектрических систем: критический обзор, *Prot.Control Mod.Power Syst.* 9 (3) (2024) 36-59.
- [13] С. Манна, А. К. Акелла, Д. К. Сингх, Новый метод отслеживания точки максимальной мощности на основе функции Ляпунова: быстрое и бесшумное отслеживание точки максимальной мощности с использованием надежного адаптивного контроллера с эталонной моделью для солнечной фотоэлектрической системы, *Prot.Control Mod.Power Syst.* 5(1) (2023) 205-229.
- [14] Б. Ян, Т. Дж. Чжу, Дж. Б. Ван и др., Комплексный обзор алгоритмов отслеживания точки максимальной мощности фотоэлектрических систем в условиях частичного затенения, *J.Clean.Prod.*268 (2020) 121983.
- [15] Б. Ян, Р. Се, Дж. Х. Дуань и др., Обзор современных методов отслеживания точки максимальной мощности для гибридных фотоэлектрических систем с термоэлектрическим генератором: моделирование, методологии и перспективы, *Global Energy Interconnect.*6 (5) (2023) 567-591.
- [16] Н. Димри, А. Тивари, Г. Н. Тивари, Влияние термоэлектрического охладителя (ТЭО), интегрированного в основание непрозрачного фотоэлектрического (ФЭ) модуля, на повышение общей электрической эффективности, *Sol.Energy* 166 (2018) 159-170.

- [17] К. С. Онг, М. С. Нагави, К. Лим, Тепловые и электрические характеристики гибридной конструкции солнечно-термоэлектрической системы, *Energy Conver.Manag.* 133 (2017) 31-40.
- [18] В. Верма, А. Кейн, Б. Сингх, Дополнительное повышение эффективности ФЭ-энергетической системы за счет термоэлектрической генерации, *Renew.Sustain.Energy Rev.* 58 (2016) 1017-1026.
- [19] E.S.Yin, Q.Li, Y.M.Xuan, Анализ теплового сопротивления и оптимизация гибридной фотоэлектрической термоэлектрической системы, *Energy Conver.Manag.* 143 (2017) 188-202.
- [20] J.Lin, T.J.Liao, B.H.Lin, Анализ производительности и согласование нагрузки гибридной фотоэлектрической термоэлектрической системы, *Energy Conver.Manag.* 105 (2015) 891-899.
- [21] П. Сундаррадж, Р.А. Тейлор, Д. Баннерджи и др., Экспериментальный и теоретический анализ гибридного солнечного термоэлектрического генератора с принудительным конвекционным охлаждением, *J.Phys.D Appl.Phys.* 50 (1) (2017) 015501.
- [22] К. Бабу, П. Поннамбалам, Теоретическая оценка производительности гибридной системы PV-TEG, *Energy Conver.Manag.* 173 (2018) 450-460.
- [23] Э.С. Инь, Ц. Ли, Ю.М. Сюань, Новый метод оптимального проектирования гибридной фотоэлектрической термоэлектрической системы с разделением спектра концентрации, *Energy* 163 (2018) 519-532.
- [24] Т.Х. Кван, Х.Ф. Ву, Алгоритм ОТММ с механизмом блокировки, применяемый к гибридной системе фотоэлектрических элементов и термоэлектрических генераторов, *Appl.Energy* 204 (2017) 873-886.
- [25] Н. Канагарадж, М. Аль-Анси, Алгоритм управления извлечением максимальной мощности для гибридной системы возобновляемой энергии, *Comput.Syst.Sci.Eng.* 45 (1) (2023) 769-784.
- [26] А.Ф. Мирза, М. Мансур, К. Зербахт и др., Высокоэффективная гибридная система ФЭ-ТЭГ с интеллектуальным управлением для сбора максимальной энергии в различных нестационарных условиях эксплуатации, *J.Clean.Prod.* 320 (2021) 128643.
- [27] М.К. Хан, М. Хамза Зафар, М. Мансур и др., Извлечение зеленой энергии для устойчивого развития: новая методика ОТММ для гибридной системы ФЭ-ТЭГ, *Sustainable Energy Technol.Assess.* 53 (2022) 102388.
- [28] М.К. Сенапати, К. Прадхан, Р.К. Калай, Отслеживание точки максимальной мощности на основе вычислительного интеллекта для фотоэлектрической системы генерации электроэнергии с анализом малых сигналов, *Optimal Control Appl.Methods* 44 (2) (2023) 617-636.
- [29] C.Pradhan, M.K.Senapati, S.G.Malla и др., Скоординированное управление мощностью и контроль автономной фотоэлектрической гибридной системы с модифицированным ОТММ на основе IWO, *IEEE Syst.J.* 15 (3) (2023) 3585-3596.
- [30] P.Kumar, A.Shrivastava, Отслеживание максимальной мощности солнечной фотоэлектрической системы с использованием методов нечеткой логики и инкрементальной проводимости, *Mater.Today Proc.* 79 (2023) 267-277.
- [31] Н.М.М. Альтвалльбах, М.А.М. Радзи, Н. Азис и др., Новый алгоритм возмущения и наблюдения на основе правила трапеций: условия равномерного и частичного затенения, *Energy Conver.Manag.* 264 (2022) 115738.
- [32] А.Ф. Мирза, К. Линг, М.Й. Джавед и др., Новые методы ОТММ для фотоэлектрических систем при равномерном облучении и частичном затенении, *Sol.Energy* 184 (2019) 628-648.

- [33] Э. Скоплаки, Дж.А. Паливос, Рабочая температура фотоэлектрических модулей: обзор соответствующих корреляций, *Renew.Energy* 34 (1)(2009) 23-29.
- [34] А. Музатик, Оценка рабочей температуры фотоэлектрических модулей с использованием простой корреляции, *Int.J.Energy Eng.* 4 (4)(2014) 151-158.
- [35] Б. Ян, Р. Се, Х. К. Шу и др., Техничко-экономическая и экологическая оптимизация гибридных фотоэлектрических термоэлектрических генераторных систем на основе подхода, основанного на данных, *Appl.Therm.Eng.* 257(2024) 124222.
- [36] М.К. Сенапати, К. Аль Джаафари, К. Аль Хосани и др., Улучшенное использование энергии фотоэлектрических систем: интегрированный подход с применением ИНС и SMC, в: Труды 3-й Международной конференции IEEE по интеллектуальным технологиям для энергетики и управления (STPEC), 2023 г., Бхубанешвар, Индия, 2023 г., стр. 1-6.
- [37] Б. Ян, М.Т. Чжан, Дж.Б. Ван и др., Сбор энергии централизованных термоэлектрических систем генерации на основе интерактивного коллективного интеллекта при неравномерном температурном градиенте, *Sustain.Energy Technol.Assess.* 48 (2021) 101600.
- [38] Б. Ян, С.К. Ву, Дж.Х. Хуан и др., Разработка OTMM-метода на основе алгоритма оптимизации роя сальп для гибридной системы ФЭ-ТЭГ в условиях частичного затенения, *Energy Conver.Manag.* 292 (2023) 117410.
- [39] C.T.Zhong, G.Li, Z.Meng, Оптимизация белужьих китов: новый метаэвристический алгоритм, вдохновленный природой, *Knowl.-Based Syst.* 251(2022) 109215.
- [40] H.T.Kahraman, S.Aras, E.Gedikli, Баланс приспособленности и расстояния (FDB): новый метод выбора для метаэвристических алгоритмов поиска, *Knowl.-Based Syst.* 190 (2020) 105169.
- [41] М.К. Сенапати, К. Прадхан, С.Р. Самантарай и др., Улучшенная стратегия управления питанием для микросети постоянного тока на основе возобновляемых источников энергии с интеграцией накопителей энергии, *IET Gener.Transm.Distrib.* 13 (6) (2019) 838-849.
- [42] М.К. Сенапати, О. Аль Зааби, К. Аль Хосани и др., Развитие экосистем зарядки электромобилей с помощью интеллектуального управления стабильностью микросети постоянного тока, *IEEE Trans.Ind.Appl.* 60 (5) (2024) 7264-7278.
- [43] А. Атту, А. Массум, М. Саиди, Управление мощностью фотоэлектрических систем с использованием OTMM и повышающего преобразователя, *J.Electric.Comput.Eng.* 2 (1) (2010) 23-27.
- [44] U.R.Muduli, B.Chikondra, R.K.Behera, Схема DTC на основе пространственно-векторной ШИМ с пониженным синфазным напряжением для привода пятифазного асинхронного двигателя, *IEEE Trans.Power Electron.* 37 (1)(2021) 114-124.
- [45] B.Yang, L.N.Zhong, X.S.Zhang и др., Новый биоинспирированный меметический алгоритм роя сальп и его применение к OTMM для фотоэлектрических систем с учетом частичного затенения, *J.Clean.Prod.* 215(2019) 1203-1222.
- [46] M.Abdel-Basset, D.El-Shahat, M.Jameel и др., Оптимизатор экспоненциального распределения (EDO): новый алгоритм, вдохновленный математикой, для задач глобальной оптимизации и инженерных задач, *Artif.Intell.Rev.* 56(9) (2023) 9329-9400.

Получено 16 июля 2024 г.;

отредактировано 19 сентября 2024 г.; принято 21 октября 2024 г.



Отсканируйте для получения более подробной информации.

Рецензирование осуществлялось компанией Global Energy Interconnection Group Co.Ltd.

*Ответственный автор.

Адреса электронной почты: yangbo_ac@outlook.com (Б.Ян), liangboxiao30@163.com (Б.Лян), 798597909@qq.com (С.Бу), hongbiao.li@keliangtek.com (Х.Ли), dengke.gao@keliangtek.com (Д.Гао), l.jiang@liv.ac.uk (Л.Цзян), JingboWang96@outlook.com (Дж.Ван).

<https://doi.org/10.1016/j.gloe.2024.10.014>

2096-5117/© 2025 Global Energy Interconnection Group Co.Ltd. Издательские услуги предоставлены Elsevier B.V. от имени KeAi Communications Co.Ltd.

Эта статья находится в открытом доступе и распространяется по лицензии CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



Бо Ян — профессор и научный руководитель аспирантов в Институте электроэнергетики Куньминского технологического университета. Он получил степень доктора философии в Ливерпульском университете (Великобритания) в 2015 году. Он опубликовал более 180 статей в журналах, индексируемых в SCI, и 30 статей в журналах, индексируемых в EI. Его научные интересы включают интеллектуальные энергосети, а также оптимизацию и управление новыми энергетическими системами на основе искусственного интеллекта.



Босяо Лианг получил степень бакалавра технических наук в Куньминском университете науки и технологий в 2023 году и в настоящее время получает степень магистра в области силовой электроники и силовых приводов в Институте электроэнергетики Куньминского университета науки и технологий. Его научные интересы включают оптимизацию и управление новыми энергетическими системами на основе искусственного интеллекта.



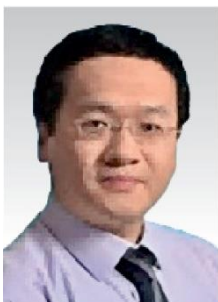
Шаоцун Ву получил степень магистра в Куньминском университете науки и технологий в 2024 году и в настоящее время получает докторскую степень по электротехнике в Шаньдунском университете. Его научные интересы включают отслеживание точки максимальной мощности гибридных фотоэлектрических систем с термоэлектрическим генератором и экономическое распределение нагрузки.



Хунбяо Ли получил степень магистра в Шанхайском университете Цзяотун и в настоящее время работает в компании Shanghai KeLiang Information Technology Co.Ltd., занимаясь технологиями моделирования силовой электроники и энергетических систем в реальном времени. Его научные интересы включают технологии моделирования силовой электроники и энергетических систем в реальном времени.



Денгке Гао получил степень доктора философии в Шанхайском университете Цзяотун и в настоящее время занимается моделированием и анализом устойчивости новых энергосистем в компании Shanghai KeLiang Information Technology Co.Ltd. Его научные интересы включают моделирование и анализ устойчивости новых энергосистем.



Линь Цзян — профессор кафедры электротехники и электроники Ливерпульского университета (Великобритания) и руководитель исследовательской группы по управлению интеллектуальными энергосетями и производству электроэнергии из возобновляемых источников. В сферу его научных интересов входят передовая теория управления и применение, анализ интеллектуальной энергосети, управление и оптимизация, современные энергетические сетевые технологии и многое другое.



Цзинбо Ван получил степень магистра в Куньминском университете науки и технологий в 2022 году и был удостоен полной стипендии Китайского стипендиального совета (CSC) для обучения в докторантуре Ливерпульского университета (Великобритания) в том же году. Его научные интересы включают моделирование и оптимизацию новых систем производства энергии.

(Редактор: Цзэдун Чжан)