

考虑双重低碳需求响应的电力系统优化调度

魏业文^{1,2}, 顾佳¹, 刘霁欧¹

(1.三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2.三峡大学 新能源微电网湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 针对目前电力系统低碳调度中负荷侧降碳手段单一,且源-荷-储侧降碳方法协同性差的问题,文章提出了一种基于碳势指标的源-荷-储多维降碳耦合策略,建立了计及低碳经济目标的电力系统双层优化调度模型。首先,基于电力系统碳排放流理论建立负荷和储能的碳排放流追溯模型;其次,在负荷侧建立融合碳排放流理论的“价格-激励”双重低碳需求响应模型;在储能侧建立基于节点碳势的低碳调度模型;然后,构建具有分时电价与节点碳势特征的电力系统双层优化调度模型,上、下层模型分别以最优经济、最优低碳作为调度目标;最后,采用改进 IEEE14 节点系统完成算例分析。仿真结果表明,该调度策略能够深入挖掘系统的降碳潜力,有效增强系统的减碳能力,提高系统的经济效益。

关键词: 低碳调度; 碳势指标; 低碳需求响应; 碳排放流

中图分类号: TK81; TK51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2025)03-0370-10

0 引言

随着“双碳”目标的提出,高效利用低碳清洁能源和发展低碳电力成为热点^[1]。充分利用电力系统源-荷-储的协同调度,并发挥市场机制的作用^[2]以促进节能减排,对于实现电力系统低碳经济运行具有重要意义。

目前,电力系统低碳经济调度的研究重点分为源荷协同低碳运行、荷储灵活性资源低碳调度等方面。在源荷协同低碳运行方面,电源侧通过计及碳排放成本的机组组合优化,能够实现电能的低碳生产^[3,4]。负荷侧通过响应价格或激励机制改变用户用能行为,也能够加快电力系统的降碳进程。碳排放流理论能够完成负荷侧的用电碳排放溯源,实现荷侧碳排放责任的公平分摊^[5]。文献[6]提出了低碳需求响应机制,将动态碳排放因子作为引导信号,引导用户自觉调整用电行为,消费低碳能源,实现系统低碳运行目标。文献[7]利用基于 Shapley 值的碳责任分摊方法规定负荷的碳排放责任,同时建立基于负荷碳排放量的价格型需求响应模型,合理平衡系统的经济性与低碳性。上述文献对价格型需求响应进行了相应的低碳改进,但少有将动态碳排放因子作为信号,引导用户进行价格型低碳需求响应,忽略了用户主动减排的

需求,节能减排空间有待优化。文献[8,9]均基于碳排放流理论对系统进行碳势计算分析,并以节点碳势为激励信号引导用户进行响应,合理优化调整用户自身用能行为。上述文献多以节点碳势为激励信号,但所用激励方式比较单一,鲜有在激励型需求响应中引入碳奖罚机制。同时缺乏与价格型低碳需求响应的联合作用,通过制定双重低碳需求响应模型参与电力系统低碳调度,可以实现以用户驱动的电力系统深度碳减排。

在荷、储灵活性资源低碳调度方面,碳排放流理论通过调度负荷侧资源进行需求响应,可在一定程度上实现系统的削峰填谷,增加可再生能源的消纳量,减少系统的碳排放量。然而,仅依赖负荷侧响应调节电力系统整体节点碳势偏高或偏低的情况效果并不理想,并且需求响应调节能效还会受到负荷峰谷变化的限制。文献[10]提出了考虑需求响应与储能的配电系统低碳调度策略,储能系统的充放电调度可以促进新能源消纳进而降低系统碳排放量。文献[11,12]构建了储能系统的扩展碳排放流模型,将储能能量维度的时移作用映射到碳排放维度,提出了基于储能系统的综合能源低碳调度策略。因此,储能系统作为柔性灵活可调度资源,能够依据碳势灵活调整充放电策略,

收稿日期: 2024-06-27。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(52377191)。

作者简介: 魏业文(1987-),男,博士,讲师,研究方向为新能源并网与消纳。E-mail: gu18371750885@163.com

消纳低碳能源,承担更多的碳排放责任;同时可以协助负荷侧进行低碳调度,缓解荷侧调节压力,有效降低系统碳排放量。

本文提出了基于双重低碳需求响应和储能低碳调度的电力系统源-荷-储协同低碳调度策略。首先,基于碳排放流理论构建负荷、储能碳排放流计算模型;其次,在考虑需求响应负荷和储能系统两种可调节资源的基础上,构建电力系统经济低碳双层优化调度模型,上层为以动态碳排放因子为引导信号的价格型需求响应的经济调度,下层为以节点碳势为信号的激励型需求响应,同时储能系统配合需求响应进行荷储协同低碳调度;最后,模型上、下层通过电价、碳势与负荷需求的综合耦合,实现源-荷-储多维降碳的协同策略。

1 电力系统碳排放流模型

1.1 基本概念和计算方法

电力系统碳排放流是一种依附于电力潮流的虚拟网络流,用来表示电力系统中任何支路的碳排放。将碳排放责任从源侧转移并归算至负荷侧,公平合理地对负荷节点碳排放责任进行分摊^[13]。

1.2 荷-储碳排放模型

1.2.1 负荷碳排放流模型

利用碳排放流追踪方法,可将发电侧的碳排放责任合理分摊至负荷侧,量化负荷侧用能所产生的间接碳排放量。根据系统节点碳势大小及节点负荷情况计算得出负荷节点对应的碳排放量。

$$e_i = \frac{\sum_{s \in N^*} P_s \rho_s + \sum_{g \in M^*} P_g e_g}{\sum_{s \in N^*} P_s + \sum_{g \in M^*} P_g} \quad (1)$$

式中: e_i 为节点 i 碳势; ρ_s 为支路碳排放流密度; P_s 为有功潮流; P_g 为节点 i 所连电源的有功; e_g 为电源的发电碳强度。

负荷节点碳排放量 D_i^L 为

$$D_i^L = \sum_{t=1}^T P_{i,t} e_{i,t} \Delta t \quad (2)$$

式中: T 为调度时段; $P_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的负荷量; $e_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的碳势。

1.2.2 储能系统碳排放流模型

储能系统充电、放电过程均对应相应的碳排放责任。其具体碳排放流模型如下。

① 储能系统充电模式碳排放流模型

储能充电碳势等于其所在节点的节点碳势,

其碳排放流模型 e_{cha} 为

$$e_{\text{cha}} = e_i \quad (3)$$

② 储能系统放电模式碳排放流模型

储能系统放电时碳势等于充电过程存储的碳排放流量与电量的比值,假设系统在 t 时刻放电,其碳排放流模型 e_{dis} 为

$$e_{\text{dis}} = \frac{F_{\text{es}}(t_N)}{E_{\text{es}}(t_N)} \quad (4)$$

式中: $F_{\text{es}}(t_N)$ 为 t_N 时刻的剩余碳排放流量; $E_{\text{es}}(t_N)$ 为 t_N 时刻的剩余电能量。

D_e^{ES} 为储能系统流入接入节点 i 的碳排放流量,即碳排放责任。

$$D_e^{\text{ES}} = \sum_{t=0}^{T_{\text{cha}}} e_{\text{cha},t} P_{\text{ES},e,t}^{\text{cha}} \Delta t - \sum_{t=0}^{T_{\text{dis}}} e_{\text{dis},t} P_{\text{ES},e,t}^{\text{dis}} \Delta t \quad (5)$$

式中: T_{cha} 为截止核算时刻储能系统累积的充电时长; T_{dis} 为核算截止时刻储能系统累计向接入节点的放电时长; $e_{\text{cha},t}$ 、 $e_{\text{dis},t}$ 分别为 t 时刻储能设备充电、放电碳势; $P_{\text{ES},e,t}^{\text{cha}}$ 为 t 时刻储能系统 e 的充电功率; $P_{\text{ES},e,t}^{\text{dis}}$ 为 t 时刻储能设备 e 注入接入节点的放电功率。

2 电力系统低碳机理分析

2.1 双重低碳需求响应模型

2.1.1 基于动态碳排放因子的价格型低碳需求响应

本文将分时电价附加碳导向,利用动态碳排放因子来区分电价的峰谷时段,划分为高碳、中碳和低碳用电时段,在高碳排放时段提升电价,在低碳排放时段降低电价,中碳排放时段保持电价稳定。通过具有碳导向特征的电价引导用户在低碳排放时段增加用电,高碳排放时段减少用电,从而促进用户能源消费行为转变,实现以用户为驱动的电力系统碳减排目标。

采用模糊隶属度函数^[15]分析基于动态碳排放因子^[6]的碳排时段,模型如下。

$$\begin{cases} \mu_1(\varepsilon_t^j) = \frac{\varepsilon_t^j - \varepsilon^{\min}}{\varepsilon^{\max} - \varepsilon^{\min}} \\ \mu_2(\varepsilon_t^j) = \frac{\varepsilon^{\max} - \varepsilon_t^j}{\varepsilon^{\max} - \varepsilon^{\min}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: ε^{\min} 、 ε^{\max} 分别为动态碳排放因子的最小值、最大值。

动态碳排放因子曲线上最大值点的峰、谷隶属度分别为 1,0,最小值点分别为 0,1,设隶属度阈值为 $\lambda_1, \lambda_2 \in (0,1)$ 。将 $\mu_1(\varepsilon_t^j) > \lambda_1$ 的时段划分为高碳时段,将 $\mu_2(\varepsilon_t^j) < \lambda_2$ 的时段划分为低碳时段,其余划分为中碳时段。

选取电价弹性矩阵方法对需求响应进行建模,其数学模型^[6]为

$$m = \frac{\Delta L_e / L_e}{\Delta c_p / c_p} \quad (7)$$

式中: m 为电量电价弹性指标; $L_e, \Delta L_e$ 分别为电量及其变化量; $c_p, \Delta c_p$ 分别为电价及其变化量。

2.1.2 基于节点碳势的激励型低碳需求响应

本文利用节点碳势作为激励信号并引入碳奖励机制。用户依据碳势情况进行用能行为调整,本文考虑的可调度负荷包括可转移负荷与可削减负荷。基于所提的碳奖励激励机制,可转移负荷将会由碳势较高时段的节点转移至碳势较低时段的节点,可削减负荷将会在节点碳势较高时段进行削减,实现时空两个维度上的低碳调度,进而达到消纳风光,降低系统碳排的目的。

建立可转移负荷模型为

$$\begin{cases} C_{\text{shif},t} = C_{\text{shif},t}^{\text{dis}} + C_{\text{shif},t}^{\text{re}} \\ C_{\text{shif},t}^{\text{dis}} = K_{\text{shif}}^{\text{dis}} (P_{\text{shif},t}^{\text{tra,in}} + P_{\text{shif},t}^{\text{tra,out}}) \\ K_{\text{shif},1}^{\text{re}} (P_{\text{shif},t}^{\text{tra,in}} - P_{\text{shif},t}^{\text{tra,out}}), \\ e_{\min} \leq e_{i,t} \leq \frac{1}{2}(e_{\min} + e_{\text{ave}}) \\ K_{\text{shif},2}^{\text{re}} (P_{\text{shif},t}^{\text{tra,in}} - P_{\text{shif},t}^{\text{tra,out}}), \\ \frac{1}{2}(e_{\min} + e_{\text{ave}}) \leq e_{i,t} \leq \frac{1}{2}(e_{\max} + e_{\text{ave}}) \\ K_{\text{shif},3}^{\text{re}} (P_{\text{shif},t}^{\text{tra,in}} - P_{\text{shif},t}^{\text{tra,out}}), \\ \frac{1}{2}(e_{\max} + e_{\text{ave}}) \leq e_{i,t} \leq e_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $C_{\text{shif},t}$ 为可转移负荷的总调度成本; $C_{\text{shif},t}^{\text{dis}}$ 为基础调度成本; $C_{\text{shif},t}^{\text{re}}$ 为激励型低碳需求响应碳奖励成本; $K_{\text{shif}}^{\text{dis}}$ 为可转移负荷的单位调度成本; $K_{\text{shif},1}^{\text{re}}, K_{\text{shif},2}^{\text{re}}, K_{\text{shif},3}^{\text{re}}$ 分别为处于不同节点碳势情况下,可转移负荷的单位碳奖励成本; $P_{\text{shif},t}^{\text{tra,in}}, P_{\text{shif},t}^{\text{tra,out}}$ 分别为 t 时刻可转移负荷转入、转出负荷量;

e_{\max}, e_{ave} 分别为 t 时刻负荷节点碳势的最小值、最大值与平均值。

建立可削减负荷模型为

$$\begin{cases} C_{\text{cut},t} = C_{\text{cut},t}^{\text{dis}} + C_{\text{cut},t}^{\text{re}} \\ C_{\text{cut},t}^{\text{dis}} = K_{\text{cut}}^{\text{dis}} P_{\text{cut},t} \\ K_{\text{cut},1}^{\text{re}} P_{\text{cut},t}, e_{\min} \leq e_{i,t} \leq \frac{1}{2}(e_{\min} + e_{\text{ave}}) \\ C_{\text{cut},t}^{\text{re}} = K_{\text{cut},2}^{\text{re}} P_{\text{cut},t}, \frac{1}{2}(e_{\min} + e_{\text{ave}}) \leq e_{i,t} \leq \frac{1}{2}(e_{\max} + e_{\text{ave}}) \\ K_{\text{cut},3}^{\text{re}} P_{\text{cut},t}, \frac{1}{2}(e_{\max} + e_{\text{ave}}) \leq e_{i,t} \leq e_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $C_{\text{cut},t}$ 为可削减负荷的总调度成本; $C_{\text{cut},t}^{\text{dis}}$ 为基础调度成本; $C_{\text{cut},t}^{\text{re}}$ 为激励型低碳需求响应碳奖励成本; $P_{\text{cut},t}$ 为 t 时刻可削减负荷量。

2.2 基于节点碳势的阶梯型碳交易模型

本文建立基于节点碳势的阶梯碳排放交易模型,用于提高用户参与电力系统节能降碳的主动性。系统负荷参与碳排放交易市场,实现碳排放权的有效交易,其实际碳排放权交易额 D^{r} 为

$$D^{\text{r}} = D^{\text{ac}} - D^{\text{a}} \quad (12)$$

式中: D^{ac} 为系统负荷在调度期间内的实际碳排放量; D^{a} 为系统负荷在碳交易市场获得的初始碳排放配额,具体模型见文献[17]。

$$D^{\text{ac}} = \sum_{t=1}^T e_{i,t} (P_t^{\text{PDR}} + P_{\text{shif},t}^{\text{tra,in}} - P_{\text{shif},t}^{\text{tra,out}} - P_{\text{cut},t}) \Delta t \quad (13)$$

式中: P_t^{PDR} 为 t 时刻价格型需求响应后的负荷量。

阶梯型碳交易成本表示为

$$C_L^{\text{CO}_2} = \begin{cases} \lambda D^{\text{r}} & D^{\text{r}}, d \\ \lambda(1+\alpha)(D^{\text{r}}-d) + \lambda d & d < D^{\text{r}}, 2d \\ \lambda(1+2\alpha)(D^{\text{r}}-2d) + \lambda(2+\alpha)d & 2d < D^{\text{r}}, 3d \\ \lambda(1+3\alpha)(D^{\text{r}}-3d) + \lambda(3+3\alpha)d & 3d < D^{\text{r}}, 4d \\ \lambda(1+4\alpha)(D^{\text{r}}-4d) + \lambda(4+6\alpha)d & D^{\text{r}} > 4d \end{cases} \quad (14)$$

式中: D^{r} 为实际碳排放权交易额; λ 为碳交易基准价格; d 为碳排放区间长度; α 为价格增长系数。

3 源-荷-储协同低碳经济调度策略

3.1 电力系统双层优化调度模型

本文构建的具有分时电价与节点碳势特征的电力系统双层优化调度模型如图 1 所示。

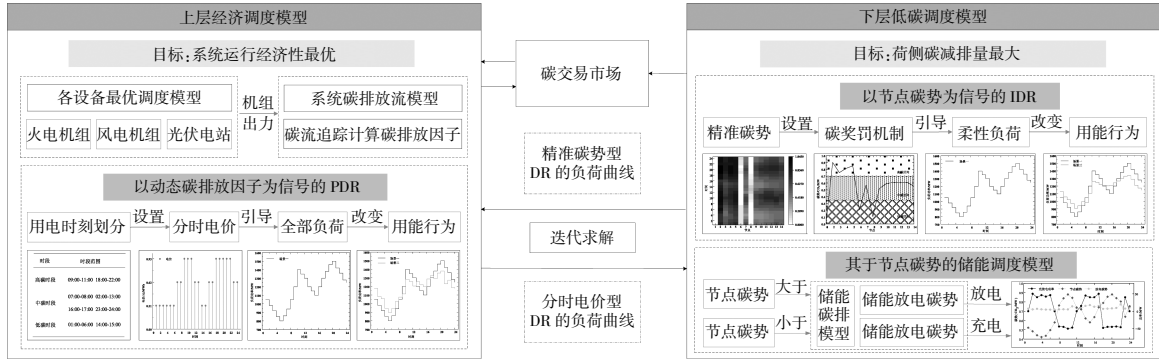


图1 电力系统双层优化调度模型

Fig.1 A two-level optimal dispatching model for power system

3.2 数学模型

3.2.1 上层经济调度模型

上层经济调度模型目标函数 F 为系统运行经济性最优,包括火电机组发电成本 C_G 、风电机组发电成本 C_W 、光伏机组发电成本 C_{PV} 、发电侧碳交易成本 $C_{gen}^{CO_2}$ 与弃风、弃光惩罚成本 C_{Wq} 、 C_{PVq}

$$\begin{cases}
 \min F = \min (C_G + C_W + C_{PV} + C_{gen}^{CO_2} + C_{Wq} + C_{PVq}) \\
 C_G = C_G^M + C_G^S \\
 C_G^M = \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^{N_G} a^g (P_{G,t}^g)^2 + b^g P_{G,t}^g + c^g \\
 C_G^S = \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^{N_G} \tau^g [U_{t-1}^g (1 - U_t^g) + U_t^g (1 - U_{t-1}^g)] \\
 C_W = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^{N_W} \kappa_w P_{W,t}^n \\
 C_{PV} = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^{N_{PV}} \kappa_{pv} P_{PV,t}^m \\
 C_{gen}^{CO_2} = \sum_{t=1}^T \sum_{g=1}^{N_G} \sigma_t (e_g^G - e_g^q) P_{G,t}^g \\
 C_{Wq} = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^{N_W} \kappa_{q,w} (P_{W,t}^{n,pre} - P_{W,t}^n) \\
 C_{PVq} = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^{N_{PV}} \kappa_{q,pv} (P_{PV,t}^{m,pre} - P_{PV,t}^m)
 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $C_{G,t}^M$ 为机组运行成本; $C_{G,t}^S$ 为机组启停成本; N_G 为火电机组数量; U_t^g 为机组 g 在 t 时段的开停机状态变量; τ^g 为机组启停成本系数; $P_{G,t}^g$ 为机组 g 在 t 时段的出力大小; N_W 为风电机组数量; N 为光伏机组数量; κ_w, κ_{pv} 分别为风电、光伏机组单位发电成本系数; $P_{W,t}^n$ 为第 n 台风电机组 t 时刻实际

出力; $P_{PV,t}^m$ 为第 m 台光伏机组 t 时刻实际出力; e_i^G, e_i^q 分别为发电机组单位碳排放系数、初始碳配额系数; σ_t 为 t 时刻火电发电机组的单位碳交易价格; $\kappa_{q,w}, \kappa_{q,pv}$ 分别为弃风、弃光惩罚成本系数; $P_{W,t}^{n,pre}, P_{PV,t}^{m,pre}$ 分别为第 n, m 台风电、光伏 t 时刻预测出力。

3.2.2 下层低碳调度模型

目标函数: 下层低碳调度模型的目标函数 f 为荷侧碳减排量最大,即荷储联合调度,以用户进行低碳需求响应后减少的碳交易成本为激励,具体包括激励型需求响应总成本 C_{IDR} , 荷侧碳交易成本 $C_L^{CO_2}$ 、储能系统的运行成本 C_{ES} 以及碳交易成本 $C_{ES}^{CO_2}$

$$\begin{cases}
 f = C_{IDR} + C_L^{CO_2} + C_{ES} + C_{ES}^{CO_2} \\
 C_{IDR} = C_{shif,t} + C_{cut,t} \\
 C_{ES} = \sum_{t=1}^T \sum_{e=1}^{N_{ES}} (c_{ES,e}^{cha} P_{ES,e,t}^{cha} X_{ES,e,t}^{cha} + c_{ES,e}^{dis} P_{ES,e,t}^{dis} X_{ES,e,t}^{dis}) \\
 C_{ES}^{CO_2} = \sum_{t=1}^T \sum_{e=1}^{N_{ES}} \sigma_{ES,t} D_e^{ES}
 \end{cases} \quad (17)$$

式中: N_{ES} 为储能机组数量; $c_{ES,e}^{cha}, c_{ES,e}^{dis}$ 分别为储能设备 e 的单位充、放电成本; $P_{ES,e,t}^{cha}$ 和 $P_{ES,e,t}^{dis}$ 分别为 t 时刻储能设备 e 的充、放电功率; $X_{ES,e,t}^{cha}, X_{ES,e,t}^{dis}$ 为 0-1 状态变量; $\sigma_{ES,t}$ 为储能系统单位碳交易价格。

本文相关约束条件同文献[7],[10],[12],[17]。

3.3 模型求解

本文构建具有分时电价与节点碳势特征的电

电力系统双层优化调度模型，其求解流程如图 2 所示。

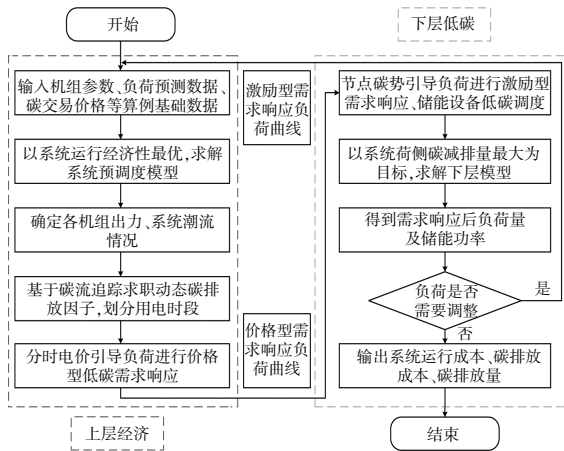


图 2 双层模型求解流程

Fig.2 Flow chart of solving double-layer model

由图 2 可知：①输入机组参数、风、光、负荷预测数据等；②求解上层系统调度模型，获取各机组启停计划和出力情况，计算出实时支路功率数据，根据碳排放流追踪模型求取系统动态碳排放因子，进行用电时段划分；③以具有碳导向特征的分时电价为信号，引导用户进行价格型低碳需求响应，输出响应后的负荷数据，并将其传输到下层低碳调度模型；④下层调度根据上层的调度结果，以节点碳势为信号引导用户进行激励型低碳需求响应以及储能系统的低碳调度；⑤求解系统下层低碳调度模型，输出调度后的负荷需求量、储能功率等；⑥将下层低碳调度后的负荷量代入上层经济调度模型中，再次进行调度，求解机组出力计划，更新系统动态碳排放因子，重复上述过程，直至各负荷在 ζ 和 $\zeta-1$ 次迭代的负荷量满足收敛判断条件 $|P_{\zeta,t}^{IDR} - P_{\zeta-1,t}^{IDR}| < \varepsilon$ 时， $\varepsilon=0.05$ ，结束求解并输出最优调度结果。

本文所构建的电力系统低碳经济双层优化调度模型，为避免在求解过程中出现调度决策在经济性与低碳性之间摇摆的振荡情况，采用文献[18]中的 Bisection Method 进行约束。该方法利用等分的方法来处理调度决策产生振荡的情况，其原理是为负荷需求量规定一个持续满足其变动范围的优化区间，在后续迭代过程中不断更新负荷需求量的上、下界，缩减此区间范围，最终在不大于临界值时结束。

4 算例分析

4.1 基础数据

本文采用改进 IEEE14 节点系统进行算例分析，系统结构如图 3 所示。风、光、荷预测曲线如图 4 所示。调度周期为 24 h，时间间隔为 1 h。火电机组相关参数详见文献[19]。分别在 8 节点接入一个风电场，在 6 节点接入一个光伏电站，风光机组相关参数见表 1。

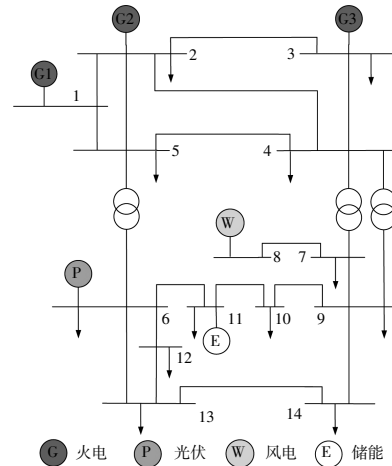


图 3 改进的 IEEE14 节点系统

Fig.3 Improved IEEE14 node system diagram

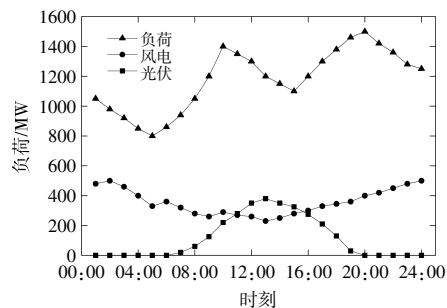


图 4 风、光、荷预测曲线

Fig.4 Forecasting curve of wind power, photovoltaic power and load

表 1 风、光电气参数

Table 1 Wind and solar electrical parameters

可再生能源	装机容量	最小消纳率/%	发电成本系数	弃风、弃光惩罚系数	碳排放系数
能源	MW		元/MW	元/MW	tCO ₂ /MW
风电机组	700	70	12	60	0.043 1
光伏机组	600	70	12	60	0.154 5

储能系统的容量为 250 MW·h，额定充放电功率为 50 MW，充、放电能量转换效率为 0.98，储能系统单位充、放电成本为 50 元/MW^[16]。价格弹性矩阵中的自弹性系数为 -0.1，互弹性系数为

0.03^[20],分时电价基准值设定为 616 元/(MW·h)^[7]。本文设定价格型低碳需求响应调度包含系统全部负荷节点,激励型低碳需求响应调度仅包含负荷节点 10 与节点 12。可转移与可削减负荷分别占总负荷量的 10%与 5%,单位调度成本均为 30 元/MW^[21,22]。碳配额系数与碳交易价格见文献[23],碳交易基价为 252 元/t,价格增长系数为 0.25,碳排放区间长度为 250 t。双层调度模型采用 MATLAB 软件,调用 CPLEX 求解器进行求解。

为验证本文所提策略的有效性,设置了 5 个场景进行对比分析。场景一:不考虑需求响应的传统电力系统经济调度策略;场景二:考虑价格型低碳需求响应的传统电力系统经济调度策略;场景三:考虑激励型低碳需求响应的传统电力系统经济调度;场景四:考虑双重低碳需求响应的电力系统低碳调度策略;场景五:考虑双重低碳需求响应与储能低碳调度的电力系统低碳经济调度策略。全部场景均考虑碳交易机制。

4.2 双重低碳需求响应有效性分析

4.2.1 价格型低碳需求响应调度结果分析

价格型低碳需求响应模型根据系统负荷量与

机组出力情况计算得出响应前系统动态碳排放因子。动态碳排放因子划分的用电时段如表 2 所示。

表 2 时段划分情况
Table 2 Time division

名称	时段范围
高碳	09:00-11:00,18:00-22:00
中碳	07:00-08:00,02:00-13:00,16:00-17:00,23:00-24:00
低碳	01:00-06:00,14:00-15:00

价格型低碳需求响应调度结果如图 5 所示。

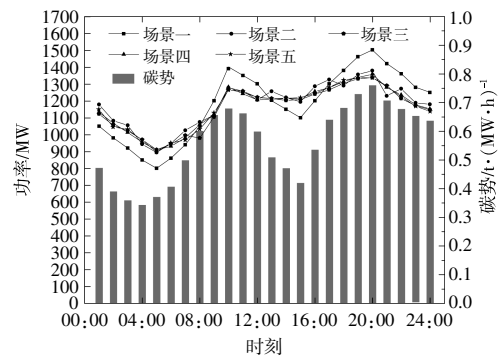


图 5 不同场景的负荷调度结果

Fig.5 Comparison of results before and after demand

以电价引导系统运行结果如表 3 所示。

表 3 不同场景的运行结果对比

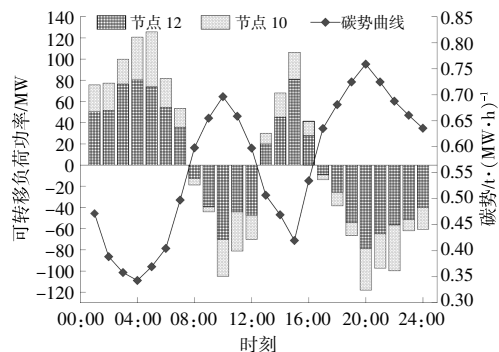
Table 3 Comparison of operating results in different scenarios

场景	运行成本/元	储能成本/元	弃风、光成本/元	碳交易成本/元	总成本/元	新能源消纳率/%	碳排放量/t
场景一	2 679 287.85	29 983.50	108 995.75	591 072.50	3 409 539.60	83.96	7 399.88
场景二	2 627 547.44	29 337.00	61 477.82	574 350.22	3 292 712.48	90.95	7 219.57
场景三	2 759 022.65	28 584.50	35 886.21	569 781.29	3 393 274.65	94.74	7 156.42
场景四	2 598 957.70	27 987.50	6 740.76	536 303.52	3 163 248.72	99.01	6 722.55
场景五	2 510 576.84	39 254.50	0.00	512 570.21	3 062 401.55	100.00	6 418.28

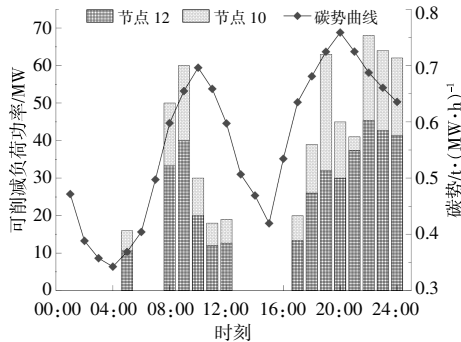
由表 3 可知,在均考虑碳交易机制的情况下,场景二总成本较场景一减少了 3.42%,碳排放量降低了 2.44%。这表明价格型需求响应划分电价时段的标准不同,其作用也不同,传统价格型需求响应以系统运行经济效益最优为目标,但考虑碳排放因子的价格型低碳需求响应则是根据碳排放因子的大小调节电价,分时电价引导用户进行低碳用电行为,大量负荷由高碳时段转移至低碳时段,因此能够减少系统弃风、弃光量,降低碳排放量,同时也减少了碳交易成本、弃风弃光成本,促进了可再生能源的消纳,降低了电力系统运行总成本,实现系统经济运行。

4.2.2 激励型低碳需求响应调度结果分析

考虑激励型低碳需求响应前、后可转移、可削减负荷调度结果如图 6 所示。



(a)可转移负荷调度结果



(b) 可削减负荷调度结果

图 6 可转移负荷、可削减负荷调度结果

Fig.6 The results of load scheduling can be transferred and reduced

由图 6 可知,在本文机制的作用下,可转移负荷的调度量增加,从碳势高的时刻转移至碳势低的时刻,可削减负荷集中于碳势高的时刻。

激励型低碳调度结果如表 4 所示。

表 4 激励型低碳需求响应运行结果对比

Table 4 Comparison of operation results of incentive low-carbon demand response

场景	可转移负荷		可削减负荷	
	调度成本	碳奖罚成本	调度成本	碳奖罚成本
	元			
场景三	52 705.692	33 226.368	17 850.79	38 180.85
场景四	25 685.341	25 187.754	17 850.79	31 351.72
场景五	19 536.758	16 256.623	17 850.79	27 439.51

由表 4 可知,由于可转移负荷与可削减负荷采取的调度策略存在差异,可转移负荷须要根据在不同时段不同节点碳势的高低进行用电行为的调整,以此获取碳减排收益。而对于可削减负荷,为了最大限度地获取碳减排收益,会在碳势峰值时段采取最大可削减功率进行调度,因此在各个场景下其调度成本保持一致,获得的碳减排收益也更多。场景三的运行成本相较场景一上升了 3.00%,这是由于计及碳奖罚机制的激励型需求响应虽然可以给用户带来更多的收益,但会增加需求响应的调度成本,从而导致系统整体运行成本的提高。而场景三的碳排放量较场景一减少 3.29%,表明碳奖罚机制可以引导柔性负荷在系统碳势较高的时段转出、削减用能,在系统碳势较低的时段转入用能,实现负荷在时间层面上的灵活应用,起到低碳减排的正向作用。

4.2.3 双重低碳需求响应调度结果分析

本节对双重低碳需求响应模型进行仿真分

析,结合表 3 分析可知,因为场景一策略不考虑需求响应,负荷侧与源侧不能进行有效互动,制约了系统运行的经济性与低碳性,场景二策略经济性较优,场景三策略低碳性较优,场景四策略使系统运行结果兼具经济性和低碳性,运行成本与总成本较前三种场景分别减少了 3.1%,7.2%;1.2%,3.9%;5.9%,6.8%。结合图 5 场景四调度结果表明:通过价格型需求响应在时间维度上进行负荷调度,降低系统负荷峰谷差,但系统节能降碳空间仍有待优化;通过激励型需求响应再次进行柔性负荷的灵活低碳调节,平滑负荷曲线,更深层次减少系统碳排放;由上述分析可知,双重低碳需求响应联合作用最终达成系统深度低碳状态的调整。在进行双重低碳需求响应之后,系统场景一、场景四各时段的碳势分布分别如图 7,8 所示。

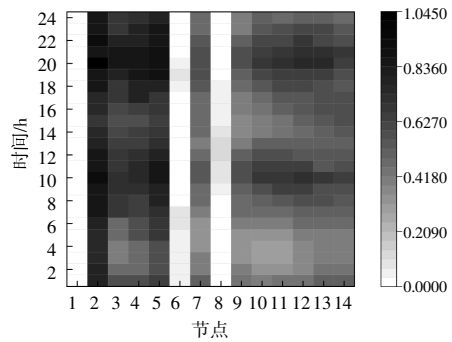


图 7 场景一碳势分布

Fig.7 Scenario one carbon potential distribution

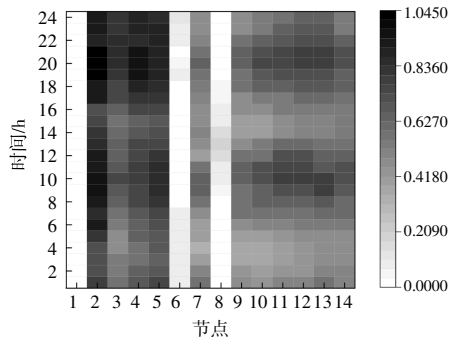


图 8 场景四碳势分布

Fig.8 Scene four carbon potential distribution

由图 7 可见,系统碳势在空间分布上,高碳势节点为常规火电机组直接提供负荷的节点,平均碳势约为 0.853 t/(MW·h),如节点 2~5;中碳势节点出现在风机、光伏临近节点,平均碳势约为 0.547 t/(MW·h),如节点 7,9~11;低碳势节点主要由风光直接供电,平均碳势约为 0.103 t/(MW·h),

如节点 6,8;在时间分布上,系统高碳势主要在用户用电高峰 09:00-12:00,18:00-23:00,呈负荷曲线特性。将场景一和场景四碳势进行对比,由于场景四通过电价调整负荷用电行为的同时,对柔性负荷进行低碳调整,这一策略促使系统更倾向使用新能源机组来支撑负荷,提高“绿电”使用率,从而降低系统节点碳势,场景四全局碳势相比场景一下降 5.77%。

图 9 为需求响应优化评估结果。

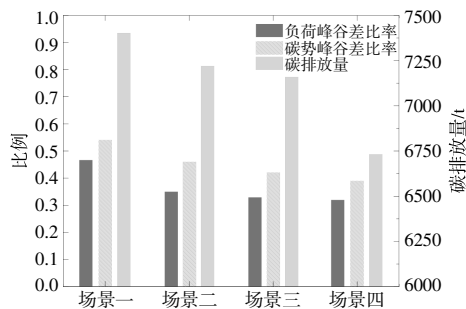


图 9 4 种场景需求响应优化评估指标对比

Fig.9 Comparison of evaluation metrics in four scenarios of DR optimization results

由图 9 可知:场景四负荷峰谷差比率最小为 31.96%,表明其负荷曲线具有最高的平滑度;场景四碳势峰谷差比率最小为 39.15%,表明系统碳势趋向于平稳,说明用户表现出明显的减碳意愿;场景四日碳排放量也最低,仅为 6 722.55 t/d。以上分析结果进一步验证了场景四策略的有效性,与场景二、场景三策略相比,其在提高负荷峰谷转移率、降低系统碳势、减少系统碳排放量方面效果更佳,具有良好的低碳效益。

4.3 储能设备调度结果分析

储能低碳调度结果如图 10 所示。

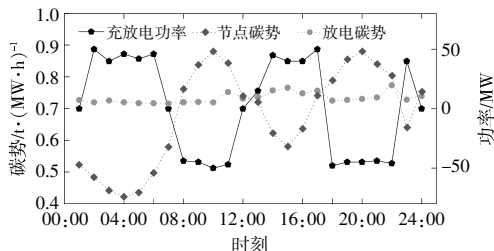


图 10 节点 11 储能系统出力结果图

Fig.10 Node 11 energy storage system output result diagram

由图 10 可知,在风力发电高峰时段 01:00-07:00,储能的放电碳势大于系统节点碳势,将储能系统设置为充电状态,在此期间,大量低碳电能注入电池,随着低碳电能占比逐渐增大,储能系统

的放电碳势逐步减小,储能系统实现了对低碳资源的有效储存和灵活应用。在 08:00-11:00,节点碳势大于储能的放电碳势,储能将切换至放电状态,释放之前储存的低碳电能,有助于减少高碳排机组的运行时间,满足电力供需平衡的同时降低系统碳排放量。在负荷低谷及光伏出力高峰时期,高碳排机组出力占比降低,使系统碳势减小,在 13:00-17:00,CO₂ 由 0.739 1 t/(MW·h) 下降到 0.579 1 t/(MW·h)。储能系统在上述时段再次进入充电状态,以备后续的用能需求。在 13:00-15:00,随着含碳电能注入储能系统,储能内部单位电量对应的碳排放量增加,导致放电时碳势上升。18:00-22:00 的电力负荷高峰期及光伏出力低谷期,储能系统与风电和火电机组共同响应负荷需求,储能碳排放因子较火电机组降低了 25.6%。

4.4 源-荷-储协同调度策略有效性分析

为了分析电力系统在参与碳交易机制下,源-荷-储协同低碳经济调度策略的有效性,以场景一、场景四、场景五进行对比分析。结合图 5、表 3 进行分析可知,场景五在场景四的基础上额外考虑了储能系统的低碳调度策略,其中储能低碳调度成本较场景四储能经济调度成本升高了 28.7%,表明储能低碳调度策略会以系统减碳量最大为目标进行实时调节,因而会牺牲部分经济效益。源-荷-储联合低碳调度增加了对系统整体碳势“削峰填谷”的效果,驱使系统最终到达深度低碳状态,使得系统碳排放量较场景一降低了 13.27%;同时储能配合负荷调度,负荷分布情况进一步被优化调整,基于“源随荷动”机理,荷侧反作用于源测机组,重新优化调整机组出力,系统运行总成本较场景一降低了 10.18%,从而验证了本文提出的源-荷-储协同调度策略可以进一步实现系统的低碳经济调度。

图 11,12 为两种情景的功率平衡图。场景一的优化调度策略为经济性最优,对图 11 进行分析,此场景下出现弃风弃光量较大现象,原因是如果火电机组在运行过程中启停多次,会产生大量的启停成本进而破坏系统的经济性,因此系统会牺牲部分风光来维持功率平衡。储能系统也因经济性要求出力较少,同时场景一因为没有负荷调度致使火电机组出力较多,系统碳排放量增多,影响系统低碳运行。场景五考虑源-荷-储协同低碳

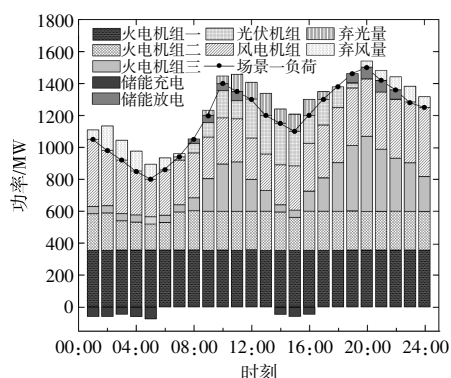


图 11 场景一经济调度结果

Fig.11 Scenario 1 results of economic dispatch

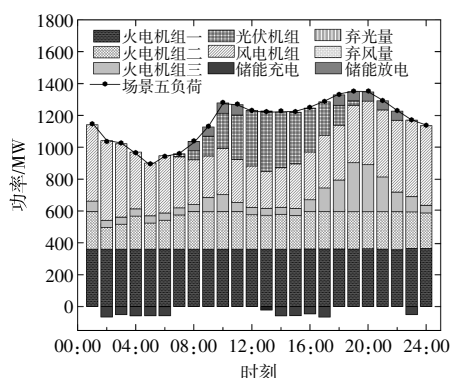


图 12 场景五低碳经济调度结果

Fig.12 Scenario 5 scheduling results of low-carbon economy 调度,对图 12 进行分析,用户在两个用电峰值期间积极响应,有效降低了峰谷差,通过响应消费零碳排的风电、光电,减少了弃风、弃光,同时在满足低碳排机组出力的情况下,抑制了一定量的高碳排机组碳排放,实现用户驱动的电力系统碳减排,且储能系统灵活有效利用新能源出力高峰时段的低碳电能,配合负荷低碳调度,实现荷储协同降碳调节。源测机组也随荷储重新进行调整,拥有更好的消纳风光能力和减碳效果,系统实现深度低碳优化。上述分析验证了本文提出的源-荷-储协同低碳经济优化调度策略的有效性和可行性。

5 结论

本文提出了一种考虑双重低碳需求响应和储能低碳调度的电力系统协同优化调度策略,利用仿真算例验证了策略正确性,得出以下结论。

①本文所提模型与不考虑需求响应调整相比,负荷峰谷差降低了 14.71%,碳势峰谷差降低 15.12%,全局碳势降低了 5.77%,可再生能源消纳率提升了 15.05%,碳排放量减少了 9.15%,总运行成本减少了 7.22%。

②本文依据节点碳势建立储能碳排流模型,储能系统通过对风光出力高峰时段低碳电能的灵活有效利用,降低高碳排机组出力,系统全局碳势相比普通场景下降了 8.91%。

③本文所提的电力系统源-荷-储协同低碳经济优化调度策略,使系统总成本减少了 10.18%,碳排放量减少了 13.27%,调度结果更具整体最优性,兼顾了“双碳”目标下的低碳性与经济性。

参考文献:

- [1] 米剑锋, 马晓芳. 中国 CCUS 技术发展趋势分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2537-2544.
- [2] 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.
- [3] 肖勇, 戚锦通, 胡伟, 等. 基于双层规划模型的燃煤发电机组初始碳排放配额分配方案研究[J]. 热力发电, 2022, 51(10): 42-46.
- [4] Fra ntišek Z, Martin Š, Vúclav K. Multistage stochastic optimization of carbon risk management [J]. Expert Systems with Applications, 2022, 201(9): 1-12.
- [5] 汪超群, 陈懿, 文福拴, 等. 电力系统碳排放流理论改进与完善[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1683-1693.
- [6] 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): 2830-2841.
- [7] 刘哲远, 邢海军, 程浩忠, 等. 考虑碳排放流及需求响应的综合能源系统双层优化调度 [J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 169-178.
- [8] 刘可真, 李林耘, 林铮, 等. 考虑碳排放流的电-气互联系统源荷互动低碳经济调度 [J]. 电力自动化设备, 2024, 44(5): 1-10.
- [9] 叶宇静, 邢海军, 米阳, 等. 考虑低碳需求响应及主从博弈的综合能源系统低碳优化调度[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(9): 34-43.
- [10] 宋泽溟, 冯华, 陈晓刚, 等. 基于节点碳势的配电网分布式资源低碳调度策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2320-2332.
- [11] 张玉敏, 孙鹏凯, 吉兴全, 等. 考虑扩展碳排放流的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3174-3191.
- [12] 张笑演, 王檣裕, 黄蕾, 等. 考虑扩展碳排放流和碳交易议价模型的园区综合能源优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 34-46.
- [13] 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.
- [14] 包维瀚,李姚旺,季节,等.储能系统与双向电力负荷的碳排放核算方法[J].电网技术,2023,47(8):3049-3058.
- [15] 师阳,李宏伟,陈继开,等.计及激励型需求响应的热电互联虚拟电厂优化调度 [J]. 太阳能学报,2023,44(4):349-358.
- [16] 崔杨,安宁,付小标,等.考虑广义储能与碳捕集设备联合调峰的电力系统低碳经济调度[J].电力自动化设备,2023,43(8):40-48.
- [17] 梁宁,方茜,徐慧慧,等.基于节点碳势需求响应的电力系统双层优化调度 [J]. 电力系统自动化,2024,48(9):44-53.
- [18] Cheng Y H,Zhang N,Zhang B S,et al.Low-carbon operation of multiple energy systems based on energy-carbon integrated prices[J].IEEE Transactions on Smart Grid,2020,11(2):1307-1318.
- [19] 廖望,刘东,巫宇锋,等.考虑源荷不确定性及用户响应行为的电力系统低碳经济调度[J].中国电机工程学报,2024,44(3):905-918.
- [20] 刘光宇,韩东升,刘超杰,等.考虑双重需求响应及阶梯型碳交易的综合能源系统双时间尺度优化调度[J].电力自动化设备,2023,43(5):218-22.
- [21] 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.
- [22] 李天格,胡志坚,陈志,等.计及电-气-热-氢需求响应的综合能源系统多时间尺度低碳运行优化策略[J].电力自动化设备,2023,43(1):16-24.
- [23] 张晓辉,刘小琰,钟嘉庆.考虑奖惩阶梯型碳交易和电-热转移负荷不确定性的综合能源系统规划 [J].中国电机工程学报,2020,40(19):6132-6141.

Optimization scheduling of power systems considering dual low-carbon demand response

Wei Yewen^{1,2}, Gu Jia¹, Liu Jiou¹

(1.College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2.Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In response to the issues of limited carbon reduction methods on the load side and poor coordination of carbon reduction methods across generation, load, and storage in current low-carbon dispatching of power systems, a multi-dimensional carbon reduction coupling strategy based on carbon potential indicators is proposed. This involves the establishment of a dual-layer optimization dispatch model for the power system, which includes low-carbon economic objectives. Initially, a carbon flow tracing model for loads and energy storage is developed based on the theory of carbon emissions flow in power systems. Subsequently, a dual low-carbon demand response model integrating carbon flow theory is established on the load side, and a low-carbon dispatch model based on nodal carbon potential is developed for the energy storage side. Then, a dual-layer optimization dispatch model for the power system characterized by time-of-use electricity pricing and nodal carbon potential is constructed, with the upper and lower layers aimed at optimal economic and low-carbon objectives, respectively. Finally, the strategy is tested using a modified IEEE14-node system, and the simulation results demonstrate that this dispatch strategy can effectively tap into the system's carbon reduction potential, enhance its carbon reduction capability, and improve its economic benefits.

Keywords: low-carbon dispatch; carbon potential indicators; low-carbon demand response; carbon emission flow