



(12) 发明专利



(10) 授权公告号 CN 114792201 B

(45) 授权公告日 2024. 06. 21

(21) 申请号 202210427099.8

(22) 申请日 2022.04.21

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 114792201 A

(43) 申请公布日 2022.07.26

(73) 专利权人 国网河北省电力有限公司经济技术研究院

地址 050001 河北省石家庄市裕华区富强大街27号

专利权人 国网河北省电力有限公司
国家电网有限公司

(72) 发明人 秦梁栋 王涛 陈志永 张菁
齐晓光 王颖 张倩茅 徐田丰
陈宇 朱天瞳 田家辉 张丽洁
田志杰 董家盛 赵凯林 谢婉莹
苗世洪 林毓军

(74) 专利代理机构 石家庄国为知识产权事务所
13120

专利代理师 付晓娣

(51) Int.Cl.

G06Q 10/0631 (2023.01)

G06Q 10/067 (2023.01)

G06Q 50/06 (2024.01)

H02J 3/28 (2006.01)

H02J 3/46 (2006.01)

(56) 对比文件

周洋;王进;任胜男;龚罗文;刘婷.计及碳捕集设备的电气互联综合能源系统低碳经济调度.电器与能效管理技术.2020,(04),全文.

彭元;娄素华;范越;吴耀武;梁书豪.考虑火电机组储热改造的电力系统低碳经济调度.电网技术.2020,(09),全文.

审查员 张力

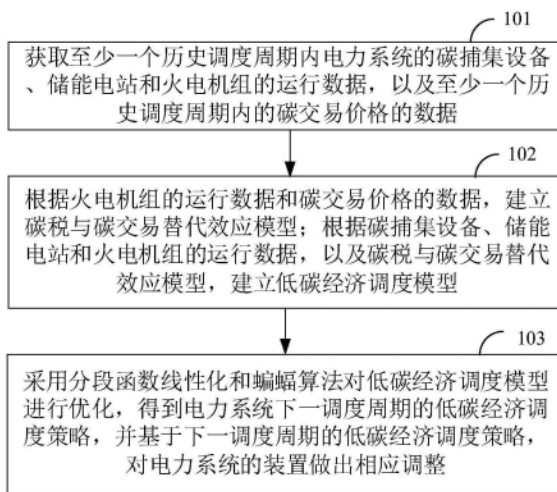
权利要求书7页 说明书17页 附图4页

(54) 发明名称

电力系统低碳经济调度方法及装置

(57) 摘要

本申请适用于电力系统技术领域,提供了电力系统低碳经济调度方法及装置,该方法包括:获取至少一个历史调度周期内电力系统的碳捕集设备、储能电站和火电机组的运行数据,以及碳交易价格的数据;根据火电机组的运行数据和碳交易价格的数据,建立碳税与碳交易替代效应模型;根据碳捕集设备、储能电站和火电机组的运行数据,以及碳税与碳交易替代效应模型,建立低碳经济调度模型;采用分段函数线性化和蝙蝠算法对所述低碳经济调度模型进行优化,得到所述电力系统下一调度周期的低碳经济调度策略,并基于所述下一调度周期的低碳经济调度策略,对所述电力系统的装置做出相应调整。本申请构建了以清洁低碳、安全高效为核心的电力系统。



1. 一种电力系统低碳经济调度方法,其特征在于,包括:

获取至少一个历史调度周期内电力系统的碳捕集设备、储能电站和火电机组的运行数据,以及所述至少一个历史调度周期内的碳交易价格的数据;

根据所述火电机组的运行数据和所述碳交易价格的数据,建立碳税与碳交易替代效应模型;

根据所述碳捕集设备、所述储能电站和所述火电机组的运行数据,以及所述碳税与碳交易替代效应模型,建立低碳经济调度模型;

采用分段函数线性化和蝙蝠算法对所述低碳经济调度模型进行优化,得到所述电力系统下一调度周期的低碳经济调度策略,并基于所述下一调度周期的低碳经济调度策略,对所述电力系统的装置做出相应调整;

所述碳税与碳交易替代效应模型满足一个调度周期内电力系统的碳排放量超过初始碳排放配额的条件时的模型;

所述碳税与碳交易替代效应模型为:

$$Q_T = Q_{GP} + Q_{TA} + Q_{TR}$$

$$Q_{TR} = \mu (Q_T - Q_{GP})$$

$$C_T = C_{TA} + C_{TR}$$

其中, Q_{GP} 为电力系统的初始碳排放配额; Q_{TA} 为电力系统支付碳税的碳排放量; Q_{TR} 为购买的碳排放许可证的碳排放量; μ 为替代系数; C_T 为总碳排放成本; C_{TA} 为碳税成本; C_{TR} 为碳交易成本;

其中,所述电力系统的初始碳排放配额根据火电机组的发电量和基准线法进行计算,具体通过下式进行计算:

$$Q_{GP} = \delta_G \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T P_{i,t}^G \Delta t$$

其中, δ_G 为单位发电量无偿碳排放配额; $P_{i,t}^G$ 为t时刻火电机组i的出力功率; Δt 单位调度时长; I 为系统中火电机组节点集合; T 为调度周期中总时刻数;

所述电力系统的碳排放量包括外购的电力产生的碳排放量和火电机组燃煤产生的碳排放量,所述电力系统的碳排放量公式为:

$$Q_T = Q_B + Q_G$$

$$Q_B = \sum_{t=1}^T (a_1 + b_1 P_t^B \Delta t)$$

$$Q_G = \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T (a_2 + b_2 P_{i,t}^G \Delta t)$$

其中, Q_T 为所述电力系统的碳排放量; Q_B 为外购电力所产生的碳排放量; Q_G 为火电机组燃煤产生的碳排放量; a_1 、 b_1 为外购电量的碳排放计算参数; P_t^B 为t时刻从电力市场中购买电功率; a_2 、 b_2 为火电机组的碳排放计算参数;

所述低碳经济调度模型为:

$$F = \min_{\Psi_1} C_1 + \min_{\Psi_2} \sum_{\omega \in \Omega} \pi_{\omega} C_{2\omega}$$

$$C_1 = \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T (C_i^F U_{i,t}^C + C_i^S V_{i,t}^S + C_i^D V_{i,t}^D)$$

$$C_{2\omega} = \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T C_i^V P_{i,t\omega}^C + \lambda_t^B P_{t\omega}^B + C_{TR}^\omega + C_{TA}^\omega$$

其中, Ψ_1 、 Ψ_2 为调度一阶段和二阶段的决策变量集合,调度一阶段为所有场景下相同的基础成本,调度二阶段为不同场景下对应的成本; C_1 为一阶段机组启动和停止成本; $C_{2\omega}$ 为场景 ω 下二阶段系统运行成本; C_i^F 为机组 i 的运行固定成本; C_i^S 为机组 i 的启动成本、 C_i^D 为机组 i 的停止成本; $U_{i,t}^C$ 为 t 时刻下机组 i 的运行状态; $V_{i,t}^S$ 为 t 时刻下机组 i 的启动动作变量、 $V_{i,t}^D$ 为 t 时刻下机组 i 的停止动作变量; C_i^V 为机组 i 的可变运行成本; $P_{i,t\omega}^C$ 为场景 ω 下 t 时刻火电机组出力; λ_t^B 为 t 时刻购电价格; $P_{t\omega}^B$ 场景 ω 下 t 时刻购电功率; C_{TA}^ω 为场景 ω 下碳税成本;

所述低碳经济调度模型的约束条件包括:碳捕集设备运行约束、储能电站运行约束、火电机组运行约束和系统及网络功率平衡约束;

所述碳捕集设备运行约束具体包括:

$$\text{碳捕集设备运行能耗: } \begin{cases} P_{i,t\omega}^{\text{CCS}} = U_{i,t\omega}^{\text{CCS}} P_m^{\text{CCS}} + P_{i,t\omega}^{\text{CCS}} \\ P_{i,t\omega}^{\text{CCS}} = W_i Q_{i,t\omega}^{\text{CCS}} \end{cases}, \text{其中, } P_{i,t\omega}^{\text{CCS}}、P_m^{\text{CCS}}、P_{i,t\omega}^{\text{CCS}} \text{ 分别为场景 } \omega$$

下 t 时刻碳捕集设备 i 的总能耗、固定能耗和运行能耗; $U_{i,t\omega}^{\text{CCS}}$ 为碳捕集设备运行状态; W_i 为碳捕集设备 i 处理单位 CO_2 所需的运行能耗; $Q_{i,t\omega}^{\text{CCS}}$ 为场景 ω 下 t 时刻碳捕集设备 i 捕获的二氧化碳量;

碳捕集电厂总输出功率: $P_{i,t\omega}^T = P_{i,t\omega}^G - P_{i,t\omega}^{\text{CCS}}$,其中, $P_{i,t\omega}^T$ 为场景 ω 下 t 时刻碳捕集电厂 i 向系统中注入的功率;

碳捕集设备捕获的二氧化碳量: $Q_{i,t\omega}^{\text{CCS}} = \lambda_i^{\text{CCS}} \chi_{i,t\omega}^{\text{CCS}} Q_{i,t\omega}^G - Q_{i,t\omega}^C + Q_{i,t\omega}^D$,其中, λ_i^{CCS} 为碳捕集设备 i 的烟气分流比; $\chi_{i,t\omega}^{\text{CCS}}$ 为场景 ω 下 t 时刻碳捕集设备 i 捕获水平; $Q_{i,t\omega}^C$ 、 $Q_{i,t\omega}^D$ 分别为碳捕集设备 i 中储液罐释放或储存的碳排放量;

所述储能电站运行约束具体包括:

$$U_{s,t\omega}^{\text{EC}} P_{\min}^{\text{EC}} \leq P_{s,t\omega}^{\text{EC}} \leq U_{s,t\omega}^{\text{EC}} P_{\max}^{\text{EC}}$$

$$\text{储能电站充放电功率约束: } U_{s,t\omega}^{\text{ED}} P_{\min}^{\text{ED}} \leq P_{s,t\omega}^{\text{ED}} \leq U_{s,t\omega}^{\text{ED}} P_{\max}^{\text{ED}}, \text{其中, } P_{s,t\omega}^{\text{EC}}、P_{s,t\omega}^{\text{ED}}$$

$$U_{s,t\omega}^{\text{EC}}、U_{s,t\omega}^{\text{ED}} \in \{0,1\} \quad U_{s,t\omega}^{\text{EC}} + U_{s,t\omega}^{\text{ED}} \leq 1$$

分别为储能电站充放电功率; $U_{s,t\omega}^{\text{EC}}$ 、 $U_{s,t\omega}^{\text{ED}}$ 分别为储能电站充放电状态; $P_{\min}^{\text{EC}}$ 、 $P_{\max}^{\text{EC}}$ 、 $P_{\min}^{\text{ED}}$ 、 $P_{\max}^{\text{ED}}$ 依次为储能电站充放电功率的上下限;

$$\text{储能系统容量约束: } \begin{cases} E_{s,t\omega} = (1 - \varepsilon) E_{s,t-1\omega} + (\eta_C P_{s,t\omega}^{\text{EC}} - P_{s,t\omega}^{\text{ED}}) \Delta t / E_{\text{all}} \\ E_{\min} \leq E_{s,t\omega} \leq E_{\max} \end{cases}, \text{其中, } E_{s,t\omega} \text{ 为场景}$$

ω 下 t 时刻储能电站的储能状态; ε 为储能电站自损耗率; η_c 为充电效率; E_{all} 为储能电站总容量; E_{max} 为容量状态的上限值; E_{min} 为容量状态的下限值;

始末储存能量平衡约束: $|E_{s,T\omega} - E_{s,0\omega}| \leq \Delta E$, 其中, $E_{s,T\omega}$ 代表储能电站初始时刻; $E_{s,0\omega}$ 为末尾时刻的容量状态; ΔE 为始末时刻允许的容量偏差值;

所述分段函数线性化的步骤具体包括:

结合五个 0-1 变量 z_i 和六个连续变量 w_i 对支付碳税的碳排放量和碳税成本进行线性化表达, 支付碳税的碳排放量的线性化表达式为:

$$Q_{TA} = Q_1 w_2 + 2Q_1 w_3 + 3Q_1 w_4 + 4Q_1 w_5 + 5Q_1 w_6$$

其中, Q_{TA} 为支付碳税的碳排放量; Q_1 为碳税区间长度; $\sum_{n=1}^6 w_n = 1$ $\sum_{n=1}^5 z_n = 1$ $w_1 \leq z_1$, $w_2 \leq z_1 + z_2$, $\dots$, $w_5 \leq z_4 + z_5$, $w_6 \leq z_5$;

碳税成本的线性化表达式为:

$$C_{TA} = R_1 Q_1 w_2 + R_1 Q_1 (2+\alpha) w_3 + R_1 Q_1 (3+3\alpha) w_4 + R_1 Q_1 (4+6\alpha) w_5 + R_1 Q_1 (5+10\alpha) w_6$$

其中, C_{TA} 为碳税成本; R_1 为基础税率; α 为税率增长幅度;

所述蝙蝠算法的步骤具体包括:

初始化电力系统的网架结构、碳价、碳税税率等模型参数; 初始化蝙蝠速度、响度、脉冲频率等算法参数;

随机初始化蝙蝠种群位置与速度, 每个蝙蝠的位置代表场景替代系数的取值;

产生随机数, 确定更新蝙蝠个体位置计算式, 将蝙蝠位置传入电力系统低碳经济调度模型, 得到所有碳交易价格场景下系统碳排放量, 计算期望运行成本;

根据模型返回值获取蝙蝠适应度, 执行全局搜索, 计算最佳蝙蝠个体, 执行局部搜索, 更新个体最优值、个体位置、响度和脉冲频率, 具体方法为:

$$A_t = A_f A_{t-1}$$

$$r_t = r_0 * (1 - e^{-R_f * t})$$

其中, A_t 、 A_{t-1} 为第 t 代与 $t-1$ 代中蝙蝠算法的响度; A_f 为响度衰减系数; r_t 第 t 代中蝙蝠算法的脉冲发射率; r_0 为初始脉冲发射率; R_f 为脉冲衰减系数;

重复产生随机数以后的步骤直到算法满足收敛条件, 所述收敛条件为前后两次的全局最优值之差小于给定的阈值或者算法循环次数达到最大循环次数;

输出结果, 算法输出结果为每个场景下的替代系数取值和综合考虑所有场景的系统调度计划。

2. 如权利要求1所述的电力系统低碳经济调度方法, 其特征在于, 根据所述火电机组的运行数据和所述碳交易价格的数据, 建立碳税与碳交易替代效应模型, 包括:

根据所述碳交易价格的数据, 采用几何布朗运动方程描述碳交易价格不确定性的波动特征, 基于所述波动特征和随机场景法, 建立碳交易价格模型;

根据所述碳交易价格模型, 建立碳交易成本函数和碳税成本函数;

根据所述火电机组的运行数据、所述碳交易成本函数和碳税成本函数, 建立所述碳税与碳交易替代效应模型;

其中, 所述波动特征通过以下公式计算:

$$dP_{ctra}(t) = \mu P_{ctra}(t) dt + \sigma P_{ctra}(t) dB(t)$$

其中, $P_{\text{ctra}}(t)$ 为碳交易价格; $dP_{\text{ctra}}(t)$ 为碳价的不确定性量; μ 为碳价的期望增长率; dt 为时间增量; 方差 σ 表示碳排放权交易价格波动率; $d_{B(t)}$ 为标准维纳过程增量。

3. 如权利要求1或2所述的电力系统低碳经济调度方法, 其特征在于, 所述碳交易成本根据碳交易成本函数得到, 所述碳交易成本函数为:

$$\begin{cases} C_{\text{TR}}^{\omega} = \lceil \mu_{\omega} \rceil C_{\text{TR},m} + P_{\text{ctra}}^{\omega} Q_{\text{TR}}^{\omega} \\ C_{\text{TR}} = \sum_{\omega \in \Omega} \pi_{\omega} C_{\text{TR}}^{\omega} \end{cases}$$

其中, C_{TR}^{ω} 为场景 ω 下的碳交易成本; $\lceil \mu_{\omega} \rceil$ 为场景 ω 下替代系数 μ_{ω} 的向上取整值; $C_{\text{TR},m}$ 为碳交易市场的基础交易费用; Q_{TR}^{ω} 为场景 ω 下分配于购买碳排放许可证的碳排放量; Ω 为场景集合; 场景 ω 对应特定的碳交易价格为 P_{ctra}^{ω} ; 场景发生概率 π_{ω} 。

4. 如权利要求1或2所述的电力系统低碳经济调度方法, 其特征在于, 所述碳税成本根据碳税成本函数得到, 所述碳税成本函数为:

$$C_{\text{TA}} = \begin{cases} R_1 Q_{\text{TA}}, & 0 \leq Q_{\text{TA}} < Q_1 \\ R_1 Q_1 + R_1 (1 + \alpha)(Q_{\text{TA}} - Q_1), & Q_1 \leq Q_{\text{TA}} < 2Q_1 \\ R_1 Q_1 (2 + \alpha) + R_1 (1 + 2\alpha)(Q_{\text{TA}} - 2Q_1), & 2Q_1 \leq Q_{\text{TA}} < 3Q_1 \\ R_1 Q_1 (3 + 3\alpha) + R_1 (1 + 3\alpha)(Q_{\text{TA}} - 3Q_1), & 3Q_1 \leq Q_{\text{TA}} < 4Q_1 \\ R_1 Q_1 (4 + 6\alpha) + R_1 (1 + 4\alpha)(Q_{\text{TA}} - 4Q_1), & 4Q_1 \leq Q_{\text{TA}} < 5Q_1 \end{cases}$$

其中, C_{TA} 为碳税成本, Q_{TA} 为支付碳税的碳排放量, R_1 为基础税率; Q_1 为碳税区间长度; α 为税率增长幅度。

5. 一种电力系统低碳经济调度装置, 其特征在于, 包括:

获取模块, 用于获取至少一个历史调度周期内电力系统的碳捕集设备、储能电站和火电机组的运行数据, 以及所述至少一个历史调度周期内的碳交易价格的数据;

模型建立模块, 用于根据所述火电机组的运行数据和所述碳交易价格的数据, 建立碳税与碳交易替代效应模型; 根据所述碳捕集设备、所述储能电站和所述火电机组的运行数据, 以及所述碳税与碳交易替代效应模型, 建立低碳经济调度模型;

优化模块, 用于采用分段函数线性化和蝙蝠算法对所述低碳经济调度模型进行优化, 得到所述电力系统下一调度周期的低碳经济调度策略, 并基于所述下一调度周期的低碳经济调度策略, 对所述电力系统的装置做出相应调整;

所述碳税与碳交易替代效应模型满足一个调度周期内电力系统的碳排放量超过初始碳排放配额的条件时的模型;

所述碳税与碳交易替代效应模型为:

$$\begin{aligned} Q_{\text{T}} &= Q_{\text{GP}} + Q_{\text{TA}} + Q_{\text{TR}} \\ Q_{\text{TR}} &= \mu (Q_{\text{T}} - Q_{\text{GP}}) \\ C_{\text{T}} &= C_{\text{TA}} + C_{\text{TR}} \end{aligned}$$

其中, Q_{GP} 为电力系统的初始碳排放配额; Q_{TA} 为电力系统支付碳税的碳排放量; Q_{TR} 为购买的碳排放许可证的碳排放量; μ 为替代系数; C_{T} 为总碳排放成本; C_{TA} 为碳税成本; C_{TR} 为碳交易成本;

其中, 所述电力系统的初始碳排放配额根据火电机组的发电量和基准线法进行计算,

具体通过下式进行计算：

$$Q_{GP} = \delta_G \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T P_{i,t}^G \Delta t$$

其中, δ_G 为单位发电量无偿碳排放配额; $P_{i,t}^G$ 为t时刻火电机组i的出力功率; Δt 单位调度时长; I 为系统中火电机组节点集合; T 为调度周期中总时刻数;

所述电力系统的碳排放量包括外购的电力产生的碳排放量和火电机组燃煤产生的碳排放量, 所述电力系统的碳排放量公式为:

$$Q_T = Q_B + Q_G$$

$$Q_B = \sum_{t=1}^T (a_1 + b_1 P_t^B \Delta t)$$

$$Q_G = \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T (a_2 + b_2 P_{i,t}^G \Delta t)$$

其中, Q_T 为所述电力系统的碳排放量; Q_B 为外购电力所产生的碳排放量; Q_G 为火电机组燃煤产生的碳排放量; a_1 、 b_1 为外购电量的碳排放计算参数; P_t^B 为t时刻从电力市场中购买电功率; a_2 、 b_2 为火电机组的碳排放计算参数;

所述低碳经济调度模型为:

$$F = \min_{\Psi_1} C_1 + \min_{\Psi_2} \sum_{\omega \in \Omega} \pi_{\omega} C_{2\omega}$$

$$C_1 = \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T (C_i^F U_{i,t}^C + C_i^S V_{i,t}^S + C_i^D V_{i,t}^D)$$

$$C_{2\omega} = \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T C_i^V P_{i,t\omega}^C + \lambda_t^B P_{t\omega}^B + C_{TR}^{\omega} + C_{TA}^{\omega}$$

其中, Ψ_1 、 Ψ_2 为调度一阶段和二阶段的决策变量集合, 调度一阶段为所有场景下相同的基础成本, 调度二阶段为不同场景下对应的成本; C_1 为一阶段机组启动和停止成本; $C_{2\omega}$ 为场景 ω 下二阶段系统运行成本; C_i^F 为机组i的运行固定成本; C_i^S 为机组i的启动成本、 C_i^D 为机组i的停止成本; $U_{i,t}^C$ 为t时刻下机组i的运行状态; $V_{i,t}^S$ 为t时刻下机组i的启动动作变量、 $V_{i,t}^D$ 为t时刻下机组i的停止动作变量; C_i^V 为机组i的可变运行成本; $P_{i,t\omega}^C$ 为场景 ω 下t时刻火电机组出力; λ_t^B 为t时刻购电价格; $P_{t\omega}^B$ 场景 ω 下t时刻购电功率; C_{TR}^{ω} 为场景 ω 下碳税成本;

所述低碳经济调度模型的约束条件包括: 碳捕集设备运行约束、储能电站运行约束、火电机组运行约束和系统及网络功率平衡约束;

所述碳捕集设备运行约束具体包括:

$$\begin{aligned} P_{i,t\omega}^{CCS} &= U_{i,t\omega}^{CCS} P_m^{CCS} + P_{i,t\omega}^{CCS} \\ P_{i,t\omega}^{CCS} &= W_i Q_{i,t\omega}^{CCS} \end{aligned} \quad \text{其中, } P_{i,t\omega}^{CCS}、P_m^{CCS}、P_{i,t\omega}^{CCS} \text{ 分别为场景 } \omega$$

下t时刻碳捕集设备i的总能耗、固定能耗和运行能耗; $U_{i,t\omega}^{CCS}$ 为碳捕集设备运行状态; W_i 为碳

捕集设备*i*处理单位CO₂所需的运行能耗; $Q_{i,t\omega}^{CCS}$ 为场景 ω 下*t*时刻碳捕集设备*i*捕获的二氧化碳量;

碳捕集电厂总输出功率: $P_{i,t\omega}^T = P_{i,t\omega}^G - P_{i,t\omega}^{CCS}$,其中, $P_{i,t\omega}^T$ 为场景 ω 下*t*时刻碳捕集电厂*i*向系统中注入的功率;

碳捕集设备捕获的二氧化碳量: $Q_{i,t\omega}^{CCS} = \lambda_i^{CCS} \chi_{i,t\omega}^{CCS} Q_{i,t\omega}^G - Q_{i,t\omega}^C + Q_{i,t\omega}^D$,其中, λ_i^{CCS} 为碳捕集设备*i*的烟气分流比; $\chi_{i,t\omega}^{CCS}$ 为场景 ω 下*t*时刻碳捕集设备*i*捕获水平; $Q_{i,t\omega}^C$ 、 $Q_{i,t\omega}^D$ 分别为碳捕集设备*i*中储液罐释放或储存的碳排放量;

所述储能电站运行约束具体包括:

$$U_{s,t\omega}^{EC} P_{\min}^{EC} \leq P_{s,t\omega}^{EC} \leq U_{s,t\omega}^{EC} P_{\max}^{EC}$$

储能电站充放电功率约束: $U_{s,t\omega}^{ED} P_{\min}^{ED} \leq P_{s,t\omega}^{ED} \leq U_{s,t\omega}^{ED} P_{\max}^{ED}$,其中, $P_{s,t\omega}^{EC}$ 、 $P_{s,t\omega}^{ED}$

$$U_{s,t\omega}^{EC}, U_{s,t\omega}^{ED} \in \{0,1\} \quad U_{s,t\omega}^{EC} + U_{s,t\omega}^{ED} \leq 1$$

分别为储能电站充放电功率; $U_{s,t\omega}^{EC}$ 、 $U_{s,t\omega}^{ED}$ 分别为储能电站充放电状态; $P_{\min}^{EC}$ 、 $P_{\max}^{EC}$ 、 $P_{\min}^{ED}$ 、 $P_{\max}^{ED}$ 依次为储能电站充放电功率的上下限;

储能系统容量约束: $E_{s,t\omega} = (1 - \varepsilon) E_{s,t-1\omega} + (\eta_c P_{s,t\omega}^{EC} - P_{s,t\omega}^{ED}) \Delta t / E_{all}$,其中, $E_{s,t\omega}$ 为场景 ω 下*t*时刻储能电站的储能状态; ε 为储能电站自损耗率; η_c 为充电效率; E_{all} 为储能电站总容量; $E_{\max}$ 为容量状态的上限值; $E_{\min}$ 为容量状态的下限值;

始末储存能量平衡约束: $|E_{s,T\omega} - E_{s,0\omega}| \leq \Delta E$,其中, $E_{s,T\omega}$ 代表储能电站初始时刻; $E_{s,0\omega}$ 为末尾时刻的容量状态; ΔE 为始末时刻允许的容量偏差值;

所述分段函数线性化的步骤具体包括:

结合五个0-1变量 z_i 和六个连续变量 w_i 对支付碳税的碳排放量和碳税成本进行线性化表达,支付碳税的碳排放量的线性化表达公式为:

$$Q_{TA} = Q_1 w_2 + 2Q_1 w_3 + 3Q_1 w_4 + 4Q_1 w_5 + 5Q_1 w_6$$

其中, Q_{TA} 为支付碳税的碳排放量; Q_1 为碳税区间长度; $\sum_{n=1}^6 w_n = 1$ $\sum_{n=1}^5 z_n = 1$ $w_1 \leq z_1$, $w_2 \leq z_1 +$

$z_2, \dots, w_5 \leq z_4 + z_5, w_6 \leq z_5$;

碳税成本的线性化表达公式为:

$$C_{TA} = R_1 Q_1 w_2 + R_1 Q_1 (2 + \alpha) w_3 + R_1 Q_1 (3 + 3\alpha) w_4 + R_1 Q_1 (4 + 6\alpha) w_5 + R_1 Q_1 (5 + 10\alpha) w_6$$

其中, C_{TA} 为碳税成本; R_1 为基础税率; α 为税率增长幅度;

所述蝙蝠算法的步骤具体包括:

初始化电力系统的网架结构、碳价、碳税税率等模型参数;初始化蝙蝠速度、响度、脉冲频率等算法参数;

随机初始化蝙蝠种群位置与速度,每个蝙蝠的位置代表场景替代系数的取值;

产生随机数,确定更新蝙蝠个体位置计算式,将蝙蝠位置传入电力系统低碳经济调度模型,得到所有碳交易价格场景下系统碳排放量,计算期望运行成本;

根据模型返回值获取蝙蝠适应度,执行全局搜索,计算最佳蝙蝠个体,执行局部搜索,更新个体最优值、个体位置、响度和脉冲频率,具体方法为:

$$A_t = A_f A_{t-1}$$
$$r_t = r_0 * (1 - e^{-R_f * t})$$

其中, A_t 、 A_{t-1} 为第t代与t-1代中蝙蝠算法的响度; A_f 为响度衰减系数; r_t 第t代中蝙蝠算法的脉冲发射率; r_0 为初始脉冲发射率; R_f 为脉冲衰减系数;

重复产生随机数以后的步骤直到算法满足收敛条件,所述收敛条件为前后两次的全局最优值之差小于给定的阈值或者算法循环次数达到最大循环次数;

输出结果,算法输出结果为每个场景下的替代系数取值和综合考虑所有场景的系统调度计划。

6.一种调度装置,其特征在于,包括:处理器和存储器,该存储器用于存储计算机程序,所述处理器用于调用并运行所述存储器中存储的计算机程序,执行如权利要求1至4任一项所述的电力系统低碳经济调度方法。

7.一种计算机可读存储介质,所述计算机可读存储介质存储有计算机程序,其特征在于,所述计算机程序被处理器执行时实现如权利要求1至4任一项所述的电力系统低碳经济调度方法。

电力系统低碳经济调度方法及装置

技术领域

[0001] 本申请属于电力系统技术领域,尤其涉及电力系统低碳经济调度方法及装置。

背景技术

[0002] 随着“碳达峰、碳中和”目标和“四个革命、一个合作”能源安全新战略的提出,电力系统面临能源转型升级的需求,亟需构建以清洁低碳、安全高效为核心的用能体系。对于电力系统而言,碳排放具有负外部性,其本身对系统运行经济效益并没有直接影响。目前大体上存在两类碳规制:碳税制和碳交易制。然而,现有研究成果大多聚焦于单一碳规制下电力系统的优化运行方法,较少研究涉及到碳税和碳交易替代效应的建模过程,且往往忽略了碳交易价格波动对电力系统低碳调度策略的影响,导致低碳调度策略不合理,进而导致在这些策略控制下的电力系统的能量利用率低,节能性差。

发明内容

[0003] 本申请实施例提供了电力系统低碳经济调度方法及装置,以实现清洁低碳的电力系统。

[0004] 本申请是通过如下技术方案实现的:

[0005] 第一方面,本申请实施例提供了一种电力系统低碳经济调度方法,包括:

[0006] 获取至少一个历史调度周期内电力系统的碳捕集设备、储能电站和火电机组的运行数据,以及至少一个历史调度周期内的碳交易价格的数据;根据火电机组的运行数据和碳交易价格的数据,建立碳税与碳交易替代效应模型;根据碳捕集设备、储能电站和火电机组的运行数据,以及碳税与碳交易替代效应模型,建立低碳经济调度模型;采用分段函数线性化和蝙蝠算法对低碳经济调度模型进行优化,得到电力系统下一调度周期的低碳经济调度策略,并基于下一调度周期的低碳经济调度策略,对电力系统的装置做出相应调整。

[0007] 结合第一方面,在一些可能的实现方式中,碳税与碳交易替代效应模型满足一个调度周期内电力系统的碳排放量超过初始碳排放配额的条件时的模型;碳税与碳交易替代效应模型为:

$$[0008] \quad Q_T = Q_{GP} + Q_{TA} + Q_{TR}$$

$$[0009] \quad Q_{TR} = \mu (Q_T - Q_{GP})$$

$$[0010] \quad C_T = C_{TA} + C_{TR}$$

[0011] 其中, Q_{GP} 为电力系统的初始碳排放配额; Q_{TA} 为电力系统支付碳税的碳排放量; Q_{TR} 为购买的碳排放许可证的碳排放量; μ 为替代系数; C_T 为总碳排放成本; C_{TA} 为碳税成本; C_{TR} 为碳交易成本;

[0012] 其中,电力系统的初始碳排放配额根据火电机组的发电量和基准线法进行计算,具体通过下式进行计算:

$$[0013] \quad Q_{GP} = \delta_G \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T P_{i,t}^G \Delta t$$

[0014] 其中, δ_G 为单位发电量无偿碳排放配额; $P_{i,t}^G$ 为 t 时刻火电机组 i 的出力功率; Δt 单位调度时长; I 为系统中火电机组节点集合; T 为调度周期中总时刻数;

[0015] 电力系统的碳排放量包括外购的电力产生的碳排放量和火电机组燃煤产生的碳排放量, 电力系统的碳排放量公式为:

$$[0016] \quad Q_T = Q_B + Q_G$$

$$[0017] \quad Q_B = \sum_{t=1}^T (a_1 + b_1 P_t^B \Delta t)$$

$$[0018] \quad Q_G = \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T (a_2 + b_2 P_{i,t}^G \Delta t)$$

[0019] 其中, Q_T 为电力系统的碳排放量; Q_B 为外购电力所产生的碳排放量; Q_G 为火电机组燃煤产生的碳排放量; a_1 、 b_1 为外购电量的碳排放计算参数; P_t^B 为 t 时刻从电力市场中购买电功率; a_2 、 b_2 为火电机组的碳排放计算参数。

[0020] 结合第一方面, 在一些可能的实现方式中, 低碳经济调度模型为:

$$[0021] \quad F = \min_{\Psi_1} C_1 + \min_{\Psi_2} \sum_{\omega \in \Omega} \pi_{\omega} C_{2\omega}$$

$$[0022] \quad C_1 = \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T (C_i^F U_{i,t}^C + C_i^S V_{i,t}^S + C_i^D V_{i,t}^D)$$

$$[0023] \quad C_{2\omega} = \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T C_i^V P_{i,t\omega}^C + \lambda_t^B P_{t\omega}^B + C_{TR}^{\omega} + C_{TA}^{\omega}$$

[0024] 其中, Ψ_1 、 Ψ_2 为调度一阶段和二阶段的决策变量集合, 调度一阶段为所有场景下相同的基础成本, 调度二阶段为不同场景下对应的成本; C_1 为一阶段机组启动和停止成本; $C_{2\omega}$ 为场景 ω 下二阶段系统运行成本; C_i^F 为机组 i 的运行固定成本; C_i^S 为机组 i 的启动成本、 C_i^D 为机组 i 的停止成本; $U_{i,t}^C$ 为 t 时刻下机组 i 的运行状态; $V_{i,t}^S$ 为 t 时刻下机组 i 的启动动作变量、 $V_{i,t}^D$ 为 t 时刻下机组 i 的停止动作变量; C_i^V 为机组 i 的可变运行成本; $P_{i,t\omega}^C$ 为场景 ω 下 t 时刻火电机组出力; λ_t^B 为 t 时刻购电价格; $P_{t\omega}^B$ 为场景 ω 下 t 时刻购电功率; C_{TA}^{ω} 为场景 ω 下碳税成本;

[0025] 低碳经济调度模型的约束条件包括: 碳捕集设备运行约束、储能电站运行约束、火电机组运行约束和系统及网络功率平衡约束;

[0026] 碳捕集设备运行约束具体包括:

$$[0027] \quad \text{碳捕集设备运行能耗: } \begin{aligned} P_{i,t\omega}^{CCS} &= U_{i,t\omega}^{CCS} P_m^{CCS} + P_{i,t\omega}^{CCS} \\ P_{i,t\omega}^{CCS} &= W_i Q_{i,t\omega}^{CCS} \end{aligned}, \text{ 其中, } P_{i,t\omega}^{CCS}、P_m^{CCS}、P_{i,t\omega}^{CCS} \text{ 分别为}$$

场景 ω 下 t 时刻碳捕集设备 i 的总能耗、固定能耗和运行能耗; $U_{i,t\omega}^{CCS}$ 为碳捕集设备运行状态; W_i 为碳捕集设备 i 处理单位 CO_2 所需的运行能耗; $Q_{i,t\omega}^{CCS}$ 为场景 ω 下 t 时刻碳捕集设备 i 捕获的二氧化碳量;

[0028] 碳捕集电厂总输出功率: $P_{i,t\omega}^T = P_{i,t\omega}^G - P_{i,t\omega}^{CCS}$, 其中, $P_{i,t\omega}^T$ 为场景 ω 下 t 时刻碳捕集电

厂i向系统中注入的功率;

[0029] 碳捕集设备捕获的二氧化碳量: $Q_{i,t\omega}^{\text{CCS}} = \lambda_i^{\text{CCS}} \chi_{i,t\omega}^{\text{CCS}} Q_{i,t\omega}^{\text{G}} - Q_{i,t\omega}^{\text{C}} + Q_{i,t\omega}^{\text{D}}$, 其中, λ_i^{CCS} 为碳捕集设备i的烟气分流比; $\chi_{i,t\omega}^{\text{CCS}}$ 为场景 ω 下t时刻碳捕集设备i捕获水平; $Q_{i,t\omega}^{\text{C}}$ 、 $Q_{i,t\omega}^{\text{D}}$ 分别为碳捕集设备i中储液罐释放或储存的碳排放量;

[0030] 储能电站运行约束具体包括:

$$U_{s,t\omega}^{\text{EC}} P_{\min}^{\text{EC}} \leq P_{s,t\omega}^{\text{EC}} \leq U_{s,t\omega}^{\text{EC}} P_{\max}^{\text{EC}}$$

[0031] 储能电站充放电功率约束: $U_{s,t\omega}^{\text{ED}} P_{\min}^{\text{ED}} \leq P_{s,t\omega}^{\text{ED}} \leq U_{s,t\omega}^{\text{ED}} P_{\max}^{\text{ED}}$, 其中, $P_{s,t\omega}^{\text{EC}}$ 、 $P_{s,t\omega}^{\text{ED}}$

$$U_{s,t\omega}^{\text{EC}}、U_{s,t\omega}^{\text{ED}} \in \{0,1\} \quad U_{s,t\omega}^{\text{EC}} + U_{s,t\omega}^{\text{ED}} \leq 1$$

分别为储能电站充放电功率; $U_{s,t\omega}^{\text{EC}}$ 、 $U_{s,t\omega}^{\text{ED}}$ 分别为储能电站充放电状态; $P_{\min}^{\text{EC}}$ 、 $P_{\max}^{\text{EC}}$ 、 $P_{\min}^{\text{ED}}$ 、 $P_{\max}^{\text{ED}}$ 依次为储能电站充放电功率的上下限;

[0032] 储能系统容量约束: $E_{s,t\omega} = (1 - \varepsilon) E_{s,t-1\omega} + (\eta_c P_{s,t\omega}^{\text{EC}} - P_{s,t\omega}^{\text{ED}}) \Delta t / E_{\text{all}}$, 其中, $E_{s,t\omega}$ 为

$$E_{\min} \leq E_{s,t\omega} \leq E_{\max}$$

场景 ω 下t时刻储能电站的储能状态; ε 为储能电站自损耗率; η_c 为充电效率; E_{all} 为储能电站总容量; $E_{\max}$ 为容量状态的上限值; $E_{\min}$ 为容量状态的下限值;

[0033] 始末储能能量平衡约束: $|E_{s,T\omega} - E_{s,0\omega}| \leq \Delta E$, 其中, $E_{s,T\omega}$ 代表储能电站初始时刻; $E_{s,0\omega}$ 为末尾时刻的容量状态; ΔE 为始末时刻允许的容量偏差值。

[0034] 结合第一方面, 在一些可能的实现方式中, 分段函数线性化的步骤具体包括: 结合五个0-1变量 z_i 和六个连续变量 w_i 对支付碳税的碳排放量和碳税成本进行线性化表达, 支付碳税的碳排放量的线性化表达式为:

$$Q_{\text{TA}} = Q_1 w_2 + 2Q_1 w_3 + 3Q_1 w_4 + 4Q_1 w_5 + 5Q_1 w_6$$

[0036] 其中, Q_{TA} 为支付碳税的碳排放量; Q_1 为碳税区间长度;

$$[0037] \quad \sum_{n=1}^6 w_n = 1 \quad \sum_{n=1}^5 z_n = 1 \quad w_1 \leq z_1, w_2 \leq z_1 + z_2, \dots, w_5 \leq z_4 + z_5, w_6 \leq z_5;$$

[0038] 碳税成本的线性化表达式为:

$$[0039] \quad C_{\text{TA}} = R_1 Q_1 w_2 + R_1 Q_1 (2 + \alpha) w_3 + R_1 Q_1 (3 + 3\alpha) w_4 + R_1 Q_1 (4 + 6\alpha) w_5 + R_1 Q_1 (5 + 10\alpha) w_6$$

[0040] 其中, C_{TA} 为碳税成本; R_1 为基础税率; α 为税率增长幅度;

[0041] 蝙蝠算法的步骤具体包括:

[0042] 初始化电力系统的网架结构、碳价、碳税税率等模型参数; 初始化蝙蝠速度、响度、脉冲频率等算法参数;

[0043] 随机初始化蝙蝠种群位置与速度, 每个蝙蝠的位置代表场景替代系数的取值;

[0044] 产生随机数, 确定更新蝙蝠个体位置计算式, 将蝙蝠位置传入电力系统低碳经济调度模型, 得到所有碳交易价格场景下系统碳排放量, 计算期望运行成本;

[0045] 根据模型返回值获取蝙蝠适应度, 执行全局搜索, 计算最佳蝙蝠个体, 执行局部搜索, 更新个体最优值、个体位置、响度和脉冲频率, 具体方法为:

$$[0046] \quad A_t = A_r A_{t-1}$$

$$[0047] \quad r_t = r_0 * (1 - e^{-R_f * t})$$

[0048] 其中, A_t 、 A_{t-1} 为第 t 代与 $t-1$ 代中蝙蝠算法的响度; A_f 为响度衰减系数; r_t 第 t 代中蝙蝠算法的脉冲发射率; r_0 为初始脉冲发射率; R_f 为脉冲衰减系数;

[0049] 重复产生随机数以后的步骤直到算法满足收敛条件, 收敛条件为前后两次的全局最优值之差小于给定的阈值或者算法循环次数达到最大循环次数;

[0050] 输出结果, 算法输出结果为每个场景下的替代系数取值和综合考虑所有场景的系统调度计划。

[0051] 结合第一方面, 在一些可能的实现方式中, 根据火电机组的运行数据和碳交易价格的数据, 建立碳税与碳交易替代效应模型, 包括: 根据碳交易价格的数据, 采用几何布朗运动方程描述碳交易价格不确定性的波动特征, 基于波动特征和随机场景法, 建立碳交易价格模型; 根据碳交易价格模型, 建立碳交易成本函数和碳税成本函数; 根据火电机组的运行数据、碳交易成本函数和碳税成本函数, 建立碳税与碳交易替代效应模型; 其中, 波动特征通过以下公式计算:

$$[0052] \quad dP_{\text{ctra}}(t) = \mu P_{\text{ctra}}(t) dt + \sigma P_{\text{ctra}}(t) d_{B(t)}$$

[0053] 其中, $P_{\text{ctra}}(t)$ 碳交易价格; $dP_{\text{ctra}}(t)$ 为碳价的不确定性量; μ 为碳价的期望增长率; dt 为时间增量; 方差 σ 表示碳排放权交易价格波动率; $d_{B(t)}$ 为标准维纳过程增量。

[0054] 结合第一方面, 在一些可能的实现方式中, 碳交易成本根据碳交易成本函数得到, 碳交易成本函数为:

$$[0055] \quad \begin{cases} C_{\text{TR}}^{\omega} = \lceil \mu_{\omega} \rceil C_{\text{TR},m} + P_{\text{ctra}}^{\omega} Q_{\text{TR}}^{\omega} \\ C_{\text{TR}} = \sum_{\omega \in \Omega} \pi_{\omega} C_{\text{TR}}^{\omega} \end{cases}$$

[0056] 其中, C_{TR}^{ω} 为场景 ω 下的碳交易成本; $\lceil \mu_{\omega} \rceil$ 为场景 ω 下替代系数 μ_{ω} 的向上取整值; $C_{\text{TR},m}$ 为碳交易市场的基础交易费用; Q_{TR}^{ω} 为场景 ω 下分配于购买碳排放许可证的碳排放量; Ω 为场景集合; 场景 ω 对应特定的碳交易价格为 P_{ctra}^{ω} ; 场景发生概率 π_{ω} 。结合第一方面, 在一些可能的实现方式中, 碳税成本根据碳税成本函数得到, 碳税成本函数为:

$$[0057] \quad C_{\text{TA}} = \begin{cases} R_1 Q_{\text{TA}}, & 0 \leq Q_{\text{TA}} < Q_1 \\ R_1 Q_1 + R_1 (1 + \alpha) (Q_{\text{TA}} - Q_1), & Q_1 \leq Q_{\text{TA}} < 2Q_1 \\ R_1 Q_1 (2 + \alpha) + R_1 (1 + 2\alpha) (Q_{\text{TA}} - 2Q_1), & 2Q_1 \leq Q_{\text{TA}} < 3Q_1 \\ R_1 Q_1 (3 + 3\alpha) + R_1 (1 + 3\alpha) (Q_{\text{TA}} - 3Q_1), & 3Q_1 \leq Q_{\text{TA}} < 4Q_1 \\ R_1 Q_1 (4 + 6\alpha) + R_1 (1 + 4\alpha) (Q_{\text{TA}} - 4Q_1), & 4Q_1 \leq Q_{\text{TA}} < 5Q_1 \end{cases}$$

[0058] 其中, C_{TA} 为碳税成本, Q_{TA} 为支付碳税的碳排放量, R_1 为基础税率; Q_1 为碳税区间长度; α 为税率增长幅度。

[0059] 第二方面, 本申请实施例提供了一种电力系统低碳经济调度装置, 包括:

[0060] 获取模块, 用于获取至少一个历史调度周期内电力系统的碳捕集设备、储能电站和火电机组的运行数据, 以及至少一个历史调度周期内的碳交易价格的数据;

[0061] 模型建立模块, 用于根据火电机组的运行数据和碳交易价格的数据, 建立碳税与碳交易替代效应模型; 根据碳捕集设备、储能电站和火电机组的运行数据, 以及碳税与碳交易替代效应模型, 建立低碳经济调度模型;

[0062] 优化模块, 用于采用分段函数线性化和蝙蝠算法对低碳经济调度模型进行优化,

得到电力系统下一调度周期的低碳经济调度策略,并基于下一调度周期的低碳经济调度策略,对电力系统的装置做出相应调整。

[0063] 第三方面,本申请实施例提供了一种调度装置,包括:处理器和存储器,该存储器用于存储计算机程序,所述处理器执行所述计算机程序时实现如第一方面任一项所述的电力系统低碳经济调度方法。

[0064] 第四方面,本申请实施例提供了一种计算机可读存储介质,所述计算机可读存储介质存储有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现如第一方面任一项所述的电力系统低碳经济调度方法。

[0065] 第五方面,本申请实施例提供了一种计算机程序产品,当计算机程序产品在调度装置上运行时,使得调度装置执行上述第一方面中任一项所述的电力系统低碳经济调度方法。

[0066] 本申请实施例与现有技术相比存在的有益效果是:

[0067] 本申请实施例建立了碳税与碳交易替代效应模型,故可以定量分析碳税和碳交易二者之间的替代效应,为低碳经济调度策略提供了指导方向,使得电力系统的装置可以做出相应调整,因此形成以清洁低碳、安全高效为核心的电力系统。

[0068] 应当理解的是,以上的一般描述和后文的细节描述仅是示例性和解释性的,并不能限制本说明书。

附图说明

[0069] 为了更清楚地说明本申请实施例中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本申请的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动性的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0070] 图1是本申请一实施例提供的电力系统低碳经济调度方法的应用场景示意图;

[0071] 图2是本申请一实施例提供的电力系统低碳经济调度方法的流程示意图;

[0072] 图3为A地区电力系统网架结构图;

[0073] 图4为抽取出的不同场景对应的碳交易价格的示意图;

[0074] 图5为电力系统在不同碳交易价格场景下碳排放量构成的示意图;

[0075] 图6为不同碳交易价格场景下碳排放量分配结果与替代系数的关系图;

[0076] 图7为替代系数、系统碳排放量与碳价的关系图;

[0077] 图8是本申请实施例提供的电力系统低碳经济调度装置的结构示意图;

[0078] 图9是本申请实施例提供的调度装置的结构示意图。

具体实施方式

[0079] 以下描述中,为了说明而不是为了限定,提出了诸如特定系统结构、技术之类的具体细节,以便透彻理解本申请实施例。然而,本领域的技术人员应当清楚,在没有这些具体细节的其它实施例中也可以实现本申请。在其它情况中,省略对众所周知的系统、装置、电路以及方法的详细说明,以免不必要的细节妨碍本申请的描述。

[0080] 应当理解,当在本申请说明书和所附权利要求书中使用时,术语“包括”指示所描

述特征、整体、步骤、操作、元素和/或组件的存在,但并不排除一个或多个其它特征、整体、步骤、操作、元素、组件和/或其集合的存在或添加。

[0081] 还应当理解,在本申请说明书和所附权利要求书中使用的术语“和/或”是指相关列出的项中的一个或多个的任何组合以及所有可能组合,并且包括这些组合。

[0082] 如在本申请说明书和所附权利要求书中所使用的那样,术语“如果”可以依据上下文被解释为“当...时”或“一旦”或“响应于确定”或“响应于检测到”。类似地,短语“如果确定”或“如果检测到[所描述条件或事件]”可以依据上下文被解释为意指“一旦确定”或“响应于确定”或“一旦检测到[所描述条件或事件]”或“响应于检测到[所描述条件或事件]”。

[0083] 另外,在本申请说明书和所附权利要求书的描述中,术语“第一”、“第二”、“第三”等仅用于区分描述,而不能理解为指示或暗示相对重要性。

[0084] 在本申请说明书中描述的参考“一个实施例”或“一些实施例”等意味着在本申请的一个或多个实施例中包括结合该实施例描述的特定特征、结构或特点。由此,在本说明书中的不同之处出现的语句“在一个实施例中”、“在一些实施例中”、“在其他一些实施例中”、“在另外一些实施例中”等不是必然都参考相同的实施例,而是意味着“一个或多个但不是所有的实施例”,除非是以其他方式另外特别强调。术语“包括”、“包含”、“具有”及它们的变形都意味着“包括但不限于”,除非是以其他方式另外特别强调。

[0085] 随着“碳达峰、碳中和”目标和“四个革命、一个合作”能源安全新战略的提出,电力系统面临能源转型升级的需求,亟需构建以清洁低碳、安全高效为核心的用能体系。对于电力系统而言,碳排放具有负外部性,其本身对系统运行经济效益并没有直接影响。目前大体上存在两类碳规制:碳税制和碳交易制。然而,现有研究成果大多聚焦于单一碳规制下电力系统的优化运行方法,较少研究涉及到碳税和碳交易替代效应的建模过程,且往往忽略了碳交易价格波动对电力系统低碳调度策略的影响,导致低碳调度策略不合理,进而导致在这些策略控制下的电力系统的能量利用率低,节能性差。

[0086] 基于上述问题,本申请实施例中的电力系统低碳经济调度方法,建立了碳税与碳交易替代效应模型,故可以定量分析碳税和碳交易二者之间的替代效应,为低碳经济调度策略提供了指导方向,使得电力系统的装置可以做出相应调整,因此形成以清洁低碳、安全高效为核心的电力系统。

[0087] 举例说明,本申请实施例可以应用到如图1所示的示例性场景中。在该场景中,电力系统低碳经济调度数据获取设备10采集电力系统低碳经济调度所需的数据,并将其发送给电力系统低碳经济调度处理设备20。

[0088] 以下结合图1对本申请的可视化交互方法进行详细说明。

[0089] 图2是本申请一实施例提供的电力系统低碳经济调度方法的示意性流程图,参照图2,对该电力系统低碳经济调度方法的详述如下:

[0090] 在步骤101中,获取至少一个历史调度周期内电力系统的碳捕集设备、储能电站和火电机组的运行数据,以及至少一个历史调度周期内的碳交易价格的数据。

[0091] 在步骤102中,根据火电机组的运行数据和碳交易价格的数据,建立碳税与碳交易替代效应模型;根据碳捕集设备、储能电站和火电机组的运行数据,以及碳税与碳交易替代效应模型,建立低碳经济调度模型。

[0092] 示例性的,步骤102,可以包括:

[0093] 步骤一,根据碳交易价格的数据,采用几何布朗运动方程描述碳交易价格不确定性的波动特征,基于波动特征和随机场景法,建立碳交易价格模型;

[0094] 步骤二,根据碳交易价格模型,建立碳交易成本函数和碳税成本函数;

[0095] 步骤三,根据火电机组的运行数据、碳交易成本函数和碳税成本函数,建立碳税与碳交易替代效应模型;其中,波动特征通过以下公式计算:

$$[0096] \quad dP_{\text{ctra}}(t) = \mu P_{\text{ctra}}(t) dt + \sigma P_{\text{ctra}}(t) d_B(t)$$

[0097] 其中, $P_{\text{ctra}}(t)$ 碳交易价格; $dP_{\text{ctra}}(t)$ 为碳价的不确定性量; μ 为碳价的期望增长率; dt 为时间增量; 方差 σ 表示碳排放权交易价格波动率; $d_B(t)$ 为标准维纳过程增量。

[0098] 示例性的,碳交易成本根据碳交易成本函数得到,碳交易成本函数为:

$$[0099] \quad \begin{cases} C_{\text{TR}}^{\omega} = [\mu_{\omega}] C_{\text{TR},m} + P_{\text{ctra}}^{\omega} Q_{\text{TR}}^{\omega} \\ C_{\text{TR}} = \sum_{\omega \in \Omega} \pi_{\omega} C_{\text{TR}}^{\omega} \end{cases}$$

[0100] 其中, C_{TR}^{ω} 为场景 ω 下的碳交易成本; $[\mu_{\omega}]$ 为场景 ω 下替代系数 μ_{ω} 的向上取整值; $C_{\text{TR},m}$ 为碳交易市场的基础交易费用; Q_{TR}^{ω} 为场景 ω 下分配于购买碳排放许可证的碳排放量; Ω 为场景集合; 场景 ω 对应特定的碳交易价格为 P_{ctra}^{ω} ; 场景发生概率 π_{ω} 。示例性的,碳税成本根据碳税成本函数得到,碳税成本函数为:

$$[0101] \quad C_{\text{TA}} = \begin{cases} R_1 Q_{\text{TA}}, & 0 \leq Q_{\text{TA}} < Q_1 \\ R_1 Q_1 + R_1 (1 + \alpha) (Q_{\text{TA}} - Q_1), & Q_1 \leq Q_{\text{TA}} < 2Q_1 \\ R_1 Q_1 (2 + \alpha) + R_1 (1 + 2\alpha) (Q_{\text{TA}} - 2Q_1), & 2Q_1 \leq Q_{\text{TA}} < 3Q_1 \\ R_1 Q_1 (3 + 3\alpha) + R_1 (1 + 3\alpha) (Q_{\text{TA}} - 3Q_1), & 3Q_1 \leq Q_{\text{TA}} < 4Q_1 \\ R_1 Q_1 (4 + 6\alpha) + R_1 (1 + 4\alpha) (Q_{\text{TA}} - 4Q_1), & 4Q_1 \leq Q_{\text{TA}} < 5Q_1 \end{cases}$$

[0102] 其中, C_{TA} 为碳税成本, Q_{TA} 为支付碳税的碳排放量, R_1 为基础税率; Q_1 为碳税区间长度; α 为税率增长幅度。

[0103] 示例性的,碳税与碳交易替代效应模型满足一个调度周期内电力系统的碳排放量超过初始碳排放配额的条件时的模型;碳税与碳交易替代效应模型为:

$$[0104] \quad Q_{\text{T}} = Q_{\text{GP}} + Q_{\text{TA}} + Q_{\text{TR}}$$

$$[0105] \quad Q_{\text{TR}} = \mu (Q_{\text{T}} - Q_{\text{GP}})$$

$$[0106] \quad C_{\text{T}} = C_{\text{TA}} + C_{\text{TR}}$$

[0107] 其中, Q_{GP} 为电力系统的初始碳排放配额; Q_{TA} 为电力系统支付碳税的碳排放量; Q_{TR} 为购买的碳排放许可证的碳排放量; μ 为替代系数; C_{T} 为总碳排放成本; C_{TA} 为碳税成本; C_{TR} 为碳交易成本;

[0108] 其中,电力系统的初始碳排放配额根据火电机组的发电量和基准线法进行计算,具体通过下式进行计算:

$$[0109] \quad Q_{\text{GP}} = \delta_{\text{G}} \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T P_{i,t}^{\text{G}} \Delta t$$

[0110] 其中, δ_{G} 为单位发电量无偿碳排放配额; $P_{i,t}^{\text{G}}$ 为 t 时刻火电机组 i 的出力功率; Δt 单位调度时长; I 为系统中火电机组节点集合; T 为调度周期中总时刻数;

[0111] 电力系统的碳排放量包括外购的电力产生的碳排放量和火电机组燃煤产生的碳排放量,电力系统的碳排放量公式为:

$$[0112] \quad Q_T = Q_B + Q_G$$

$$[0113] \quad Q_B = \sum_{t=1}^T (a_1 + b_1 P_t^B \Delta t)$$

$$[0114] \quad Q_G = \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T (a_2 + b_2 P_{i,t}^G \Delta t)$$

[0115] 其中, Q_T 为电力系统的碳排放量; Q_B 为外购电力所产生的碳排放量; Q_G 为火电机组燃煤产生的碳排放量; a_1 、 b_1 为外购电量的碳排放计算参数; P_t^B 为t时刻从电力市场中购买电功率; a_2 、 b_2 为火电机组的碳排放计算参数。

[0116] 示例性的,低碳经济调度模型为:

$$[0117] \quad F = \min_{\Psi_1} C_1 + \min_{\Psi_2} \sum_{\omega \in \Omega} \pi_{\omega} C_{2\omega}$$

$$[0118] \quad C_1 = \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T (C_i^F U_{i,t}^C + C_i^S V_{i,t}^S + C_i^D V_{i,t}^D)$$

$$[0119] \quad C_{2\omega} = \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T C_i^V P_{i,t\omega}^C + \lambda_t^B P_{t\omega}^B + C_{TR}^{\omega} + C_{TA}^{\omega}$$

[0120] 其中, Ψ_1 、 Ψ_2 为调度一阶段和二阶段的决策变量集合,调度一阶段为所有场景下相同的基础成本,调度二阶段为不同场景下对应的成本; C_1 为一阶段机组启动和停止成本; $C_{2\omega}$ 为场景 ω 下二阶段系统运行成本; C_i^F 为机组i的运行固定成本; C_i^S 为机组i的启动成本、 C_i^D 为机组i的停止成本; $U_{i,t}^C$ 为t时刻下机组i的运行状态; $V_{i,t}^S$ 为t时刻下机组i的启动动作变量、 $V_{i,t}^D$ 为t时刻下机组i的停止动作变量; C_i^V 为机组i的可变运行成本; $P_{i,t\omega}^C$ 为场景 ω 下t时刻火电机组出力; λ_t^B 为t时刻购电价格; $P_{t\omega}^B$ 为场景 ω 下t时刻购电功率; C_{TA}^{ω} 为场景 ω 下碳税成本;

[0121] 低碳经济调度模型的约束条件包括:碳捕集设备运行约束、储能电站运行约束、火电机组运行约束和系统及网络功率平衡约束;

[0122] 碳捕集设备运行约束具体包括:

$$[0123] \quad \begin{aligned} P_{i,t\omega}^{CCS} &= U_{i,t\omega}^{CCS} P_m^{CCS} + P_{i,t\omega}^{CCS} \\ P_{i,t\omega}^{CCS} &= W_i Q_{i,t\omega}^{CCS} \end{aligned} \quad \text{其中, } P_{i,t\omega}^{CCS}、P_m^{CCS}、P_{i,t\omega}^{CCS} \text{ 分别为}$$

场景 ω 下t时刻碳捕集设备i的总能耗、固定能耗和运行能耗; $U_{i,t\omega}^{CCS}$ 为碳捕集设备运行状态; W_i 为碳捕集设备i处理单位 CO_2 所需的运行能耗; $Q_{i,t\omega}^{CCS}$ 为场景 ω 下t时刻碳捕集设备i捕获的二氧化碳量;

[0124] 碳捕集电厂总输出功率: $P_{i,t\omega}^T = P_{i,t\omega}^G - P_{i,t\omega}^{CCS}$,其中, $P_{i,t\omega}^T$ 为场景 ω 下t时刻碳捕集电厂i向系统中注入的功率;

[0125] 碳捕集设备捕获的二氧化碳量: $Q_{i,t\omega}^{CCS} = \lambda_i^{CCS} \chi_{i,t\omega}^{CCS} Q_{i,t\omega}^G - Q_{i,t\omega}^C + Q_{i,t\omega}^D$,其中, λ_i^{CCS} 为

碳捕集设备i的烟气分流比; $\chi_{i,t\omega}^{CCS}$ 为场景 ω 下t时刻碳捕集设备i捕获水平; $Q_{i,t\omega}^C$ 、 $Q_{i,t\omega}^D$ 分别为碳捕集设备i中储液罐释放或储存的碳排放量;

[0126] 储能电站运行约束具体包括:

$$U_{s,t\omega}^{EC} P_{\min}^{EC} \leq P_{s,t\omega}^{EC} \leq U_{s,t\omega}^{EC} P_{\max}^{EC}$$

[0127] 储能电站充放电功率约束: $U_{s,t\omega}^{ED} P_{\min}^{ED} \leq P_{s,t\omega}^{ED} \leq U_{s,t\omega}^{ED} P_{\max}^{ED}$, 其中, $P_{s,t\omega}^{EC}$ 、 $P_{s,t\omega}^{ED}$

$$U_{s,t\omega}^{EC}, U_{s,t\omega}^{ED} \in \{0,1\} \quad U_{s,t\omega}^{EC} + U_{s,t\omega}^{ED} \leq 1$$

分别为储能电站充放电功率; $U_{s,t\omega}^{EC}$ 、 $U_{s,t\omega}^{ED}$ 分别为储能电站充放电状态; $P_{\min}^{EC}$ 、 $P_{\max}^{EC}$ 、 $P_{\min}^{ED}$ 、 $P_{\max}^{ED}$ 依次为储能电站充放电功率的上下限;

[0128] 储能系统容量约束: $E_{s,t\omega} = (1 - \varepsilon) E_{s,t-1\omega} + (\eta_c P_{s,t\omega}^{EC} - P_{s,t\omega}^{ED}) \Delta t / E_{all}$, 其中, $E_{s,t\omega}$ 为
 $E_{\min} \leq E_{s,t\omega} \leq E_{\max}$

场景 ω 下t时刻储能电站的储能状态; ε 为储能电站自损耗率; η_c 为充电效率; E_{all} 为储能电站总容量; $E_{\max}$ 为容量状态的上限值; $E_{\min}$ 为容量状态的下限值;

[0129] 始末储存能量平衡约束: $|E_{s,T\omega} - E_{s,0\omega}| \leq \Delta E$, 其中, $E_{s,T\omega}$ 代表储能电站初始时刻; $E_{s,0\omega}$ 为末尾时刻的容量状态; ΔE 为始末时刻允许的容量偏差值。

[0130] 示例性的, 系统及网络功率平衡约束包括:

[0131] 线路潮流约束:

$$[0132] \quad f_{l,t\omega} = B_l (\theta_{t\omega}^{l+} - \theta_{t\omega}^{l-})$$

[0133] 其中, $f_{l,t\omega}$ 为场景 ω 下t时刻线路1的潮流值; B_l 为线路1的导纳值; $\theta_{t\omega}^{l+}$ 、 $\theta_{t\omega}^{l-}$ 为场景 ω 下t时刻线路1始末节点相角。

[0134] 线路潮流上下限约束:

$$[0135] \quad -F_{l,\max} \leq f_{l,t\omega} \leq F_{l,\max}$$

[0136] 其中, $F_{l,\max}$ 为线路1潮流限值。

[0137] 系统功率平衡约束:

$$[0138] \quad \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T (P_{i,t\omega}^G - P_{i,t\omega}^{CCS}) + \eta_D \sum_{s \in S} P_{s,t\omega}^{ED} + P_{t\omega}^P + P_{t\omega}^W + P_{t\omega}^B = \sum_{s \in S} P_{s,t\omega}^{EC} + \sum_{k \in K} P_{k,t\omega}^L$$

[0139] 式中, η_D 为储能电站放电效率; S 为储能电站集合; $P_{t\omega}^P$ 、 $P_{t\omega}^W$ 分别为光伏、风电机组出力; $P_{k,t\omega}^L$ 为节点负荷值; K 为负荷集合。

[0140] 在步骤103中, 采用分段函数线性化和蝙蝠算法对低碳经济调度模型进行优化, 得到电力系统下一调度周期的低碳经济调度策略, 并基于下一调度周期的低碳经济调度策略, 对电力系统的装置做出相应调整。

[0141] 示例性的, 分段函数线性化的步骤具体包括: 结合五个0-1变量 z_i 和六个连续变量 w_i 对支付碳税的碳排放量和碳税成本进行线性化表达, 支付碳税的碳排放量的线性化表达式为:

$$[0142] \quad Q_{TA} = Q_1 w_2 + 2Q_1 w_3 + 3Q_1 w_4 + 4Q_1 w_5 + 5Q_1 w_6$$

[0143] 其中, Q_{TA} 为支付碳税的碳排放量; Q_1 为碳税区间长度;

[0144] $\sum_{n=1}^6 w_n = 1 \quad \sum_{n=1}^5 z_n = 1 \quad w_1 \leq z_1, w_2 \leq z_1 + z_2, \dots, w_5 \leq z_4 + z_5, w_6 \leq z_5$;

[0145] 碳税成本的线性化表达公式为:

[0146] $C_{TA} = R_1 Q_1 w_2 + R_1 Q_1 (2 + \alpha) w_3 + R_1 Q_1 (3 + 3\alpha) w_4 + R_1 Q_1 (4 + 6\alpha) w_5 + R_1 Q_1 (5 + 10\alpha) w_6$

[0147] 其中, C_{TA} 为碳税成本; R_1 为基础税率; α 为税率增长幅度;

[0148] 示例性的, 蝙蝠算法的步骤具体包括:

[0149] 初始化电力系统的网架结构、碳价、碳税税率等模型参数; 初始化蝙蝠速度、响度、脉冲频率等算法参数;

[0150] 随机初始化蝙蝠种群位置与速度, 每个蝙蝠的位置代表场景替代系数的取值;

[0151] 产生随机数, 确定更新蝙蝠个体位置计算式, 将蝙蝠位置传入电力系统低碳经济调度模型, 得到所有碳交易价格场景下系统碳排放量, 计算期望运行成本;

[0152] 根据模型返回值获取蝙蝠适应度, 执行全局搜索, 计算最佳蝙蝠个体, 执行局部搜索, 更新个体最优值、个体位置、响度和脉冲频率, 具体方法为:

[0153] $A_t = A_f A_{t-1}$

[0154] $r_t = r_0 * (1 - e^{-R_f * t})$

[0155] 其中, A_t 、 A_{t-1} 为第 t 代与 $t-1$ 代中蝙蝠算法的响度; A_f 为响度衰减系数; r_t 第 t 代中蝙蝠算法的脉冲发射率; r_0 为初始脉冲发射率; R_f 为脉冲衰减系数;

[0156] 重复产生随机数以后的步骤直到算法满足收敛条件, 收敛条件为前后两次的全局最优值之差小于给定的阈值或者算法循环次数达到最大循环次数;

[0157] 输出结果, 算法输出结果为每个场景下的替代系数取值和综合考虑所有场景的系统调度计划。

[0158] 示例性的, 对电力系统的装置做出相应调整包括: 对碳捕集设备、储能电站和火电机组等的调整。

[0159] 上述电力系统低碳经济调度方法, 建立了碳税与碳交易替代效应模型, 故可以定量分析碳税和碳交易二者之间的替代效应, 为低碳经济调度策略提供了指导方向, 使得电力系统的装置可以做出相应调整, 因此形成以清洁低碳、安全高效为核心的电力系统。

[0160] 为了方便方案的理解, 基于A地区的实际参数进行仿真分析, 电力系统网架结构如图3所示。其中, 将火电厂G1~G4改造为碳捕集电厂, 风电光伏接入节点分别为节点31与节点36, 并在风光接入节点同步配置储能电站。系统与外界电力市场的联络线接入点为节点30, 具体分析如下:

[0161] 根据碳交易价格不确定性的拟合方程式, 模型采用蒙特卡洛模拟进行场景抽样, 图4为抽取出的不同场景对应的碳交易价格。

[0162] 以场景1为例, 通常来说在1:00-8:00时段以及23:00-24:00时段, 由于系统负荷较小, 且购电市场大多处于峰谷电价中的谷电价区间, 因此负荷需求主要由风光机组出力和购电功率满足。而在10:00-22:00时段, 系统负荷需求功率上升, 购电价格升高, 购电平均成本大于火电机组发电成本, 系统通过增加火电机组出力来满足地区负荷供电需求。储能电站在负荷低谷期和电价较低的时段储存多余电能, 而在用电高峰期释放电能满足部分负荷需求。此外, 碳捕集设备通过消耗部分火电功率, 捕集机组捕捉二氧化碳并进行封存处理,

从而有效降低碳捕集电厂自身碳排放量。结果表明通过整合低碳调度资源,协调不同设备出力,可有效挖掘系统运行的经济性和低碳性。

[0163] 图5为系统在不同碳交易价格场景下碳排放量构成。由于本文假定系统外购电量均来源于火电机组,并计算其碳排放参数,因此,碳规制整体强度的增加会使得系统在电价低谷时段减少从电力市场购买的电量,增加系统内部火电机组的出力,降低系统的碳排放成本。对比碳价较高的场景8、14和16和碳价较低的场景1和19可以看出,随着碳交易价格的提高,一方面,系统会倾向于使用火电机组发电替代从电力市场中购买电量,另一方面,碳捕集设备的碳捕获量也随之增加,降低了火电机组向系统中注入的发电功率,系统通过增加发电成本来减少调度周期内的剩余碳排放量,从而提升系统运行的经济、环境效益。

[0164] 图6和图7分别为不同碳交易价格场景下系统剩余碳排放量分配结果以及替代系数、系统剩余碳排放量与碳价的关系。可以看出,场景的碳交易价格越高,碳交易对碳税的替代效应越小(系统分配于支付碳税的碳排放量占比越大)。系统剩余碳排放量与场景的碳交易价格也呈负相关关系。如图7所示,当碳交易市场的碳价从34.8元/t提高到56.9元/t时,系统剩余碳排放量从7124.7t下降到4326.6t,这表明提高碳交易市场价格对电力系统的碳减排具有明显的促进作用。然而,过高的碳规制强度会增加系统发电成本负担,无法起到合理激励系统碳减排的作用。因此,在实际生产过程中需要适当控制碳交易价格的波动区间,将碳交易价格稳定在合理水平,这样可以更方便对电力系统的装置进行调整,达到低碳的目标。

[0165] 应理解,上述实施例中各步骤的序号的大小并不意味着执行顺序的先后,各过程的执行顺序应以其功能和内在逻辑确定,而不对本申请实施例的实施过程构成任何限定。

[0166] 对应于上文实施例所述的电力系统低碳经济调度方法,图8示出了本申请实施例提供的电力系统低碳经济调度装置的结构框图,为了便于说明,仅示出了与本申请实施例相关的部分。

[0167] 参见图8,本申请实施例中的电力系统低碳经济调度装置可以包括:获取模块301、模型建立模块302和优化模块303。

[0168] 可选的,获取模块301用于获取至少一个历史调度周期内电力系统的碳捕集设备、储能电站和火电机组的运行数据,以及至少一个历史调度周期内的碳交易价格的数据。

[0169] 可选的,模型建立模块302,用于根据火电机组的运行数据和碳交易价格的数据,建立碳税与碳交易替代效应模型;根据碳捕集设备、储能电站和火电机组的运行数据,以及碳税与碳交易替代效应模型,建立低碳经济调度模型。

[0170] 示例性的,根据火电机组的运行数据和碳交易价格的数据,建立碳税与碳交易替代效应模型,包括:根据碳交易价格的数据,采用几何布朗运动方程描述碳交易价格不确定性的波动特征,基于波动特征和随机场景法,建立碳交易价格模型;根据碳交易价格模型,建立碳交易成本函数和碳税成本函数;根据火电机组的运行数据、碳交易成本函数和碳税成本函数,建立碳税与碳交易替代效应模型;其中,波动特征通过以下公式计算:

$$[0171] \quad dP_{\text{ctra}}(t) = \mu P_{\text{ctra}}(t) dt + \sigma P_{\text{ctra}}(t) d_{B(t)}$$

[0172] 其中, $P_{\text{ctra}}(t)$ 碳交易价格; $dP_{\text{ctra}}(t)$ 为碳价的不确定性量; μ 为碳价的期望增长率; dt 为时间增量;方差 σ 表示碳排放权交易价格波动率; $d_{B(t)}$ 为标准维纳过程增量。

[0173] 示例性的,碳交易成本根据碳交易成本函数得到,碳交易成本函数为:

$$[0174] \quad \begin{cases} C_{TR}^{\omega} = \lceil \mu_{\omega} \rceil C_{TR,m} + P_{ctra}^{\omega} Q_{TR}^{\omega} \\ C_{TR} = \sum_{\omega \in \Omega} \pi_{\omega} C_{TR}^{\omega} \end{cases}$$

[0175] 其中, C_{TR}^{ω} 为场景 ω 下的碳交易成本; $\lceil \mu_{\omega} \rceil$ 为场景 ω 下替代系数 μ_{ω} 的向上取整值; $C_{TR,m}$ 为碳交易市场的基础交易费用; Q_{TR}^{ω} 为场景 ω 下分配于购买碳排放许可证的碳排放量; Ω 为场景集合; 场景 ω 对应特定的碳交易价格为 P_{ctra}^{ω} ; 场景发生概率 π_{ω} 。示例性的,碳税成本根据碳税成本函数得到,碳税成本函数为:

$$[0176] \quad C_{TA} = \begin{cases} R_1 Q_{TA}, & 0 \leq Q_{TA} < Q_1 \\ R_1 Q_1 + R_1 (1 + \alpha) (Q_{TA} - Q_1), & Q_1 \leq Q_{TA} < 2Q_1 \\ R_1 Q_1 (2 + \alpha) + R_1 (1 + 2\alpha) (Q_{TA} - 2Q_1), & 2Q_1 \leq Q_{TA} < 3Q_1 \\ R_1 Q_1 (3 + 3\alpha) + R_1 (1 + 3\alpha) (Q_{TA} - 3Q_1), & 3Q_1 \leq Q_{TA} < 4Q_1 \\ R_1 Q_1 (4 + 6\alpha) + R_1 (1 + 4\alpha) (Q_{TA} - 4Q_1), & 4Q_1 \leq Q_{TA} < 5Q_1 \end{cases}$$

[0177] 其中, C_{TA} 为碳税成本, Q_{TA} 为支付碳税的碳排放量, R_1 为基础税率; Q_1 为碳税区间长度; α 为税率增长幅度。

[0178] 示例性的,碳税与碳交易替代效应模型满足一个调度周期内电力系统的碳排放量超过初始碳排放配额的条件时的模型;碳税与碳交易替代效应模型为:

$$[0179] \quad Q_T = Q_{GP} + Q_{TA} + Q_{TR}$$

$$[0180] \quad Q_{TR} = \mu (Q_T - Q_{GP})$$

$$[0181] \quad C_T = C_{TA} + C_{TR}$$

[0182] 其中, Q_{GP} 为电力系统的初始碳排放配额; Q_{TA} 为电力系统支付碳税的碳排放量; Q_{TR} 为购买的碳排放许可证的碳排放量; μ 为替代系数; C_T 为总碳排放成本; C_{TA} 为碳税成本; C_{TR} 为碳交易成本;

[0183] 其中,电力系统的初始碳排放配额根据火电机组的发电量和基准线法进行计算,具体通过下式进行计算:

$$[0184] \quad Q_{GP} = \delta_G \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T P_{i,t}^G \Delta t$$

[0185] 其中, δ_G 为单位发电量无偿碳排放配额; $P_{i,t}^G$ 为 t 时刻火电机组 i 的出力功率; Δt 单位调度时长; I 为系统中火电机组节点集合; T 为调度周期中总时刻数;

[0186] 电力系统的碳排放量包括外购的电力产生的碳排放量和火电机组燃煤产生的碳排放量,电力系统的碳排放量公式为:

$$[0187] \quad Q_T = Q_B + Q_G$$

$$[0188] \quad Q_B = \sum_{t=1}^T (a_1 + b_1 P_t^B \Delta t)$$

$$[0189] \quad Q_G = \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T (a_2 + b_2 P_{i,t}^G \Delta t)$$

[0190] 其中, Q_T 为电力系统的碳排放量; Q_B 为外购电力所产生的碳排放量; Q_G 为火电机组

燃煤产生的碳排放量; a_1 、 b_1 为外购电量的碳排放计算参数; P_t^B 为t时刻从电力市场中购买电功率; a_2 、 b_2 为火发电机组的碳排放计算参数。

[0191] 示例性的,低碳经济调度模型为:

$$[0192] \quad F = \min_{\Psi_1} C_1 + \min_{\Psi_2} \sum_{\omega \in \Omega} \pi_{\omega} C_{2\omega}$$

$$[0193] \quad C_1 = \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T (C_i^F U_{i,t}^C + C_i^S V_{i,t}^S + C_i^D V_{i,t}^D)$$

$$[0194] \quad C_{2\omega} = \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T C_i^V P_{i,t\omega}^C + \lambda_t^B P_{t\omega}^B + C_{TR}^{\omega} + C_{TA}^{\omega}$$

[0195] 其中, Ψ_1 、 Ψ_2 为调度一阶段和二阶段的决策变量集合,调度一阶段为所有场景下相同的基础成本,调度二阶段为不同场景下对应的成本; C_1 为一阶段机组启动和停止成本; $C_{2\omega}$ 为场景 ω 下二阶段系统运行成本; C_i^F 为机组i的运行固定成本; C_i^S 为机组i的启动成本、 C_i^D 为机组i的停止成本; $U_{i,t}^C$ 为t时刻下机组i的运行状态; $V_{i,t}^S$ 为t时刻下机组i的启动动作变量、 $V_{i,t}^D$ 为t时刻下机组i的停止动作变量; C_i^V 为机组i的可变运行成本; $P_{i,t\omega}^C$ 为场景 ω 下t时刻火电机组出力; λ_t^B 为t时刻购电价格; $P_{t\omega}^B$ 为场景 ω 下t时刻购电功率; C_{TA}^{ω} 为场景 ω 下碳税成本;

[0196] 低碳经济调度模型的约束条件包括:碳捕集设备运行约束、储能电站运行约束、火电机组运行约束和系统及网络功率平衡约束;

[0197] 碳捕集设备运行约束具体包括:

$$[0198] \quad \text{碳捕集设备运行能耗: } \begin{matrix} P_{i,t\omega}^{CCS} = U_{i,t\omega}^{CCS} P_m^{CCS} + P_{i,t\omega}^{CCS} \\ P_{i,t\omega}^{CCS} = W_i Q_{i,t\omega}^{CCS} \end{matrix}, \text{ 其中, } P_{i,t\omega}^{CCS}、P_m^{CCS}、P_{i,t\omega}^{CCS} \text{ 分别为}$$

场景 ω 下t时刻碳捕集设备i的总能耗、固定能耗和运行能耗; $U_{i,t\omega}^{CCS}$ 为碳捕集设备运行状态; W_i 为碳捕集设备i处理单位CO₂所需的运行能耗; $Q_{i,t\omega}^{CCS}$ 为场景 ω 下t时刻碳捕集设备i捕获的二氧化碳量;

[0199] 碳捕集电厂总输出功率: $P_{i,t\omega}^T = P_{i,t\omega}^G - P_{i,t\omega}^{CCS}$,其中, $P_{i,t\omega}^T$ 为场景 ω 下t时刻碳捕集电厂i向系统中注入的功率;

[0200] 碳捕集设备捕获的二氧化碳量: $Q_{i,t\omega}^{CCS} = \lambda_i^{CCS} \chi_{i,t\omega}^{CCS} Q_{i,t\omega}^G - Q_{i,t\omega}^C + Q_{i,t\omega}^D$,其中, λ_i^{CCS} 为碳捕集设备i的烟气分流比; $\chi_{i,t\omega}^{CCS}$ 为场景 ω 下t时刻碳捕集设备i捕获水平; $Q_{i,t\omega}^C$ 、 $Q_{i,t\omega}^D$ 分别为碳捕集设备i中储液罐释放或储存的碳排放量;

[0201] 储能电站运行约束具体包括:

$$[0202] \quad \text{储能电站充放电功率约束: } \begin{matrix} U_{s,t\omega}^{EC} P_{\min}^{EC} \leq P_{s,t\omega}^{EC} \leq U_{s,t\omega}^{EC} P_{\max}^{EC} \\ U_{s,t\omega}^{ED} P_{\min}^{ED} \leq P_{s,t\omega}^{ED} \leq U_{s,t\omega}^{ED} P_{\max}^{ED} \end{matrix}, \text{ 其中, } P_{s,t\omega}^{EC}、P_{s,t\omega}^{ED} \\ U_{s,t\omega}^{EC}、U_{s,t\omega}^{ED} \in \{0,1\} \quad U_{s,t\omega}^{EC} + U_{s,t\omega}^{ED} \leq 1$$

分别为储能电站充放电功率; $U_{s,t\omega}^{\text{EC}}$ 、 $U_{s,t\omega}^{\text{ED}}$ 分别为储能电站充放电状态; $P_{\min}^{\text{EC}}$ 、 $P_{\max}^{\text{EC}}$ 、 $P_{\min}^{\text{ED}}$ 、 $P_{\max}^{\text{ED}}$ 依次为储能电站充放电功率的上下限;

[0203] 储能系统容量约束: $E_{s,t\omega} = (1 - \varepsilon) E_{s,t-1\omega} + (\eta_c P_{s,t\omega}^{\text{EC}} - P_{s,t\omega}^{\text{ED}}) \Delta t / E_{\text{all}}$, 其中, $E_{s,t\omega}$ 为
 $E_{\min} \leq E_{s,t\omega} \leq E_{\max}$

场景 ω 下 t 时刻储能电站的储能状态; ε 为储能电站自损耗率; η_c 为充电效率; E_{all} 为储能电站总容量; $E_{\max}$ 为容量状态的上限值; $E_{\min}$ 为容量状态的下限值;

[0204] 始末储存能量平衡约束: $|E_{s,T\omega} - E_{s,0\omega}| \leq \Delta E$, 其中, $E_{s,T\omega}$ 代表储能电站初始时刻; $E_{s,0\omega}$ 为末尾时刻的容量状态; ΔE 为始末时刻允许的容量偏差值。

[0205] 示例性的, 系统及网络功率平衡约束包括:

[0206] 线路潮流约束:

[0207] $f_{l,t\omega} = B_l (\theta_{l\omega}^{l+} - \theta_{l\omega}^{l-})$

[0208] 其中, $f_{l,t\omega}$ 为场景 ω 下 t 时刻线路 l 的潮流值; B_l 为线路 l 的导纳值; $\theta_{l\omega}^{l+}$ 、 $\theta_{l\omega}^{l-}$ 为场景 ω 下 t 时刻线路 l 始末节点相角。

[0209] 线路潮流上下限约束:

[0210] $-F_{l,\max} \leq f_{l,t\omega} \leq F_{l,\max}$

[0211] 其中, $F_{l,\max}$ 为线路 l 潮流限值。

[0212] 系统功率平衡约束:

[0213]
$$\sum_{i \in I} \sum_{t=1}^T (P_{i,t\omega}^G - P_{i,t\omega}^{\text{CCS}}) + \eta_D \sum_{s \in S} P_{s,t\omega}^{\text{ED}} + P_{t\omega}^P + P_{t\omega}^W + P_{t\omega}^B = \sum_{s \in S} P_{s,t\omega}^{\text{EC}} + \sum_{k \in K} P_{k,t\omega}^L$$

[0214] 式中, η_D 为储能电站放电效率; S 为储能电站集合; $P_{t\omega}^P$ 、 $P_{t\omega}^W$ 分别为光伏、风电机组出力; $P_{k,t\omega}^L$ 为节点负荷值; K 为负荷集合。

[0215] 可选的, 优化模块 303, 用于采用分段函数线性化和蝙蝠算法对低碳经济调度模型进行优化, 得到电力系统下一调度周期的低碳经济调度策略, 并基于下一调度周期的低碳经济调度策略, 对电力系统的装置做出相应调整。

[0216] 示例性的, 分段函数线性化的步骤具体包括: 结合五个 0-1 变量 z_i 和六个连续变量 w_i 对支付碳税的碳排放量和碳税成本进行线性化表达, 支付碳税的碳排放量的线性化表达式为:

[0217] $Q_{\text{TA}} = Q_1 w_2 + 2Q_1 w_3 + 3Q_1 w_4 + 4Q_1 w_5 + 5Q_1 w_6$

[0218] 其中, Q_{TA} 为支付碳税的碳排放量; Q_1 为碳税区间长度;

[0219]
$$\sum_{n=1}^6 w_n = 1 \quad \sum_{n=1}^5 z_n = 1 \quad w_1 \leq z_1, w_2 \leq z_1 + z_2, \dots, w_5 \leq z_4 + z_5, w_6 \leq z_5;$$

[0220] 碳税成本的线性化表达式为:

[0221] $C_{\text{TA}} = R_1 Q_1 w_2 + R_1 Q_1 (2 + \alpha) w_3 + R_1 Q_1 (3 + 3\alpha) w_4 + R_1 Q_1 (4 + 6\alpha) w_5 + R_1 Q_1 (5 + 10\alpha) w_6$

[0222] 其中, C_{TA} 为碳税成本; R_1 为基础税率; α 为税率增长幅度;

[0223] 示例性的, 蝙蝠算法的步骤具体包括:

[0224] 初始化电力系统的网架结构、碳价、碳税税率等模型参数; 初始化蝙蝠速度、响度、

脉冲频率等算法参数;

[0225] 随机初始化蝙蝠种群位置与速度,每个蝙蝠的位置代表场景替代系数的取值;

[0226] 产生随机数,确定更新蝙蝠个体位置计算式,将蝙蝠位置传入电力系统低碳经济调度模型,得到所有碳交易价格场景下系统碳排放量,计算期望运行成本;

[0227] 根据模型返回值获取蝙蝠适应度,执行全局搜索,计算最佳蝙蝠个体,执行局部搜索,更新个体最优值、个体位置、响度和脉冲频率,具体方法为:

[0228] $A_t = A_f A_{t-1}$

[0229] $r_t = r_0 * (1 - e^{-R_f * t})$

[0230] 其中, A_t 、 A_{t-1} 为第t代与t-1代中蝙蝠算法的响度; A_f 为响度衰减系数; r_t 第t代中蝙蝠算法的脉冲发射率; r_0 为初始脉冲发射率; R_f 为脉冲衰减系数;

[0231] 重复产生随机数以后的步骤直到算法满足收敛条件,收敛条件为前后两次的全局最优值之差小于给定的阈值或者算法循环次数达到最大循环次数;

[0232] 输出结果,算法输出结果为每个场景下的替代系数取值和综合考虑所有场景的系统调度计划。

[0233] 需要说明的是,上述装置/单元之间的信息交互、执行过程等内容,由于与本申请方法实施例基于同一构思,其具体功能及带来的技术效果,具体可参见方法实施例部分,此处不再赘述。

[0234] 所属领域的技术人员可以清楚地了解到,为了描述的方便和简洁,仅以上述各功能单元、模块的划分进行举例说明,实际应用中,可以根据需要而将上述功能分配由不同的功能单元、模块完成,即将所述装置的内部结构划分成不同的功能单元或模块,以完成以上描述的全部或者部分功能。实施例中的各功能单元、模块可以集成在一个处理单元中,也可以是各个单元单独物理存在,也可以两个或两个以上单元集成在一个单元中,上述集成的单元既可以采用硬件的形式实现,也可以采用软件功能单元的形式实现。另外,各功能单元、模块的具体名称也只是为了便于相互区分,并不用于限制本申请的保护范围。上述系统中单元、模块的具体工作过程,可以参考前述方法实施例中的对应过程,在此不再赘述。

[0235] 本申请实施例还提供了一种调度装置,参见图9,该调度装置500可以包括:至少一个处理器510、存储器520以及存储在所述存储器520中并可在所述至少一个处理器510上运行的计算机程序,所述处理器510执行所述计算机程序时实现上述任意各个方法实施例中的步骤,例如图2所示实施例中的步骤101至步骤103。或者,处理器510执行所述计算机程序时实现上述各装置实施例中各模块/单元的功能,例如图8所示模块301至303的功能。

[0236] 示例性的,计算机程序可以被分割成一个或多个模块/单元,一个或者多个模块/单元被存储在存储器520中,并由处理器510执行,以完成本申请。所述一个或多个模块/单元可以是能够完成特定功能的一系列计算机程序段,该程序段用于描述计算机程序在调度装置500中的执行过程。

[0237] 本领域技术人员可以理解,图9仅仅是调度装置的示例,并不构成对调度装置的限定,可以包括比图示更多或更少的部件,或者组合某些部件,或者不同的部件,例如输入输出设备、网络接入设备、总线等。

[0238] 处理器510可以是中央处理单元(Central Processing Unit,CPU),还可以是其他通用处理器、数字信号处理器(Digital Signal Processor,DSP)、专用集成电路

(Application Specific Integrated Circuit,ASIC)、现成可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array,FPGA)或者其他可编程逻辑器件、分立门或者晶体管逻辑器件、分立硬件组件等。通用处理器可以是微处理器或者该处理器也可以是任何常规的处理器等。

[0239] 存储器520可以是调度装置的内部存储单元,也可以是调度装置的外部存储设备,例如插接式硬盘,智能存储卡(Smart Media Card,SMC),安全数字(Secure Digital,SD)卡,闪存卡(Flash Card)等。所述存储器520用于存储所述计算机程序以及调度装置所需的其他程序和数据。所述存储器520还可以用于暂时地存储已经输出或者将要输出的数据。

[0240] 总线可以是工业标准体系结构(Industry Standard Architecture,ISA)总线、外部设备互连(Peripheral Component,PCI)总线或扩展工业标准体系结构(Extended Industry Standard Architecture,EISA)总线等。总线可以分为地址总线、数据总线、控制总线等。为便于表示,本申请附图中的总线并不限定仅有一根总线或一种类型的总线。

[0241] 本申请实施例提供的电力系统低碳经济调度方法可以应用于计算机、可穿戴设备、车载设备、平板电脑、笔记本电脑、上网本、手机等调度装置上,本申请实施例对调度装置的具体类型不作任何限制。

[0242] 本申请实施例还提供了一种计算机可读存储介质,所述计算机可读存储介质存储有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现可实现上述电力系统低碳经济调度方法各个实施例中的步骤。

[0243] 本申请实施例提供了一种计算机程序产品,当计算机程序产品在移动终端上运行时,使得移动终端执行时实现可实现上述电力系统低碳经济调度方法各个实施例中的步骤。

[0244] 所述集成的单元如果以软件功能单元的形式实现并作为独立的产品销售或使用时,可以存储在一个计算机可读存储介质中。基于这样的理解,本申请实现上述实施例方法中的全部或部分流程,可以通过计算机程序来指令相关的硬件来完成,所述的计算机程序可存储于一计算机可读存储介质中,该计算机程序在被处理器执行时,可实现上述各个方法实施例的步骤。其中,所述计算机程序包括计算机程序代码,所述计算机程序代码可以为源代码形式、对象代码形式、可执行文件或某些中间形式等。所述计算机可读介质至少可以包括:能够将计算机程序代码携带到拍照装置/调度装置的任何实体或装置、记录介质、计算机存储器、只读存储器(ROM,Read-Only Memory)、随机存取存储器(RAM,Random Access Memory)、电载波信号、电信信号以及软件分发介质。例如U盘、移动硬盘、磁碟或者光盘等。在某些司法管辖区,根据立法和专利实践,计算机可读介质不可以是电载波信号和电信信号。

[0245] 在上述实施例中,对各个实施例的描述都各有侧重,某个实施例中没有详述或记载的部分,可以参见其它实施例的相关描述。

[0246] 本领域普通技术人员可以意识到,结合本文中所公开的实施例描述的各示例的单元及算法步骤,能够以电子硬件、或者计算机软件和电子硬件的结合来实现。这些功能究竟以硬件还是软件方式来执行,取决于技术方案的特定应用和设计约束条件。专业技术人员可以对每个特定的应用来使用不同方法来实现所描述的功能,但是这种实现不应认为超出本申请的范围。

[0247] 在本申请所提供的实施例中,应该理解到,所揭露的装置/网络设备和方法,可以通过其它的方式实现。例如,以上所描述的装置/网络设备实施例仅仅是示意性的,例如,所述模块或单元的划分,仅仅为一种逻辑功能划分,实际实现时可以有另外的划分方式,例如多个单元或组件可以结合或者可以集成到另一个系统,或一些特征可以忽略,或不执行。另一点,所显示或讨论的相互之间的耦合或直接耦合或通讯连接可以是通过一些接口,装置或单元的间接耦合或通讯连接,可以是电性,机械或其它的形式。

[0248] 所述作为分离部件说明的单元可以是或者也可以不是物理上分开的,作为单元显示的部件可以是或者也可以不是物理单元,即可以位于一个地方,或者也可以分布到多个网络单元上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部单元来实现本实施例方案的目的。

[0249] 以上所述实施例仅用以说明本申请的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述实施例对本申请进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本申请各实施例技术方案的精神和范围,均应包含在本申请的保护范围之内。

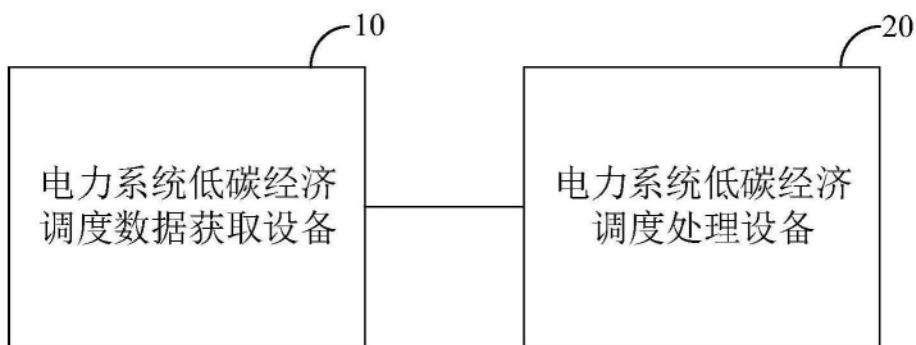


图1

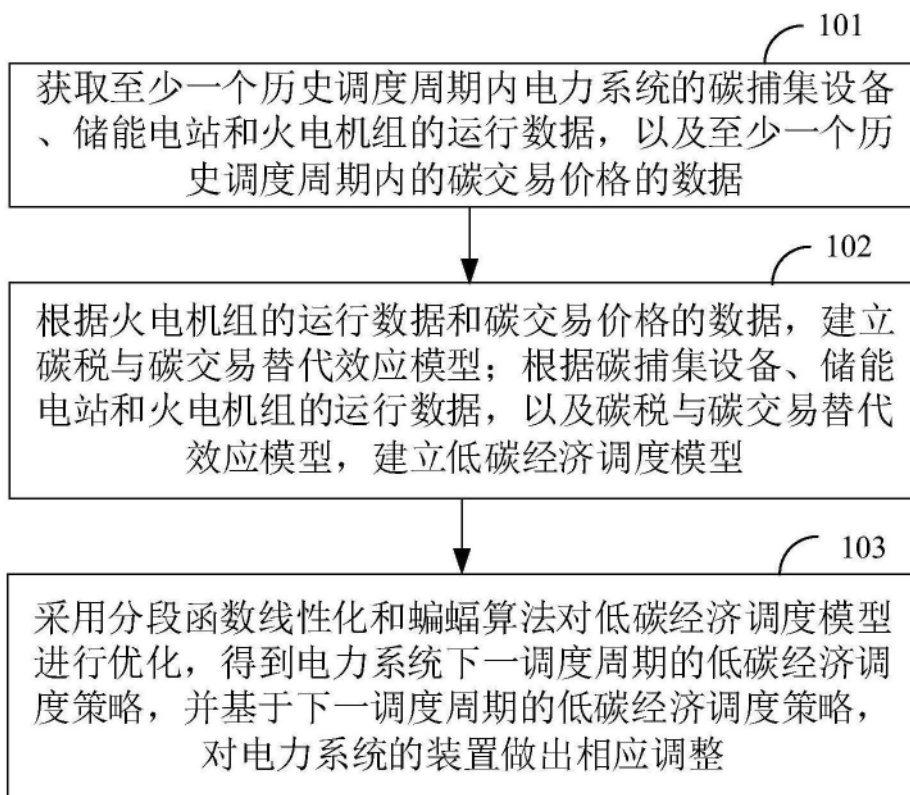


图2

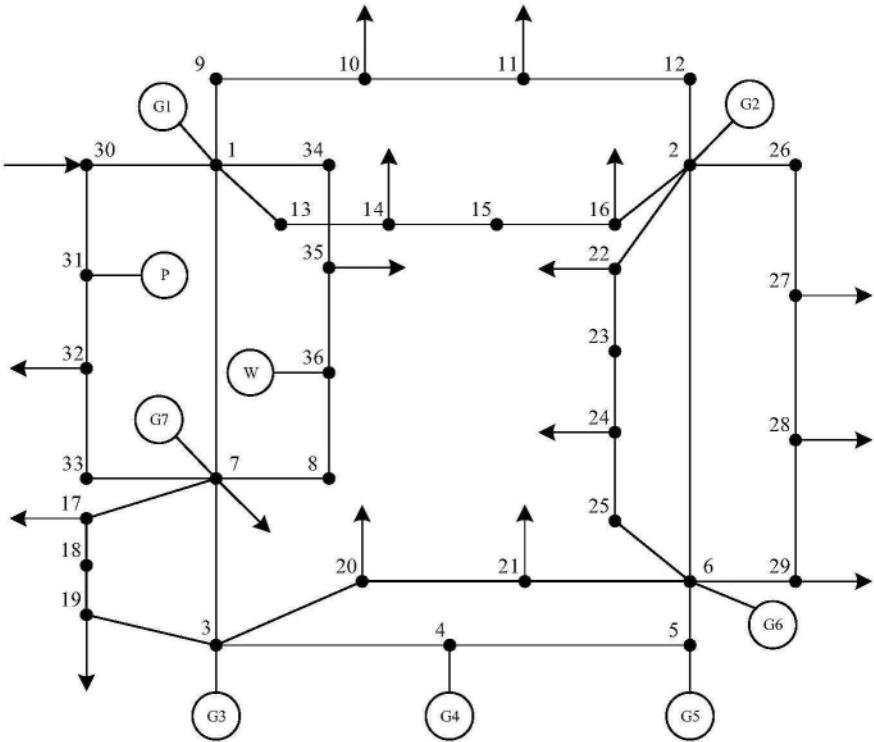


图3

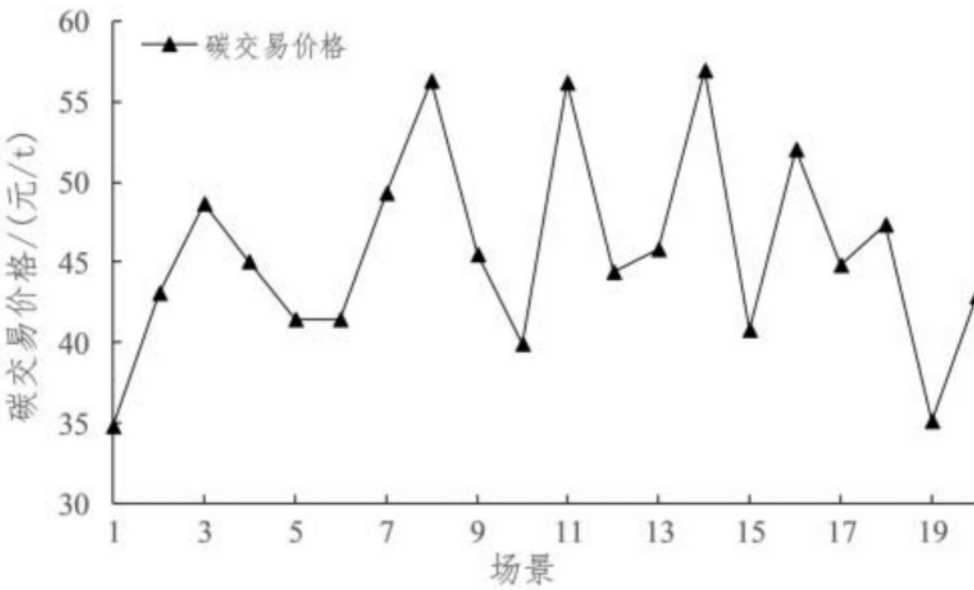


图4

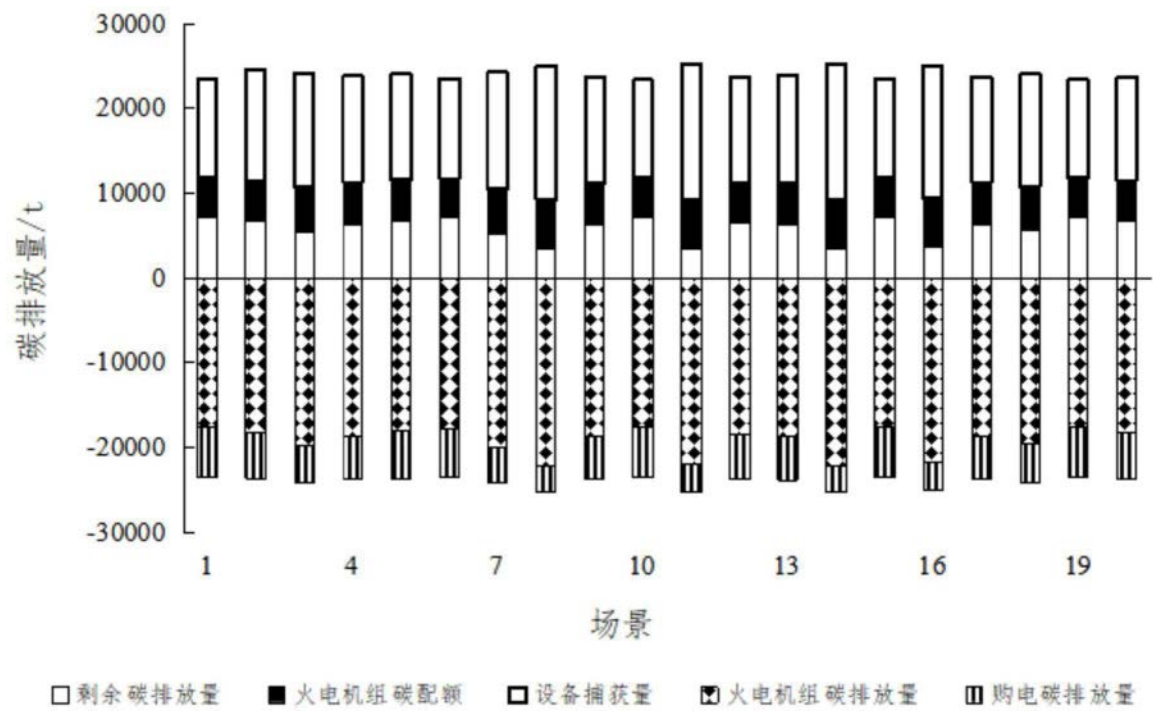


图5

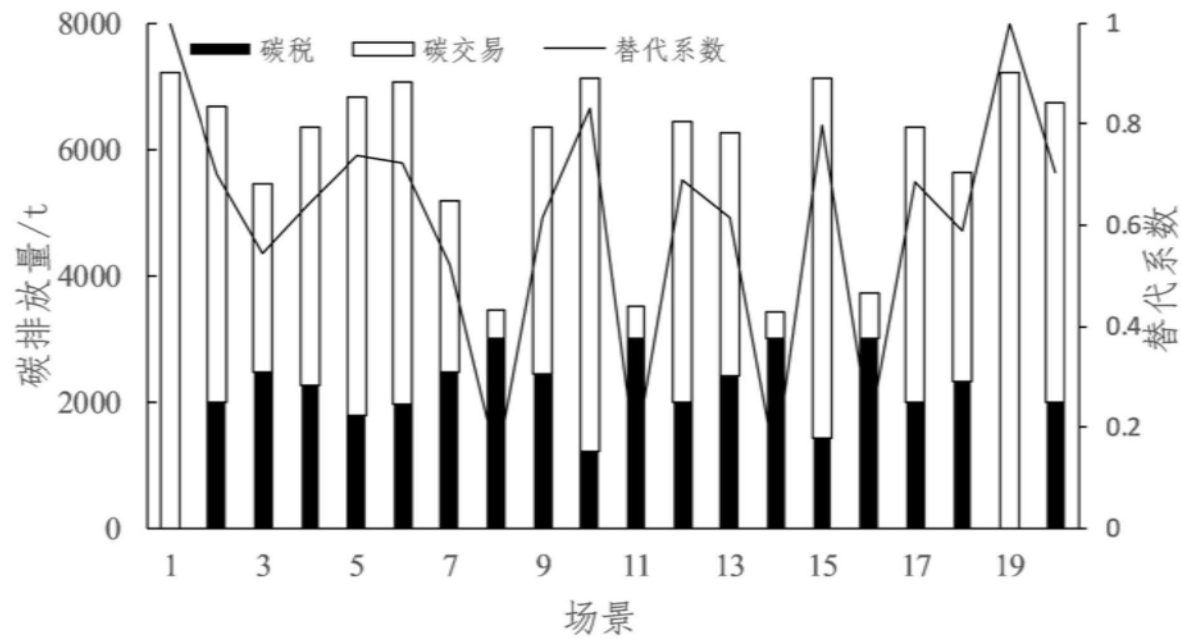


图6

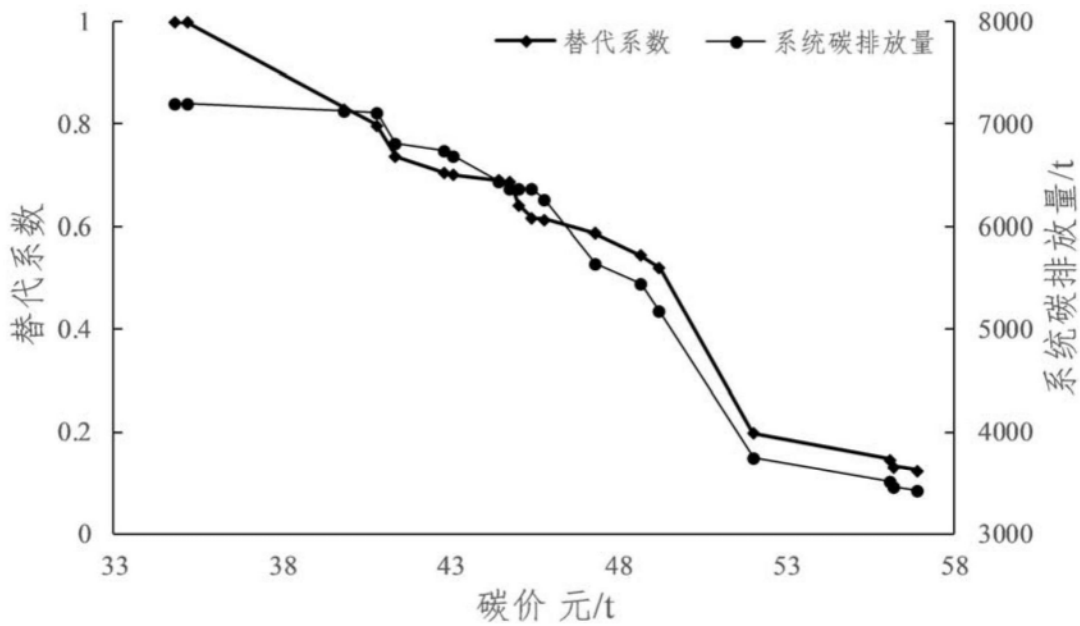


图7

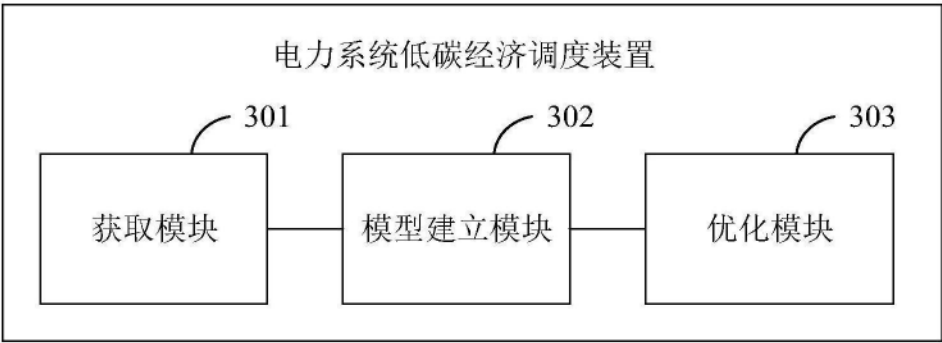


图8

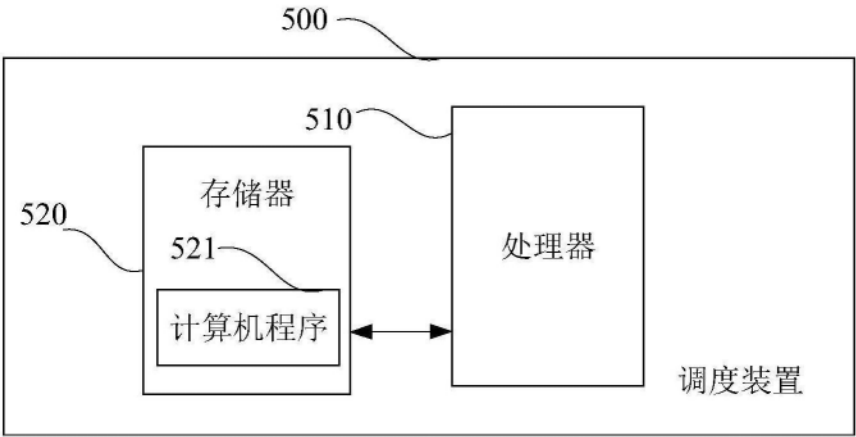


图9