

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241765

## 考虑动态碳势和需求响应的配电网低碳调度策略

肖勇<sup>1</sup>, 陆煜铨<sup>1</sup>, 尹雁和<sup>2</sup>, 曾国钧<sup>3</sup>, 赵云<sup>1</sup>, 阮志杰<sup>2</sup>, 张勇军<sup>3</sup>

(1. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510663; 2. 广东电网有限责任公司中山供电局, 广东 中山 528400;  
3. 华南理工大学电力学院智慧能源工程技术研究中心, 广东 广州 510640)

**摘要:** 如何有效挖掘需求侧资源的低碳响应潜力, 配合中低压配电网调度以降低系统运行碳排放, 是我国“双碳”目标推进下面临的一个重要问题。为此, 提出一种考虑动态碳势和需求响应的新型配电网低碳调度方法。首先, 考虑上级电网动态碳势和配电网网损对碳排放流的影响, 分别建立用户侧用电碳排放和配电网网损碳排放的核算模型。其次, 建立基于动态碳势的激励型需求响应模型, 根据不同时刻的碳势调节低碳激励价格, 以引导用户调节柔性负荷, 降低电力碳排放。然后, 建立兼顾运行安全性和经济性的配电网低碳调度模型, 通过配电网动态碳势来引导需求响应, 以较小的调用成本达到系统低碳安全运行的效果。最后, 以改进的 IEEE33 节点配电系统为例, 采用所提模型和方法后, 算例中系统的网损、日负荷峰谷差和电力碳排放分别下降了 7.3%、11.7% 和 3.5%。  
**关键词:** 动态碳势; 需求响应; 低碳调度; 新型配电网; 碳流理论

### Low-carbon scheduling strategy for distribution networks considering dynamic carbon potential and demand response

XIAO Yong<sup>1</sup>, LU Yuxin<sup>1</sup>, YIN Yanhe<sup>2</sup>, ZENG Guojun<sup>3</sup>, ZHAO Yun<sup>1</sup>, RUAN Zhijie<sup>2</sup>, ZHANG Yongjun<sup>3</sup>

(1. Electrical Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 2. Zhongshan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhongshan 528400, China; 3. Research Center of Smart Energy Technology, School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Effectively utilizing the low-carbon potential of demand-side resources to coordinate with medium- and low-voltage distribution network scheduling, thereby reducing system carbon emissions, is crucial for China's "dual carbon" strategy. To address this issue, a new low-carbon scheduling method for distribution networks is proposed, considering dynamic carbon potential and demand response. First, the influence of the superior grid's dynamic carbon potential and distribution network losses on carbon emission flow is analyzed, and accounting models for user-side electricity consumption emissions and network loss emissions are established. Second, an incentive-based demand response model based on dynamic carbon potential is developed. By adjusting low-carbon incentive prices according to time-varying carbon potential, users are guided to regulate flexible loads to reduce electricity-related carbon emissions. Then, a low-carbon scheduling model for distribution networks is created. It balances operational safety and economy, while the distribution network's dynamic carbon potential guides the demand response to achieve low-carbon and safe system operation at minimal activation cost. Finally, case studies on a modified IEEE 33-node system demonstrate the effectiveness of the proposed model and method, reducing network losses by 7.3%, daily peak-valley load difference by 11.7%, and carbon emissions by 3.5%.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177085).

**Key words:** dynamic carbon potential; demand response; low-carbon scheduling; new distribution network; carbon emission flow theory

## 0 引言

当前, 低碳电力技术已成为引领能源行业变革

和创新发展的主要驱动力<sup>[1]</sup>。随着新型电力系统建设的推进, 中低压配电网正逐步转变为源网荷储融合互动的新型分布式智能电网<sup>[2-4]</sup>, 这为配电网优化调度带来了新的机遇和挑战<sup>[5]</sup>。一方面, 新能源大量接入会显著影响配电网的电力供需平衡, 迫切需加强需求侧管理<sup>[6]</sup>; 另一方面, 电源侧和上级电

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177085); 南方电网科学研究院基金项目资助(032000KK5222010)

网的碳势变化和用户用电行为对配电网碳排放有着显著影响<sup>[7]</sup>, 从而为配电网低碳运行带来了新的优化空间<sup>[8]</sup>。如何有效挖掘需求侧资源的低碳响应潜力, 协助配电网降低系统运行碳排放, 已成为亟需解决的关键技术问题<sup>[9]</sup>。

现阶段电力能源系统低碳优化调度领域的研究主要围绕直接碳排放控制与间接碳责任分摊<sup>[10]</sup>两条路径展开。鉴于电力行业大部分碳排放来自化石能源的燃烧, 故有不少研究<sup>[11-13]</sup>主要集中在电源侧, 通过机组组合优化调度的手段来降低系统直接碳排放。然而, 纯电源侧优化存在边际减排成本递增的局限, 亟需需求侧资源的协同参与。

基于此, 需求响应机制与多元灵活性资源的协同调度成为拓展碳减排路径的重要方向。文献[14-15]提出了一种结合碳捕集电厂和多能源需求响应的优化调度方案; 文献[16]引入碳交易机制及包括需求响应在内的多种灵活性资源参与主动配电网的经济低碳化调度; 文献[17-18]通过阶梯式碳交易和综合需求响应实现了综合能源系统的低碳运行。然而, 上述研究采用的激励信号未能反映用电动态碳足迹, 难以明确碳排放责任, 限制了需求侧的碳减排潜力。

碳排放流理论为间接碳排放核算提供了新的方法。文献[19-20]初步建立了基于电力潮流追踪的碳流理论体系, 实现了需求侧间接碳排放的精准计量。文献[21]在此基础上提出的分布式算法在提升计算效率的同时保障了数据隐私, 为动态碳势的高效感知扫清了技术障碍。

得益于碳流追踪精度的提升与数据壁垒的突破, 研究者开始探索将动态碳势作为需求侧调控信号的作用。基于碳流理论, 文献[22]提出了一种促进系统碳减排的低碳需求响应机制; 文献[23]计算出负荷侧碳排放责任, 并利用以碳价为信号的需求响应对主网进行低碳调度。文献[24]通过在需求响应中结合对节点碳势的控制, 实现了主网的碳减排。文献[25]利用碳捕集系统和需求侧资源有效减少系统碳排放。然而, 现有研究较多聚焦于输电网层级, 对分布式资源渗透率高的配电网缺乏针对性研究, 其碳排放核算方法与低碳调度策略仍需深入探索。

综上所述, 当前该领域的研究仍存在一些不足, 主要表现在: 1) 传统碳流分析方法采用恒定碳势计算上级电网注入功率所产生的碳排放, 这与主网输送电力中火电所占比例的时序波动性相悖, 且主网中不考虑网损的碳排放计算模型不适用于线路阻抗比无法忽视的配电网; 2) 减少用电和减少电力碳排放并不等同, 传统激励型需求响应仅关注用电

量的增减, 未能通过动态碳势的引导来使用户感知到不同时段下相同用电量所产生的碳排放差异, 不利于释放需求侧的低碳响应潜力。

为此, 本文提出了考虑动态碳势和需求响应的配电网低碳调度方法。首先, 考虑主网碳势时变特性与配电网网损对碳流分析的影响, 建立了配电网的精细化碳排放核算模型。其次, 将激励补偿与动态碳势相关联, 构建了基于动态碳势的激励型需求响应模型, 以激发用户侧灵活资源的低碳响应潜力。最后, 综合考虑配电网的低碳、经济和安全运行, 建立了新型配电网低碳调度模型, 并通过仿真验证了所提方法在降低配电系统碳排放、网损以及日负荷峰谷差上的有效性。

## 1 基于碳流理论的配电网碳排放核算

实现配电网碳排放精准核算是开展低碳调度的前提。碳流理论将碳排放分析与电力系统潮流计算相结合, 给出了碳流分析中的重要概念和指标<sup>[19]</sup>。区别于传统碳流分析方法<sup>[20]</sup>, 本文同时计及配电网网损和上级电网动态碳势的影响, 分别建立用户侧用电碳排放与配电网网损碳排放核算模型, 以明确负荷侧和网侧的碳排放责任。

### 1.1 考虑动态碳势的用户侧用电碳排放核算

在配电网中, 直接电力碳排放的来源为本地火力发电机组, 而间接电力碳排放则来源于上级电网向配电网输送电力中所含有的火电。鉴于电力系统“源随荷动”的特性, 用户侧是电力碳排放的主要责任方<sup>[22]</sup>, 其用电行为显著影响了配电网碳排放。为了将碳流理论应用于配电网中, 附录 A 阐述了配电网碳流分析中的关键指标和计算方法。

在核算上级电网注入功率所产生的碳排放时, 传统的碳流分析方法普遍采用区域电网平均碳排放因子与上级电网输入电量相乘的方式来计算。然而, 主网输送电力中火电所占比例的时序波动会导致联络线输入功率所对应碳排放强度的动态变化。因此, 本文考虑上级电网动态碳势的影响, 使配电网碳流分析更加精确且贴合实际。

将上级电网等效为一个大型火电机组, 其动态发电碳排放强度可由上级电网的碳流分析得出。而本地机组的发电碳排放强度由其正常运行时的碳排放特性决定(通常为已知量)。在已知上级电网注入至配电网连接点电力的动态碳势、配电网负荷和电源的情况下, 通过对配电网进行碳流计算, 可求出各负荷节点的用电碳排放强度, 进而明确用户侧用电碳排放责任。

需要指出的是, 利用碳流理论所得碳势可精细

至节点级, 但为了保障同一时段内不同节点用户碳排放责任一致, 便于需求侧的低碳管理, 本文对配电网各节点碳势进行空间维度上的平均化处理, 以得到统一的动态碳势, 如式(1)所示。

$$k_t = \frac{\sum_{i=1}^N (e_{i,t} \cdot P_{i,t})}{\sum_{i=1}^N P_{i,t}} \quad (1)$$

式中:  $k_t$  为时段  $t$  配电网的碳势;  $N$  为配电网管辖范围内的节点总数;  $e_{i,t}$  为节点  $i$  在时段  $t$  的碳势;  $P_{i,t}$  为节点  $i$  在时段  $t$  流出的有功功率。

## 1.2 配电网网损碳排放核算

电力传输和分配过程中的网损所对应发电环节产生的碳排放即为网损碳排放, 其可用于衡量配电网运行的低碳程度。文献[19]在输电网场景中采用忽略网损的直流潮流模型进行碳流分析, 但配电网的线路阻抗较大, 网损不可忽略, 故本文采用计及网损的交流潮流模型进行碳流分析, 以明确其应承担的碳排放责任。

不同时段下的网损碳流率为

$$R_{\text{loss}} = R_{\text{in}} - R_{\text{out}} = \sum_{k=1}^K R_{Gk} - \sum_{m=1}^M R_{Lm} \quad (2)$$

式中:  $R_{\text{loss}}$  为配电网网损碳流率;  $R_{\text{in}}$  为配电网注入碳流率;  $R_{\text{out}}$  为配电网流出碳流率;  $R_{Gk}$  为接入配电网的第  $k$  台发电机组(含上级电网注入功率所等效的大火电机组)的碳流率;  $R_{Lm}$  为编号为  $m$  的负荷节点碳流率;  $K$  为配电网所有含发电机组的节点个数;  $M$  为配电网所有负荷节点个数。

配电网一天内的网损碳排放  $E_{\text{loss}}$  为

$$E_{\text{loss}} = \sum_{t=1}^T R_{\text{loss},t} \Delta t \quad (3)$$

式中:  $R_{\text{loss},t}$  为时段  $t$  配电网网损碳流率;  $T$  为调度周期,  $\Delta t$  为单位时间间隔, 单位为  $\text{h}$ 。

## 2 基于动态碳势的激励型需求响应

传统的需求响应主要通过电价信号或激励措施引导用户改变其用电行为, 从而改变负荷分布<sup>[22]</sup>。与价格型需求响应相比, 激励型需求响应有如下优点: 1) 在电力供应紧张的情况下, 可迅速调动用户侧柔性负荷资源减少用电, 缓解供需矛盾; 2) 在用户对价格变化不敏感的情况下, 直接的激励措施更能激发用户的参与; 3) 允许电网更精确地控制需求响应活动, 以满足运行的具体需求。因此, 本文采用激励型需求响应来引导用户低碳用电。

本文在传统激励型需求响应的基础上引入基于动态碳势的低碳激励成本, 并根据不同时刻的碳势调节低碳激励价格。碳排放强度高时, 激励成本高,

碳排放强度低时, 激励成本低。期望通过这种激励机制的引导, 使可转移负荷从碳势高时段转移至碳势低时段, 可中断负荷优先在碳势高时段中断用电, 从而减少配电网碳排放。

### 2.1 可转移负荷调用模型

调用可转移负荷, 需要由电网与电力用户事先签订好协议, 由调度中心向用户发出信号, 经用户确认响应后, 主动将碳势高时段的灵活负荷转移至碳势低时段, 按照协议用户会得到一定的补偿<sup>[7]</sup>。

在调度补偿和低碳激励双重驱动下, 可转移负荷能在保持总用电需求不变的前提下, 通过调整用电功率的时间分布配合电网运行, 其调用成本包括调度补偿成本与低碳激励成本, 对应的数学模型为

$$C_t^{\text{TL}} = C_{\text{dis},t}^{\text{TL}} + C_{\text{inc},t}^{\text{TL}} \quad (4)$$

$$\begin{cases} C_{\text{dis},t}^{\text{TL}} = (\lambda^{\text{TL}} - \mu^{\text{TL}}) |P_t^{\text{TL}}| \\ C_{\text{inc},t}^{\text{TL}} = \frac{k_t - k_{\min}}{k_{\max} - k_{\min}} \cdot \mu^{\text{TL}} |P_t^{\text{TL}}| \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T P_t^{\text{TL}} = 0 \\ -P_{\max,t}^{\text{TL}} \leq P_t^{\text{TL}} \leq P_{\max,t}^{\text{TL}} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $C_t^{\text{TL}}$ 、 $C_{\text{dis},t}^{\text{TL}}$ 、 $C_{\text{inc},t}^{\text{TL}}$  分别为时段  $t$  调用可转移负荷的总成本、调度补偿成本与低碳激励成本;  $\lambda^{\text{TL}}$ 、 $\mu^{\text{TL}}$  分别为可转移负荷的单位补偿价格和激励价格;  $k_{\min}$ 、 $k_{\max}$  分别为一天内配电网碳势的最低和最高值;  $P_t^{\text{TL}}$ 、 $P_{\max,t}^{\text{TL}}$  分别为时段  $t$  转移负荷量(转移出取负值, 转入取正值)及最大转移量。

### 2.2 可中断负荷调用模型

对于可中断负荷, 其调用成本也包括调度补偿成本与低碳激励成本两部分, 对应的数学模型为

$$C_t^{\text{IL}} = C_{\text{dis},t}^{\text{IL}} + C_{\text{inc},t}^{\text{IL}} \quad (7)$$

$$\begin{cases} C_{\text{dis},t}^{\text{IL}} = (\lambda^{\text{IL}} - \mu^{\text{IL}}) P_t^{\text{IL}} \\ C_{\text{inc},t}^{\text{IL}} = \frac{k_t - k_{\min}}{k_{\max} - k_{\min}} \cdot \mu^{\text{IL}} P_t^{\text{IL}} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} 0 \leq \sum_{t=1}^T P_t^{\text{IL}} \leq P_{\text{sum}}^{\text{IL}} \\ 0 \leq P_t^{\text{IL}} \leq P_{\max,t}^{\text{IL}} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $C_t^{\text{IL}}$ 、 $C_{\text{dis},t}^{\text{IL}}$  与  $C_{\text{inc},t}^{\text{IL}}$  分别为时段  $t$  调用可中断负荷的总成本、调度补偿成本与低碳激励成本;  $\lambda^{\text{IL}}$ 、 $\mu^{\text{IL}}$  分别为可中断负荷的单位补偿价格和激励价格;  $P_t^{\text{IL}}$ 、 $P_{\max,t}^{\text{IL}}$  分别为时段  $t$  中断负荷量及其最大值;  $P_{\text{sum}}^{\text{IL}}$  为整个调度周期内允许中断的负荷总量。

### 3 新型配电网低碳调度模型及其求解

利用需求侧资源降低电力碳排放时, 若采用恒定碳势, 则无法让用户感知到不同时段下其用电行为所产生的碳排放差异, 导致需求侧碳减排潜力无法得到进一步释放。此外, 采用恒定碳势进行用户侧碳排放核算, 未能揭示电力消费的碳排放强度随时间变化的本质, 这容易引导用户形成“减少用电量即同比减少碳排放”的片面认知, 而忽略了通过优化用电时序(将负荷从高碳势时段转移至低碳势时段)来实现更高效减排的可能性。这种认知偏差可能在制定减排策略时引发以下问题:

1) 用户若过于关注减少用电量而忽视电力生产过程中的碳排放因素, 则会错失通过改变用电计划或电力来源以减少碳排放的良机;

2) 用户若为减少用电量而直接削减电力消费, 将会显著影响日常生活舒适度和工业生产效率;

3) 需求侧管理的目的之一是通过改变用电模式来优化电网负荷和提高能源效率, 如果用户只关注减少用电量, 可能会阻碍其有效实施。

为此, 本文建立了考虑动态碳势和需求响应的配电网低碳调度模型, 以配电网动态碳势为引导信号, 以调度补偿价格和低碳激励价格为激励信号, 利用用户侧柔性负荷资源, 通过需求响应调整配电网负荷分布, 一方面减少配电网整体碳排放量, 另一方面降低配电网负荷峰谷差, 从而以较小的调用成本实现系统低碳安全运行。

#### 3.1 配电网低碳调度流程

本文所提的配电网低碳调度策略实施流程如图1所示, 主要分为以下3个阶段。

1) 计算配网动态碳势: 根据原计划调度数据, 得到配电网未来24h的基准潮流分布, 再结合非清洁能源电站的发电碳排放数据, 计算得到配电网未来24h的动态碳势。

2) 生成低碳调度策略: 根据配电网动态碳势变化情况, 综合考虑低碳、经济、安全三重目标, 制定配电网低碳调度策略。

3) 执行低碳调度方案: 调度中心公布单位补偿价格和激励价格, 发布可调负荷的调用计划; 用户响应调度指令并向调度中心上报响应后负荷。

#### 3.2 目标函数

配电网利用需求侧柔性可调资源进行低碳调度时, 需兼顾运行的安全性和经济性, 不能以牺牲电网安全为代价强制实施低碳调度, 否则可能引发线路过载、电压越限等事故, 影响系统安全。因此, 配电网低碳调度的目标函数应综合考虑运行的安全

性、经济性和低碳性。

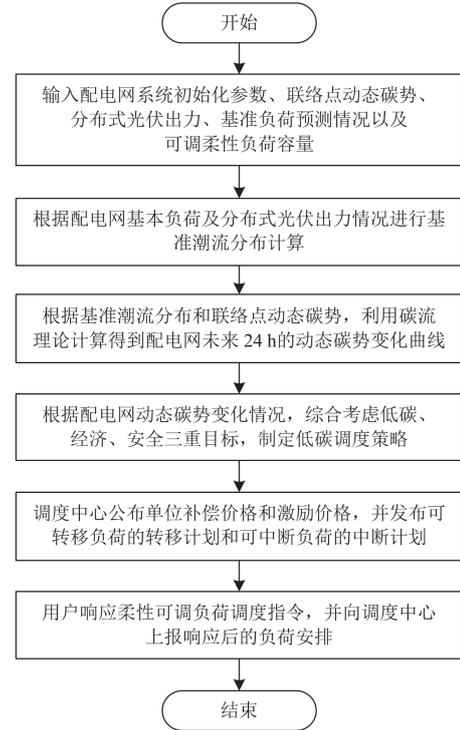


图1 低碳调度策略实施流程图

Fig. 1 Implementation flow of low-carbon scheduling strategy

本文所提配电网低碳调度模型的目标函数由柔性负荷调用总成本  $F_1$ 、配电网电力碳排放总量  $F_2$ 、配电网日负荷均方根差  $F_3$  三部分组成。

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^T (C_t^{\text{TL}} + C_t^{\text{LL}}) \quad (10)$$

$$\min F_2 = E_{\text{loss}} + \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{m=1}^M R_{m,t} \Delta t \right] \quad (11)$$

$$\min F_3 = \sqrt{\sum_{t=1}^T (P_t^{\text{L}} - P_{\text{ave}}^{\text{L}})^2 / T} \quad (12)$$

$$P_t^{\text{L}} = P_{0,t}^{\text{L}} + P_t^{\text{TL}} - P_t^{\text{LL}} \quad (13)$$

式中:  $R_{m,t}$  为编号为  $m$  的负荷节点在时段  $t$  的碳流率;  $P_t^{\text{L}}$ 、 $P_{\text{ave}}^{\text{L}}$  分别为实施低碳调度后时段  $t$  配电网的实际负荷和日平均负荷;  $P_{0,t}^{\text{L}}$  为时段  $t$  实施低碳调度前的基本负荷功率。

#### 3.3 约束条件

配电网低碳调度需满足两类约束: 1) 体现用户侧柔性负荷可调能力的约束; 2) 体现配电网运行安全性的约束。前者包括柔性负荷单位调度时长内的可调量和整个调度周期内的可调总量, 具体见式(6)和式(9)。后者主要包括支路电流、节点电压、线路传输功率、潮流、功率因数等约束。

1) 支路电流约束

$$|I_{s,t}| \leq I_{s,\max} \quad (14)$$

式中:  $|I_{s,t}|$  为时段  $t$  支路  $s$  的电流值;  $I_{s,\max}$  为支路  $s$  的最大电流限值;

2) 节点电压约束

$$V_{i,\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,\max} \quad (15)$$

式中:  $V_{i,t}$  为节点  $i$  在时段  $t$  的电压值;  $V_{i,\min}$ 、 $V_{i,\max}$  分别为节点  $i$  的电压下限、上限值;

3) 线路传输功率约束

$$P_{s,\min} \leq P_{s,t} \leq P_{s,\max} \quad (16)$$

式中:  $P_{s,t}$  为支路  $s$  在时段  $t$  的传输功率;  $P_{s,\min}$ 、 $P_{s,\max}$  分别为支路  $s$  传输功率的最小、最大值。

4) 潮流约束

$$\begin{cases} P_{i,t} = -U_{i,t} \sum_{j=1}^N U_{j,t} (G_{ij} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij} \sin \theta_{ij,t}) \\ Q_{i,t} = -U_{i,t} \sum_{j=1}^N U_{j,t} (G_{ij} \sin \theta_{ij,t} - B_{ij} \cos \theta_{ij,t}) \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $P_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$  分别为节点  $i$  在时段  $t$  流出的有功、无功功率;  $U_{i,t}$ 、 $U_{j,t}$  分别为节点  $i$ 、节点  $j$  在时段  $t$  的电压;  $G_{ij}$  和  $B_{ij}$  分别为配电网节点导纳矩阵第  $i$  行、第  $j$  列元素的实部和虚部;  $\theta_{ij,t} = \theta_{i,t} - \theta_{j,t}$ ,  $\theta_{i,t}$  和  $\theta_{j,t}$  分别为节点  $i$  和  $j$  在时段  $t$  的电压相角。

5) 功率因数约束

$$\cos \left( \arctan \left( \frac{Q_{i,t}}{P_{i,t}} \right) \right) \geq \lambda_{\min} \quad (18)$$

式中:  $\lambda_{\min}$  为配电网各节点的功率因数下限值, 通常取为 0.85。

### 3.4 模型求解

由于本文所提配电网低碳调度模型的 3 个目标不可能同时最优, 故该模型的求解是一个含约束的多目标优化问题<sup>[26]</sup>。

NSGA-II 算法<sup>[27-28]</sup>具有运行速度快、解集收敛性好的优点, 且其应用较为广泛和成熟。本文采用 NSGA-II 算法求解所提模型, 求解流程如图 2 所示。需要指出的是, 在潮流计算时使用最优潮流算法即可满足模型的所有约束条件, 保证配电网安全运行。

模型经求解后可得到一个 Pareto 解集, 该解集中的每一个解都是正确且可行的, 之后可利用客观赋权的 CRITIC 法<sup>[29]</sup>, 根据标准化后优先等级为 1 的 Pareto 解集对 3 个目标进行赋权, 取评分最高的解作为配电网的低碳调度策略。

实际调度中, 配电网运行管理人员也可以根据

系统运行目标, 采用主观的层次分析法对 3 个目标赋予不同权重, 通过对 Pareto 解集中的每个解进行打分, 即可将分数最高的解作为配电网的低碳调度方案, 然后将指令下达至各节点用户执行。

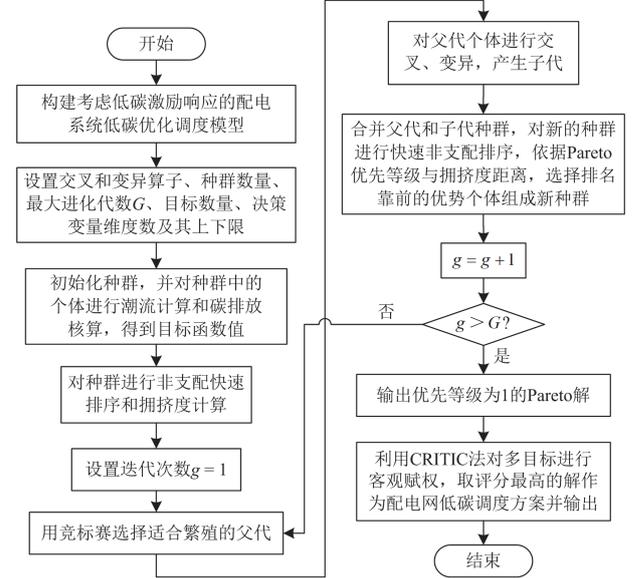


图 2 模型求解流程图

Fig. 2 Model solving flow chart

## 4 算例分析

### 4.1 算例参数设置

为验证所提方法的有效性, 本文采用改进的 IEEE33 节点配电系统进行仿真分析, 其拓扑结构如图 3 所示。系统线路阻抗值等网架结构参数和标准 IEEE33 节点系统一致, 各节点基准电压为 1 p.u., 系统基准电压为 12.66 kV。

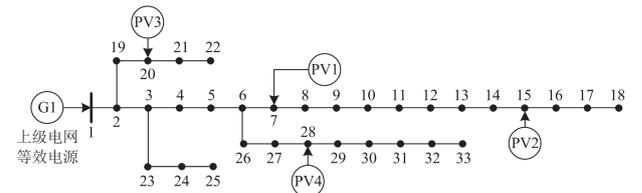


图 3 改进的 IEEE33 节点配电系统

Fig. 3 Improved IEEE33-bus distribution system

主网购电等效为燃煤机组 G1 发电并接入节点 1, 4 台分布式光伏机组 PV1—PV4 分别接入节点 7、15、20、28。

系统中 1 号节点(上级电网连接点)的动态碳势<sup>[30-31]</sup>、配电网总负荷和各机组输出的功率预测曲线如图 4 所示, 其中负荷呈“三峰一谷”型。分时电价采用表 1 所示的峰谷电价。

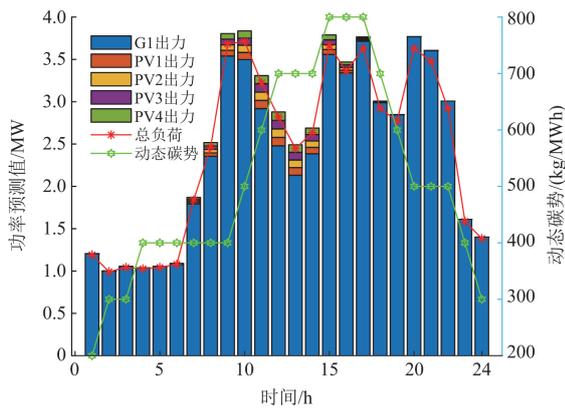


图4 动态碳势和功率预测曲线

Fig. 4 Dynamic carbon potential and power prediction curve

表1 峰谷电价

Table 1 Peak and valley electricity price

名称	对应的离散时段	电价/(元/kWh)
峰时	10:00—12:00、14:00—19:00	1.0370
平时	08:00—10:00、12:00—14:00、19:00—24:00	0.6100
谷时	00:00—08:00	0.2318

节点 2、4、7、8、14、24、25、29、30、31、32 上的可转移负荷和节点 24、25 上的可中断负荷参与激励型需求响应调度, 各时段可转移负荷与可中断负荷的最大值均为基本负荷的 15%, 在一个调度周期内可转移负荷与可中断负荷的用电量均不超过总用电量的 15%,  $\lambda^{TL}$ 、 $\mu^{TL}$ 、 $\lambda^{IL}$ 、 $\mu^{IL}$  分别取 0.6、0.4、0.7、0.4 元/kWh。

调度周期为  $T = 24$  h, 单位时间间隔  $\Delta t$  为 1 h。应用 NSGA-II 算法求解时, 种群数量取 250, 最大进化次数取 250, 目标数为 3, 决策变量为调度周期内各时段可转移与可中断负荷量, 合并后共有  $13 \times 24$  维, 交叉、变异分布指数均取为 20。

为验证本文所提配电网低碳调度方法的有效性, 本节设置了以下 3 种场景进行对比分析。

场景 1: 不考虑动态碳势和激励型需求响应, 配电网按日前计划运行;

场景 2: 不考虑动态碳势, 只考虑传统激励型需求响应, 即配电网采用传统调度方法;

场景 3: 同时考虑动态碳势和本文所提的激励型需求响应, 即采用本文所提配电网低碳调度方法。

#### 4.2 日运行结果分析

3 种场景下配电网日运行结果的对比如表 2 所示。由表 2 可知, 场景 3 的网损碳排放、用户侧碳排放和整体碳排放总量均为最低, 其中整体碳排放总量比场景 1 低 1127.53 kg、比场景 2 低 237.75 kg, 这表明本文所提配电网低碳调度方法能有效实现电

能在用电环节的低碳利用。

表2 配电网日运行结果对比

Table 2 Comparison of distribution network daily operation results

指标	场景 1	场景 2	场景 3
向主网购电成本/元	17 212.23	16 925.89	16 829.12
因网损造成的电费损失/元	1185.23	1087.69	1075.81
网损电量/MWh	1.56	1.46	1.45
日负荷峰谷差/kW	2722.08	2408.68	2404.54
日负荷均方根差/kW	1008.17	888.5	883.8
可转移负荷调度补偿/元	0	1424.57	488.32
可转移负荷低碳激励/元	0	0	476.15
可中断负荷调度补偿/元	0	521.38	268.53
可中断负荷低碳激励/元	0	0	255.6
调用总成本/元	0	1945.95	1488.6
网损碳排放量/kg	907.39	837.95	828.69
用户侧碳排放量/kg	31 237.99	30 417.64	30 189.16
整体碳排放总量/kg	32 145.38	31 255.6	31 017.85

与场景 1 对比可知, 场景 3 和场景 2 均通过激励型需求响应有效降低了配电网日负荷峰谷差和均方根差, 同时减少了网损, 并满足了配电网安全运行的要求。

比较场景 3 和场景 2 可知, 场景 3 通过基于动态碳势的激励型需求响应, 以比场景 2 更小的调用总成本实现了比场景 2 更低的电力碳排放、略优的削峰填谷效果、更少的购电成本和电费损失, 这表明本文所提方法能以更小的经济代价实现配电网的低碳安全运行, 兼顾了低碳性、安全性和经济性, 具有实际应用价值。

不同场景下配电网的负荷曲线和整体电力碳排放的对比分别如图 5 和图 6 所示。分析图 5 和图 6 可知, 与其他场景相比, 场景 3 在配电网碳势较高时段(第 15~17 h)内的削峰程度最显著, 致使其在

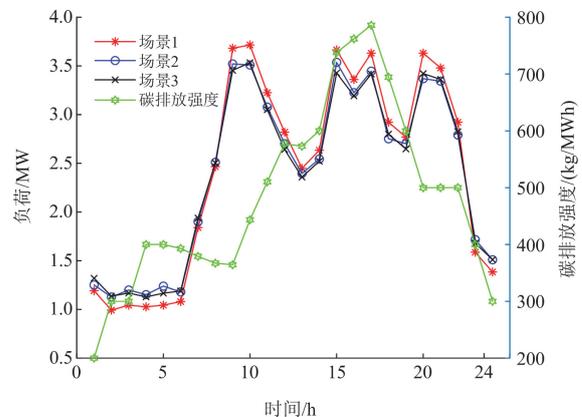


图5 不同场景下的负荷曲线对比

Fig. 5 Comparison of load curves in different scenarios

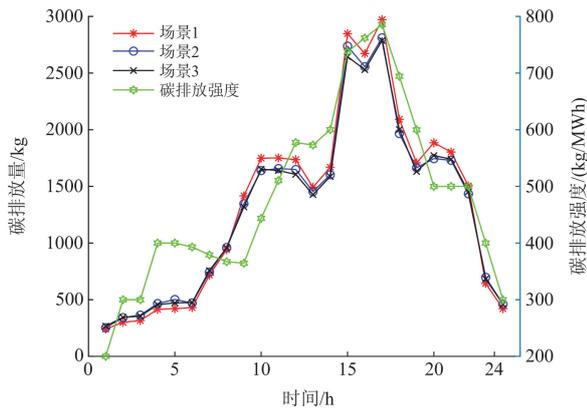


图 6 不同场景下的电力碳排放量

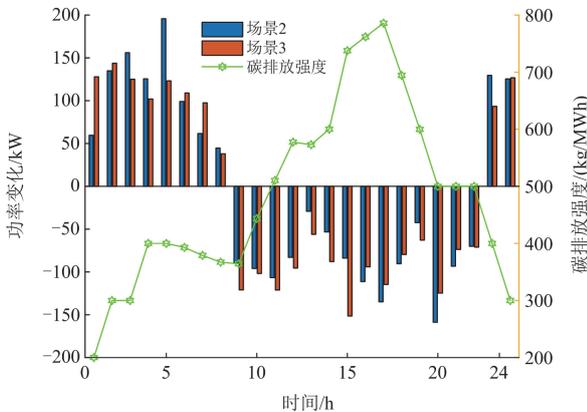
Fig. 6 Carbon emissions from electricity in different scenarios

这段时间内的电力碳排放量最低。这表明本文所提降低碳调度方法更能引导可调柔性负荷减少在碳势较高时段的用电量, 实现更优的碳减排效果。

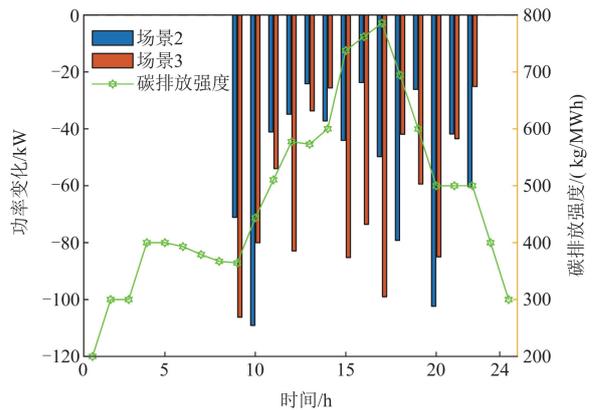
此外, 对比图 5 和图 6 曲线变化趋势可知, 减少用电与减少电力碳排放并不等同。第 9~11 h 和第 20~21 h 是配电网负荷的两个高峰期, 尽管配电网在这期间向上级电网大量购电, 但由于主网动态碳势的影响, 两个高峰期的碳势较低, 最终使得配电网在第 9~11 h 或第 20~21 h 的电力碳排放低于第 15~17 h, 这一现象表明, 利用动态碳势可使用户感知到不同时段下其用电行为所产生的碳排放差异, 进一步释放需求侧碳减排潜力。

为验证基于动态碳势的激励型需求响应的有效性, 下面将不同场景下可转移和可中断负荷的调度结果进行对比, 如图 7 所示。

由图 7(a)可知, 在高于日平均碳势的第 12~19 h 内, 场景 3 的负荷转移量之和大于场景 2, 这表明场景 3 在低碳激励价格的引导下, 将会有更多可转移负荷从碳势高时段转移至碳势低时段, 从而实现电能的低碳利用。



(a) 可转移负荷调度结果



(b) 可中断负荷调度结果

图 7 不同场景下的可调负荷调度结果

Fig. 7 Adjustable load scheduling results in different scenarios

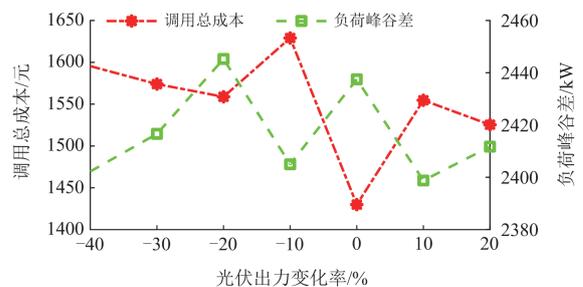
由图 7(b)可知, 在高于日平均碳势的第 12~19 h 内, 场景 3 的负荷削减量之和明显大于场景 2, 这表明在低碳激励价格的引导下, 可中断负荷优先在碳势高时段中断用电, 从而减少配电网碳排放。

### 4.3 光伏出力不确定性对低碳调度结果的影响分析

由于光伏出力不确定性较强, 在制定配电网低碳调度策略时, 应对其进行考虑。通过设定不同的光伏出力变化率, 观察其对调用总成本、负荷峰谷差和碳排放总量的影响。为不失一般性, 选取 4 种典型光伏出力曲线(如附录 B 图 B1 所示)来分析光伏出力不确定性对低碳调度结果的影响。

光伏出力不确定性对配电网调用总成本、负荷峰谷差和碳排放总量的影响如图 8 所示(结果均为 10 次运算平均值)。由图 8(a)可知, 调用总成本和负荷峰谷差具有较强的负相关性, 即调用总成本的增大往往能够使负荷峰谷差降低, 这符合激励型需求响应的客观规律。由图 8(b)可知, 随着光伏出力变化率的增大, 经低碳调度后配电网的碳排放总量呈下降趋势。

随着光伏出力变化率从-40%逐渐增加到 20%, 调用总成本、负荷峰谷差和碳排放总量相对初始场景的最大变化率分别为 13.93%、1.59%和 7.54%,



(a) 光伏出力对调用总成本和负荷峰谷差的影响

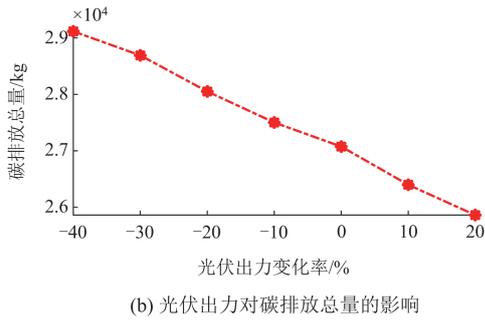


图8 光伏出力不确定性灵敏度分析

Fig. 8 Uncertainty sensitivity analysis of photovoltaic output

这表明3个目标中,调用总成本对光伏出力的变化最为敏感。总的来说,本文所提配电网低碳调度策略能够较好地适应光伏出力不确定性带来的影响,在不同光伏出力条件下均能有效降低配电系统的网损、负荷峰谷差和电力碳排放。

## 5 结论

为充分挖掘需求侧柔性负荷的低碳响应潜力,本文提出了一种考虑动态碳势和需求响应的配电网低碳调度模型与方法。

1) 相较于传统碳流分析模型,所提配电网碳排放核算模型能更精准地反映配电网实际碳排放特征,为低碳调度提供更贴合的核算工具。

2) 相较于传统激励型需求响应,基于动态碳势的激励型需求响应机制在引导用户低碳用电和减少调用成本方面更有优势。

3) 所构建的低碳调度模型能兼顾配电网低碳、经济与安全运行,算例结果显示,优化后系统的网损、日负荷峰谷差和碳排放量分别下降了7.3%、11.7%和3.5%,验证了该方法在降低碳排放、平抑负荷波动及提升运行经济性方面的有效性,有助于需求侧资源在配电网低碳转型中的应用。

未来将进一步研究柔性负荷响应不确定性、储能和碳减排机制设计对配电网低碳运行的影响。

### 附录 A

配电网的支路碳流率可视为单位时间内配电网为维持有功潮流而在火电厂产生的碳排放量,包括直接和间接电力碳排放,可表示为

$$R = \frac{dF}{dt} \quad (A1)$$

式中:  $R$  为支路碳流率,单位为  $\text{kg/h}$ ;  $F$  为一定时间内随有功潮流经过某条支路的碳流所对应的碳排放累积量。

配电网的支路碳流密度  $\rho$  可理解成支路为传输单位电量所对应发电侧产生的碳排放量,即一段时间内的碳流量与通过该支路电量的比值,可表示为

$$\rho = \frac{\int R dt}{\int P dt} = \frac{F}{W} \quad (A2)$$

式中:  $W$  和  $P$  分别为有功电量和有功功率。 $\rho$  的单位为  $\text{kg/MWh}$ 。

配电网的节点碳势,即节点碳排放强度,用于表征在节点处每消费单位电量时,配电网因从上级电网购电形成的碳排放与本地火电厂发电所产生的碳排放之和。当该节点为负荷节点时,其等于该节点用户的用电碳排放强度,可由式(A3)计算得到。

$$e_{Ni} = \frac{\sum_{s \in I^+} p_{Bs} \rho_s + p_{Gi} e_{Gi}}{\sum_{s \in I^+} p_{Bs} + p_{Gi}} \quad (A3)$$

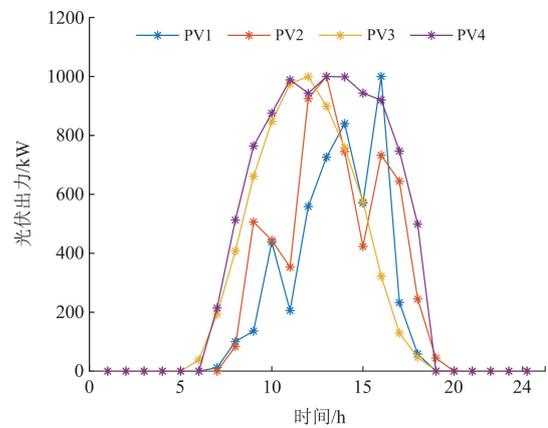
式中:  $e_{Ni}$  为节点  $i$  的碳势,单位为  $\text{kg/MWh}$ ;  $I^+$  表示有功潮流流入节点  $i$  的支路集合;  $p_{Bs}$  为支路  $s$  的有功功率;  $p_{Gi}$ 、 $e_{Gi}$  分别为节点  $i$  处的机组发电功率和碳排放强度;  $\rho_s$  为支路  $s$  的碳流密度,根据碳排放流的性质,其可由支路始端节点的碳排放强度代替。

节点碳势矩阵  $E_N$  计算公式的详细推导见文献[20],可表示为

$$E_N = (P_N - P_B^T)^{-1} P_G^T E_G \quad (A4)$$

式中:  $P_N$  为节点有功通量矩阵;  $P_B$  为支路潮流分布矩阵;  $P_G$  为机组注入分布矩阵;  $E_G$  为机组碳排放强度向量。

### 附录 B



图B1 典型光伏出力曲线

Fig. B1 Typical photovoltaic power output curve

## 参考文献

- [1] 侯金鸣, 孙蔚, 肖晋宇, 等. 电力系统关键技术进步与低碳转型的协同优化[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(13): 1-9.  
HOU Jinming, SUN Wei, XIAO Jinyu, et al. Collaborative optimization of key technology progress and low-carbon transition of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 1-9.
- [2] 杨晓辉, 邓福伟, 张钟炼, 等. 基于自适应  $\varepsilon$  约束法考虑 OLTC 模糊控制的低碳配电网双层规划[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 1-11.  
YANG Xiaohui, DENG Fuwei, ZHANG Zhonglian, et al. Bi-level planning for low-carbon distribution networks based on an adaptive  $\varepsilon$ -constraint method considering OLTC fuzzy control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 1-11.
- [3] 罗龙波, 陈明辉, 王雯沁, 等. 考虑分级重构的配电网安全低碳两阶段运行优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 36-45.  
LUO Longbo, CHEN Minghui, WANG Wenqin, et al. A two-stage secure and low-carbon operation optimization for a distribution network considering multi-level reconfiguration[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 36-45.
- [4] 张勇军, 成润婷, 史训涛, 等. 市场环境下分布式智能电网关键技术与机制研究综述[J/OL]. 电力自动化设备: 1-14[2025-06-15]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202502012>  
ZHANG Yongjun, CHENG Runting, SHI Xuntao, et al. Review of research on key technologies and mechanisms for distributed smart grid in market environment[J/OL]. Electric Power Automation Equipment: 1-14[2025-06-15]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202502012>
- [5] 董旭柱, 华祝虎, 尚磊, 等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3021-3035.  
DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035.
- [6] 霍现旭, 陈天恒, 魏立勇, 等. 基于低碳经济优化调度的电-碳联合需求响应改进策略研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(5): 99-104, 113.  
HUO Xianxu, CHEN Tianheng, WEI Liyong, et al. Improved strategy for electricity-carbon joint demand response based on optimal dispatching of low-carbon economy[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36(5): 99-104, 113.
- [7] 葛津铭, 刘志文, 王朝斌, 等. 考虑需求响应的高比例光伏配电网低碳调度[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 1929-1937.  
GE Jinming, LIU Zhiwen, WANG Chaobin, et al. Low-carbon dispatch of high proportion photovoltaic distribution network considering demand response[J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 1929-1937.
- [8] 唐巍, 张起铭, 张璐, 等. 新型配电系统多层次交直流互联理念、关键技术与发展方向[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 2-17.  
TANG Wei, ZHANG Qiming, ZHANG Lu, et al. Concept, key technologies and development direction of multilevel AC/DC interconnection in new distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 2-17.
- [9] 王兴东, 马磊, 杨金成, 等. 计及需求侧资源可调潜力的互动关键技术发展综述及展望[J]. 供用电, 2023, 40(3): 71-78.  
WANG Xingdong, MA Lei, YANG Jincheng, et al. Development summary and prospect of interactive key technologies taking into account the interactive potential of demand side resources[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(3): 71-78.
- [10] 刘天蔚, 边晓燕, 吴珊, 等. 电力系统碳排放核算综述与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 176-187.  
LIU Tianwei, BIAN Xiaoyan, WU Shan, et al. Overview and prospect of carbon emission accounting in electric power systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 176-187.
- [11] QIN Minglei, YANG Yongbiao, ZHAO Xianqiu, et al. Low-carbon economic multi-objective dispatch of integrated energy system considering the price fluctuation of natural gas and carbon emission accounting[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(4): 1-18.
- [12] ZHANG L, LIU D, CAI G, et al. An optimal dispatch model for virtual power plant that incorporates carbon trading and green certificate trading[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 144.
- [13] 袁桂丽, 刘骅骐, 禹建芳, 等. 含碳捕集热电机组的虚拟电厂热电联合优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4440-4449.  
YUAN Guili, LIU Huaqi, YU Jianfang, et al. Combined heat and power optimal dispatching in virtual power plant with carbon capture cogeneration unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4440-4449.
- [14] YANG D, XU Y, LIU X, et al. Economic-emission dispatch problem in integrated electricity and heat system considering multi-energy demand response and carbon capture technologies[J]. Energy, 2022, 253.
- [15] 崔杨, 谷春池, 付小标, 等. 考虑广义电热需求响应的含碳捕集电厂综合能源系统低碳经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(23): 8431-8446.  
CUI Yang, GU Chunchi, FU Xiaobiao, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system with carbon capture power plants considering generalized electric heating demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23): 8431-8446.

- [16] 高瑞阳, 王新宝, 高娴, 等. 考虑灵活性资源和多能共享的低碳区域综合能源系统联盟-配电网博弈优化调度[J]. 南方电网技术, 2024, 18(2): 77-88.  
GAO Ruiyang, WANG Xinbao, GAO Xian, et al. Optimal dispatching of low-carbon regional integrated energy system alliance and distribution network game considering flexible resources and multi energy sharing[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(2): 77-88.
- [17] YAN Y, LIU M, LI S, et al. Distributed low-carbon operational optimization model of an integrated energy system based on ladder carbon trading and integrated demand response[J]. International Journal of Green Energy, 2024, 21(6): 1324-1344.
- [18] ZHU G, GAO Y, SUN H. Optimization scheduling of a wind-photovoltaic-gas-electric vehicles community-integrated energy system considering uncertainty and carbon emissions reduction[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2023, 33.
- [19] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流分析理论初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 38-43, 85.  
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qianyao, et al. Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 38-43, 85.
- [20] KANG C, ZHOU T, CHEN Q, et al. Carbon emission flow from generation to demand: a network-based model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2386-2394.
- [21] WU Xingping, YANG Wei, ZHANG Ning, et al. A distributed computing algorithm for electricity carbon emission flow and carbon emission intensity[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(2): 138-146.
- [22] 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.
- [23] 陈厚合, 茅文玲, 张儒峰, 等. 基于碳排放流理论的电力系统源-荷协调低碳优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 1-11.  
CHEN Houhe, MAO Wenling, ZHANG Rufeng, et al. Low-carbon optimal scheduling of a power system source-load considering coordination based on carbon emission flow theory[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 1-11.
- [24] WANG Yunqi, QIU Jing, TAO Yuechuan. Optimal power scheduling using data-driven carbon emission flow modelling for carbon intensity control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 37(4): 2894-2905.
- [25] LI J, HE X, LI W, et al. Low-carbon optimal learning scheduling of the power system based on carbon capture system and carbon emission flow theory[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 218.
- [26] 冯浩洋, 陈明丽, 潘峰, 等. 基于改进强度 Pareto 进化算法的居民用户侧源储荷协调优化[J]. 南方电网技术, 2022, 16(4): 86-94.  
FENG Haoyang, CHEN Mingli, PAN Feng, et al. Coordinated optimization of source-storage-load for residents based on improved strength pareto evolutionary algorithm[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(4): 86-94.
- [27] XU Xu, HE Chenguang, SU Chenya, et al. Research on system resource optimization of distribution network producer-consumer system considering resilience and economy[J]. IEEE Access, 2023, 11: 63947-63957.
- [28] 冯喜春, 韩璟琳, 赵辉, 等. 主从博弈框架下配电网规划运行多目标协同优化方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(1): 26-34.  
FENG Xichun, HAN Jinglin, ZHAO Hui, et al. Multi-objective cooperative optimization method of distribution network planning and operation under the Stackelberg game framework[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(1): 26-34.
- [29] XU Chuanbo, KE Yiming, LI Yanbin, et al. Data-driven configuration optimization of an off-grid wind/PV/hydrogen system based on modified NSGA-II and CRITIC-OPSIS[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 215.
- [30] 周天睿, 康重庆. 基于碳排放流的配电系统低碳优化运行方法研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(3): 241-247.  
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing. Research on low-carbon oriented optimal operation of distribution networks based on carbon emission flow theory[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(3): 241-247.
- [31] 钱俊杰, 徐懂理, 袁乐, 等. 计及全过程碳足迹和灵活输出模型的综合能源系统低碳经济运行[J]. 广东电力, 2023, 36(10): 19-29.  
QIAN Junjie, XU Dongli, YUAN Le, et al. Low-carbon economic operation model of integrated energy system considering the whole process carbon footprint and flexible output models[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(10): 19-29.

收稿日期: 2024-12-30; 修回日期: 2025-06-24

作者简介:

肖勇(1978—), 男, 高级工程师(教授级), 博士, 研究方向为电力需求响应; E-mail: xiaoyong@csg.cn

曾国钧(2000—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为市场机制下智能配用电系统优化运行与低碳需求响应。E-mail: 869195703@qq.com

(编辑 周金梅)