



# 考虑可调节负荷减碳降碳价值的需求响应运行决策模型

张晓萱<sup>1</sup>, 薛松<sup>1</sup>, 许野<sup>2</sup>, 许轶<sup>2</sup>, 丁泽宇<sup>1</sup>, 孙庆凯<sup>1</sup>

(1. 国网能源研究院有限公司, 北京 102209; 2. 华北电力大学, 北京 102206)

**摘要:** 需求响应是重要的可调节负荷资源之一, 对于新型电力系统的减碳和新能源消纳具有重要促进作用。将碳流理论、智能优化算法和多属性评判方法融入需求响应可调节负荷运行策略决策过程中, 构建以用户用电成本最小化为目标函数、涵盖电力供需平衡和机组出力限制等约束条件的需求响应策略优化模型, 利用遗传算法确定利于实现优化目标的优势种群各个染色体的经济效益、新能源消纳量和用户碳排放强度的计算结果, 组合运用改进的熵权法和权重加和法对所有染色体进行综合评估和排序, 得到确保系统经济效益、新能源消纳和减碳效果全局最佳的需求响应策略, 最大限度地提高可调节负荷资源的价值。最后, 通过算例验证了方法的可行性和有效性。

**关键词:** 可调节负荷; 碳流计算; 需求响应; 智能优化; 多重价值

**DOI:** 10.11930/j.issn.1004-9649.202406091

## 0 引言

新型电力系统的供需双侧均有随机性和不可控性, 单纯的电力供应侧调节模式尽管具有简单易行、供应相对稳定等特性, 但无法充分发挥新型电力系统的运行可靠、灵活性高、互动性强、可再生能源利用率高等优势<sup>[1-2]</sup>。需求响应是一种重要的可调节负荷资源, 通过合理控制需求响应策略, 制定电价协议或者采取激励手段, 改变电力用户负荷, 确保其适应实时的电力供应, 实现新能源场站与可调节负荷用户之间的良性互动的同时, 提升电力资源的配置利用和调度运行效率, 对于保证电力系统的供需平衡、提高系统的安全性和稳定性、活跃电力市场以及提升电网灵活调节能力至关重要<sup>[3-5]</sup>。

针对区域综合能源系统普遍面临的能源供需失衡风险、可能存在的系统灵活性和稳定性不足等问题, 当前许多研究<sup>[6-11]</sup>考虑将需求响应激励机制引入区域综合能源系统的调度策略设计过程中, 主要聚焦在用户侧电力需求的转移和削减机

理研究、需求响应资源潜力评估、系统多目标优化调度模型构建等方面。文献<sup>[6]</sup>在构建能源管理与定价双层优化模型的基础上, 生成了兼顾系统经济性、鲁棒性和新能源高比例消纳的综合能源系统协同调度策略。文献<sup>[7]</sup>构建了区域综合能源系统的多目标低碳经济调度模型, 并通过标准节点电力系统和典型热力系统验证了模型的可行性和实用性。文献<sup>[8]</sup>建立了一种热负荷弹性与分时电价需求侧响应协同促进碳减排的电热优化调度模型。仿真结果表明, 该模型可以有效促进系统的低碳经济运行。文献<sup>[9]</sup>基于碳排放流理论, 在考虑当前电力系统“源随荷动”的特性基础上, 将动态碳因子作为响应依据, 提出一种可以激励用户并降低系统碳排放的新型低碳需求响应机制。文献<sup>[10]</sup>以成本最小为目标函数, 提出了一种考虑需求响应的孤岛微电网鲁棒调度模型, 并采用遗传算法和混合整数规划方法对其进行求解, 证明了所提模型在维持电网供需平衡的同时, 能够最大限度地降低总成本。文献<sup>[11]</sup>基于德国国家能源系统模型和区域需求响应优化模型, 对 2035 年的需求响应情景进行经济评估和潜力分析, 为国家和区域级别的需求响应策略生成提供参考和借鉴。

另外, 还有部分研究<sup>[12-15]</sup>重点关注如何运用

收稿日期: 2024-06-25; 修回日期: 2024-09-29。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目 (1300-202157404A-0-0-00)。



需求响应机制来调动居民用户的参与积极性，最大限度地保障居民、电网公司、公用企业的共同利益。文献 [12] 为了充分发挥居民用户的节能降碳潜力，提出了价格信号与积分制联合激励下，考虑消费舒适度的居民用户需求响应优化策略，很好地保障了电网公司与居民用户的共同利益。文献 [13] 提出一种基于主从博弈推演和改进多任务学习的居民用户需求响应潜力评估方法，通过算例验证了该方法在居民用户需求响应特性挖掘及需求响应潜力评估中的优越性。文献 [14] 针对售电公司和居民用户之间存在的利益冲突，提出了一种基于双重博弈的电价套餐设计方法，引导用户调整用电行为的同时，很好地实现了削峰填谷和碳排放量下降。文献 [15] 基于 Stackelberg 博弈算法，提出了一种可再生能源整合的消费者和公用企业之间的实时需求响应均衡模型，案例仿真证明了该算法能够为需求响应策略的实施提供有效的负载控制。

综上所述，现有的需求响应策略优化设计多以经济目标为导向，通过合理制定分时电价和用户参与需求响应时的补偿成本，保证配电网运营商的利润最大化（或者用户的用电成本最小化）。但是，该设计原则忽略了需求响应策略对电力系统的碳排放量降低和可再生能源消纳的积极影响，导致所提的需求响应策略不能兼顾经济效益和减碳效用的综合最大化。因此，本文结合需求响应策略智能优化模型和碳流理论，在构建以用户的用电成本最小化为目标函数，涵盖电力供需平衡、机组出力限制和支路传输限制等约束条件的需求响应策略优化模型的基础上，利用遗传算法（genetic algorithm, GA）确定优势种群的各个染色体，结合各个染色体的用能成本、新能源消纳和用户碳排放强度的计算结果，以及基于改进熵权法的上述 3 类指标的权重系数，采用权重加和法对其进行综合评估和排序，得到确保系统经济效益、新能源消纳和减碳效果全局最佳的需求响应策略，真实反映可调节负荷资源的多重价值。

## 1 基于碳流理论的需求响应可调节负荷碳强度计算

基于负荷节点碳势的碳强度计算是在明确系

统的潮流分布、确定发电节点和负荷节点的碳流联系的基础上，根据相关公式将发电节点的碳属性转移到负荷节点，最终确定负荷节点的碳势与碳流率的乘积即为该节点的碳强度 [16]。假设某系统共有  $B$  个节点，其中， $K$  个节点存在机组注入， $M$  个节点存在电力需求。在对关键矩阵和向量进行定义的基础上，测算负荷节点的碳势和碳流率向量，最终确定各个负荷节点的碳排放强度，具体过程 [17] 如下。

1) 为了阐明电力系统的有功潮流分布，以及发电机组与电力系统的连接关系，分别定义支路潮流分布矩阵为  $\mathbf{P}_B=(P_{Bij})_{B \times B}$ ，机组注入的分布矩阵为  $\mathbf{P}_G=(P_{Gkj})_{K \times B}$ 。

2) 为了描述所有负荷节点与电力系统的关联关系，以及发电机组和节点的用电需求对节点碳势的贡献，定义负荷分布矩阵  $\mathbf{P}_L=(P_{Lmj})_{M \times B}$ ，节点有功通量矩阵  $\mathbf{P}_N=(P_{Nij})_{B \times B}$ ，分别表示为

$$\mathbf{P}_N = \text{diag}(\boldsymbol{\zeta}, \mathbf{P}_Z) \quad (1)$$

$$\mathbf{P}_Z = [\mathbf{P}_B \ \mathbf{P}_G]^T \quad (2)$$

式中： $\boldsymbol{\zeta}$  为  $B+K$  阶行向量，所有元素均为 1。

3) 计算碳排放强度  $\mathbf{E}_G$  和节点碳势向量  $\mathbf{E}_N$ 。假设第  $i(i=1, 2, \dots, B)$  个节点的碳势为  $e_{Ni}$ ，单位为  $\text{kgCO}_2/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，则节点碳势向量可以表示为

$$\mathbf{E}_N = [e_{N1}, e_{N2}, \dots, e_{NB}]^T \quad (3)$$

具体计算方法为

$$\mathbf{E}_N = (\mathbf{P}_N - \mathbf{P}_B^T)^{-1} \mathbf{P}_G^T \mathbf{E}_G \quad (4)$$

$$\mathbf{E}_G = [e_{G1}, e_{G2}, \dots, e_{GK}] \quad (5)$$

式中： $\mathbf{E}_G$  为发电机组的碳排放强度向量； $e_{Gk}$  为第  $k(k=1, 2, \dots, K)$  台发电机组的碳排放强度， $\text{kgCO}_2/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

4) 计算负荷碳流率向量  $\mathbf{R}_L$  为

$$\mathbf{R}_L = [R_{L1}, R_{L2}, \dots, R_{LM}]^T \quad (6)$$

式中： $R_{Li}(i=1, 2, \dots, M)$  为负荷节点  $i$  的碳流率， $\text{kgCO}_2/\text{h}$ 。

基于节点碳势向量  $\mathbf{E}_N$  和负荷分布矩阵  $\mathbf{P}_L$ ，得到  $\mathbf{R}_L$  为

$$\mathbf{R}_L = \mathbf{P}_L \mathbf{E}_N \quad (7)$$

(5) 计算碳排放强度  $\mathbf{Y}$ 。在确定系统负荷碳流率  $\mathbf{R}_L$  的基础上，计算  $\mathbf{Y}$  为



$$Y = R_L \gamma \quad (8)$$

式中： $\gamma$ 为  $M$  阶行向量，向量中所有元素代表相应的时间且保持一致。

## 2 基于智能优化算法的需求响应可调节负荷运行决策模型

### 2.1 需求响应可调节负荷运行决策模型

为了深入考察电力系统推行实时电价激励机制的有效性，本文提出以电力系统全体用户的日内购能成本最小化为优化目标，涵盖系统供需平衡、机组出力水平规定和用户电力需求调整范围等约束条件的需求响应策略优化模型。

1) 目标函数。

$$\min C_{\text{ost}} = \sum_{i=1}^J \sum_{t=1}^T [u_i(t)p_i(t)] - \sum_{i=1}^J \sum_{t=1}^T \left[ \frac{(u_i(t) - w_i(t))d_i(t)}{2} \right] \quad (9)$$

式中： $C_{\text{ost}}$ 为用户参与需求响应以后的日内购电总成本，元； $J$ 为用户的总数，本文取 12； $T$ 为每日小时数，取 24； $w_i(t)$ 、 $u_i(t)$ 分别为需求响应策略实施前后用户  $i$  在时刻  $t$  的电力需求， $\text{kW}\cdot\text{h}$ ； $d_i(t)$ 为用户  $i$  在时刻  $t$  参与需求响应时获得的补贴收益，元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$ ； $p_i(t)$ 为分时电价，元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

2) 约束条件。

①需求响应策略实施后用户电力需求和机组出力约束为

$$u_i(t) \in [\alpha_w w_i(t), \beta_u w_i(t)], \forall t, i \quad (10)$$

$$f_k(t) \in [f_{k,\min}(t), f_{k,\max}(t)], \forall t, k \quad (11)$$

式中： $\alpha_w$ 和  $\beta_u$ 分别为用户的电力需求变化区间系数； $f_k(t)$ 为机组  $k$  ( $k=1, \dots, K$ ) 在时刻  $t$  的出力，MW； $f_{k,\min}(t)$ 和  $f_{k,\max}(t)$ 分别为机组  $k$  在时刻  $t$  的最小和最大出力，MW。

②逐时供需平衡约束为

$$\sum_{k=1}^K f_k(t) \geq \sum_{i=1}^J u_i(t), \forall t \quad (12)$$

③实施需求响应策略后用户的电力需求调整约束为

$$\sum_{i=1}^J \sum_{t=1}^T u_i(t) \leq \sum_{i=1}^J \sum_{t=1}^T w_i(t) \quad (13)$$

④需求响应策略后的新能源机组总出力不低于未实施需求响应策略的机组总出力，即

$$\sum_{i=1}^W \sum_{t=1}^T f_{wi}(t) \geq \sum_{i=1}^W \sum_{t=1}^T e_{wi}(t) \quad (14)$$

式中： $e_{wi}(t)$ 、 $f_{wi}(t)$ 分别为需求响应策略实施前后新能源机组  $i$  在时刻  $t$  的发电量； $W$ 为新能源机组数量。

⑤火电机组爬坡约束为

$$f_{g,i}(t) - f_{g,i}(t-1) \leq \Delta t U_{g,i}^{\text{f,con}}, \forall t, i \quad (15)$$

$$f_{g,i}(t-1) - f_{g,i}(t) \leq \Delta t D_{g,i}^{\text{f,con}}, \forall t, i \quad (16)$$

式中： $f_{g,i}(t)$ 为火电机组  $i$  在  $t$  时刻的出力； $U_{g,i}^{\text{f,con}}$ 、 $D_{g,i}^{\text{f,con}}$ 分别为火电机组  $i$  最大上爬坡速率与最大下爬坡速率。

6) 支路电功率传输约束为

$$P_{l,\min} \leq \sum_{k=1}^K G_{l-k} f_k(t) - \sum_{i=1}^J G_{l-i} u_i(t) \leq P_{l,\max} \quad (17)$$

式中： $P_{l,\max}$ 、 $P_{l,\min}$ 分别为支路  $l$  传输功率上下限； $G_{l-k}$ 为节点  $k$  注入（节点接入机组）或吸收功率（节点接入负荷）对支路  $l$  潮流转移分布因子。

### 2.2 基于遗传算法优化的初始需求响应可调节负荷运行策略

需求响应策略模型具有非线性、多模态、高维度的特点，采用传统优化算法对其进行求解，鲁棒性较差，且容易陷入局部最优，并且在高维度情况下可能会面临维度灾难，导致算法性能显著下降<sup>[18-19]</sup>。因此，本文引入遗传算法生成初始的需求响应策略，该方法是一种基于自然选择和遗传机制的求解方法，通过在群体中自动选择优良基因，快速生成最优解<sup>[20-21]</sup>。运用 GA 求解需求响应策略优化模型的步骤如下。

1) 编码、初始化种群。以需求响应策略实施后各个时间段的电源发电量以及用户需求作为决策变量，即  $X = [x_1 \dots x_n]^T$ ，其中， $n$ 为决策变量个数。采用实数编码，并精确到小数点后两位数。设置种群规模为  $N$ ，迭代次数为  $I$ ，随机生成  $N$  个染色体串，第  $I$  代种群表示为  $P(I)$ ，初始种群为  $P(0) = \{X_{1,0}, X_{2,0}, X_{3,0}, \dots, X_{N,0}\}$ 。

2) 评估个体适应度。适应度函数 (fitness) 也被称为评价函数，用于定义个体在当前环境下



的优劣程度和描述整个个体与其适应度之间的对应关系，为后续繁殖优势个体进而确保整体种群朝着最优方向进化奠定很好的基础。本文采用罚函数构造法将原始的有约束优化模型转化为无约束问题以后，再对其进行求解，目标函数为

$$f(X_{N,l}) = \frac{1}{\text{cost}(X_{N,l})/C + kp(X_{N,l})} \quad (18)$$

式中： $C$ 为固定常数，用于保障目标函数与罚函数为同一数量级； $\text{cost}(X_{N,l})$ 为个体 $X_{N,l}$ 的经济效益； $k$ 为惩罚因子； $p(X_{N,l})$ 为罚函数，表示个体 $X_{N,l}$ 违反约束条件的程度，通常以违反约束条件的数量或程度来表示，当个体满足所有约束条件即属于可行性解时，罚函数 $p(X_{N,l})$ 取0，不发挥作用，反之，若个体不属于可行性解，罚函数 $p(X_{N,l})$ 增大导致适应度值降低，降低该个体在种群中的生存概率，不利于被复制遗传到下一代。在计算种群 $P(k)$ 的每一个个体 $X_{N,l}$ 的适应度值 $f(X_{N,l})$ 的基础上，记录每一代种群的最佳适应度及对应的个体基因。

3) 选择算子。基于前述的适应度评估结果，优先选择具有较高适应度值的个体 $f(X_{N,l})$ ，并且消除具有较低适应度值的个体。本文采用“轮盘赌”的选择方法，每一个个体被选中遗传到下一代的概率 $P_{n,l}$ 为它的适应度值与整个种群的个体适应度总和的比值，即

$$P_{n,l} = f(X_{n,l}) / \sum_{n=1}^N f(X_{n,l}) \quad (19)$$

4) 交叉算子。在自然界的生物进化过程中，染色体通过两两配对并重组基因形成新的染色体，以增强后代的多样性和适应能力，交叉操作据此成为遗传算法的核心环节。本文选择两点交叉算法，运用交叉概率 $P_c$ 判别个体之间的交叉行为，并在相互配对的两个个体串中进行随机交叉。

5) 变异算子。为了防止局部收敛和确保种群的多样性，以变异概率 $P_m$ 判断当前个体是否变异，并通过随机选择的方法选中某一点位进行变异，形成新的个体，完成变异算子操作。

6) 算法终止判定。本文设定的算法终止依据为目标函数是否收敛，即适应度函数值趋于稳定或当且仅当迭代次数达到设定的最大迭代次数时，停止循环并输出最优结果。

### 3 基于多属性评判理论的需求响应可调节负荷运行决策综合评估与排序

#### 3.1 基于改进熵权法的权重计算

权重计算方法主要包括主观赋权法、客观赋权法和二者的组合赋权法<sup>[22-23]</sup>。其中，主观赋权法主要借助相关专家对于指标重要程度的主观判定结果来计算得到权重系数，严重受制于被调查人员的知识或者经验判断；客观赋权法更多依赖于评价指标的历史数据信息确定权重系数，数据收集可能存在困难。由于上述两类方法固有的优越性和局限性，计算结果完全取决于掌握的指标信息，与实际情况偏差较大等，采用二者的综合赋权方法，可以得到更为贴近现实情况的权重系数<sup>[24]</sup>。因此，本文针对3类评判指标的历史数据信息难以获取和过于依赖指标信息导致权重计算结果严重偏离实际情况等问题，将层次分析法的思想融入熵权法的计算过程中，采用改进的熵权法计算得到指标的权重系数<sup>[22]</sup>。

##### 3.1.1 指标的重要程度判断矩阵构建

借鉴传统的层次分析法，通过随机选择参与打分的人员人数来确保调查结果的多样性和客观性，设计1~4个重要等级（从1到4，重要等级依次升高），汇总专家的投票结果，最终生成经济效益、新能源消纳、用户碳排放强度3个指标的重要性程度投票表格和对应的采样矩阵 $U_{3 \times 4}$ ，其元素 $u_{ij}$ 为第 $i(i=1, 2, 3)$ 个指标第 $j(j=1, 2, 3, 4)$ 个重要等级投票的初始值，本文假设 $U_{3 \times 4} = \begin{pmatrix} 6 & 3 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 6 & 1 \\ 4 & 5 & 1 & 0 \end{pmatrix}$ 。

##### 3.1.2 临时权重计算。

###### 1) 构建标准化评价矩阵。

基于前述建立的原始评价指标矩阵 $U$ ，采用归一化方法对原始的打分结果进行处理，得到 $Z$ ，其元素 $z_{ij}(i=1, 2, 3, j=1, 2, 3, 4)$ 为第 $i$ 个指标第 $j$ 个重要等级标度的标准化值。

2) 计算第 $i$ 个评价指标的熵 $E_i$ 和信息偏差度 $d_i$ 分别为

$$\begin{cases} E_i = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{j=1}^4 z_{ij} \ln(z_{ij}) \\ d_i = 1 - E_i \end{cases} \quad (20)$$

式中： $n$ 为评价指标数量，本文取3。



3) 运用熵权法生成临时权重，计算得到的 3 个指标的临时权重  $W_i$  为

$$W_i = d_i / \sum_{i=1}^3 d_i \quad (21)$$

针对 3.1.1 节  $U_{3 \times 4}$ ，可得到 3 类评价指标临时权重结果分别为 0.3173、0.3258、0.3569。

### 3.1.3 最终权重计算

通过查阅相关文献和专家咨询，对前述确定的 4 个重要性程度进行打分， $R = (\text{重要等级 4, 重要等级 3, 重要等级 2, 重要等级 1}) = [100 \ 75 \ 50 \ 25]$ 。根据重要程度判断结果矩阵  $Z$ ，计算出各指标的总得分向量  $P$  为

$$P = ZR^T = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} & z_{14} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} & z_{24} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} & z_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 100 \\ 75 \\ 50 \\ 25 \end{pmatrix} = (p_1, p_2, p_3) \quad (22)$$

最终，联合使用加权平均法和归一化方法得到最终权重，运用得分分别乘以临时权重  $W_i$ ，并对其归一化处理，得到 3 个指标的最终权重  $w_i$  为。

$$w_i = W_i p_i / \sum_{i=1}^3 W_i p_i \quad (23)$$

针对 3.1.1 节  $U_{3 \times 4}$ ，可得到 3 类评价指标最终权重值分别为 0.4535、0.2465、0.3000。

如上所述，改进的熵权法首先基于专家对于指标重要程度的评估结果的一致性计算得到了 3 个指标的临时权重，有效避免了不同性质和不同数量级的指标之间的相互比较；然后，结合指标的重要程度打分，计算得到了指标的最终权重，在考虑专家的主观意见的同时，兼顾了客观的评分标准；最终，确定 3 个指标的最终权重系数，为后续生成兼顾经济效益、低碳转型和新能源消纳的最优需求响应策略奠定了坚实基础。

### 3.2 基于权重加和法的需求响应策略综合评估与排序

权重加和法是目前最为广泛使用的多属性评判方法，该方法的原理易懂，计算过程简单，排序结果清晰，利于决策者使用和理解，基于权重系数和归一化指标，计算得到各个候选方案的综合效用值  $C_i$  为

$$C_i = \sum_{i=1}^3 w_i u_i \quad (24)$$

式中： $u_i$  为经过归一化后的各项指标值。

按照从大到小的顺序对综合效用值  $C_i$  进行排序，并确定最优策略。考虑可调节负荷减碳价值的需求响应运行决策整体流程如图 1 所示。

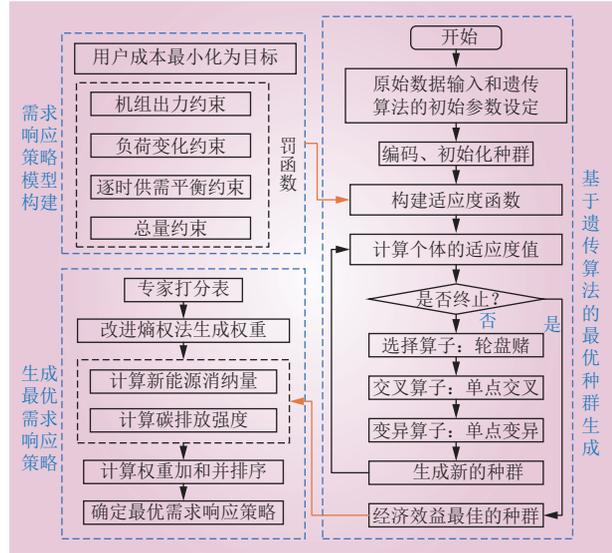


图 1 考虑可调节负荷减碳价值的需求响应运行决策方法  
Fig. 1 Operation decision-making method for demand response considering carbon reduction value of adjustable loads

## 4 算例分析

### 4.1 算例介绍

为了进一步验证本文所提方法的合理性和实用性，结合典型园区的发电侧和用户侧的关键节点信息及其拓扑结构，建立和生成 14 节点电力系统，进行方法的实证研究<sup>[25]</sup>，如图 2 所示。算例包括 5 台发电机组、20 条输电线路和 12 个负荷节点。节点 1 为平衡节点，电压幅值为 1.045 p.u.，接入一台常规火力发电机组，其碳排放强度为 0.875 tCO<sub>2</sub>/MW；节点 2、3、6、8 为 PV 节点，电压幅值分别为 1.015 p.u.、1.005 p.u.、1.035 p.u. 和 1.085 p.u.，其中，节点 2、8 接入常规燃气发电机组，碳排放强度分别为 0.525 tCO<sub>2</sub>/MW 和 0.520 tCO<sub>2</sub>/MW；节点 3 接入风电场，装机容量为 60 MW；节点 6 接入光伏电站，装机容量为 19 MW；该系统的负荷节点编号为 L2~L14；各节点的基准电压均为 110 kV。图 3 为需求响应策略

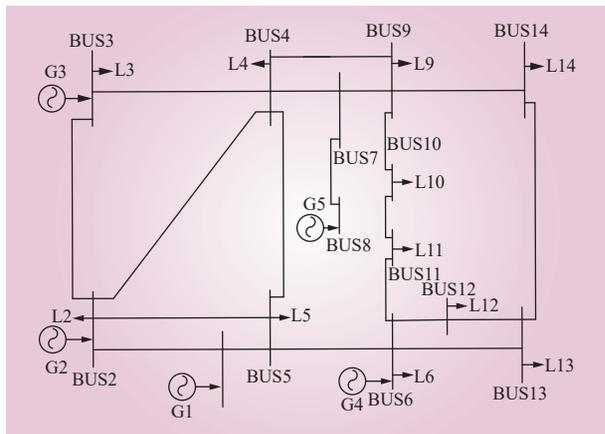


图 2 园区电力系统的网络拓扑结构  
Fig. 2 Network topology structure of park's power system

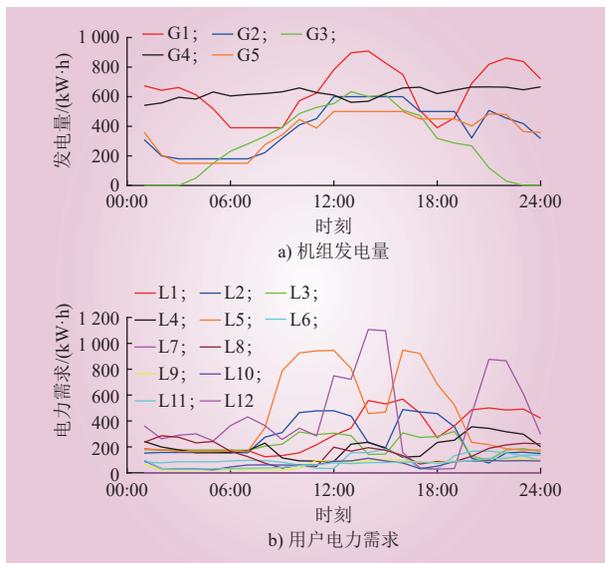


图 3 需求响应策略实施前(基准场景)机组发电量和用户电力需求

Fig. 3 Electricity output of units and electricity demand of users before implementation of demand response strategies (base scenario)

实施前, 该系统的发电机组发电量和各个用户节点的电力需求。本文使用的遗传算法和碳流计算程序均在 Matlab2023a 上实现, 计算机设备的处理器为 AMD Ryzen 7 5700X 8-Core Processor 3.40 GHz, 内存大小为 16 GB。

#### 4.2 结果分析与讨论

基于前文构建的基于智能优化算法的需求响应策略优化模型, 运用遗传算法对其进行求解, 考察电价激励策略的实施给用户侧用电行为带来的影响。遗传算法的关键参数取值如表 1 所示。

图 4 展示了遗传算法的迭代求解过程。可以看出, 运用遗传算法求解得到的该优势种群的所有染色体的最低经济成本为 3 538.020 223 元。在淘汰掉无法满足支路电功率传输约束的染色体的基础上, 运用基于碳流理论的用户碳排放强度计算方法, 确定剩余各个染色体的碳排放强度和新能源消纳量, 表 2 列举了排序靠前的 10 个染色体的 3 个指标计算结果。

表 1 遗传算法的参数设置

Table 1 Parameter setting of genetic algorithm

参数名	参数值
种群大小	100
迭代次数	500
交叉率	0.8
变异率	0.2
选择方式	轮盘赌
目标函数容差	$1 \times 10^{-8}$
约束条件容差	$1 \times 10^{-8}$

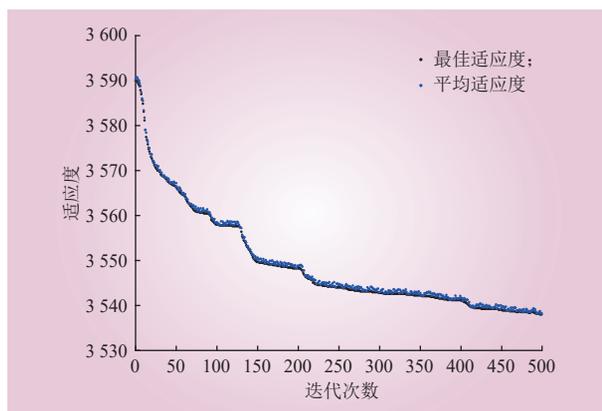


图 4 遗传算法的迭代寻优过程

Fig. 4 Iterative optimization process of genetic algorithm

由表 2 可知, 以系统经济效益最优, 即日内所有参与需求响应的用户电力购买成本最低为优化目标, 生成的排序前 10 的最优种群的平均成本为 3 538.034 718 元, 相较于基准场景(即需求响应策略实施以前)的经济成本(3 810.174 173 元), 降低了 7.14%。类似地, 实施需求响应策略以后, 用户根据自身情况适时地调整用电计划, 有效促进了新能源发电量的高比例消纳, 对比基准场景的新能源消纳量(21 439.112 560 (kW·h)), 需求响应后的平均消纳量为 22 985.694 109 (kW·h), 提升了 7.21%。



表 2 排序前 10 的染色体评价指标  
Table 2 Evaluation indicators of top 10 chromosomes

染色体编号	经济效益/元	新能源消纳量/(kW·h)	碳排放强度/(tCO <sub>2</sub> ·MW <sup>-1</sup> )
3	3538.020223	22985.663504	0.600079
62	3538.021444	22985.663205	0.600081
95	3538.023447	22985.757260	0.596880
36	3538.024562	22985.663801	0.600080
60	3538.030573	22985.663811	0.600080
34	3538.040900	22985.740674	0.594854
43	3538.051068	22985.668392	0.626476
8	3538.041506	22985.659628	0.626443
30	3538.041510	22985.661761	0.626476
20	3538.051947	22985.799057	0.621452

至于用户的碳排放强度，新能源消纳量的有效提升，意味着火力发电量的适度降低，碳排放强度随之下降，表 3 为需求响应策略实施前后的用户典型日碳排放强度的对比结果，相较于基准场景，需求响应策略实施后的碳排放强度平均量下降了 8.41%。

为了更好地兼顾需求响应策略实施带来的经济效益提升、用户碳排放强度下降和新能源的高比例消纳等多项价值，以遗传算法求解得到的经济效益较高的前 20 代染色体为研究对象，在补充计算得到所有染色体的用户碳排放强度和新能源

表 3 需求响应策略实施前后的典型日碳排放强度对比  
Table 3 Comparison of typical daily carbon emission intensities before and after implementation of demand response strategies

单位：tCO<sub>2</sub>·MW<sup>-1</sup>

负荷编号	需求响应策略实施前	需求响应策略实施后
L1	0.6367	0.6051
L2	0.6782	0.6030
L3	0.6554	0.6013
L4	0.6352	0.5957
L5	0.6243	0.5828
L6	0.6694	0.6149
L9	0.6579	0.6067
L10	0.6706	0.5968
L11	0.6714	0.5941
L12	0.6525	0.6003
平均	0.6552	0.6001

消纳量的基础上，组合运用改进的熵权法和权重加和法计算得到所有染色体的综合效用值，并据此对 20 代染色体进行综合评估和排序，图 5 为所有染色体的 3 项指标值和综合效用值，以及从高到低的排序情况。

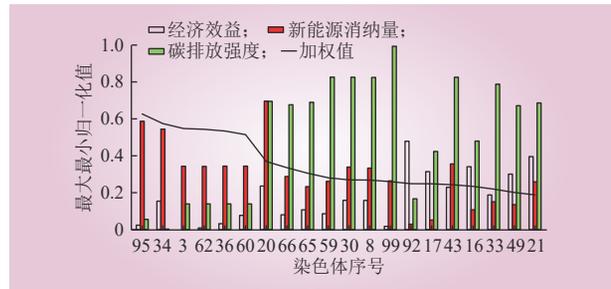


图 5 目标染色体的归一化加权指标排序结果  
Fig. 5 Ranking result of normalized weighted indicator of target chromosomes

由图 5 可知，联合使用碳流计算理论、智能优化方法和多属性评判理论，利于生成确保系统经济效益、新能源消纳和减碳效果全局最佳的需求响应策略，最大限度地提高可调节负荷资源的价值，其中，最佳方案为最优种群的第 95 号染色体，经济效益、新能源消纳量、碳排放强度分别为 3538.023447 元、22985.757260 (kW·h) 和 0.596880 tCO<sub>2</sub>/MW，该方案对应的发电机组出力 and 电力需求详见图 6。相较于基准场景，系统的经济效益增加了 272.150726 元；新能源发电量明显上升，相比于基准场景，增加了 1546.644700 (kW·h)；最后，由于系统的新能源消纳量的大幅提升，系统的碳排放量和用户的碳排放强度明显下降，对比基准场景，所有用户的典型日碳排放强度均值下降了 8.90%，有效促进了新型电力系统的绿色低碳转型，对促进各区域之间的碳减排合作和经济协调发展具有重要意义。

为了更好地体现前述所提的碳流理论、智能优化算法和多属性评判方法的组合方法的优势，本文采用 Gurobi 数学求解器对所建需求响应优化模型进行求解，求解结果详见表 4。可以看出：1) 在求解速度方面，Gurobi 数学求解器的模型求解时间约为 1.25 s，用时较短；相反，利用遗传算法求解生成最优染色体需要耗时 315.82 s。这是因为，作为启发式算法，遗传算法需要在解空间内反复搜索和迭代多次才能找到最优染色体，导致

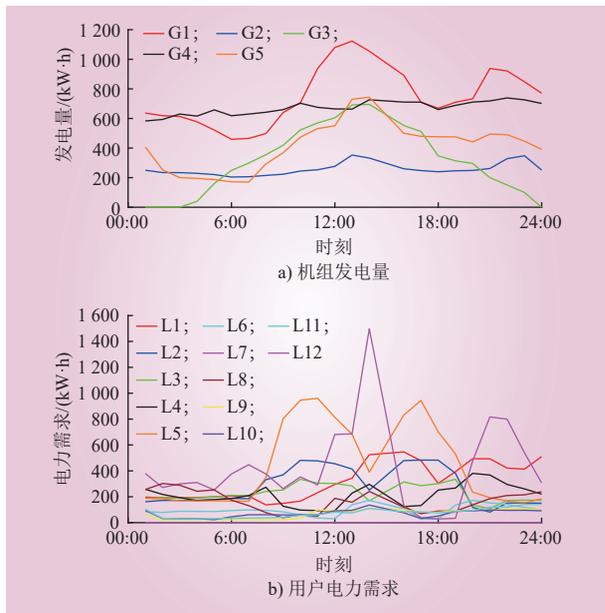


图 6 需求响应策略实施后的机组发电量和用户电力需求  
Fig. 6 Electricity output of units and electricity demand of users after implementation of demand response strategies

表 4 2 类优化方法的结果对比  
Table 4 Result comparison of two types of optimization methods

方法	经济成本/ 元	新能源消纳量/ (kW·h)	碳排放强度/ (tCO <sub>2</sub> ·MW <sup>-1</sup> )	最终 得分
Gurobi	3435.159422	21521.16273	0.65139	0.435
本文方法	3538.023447	22985.75726	0.59688	0.565

其求解效率不如 Gurobi 数学求解器。2) 在求解结果方面, 基于 Gurobi 数学求解器的最优决策方案的经济成本低于本文所提的组合方法, 但是其新能源消纳量与碳排放控制效果明显较差, 导致两类方法求解结果的归一化最终得分 (0.435) 不如本文所提方法 (0.565)。由此可见, 直接采用数学求解器制定的最优需求响应策略仅仅可以保证经济成本的最小化, 无法同时兼顾新能源的高比例消纳和减碳成效; 相反, 基于遗传算法求解生成的多个候选策略, 组合使用碳流理论和权重加和法, 可以得到成本控制、新能源消纳和减碳成效 3 个目标综合最优的需求响应策略。

## 5 结论

需求响应作为重要的可调节负荷资源, 从根本上改变了传统通过增加能源供应以满足能源需

求增长的单一思维模式, 树立并落实了可调节负荷作为一种替代资源的新理念, 增强电力系统的弹性和灵活性的同时, 有助于革新能源利用模式和提升用电效率。

本文创新性地将碳流理论和多属性评判理论融入需求响应策略的优化设计过程, 妥善解决了潮流和碳流计算与策略优化生成的联动缺失问题, 相较于未实施需求响应策略, 通过遗传算法求解的最优需求响应策略的用户用电成本下降了 7.14%, 新能源消纳量增加了 7.21%, 碳排放强度下降了 8.41%, 对于保障电力系统的稳定性和安全性、提高电网侧以及用户侧的新能源消纳量以及资源利用效率具有重要的战略意义。

后续工作可以考虑采用改进的智能优化算法, 以期提升模型求解效率, 增加候选方案的全面性和多样性, 增强需求响应策略的可行性和实用性, 突显用户侧可调节资源的降本增效和节能减排价值。

## 参考文献:

- [1] 鞠立伟, 吕硕硕, 李鹏. 新型电力系统需求侧灵活性资源时空协同优化与动态均衡机制研究综述 [J]. 电力建设, 2024, 45(9): 142-163.  
JU Liwei, LV Shuoshuo, LI Peng. Review of novel demand-side flexibility resource spatio-temporal co-optimization and dynamic equilibrium mechanism of power systems[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(9): 142-163.
- [2] 叶小宁, 王彩霞, 李琼慧, 等. 国外新能源高占比电力系统电力供应保障措施及启示 [J]. 中国电力, 2024, 57(4): 61-67.  
YE Xiaoning, WANG Caixia, LI Qionghui, et al. Power supply ensuring measures and implications of foreign countries' power systems with high proportion of new energy[J]. Electric Power, 2024, 57(4): 61-67.
- [3] 苏志鹏, 王莉, 梁欣怡, 等. 考虑阶梯式碳交易及综合需求响应的虚拟电厂优化调度 [J]. 中国电力, 2023, 56(12): 174-182.  
SU Zhipeng, WANG Li, LIANG Xinyi, et al. Optimal dispatch of virtual power plant considering stepped carbon trading and comprehensive demand response[J]. Electric Power, 2023, 56(12): 174-182.
- [4] 徐峰亮, 王克谦, 王文豪, 等. 计及激励型需求响应的低压配电网混合储能优化配置 [J]. 中国电力, 2024, 57(6): 90-101.



- XU Fengliang, WANG Keqian, WANG Wenhao, *et al.* Optimal allocation of hybrid energy storage in low-voltage distribution networks with incentive-based demand response[J]. *Electric Power*, 2024, 57(6): 90–101.
- [5] 蒋棹骏, 向月, 谈竹奎, 等. 计及需求响应的高比例清洁能源园区储能容量优化配置 [J]. *中国电力*, 2023, 56(12): 147–155, 163.
- JIANG Zhaojun, XIANG Yue, TAN Zhukui, *et al.* Optimal allocation of energy storage capacity in high proportion clean energy parks considering demand response[J]. *Electric Power*, 2023, 56(12): 147–155, 163.
- [6] 尚文强, 李广磊, 丁月明, 等. 考虑源荷不确定性和新能源消纳的综合能源系统协同调度方法 [J]. *电网技术*, 2024, 48(2): 517–532.
- SHANG Wenqiang, LI Guanglei, DING Yueming, *et al.* Collaborative scheduling for integrated energy system considering uncertainty of source load and absorption of new energy[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(2): 517–532.
- [7] 何晓洋, 刘森, 李健, 等. 基于需求侧响应的区域综合能源系统的低碳经济调度 [J]. *高电压技术*, 2023, 49(3): 1140–1149.
- HE Xiaoyang, LIU Miao, LI Jian, *et al.* Low-carbon economic dispatch of regional integrated energy system based on demand side response[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(3): 1140–1149.
- [8] 朱伟业, 罗毅, 胡博, 等. 热负荷弹性与分时电价需求侧响应协同促进碳减排的电热优化调度 [J]. *电网技术*, 2021, 45(10): 3803–3813.
- ZHU Weiye, LUO Yi, HU Bo, *et al.* Optimized combined heat and power dispatch considering decreasing carbon emission by coordination of heat load elasticity and time-of-use demand response[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(10): 3803–3813.
- [9] 李姚旺, 张宁, 杜尔顺, 等. 基于碳排放流的电力系统低碳需求响应机制研究及效益分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(8): 2830–2842.
- LI Yaowang, ZHANG Ning, DU Ershun, *et al.* Mechanism study and benefit analysis on power system low carbon demand response based on carbon emission flow[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(8): 2830–2842.
- [10] MONIR S A, ABOLFAZL M, WEBBER L, *et al.* Robust optimization-based optimal operation of islanded microgrid considering demand response[J]. *Sustainability*, 2022, 14(21): 14194.
- [11] WILKO H, WIDED M, THOMAS V, *et al.* Economic assessment of demand response using coupled national and regional optimization models[J]. *Energies*, 2022, 15(22): 8577.
- [12] 戴逢哲, 姜飞, 陈磊, 等. 价格-积分联合激励下考虑消费舒适度的居民需求响应优化策略 [J]. *电网技术*, 2024, 48(2): 819–833.
- DAI Fengzhe, JIANG Fei, CHEN Lei, *et al.* Optimization strategy of residential demand response considering consumption comfort under price-score joint incentive[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(2): 819–833.
- [13] 李志煌, 邵振国, 朱少林, 等. 基于主从博弈推演和改进多任务学习的居民用户需求响应潜力评估 [J/OL]. *电网技术*, 1–14[2024-08-14].
- LI Zhihuang, SHAO Zhenguo, ZHU Shaolin, *et al.* Assessing the potential of residential user demand response based on stackelberg game theory and improvements in multi-task learning[J/OL]. *Power System Technology*, 1–14[2024-08-14].
- [14] 董雷, 倪佳炜, 张师铭, 等. 基于双重博弈的电价套餐设计方法 [J]. *电网技术*, 2024, 48(2): 688–700.
- DONG Lei, NI Jiawei, ZHANG Shiming, *et al.* Designing of electricity price package method based on dual game[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(2): 688–700.
- [15] AKASH T, PUSHPENDRA S, LAL M. A stackelberg game theory based demand response algorithm for domestic consumers[J]. *Electric Power Components and Systems*, 2022, 50(19): 1186–1199.
- [16] 陈家兴, 王春玲, 刘春明. 基于改进碳排放流理论的电力系统动态低碳调度方法 [J]. *中国电力*, 2023, 56(3): 162–172.
- CHEN Jiaxing, WANG Chunling, LIU Chunming. Dynamic low-carbon dispatching method of power system based on improved carbon emission flow theory[J]. *Electric Power*, 2023, 56(3): 162–172.
- [17] 吴静, 刘轩宇, 李响, 等. 考虑网损的电力系统节点边际碳势理论研究与建模 [J/OL]. *中国电力*: 1–11[2024-06-22].
- WU Jing, LIU Xuanyu, LI Xiang, *et al.* Research and modelling of bus marginal carbon intensity for power systems considering network losses[J/OL]. *Electric Power*, 1–11[2024-06-22].
- [18] 周孟然, 王旭, 邵帅, 等. 考虑需求响应和碳排放额度的微电网分层优化调度 [J]. *中国电力*, 2022, 55(10): 45–53.
- ZHOU Mengran, WANG Xu, SHAO Shuai, *et al.* Hierarchical optimal scheduling of microgrid considering demand response and carbon emission quota[J]. *Electric Power*, 2022, 55(10): 45–53.
- [19] 李鹏, 杨莘博, 魏澄宙, 等. 计及能源政策的园区综合能源系统鲁棒随机优化模型 [J]. *中国电力*, 2022, 55(11): 109–120.
- LI Peng, YANG Shenbo, WEI Chengzhou, *et al.* Robust stochastic optimization model of park integrated energy system considering impact of energy policy[J]. *Electric Power*, 2022, 55(11): 109–120.
- [20] 汪惟源, 乔颖, 窦飞, 等. 基于改进遗传算法的海上风电场集电系统拓扑优化 [J]. *中国电力*, 2019, 52(1): 63–68.



- WANG Weiyuan, QIAO Ying, DOU Fei, *et al.* Optimization of offshore wind farm collector systems based on improved genetic algorithm[J]. *Electric Power*, 2019, 52(1): 63–68.
- [21] 葛成余, 周博曦, 朱颂怡, 等. 基于遗传算法的区域配电网单线图自动布局算法 [J]. *中国电力*, 2016, 49(12): 53–57.
- GE Chengyu, ZHOU Boxi, ZHU Songyi, *et al.* Single line diagram layout and optimization method for regional distribution system based on genetic algorithm[J]. *Electric Power*, 2016, 49(12): 53–57.
- [22] 王奇, 常安, 宋云海, 等. 基于组合赋权的变权模糊输电设备状态评估方法 [J]. *中国电力*, 2015, 48(5): 21–26.
- WANG Qi, CHANG An, SONG Yunhai, *et al.* A variable weights transmission equipment condition evaluation method based on combined weight theory[J]. *Electric Power*, 2015, 48(5): 21–26.
- [23] 贾开华, 于云霞, 范秀波, 等. 基于 AHP-EWM 综合赋权和 TOPSIS 法的多能互补系统综合评价 [J]. *中国电力*, 2023, 56(7): 228–238.
- JIA Kaihua, YU Yunxia, FAN Xiubo, *et al.* Multi-criteria comprehensive evaluation of multi-energy complementary system based on AHP-EWM and TOPSIS method[J]. *Electric Power*, 2023, 56(7): 228–238.
- [24] 丁宇辰. 煤制油项目后评价体系的构建与应用研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2015.
- DING Yuchen. Study on construction and application of the evaluation of coal-to-liquids project[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2015.
- [25] 许轶. “碳双控”背景下电力系统碳责任优化与需求响应策略研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2024.
- XU Yi. Research on carbon responsibility optimization and demand response strategy of power system under the background of "carbon dual control"[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2024.

#### 作者简介:

张晓萱 (1980—), 女, 博士, 高级工程师 (教授级), 从事电力行业的碳减排、碳交易、电力市场和需求响应策略优化设计, E-mail: [zhangxiaoxuan@sgeri.sgcc.com.cn](mailto:zhangxiaoxuan@sgeri.sgcc.com.cn);

许野 (1980—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 从事电力系统碳排放流计算、人工智能技术在需求响应策略设计中的应用研究, E-mail: [xuye@ncepu.edu.cn](mailto:xuye@ncepu.edu.cn).

(责任编辑 许晓艳)

## Operational Decision Model for Demand Response Considering Carbon Reduction Value of Adjustable Loads

ZHANG Xiaoxuan<sup>1</sup>, XUE Song<sup>1</sup>, XU Ye<sup>2</sup>, XU Yi<sup>2</sup>, DING Zeyu<sup>1</sup>, SUN Qingkai<sup>1</sup>

(1. State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Demand response is one of the important adjustable load resources, which plays an important role in promoting carbon reduction and new energy consumption in new power systems. This article integrated carbon flow theory, intelligent optimization algorithm, and multi-attribute evaluation methods into adjustable load operation strategy decision-making for demand response. It constructed a demand response strategy optimization model with the objective function of minimizing user electricity costs and constraints covering power supply and demand balance and unit output limitations. A genetic algorithm was used to determine the various chromosomes of the advantageous population that are conducive to achieving optimization goals. By combining the economic benefits of each chromosome, the consumption of new energy, and the calculation results of user carbon emission intensity, the improved entropy weight method and weight sum method were combined to comprehensively evaluate and rank all chromosomes. As a result, the demand response strategy that ensures the global best economic benefits, consumption of new energy, and carbon reduction effects of the system was obtained, which maximized the value of adjustable load resources. The feasibility and effectiveness of the method were finally verified through examples.

This work is supported by Science and Technology Project of SGCC (No.1300-202157404A-0-0-00).

**Keywords:** adjustable load; carbon flow calculation; demand response; intelligent optimization; multiple values