

考虑碳排放流的电力系统源网荷协同低碳调度模型研究

张小东¹, 高敏¹, 苟永耀², 刘道晴³, 韩洁平⁴, 刘禹含⁴

1. 国家电网有限公司西北分部, 陕西 西安 710048
2. 国网甘肃省电力公司平凉供电公司, 甘肃 平凉 744000
3. 国网英大碳资产管理(上海)有限公司, 上海 200120
4. 东北电力大学 经济管理学院, 吉林 吉林 132012

DOI: 10.61369/TACS.2025090029

摘要: 随着碳达峰、碳中和目标的提出, 构建源—网—荷协同的低碳调度机制的构建成为电力系统优化运行的重要方向。本文引入碳排放流理论, 剖析了碳流与电力潮流之间的耦合机理, 构建了计及分布式电源、储能装置及可中断负荷的配电网低碳优化模型。以此为基础, 确立节点碳势导向的储能充放电判断与分布式机组出力策略, 搭建以碳排放成本最小为目标的两阶段源网荷协同低碳调度模型。利用Shapley值法对碳排放责任进行分摊, 探究了不同负荷响应和清洁能源出力水平下的系统碳排放特性。

关键词: 源网荷协同; 碳排放流; 低碳调度; 储能; 可中断负荷

Research on a Cooperative Low-Carbon Dispatch Framework for Power Systems Taking into Account Carbon Emission Flows

Zhang Xiaodong¹, Gao Min¹, Gou Yongyao², Liu Daoqing³, Han Jieping⁴, Liu Yuhan⁴

1. Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an, Shaanxi 710048
2. State Grid Gansu Electric Power Company Pingliang Power Supply Company, Pingliang, Gansu 744000
3. State Grid Yingda Carbon Asset Management (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200120
4. School of Economics and Management, Northeast Electric Power University, Jinlin, Jilin 132012

Abstract: As carbon peaking and carbon neutrality goals progress, setting up a low-carbon dispatch mechanism that coordinates sources, grids, and loads has become a crucial direction for optimizing power system operations. This paper introduces the carbon flow theory to analyze the coupling mechanism between carbon flow and power flow, and establishes a low-carbon optimization model for distribution systems incorporating distributed generation, energy storage devices, and interruptible loads. Building on this, it proposes a node carbon potential-based criterion for energy storage charging and discharging, along with a distributed generation output strategy, and constructs a two-stage source-grid-load coordinated low-carbon dispatch framework aimed at minimizing carbon emission costs. By applying the Shapley value method to allocate carbon emission responsibilities, the study explores the system's carbon emission characteristics under varying load response levels and clean energy generation conditions.

Keywords: source-grid-load coordination; carbon emission flow; low-carbon dispatch; energy storage; interruptible load

引言

在“双碳”战略背景下, 构建安全、经济、清洁、低碳的电力系统是我国能源转型的重要方向^[1]。可再生能源装机容量与储能、需求响应等柔性资源均实现快速增长, 这使得电力系统的运行特性日趋复杂, 难以用传统的基于功率平衡的调度模型已难以全面刻画系统的碳排放特征和低碳运行机理^[2]。如何在碳排放流框架下建立源—网—荷—储协同调度机制, 实现功率流与碳流的联合优化, 是亟待解决的问题。本研究依照碳排放流与潮流的耦合机理, 创建起包含分布式能源, 储能设施和可调节负荷的低碳调度模型, 利用碳势判断来设计储能充放电控制方案, 并采用 Shapley 值法分摊碳排放责任, 实现多主体协同低碳优化, 为配电网碳排放的精细化核算工作, 以及低碳运行策略的设计与优化, 提供了坚实的理论依据与支撑。

一、碳排放流与电力潮流耦合机理

(一) 碳排放流基本定义

碳排放流 (Carbon Flow) 理论是一种将电力系统中能量传输与碳排放传递过程统一建模的分析方法。其核心思想是：在电力系统中，每一节点不仅存在电压、电流等电气状态变量，还存在与其功率流量对应的“碳流量”和“碳势”变量。碳流量反映电能传输过程中携带的碳排放强度，碳势则代表节点单位功率所对应的等效碳排放水平^[3]。

(二) 储能与分布式电源对碳势的影响

在含分布式电源与储能装置的配电系统中，节点碳势不再仅由主网决定，而是受到本地清洁能源出力与储能充放电状态的共同影响。分布式发电机组可视为低碳或零碳电源，其所在节点的碳势通常低于主网节点碳势；此类机组并入电网运行时，能够降低其下游节点的碳势，进而促使系统整体碳强度得到降低。反之，当该节点下游无分布式电源或储能设备时，下游节点碳势将等于其上游节点碳势^[4]。

二、基于碳排放流的低碳调度模型

(一) 模型总体结构

从系统整体角度进行分析，电力网络在任意时间段内必须满足能量守恒定律。假定配电系统内包含 K 台分布式发电机组与 M 个储能元件^[5]。则基于该条件所构建的优化调度模型以连续 T 时段内全系统的综合碳排放成本最小为优化目标函数，其数学表达形式如下：

$$\min E_T = \sum_{t=1}^T \left(P_{G0,t} \cdot e_{G0,t} + \sum_{k=1}^K P_{Gk,t} \cdot e_{Gk,t} \right) \quad (1)$$

式中： $e_{Gk,t}$ 是在第 t 时段，第 K 台发电机组 (分布式) 的机组碳势； E_T 是在系统连续 T 个时间周期内支付的总碳排放费用；

$P_{Gk,t}$ 是指第 k 台发电机组的有功出力； $e_{G0,t}$ 指得电能时的主网碳势； $P_{G0,t}$ 是指从主网获得电能时与之对应的有功功率。

研究结果显示：潮流分配对节点碳势的约束更为显著。碳势 $e_{Gk,t}$ 仅收到配电系统内部的机组参数得影响， $e_{G0,t}$ 直接由主网的运行状态决定，不考虑分布式电源等因素的影响，公式 (1) 的目标函数就是线性函数。

以潮流方程为基础构建模型约束，且该约束需保证在所有时段内模型都可以满足配电系统的潮流方程。即：

$$\begin{cases} P_{i,t} = U_{i,t} \cdot \sum_{j=1}^n U_{j,t} \cdot (G_{ij} \cdot \cos \theta_{ij,t} + B_{ij} \cdot \sin \theta_{ij,t}) \\ Q_{i,t} = U_{i,t} \cdot \sum_{j=1}^n U_{j,t} \cdot (G_{ij} \cdot \sin \theta_{ij,t} + B_{ij} \cdot \cos \theta_{ij,t}) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $Q_{i,t}$ 是在第 t 时段节点 i 的无功功率； $P_{i,t}$ 是在第 t 时段节点 i 的有功功率； B_{ij} 表示节点 i 、 j 的电纳以及电导； $\theta_{ij,t}$ 为节点 i 和 j 的相角差。 $U_{i,t}$ 是节点 i 的电压， $U_{j,t}$ 是节点 j 的电压；计算时必须考量线路潮流的约束及电压的约束来保证电力系统平稳运行：

$$\begin{cases} S_{i,t} \leq S_{imax} \\ U_{imin} \leq U_{i,t} \leq U_{imax} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $S_{i,t}$ 是在第 t 时段流过第 l 条支路上的复功率； S_{imax} 是第 l 条支路可传输的最大功率， $S_{i,t}$ 是在第 t 时段流过第 l 条支路上的复功率； S_{imax} 为第 l 条支路可传输的最大功率。

当网络中存在分布式电源时，需满足其发电功率约束和爬坡约束，即：

$$\begin{cases} P_{Gkmin} \leq P_{Gk,t} \leq P_{Gkmax} \\ -P_{DGkmin} \leq P_{Gk,t} - P_{Gk,t-1} \leq P_{UGkmax} \end{cases} \quad (4)$$

式中： P_{DGkmin} 为每个时段内机组可向下调节的最大出力； P_{UGkmax} 为每个时段内机组可向上调节的最大出力。

(二) 清洁能源出力与碳排放责任建模

电力系统的碳排放主要源于火电机组发电过程，因此可采用碳排放强度指标对其进行表征，然而碳排放强度与机组类型、燃煤质量以及各时段燃料的燃烧情况有关。水电机组及新能源机组产生每单位电能的碳排放大约为 0^[6]。运行状态等因素直接影响火电机组的碳排放强度，可通过如下公式完成拟合计算：

$$w_i = \frac{(a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i) \xi_i}{P_{Gi}} \times 10^3 \quad (5)$$

式中： w_i 是机组 i 的度电煤耗， $g/(kW \cdot h)$ ； a_i 、 b_i 、 c_i 是燃煤机组 i 用来表示机组燃煤耗量特性的参数； ξ_i 是度电煤耗修正系数，当设备正常工作时， ξ_i 取 1.0；机组停止工作时， ξ_i 取 0；在深度调峰状态，或需快速升降负荷时， ξ_i 取 1.01。

通过引入灵活可调参数 β ，能够有效完善网损碳排放只能分摊至单侧的缺陷，进而拓宽碳流分析理论的应用范围。

负荷或新能源 k 的功率偏差 L_k 所需承担的网损变化， L_k 为

$$\Delta \delta_{Lk} = - \sum_{i=n+1}^{n+m} \frac{\delta_{Gi}}{\delta_i} [A_d^{-1}]_{ik} \delta_{Lk} \quad (6)$$

当边际调节机组的煤耗特性呈现线性规律，系统中其他发电单元维持恒定出力的状况下，新能源的减排效果能够通过其接入前后全网碳排放变化量来衡量。

(三) 储能元件碳排放流模型

依储能介质基本性质，充放电循环中，设 F_0 是该时刻的剩余碳流量； Q_0 是储能设备上一次从放电开始到充电结束的剩余电量，据荷电状态的定义得： $SOC = Q_0 / Q_{max}$ 储能设备从 T_0 时开始充电，直至 T 时刻转变为放电状态，放电碳势公式如下：

$$e_s(T) = \frac{F_0 + \int_{T_0}^T R(t) dt}{(Q_0 + \int_{T_0}^T P(t) dt) \cdot \eta} \quad (7)$$

式中： $e_s(T)$ 特指储能元件在时刻 T 充电结束，正式转入放电状态时，所对应的放电碳势； $\int_{T_0}^T P(t) dt$ 和 $\int_{T_0}^T R(t) dt$ 依次为储能设备在完整充电阶段，所累积的电量与碳流量；定义转换效率 η 为储能装置在充放电切换过程中能量转移的利用率。

三、源网荷协同低碳调度策略构建

(一) 基于碳势的储能与分布式机组调度规则

低碳运行这一概念之下，节点的碳势能够简化优化模型的处理，分布式机组的设定碳势保持不变，当接入点的碳势高于机组

自身碳势时，此机组就会并网并达到满载运转状态，反之则切断联络^[7]。储能运行状态亦取决于碳势比较：节点碳势高于储能放电碳势且储能电量不为零时放电；节点碳势大于储能放电所需碳势且电量充足时便启动放电过程，低于放电需求或者尚未饱和的情况下转入充电模式，二者相等时保持独立运行，而当无剩余容量时自动切换到强制充电模式以保证后续能够持续供电^[8]。具体求解步骤为：①读取负荷、储能与机组初始状态；②假定储能离网，求得机组与主网出力；③计算节点碳势；④比较节点与储能放电碳势确定充放电状态；⑤将充电储能视为负荷、放电储能视为分布式电源重新求解；⑥修正节点碳势并校验前述判断；若不满足则迭代更新，直至收敛；⑦计算时段碳排放并更新储能与机组数据供下一时段使用。该方法以碳势判据为核心，实现储能与分布式电源在单时段内的低碳最优协同。

(二) 两阶段低碳调度模型

构建多目标函数时，若以配电网线路网损、线路电压偏差最小化和火电机组最优出力为优化目标，可利用帕累托最优理论求全局最优解，再通过帕累托改进让资源分配达到最优^[9]。理想点评价模型的表达式如下：

$$U(X) = \left(\frac{f_r(X) - f_r X_r^*}{f_r X_r^*} \right) \quad (8)$$

其中， $f_r(X)$ 代表第 r 个单目标， $f_r X_r^*$ 为该单目标函数对应的最优值； $U(X)$ 则是通过对各单目标函数进行无量纲化处理后，所构建的多目标评价函数。在电网正常运行的情况下，电力从源头传输到末端的过程中，接入用户侧的分布式储能装置会使配网的潮流分布特性发生改变，线路损耗会出现波动现象。节点 i 对应的电压偏差为：

$$U_{dev} = U_i - U_N \quad (9)$$

其中， U_{dev} 为节点 i 处的电压与额定电压的差值； U_i 为相邻两节点间线路的首端电压。

有功功率平衡与无功功率平衡是电力系统稳定运行的关键前提，据此可围绕电力系统的线路和节点，分别建立对应的有功功率约束条件与无功功率约束条件，从而确定出综合能源系统的上下限参数范围，其具体表达形式如公式(10)所示：

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{is} - P_i = P_{is} - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \\ \Delta Q_i = Q_{is} - Q_i = Q_{is} - f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \end{cases} \quad (10)$$

参考文献

- [1] 任晨星, 任清洁, 高翔. "双碳"背景下我国低碳电力发展研究[J]. 热力发电, 2024, 53(2): 1-7.
- [2] 杨艳敏. 面向能源互联网的需求侧负荷动态云模型调控策略研究[D]. 华北电力大学(北京), 2019.
- [3] 李虹, 林兰心. 基于碳排放流理论的供需联合优化调度策略[J]. 电力科学与工程, 2023, 39(11): 1-11.
- [4] 乔珊. 主动配电网多源协同运行优化研究[D]. 山东大学, 2021.
- [5] 吴振川, 吴晓南, 谢明宏, 等. 某分布式能源系统能效分析[J]. 化工中间体, 2018(009): 000.
- [6] 王璇, 杨伟, 李瑞尧. 基于节能减碳的电力调度运行模式研究[J]. 光源与照明, 2022(11): 164-166.
- [7] 王长江, 叶承晋, 黄存强, 等. 基于碳排放流的多产消者配电网碳电协同调度[J]. 供用电, 2025, 42(3): 14-24.
- [8] 施婕, 彭英智, 孙伟卿. 碳流管控下的配电网储能优化运行[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(11): 3971-3980.
- [9] 盛四清, 范林涛, 李兴, 等. 基于帕累托最优的配电网多目标规划[J]. 电力系统自动化, 2014(15): 7.
- [10] 刘子华, 曹瑞峰, 赵志扬, 等. 基于碳排放流的综合能源系统碳排放监测方法[J]. 浙江电力, 2023, 42(10): 65-72.

构建发电机组的出力约束方程如式(11)所示：

$$\begin{cases} P_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \overline{P}_{Gi} \\ Q_{Gi} \leq Q_{Gi} \leq \overline{Q}_{Gi} \end{cases} \quad (11)$$

为保证电力系统稳定运行不被破坏，需根据电力系统网络节点和线路情况，构建节点电压幅值约束、线路的潮流约束以及发电机的容量约束如式(12)所示：

$$\begin{cases} V_i \leq V_i \leq \overline{V}_i \\ |P_i| = |P_y| = |V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - V_i^2 G_{ij}| \leq \overline{P}_i \\ P_{EB} \leq P_{EB} \leq \overline{P}_{EB} \end{cases} \quad (12)$$

根据已知负荷、机组出力限制以及线路容量，计算各机组出力情况，目标函数为：

$$\min \sum_{i \in N_G} P_{Gi} (\lambda_{Gi} + \lambda_c) \quad (13)$$

由电力平衡约束、机组出力约束和线路容量约束，构建约束条件为：

$$\begin{cases} s.t. \sum_{i=1}^{N_D} P_{Di} = \sum_{j=1}^{N_G} P_{Gj} \\ 0 \leq P_{Di} \leq \overline{P}_{Di} \\ 0 \leq P_{Gj} \leq \overline{P}_{Gj} \\ |f_i| \leq \overline{f}_i \end{cases} \quad (14)$$

结合式(14)的约束条件及前文模型得到的目标函数，寻找在可行域内的帕累托最优情况。

四、结论

根据碳排放流的理论框架建立源-网-荷-储协同的低碳调度模型，实现功率流与碳流的统一建模和统一优化目标^[10]。节点碳势可作为低碳调度的有效状态量，辐射型配电网可用顺序法高效求解碳流；基于碳势判据的储能控制在高碳时段放电、低碳时段充电，可显著降低系统平均碳势并抑制网损带来的隐含排放；可中断负荷与清洁能源协同可进一步减少火电边际出力与系统碳排放；结合 Shapley 分摊能合理反映多主体减排贡献，便于形成可执行的碳成本结算规则。