

光伏发电集群辅助服务模式对系统电碳运营效率 支撑机制研究

崔勇¹, 蔡昌春², 倪申鑫³, 许坤⁴, 庞昊¹, 何文龙³

(1. 安徽科技工程大学经济与管理学院, 安徽省 蚌埠市 233030; 2. 江苏省输配电装备技术重点实验室(河海大学), 江苏省 常州市 213200; 3. 安徽科技工程大学电气与电子工程学院, 安徽省 蚌埠市 233030; 4. 安徽乾坤电力工程有限公司, 安徽省 合肥市 231582)

Research on Support Mechanism of Photovoltaic Cluster Ancillary Service Modes for System Electro-Carbon Operational Efficiency

CUI Yong¹, CAI Changchun², NI Shenxin³, XU Kun⁴, PANG Hao¹, HE Wenlong³

(1. College of Economics and Management, Anhui University of Science and Technology, Bengbu 233030, Anhui Province, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Power Transmission and Distribution Equipment Technology (Hohai University), Changzhou 213200, Jiangsu Province, China; 3. College of Electrical and Electronic Engineering, Anhui University of Science and Technology, Bengbu 233030, Anhui Province, China; 4. Anhui Qiankun Electric Power Engineering Co., Ltd., Hefei 231582, Anhui Province, China)

摘要:【目的】在新型电力系统发展背景下, 设计了考虑光伏发电集群辅助服务(cluster ancillary services, CAS)的系统效率测度框架, 旨在阐明CAS对系统电碳运营效率支撑机制。【方法】基于电网碳流理论, 提出CAS模式下的系统碳流计算及融合碳流指标的集群划分方法; 构建以光伏发电功率为生产投入指标, 电气量和碳流量为产出指标的效率评估模型, 以分析系统多维指标之间耦合作用机制, 并在改进的IEEE 14节点系统进行仿真验证。【结果】CAS可优化系统电碳指标, 全时段线损率为4.220%~4.955%, 最大电压偏差为6.000%~6.200%, 系统峰谷时段频率偏差控制在 ± 0.080 Hz以内, 碳排放因子下降约16.500%, 节点碳势均值波动减小。【结论】CAS可改善系统电碳关键指标, 降低系统线损率、电压偏差与频率偏差, 减小系统碳排放因子及节点碳势均值波动, 有助于提升系统节能减碳效果。研究结果可为新型电力系统低碳运营优化策略制定、新能源辅助服务资源配置提供参考。

关键词: 光伏集群; 辅助服务; 碳排放流; 集群划分; 节能减碳; 低碳运营

ABSTRACT: [Objectives] Under the background of the development of new power systems, a system efficiency

measurement framework considering photovoltaic cluster ancillary services (CAS) is designed to clarify the support mechanism of CAS on the system electricity-carbon operational efficiency. [Methods] Based on the power grid carbon flow theory, a system carbon flow calculation method under the CAS mode and a cluster classification approach integrating carbon flow indicators are proposed. An efficiency evaluation model is developed with photovoltaic power output as the input indicator and electrical quantities and carbon flow as the output indicators, to analyze the coupling mechanism among multi-dimensional indicators of the system, and simulation verification is carried out on the improved IEEE 14-bus system. [Results] CAS can optimize the system electricity-carbon indicators. The all-time line loss rate is 4.220%-4.955%, the maximum voltage deviation is 6.000%-6.200%, the frequency deviation during peak and valley periods of the system is controlled within ± 0.080 Hz, the carbon emission factor is reduced by about 16.500%, and the average node carbon potential fluctuation is reduced. [Conclusions] CAS can improve key system electro-carbon indicators, reduce the system line loss rate, voltage deviation, and frequency deviation, lower the carbon emission factor and the average node carbon potential fluctuation, thus improving the energy-saving and carbon-reduction effect of the system. The findings can provide references for the formulation of low-carbon operation optimization strategies of new power systems and the allocation of new energy ancillary service

基金项目: 安徽省高校协同创新项目(GXXT-2023-065)。

Project Supported by Anhui Provincial University Collaborative Innovation Program (GXXT-2023-065).

resources.

KEY WORDS: photovoltaic cluster; ancillary services; carbon emission flow; cluster partitioning; energy saving and carbon reduction; low-carbon operation

0 引言

新型电力系统建设过程中,光伏发电规模化接入为系统低碳运行提供了重要支撑。为提升新能源消纳水平与系统运行经济性,需对光伏资源实施集群化管理,充分挖掘其在辅助服务方面潜力,进而提升系统电碳运营效率。在此背景下,研究光伏发电集群辅助服务对系统运行支撑机制具有理论参考价值与实际意义。

目前,在碳流指标分析方面,文献[1]提出了计及混合交易模式的多区域互联系统碳排放流计算方法;文献[2]将碳流指标引入柔性配电网规划模型,研究表明碳流计算可嵌入复杂系统运行决策。但二者均未考虑光伏辅助服务带来的有功-无功动态调节对碳流分布的影响。在效率评估方法方面,文献[3]在配电网调度中耦合碳排放流与阶梯碳交易,以同时优化成本与碳排放;文献[4]构建了综合能源系统碳减排能力协调优化模型,并验证了考虑碳排放影响的系统降碳优化效果,但缺少对光伏集群辅助服务、电碳指标、运营效率影响路径的定量分析。在集群划分依据方面,现有光伏集群划分多依据电气距离或调节容量,如文献[5]研究了基于台区资源聚合的集群管理模式,但其聚合准则以功率调节能力为主,未引入节点碳势或碳流率等碳流指标,对于集群低碳运营管理机制量化尚需完善。

针对以上问题,本文提出光伏集群辅助服务模式下的碳流计算、集群划分及系统效率评估体系,并在改进的IEEE 14节点系统上进行仿真,分析集群辅助服务(cluster ancillary services, CAS)对系统电碳指标及运营效率的影响机理,以期对光伏集群优化运行与系统低碳调度提供参考。

1 考虑光伏辅助服务的系统低碳运营机制

电力系统辅助服务主要目标是维持电力系统安全稳定运行,保证电能质量并支持电力市场正

常运作。光伏发电系统不但可以承担正常能量供给任务,还可以利用光伏电站所配备逆变器的电网功率自动跟踪功能为系统提供辅助服务。为对不同光伏电站实施优化调度,厘清不同光伏电站协同运营对系统节能减碳效率支撑机制,构建考虑光伏辅助服务的系统低碳运营机制框架,主要包括以下三部分:一是考虑光伏系统功率动态调节辅助服务支撑作用,基于文献[6-7]所提理论,通过修正节点碳势方程改进碳流计算方法;二是构建集群、系统电气量及碳流量指标交互影响的结构方程模型(structural equation modeling, SEM),以识别影响系统运营效率的关键因素;三是分析不同集群对系统全环节效率的影响,并通过系统运营效率指标变化,评估光伏发电系统功率调节能力。此外,光伏配有储能装置,可参与辅助服务调节。

参考文献[8-9]相关技术要求,并结合所构建框架,提出如下假设:1)光伏发电系统辅助服务的有功调频响应能力为10~40 MW/Hz;2)光伏发电系统主要参与一次调频,不考虑辅助服务成本补偿;3)光照有效时间为07:00—20:00,夜间无光照(20:00至次日06:00,光伏发电功率为0 MW);系统运营管理以1 h为时间尺度。

2 考虑集群划分及辅助服务的系统运营效率分析方法

2.1 系统电气量和碳流量指标计算模型

系统电气量指标主要包括节点电压偏差、系统线损率及频率偏差等^[10-11],其主要基于系统潮流进行计算。现有碳流计算方法虽然可以实现碳势、碳流率、碳排放因子的基础测算,但直接用于含光伏辅助服务的电力系统时,难以精准反映光伏动态调节对碳流分布的影响。

为此,结合CAS特性改进碳流计算方法,修正节点碳势方程:

$$\mathbf{E}_N = (\mathbf{P}_N - \mathbf{P}_B^T)^{-1} (\mathbf{P}_G)^T \mathbf{E}_G \quad (1)$$

式中: $\mathbf{E}_N = (e_{N1}, e_{N2}, \dots, e_{Ni})^T$ 为节点碳势向量,其中, e_{Ni} 为第 i 个节点的碳势; $\mathbf{P}_N$ 为节点有功通量矩阵; $\mathbf{P}_B$ 为支路潮流分布矩阵; $\mathbf{P}_G$ 为机组注入分布矩阵; $\mathbf{E}_G$ 为发电机组碳排放强度向量。

考虑光伏系统辅助服务的功率跟踪变化,对 P_G 进行改进,如式(2)所示,以反映光伏电站参与辅助服务对碳流的影响。

$$P_G = (P_{Gkj} + P_{Xkj})_{K \times N} \quad (2)$$

式中: P_{Gkj} 为第 k 台发电机组向第 j 个节点注入的有功功率; P_{Xkj} 为第 k 个光伏系统向第 j 个节点注入的有功功率; K 为发电单元总数; N 为系统节点总数。

为便于后续潮流计算与电气指标优化分析,还需明确光伏发电系统参与辅助服务时无功功率计算方法^[12]:其有功出力会跟踪系统功率变化动态调整,在此基础上根据设定功率因数(取0.90),可推导其无功辅助服务支撑功率,如式(3)所示。

$$Q = P / (\tan \theta) \quad (3)$$

式中: P 为计及辅助服务的光伏系统有功出力; Q 为光伏发电系统无功功率; θ 为光伏系统接入节点相位。

第 i 个负荷节点的碳流率表示为

$$R_{Li} = P_{Li}^g e_{Ni} \quad (4)$$

式中 $P_{Li}^g = P_{Li} - P_{pv,i}$,为节点 i 负荷功率,其中 P_{Li} 为节点 i 原始负荷功率, $P_{pv,i}$ 为节点 i 接入零碳电源出力。

系统碳排放因子^[13]表示为

$$C_f = \frac{\sum_{k=1}^{N_G} P_{Gk} \cdot E_{Gk}}{\sum_{k=1}^{N_G} P_{Gk}} \quad (5)$$

式中: P_{Gk} 为第 k 台发电机组有功出力; E_{Gk} 为第 k 台发电机组碳排放强度; N_G 为系统内发电机组总数。

2.2 集群系统划分方法

不同电源点集群划分需明确具体划分原则,主要考虑光伏系统调控容量、节点净负荷碳流率、节点碳势3个指标。

1) 光伏系统调控容量反映光伏电站的有功、无功调节能力^[14],将具有相似调节能力的光伏划分为一个集群,系统无功功率 Q_j 计算方法如下:

$$\begin{cases} Q_{j,\min} \leq Q_j \leq Q_{j,\max} \\ Q_{j,\min} = -\sqrt{S_{j,\max}^2 - P_j^2} \\ Q_{j,\max} = \sqrt{S_{j,\max}^2 - P_j^2} \end{cases} \quad (6)$$

$$0 \leq P_j \leq P_{j,\max} \quad (7)$$

式中: $Q_{j,\max}$ 、 $Q_{j,\min}$ 分别为 Q_j 上下限, $kV \cdot A$; $S_{j,\max}$ 为光伏逆变器并网容量, $kV \cdot A$; $P_{j,\max}$ 为光伏有功功率 P_j 上限, kW 。

2) 节点负荷与光伏电站出力的差值为净负荷,据此计算节点碳流率,用于表征各光伏电站对系统碳减排的支撑作用。

3) 将碳势相近节点划分为同一集群,有利于实施碳排放统一管理,并据此评估各集群对系统碳减排的实际贡献,为调度优化与节点碳势均衡提供依据。

参考文献[15],构建包含光伏发电系统辅助服务调控容量、节点净负荷碳流率、节点碳势的系统模块度函数,对集群进行划分,如式(8)所示,可将模拟接入网络节点中的不同光伏主体分别作为独立单元,并随机选择2个节点尝试组成新集群,若模块度函数值 q 不断增大,则形成新集群,并继续吸纳其他节点组成集群,直至 q 不再增加为止。

$$\begin{cases} q = \frac{1}{2m} \sum_i \sum_j [A_{ij} - k_i k_j / (2m)] \varphi(i, j) \\ k_i = \sum_j A_{ij} \\ k_j = \sum_i A_{ij} \\ m = \frac{1}{2} \sum_{i,j} A_{ij} \end{cases} \quad (8)$$

式中: k_i 、 k_j 分别为与节点 i 、 j 相连的所有支路数; m 为网络中支路总数;若节点 i 和 j 在同一集群中, $\varphi(i, j)=1$,否则 $\varphi(i, j)=0$;当节点 i 和 j 之间存在连接支路时, $A_{ij}=1$,否则 $A_{ij}=0$ 。

本文主要基于节点指标相似度进行集群划分。节点相似性矩阵 C 的元素 C_{ij} 代表节点 i 、 j 的指标相似度,其表达式如下:

$$C_{ij} = \begin{cases} 1, & i=j \\ \frac{1}{A} \sum_{k=1}^3 \alpha_k (x'_{ik} \cdot x'_{jk}), & i \neq j \end{cases} \quad (9)$$

$$A = \max_{i \neq j} \sum_{k=1}^3 \alpha_k (x'_{ik} \cdot x'_{jk}) \quad (10)$$

式中: α_k 为第 k 个指标权重,同时为便于分析计算,假设3个指标权重相同,均为1/3; x'_{ik} 和 x'_{jk}

分别为第 i 、 j 个节点第 k 个指标的归一化值，节点 i 、 j 的指标向量分别为 $\mathbf{x}'_i = (x'_{i,1}, x'_{i,2}, x'_{i,3})^T$ ， $\mathbf{x}'_j = (x'_{j,1}, x'_{j,2}, x'_{j,3})^T$ ； $\sum_{k=1}^3 \alpha_k (x'_{i,k} \cdot x'_{j,k})$ 为节点 i 、 j 指标向量的加权内积，其值越大，2 个节点指标相似度越高； A 为节点 i 、 j 指标向量的最大加权内积。

2.3 集群系统效率分析方法

2.3.1 系统电碳指标调控路径分析方法

光伏出力变化会直接影响系统电气量与碳流量指标，且两类指标之间存在多变量耦合关系。为定量刻画多变量间影响路径与作用强度，本文引入 SEM 进行分析。SEM 可有效处理观测变量与潜在变量的多层级关联，适配电碳耦合指标的分析需求；其路径系数的绝对值代表变量间影响程度，绝对值越大，影响程度越大^[16]。

参考文献[17]中关于不同变量的选择原理，设定外生潜变量为光伏发电出力。内生潜变量包括电气量与碳流量，其中，电气量观测指标包括线损率、电压偏差、频率偏差；碳流量观测指标包括节点碳势、节点碳流率、碳排放因子。

首先构建测量模型，明确外生、内生观测变量与对应潜变量的表征关系，分析方程如下：

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}_x \boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{\delta} \quad (11)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}_y \boldsymbol{\gamma} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (12)$$

式中： $\mathbf{X}$ 为外生观测变量，对应潜在自变量 $\boldsymbol{\xi}$ ； $\mathbf{Y}$ 为内生观测变量，对应潜在因变量 $\boldsymbol{\gamma}$ ； $\mathbf{A}_x$ 为 $\mathbf{X}$ 与 $\boldsymbol{\xi}$ 的关系矩阵； $\mathbf{A}_y$ 为 $\mathbf{Y}$ 与 $\boldsymbol{\gamma}$ 的关系矩阵； $\boldsymbol{\delta}$ 和 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 分别为外生、内生观测变量的误差向量。

其次，构建结构模型，明确潜在自变量与潜在因变量之间作用路径与数量关系，量化潜在变量间影响强度，分析方程如下：

$$\boldsymbol{\gamma}_j = \mathbf{B} \boldsymbol{\gamma}_i + \boldsymbol{\Gamma} \boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{\zeta} \quad (13)$$

式中： $\mathbf{B}$ 为潜在因变量之间关系矩阵； $\boldsymbol{\Gamma}$ 为潜在自变量对潜在因变量的影响矩阵； $\boldsymbol{\zeta}$ 为内模型的误差向量； $\boldsymbol{\gamma}_i$ 、 $\boldsymbol{\gamma}_j$ 为 $\boldsymbol{\gamma}$ 中不同元素。

基于式(11)–(13)计算不同变量相互影响程度的路径系数；通过不同潜变量之间路径系数乘积，可求得某个变量对系统总影响程度，即获得总路径系数。路径系数正负分别代表正、负向影响；其绝对值代表变量间影响程度，绝对值越大，影

响程度越大。

2.3.2 基于数据包络分析的系统多时段运营效率评估模型

以 1 h 为时间尺度，将每个时段作为系统运营效率评估决策单元 (decision making unit, DMU)，构建考虑投入与产出指标随时段动态变化的数据包络分析 (data envelopment analysis, DEA) 多时段运营效率评估模型，并通过综合对比不同集群不同时段效率，确定最佳集群^[18-19]。其目标函数如下：

$$\begin{cases} \min \eta \\ \sum_{k=1}^{24} \lambda_k y_{rk} - s^+ = y_{r0} \\ \sum_{k=1}^{24} \lambda_k x_{ik} + s^- = \eta x_{i0} \\ \sum_{k=1}^{24} \lambda_k = 1 \\ \lambda_k, s^+, s^- \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中： η 为决策单元效率； x_{ik} 为第 k 个决策单元第 i ($i=1, 2, 3$) 个投入指标； y_{rk} 为第 k 个决策单元第 r ($r=1, 2$) 个产出指标； x_{i0} 为当前待评价决策单元第 i 个投入指标观测值； y_{r0} 为当前待评价决策单元第 r 个产出指标观测值； s^+ 、 s^- 分别为产出、投入松弛变量； λ_k 为第 k 个决策单元权重。

为了评估不同时刻系统整体效率水平，以系统整体进行投入、产出指标选取：投入指标为集群内各主体的动态出力功率；产出指标包含反映系统运行可靠性的频率偏差、线损率，以及反映低碳特性的动态碳排放因子、节点碳势、碳流率均值等。其中，碳排放因子可以衡量全系统碳排放水平。以系统效率最优化为目标，若某一决策单元松弛值为 0 且效率值为 1，表明其已实现投入、产出配置相对最优状态；反之，若松弛值大于 0 且效率值低于 1，则说明该决策单元存在优化空间。

2.4 典型场景获取模型

为模拟光伏发电出力与负荷功率的随机性与间歇性，采用拉丁超立方采样改进蒙特卡罗方法，生成运行场景^[20]。

设随机变量 X 为光伏出力/负荷功率，服从连

续概率分布,其累积分布函数为 $F(x)=P(X\leq x)$,其逆累积分布函数为 $F^{-1}(u)$ ($u\in[0,1]$ 为均匀随机数)。将 $[0,1]$ 等分为 N 个互不重叠子区间(即抽样样本),在每个子区间随机抽取均匀随机数 u_i ($i=1,2,\dots,N$),通过反变换法得到抽样样本,核心模型如下:

$$\begin{cases} u_i \sim U(\frac{i-1}{N}, \frac{i}{N}), \\ x_i = F^{-1}(u_i) \end{cases} \quad (15)$$

式中 $U(\frac{i-1}{N}, \frac{i}{N})$ 为 $[\frac{i-1}{N}, \frac{i}{N}]$ 上的均匀分布。

3 仿真案例

3.1 基础数据

由于用户行为具有随机性,光伏发电具有间歇性,电力供应与电力需求均为随机变量。其中,负荷样本满足参数 α 、 β 均取1的Beta分布,光伏样本满足参数 α 、 β 均取2的Beta分布。参考2.4节方法,生成14组负荷与光伏的随机样本,并将其接入IEEE 14节点系统,用于验证所提运行场景。

基于所构建模型,利用MATLAB编程,程序主要包括系统潮流-碳流分析、集群划分计算、系统电碳指标关键路径影响分析、系统运营效率评估分析4个模块。

3.2 考虑光伏辅助服务的系统运营分析

为分析光伏辅助服务对系统运营支撑效果,设置2种仿真场景:1)无辅助服务方案作为基准场景,即不考虑光伏发电功率跟踪的影响;2)考虑光伏辅助服务方案作为对比场景。2个方案系统结构一致,通过观测2个方案在多时间尺度下差异,验证光伏辅助服务对系统低碳运营贡献,并明确其最佳支撑时刻,为CAS模式下系统效率调控提供依据。

3.2.1 系统电气量指标对比

2个方案电气量指标对比如图1所示。

1) 线损率

由图1(a)可见,无辅助服务方案下,线损率波动明显:负荷谷段(04:00)线损率为4.915%;随着负荷与光伏出力变化,负荷峰段(13:00—24:00)

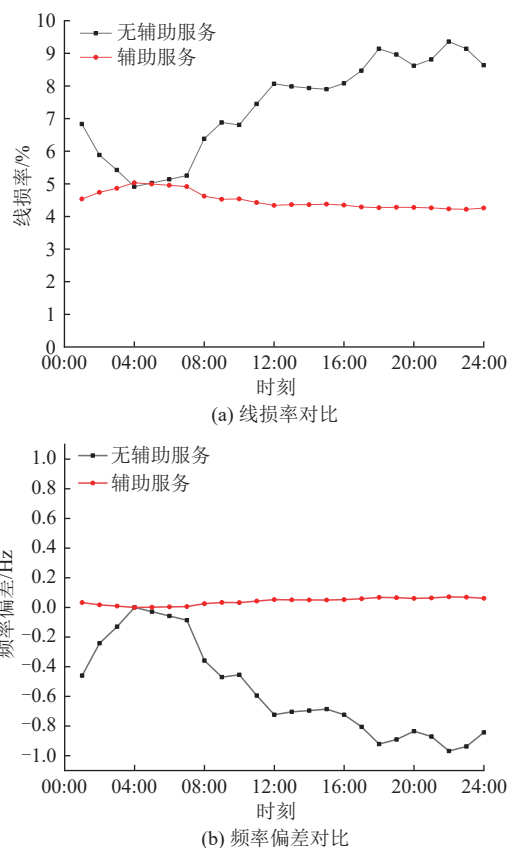


图1 电气量指标对比

Fig. 1 Comparison of electrical quantity indicators

与光伏出力峰段(07:00—20:00)重叠时段的线损率持续偏高,多个时段超过6.000%,并在22:00负荷高峰时达到最大值9.141%,峰谷线损率差值较大。辅助服务方案下,全时段线损率维持低位:04:00线损率为4.955%;07:00—20:00线损率稳定控制在4.300%~4.600%,无明显波动;23:00线损率降至最小值4.220%。

2) 频率偏差

由图1(b)可见,无辅助服务方案下,负荷持续攀升的峰段(04:00—24:00)频率偏差波动较大,09:00后频率偏差绝对值超出0.5 Hz国家标准要求,22:00负荷高峰时频率偏差绝对值最大,达到0.969 Hz,03:00负荷谷段频率偏差绝对值最小,为0.130 Hz,峰谷频率偏差超出国家标准要求。辅助服务方案下,光伏出力峰段频率偏差绝对值减小,全天峰谷频率偏差均控制在 ± 0.080 Hz内;综上,光伏出力峰段的频率支撑能力可有效覆盖负荷峰段主要波动,峰谷频率偏差符合国家标准要求,说明辅助服务方案在改善频率偏差方面具

有更好的系统稳定支撑能力。

3.2.2 系统动态碳流量相关指标对比

2种方案下碳流量指标对比如图2所示。

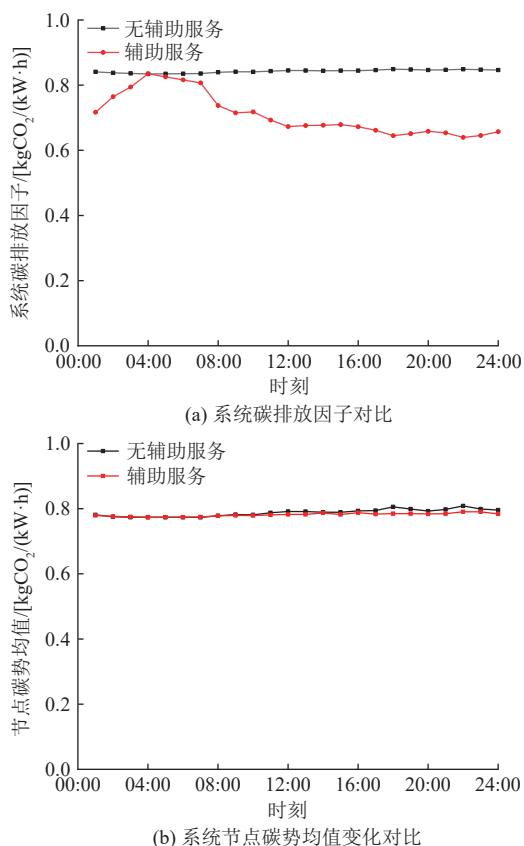


图2 碳流量指标对比

Fig. 2 Comparison of carbon flow indicators

1) 碳排放因子

从图2(a)可以看出,无辅助服务方案下,04:00负荷谷段碳排放因子最小,为0.834,18:00负荷峰段碳排放因子达到最大值0.849,全天碳排放因子峰谷波动极小且维持高位。辅助服务方案下,04:00达到最大值0.835,04:00之后光伏出力逐渐提升,碳排放因子在日间光伏出力高峰时段持续下降,22:00光伏出力谷段降至最小值0.640,碳排放因子较无辅助服务方案下降约16.500%,日间光照峰段减碳效果尤为突出。

2) 节点碳势均值

从图2(b)可以看出,无辅助服务方案下,系统节点碳势均值全天存在一定波动,其最小值0.774出现在07:00,最大值0.809出现在22:00,全天最大变化范围为0.035,其中18:00、22:00波动相对明显。在辅助服务方案下,系统节点碳

势均值全天仅小幅波动,其最小值0.773出现在04:00,最大值0.791出现在22:00,全天最大变化范围仅0.018,波动幅度较无辅助服务更小。综合对比可知,辅助服务方案在小幅降低系统平均碳势方面效果更好。

3.3 系统运营效率分析

结合2.2和2.3分析,对不同光伏发电主体的集群进行划分,分析不同集群效率及影响集群产出指标的关键路径。

3.3.1 参与集群主体的确定方法

不同主体之间节点相似度是求解 q 值的基础,当 q 值达到最大时,可确定参与集群的主体及数量。 q 值求解次数取决于接入系统节点的光伏发电主体数量。模块度函数迭代计算与优化分析结果表明:集群主体数量 $z=14$ 时, q 值最小,仅0.136;当 $z=4$ 时, q 值达到最大,为0.755,对应接入系统节点的发电主体为光伏2、3、4、5,由此确定参与集群1的主体。对于剩余10个发电主体,继续按照2.2节方法,通过4轮划分,确定不同集群的最佳参与主体,结果如表1所示。其他集群划分的 q 值计算方法与此类似。

表1 集群划分结果

Tab. 1 Cluster partitioning results

集群	光伏发电主体	q 值
1	2、3、4、5	0.755
2	11、14	0.894
3	6、9、12、13	0.903
4	1、7、8、10	0.903

3.3.2 敏感性分析

为量化分析指标权重对集群划分的影响程度,以光伏调控容量、节点净负荷碳流率、节点碳势为评价指标,采用控制变量法进行权重扰动分析。先通过Z-score标准化消除量纲差异,基于加权欧式距离构建节点相似度矩阵;以均方误差(mean squared error, MSE)度量矩阵偏差,结合皮尔逊相关系数与变异系数评价敏感性;经Min-Max归一化后,按MSE 50%、相关系数30%、变异系数20%加权计算综合敏感性得分,给出敏感性排序,如表2所示。

以上敏感性分析结果显示,节点净负荷碳流

表2 各评价指标敏感性权重分配

Tab. 2 Sensitivity weight distribution of each evaluation indicator

评价指标	节点净负荷碳流率	节点碳势	光伏调控容量
MSE	110.312	110.072	109.965
皮尔逊相关系数	0.943	0.912	0.919
变异系数	0.032	0.018	0.019
综合敏感性得分	1.000	0.154	0.092
敏感性排名	1	2	3

率对集群划分影响程度最敏感，光伏调控容量最不敏感，说明集群划分确定后，改变光伏调控容量或其权重不会影响集群划分。

3.3.3 系统效率对比分析

基于以上分析，得到集群划分结果及系统效率，如表3所示。

表3 不同CAS模式下的系统效率

Tab. 3 System efficiency under different CAS modes

时刻	系统效率			
	集群1	集群2	集群3	集群4
07:00	1.000	0.846	1.000	1.000
08:00	1.000	0.782	1.000	1.000
09:00	1.000	0.774	1.000	1.000
10:00	1.000	0.486	1.000	1.000
11:00	1.000	0.591	1.000	1.000
12:00	1.000	0.822	1.000	1.000
13:00	1.000	1.000	1.000	1.000
14:00	1.000	1.000	1.000	1.000
15:00	1.000	0.901	1.000	1.000
16:00	0.868	0.850	0.860	0.850
17:00	0.988	0.867	0.994	1.000
18:00	1.000	1.000	1.000	1.000
19:00	1.000	0.313	1.000	1.000
20:00	1.000	0.425	1.000	1.000

光伏出力峰段 07:00 - 15:00，集群1、3、4效率均为 1.000，处于最优运营状态；集群2多数时段效率低于 1.000，运行效率较差。负荷次高峰与光伏峰段重叠的 16:00—17:00 为全系统效率低谷期，集群1、3、4效率均出现不同程度的下降，其中 16:00 集群1效率最高(0.868)，17:00 集群4效率回归 1.000；集群2在该峰段效率较低。13:00—14:00、18:00 等负荷平稳峰段，所有集群效率都为 1.000；在光伏出力谷段，各集群效率未出现明显异常。从全时段峰谷效率表现来看，集群4仅在 16:00 出现效率小幅下降，在光伏出力峰段、负荷峰段均保持高效运行，为全时段整体运营效率

最优集群。

3.3.4 考虑集群对电碳指标影响路径的系统运行分析

在模拟光伏集群参与系统运行的基础上，结合式(11)–(13)，分析不同集群对系统电碳指标的影响路径。为验证所构建模型的适配性，采用绝对拟合指数、相对拟合指数、简约拟合指数作为模型拟合效果的评价指标，由于所选数据样本较少，在使用 Amos 软件拟合过程中，需多次模拟不同变量残差项之间共变关系，以提升拟合效果。模拟结果表明，3类指数对应的各数据整体表现良好，由此可为计算对比不同集群中不同主体对系统电气量、碳流量路径系数奠定基础。

1) 考虑系统电气量指标影响路径分析

分别从不同集群中不同主体对系统电气量指标影响路径系数中选择最大绝对值进行对比，结果如表4所示。

表4 不同主体对电气量指标影响路径

Tab. 4 Influence pathways of different entities on electrical quantity indicators

光伏参与主体	所属集群	路径系数		
		线损率	电压偏差	频率偏差
4	1	-0.29	-0.27	-0.27
14	2	-0.20	-0.19	0.20
12	3	-0.26	-0.24	0.25
1	4	-0.21	-0.20	0.21

分析结果表明，集群1中光伏4对系统线损率、电压偏差和频率偏差均有改善作用，是该集群中参与电气量指标调控有效主体，其中对线损率影响最为明显。光伏14、12、1对频率偏差影响为正向，存在增大偏差的可能性。集群1对系统电碳指标影响路径如图3所示。

2) 考虑系统碳流量指标影响路径分析

分别从集群中不同主体对系统碳流量指标影响路径系数中选择最大绝对值进行对比，结果如表5所示。

由表5可知，光伏14参与系统调节可降低碳势均值，但会提高碳流率。光伏4、12、1均对碳势均值起到正向支撑作用，均可降低碳流率均值，且光伏4对降低碳流率影响最大。4个主体均有助于降低碳排放因子，其中光伏4对降低碳流率均

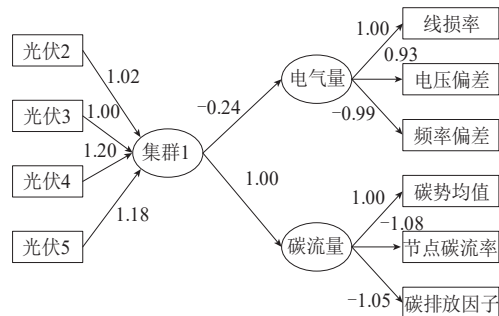


图3 集群1对系统电碳指标的影响路径

Fig. 3 Influence pathway of cluster 1 on system electro-carbon indicators

表5 不同主体对碳流量指标影响路径

Tab. 5 Influence pathways of different entities on carbon flow indicators

光伏参与主体	所属集群	路径系数		
		碳势均值	碳流率均值	碳排放因子
4	1	1.20	-1.30	-1.26
14	2	-0.09	0.09	-0.10
12	3	1.16	-1.25	-1.21
1	4	1.06	-1.14	-1.11

值、碳势均值和碳排放因子的支撑作用最强，应作为系统低碳运营调节的重点主体。

4 结论

构建了考虑CAS的系统低碳运营效率方法体系，分析了光伏发电资源优化配置对系统低碳运营效率支撑机制，主要结论如下：

1) CAS通过光伏逆变器有功-无功协同调节，可在光伏出力峰段改善系统线损率、电压偏差与频率偏差，同时降低碳排放因子、平抑节点碳势波动；峰段支撑效果优于谷段，同时在谷段可维持系统电碳指标均衡。

2) 经集群划分与效率评估，集群4全时段运营效率较好，且可优先作为系统峰段调度的集群；集群1中光伏4为系统电碳指标支配关键主体，同时，其对峰段的调控支配能力较强。

3) 基于所提方法体系并结合案例数据，分析了光伏集群分层级管理及其辅助服务对系统低碳运营效率支撑可行性，为新能源辅助服务市场机制研究提供了应用范式。

受限于当前模型假设及现有数据场景，研究仍存在一定局限性，下一步将在以下方面开展研

究：1) 引入成本-收益分析框架，结合新能源辅助服务市场规则，构建集群内主体收益分配机制，进一步提升方案的经济性与可行性；2) 进一步扩充观测指标数量并细化指标颗粒度，完善多维度系统运行指标观测体系，开展方法普适性研究；3) 结合电力市场现有机制，研究光伏集群参与辅助服务的市场激励策略。

参考文献

[1] 唐爱红, 余文晗, 张莹, 等. 计及混合交易模式的多区域互联电力系统碳排放流计算方法[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3535-3543.

Tang A H, Yu W H, Zhang Y, et al. Calculation method of carbon emission flow in multi-regional interconnected power system considering hybrid trading mode[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3535-3543.

[2] 王长伟, 高超, 牛凯, 等. 基于碳排放流的柔性配电网低碳规划方法[J]. 电力建设, 2025, 46(3): 60-71.

Wang C W, Gao C, Niu K, et al. Low-carbon planning of flexible distribution network based on carbon emission flow[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(3): 60-71.

[3] 王大鑫, 张倩, 郑诗程, 等. 考虑碳排放流和阶梯式碳交易的配电网优化调度[J]. 可再生能源, 2024, 42(12): 1661-1670.

Wang D X, Zhang Q, Zheng S C, et al. Optimization scheduling of distribution networks considering carbon emission flow and staged carbon trading[J]. Renewable Energy Resources, 2024, 42(12): 1661-1670.

[4] 李政平, 薛涵今, 刘骏发, 等. 考虑碳减排能力提升的综合能源系统协调优化模型[J]. 太阳能学报, 2026, 47(4): 152-160.

Li Z P, Xue H J, Liu J F, et al. Coordinated optimization model of integrated energy system considering carbon emission reduction capacity improvement[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2026, 47(4): 152-160.

[5] 梁思琪, 边晓燕, 刘天蔚, 等. 计及台区资源聚合功率的中低压配电系统低碳优化调度方法[J]. 电网技术, 2024, 48(8): 3217-3227.

Liang S Q, Bian X Y, Liu T W, et al. Low-carbon optimal dispatching method for the medium and low voltage distribution system considering the aggregated power of station resources[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3217-3227.

[6] 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.

- Zhou T R, Kang C Q, Xu Q Y, et al. Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 38-43.
- [7] 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.
- Wang C Q, Chen Y, Wen F S, et al. Improvement and perfection of carbon emission flow theory in power systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1683-1693.
- [8] GB/T 40595—2021 并网电源一次调频技术规定及试验导则[S].
- GB/T 40595—2021 Guide for technology and test on primary frequency control of grid-connected power resource[S].
- [9] GB/T 19964—2024 光伏电站接入电力系统技术规定[S].
- GB/T 19964—2024 Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system[S].
- [10] 王亭岭, 李帅, 熊军华, 等. 典型电能质量扰动下新能源配电网附加损耗量化分析[J]. 太阳能学报, 2025, 46(5): 176-184.
- Wang T L, Li S, Xiong J H, et al. Quantitative analysis of additional losses in new energy distribution networks under typical power quality disturbances[J]. Acta Energiac Solaris Sinica, 2025, 46(5): 176-184.
- [11] Luo C L, Ooi B T. Frequency deviation of thermal power plants due to wind farms[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 708-716.
- [12] 廖孟柯, 周红莲, 崔勇, 等. 考虑光伏发电辅助服务的系统电碳能效测度方法研究[J]. 电气工程学报, 2025, 20(6): 431-440.
- Liao M K, Zhou H L, Cui Y, et al. Research on energy efficiency measurement method of system electricity carbon considering photovoltaic power generation auxiliary service[J]. Journal of Electrical Engineering, 2025, 20(6): 431-440.
- [13] 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.
- [14] 张帆. 大规模分散光伏电源接入配电网的协同优化研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- Zhang F. Research on collaborative optimization of large scale distributed photovoltaic in distribution network[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [15] 卜强生, 吕朋蓬, 李炜祺, 等. 基于SLM-RBF的配电网分布式光伏集群智能划分策略[J]. 上海交通大学学报, 2024, 58(10): 1534-1543.
- Bu Q S, Lü P P, Li W Q, et al. Intelligent partition strategy of distributed photovoltaic cluster in distribution network based on SLM-RBF[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2024, 58(10): 1534-1543.
- [16] 刘博, 陈佳璇, 李江. 基于SEM-MIP状态估计的配电网拓扑辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(13): 69-77.
- Liu B, Chen J X, Li J. SEM-MIP based state estimation for topology identification in a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(13): 69-77.
- [17] 刘敦楠, 刘睿智, 罗朝春, 等. 基于结构方程的电力市场效率优化路径方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 36-41.
- Liu D N, Liu R Z, Luo C C, et al. Path optimization method of electricity market efficiency based on structural equation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 36-41.
- [18] 李鹏, 文淼, 董存, 等. 基于模糊DEMATEL-超效率DEA的可再生能源发电技术综合效益评估方法[J]. 电网技术, 2024, 48(6): 2346-2355.
- Li P, Wen M, Dong C, et al. Comprehensive benefits evaluation of renewable energy development based on fuzzy DEMATEL-super-efficiency DEA[J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2346-2355.
- [19] 赵乐冰, 王蕾, 万灿, 等. 基于数据包络分析法的城市综合能源系统分环节能效评价[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(17): 132-141.
- Zhao L B, Wang L, Wan C, et al. Segmented energy efficiency evaluation of urban integrated energy system based on data envelopment analysis method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(17): 132-141.
- [20] 解仡, 孙丹阳, 张刚, 等. 计及风光不确定性的风-光-光热联合发电系统中光热电站储热容量优化配置[J]. 智慧电力, 2024, 52(2): 32-39.
- Xie T, Sun D Y, Zhang G, et al. Optimal capacity configuration of thermal storage within CSP plant in wind-PV-CSP hybrid power generation system considering uncertainty of wind and photovoltaic power[J]. Smart Power, 2024, 52(2): 32-39.

收稿日期: 2026-04-13。

修回日期: 2026-06-03。

作者简介:



崔勇

崔勇(1978)，男，博士，副教授，研究方向为新能源电力系统优化、能源管理，cuiyong826@126.com；



倪申鑫

倪申鑫(2002)，男，硕士研究生，研究方向为新能源电力系统优化、能源管理，nishenx2025@163.com；



蔡昌春

蔡昌春(1981)，男，博士，副教授，研究方向为综合能源系统建模与控制、海上大规模新能源并网控制，fload_cai@163.com；



许坤

许坤(1977)，男，高级工程师，研究方向为电力工程设计及管理。

(责任编辑 尚彩娟)