

Управление ресурсами нагрузки на основе недоминируемого генетического алгоритма сортировки (NSGA-II) для поддержания значений частоты и напряжения

Ясин Ванг^{a,*}, Чжихан Чжу^b, Чжихун Ю^a, Зиган Ванг^a

^a Китайский научно-исследовательский институт электроэнергетики, Пекин 100048, КНР

^b Факультет электротехники, Чжэцзянский университет, Ханчжоу 310058, КНР

Аннотация. Обеспечение стабильной частоты и напряжения в последнее время становится все более сложной задачей для современных энергосистем. Это в первую очередь связано с колеблющимся и прерывистым характером возобновляемых источников энергии и неопределенностью спроса на электроэнергию. Для решения этих проблем в данном исследовании предлагается метод управления ресурсами нагрузки (LRM) для борьбы с внезапными помехами в электроснабжении. Метод LRM поддерживает первичное регулирование частоты и напряжения, а его интеграция с динамикой сети минимизирует установленную функцию потерь, вызванную участием нагрузки. Для повышения эффективности управления в LRM использовалась процедура настройки коэффициентов на основе недоминируемого генетического алгоритма сортировки (NSGA-II), направленная на улучшение минимального значения частоты/напряжения, снижение процента ошибки в установившемся режиме частоты/напряжения и минимизацию общих усилий по управлению нагрузкой. Для подтверждения эффективности предложенного подхода были проведены сравнительные эксперименты с тремя технологиями управления ресурсами нагрузки для вспомогательных услуг первичного регулирования в MATLAB/Simulink. По сравнению с традиционным оптимальным управлением нагрузкой или использованием только LRM, улучшенный LRM на основе NSGA-II демонстрирует превосходные характеристики. Он позволяет добиться лучшей частотной характеристики, переходных процессов напряжения и характеристик в установившемся режиме, а также учесть потери мощности.

Ключевые слова: Модель сети; Управление ресурсами нагрузки; Первичное реагирование; Интеллектуальная сеть; Многоцелевая оптимизация

0 Введение

Современные энергосистемы сталкиваются с дисбалансом мощности из-за колебаний в выработке возобновляемой энергии или неопределенных изменений спроса на нагрузку, что приводит к отклонениям частоты и напряжения от их стандартных значений [1-3]. Эти отклонения необходимо оперативно корректировать для обеспечения стабильности интеллектуальной сети. Традиционно первичные меры управления принимаются на стороне производства для восстановления баланса мощности и стабилизации частоты и напряжения [4].

Однако эти основные системы управления основаны на синхронных генераторах или крупных трансформаторах, что приводит к высоким экономическим затратам и загрязнению окружающей среды [5,6]. Кроме того, присущие им механические ограничения приводят к длительному времени отклика. Поэтому ресурсы нагрузки на стороне спроса должны эффективно управляться для обеспечения первичного регулирования значений частоты и напряжения [7].

В конце 1970-х годов [8] была предложена концепция вклада со стороны спроса в качестве дополнения или замены традиционных системных услуг. В частности, с увеличением присутствия интеллектуальных нагрузок в сетях с нетерпением ожидается появление технологий управления ресурсами нагрузки (LRM), которые могут участвовать в первичном управлении [9,10]. В работе [11] представлена стратегия модуляции нагрузкой, основанная на виртуальной инерции, для первичного регулирования частоты. Исследователи утверждают, что реагирующие нагрузки обладают значительным потенциалом для обеспечения первичного управления [7,12]. Например, бытовые приборы могут корректировать свои схемы нагрузки, чтобы помочь смягчить дисбаланс

мощности [13,14]. В работе [15] был предложен подход к первичному управлению напряжением с использованием водонагревателей с тепловым насосом для предотвращения повышения напряжения в фотоэлектрических системах. В работе [16] нагрузки кондиционеров выступают в качестве источников реакции напряжения/частоты на основе модели прогнозирующего управления.

Nomenclature			
θ_j	Phase angle	Q_e	Reactive branch flow on transmission line $e = ij$ or $e = ji$
ω_j	Frequency	P_{ij}	Active power transfer from bus i to bus j
P_j^m	Integrated active power injection	Q_{ij}	Reactive power transfer from bus i to bus j
V_j	Voltage magnitude	H_j	Inertia constant of generator
Q_j^m	Integrated reactive power injection	K_j	Coefficient related to voltage
p_j	Active controllable load power	$D_j\omega_j$	Active power variation caused by frequency-sensitive load and generator friction
q_j	Reactive controllable load power	$D_{jL}V_j$	Reactive power variation due to voltage deviation
P_e	Active branch flow on transmission line $e = ij$ or $e = ji$		

Более того, как указано в [17] и [18], управление нагрузкой должно осуществляться с минимальным воздействием на производительность конечного пользователя. С этой целью в [13] был представлен децентрализованный подход к управлению спросом для первичного регулирования частоты посредством прямого управления нагрузкой, не влияющий на комфорт потребителя. В [19] предложен неразрушающий метод управления нагрузкой для регулирования частоты на основе одноранговой связи. Опираясь на новую математическую концепцию — динамику сети как алгоритмы оптимизации, в работе [20] было разработано оптимальное управление нагрузкой (OLC), «повсеместное непрерывное быстродействующее распределенное управление первичной частотой нагрузки», которое стремится минимизировать общие потери. В работе [21] OLC было дополнительно усовершенствовано за счет выбора более подходящих коэффициентов усиления для каждого контроллера, без использования одинаковых значений. Однако эти парадигмы управления нагрузкой были разработаны для управления первичной частотой и не решали проблем с напряжением [22].

Недавние исследования выявили ряд критических недостатков в участии нагрузки в первичном управлении: «некоторые исследователи пренебрегают влиянием на комфорт пользователя; некоторые подходы используют одни и те же параметры управления для ресурсов нагрузки в разных местах; в литературе мало исследований, посвященных способности интеллектуальных нагрузок поддерживать как частоту, так и напряжение».

Для решения этих задач была разработана структура LRM для оперативного устранения дисбаланса мощности. Метод LRM поддерживает первичное регулирование частоты и напряжения. Кроме того, в этом исследовании показано, что интеграция LRM с динамикой сети минимизирует установленную функцию неудовлетворенности, вызванную участием нагрузки [23]. В предыдущей работе [24] были изучены эффекты управления LRM при различных функциях неудовлетворенности, и все контроллеры нагрузки имели схожие настройки коэффициентов усиления. Однако, как уже упоминалось, неоптимально использовать одинаковые коэффициенты усиления контроллера для всех ресурсов нагрузки [25]. Для повышения эффективности реагирования необходимо оптимизировать параметры каждого контроллера нагрузки, учитывая минимальное значение частоты/напряжения, ошибку в установившемся режиме частоты/напряжения и общее усилие управления нагрузкой. Недоминируемый генетический алгоритм сортировки II — это широко известный и хорошо зарекомендовавший себя алгоритм многоцелевой оптимизации, успешно применяемый в различных областях, включая энергетические системы и технику [26]. Поэтому LRM был подвергнут процедуре многоцелевой оптимизации на основе NSGA-II для настройки коэффициента усиления.

Данное исследование в первую очередь направлено на оптимизацию использования ресурсов нагрузки для повышения стабильности частоты и напряжения с целью минимизации потерь. В разделе 1 представлена динамическая модель сети и структура LRM, которые служат основой для последующего анализа и проектирования. Для достижения лучших характеристик частотной и вольт-амперной характеристики предложены несколько взаимосвязанных целей, а в разделе 2 представлена процедура настройки коэффициентов усиления для LRM на основе алгоритма NSGA-II. В разделе 3 представлен пример исследования, а в разделе 4 – основные выводы исследования.

1 Сетевая модель и локальная структура LRM

1.1 Динамическая модель сети

Энергетическая сеть представлена в виде графа с (N, ϵ) . Множество вершин N представляет собой векторы узлов, а множество ребер $\epsilon (\epsilon \subseteq N \times N)$ обозначает линии электропередачи [21]. (N, ϵ) предполагается ориентированным графом; следовательно, если $e = (i, j) \in \epsilon$, то следует $(j, i) \notin \epsilon$. C_{je} — элементы матрицы инцидентности энергетической сети.

$$C_{je} = \begin{cases} 1 & \text{if } e = ji \in \epsilon \\ -1 & \text{if } e = ij \in \epsilon \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

Генераторная шина G и нагрузочный узел L образуют множество N , где $G \cup L = N$. Шина $j \in G$ имеет нагрузки и генератор, способный обеспечивать электроэнергию, тогда как узел $j \in L$ имеет только нагрузки, но не имеет генератора. Динамика модели энергосети может быть записана как (2)-(4)[23], и все переменные указывают на свои отклонения в данном исследовании.

$$\dot{\theta}_j = \omega_j \quad (2)$$

$$H_j \dot{\omega}_j = P_j^m - p_j - \sum_{e \in \epsilon} C_{je} P_e - D_j \omega_j, \forall j \in G \quad (3)$$

$$K_j \dot{V}_j = Q_j^m - D_{jL} V_j - q_j - \sum_{e \in \epsilon} C_{je} Q_e, \forall j \in L \quad (4)$$

Specifically, the swing equation of the generator bus $j \in G$ is given in (3), and the voltage magnitude dynamic on the load bus $j \in L$ is given in (4). Here, D_j is the damping constant. The power flow algebraic equations of the network model can be written as (5) and (6) [23].

$$P_{ij} = B'_{ij} V_i + B''_{ij} V_j + B'''_{ij} (\theta_i - \theta_j), \forall (i, j) \in \epsilon \quad (5)$$

$$Q_{ij} = T'_{ij} V_i + T''_{ij} V_j + T'''_{ij} (\theta_i - \theta_j), \forall (i, j) \in \epsilon \quad (6)$$

Here, P_{ij} and Q_{ij} denote branch power flow, $B'_{ij}, B''_{ij}, B'''_{ij}, T'_{ij}, T''_{ij}$, and T'''_{ij} are constants.¹

Therefore, a complete power network dynamic model is built by combining (2)–(6).

¹ $B'_{ij}, B''_{ij}, B'''_{ij}, T'_{ij}, T''_{ij}$, and T'''_{ij} are constants related to the initial values of the state variable and line parameters. The detailed derivation is presented in our previous work [28].

1.2 Структура LRM

Для устранения помех мощности, вносимых в узел $j \in N$, и обеспечения стабильности частоты и напряжения, предполагается, что управляемые нагрузки p_j и q_j в (3) и (4) будут корректироваться,

эффективно перераспределяя мощность с минимальным совокупным недостатком мощности. Здесь предлагается структура LRM, которая минимизирует установленный недостаток мощности для энергоснабжающих компаний и потребителей. Поэтому общая форма функции совокупного недостатка мощности формулируется как в (7а), включающая $c_{pj}(p_j)$, $c_{qj}(q_j)$, $\hat{p}_j^2/2D_j$ и $\hat{q}_j^2/2D_{jL}$. $c_{pj}(p_j)$ и $c_{qj}(q_j)$ — это функции стоимости, обусловленные активной/реактивной управляемой нагрузкой p_j и q_j соответственно, что может быть целью, учитывающей механические характеристики интеллектуальных устройств, политику планирования энергоснабжения энергоснабжающих компаний или уровень комфорта потребителей. $\hat{p}_j^2/2D_j$ и $\hat{q}_j^2/2D_{jL}$ — два фиксированных элемента, которые указывают на стоимость частотно-/вольт-чувствительной, но неуправляемой нагрузки $\hat{p}_j := D_j \omega_j$ и $\hat{q}_j := D_{jL} V_j$ соответственно. Кроме того, (7b) представляет собой ограничение баланса мощности.

$$\min_{\substack{p_j \leq \bar{p}_j \leq \hat{p}_j, \\ q_j \leq \bar{q}_j \leq \hat{q}_j}} \sum_{j \in N} c_{pj}(p_j) + c_{qj}(q_j) + \hat{p}_j^2/2D_j + \hat{q}_j^2/2D_{jL} \quad (7a)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{aligned} p_j + \hat{p}_j &= P_j^m - \sum_{e \in \varepsilon} C_{je} P_e \\ q_j + \hat{q}_j &= Q_j^m - \sum_{e \in \varepsilon} C_{je} Q_e \end{aligned} \quad (7b)$$

Here, \underline{p}_j and \underline{q}_j are the lower bounds of controllable re/active load power, and \bar{p}_j , \bar{q}_j are the upper bounds. These bounds are contingent on the capability of the smart appliances to deviate from their regular power consumption.

The costs of $c_{pj}(p_j)$ and $c_{qj}(q_j)$ are assumed to be strictly convex and have two continuous derivatives on $[\underline{p}_j, \bar{p}_j]$ and $[\underline{q}_j, \bar{q}_j]$, respectively. Moreover, the actual cost functions that align with these assumptions were examined in [27] and [28].

The dual problem of the disutility Eq. (7) is represented as

$$\begin{aligned} \sum_{j \in N} \Phi_j(v_j, \lambda_j) = \min_{\substack{p_j \leq \bar{p}_j \leq \hat{p}_j, \\ q_j \leq \bar{q}_j \leq \hat{q}_j}} & \sum_{j \in N} (c_{pj}(p_j) + c_{qj}(q_j) + \frac{1}{2D_j} \hat{p}_j^2 + \frac{1}{2D_{jL}} \hat{q}_j^2) \\ & - v_j p_j - v_j \hat{p}_j + v_j P_j^m - v_j \sum_{e \in \varepsilon} C_{je} P_e \\ & - \lambda_j q_j - \lambda_j \hat{q}_j + \lambda_j Q_j^m - \lambda_j \sum_{e \in \varepsilon} C_{je} Q_e \end{aligned} \quad (8)$$

Функция минимизации $\Phi_j(v_j, \lambda_j)$ получается при следующих условиях оптимальности:

$$\begin{aligned}
p_j &:= [c'_{pj}{}^{-1}(v_j)]_{p_j}^{\bar{p}_j} \\
q_j &:= [c'_{qj}{}^{-1}(\lambda_j)]_{q_j}^{\bar{q}_j} \\
\hat{p}_j &:= D_j v_j \\
\hat{q}_j &:= D_{jL} \lambda_j
\end{aligned} \tag{9}$$

The Lagrange dual function exhibits strict concavity owing to the convex optimization theory. Hence, the primary problem is solved by maximizing its dual problem as $\max_{v, \lambda} [\Phi(v, \lambda) := \sum_{j \in N} \Phi_j(v_j, \lambda_j)]$, where $\Phi_j(v_j, \lambda_j)$ is

$$\begin{aligned}
\Phi_j(v_j, \lambda_j) &= c_{pj}(p_j) - v_j p_j - \frac{1}{2} D_j v_j^2 + v_j P_j^m - v_j \sum_{e \in \varepsilon} C_{je} P_e \\
&\quad + c_{qj}(q_j) - \lambda_j q_j - \frac{1}{2} D_{jL} \lambda_j^2 + \lambda_j Q_j^m - \lambda_j \sum_{e \in \varepsilon} C_{je} Q_e
\end{aligned}$$

The variables v_j and λ_j adhere to iteration rules (10) and (11) using the gradient descent algorithm:

$$\dot{v}_j = \gamma_j \frac{\partial \Phi}{\partial v_j}(v_j, \lambda_j) = -\gamma_j (p_j + D_j v_j - P_j^m + \sum_{e \in \varepsilon} C_{je} P_e), \forall j \in G \tag{10}$$

$$\dot{\lambda}_j = \kappa_j \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda_j}(v_j, \lambda_j) = -\kappa_j (q_j + D_{jL} \lambda_j - Q_j^m + \sum_{e \in \varepsilon} C_{je} Q_e), \forall j \in L \tag{11}$$

где $\gamma_j > 0$ и $\kappa_j > 0$ — размеры шага.

Уравнения (10) и (11) представляют алгоритмы оптимизации, используемые для решения двойственной задачи. Далее, проектные переменные v_j и λ_j заменяются на ω_j и V_j . Шаги устанавливаются равными $\gamma_j = 1/H_j$ и $\kappa_j = 1/K_j$. Впоследствии условия оптимальности в (9) становятся (12)-(15), а (10) и (11) становятся (16) и (17) соответственно.

$$p_j := [c'_{pj}{}^{-1}(\omega_j)]_{p_j}^{\bar{p}_j}, \forall j \in N \tag{12}$$

$$q_j := [c'_{qj}{}^{-1}(V_j)]_{q_j}^{\bar{q}_j}, \forall j \in N \tag{13}$$

$$\hat{p}_j := D_j \omega_j, \forall j \in N \quad (14)$$

$$\hat{q}_j := D_{jL} V_j, \forall j \in N \quad (15)$$

$$\dot{\omega}_j = -\frac{1}{H_j} (p_j + D_j \omega_j - P_j^m + \sum_{e \in \varepsilon} C_{je} P_e), \forall j \in G \quad (16)$$

$$\dot{V}_j = -\frac{1}{K_j} (q_j + D_{jL} V_j - Q_j^m + \sum_{e \in \varepsilon} C_{je} Q_e), \forall j \in L \quad (17)$$

It can be observed that (16) and (17) are the same as the network dynamics (3) and (4). In other words, the system automatically performs the dynamics (14)–(17). Hence, $p_j := [c_{pj}^{-1}(\omega_j)]_{\underline{p}_j}^{\bar{p}_j}$ and $q_j(V_j) := [c_{qj}^{-1}(V_j)]_{\underline{q}_j}^{\bar{q}_j}$ can lead to the design of local LRM. Eqs. (12)–(17) create a trajectory $(p(t), \hat{p}(t), q(t), \hat{q}(t), \omega(t), V(t))$, which ultimately converges to the optimal point $(p^*, \hat{p}^*, q^*, \hat{q}^*, \omega^*, V^*)$ with $t \rightarrow \infty$. $(p^*, \hat{p}^*, q^*, \hat{q}^*)$ is the optimal solution for the primal problem, and (ω^*, V^*) is the optimal solution for the dual problem (a related proof is provided in our previous work [23]). The network dynamics under such load control form a solution process; controllable loads can participate in rebalancing power, and thus enhance frequency and voltage stability.

2 Оптимальный метод LRM на основе NSGA-II

В этом разделе представлен наглядный пример проектирования контроллера нагрузки и предложена процедура оптимизации на основе алгоритма NSGA-II для определения параметров настройки.

2.1 Наглядный пример проектирования контроллера для интеллектуальных систем управления нагрузкой

If the costs $c_{pj}(p_j)$ and $c_{qj}(q_j)$ in (7a) are the quadratic forms of $c_{pj}(p_j) = p_j^2/2\alpha$ and $c_{qj}(q_j) = q_j^2/2\beta$ (according to our assumption about the cost function, both α and β are positive coefficients), respectively, their corresponding active and reactive load controls that must be applied to the demand side are $p_j(\omega_j) := [c_{pj}^{-1}(\omega_j)]_{\underline{p}_j}^{\bar{p}_j} = [\alpha\omega_j]_{\underline{p}_j}^{\bar{p}_j}$ and $q_j(V_j) := [c_{qj}^{-1}(V_j)]_{\underline{q}_j}^{\bar{q}_j} = [\beta V_j]_{\underline{q}_j}^{\bar{q}_j}$, respectively, according to the previous analysis results. Hence, the local load controller design scheme is as follows.

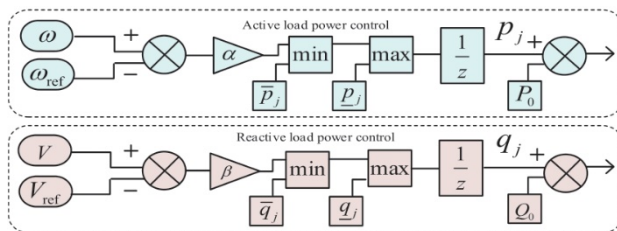


Рис. 1. Схема проектирования локального контроллера для управляемых нагрузочных ресурсов.

На рис. 1 ω_{ref} и V_{ref} — это опорные значения частоты и напряжения соответственно, а P_0 и Q_0 — номинальные мощности управляемых нагрузок. Когда отклонение частоты или напряжения выходит за рамки зоны нечувствительности, срабатывают локальные контроллеры нагрузки, которые помогают восстановить их до допустимых диапазонов.

Соответствующие частотные показатели представлены на рис. 2. Минимальная частота, $\omega(T_{nadir})$, является критически важным показателем, отражающим частотное состояние системы. Если она падает ниже определенного порогового значения, это может привести к коллапсу частоты. Для безопасной и стабильной работы энергосистемы крайне важно внедрить эффективное первичное регулирование, способное смягчить падение частоты, вызванное помехами в электросети, обеспечивая соответствие системы ограничению для $\omega(T_{nadir})$. $\omega(T_{steady})$ представляет собой установившееся значение частоты, а T_{steady} указывает момент времени, когда частота возвращается к новому установившемуся значению. Кроме того, кривая реагирования напряжения может быть охарактеризована аналогичными показателями.

Согласно теоремам, параметры управления α и β имеют положительные значения, и их значения не влияют на устойчивость системы [23]. Однако управляющие воздействия изменяются в зависимости от α и β . Очевидно, что присвоение одинаковых значений коэффициентов усиления всем контроллерам нагрузки не является оптимальным. Эти параметры можно дополнительно систематически оптимизировать для улучшения частотной и вольт-амперной характеристик.

2.2 Процедура оптимизации параметров на основе алгоритма NSGA-II

Процедура оптимизации параметров для LRM была разработана для достижения следующих целей: улучшение минимальных значений частоты и напряжения, минимизация ошибки в установившемся режиме частоты и напряжения, а также снижение общего сброса нагрузки на протяжении всего процесса. Таким образом, вектор целевой функции F^{\rightarrow} для оптимизации параметров включает в себя следующие пять компонентов:

Функции f_1 и f_2 направлены на улучшение минимальных значений частоты и напряжения соответственно.

$$f_1 := \min |\omega_{ref} - \omega(T_{nadir})| \quad (18)$$

$$f_2 := \min |V_{ref} - V(T_{nadir})| \quad (19)$$

Здесь ω_{ref} и V_{ref} — опорные значения частоты и напряжения соответственно. $\omega(T_{nadir})$ и $V(T_{nadir})$ — минимальные значения частоты и напряжения соответственно.

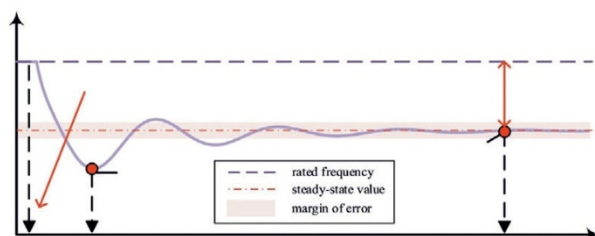


Рис. 2. Иллюстрация кривой частотной характеристики.

Функции f_3 и f_4 направлены на минимизацию ошибок в установившемся режиме частоты и напряжения соответственно.

$$\omega(T_{steady}) \quad (20)$$

$$\omega(T_{steady}) \quad (21)$$

Здесь $\omega (T_{\text{steady}})$ — значение установившейся частоты, а $V (T_{\text{steady}})$ — значение установившегося напряжения.

Функция f_5 направлена на снижение усилий по управлению нагрузкой. f_5 :

$$= \min \sum_{T_k=1}^T \sum_{j=1}^n (\min[\alpha_j |\omega_{\text{ref}} - \omega(T_k)|, \bar{p}_j] + \min[\beta_j |V_{\text{ref}} - V(T_k)|, \bar{q}_j]) \quad (22)$$

Здесь T_k — k -й момент времени дискретизации, а j — j -я управляемая нагрузка.

Как показано на рис. 3, коэффициенты управления α и β , используемые в LRM, оптимизируются с помощью алгоритма NSGA-II, который особенно подходит для задач с несколькими противоречащими целями и предоставляет ряд компромиссных решений в ходе принятия решений.

Этапы, показанные на рис. 3, объясняются следующим образом:

Инициализация популяции: задаются размер популяции ($\text{pop}=n$), максимальное количество поколений и другие соответствующие параметры, используемые в алгоритме NSGA-II. Начальный коэффициент усиления популяции выбирается случайным образом из допустимой области, которая варьируется в зависимости от конкретных практических вариантов моделирования.

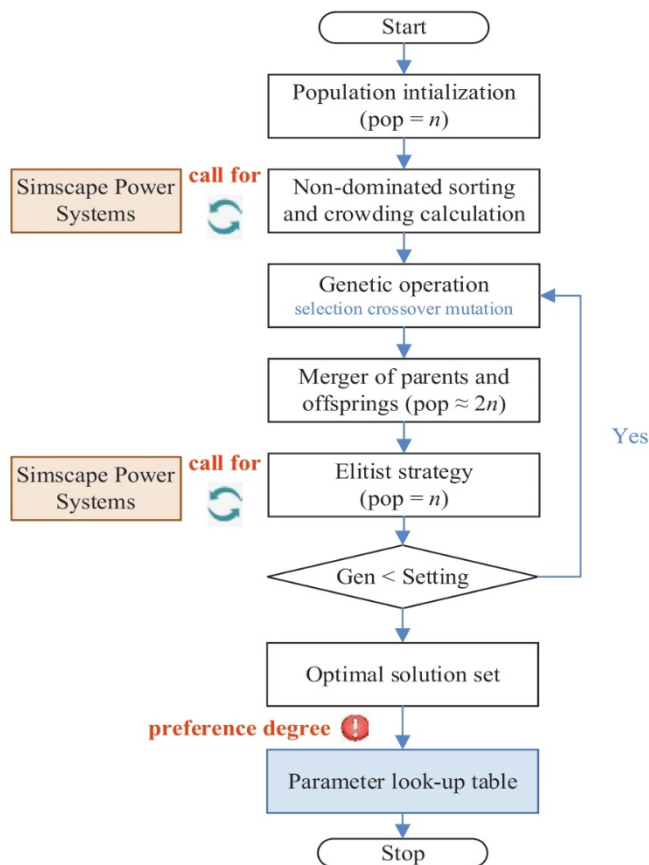


Рис. 3. Блок-схема оптимизации параметров управления нагрузкой на основе алгоритма NSGA-II.

Расчет ранжирования по признаку недоминирования и плотности популяции: вычислить количество доминирующих и доминируемых особей для каждой особи. Выбрать недоминирующих особей и найти новый набор недоминирующих особей в оставшейся популяции. Этот процесс повторяется до тех пор, пока вся популяция не будет отсортирована по признаку недоминирования.

Для дальнейшего отбора особей с одинаковым рангом группирования по признаку недоминирования (одинаковая фронтальная поверхность) для каждой целевой функции рассчитывается расстояние плотности популяции (CD). Чем выше значение CD тем более равномерным является распределением результатов вычислений в целевом пространстве, обеспечивая разнообразие популяции.

$$CD_i = \sum_{m=1}^5 CD_{i,m} = \sum_{m=1}^5 \frac{f_m(x_{i+1}) - f_m(x_{i-1})}{\max f_m - \min f_m} \quad (i = 1, 2, \dots, l; m = 1, 2, \dots, 5) \quad (23)$$

Здесь i обозначает i -ю особь, m — m -ю цель, а l — количество особей на передней поверхности.

Генетические операции. Генетические операции включают моделирование бинарного пересечения и полиномиальную мутацию.

а) Моделирование бинарного пересечения: $x_{1j}(t)$ и $x_{2j}(t)$ являются родительскими особями,

и $\tilde{x}_{1j}(t)$ и $\tilde{x}_{2j}(t)$ являются их потомками.

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{1j}(t) &= 0.5 \times [(1 + r_j)x_{1j}(t) + (1 - r_j)x_{2j}(t)] \\ \tilde{x}_{2j}(t) &= 0.5 \times [(1 - r_j)x_{1j}(t) + (1 + r_j)x_{2j}(t)] \\ r_j &= \begin{cases} (2\mu_j)^{1/(\eta_c+1)}, \mu_j \leq 0.5 \\ [1/2(1 - \mu_j)]^{1/(\eta_c+1)}, \mu_j > 0.5 \end{cases} \end{aligned} \quad (24)$$

Здесь μ_j — случайное число в диапазоне от 0 до 1, а η_c — индекс распределения пересечений (эмпирическое значение находится в диапазоне от 1 до 20).

б) Полиномиальная мутация: $\tilde{x}_j(t)$ является потомком своего родителя $x_j(t)$.

$$\tilde{x}_j(t) = x_j(t) + \beta_j, \beta_j = \begin{cases} (2\mu_j)^{1/(\eta_m+1)} - 1, \mu_j < 0.5 \\ 1 - [2(1 - \mu_j)]^{1/(\eta_m+1)}, \mu_j \geq 0.5 \end{cases} \quad (25)$$

Здесь μ_j — случайное число от нуля до единицы, а η_m — индекс распределения пересечений (эмпирическое значение находится в диапазоне от 1 до 20).

Слияние родителей и потомства: после генетической операции общая численность популяции родителей и потомства составляет приблизительно $2n$.

Элитистская стратегия: выполнить неранжированную сортировку и расчеты CD на объединенной популяции. Выбрать n лучших особей в качестве новых родителей. Введение элитистической стратегии позволяет объединить родительскую популяцию с потомством для конкуренции и создания популяции следующего поколения.

Выбор оптимального решения: оператор может выбрать одно решение из множества Парето-оптимальных решений, основываясь на предпочтениях для каждой цели в различных практических вариантах моделирования. Учитывая вычислительную и коммуникационную нагрузку в современных энергосистемах, оптимизированные параметры управления нагрузкой могут храниться в таблице поиска и использоваться в качестве критерия для оперативного выбора локальными контроллерами.

$$\begin{aligned}
 x_{\text{opt}} &= \arg \min S(x_i) \\
 &= \arg \min [\sigma_1 f_1(x_i) + \sigma_2 f_2(x_i) + \sigma_3 f_3(x_i) + \sigma_4 f_4(x_i) + \sigma_5 f_5(x_i)]
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

Здесь $\sigma_1, \dots, \sigma_5$ представляют собой степень предпочтения для каждой целевой функции, x_i — решение из множества Парето-оптимальных решений, а x_{opt} — оптимальное единственное решение.

Общая схема управления ресурсами нагрузки на основе алгоритма NSGA-II представлена на рис. 4, который поясняет, как сторона спроса участвует в первичном регулировании.

Как показано на рис. 4, интеллектуальные нагрузки отслеживают частоту и напряжение с помощью локальных счетчиков и выбирают оптимальные параметры управления в режиме реального времени, что обеспечивает более оперативную и эффективную реакцию на колебания частоты и напряжения.

3 Результаты моделирования

3.1 Модель энергосистемы Simscape

Как показано на рис. 5, модель SPS включает в себя генераторную шину, 32 нагрузочных узла и 32 ответвления. Опорное напряжение узлов составляло 12,66 кВ, а общая нагрузка — $3715 + j2300$ кВА. Из 32 нагрузочных узлов шесть (обозначены синими кругами) были выбраны в качестве управляемых, а четыре (обозначены фиолетовыми кругами) — узлами с помехами. Интеллектуальные нагрузочные узлы имеют как управляемые, так и неуправляемые ресурсы. В таблице 1 приведены первичные регулирующие мощности управляемых нагрузочных узлов. В модели SPS управляемые нагрузочные узлы представлены с помощью трехфазных параллельных RLC-нагрузок, тогда как неуправляемые нагрузочные ресурсы представлены с помощью трехфазных трехпроводных динамических нагрузок.

Более того, как показано на рис. 6, при резком изменении общего энергопотребления на затронутых узлах заданный уровень негативного воздействия процесса регулирования минимизируется в рамках нашей модели LRM.

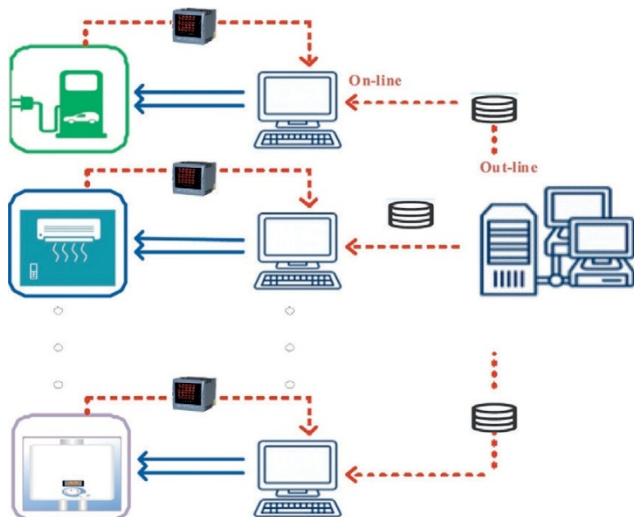


Рис. 4. Управление грузовым концом с использованием алгоритма NSGA-II для интеллектуальных нагрузок.

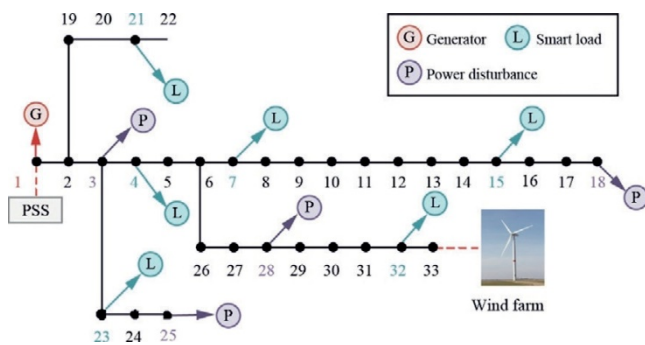


Рис. 5. Модель SPS усовершенствованной 33-узловой тестовой системы IEEE.

Таблица 1

Первичная регулирующая способность узлов управляемой нагрузки.

Bus No.	Total load power		Controllable load power	
	P/kW	$Q/kvar$	P/kW	$Q/kvar$
4	120	80	1.4	1.165
7	200	100	2.35	1.45
15	60	10	0.7	0.145
21	90	40	1.05	0.58
23	90	50	1.05	0.73
32	210	100	2.45	1.45
SUM	770	380	9	5.52

3.2 Метод LRM на основе алгоритма NSGA-II в сравнении с методами LRM и OLC

В этом разделе обсуждается эффективность предложенного метода LRM на основе алгоритма NSGA-II при изменении нагрузки.

Методы LRM на основе NSGA-II, LRM и традиционный OLC² были смоделированы и сравнены с точки зрения значений частоты/напряжения в минимуме и установившемся состоянии. Метод OLC был предложен Чжао и др. для обеспечения участия нагрузки в первичном регулировании частоты. Подробную информацию можно найти в [22].

Изменение нагрузки: при $t=4$ с общее потребление мощности на узлах 3, 18, 25 и 28 с помехами резко возрастает на 12 кВт, 4 квар (1,26 ед.)

В методах LRM и традиционном OLC управляемые нагрузки устанавливались с идентичными параметрами. В методе LRM на основе NSGA-II параметры усиления оптимизировались в допустимых областях. Допустимые области для параметров усиления каждого контроллера нагрузки установлены равными $\alpha \in [30 \text{ ед.}, 70 \text{ ед.}]$ и $\beta \in [15 \text{ ед.}, 25 \text{ ед.}]$ Начальный размер популяции составлял 40 (случайно сгенерированных в пределах допустимых областей), максимальное число поколений — 50, индекс распределения пересечений — 10, а индекс распределения мутации — 10.

На рисунках 7 и 8 изображены поперечные сечения двумерного и трехмерного Парето-фронт пятимерного Парето-фронта соответственно. В таблице 2 представлены оптимальные решения, определенные при различных степенях предпочтения.

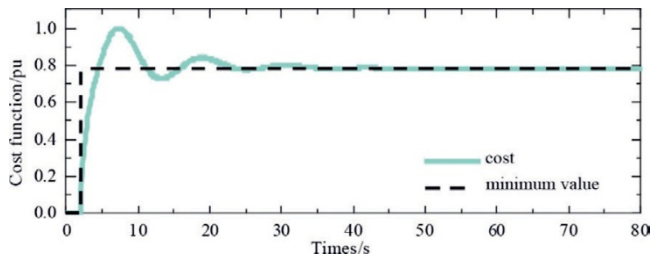


Рис. 6. Траектория функции стоимости метода LRM.

На рисунках 7, 8 и в таблице 2 показано, что значения целевых функций изменяются в зависимости от степени предпочтения. Например, когда процент важности первой целевой функции снижается с 25 % до 15 %, результат моделирования для минимальной частоты снижается с 49,8735 до 49,8634 Гц.

Кроме того, было проведено сравнительное исследование для наблюдения различий в динамической реакции частоты/напряжения во время применения метода LRM между предложенным методом LRM на основе NSGA-II, методом LRM и традиционным методом OLC. Соответствующие выводы представлены на рис. 9 и рис. 10. Моделирование метода LRM на основе NSGA-II проводилось при пятой степени предпочтения ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4 = \sigma_5$) = 20%, как показано в таблице 2. Также параметры настройки локальных контроллеров нагрузки приведены в таблице 3.

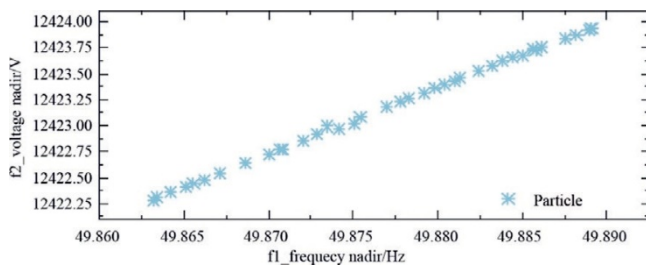


Рис. 7. 2D поперечные сечения 5-мерного Парето-фронта.

На рис. 9 показано, что метод LRM и традиционный метод OLC обеспечивают схожие преимущества для первичного регулирования частоты.

Однако, как показано на рис. 10, метод LRM превосходит традиционный метод OLC по регулированию напряжения, поскольку он может подавить минимальное значение напряжения на 21 % и уменьшить процент ошибки в установившемся режиме примерно на 24 %. Это объясняется тем, что традиционный метод OLC игнорирует возможности управления нагрузкой по регулированию напряжения.

Кроме того, анализ данных показателей эффективности, представленных в таблице 4, демонстрирует, что предложенный метод LRM на основе NSGA-II показывает лучшие переходные характеристики с точки зрения частоты и напряжения в системе. Это улучшение было достигнуто за счет применения систематической процедуры настройки коэффициентов усиления к структуре LRM.

3.3 Координация с другими устройствами

В этом разделе обсуждается координация метода LRM на основе NSGA-II с другими устройствами, включенными в систему для обработки колебаний нагрузки.

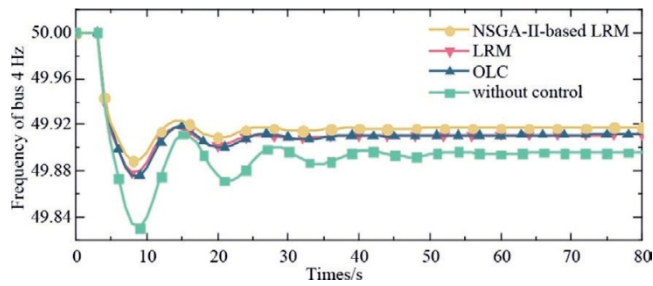


Рис. 9. Частотные характеристики узла 4, полученные при использовании различных методов.

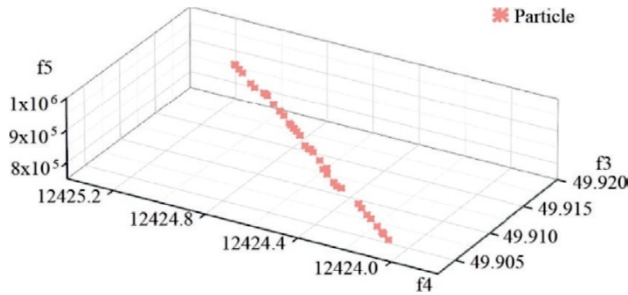


Рис. 8. Трехмерные поперечные сечения пятимерного Парето-фронта с оптимизацией NSGAI.

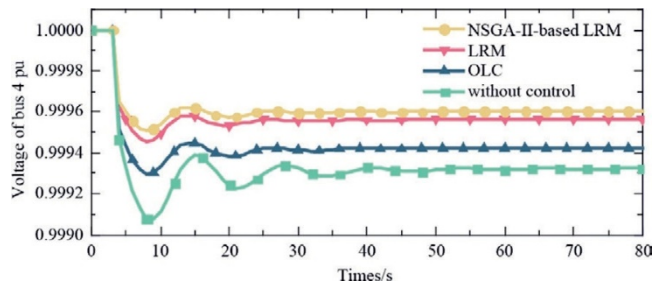


Рис. 10. Динамика напряжения в узле 4 при использовании различных методов.

Таблица 2

Выбор индекса частиц на основе различных степеней предпочтения.

Importance percentages					Particle Index	Values of objective functions				
σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5		f_1/Hz	f_2/V	f_3/Hz	f_4/V	f_5/J
25	15	5	5	50	27	49.8735	12422.9931	49.9081	12424.3826	813187.4
15	5	10	10	60	5	49.8634	12422.3065	49.9046	12424.0742	768979.2
25	20	10	10	35	36	49.8889	12423.9257	49.9174	12425.1236	909605.9
20	20	20	20	20	1	49.8891	12423.9349	49.9175	12425.1287	911275.8

Таблица 3

Настройки параметров управления нагрузкой.

	Load4	Load7	Load15	Load21	Load23	Load32
α	34.6	70	47	70	63.5	70
β	22.2	24.2	19.4	19.5	23	22.7

Таблица 4

Анализ данных показателей эффективности.

Control action	I1	I2	I3	I4
NSGA-II-based LRM	49.8891	0.99951	49.9175	0.99960
LRM	49.8785	0.99945	49.9114	0.99956
OLC	49.8757	0.99930	49.9114	0.99942
without control	49.8315	0.99908	49.8961	0.99932

^aОпределение показателей производительности: I1 — минимальная частота (Гц); I2 — минимальное напряжение (ед.); I3 — установившееся значение частоты (Гц); I4 — установившееся значение напряжения (ед.)

Вариант моделирования 1: Координация с TG (регулятором частоты вращения турбины)

В этом варианте моделирования, по сравнению с использованием исключительно управления регулятором частоты вращения турбины (TG), применение метода LRM увеличивает минимальные значения частоты и напряжения, а также соответствующие значения в установившемся режиме и сокращает время установления. Метод LRM помогает смягчить колебания частоты и падения напряжения. Кроме того, эффективность метода LRM на основе NSGA-II была оценена с использованием оптимальных настроек параметров, представленных в таблице 3. Как показано на рис. 11, процедура оптимизации параметров метода LRM на основе NSGA-II снизила минимальное значение частоты на 7,97 % и процент ошибки в установившемся режиме на 6,89 %. Более того, минимальное значение напряжения было снижено на 10,91 %, а процент ошибки в установившемся режиме уменьшен на 9,09 %. Таким образом, в варианте моделирования координации с TG использование метода LRM совместно с процедурой систематической настройки коэффициентов усиления может дополнительно улучшить динамические характеристики частоты и напряжения.

Вариант моделирования 2: Координация с PSS (стабилизатором энергетической системы)

Стабилизатор энергетической системы (PSS) — это широко используемый механизм стабилизации на стороне производства. Применение PSS значительно подавляет колебания частоты и напряжения.

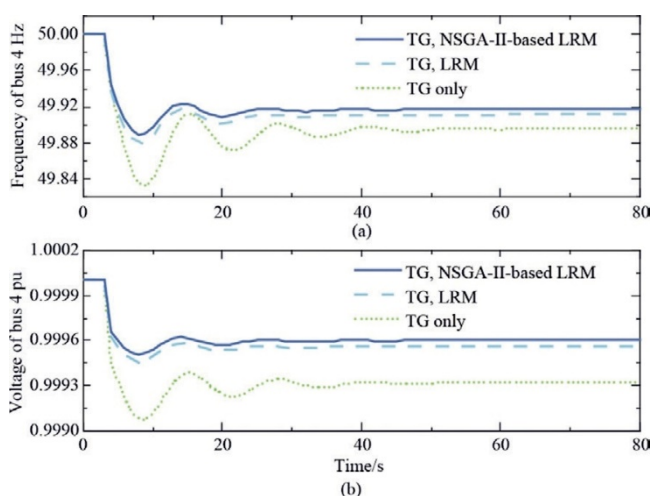


Рис. 11. Характеристики реагирования при координации с TG.

На рис. 12(a) и (b) показано сравнение реагирования при различных стратегиях управления, а именно: только контроллер PSS, контроллер PSS и с применением метода LRM, а также контроллер PSS с применением метода LRM на основе NSGA-II (с настройками параметров, представленными в таблице 5). Например, графики показывают, что при работе PSS с использованием метода LRM достигается более стабильная поддержка частоты и напряжения.

Более того, после процедуры оптимизации параметров метода LRM на основе алгоритма NSGA-II, минимальное значение частоты было снижено на 7,03 %, а процент ошибки в установившемся режиме уменьшен на 6,64 %. Аналогично, минимальное значение напряжения было снижено на 8,33 %, а процент ошибки в установившемся режиме уменьшен на 9,09 %. Таким образом, в варианте моделирования «PSS» наилучшие результаты, характеризующиеся уменьшенным перерегулированием и более высокими значениями в установившемся режиме, достигаются при использовании PSS в сочетании с методом LRM на основе алгоритма NSGA-II.

3.4 Использование метода LRM на основе алгоритма NSGA-II при учёте колебаний производства ветровой энергии

Для оценки достоверности метода LRM на основе NSGA-II в условиях прерывистого производства возобновляемой энергии в модель SPS, показанную на рис. 5, была добавлена ветровая турбина (1,5 МВт).

Колебания выходной мощности: выработка ветровой энергии в узле 33 резко снижается в момент времени $t=14$ с по мере уменьшения скорости ветра (рис. 13).

В этом варианте моделирования параметры локальных контроллеров нагрузки были оптимизированы с использованием процедуры на основе алгоритма NSGA-II, как показано в таблице 6. Были исследованы динамические характеристики частоты и напряжения, включая их переходные и установившиеся режимы.

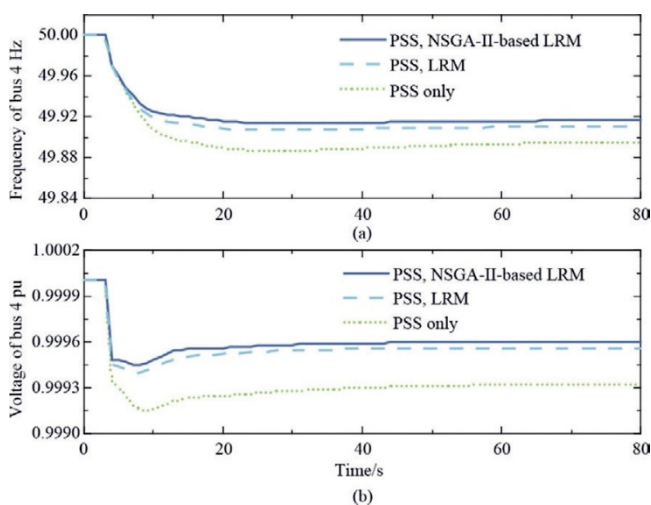


Рис. 12. Результаты реагирования при координации с PSS.

Таблица 5

Настройки параметров управления нагрузкой.

	Load4	Load7	Load15	Load21	Load23	Load32
α	48.50	68.15	69.65	69.90	67.95	69.85
β	22.01	19.13	16.64	18.30	16.65	19.01

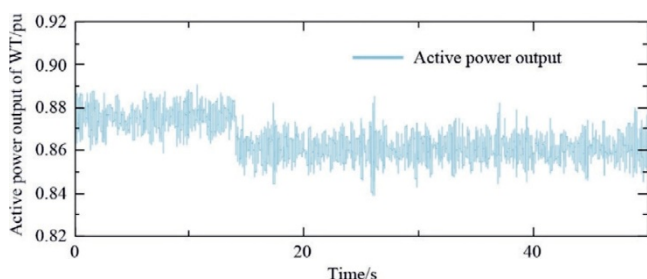


Рис. 13. Колебания выходной мощности ветровой турбины в узле 33.

Таблица 6

Настройки параметров управления нагрузкой.

	Load4	Load7	Load15	Load21	Load23	Load32
α	42.85	70	58.2	53.35	55.9	70
β	15.3	23.21	15.03	17.66	25	16.35

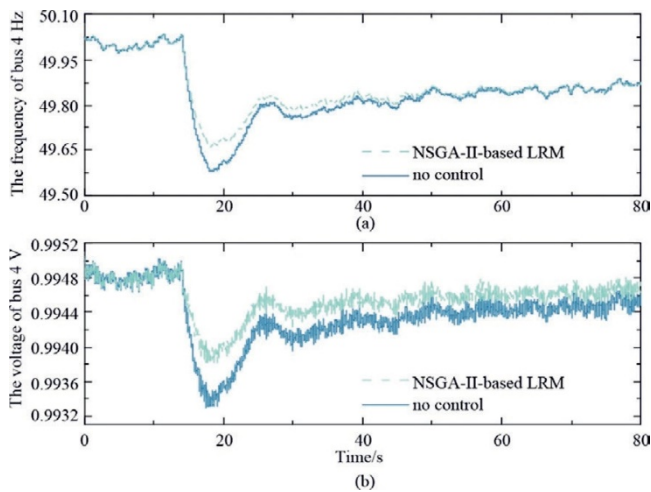


Рис. 14. Динамика частоты и напряжения, зависящая от колебаний мощности ветроэнергетической установки.

Согласно рис. 14(a) и (b), применение метода LRM на основе NSGA-II подавляет минимальные значения частоты и напряжения, а также значительно уменьшает процент ошибки в установившемся режиме напряжения. Следовательно, применение предложенного метода LRM в энергосистемах с высокой долей возобновляемых источников энергии является значительно эффективным.

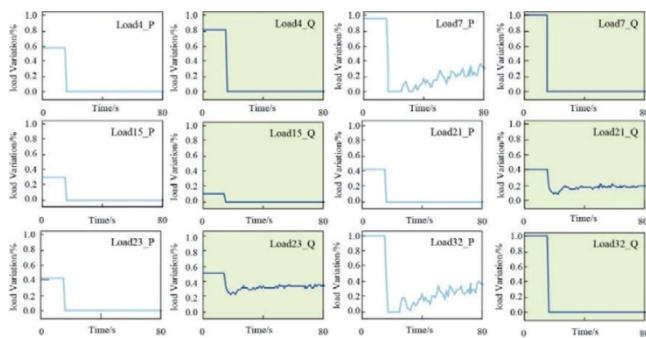


Рис. 15. Изменения динамической нагрузки (%) при использовании метода LRM на основе NSGA-II.

На рис. 15 показаны измененные схемы управляемой нагрузки, созданные с помощью метода LRM на основе NSGA-II, в ответ на колебания выходной мощности ветроэнергетической установки. Предложенный подход показал, что все ресурсы управляемой нагрузки снизили потребление энергии по сравнению со стандартными уровнями. Это указывает на то, что даже при колебаниях мощности ветроэнергетики ресурсы нагрузки могут обеспечивать основной резерв мощности. Подграфики на рис. 15 демонстрируют, что снижение потребления энергии варьируется для ресурсов управляемой нагрузки в разных местах в зависимости от мощности интеллектуальных реагирующих устройств в каждом узле. Большее снижение потребления энергии нагрузкой свидетельствует о большем потенциале обеспечения основного резерва мощности.

4 Заключение

В данной статье предлагается метод управления ресурсами нагрузки (LRM) для участия в первичном регулировании частоты и напряжения в качестве предоставления системных услуг. Благодаря локальному измерению частоты и напряжения, интеллектуальные нагрузки эффективно поддерживают первичное управление с минимальными потерями, обеспечивая тем самым надежную работу системы. При допущениях, установленных для функции потерь, предлагаемое управление нагрузкой было получено путем вычисления обратной величины ее производной, что позволяет точно корректировать нагрузку. Кроме того, интеграция динамики сети с предложенным

методом LRM демонстрирует алгоритм оптимизации, основанный на принципе двойственности, который адаптивно учитывает функцию потерь.

Эффективность управления метода LRM была дополнительно улучшена с помощью процедуры оптимизации параметров на основе алгоритма NSGA-II. Метод LRM на основе алгоритма NSGA-II помогает улучшить минимальные значения частоты и напряжения, минимизировать ошибки в установленном режиме частоты и напряжения и снизить общее отключение нагрузки. Результаты моделирования продемонстрировали улучшение кривых частотной и вольт-амперной характеристики при систематической оптимизации параметров контроллеров нагрузки.

В реальных энергосистемах внедрение предлагаемого подхода зависит от наличия определенного количества интеллектуальных счетчиков и оперативных ресурсов нагрузки. В будущем эти проблемы могут быть постепенно решены благодаря быстрому развитию интеллектуальных сетей. Кроме того, для повышения способности к достижению реагирования в реальном времени в крупномасштабных системах можно исследовать более эффективные алгоритмы многоцелевой оптимизации или методы распределенной оптимизации.

О вкладе авторов в проект CRediT

Ясин Ванг: Написание — первоначальный вариант текста, проверка достоверности, методология, исследование, формальный анализ, концептуализация. **Чжихан Чжу:** Проверка достоверности, ресурсы, исследование, концептуализация. **Чжихун Ю:** Проверка достоверности, научное руководство, ресурсы, концептуализация. **Зиган Ванг:** Проверка достоверности, программное обеспечение, ресурсы.

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.

Авторы заявляют о следующих финансовых интересах/личных связях, которые могут рассматриваться как потенциальные конфликты интересов: Ясин Ванг, Чжихун Ю и Зиган Ванг в настоящее время работают в Китайском научно-исследовательском институте электроэнергетики.

Благодарности

Авторы хотели бы выразить благодарность Государственной электросетевой корпорации Китая за поддержку проекта «Исследование ключевых технологий автоматического формирования типичных режимов работы электросети и автоматического расчета пределов устойчивости участков» (5100-202355420A-3-2-ZN).

Список используемой литературы

- [1] Ю.Ли, К.Х.Цинь, Ю.Н.Чи и др., Исследование требований к управлению и стабильности при интеграции возобновляемых источников энергии в сеть, в: Труды 8-й Международной конференции IEEE по передовой автоматизации и защите энергосистем (APAP), Сиань, Китай, 2019, стр. 26-30.
- [2] Ю.Л.Чень, Д.Л.Ци, Х.К.Хуи и др., Автономно запускаемая координация распределенных возобновляемых генераторов для восстановления частоты в изолированных микросетях: стратегия с низким уровнем связи и вычислений, *Adv.Appl.Energy* 10 (2023) 100128.
- [3] Ю.Л.Чень, К.В.Лао, Д.Л.Ци и др., Распределенное автономное управление для восстановления частоты и распределения активной мощности в изолированных микросетях, *IEEE Trans.Ind.Inf.*19 (10) (2023) 10635-10646.

- [4] В. Ян, Ф. Рейс, Ю. З. Сюй и др., Исследование спроса и требований к первичному управлению частотой возобновляемой энергии, в: Труды Китайской конференции по управлению и принятию решений (CCDC), 2019, Наньчан, Китай, 2019, стр. 5804-5808.
- [5] З. Лань, Дж. Куан, К. Ян и др., Скоординированное управление возобновляемой энергией с почти нулевым выбросом углерода с учетом экологических издержек, в: Труды 5-й конференции IEEE по энергетическому интернету и интеграции энергетических систем (E12), 2021, Тайюань, Китай, 2021, стр. 2113-2118.
- [6] Ю.К.Инь, К.К.Сан, Т.Ли и др., Исследование технологии вспомогательного регулирования частоты в энергосистеме на основе регулирования высокоэнергетической нагрузки с помощью электролитического алюминия, в: Труды 4-й Международной конференции по интеллектуальным энергетическим и интернет-системам (SPIES), Пекин, Китай, 2022, стр. 1701-1707.
- [7] Д. Чакраворти, Б. Чаудхури, С.Ю.Р.Хуи, Быстрое изменение частоты от интеллектуальных нагрузок в энергосистеме Великобритании, IEEE Trans.Smart Grid 8 (5) (2017) 2160-2169.
- [8] Ф. К. Швеппе, Р. Д. Таборс, Дж. Л. Киртли и др., Гомеостатическое управление энергоснабжением, IEEE Trans.Power Syst.PAS-99 (3) (2007) 1151-1163.
- [9] Г. Де Карне, Г. Бутиччи, М. Лизерре и др., Регулирование первичной частоты в реальном времени с использованием управления мощностью нагрузки интеллектуальными трансформаторами, в: Труды Генеральной конференции IEEE Power & Energy Society (PESGM) 2020 года, Монреаль, Квебек, Канада, IEEE, 2020, стр. 1.
- [10] Д. Чакраворти, З. Ахтар, Б. Чаудхури и др., Сравнение первичного регулирования частоты с использованием двух типов интеллектуальной нагрузки, в: Труды Генеральной конференции IEEE по энергетике и электротехнике (PESGM), 2016, Бостон, Массачусетс, США, 2016, стр. 1-5.
- [11] А. Делавари, И. Камва, Модуляция нагрузки на основе виртуальной инерции для регулирования первичной частоты энергосистемы, в: Труды Генеральной конференции IEEE Power & Energy Society 2017, Чикаго, Иллинойс, США, 2017, стр. 1-5.
- [12] С. Али Пурмусави, М. Х. Нехрир, Реагирование на спрос в реальном времени для регулирования первичной частоты в микросетях, IEEE Trans.Smart Grid 3 (4) (2012) 1988-1996.
- [13] В. Мендиета, К. А. Канизарес, Управление первичной частотой в изолированных микросетях с использованием термостатически управляемых нагрузок, IEEE Trans.Smart Grid 12 (1) (2021) 93-105.
- [14] Х. Чжоу, С. Вэй, Ж. Ф. Дай и др., Исследование стратегии участия крупномасштабных электромобилей в первичной частотной модуляции на основе модельного прогнозирующего управления, в: Труды Китайского конгресса по автоматизации (CAC) 2022 года, Сямэнь, Китай, 2022, стр. 4469-4475.
- [15] А. Л. М. Муфарис, С. Кавачи, Дж. Баба, Управление напряжением с использованием скоординированного управления тепловыми насосами-водонагревателями с высокой степенью проникновения фотоэлектрических систем, в: Труды 3-й Международной конференции по системам преобразования электроэнергии и энергии, Стамбул, 2013, стр. 1-6.
- [16] К.З.Янг, К.Лью, Ю.В.Джиа и др., Гибкие нагрузки кондиционирования воздуха как источники, реагирующие на напряжение/частоту в микросети, в: Труды 2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia), 2020, Вэйхай, 2020, стр. 1739-1744.
- [17] М.Хаджакбари Фини, М.Е.Хамедани Голшан, Регулирование частоты с использованием мощности нагрузок и генераторов в энергосистемах с высокой долей возобновляемых источников энергии, Electr.Pow.Syst.Res.166 (2019) 43-51.

[18] М.Х. Фини, М.Е.Х. Голшан, Дж.Р. Марти, Снижение влияния участия нагрузок в первичном регулировании частоты на срок службы устройства и удобство для потребителя, в: Труды Генеральной конференции IEEE Power & Energy Society (PESGM) 2019 года, Атланта, Джорджия, США, IEEE, 2019, стр. 1-5.

[19] Т. Лю, Д.Дж. Хилл, К.К. Чжан, Неразрушающее управление со стороны нагрузки для регулирования частоты в энергосистемах, IEEE Trans.Smart Grid 7(4) (2016) 2142-2153.

[20] К.Х.Чжао, У.Топку, Н.Ли и др., Проектирование и устойчивость первичного регулирования частоты со стороны нагрузки в энергосистемах, IEEE Trans.Autom.Control 59 (5) (2014) 1177-1189.

[21] А. Делавери, И. Камва, Улучшенная оптимальная децентрализованная модуляция нагрузки для регулирования первичной частоты энергосистемы, IEEE Trans.Power Syst. 33 (1) (2018) 1013-1025.

[22] Дж. Дж. Чжао, Д. Ю. Ши, Д. Чжоу и др., Стратегия управления сбросом нагрузки для энергосистемы на основе стабильности частоты и напряжения системы (апрель 2018 г.), в: Труды Китайской международной конференции по распределению электроэнергии (CICED), 2018, Тяньцзинь, 2018, стр. 1352-1355.

[23] Ю.К.Ванг, Д.Л.Ци, Дж.Л.Чжанг и др., Новое оптимальное управление нагрузкой для регулирования частоты и напряжения энергосистемы, J.Mod Power Syst.Clean Energy 11 (6) (2023) 1746-1755.

[24] Ю.К.Ванг, Д.Л.Ци, К.Б.Ванг и др., Прямое проектирование локального управления нагрузкой для первичного регулирования частоты и напряжения, Electr.Pow.Syst.Res.223 (2023) 109472.

[25] К.Калси, М.А.Элизондо, Дж.Лиан и др., Нагрузки как ресурс: частотно-регулируемый спрос, 2014. Pacific Northwest Nat.Lab., Ричленд, Вашингтон, США, Технический отчет PNNL-23764, 2014.

[26] К. Деб, А. Пратап, С. Агарвал и др., Быстрый и элитарный многоцелевой генетический алгоритм: NSGA-II, IEEE Trans.Evol.Comput.6 (2) (2002) 182-197.

[27] П. Самади, А. Х. Мохсениан-Рад, Р. Шобер и др., Оптимальный алгоритм ценообразования в реальном времени на основе максимизации полезности для интеллектуальной сети, в: Труды Первой международной конференции IEEE по коммуникациям в интеллектуальных сетях 2010 года. Гайтерсберг, Мэриленд, США, 2010, стр. 415-420.

[28] Н. Ли, Л. Дж. Чен, С. Х. Лоу, Оптимальное реагирование на спрос на основе максимизации полезности в энергетических сетях, в: Труды Генеральной конференции IEEE Power and Energy Society 2011, Детройт, Мичиган, США, 2011, стр. 1-8.

Получено 12 августа 2024 г.; отредактировано 5 декабря 2024 г.; принято 25 января 2025 г.

*** Ответственный автор**

Адреса электронных почт: 15269639282@163.com (Я. Ванг), 1015207896@qq.com (Ч. Чжу), ygyzh@sohu.com (Ч. Ю), wangzigan@epri.sgcc.com.cn (З. Ванг).

Эта статья переведена из журнала <Global Energy Interconnection> (ISSN: 2096-5117), выпуск 2, 2025 г. Оригинальное название статьи:< NSGA-II-based load resource management for frequency and voltage support>. Перевод предоставляется исключительно для справки; преимущественную силу имеет оригинал: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2025.01.005>

2096-5117/© 2025 Global Energy Interconnection Group Co.Ltd. Издательские услуги предоставлены Elsevier B.V. от имени KeAi Communications Co.Ltd. Данная статья находится в открытом доступе и распространяется по лицензии CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



Ясин Ванг получила степень доктора наук в области электротехники в Чжэцзянском университете, Ханчжоу, Китай, в 2024 году. В настоящее время она работает в Китайском научно-исследовательском институте электроэнергетики. Ее научные интересы включают в себя оптимизацию управления напряжением и частотой в интеллектуальных сетях, а также распределенную оптимизацию на основе теории игр с применением к энергосистемам.



Чжихан Чжу получил степень бакалавра электротехники в Чжэцзянском университете, Ханчжоу, Китай, в 2022 году. В настоящее время он учится в магистратуре по направлению электротехника в том же университете. Его научные интересы включают в себя машинное зрение, обработку изображений и искусственные нейронные сети.



Чжихун Ю получила степень доктора наук в области электротехники в Харбинском технологическом институте (Китай) в 2004 году. В настоящее время она работает в Китайском научно-исследовательском институте электроэнергетики (CEPRI). Она также является ведущим инженером в группе исследований динамической оценки безопасности. Её текущие научные интересы включают в себя моделирование, анализ и управление устойчивостью энергосистем, интеллектуальный анализ данных и его инженерные приложения в энергосистемах.



Зиган Ванг получил степень магистра электротехники в Мельбурнском университете (Австралия) в 2022 году. В настоящее время он работает в Китайском научно-исследовательском институте электроэнергетики. Его научные интересы включают в себя анализ безопасности и стабильности крупномасштабных энергосистем и применение искусственного интеллекта в энергосистемах.

(Редактор: Цзэдун Чжан)