

# 考虑碳流追踪与绿证交易的省级电网多时间尺度 低碳调度优化

加康

临汾汾能电力科技试验有限公司, 山西 临汾 041000

DOI: 10.61369/VDE.2025270024

**摘要 :** 基于双碳目标背景, 省级电网低碳转型需要打破传统调度模式的限制, 其中当前调度体系存在的矛盾主要是碳排放责任界定较为模糊、市场机制和物理运行的脱节。而绿色电力证书交易是环境价值兑现的重要工具, 其尚未与电网的调度决策产生有效联动。基于此, 本文从碳流追踪与绿证交易的角度出发, 分析了省级电网多时间尺度低碳调度优化, 保证电网运行稳定性的前提下增强清洁能源的消纳水平, 促使省级电力系统从传统能源供应模式迈向多元价值整合转型, 给落实国家双碳战略赋予了理论根据和操作可行性的革新途径支撑。

**关键词 :** 碳流追踪; 绿证交易; 省级电网; 多时间尺度调度

## Multi-time Scale Low-Carbon Dispatch Optimization of Provincial Power Grids Considering Carbon Flow Tracking and Green Certificate Trading

Jia Kang

Linfen Fenneng Electric Power Technology Test Co., Ltd., Linfen, Shanxi 041000

**Abstract :** Against the backdrop of the "dual carbon" goals, the low-carbon transformation of provincial power grids needs to break the constraints of traditional dispatch models. The main contradictions existing in the current dispatch system are the vague definition of carbon emission responsibilities and the disconnection between market mechanisms and physical operations. Green Electricity Certificate (GEC) trading is an important tool for realizing environmental value, but it has not yet formed effective linkage with power grid dispatch decisions. Based on this, from the perspective of carbon flow tracking and green certificate trading, this paper analyzes the multi-time scale low-carbon dispatch optimization of provincial power grids. On the premise of ensuring the stability of power grid operation, it improves the absorption level of clean energy, promotes the transformation of provincial power systems from traditional energy supply models to multi-value integration, and provides theoretical basis and operationally feasible innovative path support for the implementation of the national "dual carbon" strategy.

**Keywords :** carbon flow tracking; green certificate trading; provincial power grid; multi-time scale dispatch

### 引言

全球气候治理达成普遍共识, 为我国设定“碳达峰, 碳中和”战略目标构筑了稳固根基, 电力系统作为能源转型的关键载体和碳排放重点区域, 其低碳化发展成果直接影响双碳目标的实现进程。省网是我国电网运行的基本单元和资源配置枢纽, 其在统筹跨区输电网络规划和本地多元负荷需求之际, 要高效整合大规模间歇性可再生能源并保障减排任务落实到位, 而省网调度运营在这一过程中正遭遇技术革新和管理优化的双重考验。本文分析碳流追踪和绿证交易之间的内在逻辑联系, 全面阐释其在电网调度中的协同效应以及经济运行机制, 从方法论层面来看, 崭新提出面向日前, 日内和实时三个时间跨度的滚动优化架构, 把碳约束条件和绿证价值一并纳入调度决策的关键因素之中。

### 一、碳流追踪与绿证交易的理论分析

#### (一) 碳流追踪原理

碳流追踪技术的关键之处在于依靠电力系统中能量传输路径

的数据, 准确地量化并解析能源生产、输送和消费各个部分的碳排放特点, 通过对各类电源和节点之间碳排放贡献比例进行核算, 给实现精确责任划分给予可信凭据<sup>[1]</sup>。就省级电网而言, 其碳流监测的重点指标是节点边际碳排放强度, 这个参数要综合考量

不同电源类型对应的碳排放系数、发电效率以及电网结构特性等多种因素来动态评价并校准。通过潮流追踪算法来分析省级电网碳流动态，它的基本流程包含如下环节：根据发电单元的特点，计算其碳排放系数，火电机组采用煤耗和碳排放因子的乘积形式，水电，风电，光伏发电等清洁能源则设为零；执行电网潮流仿真之后，仔细重现各类电源电力在输配电网络中的具体传输路径；经过统计节点间的碳流交换数据，构建并量化每个节点的边际碳密度指标；联系区域负荷规模和对节点边际碳强度参数，实现对用户侧碳责任的动态分配，借助这样的方法论框架，可全方位分析不同能源形式之间的减排差别，而且给调度优化中资源分配策略的制定给予科学依据<sup>[2]</sup>。

## （二）绿证交易机制

“绿证”是一种证明可再生能源发电量的凭证，一张绿证代表1000千瓦时的电量，它实质上是完成可再生能源消纳责任的量化管理和流转，并通过经济激励来弥补清洁能源成本劣势，绿色电力证书在省级电网里的交易主要围绕着三个核心部分展开，参与其中的主体包含可再生能源发电企业，传统燃煤电厂以及终端用电客户等，可再生能源发电企业通过出售绿证得到收益补偿，燃煤电厂购买绿证完成强制减排任务，定价模式包含市场竞价和政府指导价两种情况，既确保了价格的灵活程度又体现了政策调控的想法，对绿色电力证书的实施细则，详细地说明了各类市场主体应该承担的消纳指标要求，对于没有达到消纳指标要求的情况，明确说明了补足措施<sup>[3]</sup>。

## 二、省级电网的多时间尺度低碳调度优化策略

### （一）融合碳与绿证信号的多时间尺度调度新范式

传统多时间尺度调度机制重点在于应对不确定性，达成安全性与经济性的动态平衡，提出的革新式范式，在这个基础上融合碳流强度约束条件和绿证价值反馈信号，形成起兼顾安全—经济—低碳三维目标的协同优化体系，“把碳流强度当作刚性边界，并借助绿证价值来调节经济激励”，并且利用跨周期滚动规划方法，对电力生产与消费行为展开系统调控<sup>[4]</sup>。

第一，日前调度层（规划）：根据未来24—168小时内的负荷需求预估与可再生能源出力估计，展开全网资源调配工作，这一环节重点在于统筹安排机组启停计划、跨区电力交换计划以及电网安全限制条件，而且还要考虑到系统级或者区域级碳排放强度限制情况，在充分考量绿证市场价格走势及交易意向的基础上，制定出使总社会成本降到最低限度的发电方案，这就好比给次日电网运行赋予了一种具有低碳导向的战略指南<sup>[5]</sup>。

第二，日内滚动调度层（调整）：采用数小时为单位的动态更新方式，依靠未来4—6小时内产生的超短期预测数据，对日前规划的方案进行细致的优化调整，虽然机组组合的大致框架已经确定，但此时的重点在于统筹可调资源，火电机组的深度调峰能力，水电站的发电潜力，抽水蓄能电站的运行状态，以及电化学储能设施和需求侧响应机制<sup>[6]</sup>。精确安排这些资源的实际出力计划，用以抵消风能和负荷波动带来的不确定性影响，碳排放强度

约束不再像过去那样仅从日均值的角度出发，而是转变为针对更短的时间段实施实时调控的方式，从而保证低碳目标在这样复杂的情况下能够得到精准的实现，绿证价格信号同样直接决定了快速调节资源优先级排序的具体规则<sup>[7]</sup>。

第三，实时平衡与AGC控制层（执行）：以分钟到秒级响应，利用自动发电控制（AGC）和快速储能等资源，处理瞬间的功率不平衡，保证频率和电压的稳定。这个阶段是以安全为首要目标，但是其调节指令的生成，可以继续并执行由日内层优化得到的低碳导向的机组调节优先级顺序，使低碳目标最终体现在每一秒的电网实际运行中<sup>[8]</sup>。

### （二）调度模型的优化逻辑与核心机制

在新的范式下，调度模型的优化逻辑发生了根本性变革，调度模型优化的目标函数从传统的“最小化发电成本”转变为最优化综合社会成本。调度模型优化目标函数的改变主要包括以下几个维度：显性的燃料成本，燃煤、燃气等机组的发电能耗成本；内化的环境成本，由碳价与发电碳排放量乘积构成的碳成本。这代表了碳排放的社会损害成本；绿色的价值流动，绿证交易产生的净成本或净收益存在很大差异，对购电主体而言，该费用属于实际开支，而对出售方，即清洁能源发电企业来说，这体现为负向现金流，也就是潜在盈利，站在整个系统角度，这类内部转移支付虽然不属于市场化收支，但其价格信号在调度策略制定中起着重要作用<sup>[9]</sup>。

优化流程的重点是在严格遵守各类物理安全约束条件的基础上，对上述三项成本要素进行动态平衡，其基本运行机制主要包括以下几个核心环节：第一，碳约束引导机制。调度中心依照预设的未来日度或者即时运行时段，针对整个系统以及重要断面制订平均碳流强度上限指标，这个“碳预算”被当作不可逾越的主要约束条件，在制订发电计划的时候，模型首先考量低/无碳能源种类，按照负荷需求和备用容量，在化石燃料机组当中选取单位能耗最低且效能最高的设备，而且限制高碳排放机组的出力情况，从而在实际操作层面上有效地抑制了高碳源的使用频率，达成了改善存量资源调配的效果。

第二，绿证价格杠杆机制。作为清洁能源环境效益评估的核心指标，绿证价格在调度模型中占据着举足轻重的地位，对于风电或者光伏电站而言，“成本”可以被定义为“发电费用扣除预期绿证收益”之间的差额部分，随着市场价格的不断上涨趋势，其折算之后的实际运营支出也会相应减少，在市场竞争以及电力调配环节所展现出来的成本优势就显得更加明显，而在需求侧资源管理方向上，若用户响应活动参与其中，则通过碳足迹追踪手段量化减排成效之后，以虚拟绿证形式纳入市场交易体系之中，从而达成提升经济效益并完善激励机制的目的，依托这样一种市场化工具的设计理念，既促进了能源结构转型战略目标的达成，又实现了经济价值最大化的效果，进而激发起潜在投资意愿，推动整个产业可持续发展的进程。

### （三）策略实施的预期成效与价值

第一，环境效益跃升。通过碳流强度的刚性约束和绿色电力证书价格机制的激励，可以系统提升清洁能源的消纳能力，大幅

减少弃风、弃光，有效压减煤炭发电造成的碳排放总量，为省级区域实现碳达峰提供精准支撑。第二，经济效率优化。虽然碳排放约束政策正在逐步完善，但是绿证交易机制却开辟了环境外部性内部化的创新路径，站在社会总成本的角度来看，绿证交易制度促使资源的高效配置和整体效益的提升，“帕累托改进”效应得以体现。对于发电企业而言，“双碳”目标正逐步转化为发展契机；而对于电力消费者来说，则获得了明确的绿色消费指引以及多元的成本选择方案<sup>[10]</sup>。第三，调度决策科学化。当前调度工作重点慢慢从传统的物理量测指标，像潮流，电压，频率等等，转到结合“碳流”数据和“绿证价格”的综合评定系统，依靠决策支持系统里的多种可视化工具，可以很大程度上加强调度操作的科学性和精确性，紧紧符合国家能源结构转型的战略需求。

### 三、结束语

综上所述，实现双碳目标的道路，犹如一场广泛而深刻的经济社会系统变革之路，在这趟旅途当中省级电网属于主战场之一。电网低碳转型要换掉“绿色替代”电源结构的局限，电网运行方式和市场激励方式也要“绿色进化”，碳流追踪技术就像给电网装上了“碳卫星定位系统”，对碳排放责任实行网格化、精细化、实时化追踪，解决了“看得清”的问题。绿证交易机制好比为绿色价值流提供“高速公路网”，市场化定价让环境效益变成投资消费的动力源，解决了“有动力”的问题。

### 参考文献

- [1] 刘海涛, 刘杨, 荀汉龙, 等. 绿证与改进型阶梯式碳交易互动机制下的 CHP 系统低碳经济调度研究 [J]. 电测与仪表, 2024, 61(12): 144-155.
- [2] 韩晓娟, 王祖冉, 徐铭璐. 基于碳-绿证交易的多场景源网荷储两阶段鲁棒-博弈优化调度 [J]. 电网技术, DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1387.
- [3] 刘奕辰, 肖红谊, 刘晓宏, 等. 考虑绿证交易及碳排放约束的含风光储微网低碳优化调度 [J]. 浙江电力, 2024, 43(08): 66-73. DOI: 10.19585/j.zjdl.202408008.
- [4] 蔺红, 马越, 战鹏帆. 计及绿证-碳交易的多微网合作运行优化调度 [J/OL]. 控制工程, 1-13. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20240220>.
- [5] 孟明, 陶学志. 计及供需双侧响应和绿证-碳融合的综合能源系统多时间尺度优化调度 [J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版), 1-12. <https://link.cnki.net/urlid/13.1212.tm.20240328.1709.004>.
- [6] 骆钊, 耿家璐, 黎博文, 等. 考虑碳-绿证交易机制的虚拟电厂分布鲁棒优化调度 [J]. 电力建设, 2023, 44(10): 137-148.
- [7] 张洪涛, 周意入, 涂玲英, 等. 计及绿证-碳交易与氢能的综合能源系统多时间尺度优化调度 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(11): 95-106.
- [8] 艾星贝, 闫庆友, 李金孟. 考虑负荷平移的虚拟电厂低碳经济调度 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(26): 11418-11427.
- [9] 张虹, 孟庆尧, 马鸿君, 等. 面向提升绿证需求的跨区互联系统经济低碳调度策略 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 51-61.
- [10] 李幸芝, 韩蓓, 李国杰, 等. 分布式绿色能源碳交易机制及碳数据管理的挑战 [J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(08): 977-993. DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.450.