

Анализ безопасного расстояния активной распределительной сети с учетом реагирования на спрос со стороны энергетического узла[☆]

Руи Ма^{а,*}, Ци Чжу^а, Шенгян Лиу^а, Цинь Ян^а, Мо Ши^б

^а Государственная ключевая лаборатория предотвращения и снижения рисков стихийных бедствий в энергосистемах, Чаншанский университет науки и технологий, Чанша 410114, КНР

^б Научно-исследовательский институт электроэнергетики компании Guangdong Power Grid Co., Ltd, Ключевая лаборатория надежности электроэнергетического оборудования провинции Гуандун, Гуанчжоу 510080, КНР

Аннотация. В данном исследовании предлагается метод анализа безопасного расстояния активной распределительной сети (ADN) с учетом реагирования на спрос со стороны энергетического узла (EH). С учетом влияния спонтанной ветро-солнечной энергии и гибких нагрузок на EH была разработана интерактивная модель энергоснабжения для представления работы EH под воздействием этих факторов. Кроме того, была построена модель безопасного расстояния ADN, интегрирующая EH с гибкими нагрузками, для оценки влияния изменений гибкой нагрузки на безопасное расстояние ADN. При рассмотрении таких вариантов моделирования, как снижение нагрузки кондиционеров (AC) и перераспределение нагрузки базовых станций (BS), безопасные расстояния фаз А, В и С увеличились на 17,1%, 17,2% и 17,7% соответственно. Далее, была сформулирована и решена многоцелевая модель оптимального потока мощности с использованием алгоритма прямого-обратного потока мощности, алгоритма многоцелевой оптимизации NSGA-II и метода максимального удовлетворения. Результаты моделирования на примере узловой системы IEEE33 показывают, что после оптимизации общие затраты на электроэнергию за один день снижаются на 0,026 %, а общее предельное безопасное расстояние трех фаз сети переменного тока увеличивается на 0,1 МВА. Этот метод эффективно увеличивает безопасное расстояние, облегчает перераспределение нагрузки базовых станций и снижение нагрузки переменного тока, а также способствует энергосбережению, экономичности и безопасности работы энергосистемы. ©2025 Global Energy Interconnection Group Co.Ltd. Издательские услуги предоставлены Elsevier B.V. от имени KeAi Communications Co.Ltd. Это статья с открытым доступом, распространяемая по лицензии CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Ключевые слова: Активная распределительная сеть; Энергетический узел; безопасное расстояние; Нагрузка базовой станции; Нагрузка кондиционирования воздуха

0 Введение

1) Мотивация и обзор литературы

Быстрое социально-экономическое развитие Китая привело к непрерывному ежегодному увеличению спроса на электроэнергию в жилом секторе, при этом нагрузки кондиционирования воздуха стали основным фактором, влияющим на общее потребление энергии [1]. В глобальном масштабе использование систем кондиционирования воздуха и электрических вентиляторов в настоящее время составляет приблизительно одну пятую часть электроэнергии, потребляемой в зданиях, и около 10% от общего мирового потребления электроэнергии [2].

Одновременно с этим, наступление эры мобильной связи 5-го поколения (5G) принесло значительные удобства в жизнь жилых домов и способствовало развитию инфраструктуры. Однако широкое внедрение технологии 5G привело к стремительному росту объема данных мобильной связи [3], что повлекло за собой увеличение нагрузки базовых станций (BS) и, как следствие, рост энергопотребления мобильной сети. Гибкие нагрузки, такие как нагрузки переменного тока и BS,

стали важнейшими ресурсами для участия в управлении спросом в активных распределительных сетях (ADN) [4-9].

Многочисленные исследования были посвящены методам моделирования энергетических узлов (ЕН), взаимодействующих с распределительными сетями. Например, в исследованиях рассматривалось моделирование ЕН с использованием ветровой энергии и ее оптимизация [10,11], влияние ЕН на поток мощности в распределительной сети и его оптимизация [12-14], а также энергетические узлы, ориентированные на комбинированное охлаждение, отопление и электроснабжение [15-18]. Кроме того, изучалось моделирование нагрузки базовых станций (BS), включая моделирование нагрузки центров обработки данных на основе пространственно-временных передаваемых характеристик [19] и моделирование управления энергией для BS 5G [20]. Однако метод учета общих характеристик нагрузки BS и ЕН, а также метод переноса влияния BS на интерактивную мощность между ЕН и распределительной сетью все еще нуждаются в исследовании. Перенос нагрузки базовых станций (BS) влияет на потребление возобновляемой энергии и эксплуатационные расходы распределительных сетей. Для решения этих вопросов в литературе была предложена концепция «зеленой» беспроводной связи [21]. Этот подход интегрирует распределенную генерацию электроэнергии в энергоснабжение сетей 5G для снижения затрат на электроэнергию и выбросов углерода. Однако прерывистый и колеблющийся характер выработки распределенной чистой энергии влияет на мощность энергоснабжения [22-24]. Необходимо срочно изучить, как сбалансировать передачу нагрузки базовой станции, потребление возобновляемой энергии и безопасное потребление электроэнергии с учетом спонтанной выработки ветровой энергии, а также создать многоцелевую оптимизационную модель, учитывающую вышеизложенное.

Влияние гибкого регулирования нагрузки, такого как ограничение нагрузки переменного тока и переключение нагрузки базовой станции, на безопасное расстояние является важнейшим фактором при оценке надежности электроснабжения распределительной сети. Современные исследования безопасного расстояния в распределительных сетях в основном сосредоточены на оценке безопасности и концептуализации безопасного расстояния.

В работе [25] расстояния безопасности в распределительных сетях классифицируют на расстояния фидерной и геометрической безопасности и оценивают их влияние на надежность сети. В работе [26] вводится понятие расстояний безопасности в распределительных сетях, учитывающее влияние распределенных источников питания. Аналогично, в работе [27] представлена модель и концепция зоны безопасности для всех квадрантных распределительных систем в ADN.

Однако исследования влияния гибкого регулирования нагрузки на дистанцию безопасности ограничены, особенно в вариантах моделирования, когда энергетические узлы (ЕН) со спонтанной ветро-солнечной энергией и гибкими нагрузками интегрированы в сети распределения электроэнергии. Необходимы дальнейшие исследования для изучения взаимосвязи между гибким регулированием нагрузки и дистанцией безопасности в таких условиях.

Исследования по повышению безопасного расстояния ADN должны учитывать интеграцию возобновляемых источников энергии и гибкие нагрузки. Кроме того, нельзя игнорировать вопросы, связанные с потреблением возобновляемой энергии и потерями в активной сети, вызванными ее интеграцией.

В работе [28] предлагается модель оптимального потока мощности, учитывающая цель статического запаса безопасности и дисбаланс распределения тока в энергосистеме. В работе [29] разработана многоцелевая модель оптимального потока мощности на основе контроллера потока мощности постоянного тока для гибридных систем, включающих переменный и постоянный токи. В работе [30] проверена многоцелевая модель оптимального потока мощности, учитывающая три

ключевые цели: потери в сети системы, стоимость производства электроэнергии генератором и выбросы углерода.

В работе [31] с использованием алгоритма NSGA-II решается модель, учитывающая потери в сети, затраты на генерацию в системе и смещения напряжения. В работе [32] исследуется участие гибких узлов возобновляемой энергии (ЕН), оснащенных ветровыми электростанциями, установками по переработке биоотходов и системами хранения, такими как водород, тепловая энергия и сжатый воздух, на энергетических рынках с использованием модели ценообразования, обеспечивающей равновесие рынка. В работе [33] рассматривается общая ожидаемая стоимость эксплуатации сетей с учетом ограничений, накладываемых уравнениями оптимального потока мощности, моделями работы ЕН и ограничениями гибкости ЕН. В работе [34] применяется стохастическая оптимизация на основе вариантов моделирования для учета неопределенностей, предлагая новый подход к моделированию и оценке производительности интегрированных систем. Несмотря на эти достижения, комплексная многоцелевая оптимизационная модель, которая одновременно учитывает энергоэффективность, использование чистой энергии и безопасную работу сетей распределения электроэнергии, остается неизученной.

2) Недочёты и достижения исследования

В таблице 1 представлен обзор исследований, рассмотренных в литературе. Исследования [30,33,35] были сосредоточены на экономической и экологической эксплуатации распределительных сетей, но в значительной степени игнорировали показатели безопасности активных распределительных сетей (ADN). В отличие от них, исследования [28,29,31] включали показатели безопасности распределительных сетей, такие как динамическая тепловая мощность и уровни текущей нагрузки, в свои цели оптимизации. Однако эти показатели не учитывали трехфазные условия и не анализировали влияние спонтанной ветро-солнечной энергии и гибкого регулирования нагрузки на показатели безопасности. В данном исследовании в качестве показателя оптимизации безопасности использовалось трехфазное безопасное расстояние ЕН, и была создана многоцелевая модель оптимизации регулирования с учетом перераспределения нагрузки BS и снижения нагрузки переменного тока.

С учетом вышеизложенного обзора литературы, основные результаты данного исследования можно резюмировать следующим образом.

- В данном исследовании, в сочетании с традиционным ЕН, учитывается влияние спонтанной ветро-солнечной энергии и гибких нагрузок на ЕН, а также разработана модель ЕН, включающая спонтанную ветро-солнечную энергию и гибкие нагрузки.

Таблица 1. Краткий обзор последних исследований по данной тематике.

Ref.	Indices			AC load reduction	BS load transfer	Random wind-solar power	Three-phase safety distances
	Operation	Safety	Economic				
[19]	Yes	No	Yes	No	Yes	No	No
[28]	Yes	Yes	Yes	No	No	No	No
[29]	Yes	Yes	Yes	No	No	No	No
[30]	Yes	No	Yes	No	No	No	No
[31]	Yes	Yes	Yes	No	No	No	No
[33]	Yes	No	Yes	No	No	Yes	No
[35]	Yes	No	No	Yes	No	Yes	No
PS	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

- Был проведен анализ влияния изменений гибких нагрузок (нагрузки BS и AC) на безопасные расстояния.
- Взяв нагрузку базовой станции в качестве переменной решения и учитывая безопасное расстояние, потери в активной сети, целевую стоимость энергии и ограничения по безопасности

напряжения, была разработана многоцелевая оптимизационная модель перераспределения нагрузки базовой станции, и предложен соответствующий алгоритм решения.

1 Моделирование ЕН, включающее спонтанную ветро-солнечную энергию и гибкую нагрузку.

1.1 Моделирование спонтанной ветро-солнечной энергии

Спонтанная выходная мощность ветра связана со его скоростью, и в этом разделе для моделирования спонтанной выходной мощности ветра используется распределение Вейбулла [35] следующим образом:

$$\tilde{P}_W = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \cup v > v_{co} \\ k_1 v + k_2 & v_{ci} < v \leq v_r \\ P_{wtr} & v > v_r \end{cases} \quad (1)$$

$$k_1 = \frac{P_{wtr}}{v_r - v_{ci}} \quad k_2 = -k_1 v_{ci}$$

где v_r — номинальная скорость ветра в ветровой турбине; v_{ci} и v_{co} — скорости ветра при включении и выключении соответственно; P_{wtr} — номинальная мощность ветровой турбины.

Производство фотоэлектрической энергии в основном зависит от солнечных батарей, их выходной мощности и интенсивности светового излучения; общая площадь солнечных батарей S и эффективность фотоэлектрического преобразования имеют прямую связь с выходной моделью [36], как показано ниже:

$$\tilde{P}_{PV} = E_{S\eta} \quad (2)$$

Интенсивность света соответствовала бета-распределению в зависимости от α и β , которое здесь не повторяется.

1.2 Моделирование силовой нагрузки базовой станции

Нагрузка базовой станции 5G имеет большой потенциал реагирования на спрос, поскольку она включает в себя большое количество коммуникационных нагрузок. Нагрузка потребления энергии базовой станции 5G имеет приблизительно линейную зависимость от коммуникационной нагрузки [37], как показано в (3).

$$\begin{cases} L_b = \alpha_b + \beta_b T_b \\ Q_b = L_b \cos \phi_b \end{cases} \quad (3)$$

где L_b — электрическая нагрузка базовой станции; T_b — коммуникационная нагрузка базовой станции; α_b и β_b — постоянные коэффициенты; Q_b — реактивная мощность базовой станции; и ϕ_b — угол коэффициента мощности базовой станции.

Потребляемая мощность нагрузок базовых станций изменяется в зависимости от условий связи. Кроме того, с учетом пространственных характеристик передачи нагрузки, регулирование нагрузки базовых станций помогает решить проблему пиковых перегрузок.

Основная коммуникационная нагрузка приходится на серверы, и выражение для мощности коммуникационной нагрузки можно записать следующим образом:

$$T_b = \sum_{j \in \Omega} M_{i,j} \cdot P_j^{server} \cdot P_{UE-i} \quad (4)$$

где M_{ij} — количество серверов j -го типа в i -й базовой станции, P_j^{server} — это мощность j -го типа сервера, P_{UE-i} — это коэффициент использования мощности базовой станции i , а Ω^t — это множество типов первых серверов.

1.3 Интерактивная модель энергоснабжения ЕН с учетом спонтанной энергии ветра и солнца, а также нагрузки базовой станции.

На основе существующих исследований о ЕН была разработана модель ЕН, включающая спонтанную ветро-солнечную энергию и гибкие нагрузки, как показано на рис. 1. Эта модель вводит нагрузки новой базовой станции (BS) и нагрузки переменного тока, которые в совокупности называются гибкими нагрузками. Исходные электрические нагрузки ЕН разделены на гибкие нагрузки и другие электрические нагрузки, которые в дальнейшем будут в совокупности называться электрическими нагрузками. Выходные порты гибких и электрических нагрузок подключены к трансформатору, а распределенная ветро-солнечная энергия напрямую связана с электрическими нагрузками ЕН, гибкими нагрузками и центральной системой переменного тока через преобразователь. Взаимодействие между ЕН и ADN по своей природе является стохастическим из-за изменчивости выходной мощности распределенной ветро-солнечной энергии.

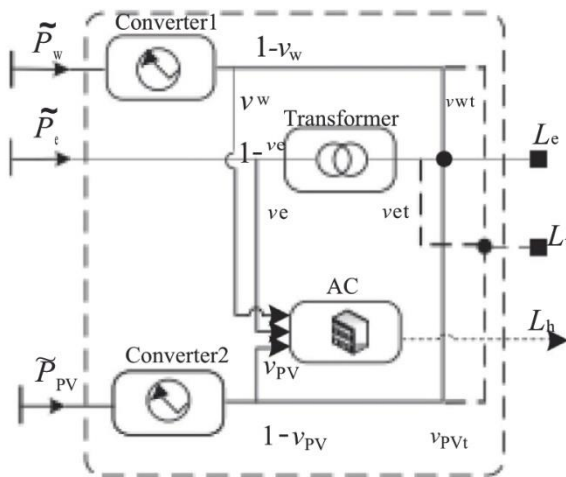


Рис. 1. Модель ЕН со спонтанной ветро-солнечной энергией и гибкой нагрузкой.

Как показано на рис. 1, левая часть модели энергогенератора включает распределенную ветровую энергию, распределенную фотоэлектрическую энергию и распределительную сеть, которые служат источниками входной энергии. Выходная энергия энергогенератора подается в виде электрических нагрузок, гибких нагрузок и нагрузок для охлаждения/обогрева. Энергогенератор состоит из таких компонентов, как устройство преобразования энергии ветра, силовой трансформатор и центральная система переменного тока. Из-за присущей случайности распределенного производства ветровой и фотоэлектрической энергии, активная мощность взаимодействия между ЕН и ADN также демонстрирует стохастическое (вероятностное) поведение.

Пусть коэффициент распределения нагрузки охлаждения/обогрева распределенной ветровой энергии равен v_w , коэффициент распределения гибкой нагрузки равен $(1-v_w) v_{wt}$, коэффициент распределения нагрузки источника питания равен $(1-v_w) (1-v_{wt})$; коэффициент распределения нагрузки охлаждения/обогрева распределенной ветровой энергии равен v_{PV} , коэффициент распределения гибкой нагрузки равен $(1-v_{PV}) v_{Pvt}$, коэффициент распределения нагрузки источника питания равен $(1-v_{PV}) (1-v_{Pvt})$; коэффициент распределения нагрузки охлаждения/обогрева ADN равен v_e , коэффициент распределения гибкой нагрузки равен $(1-v_e) v_{et}$,

а коэффициент распределения нагрузки источника питания равен $(1-v_e)$ $(1-v_{et})$. Взаимосвязь между исходной входной и преобразованной выходной энергией модели ЕН, с учётом спонтанной ветро-солнечной энергии и гибких нагрузок, показана в (5).

$$\begin{cases} L_e = (1 - v_w)(1 - v_{wt})\eta_C\tilde{P}_w + (1 - v_{PV})(1 - v_{PVt})\eta_{PV}\tilde{P}_{PV} + \\ \quad (1 - v_e)(1 - v_{et})\eta_T\tilde{P} \\ L_t = (1 - v_w)v_{wt}\eta_C\tilde{P}_w + (1 - v_{PV})v_{PVt}\eta_{PV}\tilde{P}_{PV} + \\ \quad (1 - v_e)v_{et}\eta_T\tilde{P}_e \\ L_h = v_w\eta_{AC}\tilde{P}_w + v_{PV}\eta_{AC}\tilde{P}_{PV} + v_e\eta_{AC}\tilde{P}_e \end{cases} \quad (5)$$

где L_e — электрическая нагрузка ЕН, L_t — гибкая нагрузка ЕН, L_h — нагрузка охлаждения/обогрева ЕН, η_C — КПД преобразователя ветровой энергии, η_{PV} — КПД фотоэлектрического преобразователя, η_T — КПД силового трансформатора, и η_{AC} — КПД охлаждения и обогрева центральной системы кондиционирования воздуха.

Вышеприведенная информация (5) может быть записана в матричной форме, как показано ниже:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} L_e \\ L_t \\ L_h \end{bmatrix}}_L = \underbrace{\begin{bmatrix} (1 - v_w)(1 - v_{wt})\eta_C & (1 - v_{PV})(1 - v_{PVt})\eta_{PV} & (1 - v_e)(1 - v_{et})\eta_T \\ (1 - v_w)v_{wt}\eta_C & (1 - v_{PV})v_{PVt}\eta_{PV} & (1 - v_e)v_{et}\eta_T \\ v_w\eta_{AC} & v_{PV}\eta_{AC} & v_e\eta_{AC} \end{bmatrix}}_C \underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{P}_w \\ \tilde{P}_{PV} \\ \tilde{P}_e \end{bmatrix}}_P \quad (6)$$

ЕН определяется в рабочем состоянии, когда мощность взаимодействия между ЕН и ADN положительна, и в состоянии нагрузки, когда мощность взаимодействия отрицательна.

Рассматриваются два основных типа гибких нагрузок: сокращаемая нагрузка (нагрузка переменного тока) и пространственно перемещаемая нагрузка (нагрузка базовой станции 5G). Когда нагрузка переменного тока сокращается или нагрузка базовой станции перемещается, мощность взаимодействия между гибкой нагрузкой и ЕН/ADN должна удовлетворять соотношению, определенному в (6) выше. Однако, когда нагрузка базовой станции перемещается, это влияет не только на мощность взаимодействия между ЕН и ADN, где расположена базовая станция, но и вызывает изменения в мощности взаимодействия между ЕН и ADN других ЕН. Это происходит, если перемещенная нагрузка превышает мощность текущего ЕН и перераспределяется на другие ЕН, содержащие базовую станцию.

2 Влияние ЕН, содержащих гибкие нагрузки на безопасное расстояние.

2.1 Безопасные расстояния для ADN с гибкими нагрузками

В данном исследовании рассматривалось влияние нагрузок переменного тока и базовой станции на безопасное расстояние распределительной сети. Модель зоны безопасности [38] строится следующим образом (7):

$$\begin{cases} S^\Phi = S^A + S^B + S^C \\ |S_{B,i}^\Phi(k)| = |\sum_{j \in \Omega_{B,i}(k)} (S_j^\Phi - S_b^\Phi - S_a^\Phi)| \leq C_{B,i} \quad \forall i \in B, \phi_k \notin B \\ |S_{T,i}^\Phi(k)| = |\sum_{j \in \Omega_{T,i}(k)} (S_j^\Phi - S_b^\Phi - S_a^\Phi)| \leq C_{T,i} \quad \forall i \in T, \phi_k \notin T \end{cases} \quad (7)$$

$$S_{B,j}^{\Phi}(k) \text{ и } S_{T,j}^{\Phi}(k); S_{B,j}^{\Phi}(k)$$

где S^{Φ} обозначает это мощность любой ветви i , за исключением элемента, выведенного из эксплуатации из-за неисправности;

$$S_{T,j}^{\Phi}(k)$$

мощность любого основного трансформатора i , за исключением элемента, выведенного из эксплуатации из-за неисправности; $S_{B,i}$ — номинальная мощность ответвления i ; $S_{T,i}$ — номинальная мощность основного трансформатора i ; B — совокупность всех ответвлений; T — совокупность всех основных трансформаторов; S^A, S^B и S^C — нагрузки ответвлений или силовых

$$S_j^{\Phi}$$

трансформаторов трехфазных линий A, B и C соответственно; S_j^{Φ} обозначает суммарную

$$S_b^{\Phi}$$

нагрузку фаз A, B и C в трехфазном узле; S_b^{Φ} это суммарная трехфазная нагрузка базовых станций

$$S_a^{\Phi}$$

A, B и C ; S_a^{Φ} это суммарная трехфазная нагрузка переменного тока A, B и C ; $\Omega_{B,i}(k)$ — это множество всех узлов, расположенных ниже по потоку от ветви i после вывода элементов из эксплуатации в момент $N-1$ короткого замыкания; $\Omega_{T,i}(k)$ — это множество всех узлов, расположенных ниже по потоку от основного трансформатора i после вывода элемента Φ_k из эксплуатации в момент $N-1$ короткого замыкания.

В этом случае безопасное расстояние между фазами распределительной сети можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} L_i^A = \frac{1}{3} C_i - |\sum_{j \in \Omega_{B,i}(k) \cup \Omega_{T,i}(k)} (S_j^A - S_b^A - S_a^A)| \\ L_i^B = \frac{1}{3} C_i - |\sum_{j \in \Omega_{B,i}(k) \cup \Omega_{T,i}(k)} (S_j^B - S_b^B - S_a^B)| \\ L_i^C = \frac{1}{3} C_i - |\sum_{j \in \Omega_{B,i}(k) \cup \Omega_{T,i}(k)} (S_j^C - S_b^C - S_a^C)| \end{cases} \quad (8)$$

$$L_i^A, L_i^B, L_i^C$$

где L_i^A, L_i^B и L_i^C представляют собой безопасные расстояния фаз A, B и C , соответственно, содержащих гибкие нагрузки.

2.2 Безопасное расстояние ADN с EH, содержащим гибкую нагрузку

С учетом угла коэффициента мощности EH, мощность взаимодействия между EH и ADN определяется следующим образом:

$$\begin{cases} \tilde{Q}_e = \tilde{P}_e \tan \phi_{EH} \\ \tilde{S}_e = \tilde{P}_e + j\tilde{Q}_e \end{cases} \quad (9)$$

$$\tilde{Q}_e$$

где \tilde{Q}_e это реактивная мощность взаимодействия между EH и ADN; ϕ_{EH} — угол коэффициента мощности EH, содержащего гибкие нагрузки.

Нагрузки переменного тока и базовой станции были добавлены к энергоснабжению, а трехфазные нагрузки, включающие спонтанную ветро-солнечную энергию и гибкие нагрузки, подключающиеся к сети передачи электроэнергии, должны удовлетворять следующим ограничениям зоны безопасности:

$$\begin{cases} S^\varphi = S^A + S^B + S^C \\ |S_{B,i}^\varphi(k)| = |\sum_{j \in \Omega_{B,i}(k)} (S_j^\varphi - \tilde{S}_e^\varphi)| \leq C_{B,i} \quad \forall i \in B, \phi_k \notin B \\ |S_{T,i}^\varphi(k)| = |\sum_{j \in \Omega_{T,i}(k)} (S_j^\varphi - \tilde{S}_e^\varphi)| \leq C_{T,i} \quad \forall i \in T, \phi_k \notin T \end{cases} \quad (10)$$

$$\tilde{S}_e^\varphi$$

где это суммарная мощность трехфазного взаимодействия между EH и ADN.

В связи с доступом к распределенной ветро-солнечной энергии в энергоснабжающей системе, эта энергия является спонтанной, и, следовательно, энергия взаимодействия между энергоснабжающей системой и распределительной сетью также является таковой. Модель безопасного расстояния между распределительной сетью и энергоснабжающей системой, содержащей гибкую нагрузку, выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \tilde{L}_i^A = \frac{1}{3} C_i - |\sum_{j \in \Omega_{B,i}(k) \cup \Omega_{T,i}(k)} (S_j^A - \tilde{S}_e^A)| \\ \tilde{L}_i^B = \frac{1}{3} C_i - |\sum_{j \in \Omega_{B,i}(k) \cup \Omega_{T,i}(k)} (S_j^B - \tilde{S}_e^B)| \\ \tilde{L}_i^C = \frac{1}{3} C_i - |\sum_{j \in \Omega_{B,i}(k) \cup \Omega_{T,i}(k)} (S_j^C - \tilde{S}_e^C)| \end{cases} \quad (11)$$

При переключении нагрузки базовой станции после снижения нагрузки переменного тока рассчитывается интервал распределения безопасного расстояния для определения того, соответствует ли рабочая точка требованиям безопасного расстояния.

3 Многоцелевая модель оптимизации и регулирования для энергосберегающих, экологически чистых и безопасных ADN, содержащих EH

3.1 Исследование механизма регулирования безопасного расстояния для EH, содержащих ветро-солнечную энергию и гибкие нагрузки

Спонтанная ветро-солнечная энергия влияет на безопасное расстояние ADN, что приводит к спонтанному безопасному расстоянию. В то же время, сокращение нагрузок переменного тока и перераспределение нагрузок базовых станций оказывают значительное влияние на безопасное расстояние. Поэтому после регулирования ветро-солнечной энергии и гибких нагрузок требуется активное управление безопасным расстоянием в ADN. По этой причине в данной статье предлагается подключить накопители энергии к узлу EH ADN для повышения коэффициента энергопотребления распределенной ветро-солнечной энергии, уменьшения количества отработанной ветровой и солнечной энергии и регулирования мощности взаимодействия между EH, содержащим спонтанную ветро-солнечную энергию, гибкими нагрузками и ADN. Кроме того, к ADN подключаются накопители энергии и статические компенсаторы реактивной мощности. Таким образом, ADN должен удовлетворять ограничениям безопасности в (12).

$$\begin{cases} S^\varphi = S^A + S^B + S^C \\ |S_{B,i}^\varphi(k)| = |\sum_{j \in \Omega_{B,i}(k)} [S_j^\varphi - (\tilde{S}_e - \Delta S_e) - Q_{svc} - P_{bess}]| \leq C_{B,i} \quad \forall i \in B, \phi_k \notin B \\ |S_{T,i}^\varphi(k)| = |\sum_{j \in \Omega_{T,i}(k)} [S_j^\varphi - (\tilde{S}_e - \Delta S_e) - Q_{svc} - P_{bess}]| \leq C_{T,i} \quad \forall i \in T, \phi_k \notin T \end{cases} \quad (12)$$

где ΔS_e — величина изменения мощности взаимодействия между EH и ADN после учета снижения нагрузки переменного тока, перераспределения нагрузки BS и оптимизации количества отработанной ветровой и солнечной энергии при спонтанном распределении ветровой и солнечной энергии; Q_{svc} — величина компенсации реактивной мощности статического устройства компенсации реактивной мощности, подключенного к ADN; и P_{bess} — мощность зарядки и разрядки накопителя энергии, подключенного к ADN.

В этом случае безопасное расстояние ADN с EH, содержащим спонтанную ветро-солнечную энергию и гибкую нагрузку, показано в (13).

$$\begin{cases} \tilde{L}_i^A = \frac{1}{3} C_i - |\sum_{j \in \Omega_{B,i}(k) \cup \Omega_{T,i}(k)} [S_j^A - (\tilde{S}_e - \Delta S_e)^A - Q_{svc}^A - P_{bess}^A]| \\ \tilde{L}_i^B = \frac{1}{3} C_i - |\sum_{j \in \Omega_{B,i}(k) \cup \Omega_{T,i}(k)} [S_j^B - (\tilde{S}_e - \Delta S_e)^B - Q_{svc}^B - P_{bess}^B]| \\ \tilde{L}_i^C = \frac{1}{3} C_i - |\sum_{j \in \Omega_{B,i}(k) \cup \Omega_{T,i}(k)} [S_j^C - (\tilde{S}_e - \Delta S_e)^C - Q_{svc}^C - P_{bess}^C]| \end{cases} \quad (13)$$

где $(\tilde{S}_e - \Delta S_e)^A$, $(\tilde{S}_e - \Delta S_e)^B$, and $(\tilde{S}_e - \Delta S_e)^C$ представляют собой трехфазные мощности взаимодействия между оптимизированным генератором электроэнергии с учетом ограничения нагрузки переменного тока, перераспределения нагрузки базовой станции и количества

неиспользованной ветровой и солнечной энергии соответственно; Q_{svc}^A , Q_{svc}^B

и Q_{svc}^C представляют собой величины компенсации трехфазной реактивной мощности оптимизированного статического устройства компенсации реактивной мощности, подключенного

к сети ADN; P_{bess}^A , P_{bess}^B и P_{bess}^C соответственно представляют собой трехфазные мощности зарядки и разрядки оптимизированного накопителя энергии, подключенного к ADN.

3.2 Многоцелевая модель оптимального регулирования для ADN с EH

3.2.1 Целевая функция

Три целевые функции многоцелевой модели оптимального распределения потоков мощности со спонтанной ветро-солнечной энергией и гибким безопасным расстоянием нагрузки ADN выглядят следующим образом:

1) Целевое безопасное расстояние

Цель обеспечения безопасного расстояния состоит в том, чтобы осуществлять ограничение нагрузки переменного тока и перераспределение нагрузки базовой станции при спонтанном распределении ветровой и солнечной энергии, оптимизированном за счет взаимодействия мощности генератора с распределительной сетью, накопителями энергии и устройствами компенсации реактивной мощности для обеспечения максимального безопасного расстояния для распределительной сети.

Целевая функция из (14) показана ниже:

$$f_1 = \max \left\{ C_i - \left| \sum_{\Omega_{T,i}(k)} [S_j - (\tilde{S}_e - \Delta S_e) - Q_{svc} - P_{bess}] \right| \right\} \quad (14)$$

2) Целевые показатели стоимости энергии

Учитывая стоимость электроэнергии ADN и стоимость перераспределения нагрузки базовой станции, устанавливается целевая функция стоимости энергии, как показано в (15).

$$f_2 = \min \left\{ \sum_{i=1}^{n_{EH}} [P_{i,bess} C_{bess} + (P_{i,a} - \Delta P_{i,a}) C_a + P_{i,h} C_h + P_{i,e} C_e + (P_{i,b} - \Delta P_{i,b}) C_b] + P_{loss} C_{loss} \right\} \quad (15)$$

где n_{EH} — количество EH, используемых сетью ADN; $P_{i,bess}$ — мощность зарядки и разрядки накопителя энергии i -го узла EH; $P_{i,a}$ и $\Delta P_{i,a}$ — мощность агрегации переменного тока i -го узла EH и ее уменьшение соответственно; $P_{i,h}$ — нагрузка охлаждения и обогрева i -го узла EH; $P_{i,e}$ — другие электрические нагрузки i -го узла EH; $P_{i,b}$ и $\Delta P_{i,b}$ — нагрузка и передача данных на базовой станции i -го узла EH соответственно; и P_{loss} — активная мощность потерь сети ADN; $C_{bess}, C_a, C_h, C_e, C_b, C_{loss}$ — соответственно нагрузка зарядки и разрядки накопителя энергии, нагрузка переменного тока, электрическая нагрузка охлаждения и обогрева, нагрузка базовой станции и коэффициент стоимости потерь сети.

3) Целевой показатель потерь в активной сети

Целью минимизации потерь в активной сети является минимизация потерь в активной сети всей сети ADN с учетом снижения нагрузки AC и перераспределения нагрузки BS посредством оптимизации безопасного расстояния ADN. Ее целевая функция показана ниже (16):

$$f_3 = \min \left\{ \sum_{i=1}^N U_i \sum_{j \in \Gamma} U_j [G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}] \right\} \quad (16)$$

где Γ — множество всех узлов, соединенных с узлом i .

3.2.2 Ограничительное условие

1) Ограничения баланса мощности

$$\begin{cases} P_{i,0} - (\tilde{P}_{i,e} - \Delta P_{i,e}) - \Delta P_{i,bess} - P_{i,bess} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{i,0} - (\tilde{Q}_{i,e} - \Delta Q_{i,e}) - \Delta Q_{i,svc} - Q_{i,svc} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (17)$$

$$\tilde{P}_{i,e} \quad \tilde{Q}_{i,e}$$

где $\tilde{P}_{i,e}$ и $\tilde{Q}_{i,e}$ — спонтанные значения активной и реактивной мощности EH i -го узла с ADN, соответственно; если узел не содержит EH, переменная равна 0; $\Delta P_{i,e}$ и $\Delta Q_{i,e}$ — значения изменения активной и реактивной мощности EH i -го узла с ADN, соответственно; если узел не содержит EH, переменная равна 0; $\Delta P_{i,bess}$ — мощность зарядки и разрядки накопителя i -го узла после оптимизации; $Q_{i,svc}$ — начальное значение компенсации стационарного устройства компенсации реактивной мощности до оптимизации i -го узла; и $\Delta Q_{i,svc}$ — величина изменения компенсации статического устройства компенсации реактивной мощности после оптимизации i -го узла.

2) Ограничения мощности электрической нагрузки базовой станции

Нагрузка базовой станции должна удовлетворять верхнему пределу, то есть она не может быть перегружена, как показано в (18).

$$0 \leq L_b \leq L_{b \max} \quad (18)$$

где $L_{b \max}$ — номинальная мощность электрической нагрузки базовой станции.

3) Ограничения общей мощности нагрузки базовой станции

Суммарная величина всех нагрузок базовых станций в ADN должна оставаться неизменной при переключении нагрузок базовых станций. Если общая электрическая нагрузка базовой станции равна L , то ограничение общей мощности ADN должно удовлетворять (19).

$$L = \sum_{i \in \Omega_b} L_{i,b} \quad (19)$$

где $L_{i,b}$ — электрическая нагрузка i -й базовой станции.

4) Ограничения устройств компенсации реактивной мощности

$$0 \leq Q_{svc} \leq Q_{svc \max} \quad (20)$$

где $Q_{svc \max}$ — номинальная мощность устройства компенсации реактивной мощности.

5) Ограничения по емкости заряда/разряда накопителя энергии

$$P_{bess \min} \leq P_{bess} \leq P_{bess \max} \quad (21)$$

где $P_{bess \min}$ и $P_{bess \max}$ являются нижним и верхним пределами заряда и разряда устройства хранения энергии соответственно.

6) Ограничения снижения нагрузки переменного тока

Нагрузки переменного тока должны обеспечивать суммарное снижение мощности, которое не превышает максимально допустимое суммарное снижение нагрузки переменного тока до снижения, с учетом ограничений, показанных в (22).

$$0 \leq \max \Delta P_{i,a} \leq \alpha_{i,a} P_{i,a} \quad (22)$$

где $\alpha_{i,a}$ — это максимально допустимое снижение суммарной нагрузки переменного тока в i -м узле.

7) Ограничения безопасного расстояния

Ограничение безопасного расстояния ADN выполняется при запасе надёжности основного трансформатора не менее 30 %, как показано в (23).

$$L_i^A + L_i^B + L_i^C \geq 30\% C_{T,i} \quad (23)$$

3.2.3 Наилучшее компромиссное решение

Для варианта моделирования пиковой нагрузки ADN, чтобы улучшить запасы нагрузки и безопасного расстояния ADN, в качестве основных переменных решения рассматривались объем передачи нагрузки связи базовой станции и снижение нагрузки переменного тока, при этом одновременно учитывались обеспечение безопасного расстояния ADN, объем мощности зарядки и разрядки нового накопителя энергии, а также объем компенсации реактивной мощности статического устройства компенсации реактивной мощности. Переменные решения показаны в (24) ниже:

$$U = [L_{1,b}, \dots, L_{i,b}, P_{1,a}, \dots, P_{i,a}, Q_{1.svc}^A, Q_{j.svc}^A, Q_{1.svc}^B, Q_{j.svc}^B, Q_{1.svc}^C, Q_{j.svc}^C] \quad (24)$$

где $L_{i,b}$ это нагрузка базовой станции i -го узла EH, $P_{i,a}$ — это суммарная нагрузка переменного тока

i -го узла EH, и $Q_{j.svc}^A$, $Q_{j.svc}^B$ и $Q_{j.svc}^C$ представляют собой фазы A, B и C компенсации реактивной мощности j -го устройства компенсации реактивной мощности соответственно.

Многоцелевая оптимизационная модель решалась с использованием комбинации расчетов потока мощности и алгоритма NSGA-II. Для оценки решений использовалась нечеткая функция удовлетворения, вычисляющая уровни удовлетворения для недоминирующих решений на основе безопасного расстояния, спонтанной ветровой и солнечной энергии и активных потерь сети. На основе множества Парето-оптимальных решений оптимальное компромиссное решение выводится с использованием метода максимального нечеткого удовлетворения, как показано в (25).

$$\mu_i^n = \begin{cases} 1 & f_{i,n} \leq f_{i,\min} \\ (f_{i,\max} - f_{i,n}) / (f_{i,n} - f_{i,\min}) & f_{i,\min} \leq f_{i,n} \leq f_{i,\max} \\ 0 & f_{i,n} \geq f_{i,\max} \end{cases} \quad (25)$$

Удовлетворенность i -й целевой функцией (μ_i^n) для n -го недоминируемого решения определяется следующим уравнением, где i принимает значения 1, 2, 3; $f_{i,n}$ — значение i -й целевой функции для n -го недоминируемого решения; $f_{i,\max}$ — максимальное значение i -й целевой функции среди множества Парето-оптимальных решений, а $f_{i,\min}$ — минимальное значение i -й целевой функции среди множества Парето-оптимальных решений.

На основе значений удовлетворенности целевых функций стандартизация каждого недоминирующего решения рассчитывается с использованием (25). После стандартизации удовлетворенности решение, соответствующее максимальному стандартизованному значению удовлетворенности, определяется как оптимальное компромиссное решение.

$$\mu_n = \frac{\sum_{i=1}^3 \mu_i^n}{\sum_{n=1}^N (\sum_{i=1}^3 \mu_i^n)} \quad (26)$$

где μ_n — значение удовлетворенности после нормализации n -го недоминируемого решения, а N — количество недоминируемых решений в множестве Парето-оптимальных решений.

3.2.4 Процесс решения

Многоцелевая оптимизационная модель была решена путем объединения метода расчета прямого и обратного распространения, алгоритма NSGA-II и метода максимального нечеткого удовлетворения. В целевую функцию были добавлены изменения ограничения безопасного расстояния на основе штрафной функции ограничения безопасности напряжения. Для варианта моделирования перегрузки нагрузки базовой станции ADN в качестве условия управления используется ограничение пропускной способности нагрузки базовой станции, чтобы гарантировать, что нагрузка базовой станции удовлетворяет ограничению пропускной способности. Кроме того, оптимизируются безопасное расстояние ADN, количество потерянной ветровой и солнечной энергии и потери активной сети.

Процесс решения многоцелевой оптимизационной модели ADN выглядит следующим образом:

Этап 1: Получите информацию о распределенной ветро-солнечной энергии, нагрузке базовой станции, нагрузке переменного тока и параметрах EH для ADN.

Этап 2: Определите, удовлетворяет ли нагрузка базовой станции ограничению по мощности. Если да, перейдите к шагу 6. Если нет, алгоритм генерации с обратным распространением и начальную электрическую нагрузку базовой станции комбинируют для выполнения прогностического расчёта ADN.

Этап 3: На основе алгоритма NSGA-II вычислите значения трех целевых функций: безопасного расстояния, количества неиспользованной ветровой и солнечной энергии и активных потерь в сети, и получите набор Парето-оптимальных решений.

Этап 4: Примите решение с использованием алгоритма нечеткого максимального удовлетворения для выбора оптимального компромиссного решения из множества Парето-оптимальных решений.

Этап 5: Получите переменные решения в рамках оптимального компромиссного решения и рассчитайте объем передачи нагрузки базовой станции и объем снижения нагрузки переменного тока.

Этап 6: Обновите текущие значения на основе метода прогностического расчёта производства прямых и обратных сигналов и рассчитайте безопасное расстояние ADN.

Этап 7: Выведите результаты вычислений и завершите процесс.

Блок-схема представлена на рис. 2.

4 Пример анализа моделирования

4.1 Параметры алгоритмической системы

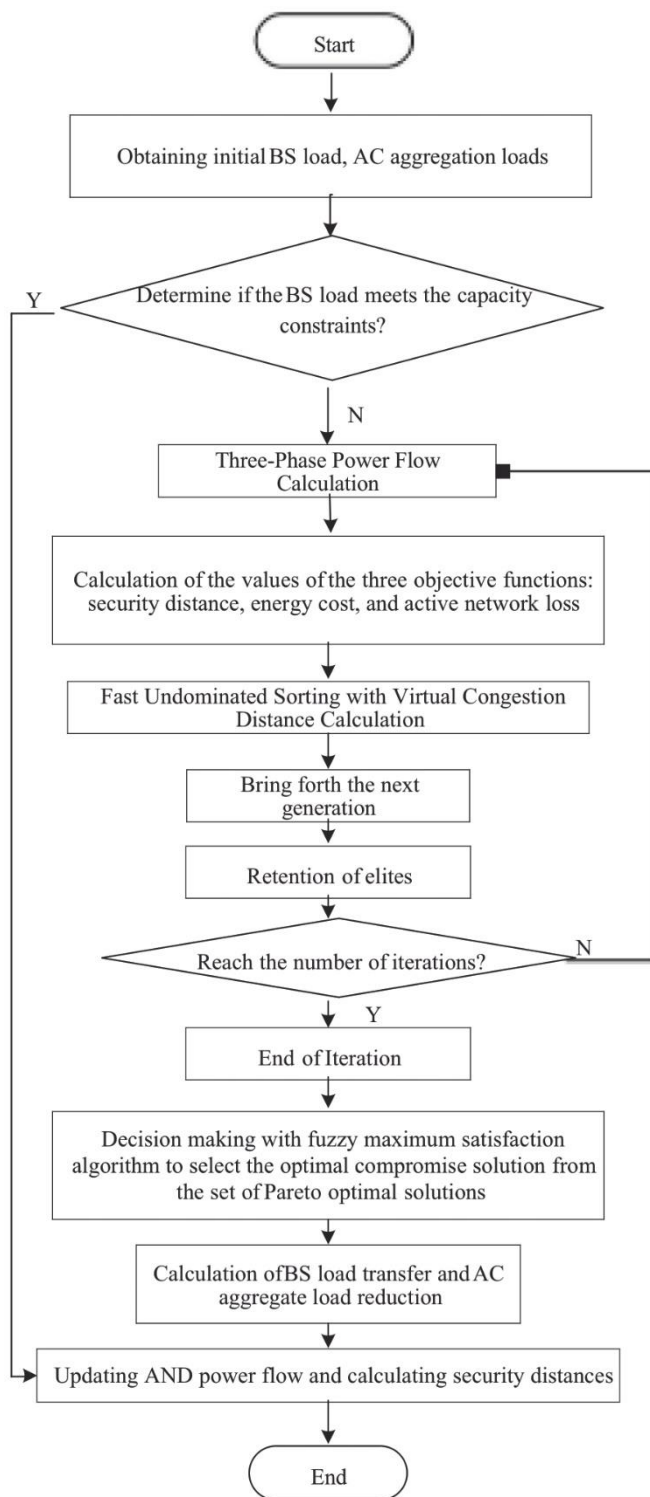


Рис. 2. Блок-схема алгоритма.

Для проверки достоверности предложенного в этом разделе подхода, метод расчета и модель были протестированы с использованием усовершенствованной системы распределения узлов IEEE33. В этой конфигурации содержится пять узлов — узел 1, узел 8, узел 15, узел 20 и узел 29 — вес они подключены к генераторам энергии, содержащим спонтанную ветро-солнечную энергию и гибкие нагрузки, каждый из которых оснащен накопителем энергии номинальной мощностью 100 кВт. Кроме того, три узла — узел 1, узел 18 и узел 22 — подключены к статическим компенсаторам реактивной мощности, каждый мощностью 100 реактивный киловольт-ампер. Система распределения узлов IEEE33 показана на рис. 3 ниже. Распределенные параметры ветро-солнечной энергии и генераторов энергии приведены в таблицах 2 и 3.

4.2 Анализ результатов

4.2.1 Анализ изменения мощности взаимодействия ЕН с гибкими нагрузками.

Для проверки влияния нагрузки переменного тока и нагрузки базовой станции на мощность взаимодействия между ЕН и ADN, начальная тепловая нагрузка была установлена на уровне 150 кВт, а остальные электрические нагрузки — на уровне 100 кВт. Начальная нагрузка переменного тока была установлена на уровне 180 кВт, а начальная нагрузка базовой станции — на уровне 150 кВт.

Изменение мощности взаимодействия при изменении гибкой нагрузки показано на рис. 4, где изменение гибкой нагрузки может быть результатом либо снижения нагрузки переменного тока, либо переноса нагрузки базовой станции. По мере увеличения степени ограничения нагрузки переменного тока или переноса нагрузки базовой станции гибкая нагрузка энергоснабжающей сети уменьшается, что приводит к увеличению мощности взаимодействия между ЕН и ADN. Следовательно, изменения нагрузки базовой станции и нагрузки переменного тока линейно связаны с мощностью взаимодействия соответственно. При этом, в отличие от снижения нагрузки переменного тока, перенос нагрузки базовой станции влияет на нагрузки других базовых станций, то есть другие ЕН, содержащие нагрузки базовых станций, имеют меньшую мощность взаимодействия с ADN.

На рис. 5 показано изменение мощности взаимодействия между ЕН и спонтанной ветро-солнечной энергией, а также гибкой нагрузкой. Рассматривая спонтанную ветро-солнечную энергию, при сокращении нагрузки переменного тока или переключении нагрузки базовой станции мощность взаимодействия между ЕН и ADN постепенно увеличивается. Это изменение больше не соответствует линейной зависимости между величиной изменения гибкой нагрузки и мощностью взаимодействия между ЕН и ADN. Кроме того, ЕН постепенно переходит из состояния нагрузки в состояние мощности до того, как нагрузка переключится на другое состояние.

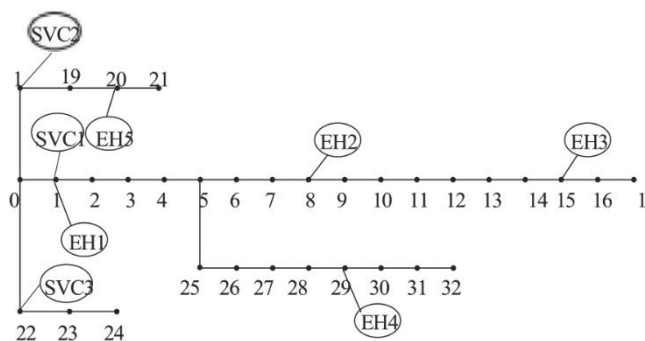


Рис. 3. Система узлов IEEE33.

Таблица 2. Распределенные параметры ветровой и фотоэлектрической энергии.

Parameters	Value	Parameters	Value
$v_{ci}/(m/s)$	3	P_{wtr}/kW	400
$v_{co}/(m/s)$	25	K	4.44
$v_r/(m/s)$	13	$c/(m/s)$	14.3
α	0.85	η	0.1365
β	0.90	S/m^2	$1,200 \times 2.16$

Таблица 3

Параметры ЕН.

Parameters	Value	Parameters	Value
η_C	0.95	v_w	0.2
η_T	0.95	v_{PV}	0.2
η_{PV}	0.9	v_e	0.5
η_{AC}	0.75	v_{et}	0.9
v_{PVt}	0.9	v_{wt}	0.9

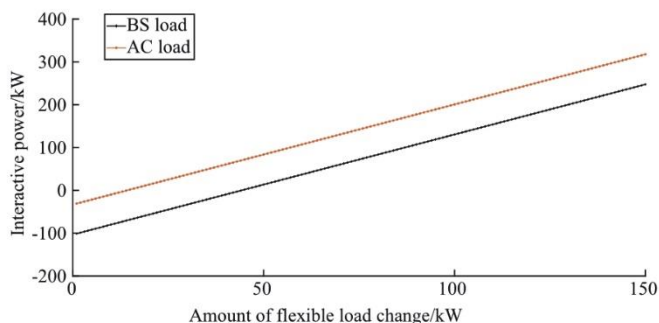


Рис. 4. Взаимодействие мощности между EH и ADN при изменении гибкой нагрузки.

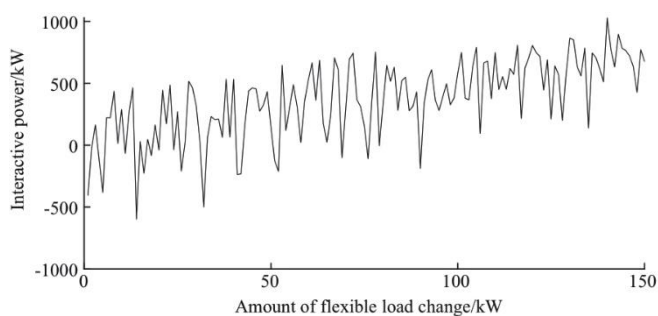


Рис. 5. Взаимодействие между EH и ADN при спонтанной выработке энергии ветра и солнца, а также гибкой нагрузке.

4.2.2 Анализ влияния EH с гибкими нагрузками на безопасные расстояния.

Для анализа влияния стратегии регулирования EH, включающего гибкие нагрузки, на безопасное расстояние ADN, были заданы варианты моделирования до и после изменения гибких нагрузок в EH, как показано в таблице 4.

Вариант моделирования 1 был продемонстрирован до начала гибкого снижения нагрузки. Вариант моделирования 2 учитывает снижение нагрузки переменного тока. Вариант моделирования 3 учитывает только перераспределение нагрузки базовой станции. Вариант моделирования 4 учитывает снижение нагрузки переменного тока и перераспределение нагрузки базовой станции. Остальные электрические нагрузки и нагрузки систем охлаждения/отопления не изменялись ни в одном из вариантов моделирования.

Во-первых, анализируется только влияние гибкого регулирования нагрузки на безопасное расстояние ADN, то есть рассматривается взаимосвязь между гибкой нагрузкой и безопасным расстоянием при определении ветро-солнечной энергетической мощности, как показано в таблице 5.

Как показано в таблице 5, при сравнении вариантов моделирования 1 и 2, безопасные расстояния для всех трёх фаз (А, В и С) увеличиваются, если учитывать только ограничение нагрузки переменного тока. Например, безопасное расстояние фазы А увеличивается на 17,0 %, фазы В — на 17,2 %, а фазы С — на 17,6 %. При сравнении вариантов моделирования 1 и 3, безопасные расстояния для всех трёх фаз также увеличиваются, если учитывать только перераспределение

нагрузки базовой станции. Например, безопасное расстояние фазы А увеличивается на 19,5 %, фазы В — на 18,0 %, а фазы С — на 18,5 %. По сравнению с безопасным расстоянием в варианте моделирования 2 (где рассматривается только снижение нагрузки переменного тока), трехфазные безопасные расстояния после переключения нагрузки базовой станции увеличиваются больше. Однако общая нагрузка базовой станции между ЕН остается неизменной при переключении базовой станции, что указывает на то, что безопасное расстояние ADN не коррелирует с общей нагрузкой ЕН линейным образом. Вариант моделирования 4 показывает результаты после учета как снижения нагрузки переменного тока, так и переключения нагрузки базовой станции, где безопасное расстояние увеличивается на 17,1 % для фазы А, на 17,2 % для фазы В и на 17,7 % для фазы С. Безопасное расстояние в фазе С увеличилось на 17,7 %. Изменение безопасного расстояния в варианте моделирования 3 было более выраженным, чем в варианте моделирования 4, при этом изменения безопасного расстояния в вариантах моделирования 2 и 4 были более близкими. Доступ к ADN после выполнения спонтанных моделирований производства ветро-солнечной энергии n раз был зарегистрирован как рабочая точка n, при этом таблица 4 служила рабочей точкой 0 для каждого варианта моделирования. Трехфазное безопасное расстояние рабочей точки n в каждом варианте моделирования показано на рис. 6-8. Трехфазное безопасное расстояние сети ADN под воздействием спонтанной ветро-солнечной энергии в различных вариантах моделирования является спонтанным. Связь между ЕН, содержащим гибкие нагрузки, и безопасными расстояниями для спонтанной ветро-солнечной энергии согласуется с выводами, полученными в таблице 4 для определённой ветро-солнечной энергии.

4.2.3 Многоцелевой анализ оптимизации

Для проверки фактического эффекта снижения и перераспределения нагрузки переменного тока и нагрузки базовой станции предполагается, что максимальное снижение нагрузки переменного тока составляет 8%, а максимально допустимая мощность нагрузки базовой станции — 150 кВт. Также предполагается, что нагрузка базовой станции ЕН 3 превышает допустимый предел, при этом начальные значения ее нагрузки переменного тока и нагрузки базовой станции показаны на рис. 9. Из рис. 9 видно, что нагрузка базовой станции превышает допустимый предел в период с 12:00 до 20:00, и, следовательно, нагрузку базовой станции необходимо перераспределить. Эта проблема решается с помощью многоцелевой модели оптимального распределения потоков мощности и алгоритма. Применяя алгоритм прямого и обратного распределения потоков мощности, решение многоцелевой модели оптимизации NSGA-II и метод максимального нечеткого удовлетворения, получаются следующие оптимальные результаты:

Таблица 4. Данные о нагрузке базовой станции и нагрузке переменного тока в ЕН.

Scenario	EH	BS load /kW	AC load /kW	Scenario	EH	BS load /kW	AC load /kW
Scenario 1	1	100	180	Scenario 2	1	100	167.4
	2	120	200		2	120	184.0
	3	150	240		3	150	202.4
Scenario 3	1	120	180	Scenario 4	1	120	167.4
	2	125	200		2	125	184.0
	3	125	240		3	125	202.4

Таблица 5. Взаимосвязь между изменением гибкой нагрузки и безопасным расстоянием.

Scenario	Phase	security distance/MVA	Scenario	Phase	security distance/MVA
Scenario 1	A	2.4015	Scenario 2	A	2.8102
	B	2.3672		B	2.7740
	C	2.3113		C	2.7190
Scenario 3	A	2.8301	Scenario 4	A	2.8116
	B	2.7937		B	2.7753
	C	2.7388		C	2.7204

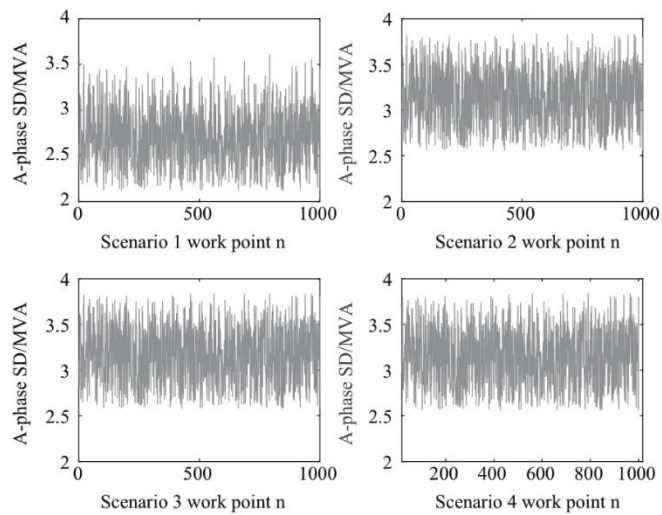


Рис. 6. Безопасное расстояние фазы А в рабочей точке.

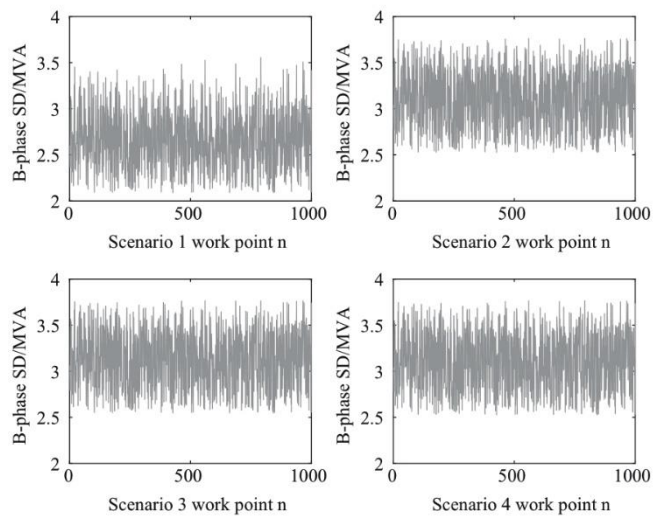


Рис. 7. Безопасное расстояние фазы В в рабочей точке.

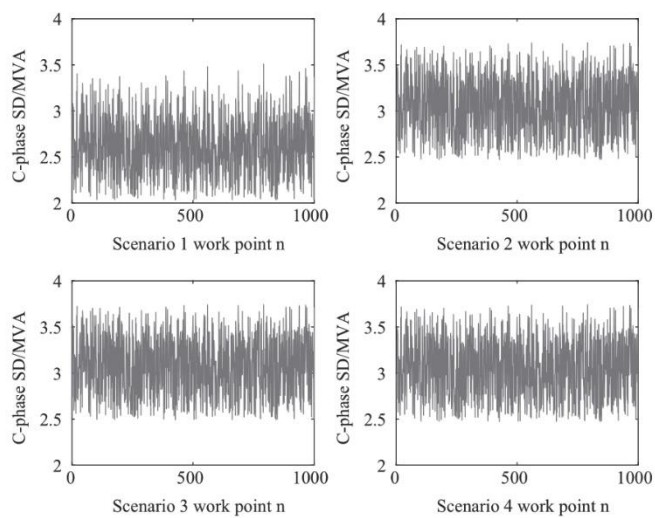


Рис. 8. Безопасное расстояние фазы С в рабочей точке.

Алгоритм устанавливает размер популяции NSGA-II равным 100, коэффициент границы Парето равным 0,3, а количество поколений для генетической изменчивости — 200. Граница Парето, рассчитанная на основе NSGA-II для одного периода, показана на рис. 10 ниже.

Распределение границы Парето является относительно равномерным и демонстрирует хорошую сходимость, что указывает на то, что предложенные в данном исследовании модель и алгоритм могут эффективно обеспечить многоцелевую скоординированную оптимизацию и получить соответствующее множество решений Парето.

На рис. 11 показан объем перераспределения нагрузки BS для всех EH.

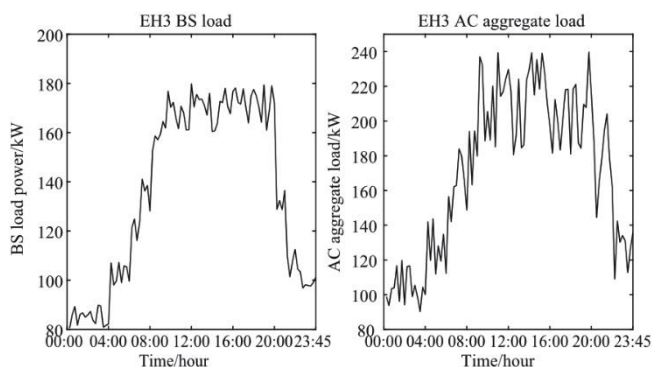


Рис. 9. Начальное значение гибкой нагрузки EH 3.

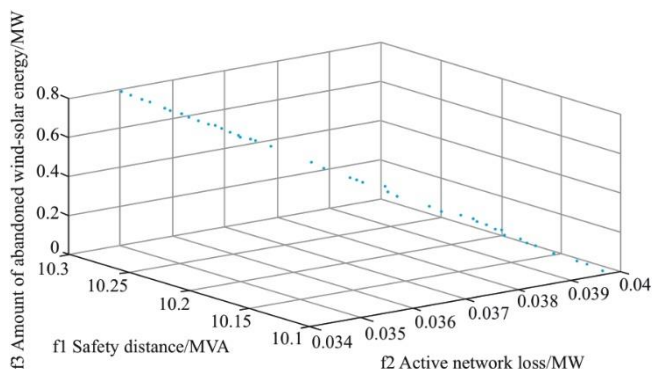


Рис. 10. Граница Парето в одном периоде.

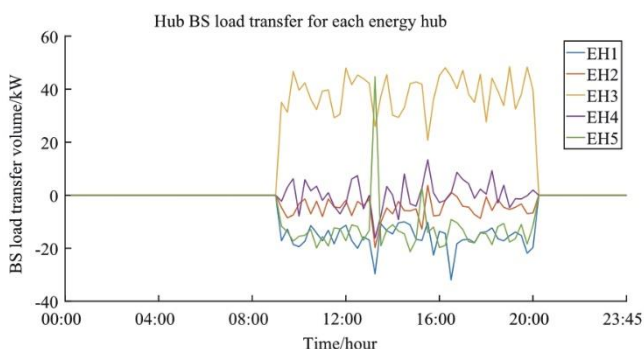


Рис. 11. Объем передачи нагрузки базовой станции для каждого EH.

Как показано на рис. 11, для каждого объема передачи нагрузки базовой станции, и как показано на рис. 9, в периоды с 00:00 до 08:00 и с 20:00 до 23:45 нагрузка базовой станции не достигла уровня перегрузки в 150 кВт. В эти периоды ADN не оптимизируется многоцелевой моделью, поэтому объем передачи нагрузки всех базовых станций для всех равен 0. В период с 08:00 до 20:00, когда

коммуникационная нагрузка базовой станции чрезмерно велика, модель и метод, предложенные в данном исследовании, начинают ее оптимизировать. В это время EH 3 имеет наибольший объем передачи нагрузки базовой станции, достигающий максимума в 50 кВт, а передачи от других EH в подавляющем большинстве случаев отрицательны, что указывает на то, что они принимают нагрузку, переданную от EH 3. Для обеспечения безопасного расстояния, потерь активной сети и ограничений стоимости энергии, объем передачи от EH 4 появляется в небольшом количестве положительных случаев, что приводит к оптимальной схеме передачи.

Как показано на рис. 12, нагрузки переменного тока снижаются в период с 08:00 до 20:00, при этом во всех EH наблюдается снижение потребления переменного тока. Максимальное значение снижения составляет приблизительно 19 кВт, хотя степень снижения нагрузок переменного тока в разных EH варьируется в зависимости от периода.

Результаты оптимизации с использованием общего трехфазного безопасного расстояния ADN в качестве целевой функции показаны на рис. 13. В периоды с 00:00 до 08:00 и с 20:00 до 23:45 алгоритм оптимизации не выполнялся, поскольку нагрузка базовой станции не превышала предел. В эти периоды безопасное расстояние до и после оптимизации не изменилось. Однако в период с 08:00 до 20:00 алгоритм начинает оптимизацию, поскольку нагрузка базовой станции превышает предел. До оптимизации общее трехфазное безопасное расстояние ADN составляло от 7,8 до 11,3 мегавольт-ампер, а после оптимизации — от 7,8 до 11,4 мегавольт-ампер. Как показано на рисунке, безопасное расстояние ADN значительно увеличилось в период действия оптимизации.

На рис. 14 показаны потери активной сети ADN до и после оптимизации. В периоды с 00:00 до 08:00 и с 20:00 до 23:45 алгоритм оптимизации не выполняется, поскольку нагрузка базовой станции не превышает предела. В эти периоды потери активной сети до и после оптимизации не изменяются. Однако в период с 08:00 до 20:00, когда применяется алгоритм, потери активной сети ADN до оптимизации составляют от 0,026 до 0,095 МВт, а после оптимизации — от 0,025 до 0,090 МВт. Как видно на рис. 14, в периоды, когда действовала оптимизация, наблюдается значительное снижение потерь активной сети ADN.

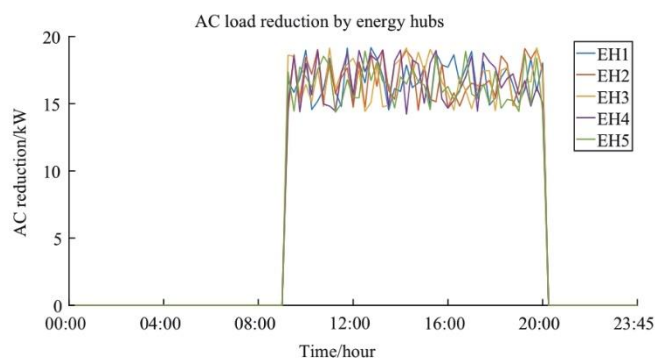


Рис. 12. Величина снижения нагрузки переменного тока для каждого EH.

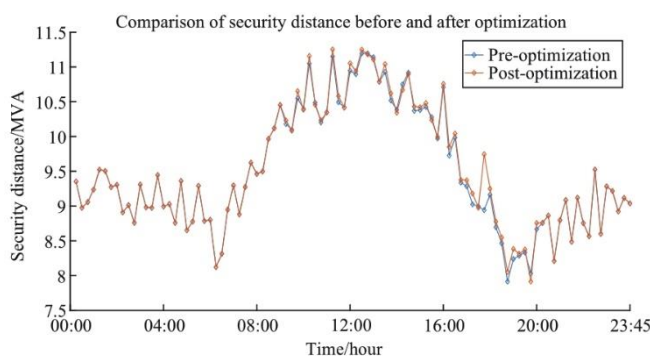


Рис. 13. Сравнение безопасного расстояния до и после оптимизации.

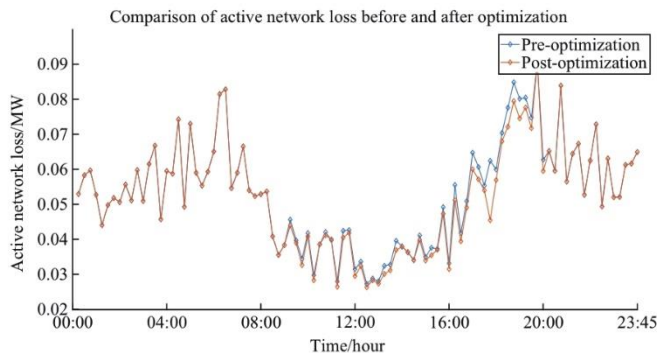


Рис. 14. Сравнение потерь в активной сети до и после оптимизации.

Таблица 6. Затраты на электроэнергию до и после оптимизации.

Scenario	Pre-Optimization	Post-Optimization	Reduction Rate/%
Cost/10,000 Yuan	3.5157	3.4248	0.026

В таблице 6 показаны затраты энергии ADN до и после оптимизации, где общие затраты энергии за один день снизились на 0,0909 млн юаней по сравнению с периодом до оптимизации. Экономия составляет 0,026 %.

Изменения величины напряжения в узлах и фазового угла напряжения каждого узла за 96 временных периодов суток после оптимизации показаны на прилагаемом рисунке А1 из Приложения А. Величины напряжения в узлах для фаз А, В и С поддерживаются в диапазоне 0,96–1,00 ед., что удовлетворяет ограничению величины напряжения 0,95–1,05 ед. Фазовые углы напряжения, показанные в правой части рисунка А1, следующие: фазовый угол фазы А находится в

пределах -0.2° и 0.2° ; фазовый угол фазы В находится в пределах -120.5° и 119.5° ; а фазовый угол фазы С находится в пределах 119.7° и 120.0° . Эти фазовые углы удовлетворяют условиям преобразования трехфазных фазовых углов. Все напряжения в узлах каждого периода соответствуют ограничениям безопасности напряжения.

В заключение, предложенный в данной статье метод эффективно снижает нагрузку переменного тока, перераспределяет нагрузку базовой станции, повышает безопасное расстояние ADN, уменьшает потери в активной сети, обеспечивает соблюдение ограничений по напряжению и способствует энергосбережению, безопасности и экономичности работы электросети.

5 Заключение

В данной статье предлагается метод анализа безопасного расстояния для ADN с учетом реагирования на спрос со стороны энергетического узла. Основные выводы заключаются в следующем:

- 1) Путем создания модели EH с учетом спонтанной энергии ветра и солнца, а также гибких нагрузок, были выявлены взаимосвязи между изменениями спонтанной энергии ветра и солнца, гибкими нагрузками и мощностью взаимодействия между EH и ADN.

- 2) Была разработана модель безопасного расстояния ADN с гибкой нагрузкой в EN, и рассмотрено влияние изменений гибкой нагрузки на безопасное расстояние ADN. Результаты показывают, что после учета ограничения нагрузки переменного тока и перераспределения нагрузки базовой станции безопасное расстояние между фазами A, B и C увеличилось на 17,1 %, 17,2 % и 17,7 % соответственно.
- 3) Для оптимизации безопасного расстояния, стоимости энергопотребления и активных потерь в сети была разработана многоцелевая оптимизационная и управляющая модель энергосбережения, экономичности и безопасности ADN. Эта модель увеличивает безопасное расстояние ADN, облегчает перераспределение нагрузки базовых станций и снижает нагрузку переменного тока. Оптимизированная экономия общих затрат на электроэнергию за один день составила 0,026%, а общее трехфазное безопасное расстояние границ ADN улучшилось на 0,1 MVA.

Однако влияние других гибких нагрузок, таких как нагрузки от зарядки электромобилей, на безопасное расстояние в данном исследовании подробно не рассматривалось. В будущих исследованиях этот фактор будет учтен в многоцелевой оптимизации, и его влияние на безопасное расстояние будет изучено дополнительно. Кроме того, алгоритм оптимизации, использованный в данном исследовании, имеет потенциал для повышения точности. В будущих исследованиях будет рассмотрено использование решателей для достижения более высокой точности.

О вкладе авторов в проект CRediT

Руи Ма: Написание – рецензирование и редактирование. **Ци Чжу:** Написание первоначального варианта текста. **Шэньян Лю:** Написание первоначального варианта текста. **Цинь Ян:** Написание – рецензирование и редактирование. **Мо Ши:** Предоставление ресурсов.

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

Данное исследование частично финансировалось Национальным фондом естественных наук Китая (№ 51977012, № 52307080).

Приложение A

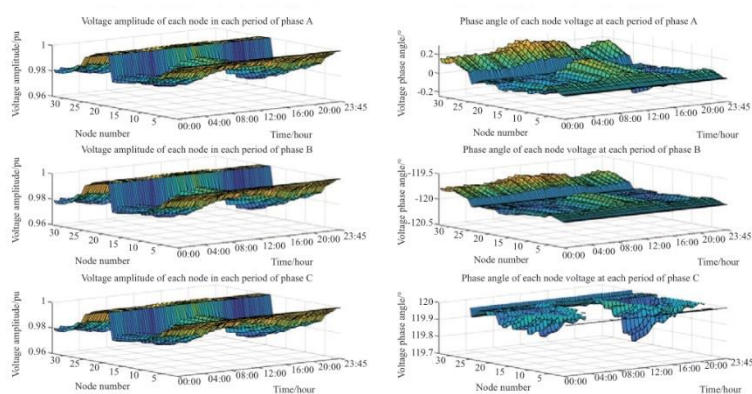


Рис. A1. Напряжение каждого узла за 96 периодов после оптимизации.

Список используемой литературы

- [1] С. Ю. Лю, Ю. Гао, Х. Дж. Ян и др., Оптимальная стратегия управления гибкой нагрузкой на основе гибридного прямого управления нагрузкой и времени использования, *Global Energy Interconnect.* 6 (3) (2023) 297-307.
- [2] МЭА, Будущее охлаждения. МЭА, Париж, 2018.
- [3] П. Бао, Ц. С. Сюй, Ю. Б. Ян, Моделирование и агрегированное управление крупномасштабными базовыми станциями 5G и резервными системами хранения энергии для вторичной поддержки частоты, *Appl.Energy* 357 (2024) 122498.
- [4] М.С.Ся, Ф.Дж.Чен, К.Ф.Чен и др., Оптимальное планирование отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха в жилых домах на основе глубокого обучения с подкреплением, *J.Mod Power Syst.Clean Energy* 11 (4)(2023) 1596-1605.
- [5] С.Си, С.Л.Сюй, К.Ван и др., Кластеризация электрической нагрузки в интеллектуальной сети: методологии, приложения и будущие тенденции, *J.Mod Power Syst.Clean Energy* 9 (2) (2021) 237-252.
- [6] П. Бао, Ц. С. Сюй, Ю. Б. Ян и др., Решение на основе кооперативной игры для динамического экономического распределения энергосистемы с учетом неопределенностей: тематическое исследование крупномасштабных базовых станций 5G в качестве виртуальной электростанции, *Appl.Energy* 368 (2024) 123463.
- [7] П. Йонг, Н. Чжан, Ю. Х. Лю и др., Изучение потенциала распределения сотовых базовых станций для регулирования частоты энергосистемы, *IEEE Trans.Power Syst.* 37 (1) (2021) 820-823.
- [8] С. Пирузи, Модель виртуальной электростанции на основе планирования работы энергоблоков с учетом ограничений сети на рынке на сутки вперед в соответствии со стратегией управления энергией, *IET Gener.Transm.Distrib.* 17 (22) (2023) 4958-4974.
- [9] М. Каземи, С. Й. Салехпур, Ф. Шахбаази и др., Участие гибких узлов на основе накопителей энергии в регулировании резервов на сутки вперед и энергетических рынках на основе скоординированной стратегии управления энергией, *Int.Trans.Electr.Energy Syst.*2022 (2022) 6481531.
- [10] Э. Шахраби, С. М. Хаками, А. Хасанхани и др., Разработка оптимального управления энергией энергетического узла в присутствии спонтанных возобновляемых источников энергии, *Sustain.Energy Grids Netw.*26 (2021) 100428.
- [11] П. Йонг, Н. Чжан, С. Ци и др., Участие базовых станций связи 5G в управлении спросом: ключевые технологии и перспективы, *Proc.CSEE* 41 (16) (2021) 5540-5552.
- [12] А.А. Эладл, М.И. Эль-Афифи, М.М. Эль-Саадави и др., Обзор энергетических узлов: модели, методы, классификация, приложения и будущие тенденции, *Alex.Eng.J.*68 (2023) 315-342.
- [13] Х.Ярмохаммади, Х.Абди, Комплексный оптимальный поток мощности и газа в многоканальных энергетических сетях при наличии систем хранения энергии с учетом программ реагирования на спрос, *Electr.Pow.Syst.Res.*214 (2023) 108810.
- [14] Дж.Дж.Ху, К.Т.Лиу, М. Шашидепур и др., Оптимальная работа энергетических узлов с крупномасштабными распределенными энергетическими ресурсами для управления перегрузкой распределительной сети, *IEEE Trans.Sustain.Energy* 12 (3) (2021) 1755-1765.
- [15] З.Л.Доу, С.Ю.Джанг, В.Ванг и др., Обзор ключевых технологий и типичных применений многостанционных интегрированных энергетических систем, *Global Energy Interconnect.*5 (3) (2022) 309-327.

- [16] Л. Донг, Дж. Вэй, Х. Лин и др., Распределенная оптимизация интегрированной энергетической электро-газ-тепловой системы с использованием многоагентного глубокого обучения с подкреплением, *Global Energy Interconnect*. 5 (6) (2022) 604-617.
- [17] М. Салехималех, А. Акбаримаджд, К. Валипур и др., Обобщенное моделирование и оптимальное управление потребностями в электроэнергии, тепле и охлаждении на основе энергетического узла, *Energy* 159 (2018) 669-685.
- [18] Ц. Сунь, Д. Се, Ц. Ю. Ни и др., Исследование экономической оптимизации планирования интегрированной энергетической системы парка с электро-тепло-охлаждение-газовой нагрузкой, *Electric Power* 53 (4) (2020) 79-88.
- [19] М. Чен, К. В. Гао, К. Л. Го и др., Моделирование и скоординированная оптимизация потенциала регулирования пространственно-временной нагрузки интернет-центров обработки данных: мотивация и архитектура, *Proc.CSEE* 42(19) (2022) 6945-6958.
- [20] Ю. Б. Лю, К. Ван, К. Цзэн и др., Ключевые технологии и перспективы управления энергопотреблением в сети 5G в рамках энергетического интернета, *Automat.Electric Power Syst.* 45(12) (2021) 174-183.
- [21] С. Попли, Р.К. Джха, С. Джайн, Комплексный обзор экологически чистых ИКТ с использованием 5G-NB-IoT: на пути к устойчивой планете, *Comput.Netw.*199(2021) 108433.
- [22] М. Чен, Ю.Х. Чжао, Ю.Х. Ли и др., Оптимальная работа интернет-центра обработки данных с кластерами ИБП на основе фотоэлектрических систем и систем хранения энергии, *Global Energy Interconnect*.7 (1) (2024) 61-70.
- [23] М. Чен, К.В. Гао, М. Шахидехпур и др., Моделирование нагрузки интернет-центра обработки данных для реагирования на спрос с учетом сочетания нескольких методов регулирования, *IEEE Trans.Smart Grid* 12(3)(2020)2060-2076.
- [24] Чжоу Ю.Й., Цзэн Б., 2022. Двухуровневый метод планирования для интернет-центра обработки данных и распределительной сети с учетом реагирования на спрос, в: Труды 5-й Международной конференции IEEE по электротехнике и энергетике (CIEEC), 2022, Нанкин, Китай, стр.: 3270-3275.
- [25] Дж. Сяо, Ц.С. Линь, Л.К. Бай и др., Безопасное расстояние для распределительной системы: определение, расчет и применение, *Int.Trans.Electr.Energy Syst.* 29 (5) (2019) e2838.
- [26] Дж.Сяо, Г.К.Зу, Х.Жу и др., Полная область безопасности квадранта для активной распределительной сети с высокой степенью проникновения распределенной генерации, *Журнал современных энергетических систем. Чистая энергия* 9(1)(2021)128-137.
- [27] Дж.Сяо, С.Х.Джанг, З.К.Кю и др., Геометрические свойства зоны безопасности распределительной системы: размер и форма, *Electr.Pow.Syst.Res.*210 (2022) 108106.
- [28] Х.Каи, С.К.Ху, К.Бу, Модель оптимального потока мощности с учетом ограничений превентивной безопасности и режимов управления IPFC, *Energies* 17(7)(2024) 1660.
- [29] Г.К.Ли, Дж.К.Гуан, Х.Ванг и др., Многоцелевое исследование оптимального потока мощности гибридной системы переменного/постоянного тока с DCPFC, *Power Syst.Technol.*44 (1) (2020) 238-244.
- [30] Б.М. Чжэн, Т.Ю, К.П.Ку и др., алгоритм Парето-оптимизации для распределенного многоцелевого потока мощности на основе многозонального параллельного сотрудничества, *Автоматизированные системы электроэнергетики* 42(20) (2018) 93-101.

- [31] С. Рахмани, Н. Амджади, Усовершенствованный метод достижения цели для решения многоцелевой задачи оптимального распределения мощности с учетом ограничений безопасности и динамического теплового режима линий, *Appl.Soft Comput.* 77 (2019) 41-49.
- [32] З. Ю. Ку, К. Ф. Сюй, Ф. Ян и др., Управление энергопотреблением на основе рыночных цен в подключенных к сети узлах возобновляемой энергии, включая гибкие источники, в соответствии с системами хранения тепловой энергии, водорода и сжатого воздуха, *J.Storage Mater.* 69 (2023) 107981.
- [33] К.В.Джанг, К.П.Ю, К.П.Ие и др., Экономическое управление энергией сетевых гибких возобновляемых энергетических узлов в соответствии с моделированием неопределенности методом нелинейного преобразования, *Energy* 278 (2023) 128054.
- [34] Х.Дж.Лианг, С. Пирузи, Система управления энергией на основе экономичной гибкой и надежной работы интеллектуальной распределительной сети, включающей интегрированную энергетическую систему хранения водорода и возобновляемых источников, *Energy* 293 (2024) 130745.
- [35] Ю.Дж.Линь, С.Х.Мяо, В.С.Янг и др., Стратегия оптимального планирования на сутки вперед для виртуальной электростанции в условиях множественной неопределенности, *Electric Power Automat.Equip.*41 (12)(2021) 143-150.
- [36] Л.Дж.Ге, В.Л.Ляо, С.Х.Ван и др., Моделирование суточных профилей нагрузки распределительной сети для генерации сценариев с использованием генеративной сети на основе потоков, *IEEE Access* 8 (2020) 77587-77597.
- [37] С.Чжан, З.Ван, З.Ю.Чжоу и др., Оптимальное распределение нескольких интегрированных фотоэлектрических базовых станций 5G для активного реагирования на спрос в распределительной сети, *Front.Energy Res.*10 (2022) 919197.
- [38] Р.Ма, В.А.Ао, Исследование спонтанного нечеткого безопасного расстояния активной распределительной сети с учетом трехфазного дисбаланса, *Proc.CSEE* 40 (23) (2020) 7600-7609.

Получено 24 июня 2024 г.;

отредактировано 7 августа 2024 г.; принято 21 октября 2024 г.



Отсканируйте для получения более подробной информации.

Экспертная оценка проводится компанией Global Energy Interconnection Group Co.Ltd.

*** Ответственный автор**

Адреса электронных почт: marui818@126.com (Р. Ма), 610566936@qq.com(Ц. Чжу), liushengyang2024@126.com (Ш. Лиу), qin.yan@csust.edu.cn (Ц. Ян), 6stonestone@sina.cn (М. Ши).

Эта статья переведена из журнала <Global Energy Interconnection> (ISSN: 2096-5117), выпуск 1, 2025 г. Оригинальное название статьи <Security distance analysis of active distribution network considering energy hub demand response>. Перевод предоставляется исключительно для справки; преимущественную силу имеет оригинал: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2024.10.013>

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



Руи Ма получил степень бакалавра в Чаншаском университете электроэнергетики (Чанша) в 1994 году, степень магистра в Хунаньском университете (Чанша) в 1999 году и степень доктора философии в Северо-Китайском университете электроэнергетики (Пекин) в 2006 году. В настоящее время он работает профессором в Чаншаском университете науки и технологий (Чанша). Его научные интересы включают анализ безопасности энергосистем, доступ к возобновляемым источникам энергии, рынок электроэнергии и низкоуглеродную электроэнергетику.



Ци Чжу получил степень бакалавра и магистра в Университете науки и технологий в Чанше, Китай, в 2019 и 2022 годах соответственно. Его научные интересы включают анализ и управление энергетическими системами.



Шенгян Лиу получил степень бакалавра в Хунаньском университете гуманитарных, естественных и технологических наук, Лоуди, Китай, в 2022 году и в настоящее время получает степень магистра в Чаншаском университете науки и технологий. Его научные интересы включают анализ и управление энергетическими системами.



Цинь Ян получила степень бакалавра в Уханьском университете (Ухань) в 2010 году, степень магистра в Техасском университете A&M (Колледж-Стейшен) в 2012 году и степень доктора философии в Техасском университете A&M (Колледж-Стейшен, США) в 2018 году. В 2021 году она стала доцентом в Чаншаском университете науки и технологий. Ее научные интересы включают электромобили, заряжаемые от розетки электросети, интеллектуальные сети, распределенные источники энергии и оптимизацию интегрированных энергетических систем.



Мо Ши получила степень бакалавра в Северо-Китайском электроэнергетическом университете (Пекин) в 2013 году, а степень магистра — в том же университете в 2016 году. В настоящее время работает в Научно-исследовательском институте электроэнергетики компании Guangdong Power Grid Co. Ее научные интересы сосредоточены на технологиях интеллектуального распределения электроэнергии.

(Редактор: Цзэдун Чжан)