

基于动态集群划分的微电网风光储协同 优化运行策略

翟丙旭¹, 赵岩松², 郭昱辰³, 李远卓¹, 姜智霖¹, 肖迁²

(1. 国网冀北电力有限公司, 北京 100053;

2. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072;

3. 天津大学 储能科学与工程研究院, 天津 300354)

摘要:在“双碳”能源战略背景下, 光伏(PV)等新能源高比例接入电力系统, 传统调度方案难以有效应对其出力随机性与波动性, 弃光现象频发, 甚至出现局部反调峰导致的峰谷差持续扩大的问题。为解决上述问题, 以含规模化光伏的微电网为研究对象, 提出一种考虑光伏集群动态聚类划分的微电网风光储协同优化运行策略。首先, 以提升光伏出力平滑性为目标, 基于趋势不一致性距离, 通过K-means动态集群划分与误差平方和(SSE)指标确定光伏最优集群划分方案与动态调整策略。其次, 基于集群划分结果, 综合源荷储各侧调度运行成本, 提出微电网风光储协同优化策略。最终, 通过算例分析表明, 所提方法能有效利用光伏集群的平滑效应特性, 提升新能源消纳水平, 并实现系统运行经济性提升与削峰填谷等多维运行目标。

关键词:动态集群划分; 新能源消纳; 微电网优化调度; 多时间尺度

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd27069

A Coordinated Optimization Operation Strategy for Wind-solar-storage in Microgrids Based on Dynamic Cluster Partitioning

ZHAI Bingxu¹, ZHAO Yansong², GUO Yuchen³, LI Yuanzhuo¹, JIANG Zhilin¹, XIAO Qian²

(1. State Grid Hebei North Electric Power Co., Ltd., Beijing 100053, China;

2. Ministry of Education Key Laboratory of Smart Grid, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. Institute of Energy Storage Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

Abstract: Under the carbon peaking and carbon neutrality goals, the high integration of new energy sources like photovoltaics (PV) into the power system makes it difficult for traditional dispatching schemes to effectively handle their randomness and volatility in output. PV curtailment occurs frequently and local counter-peak regulation further exacerbates the peak-valley load difference. To address these issues, focused on a microgrid with large-scale PV integration, and a coordinated optimization strategy for wind, PV, and storage operations, considering dynamic clustering and partitioning of PV clusters was proposed. First, with the goal of improving the smoothness of PV output, a dynamic clustering division based on trend inconsistency distance was performed using the K-means algorithm. The optimal clustering scheme and dynamic adjustment strategy were determined using sum of squared error (SSE) indicator. Next, based on the clustering results, a coordinated optimization strategy for wind, PV, and storage in the microgrid was proposed, integrating the operational costs of generation, load, and storage. Finally, case study analysis demonstrated that the proposed method effectively utilized the smoothing effect of PV clusters, enhanced the integration level of new energy, and achieved multiple operational objectives such as improving system economic efficiency and peak shaving and valley filling.

Key words: dynamic cluster partitioning; renewable energy consumption; microgrid optimization dispatch; multi-timescale

基金项目: 国网冀北电力有限公司科技项目(520101240002)

作者简介: 翟丙旭(1987—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统调度运行控制、新能源优化控制等,

Email: zhaibingxu@126.com

通讯作者: 郭昱辰(2004—), 男, 本科, Email: guoyuchen_@tju.edu.cn

在全球能源转型与“双碳”战略目标持续推进的背景下,以光伏、风电为代表的新能源设备呈现迅猛发展态势^[1],我国在可再生能源领域的技术水平已位居世界前列,进一步推动新能源发电设备在新型电力系统中的大规模、高比例、市场化应用。然而,随着网内分布式光伏装机容量的快速提升,其出力固有的间歇性与波动性日益凸显^[2],难以实现可靠消纳与源荷匹配,为电网的安全稳定运行带来严峻挑战^[3]。因此,如何最大限度提升电力系统的新能源消纳水平已成为实现新型电力系统高效运行目标的关键问题。微电网作为一种能够协调分布式电源、储能设备与负荷的自治系统,能够通过优化功率分配实现区域电力电量供需平衡^[4-5],以此成为提升新能源承载能力与源荷平衡度的重要模式^[6]。

为应对光伏等新能源导致的网侧不确定性因素增强,国内外部分学者首先从设备层级出发,针对新能源电站的集群划分方法开展研究,大多基于设备间的电气距离及差异化出力特性进行划分。例如,文献[7]基于日前调度结果计算近似电压灵敏度,并采用K-means算法,依据集群综合指标划分集群。文献[8]通过考虑不同节点间的调压需求与能力,定义电压调节能力匹配度指标,以实现集群划分。文献[9]聚焦波动特征实现同频电站聚类。文献[10]选择正反向电量比、功率中位数与平均数比值等维度作为距离计算依据,采用K-means聚类算法对区域光伏电站进行集群划分。文献[11]基于历史出力数据的功率序列相似性指标完成分布式光伏分群。文献[12]则针对经济性、稳定性与波动量进行综合评估。然而,现有研究较少关注光伏设备间的出力时序互补特征,且多采用静态划分策略,在不确定性场景下的动态适应能力较差,难以满足系统多元调度需求。

在微电网系统层级,微电网协同运行策略方面,文献[13]提出一种基于纵向联邦学习的多主体微电网群协同优化方法,通过本地训练等值封装模型、云端聚合模型与纵向联邦神经网络分布式联合训练,实现隐私保护下的协同优化与策略进化。文献[14]构建基于非合作博弈的多微网协同运行模型,考虑电价不确定性,融入电转气装置与碳捕集系统,打造点对点电能共享的新型低碳电能管理模型。针对电能共享与支付的耦合关系,提出成本降低比分布模型,实现微电网成

本降低最大化。面对新能源随机波动导致的负荷峰谷差加大等运行问题,现有研究通过构建微电网的优化运行模型并生成相应的优化调度策略,以充分利用储能系统、需求侧响应等灵活性资源。文献[15]综合考虑新能源波动等多重不确定因素,建立了考虑分区可靠性约束的分区备用优化模型,以实现模型的精细化管理。文献[16]提出新能源消纳的三态划分法,建立源荷储多阶段优化调度模型,并采用粒子群优化算法对模型进行求解。文献[17]针对微电网调度中风光不确定性与可调潜力利用不足问题,提出日前区间优化方法,构建经济-环保优化模型,并通过Jaya算法进行求解。

综上所述,在高比例光伏并网场景下,传统集群划分方法与调度策略难以有效应对新能源出力的随机性与波动性,弃光现象频发,甚至出现局部反调峰导致的峰谷差持续扩大等问题。因此,本文提出一种考虑光伏集群动态聚类划分的微电网风光储协同优化运行策略。首先,面向光伏出力平滑性提升需求,以趋势不一致性距离作为度量标准,通过K-means聚类场景下的SSE指标变化情况确定最佳聚类数,得出最优集群划分方案与动态调整策略。其次,考虑源荷储调度运行成本,构建微电网风光储协同优化运行模型并求解优化运行策略。最后,通过典型微电网算例进行验证,所提方法能够有效利用光伏集群的平滑效应,提升新能源消纳水平,并实现系统运行经济性提升与削峰填谷等多维运行目标。

1 光伏出力特性与动态集群划分方法

1.1 光伏出力特性模型

光伏发电机组的出力受到光照强度、环境温度和电池结温等因素的影响,其出力模型^[18]可以表示如下:

$$P_{pv}(t) = P_{SET} \times \frac{S(t)}{S_{SET}} \times [1 + K_T \times (T(t) - T_{SET})] \quad (1)$$

式中: $P_{pv}(t)$ 为分布式光伏发电机组 t 时刻的输出有功功率; P_{SET} 为光伏发电机组的额定输出功率; $S(t)$ 为 t 时刻的光照强度; S_{SET} 为标准光照强度; $T(t)$ 为 t 时刻的环境温度; T_{SET} 为标准环境温度; K_T 为温度系数。

1.2 区域光伏集群划分的必要性

随着光伏发电设备数量的增多,集群输出功率逐渐呈现出平滑特性。然而,光伏出力曲线由

固有波动和随机波动叠加而成,其中固有波动作为光伏出力的主要组成部分,其形状表现为下抛物线型的单峰分布。尽管两个光伏发电设备的发电曲线变化趋势存在明显差异,表面上呈现出较低的相关性,但计算所得的相关系数却往往趋近于1。因此,仅从相关系数角度评估光伏的波动一致性时,容易受到固有波动的主导,从而掩盖随机波动的影响,导致该指标不适用于作为光伏集群划分的距离度量工具。

鉴于此,本文提出趋势不一致性系数 K ,用以表征两个光伏发电设备输出功率变化趋势的不同步程度,具体定义如下:

$$K = \sum_{i=2}^n f_i(Pv^1, Pv^2) / (n - 1) \quad (2)$$

其中

$$f_i(Pv^1, Pv^2) = \begin{cases} 1 & (Pv_i^1 - Pv_{i-1}^1)(Pv_i^2 - Pv_{i-1}^2) < 0 \\ 0 & (Pv_i^1 - Pv_{i-1}^1)(Pv_i^2 - Pv_{i-1}^2) \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: Pv^1, Pv^2 分别为两台光伏同一天的发电功率序列; n 为昼间输出功率数值不为零的采样点总数; $f_i(Pv^1, Pv^2)$ 为等间隔采样点之间两光伏日输出功率曲线变化趋势的不同步性,若在某一采样间隔内,两条出力曲线的变化趋势相反,则 $f_i(Pv^1, Pv^2)$ 取值为1,若变化趋势相同,则 $f_i(Pv^1, Pv^2)$ 取值为0。

在日内,两个不同光伏输出功率曲线变化趋势不一致的采样间隔个数占采样总间隔数的比例,其数值取值范围为0至1。该系数数值越大,表明两个光伏输出功率变化趋势的不一致性越高,功率叠加后随机波动相互抵消的能力越强,进而使总输出更为平滑。

1.3 光伏集群动态划分方法

1.3.1 K-means 聚类算法原理

K-means 聚类算法是无监督聚类算法中的典型代表,其主要作用是将 N 个样本划分为 k 个互不相交的集群,确保每个样本都会被划分至某一集群中。

K-means 算法的基本流程如图1所示,概述如下:从 N 个给定样本集合中随机抽取 k 个样本作为初始集群中心;对剩余样本逐一进行遍历,计算其与各个集群中心之间的距离,将其归入距离最小的集群,从而形成新的集群;针对新形成的集群,重新计算其集群中心;重复上述样本集群划分以及集群中心更新的操作,直至集群的划分结果保持稳定,此时算法达到收敛状态,划分

过程终止,最终得到集群的划分方案。

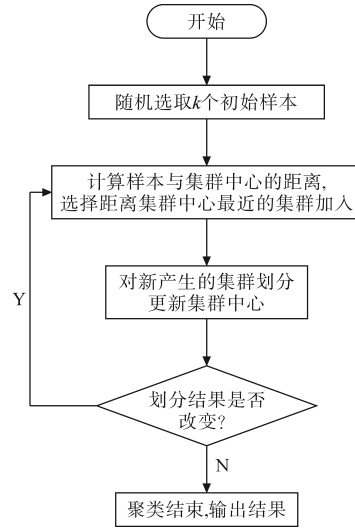


图1 K-means算法流程图

Fig.1 K-means algorithm flowchart

1.3.2 面向光伏出力平滑性提升的集群划分流程

基于趋势不一致性系数定义,本文方法以趋势不一致性距离 KD 作为光伏聚类的距离度量标准,具体表示为

$$KD = 1 - K \quad (4)$$

由此,基于K-means 聚类算法原理,设置光伏集群划分的目标函数如下:

$$f(C) = \min \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{|C_i|} KD_{je_i}^2 \quad (5)$$

式中: KD_{je_i} 为节点 j 与聚类中心 ε_i 之间的趋势不一致性距离; $|C_i|$ 为集群 i 中的节点数量。

在确定聚类目标的基础上,K-means 聚类划分算法需考虑以下三方面关键问题:初始集群中心的选择、集群中心的更新方式以及集群数目 k 值的确定。

1)初始集群中心的选择。在K-means 聚类中,初始集群中心的选择对集群划分结果影响显著,不恰当的初始集群中心容易导致K-means 聚类算法陷入局部最优。因此,本文提出基于节点密度与分散性原则的初始集群中心选择方法。

该方法流程如图2所示,其核心步骤为:首先基于节点周边密度定义节点指数,再从高指数节点集合中依最大分散原则确定初始集群中心。具体而言,先计算各节点与其余节点的距离,将每个节点的距离集合元素升序排列后,取第 M 个元素作为该节点的指数——此指数可表征节点周边密度,通常节点周边节点数量越多,指数越小;继而设定参数,将所有节点指数升序排列,取

第 T 个元素为阈值,筛选出指数小于阈值的节点构成高指数节点集合;最终,选取该集合中指数最高的节点作为首个集群中心,并在集合剩余节点中,选择与现有集群中心距离最远的节点作为后续集群中心。

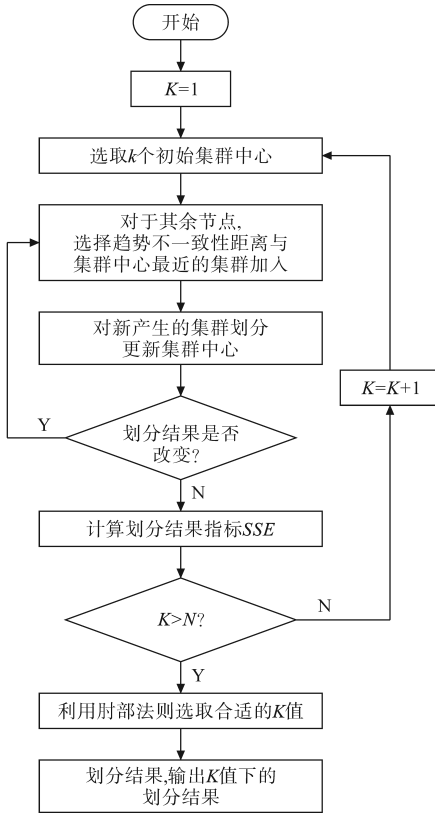


图2 基于平滑性的集群划分方式流程图

Fig.2 Flow chart of cluster partitioning based on smoothness

2) 集群中心的更新。为利用光伏集群聚合后产生的平滑效应,样本间的相似性由趋势不一致性距离 KD 直接表征,从而无法通过计算特征向量来获得新的聚类中心。针对这一问题,本文将新的集群中与其他节点趋势不一致性距离之和最小的节点作为新的聚类中心,具体计算如下式所示:

$$\varepsilon_k = \arg \min_j \sum_{i \in C_k, i \neq j} KD_{ij} \quad (6)$$

式中: ε_k 为集群 k 的聚类中心。

3) 集群数 k 值的选择。在集群划分过程中,集群数量 k 的取值往往难以预先确定,而该值的选择对聚类效果的优劣具有重要影响。本文采用各集群内部节点与对应集群中心之间的趋势不一致性距离的平方和作为评价群划分结果优劣的指标 SSE ,其定义为

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{|C_i|} KD_{je}^2 \quad (7)$$

SSE 越小,表明集群内部结构越紧密,划分效果越好。

随着集群数 k 值的增大,每个集群所包含的设备数量减小,光伏与所属集群中心的距离随之减小,从而导致指标 SSE 随着 k 增大呈单调递减趋势。极端情况下,当每个光伏自成一个集群时,各自成为自身集群中心, SSE 降为 0。然而,在实际调度中,并非 SSE 越小越好,其会降低集群内部的调度灵活性。

经验表明, SSE 随 k 增大而下降的幅度并不均匀,其变化形式如图 3 所示。在 k 较小时, SSE 下降速度较快,随着 k 继续增大, SSE 的下降速度逐渐趋于平缓。

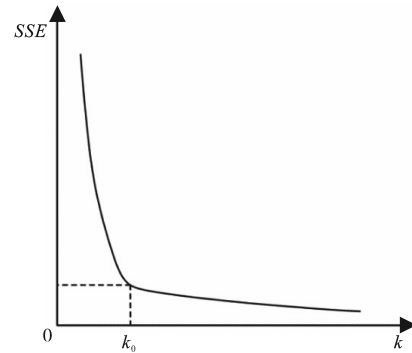


图3 集群划分指标 SSE 与集群数 k 的关系

Fig.3 Diagram of relation between cluster partitioning metrics and the number of clusters

如图 3 所示, k_0 为整个曲线的拐点。在 k_0 之前, SSE 随着 k 增大而迅速下降;在 k_0 之后, k 的增大对 SSE 减小的影响幅度较小。因此,一般将 k_0 确定为最佳集群数量,该取值能够在保证集群划分效果的同时,避免集群数量过多。以上确定最优集群数的方法称为“肘部法则”。

1.3.3 集群平滑效应指标

为评估光伏集群聚类划分后的出力平滑性提升程度,本文提出光伏集群平滑效应系数指标,具体表示如下:

$$\xi_{\text{cluster}} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_{\text{single}}^i}{\sigma_{\text{cluster}}} \quad (8)$$

式中: σ_{single}^i 为集群中第 i 个电站的有效波动率; σ_{cluster} 为集群总出力的有效波动率; N 为集群中电站的个数。

ξ_{cluster} 大于 1,说明光伏集群出力相对于各单个光伏具有平滑效果,且 ξ_{cluster} 越大,说明功率波动的平滑效果愈显著^[19]。

2 面向新能源可靠消纳的微电网风光储协同优化运行模型

2.1 优化目标函数

所提面向新能源可靠消纳的微电网优化运行模型以运行成本最小化为目标函数,综合考虑电力系统运维成本、环境收益等因素^[20]。具体计算方式如下:

1) 燃气轮机发电成本:

$$C_{gt} = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^{N_c} [a_i (P_{gt,i,t})^2 + b_i P_{gt,i,t} + c_i] \quad (9)$$

式中: C_{gt} 为发电成本; a_i, b_i, c_i 分别为燃气轮机*i*发电成本函数的二次项、一次项与常数项系数; $P_{gt,i,t}$ 为燃气轮机*i*在第*t*段的出力; N_c 为燃气轮机总数, $i=1, 2, \dots, N_c$ 。

2) 储能系统电量收益。储能系统投资成本和运维成本分别采用投资成本等年值和年运维成本计算;则储能系统电量收益计算如下:

$$E_{storage} = \sum_{t=1}^T \{ [E_{ta1} P_{d1,t} + E_{ta2} P_{d2,t} - (P_{c1,t} + P_{c2,t})] C_{p,t} \} \quad (10)$$

式中: $E_{storage}$ 为储能系统的电量收益; E_{ta1}, E_{ta2} 分别为飞轮储能效率与锂离子电池储能容量; $P_{c1,t}, P_{c2,t}$ 分别为在第*t*时段,飞轮储能与锂离子电池储能充电功率; $P_{d1,t}, P_{d2,t}$ 分别为第*t*时段的飞轮储能与锂离子电池储能放电功率; $C_{p,t}$ 为第*t*时段的实时电网电价。

3) 弃光弃风惩罚成本:

$$C_{punish} = \sum_{t=1}^T [(P_{pv,t}^{max} - P_{pv,t}) C_{pv} + (P_{wind,t}^{max} - P_{wind,t}) C_w] \quad (11)$$

式中: $P_{pv,t}^{max}, P_{wind,t}^{max}$ 分别为光电、风电的最大有功出力; $P_{pv,t}, P_{wind,t}$ 分别为光电、风电机组在第*t*时刻的实际出力; C_{pv} 为单位弃光量惩罚成本; C_w 为单位弃风量惩罚成本。

4) 储能系统运维成本:

$$C_{rotate} = \sum_{t=1}^T [(K_{load} P_{load,t} + K_{wt} P_{wind,t}^{max} + K_{pv} P_{pv,t}^{max}) C_r] \quad (12)$$

$$C_{new} = \sum_{t=1}^T [(C_{wt} P_{wind,t} + C_{pv} P_{pv,t}) + (P_{c1,t} + P_{c2,t}) P_{operate}] \quad (13)$$

式中: C_{rotate} 为储能系统的旋转备用成本; K_{load}, K_{wt}, K_{pv} 分别为负荷、风电、光伏预测误差率; $P_{load,t}$ 为在

第*t*时段负荷所需功率; C_r 为旋转备用费用系数; C_{new} 为光伏和风力发电的运行成本; C_{pv}, C_{wt} 分别为光伏与风电单位运行成本; $P_{operate}$ 为储能系统单位运行成本。

5) 风光并网储能系统环境收益:

$$R_{storage} = \sum_{t=1}^T [E_{ta1} P_{d1,t} + E_{ta2} P_{d2,t}] \sum_{h=1}^H (\rho_h C_h) \quad (14)$$

$$R_{eco} = \sum_{t=1}^T (a_{wt} P_{wind,t} + a_{pv} P_{pv,t} + R_{storage}) \quad (15)$$

式中: $R_{storage}$ 为储能设备环境收益; H 为生产电能时排放污染物的数目; ρ_h 为单位电能对应的第*h*种污染物的排放密度; C_h 为第*h*种污染物的环境损耗; a_{pv}, a_{wt} 分别为光伏、风电并网的环境收益系数; R_{eco} 为风光并网储能系统环境收益。

综上,微电网优化运行模型的总体目标函数表示如下:

$$\min C_{peaksha} = C_{gt} - E_{storage} + C_{punish} + C_{rotate} + C_{new} - R_{storage} - R_{eco} \quad (16)$$

2.2 运行约束条件

1) 功率平衡约束。微电网系统中燃气轮机出力、风光出力以及储能系统的充放电出力之和应等于负荷减去潜在的调峰不足量,如下式所示:

$$\sum_{i=1}^T P_{gt,i,t} + P_{pv,t} + P_{wind,t} + P_{d1,t} = -P_{d2,t} + P_{c1,t} + P_{c2,t} + P_{load,t} \quad (17)$$

2) 储能系统充放电约束。采用0-1变量对储能系统的出力上、下限进行约束,可保证储能能够在0至最大功率之间进行充放电,且不出现同时充放电的情况。如下式所示:

$$0 \leq P_{ess,t}^{discharge} \leq \mu_{ess,t}^{discharge} P_{ess} \quad (18)$$

$$0 \leq P_{ess,t}^{charge} \leq \mu_{ess,t}^{charge} P_{ess} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \mu_{ess,t}^{discharge}, \mu_{ess,t}^{charge} \in \{0, 1\} \\ \mu_{ess,t}^{discharge} + \mu_{ess,t}^{charge} \leq 1 \end{cases} \quad (20)$$

式中: P_{ess} 为储能系统最大充放电功率; $\mu_{ess,t}^{discharge}$ 为储能系统放电状态指示变量; $\mu_{ess,t}^{charge}$ 为储能系统充电状态指示变量。

3) 储能系统电量变化约束:

$$E_{ess,t} = E_{ess,t-1} + \eta_{ess}^{charge} P_{ess,t}^{charge} - \frac{P_{ess,t}^{discharge}}{\eta_{ess}^{discharge}} \quad (21)$$

式中: $E_{ess,t}$ 为储能系统在第*t*时段的电量; η_{ess}^{charge} 为储能系统的充电效率; $\eta_{ess}^{discharge}$ 为储能系统的放电效率。

4) 储能系统荷电状态约束:

$$SOC_{ess}^{min} E_{ess} \leq E_{ess,t} \leq SOC_{ess}^{max} E_{ess} \quad (22)$$

式中: E_{ess} 为储能系统容量; SOC_{ess}^{min} 为储能最小荷电状态; SOC_{ess}^{max} 为储能最大荷电状态。

5)燃气轮机爬坡速率约束。受设备自身响应速度的限制,燃气轮机组存在爬坡速率上限约束:

$$\begin{cases} P_{gt,t,i} - P_{gt,t-1,i} \leq \Delta P_{gt,i}^{up} & P_{gt,t,i} > P_{gt,t-1,i} \\ P_{gt,t-1,i} - P_{gt,t,i} \leq \Delta P_{gt,i}^{down} & P_{gt,t,i} < P_{gt,t-1,i} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $\Delta P_{gt,i}^{up}$ 为燃气轮机在单位时间尺度内功率上升量的限值; $\Delta P_{gt,i}^{down}$ 为燃气轮机在单位时间尺度内功率下降量的限值。

6)燃气轮机出力上、下限约束。燃气轮机组出力必须在设备自身出力上限的约束范围内,如下式所示:

$$P_{gt,t,i}^{min} \leq P_{gt,t,i} \leq P_{gt,t,i}^{max} \quad (24)$$

式中: $P_{gt,t,i}^{min}$ 为 t 时刻燃气轮机 i 出力的下限; $P_{gt,t,i}^{max}$ 为 t 时刻燃气轮机 i 的出力的上限。

7)风光出力上、下限约束。风光设备的实际出力必须在各自出力上限约束的范围内:

$$0 \leq P_{pv,t} \leq P_{pv,t}^{max} \quad (25)$$

$$0 \leq P_{wind,t} \leq P_{wind,t}^{max} \quad (26)$$

8)系统每日弃光弃风量约束。为保证光伏与风电的高效消纳,特别引入日弃光弃风量约束,如下式所示:

$$0 \leq \sum_{t=1}^T (P_{pv,t}^{max} - P_{pv,t}) \leq a \quad (27)$$

$$0 \leq \sum_{t=1}^T (P_{wind,t}^{max} - P_{wind,t}) \leq b \quad (28)$$

式中: a, b 分别为每日弃光量与弃风量的上限。

3 算例分析

3.1 算例场景说明

本文基于典型微电网系统开展算例分析,其中接入7台分布式光伏发电设备、1台风电机组、1台锂离子电池储能设备、1台飞轮储能设备以及6台燃气轮机组。储能与燃气轮机组部分运行参数如表1和表2所示。分时电价设置具体如表3所示。光伏与风机设备设置参数具体如表4所示。图4~图6分别给出微电网的日内净负荷曲线、风光日前出力预测曲线。

表1 储能系统参数

Tab.1 Energy storage system parameters

参数	设备	
	飞轮储能	锂离子电池储能
充放电效率	0.90	0.95
储能容量/MW	30	250

表2 燃气轮机参数

Tab.2 Gas turbine parameters

参数	机组					
	1	2	3	4	5	6
出力上限/MW	200	200	200	300	300	600
出力下限/MW	0	0	0	0	0	0
爬坡率上限/(MW·h ⁻¹)	100	100	100	150	150	250

表3 分时电价

Tab.3 Time-of-use price

分时	时段	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]
谷段	00:00—08:00	0.414
平段	08:00—09:00 12:00—19:00	0.782
峰段	09:00—12:00 19:00—24:00	1.149

表4 光伏与风机设备参数

Tab.4 Photovoltaic and wind turbine equipment parameters

参数	设备	
	光伏设备	风机设备
弃光/风惩罚系数/[元·(MW) ⁻¹]	500	500
单位运行成本/[元·(MW) ⁻¹]	30	40
环境收益系数/[元·(MW) ⁻¹]	80	80
预测误差率	0.05	0.05

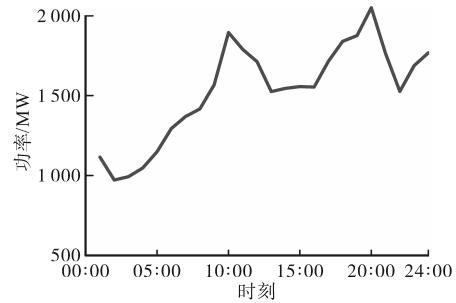


图4 微电网净负荷图

Fig.4 Diagram of power system net load

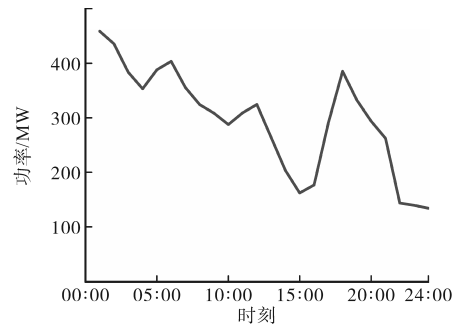


图5 风电日前出力预测曲线图

Fig.5 Day-ahead forecast curve of wind power output

3.2 光伏集群动态划分的有效性验证

本文算例首先基于7台分布式光伏发电设备的日前功率预测序列,以10 min为间隔得到144个功率采样点,将趋势不一致性距离作为聚类距

高度量值,7组曲线的趋势不一致性距离计算结果如表5所示。

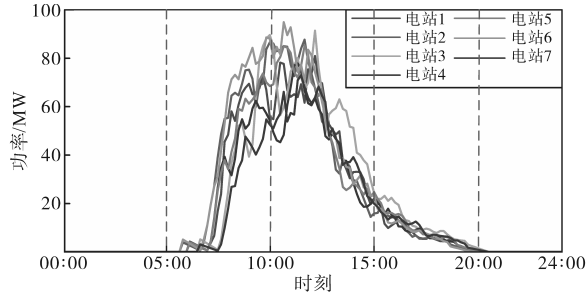


图6 光伏日前出力预测曲线图

Fig.6 Day-ahead forecast curves of PV power output

表5 集群划分趋势不一致性指标

Tab.5 Trend inconsistency index of cluster division

设备	电站1	电站2	电站3	电站4	电站5	电站6	电站7
电站1	1	2.08	1.55	2.39	0.19	2.95	2.20
电站2	2.08	1	0.54	4.47	2.26	0.88	4.27
电站3	1.55	0.54	1	3.94	1.74	1.41	3.75
电站4	2.39	4.47	3.94	1	2.21	5.35	0.20
电站5	0.19	2.26	1.74	2.21	1	3.14	2.01
电站6	2.95	0.88	1.40	5.35	3.14	1	5.15
电站7	2.20	4.27	3.75	0.20	2.01	5.15	1

利用K-means 聚类算法进行光伏集群划分的SSE 指标随不同聚类数的变化情况如图7所示。根据肘部法则,当 $k \geq 3$ 时,集群数 k 的增大对SSE的影响程度明显减小,因此能够选定最优集群数为3,此时SSE指标值为1.053。 $k=3$ 时的静态集群划分结果与各集群的平滑效应系数 ξ 如表6所示。

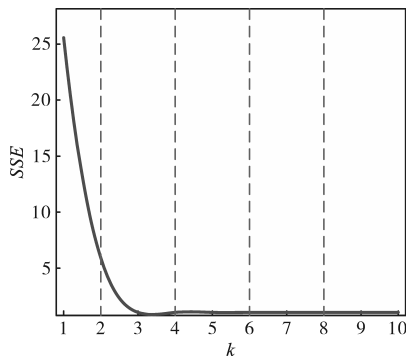


图7 划分指标SSE在不同k值下的变化曲线图

Fig.7 Diagram of SSE variation curve for different k values

表6 全天最佳聚类划分与平滑效应系数表

Tab.6 Table of optimal clustering partition and smoothing effect coefficients for the entire day

集群编号	光伏编号	平滑效应系数 ξ
集群1	电站1,电站5	2.016
集群2	电站4,电站7	2.027
集群3	电站2,电站3,电站6	3.094

各光伏功率曲线及集群总功率图如图8所

示,通过将聚类划分后光伏集群的发电功率曲线与7台光伏发电设备的出力曲线进行对比,能够直观看出各集群内的光伏呈现良好互补特性,使得聚类后的出力波动性显著降低。

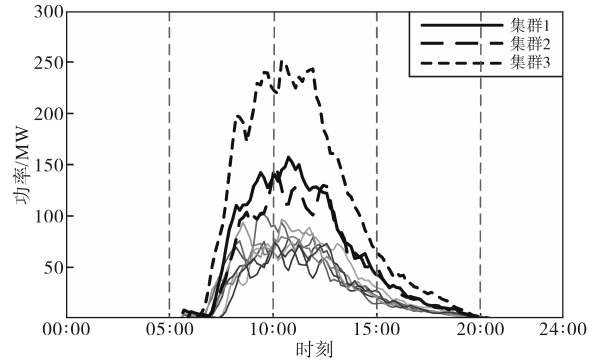


图8 各光伏功率曲线及集群总功率图

Fig.8 Diagram of power curves of each PV power station and total power of the cluster

在上述静态集群划分基础上,在日内每1h的时间尺度内对所有光伏电站进行重新集群划分,以实现划分方式的动态调整,其最佳聚类数 k 随时间的变化情况如图9所示。与静态集群划分的机理相似,动态划分过程同样以 $k=3$ 的情况为主,但在部分时段存在最佳聚类数变化的情况。日内具体的动态划分结果如表7所示,最佳聚类数所对应SSE指标的日内变化情况如图10所示。表中A,B,C为集群划分序号。

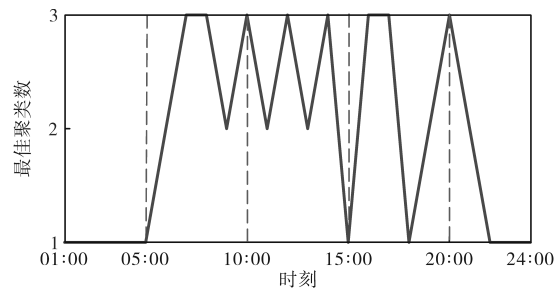


图9 最佳聚类数k随时间变化图

Fig.9 Diagram of the best k value over time

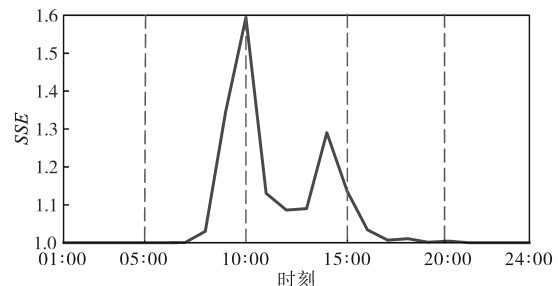


图10 划分指标SSE系数随时间变化图

Fig.10 Diagram of the SSE value over time

动态光伏集群划分场景下的平滑效应系数变化情况如图11所示,通过计算得出,在日间光

光伏发电阶段(07:00—20:00),光伏集群的平均平滑效应系数为2.563,相较于静态划分结果下的数据提升7.73%。

表7 24小时聚类分配表格
Tab.7 Table of 24 h cluster allocation

时刻	最佳集群数	光伏编号						
		1	2	3	4	5	6	7
01:00	1	A	A	A	A	A	A	A
02:00	1	A	A	A	A	A	A	A
03:00	1	A	A	A	A	A	A	A
04:00	1	A	A	A	A	A	A	A
05:00	1	A	A	A	A	A	A	A
06:00	2	A	B	A	A	A	B	A
07:00	3	B	C	A	B	B	C	A
08:00	3	A	C	B	A	A	C	B
09:00	2	B	B	A	A	A	B	A
10:00	3	A	A	A	B	A	A	B
11:00	2	B	A	B	B	A	A	B
12:00	3	B	B	A	C	B	A	C
13:00	2	B	A	B	A	A	B	B
14:00	3	B	B	A	B	A	B	A
15:00	1	A	A	A	A	A	A	A
16:00	3	A	B	A	A	A	B	A
17:00	3	A	B	A	B	B	A	A
18:00	1	A	A	A	A	A	A	A
19:00	2	A	A	B	A	A	A	B
20:00	3	B	A	B	B	B	A	B
21:00	2	A	A	B	A	A	A	B
22:00	1	A	A	A	A	A	A	A
23:00	1	A	A	A	A	A	A	A
24:00	1	A	A	A	A	A	A	A

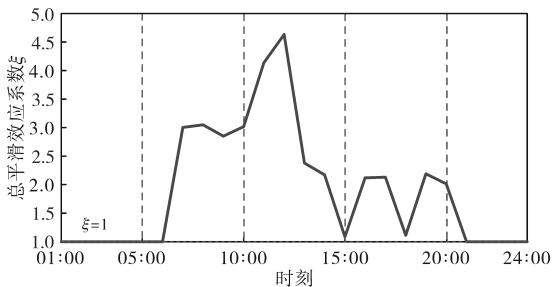


图11 平滑效应系数随时间变化

Fig.11 Diagram of the value of smoothness over time

3.3 系统优化运行性能分析

在光伏动态集群划分的基础上,面向新能源消纳率提升与负荷峰谷差抑制,考虑源荷储设备的运行成本,本文算例基于Yalmip/Cplex求解器对微电网优化运行模型进行求解并得出合理准确的调度策略,对优化运行结果的具体分析

如下。

3.3.1 经济性分析

微电网中飞轮-锂离子电池混合储能系统的充放电功率及荷电状态变化情况如图12、图13所示。在调度周期内,飞轮储能的最大填谷功率为10 MW,最大削峰功率为3.78 MW;锂离子电池储能的最大填谷功率为60 MW,最大削峰功率为33.25 MW。从图中可以看出,混合储能系统主要在00:00—06:00这一负荷低谷时段之间充当负荷进行充电,有效提高了系统的净负荷数值,降低燃气轮机组调峰压力;在10:00—11:00,18:00—21:00等尖峰负荷时间段充当电源进行放电,有效降低了尖峰负荷大小,并减小了燃气轮机的发电成本。

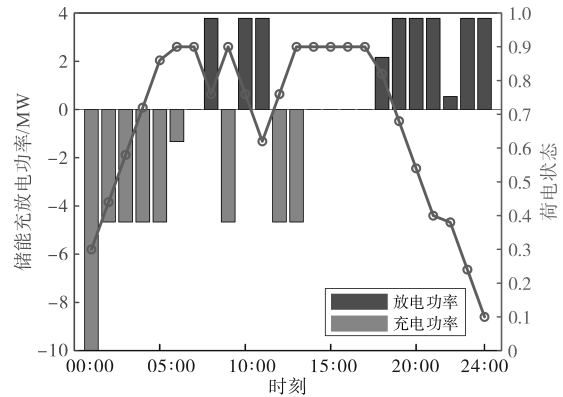


图12 飞轮储能各时段充放电功率及荷电状态

Fig.12 Diagram of flywheel energy storage charge and discharge power and charge state per hour

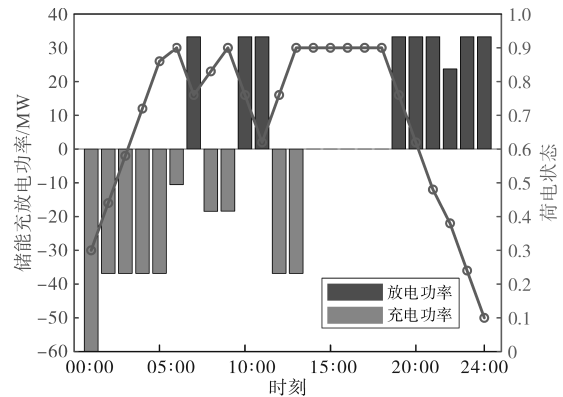


图13 锂离子电池储能各时段充放电功率及荷电状态

Fig.13 Diagram of lithium-ion battery energy storage system charge and discharge power and charge state per hour

在所提优化策略下,系统最小运行净成本为728.35万元,各个时段燃气轮机的最优出力以及风光并网功率如图14所示。燃气轮机组的运行状态得到优化,4~5号燃气轮机组以及6号燃气轮机始终处于开机状态,因为其容量大,可以稳

定地为系统输送功率。1~3号燃气轮机组的开机时段主要集中在06:00以后,因为此时间段内系统负荷需求较高,同样需要较大的容量支持负荷的需求。

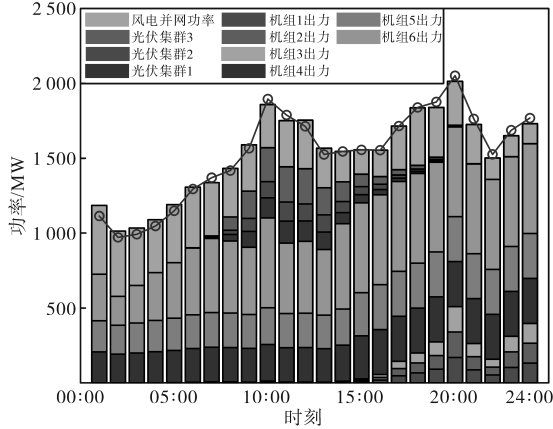


图14 各燃气轮机及风光出力情况

Fig.14 Diagram of gas turbine and wind and solar power

3.3.2 新能源消纳性能分析

通过动态集群划分,能够充分降低光伏出力的波动性,更易于实现网内的动态供需平衡。另一方面,在风光储协同运行过程中,负荷谷段时过剩难以消纳的新能源可被储能系统存储起来,在用电量高、电价贵的峰段时被储能系统释放,实现新能源的充分消纳与“低储高发”获利。

在动态集群划分与协同优化运行策略的共同作用下,系统新能源消纳率得到显著提升。如图15、图16分别为系统光伏与风机的实际出力与预测出力曲线的对比情况,可以看出风光能源基本被完全消纳,其中,光伏平均消纳率为99.62%,风电平均消纳率达到100.00%。

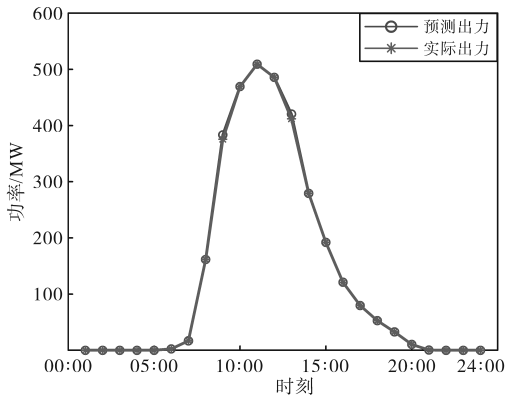


图15 光伏消纳情况图

Fig.15 Diagram of solar power consumption

3.3.3 调峰性能分析

优化前后的净负荷曲线对比情况如图17所示。由图可以看出,在储能系统参与调度后,净

负荷峰谷差得到明显降低,能够达到“削峰填谷”的效果。

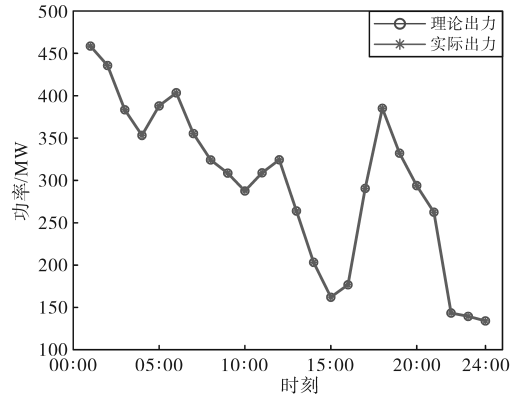


图16 风电消纳情况图

Fig.16 Diagram of wind power consumption

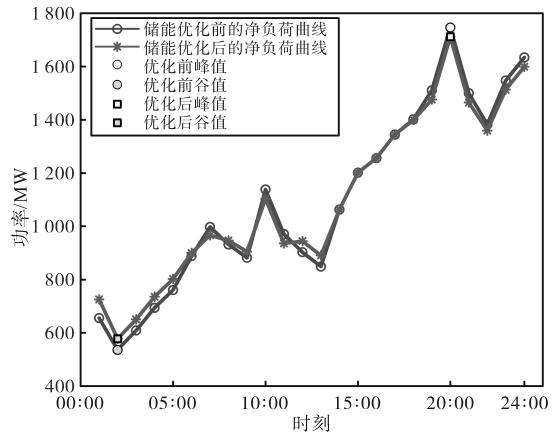


图17 优化前后净负荷比较图

Fig.17 Diagram of net load before and after optimization

在优化调度策略实施之前,其净负荷的最大值为1746.55 MW,最小值为536.15 MW,最大峰谷差为1210.39 MW;在优化后,系统净负荷最大值为1711.56 MW,最小值为577.66 MW,最大峰谷差为1133.90 MW。相比于优化前,微电网的负荷峰谷差降低量为76.5 MW,降幅约为6.3%。

4 结论

为应对传统集群划分与调度策略在高比例光伏接入场景下的动态适应能力局限性,本文提出一种考虑光伏集群动态聚类划分的微电网风光储协同优化运行策略,基于算例分析得出以下结论:

- 1)通过采用K-means聚类算法并引入趋势不一致性系数,所提方法实现了对光伏集群的合理划分,有效提升光伏出力平滑性。动态划分策略在静态方法的基础上将平滑性指标进一步提升7.73%,显著降低光伏出力波动。

2)基于所构建的微电网风光储协同优化运行模型,求解得出的调度策略在提升系统光伏消纳水平的同时,能够有效支撑电网调峰。光伏整体消纳率达到99.62%,电力系统净负荷峰谷差相较于优化前降幅约6.3%。

参考文献

- [1] 乐健,周谦,王曹,等.基于分布式协同的配电网电压和功率优化控制方法研究[J].中国电机工程学报,2020,40(4):1249-1257.
- LE Jian, ZHOU Qian, WANG Cao, et al. Research on voltage and power optimal control strategy of distribution network based on distributed collaborative principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1249-1257.
- [2] 雷雨,李光辉,王伟胜,等.计及光伏阵列的光伏发电阻抗建模与特性分析[J].中国电机工程学报,2024,44(13):5122-5134.
- LEI Yu, LI Guanghui, WANG Weisheng, et al. Impedance modeling and characteristics analysis of photovoltaic generation considering photovoltaic array[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(13): 5122-5134.
- [3] 刘向实,王凌纤,吴炎彬,等.计及配电网运行风险的分布式电源选址定容规划[J].电工技术学报,2019,34(S1):264-271.
- LIU Xiangshi, WANG Lingxian, WU Yanbin, et al. Locating and sizing planning of distributed generation power supply considering the operational risk cost of distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 264-271.
- [4] 别朝红,林超凡,李更丰,等.能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J].中国电机工程学报,2020,40(9):2735-2744.
- BIE Zhaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2744.
- [5] 别朝红,林雁翎,邱爱慈.弹性电网及其恢复力的基本文概念与研究展望[J].电力系统自动化,2015,39(22):1-9.
- BIE Zhaohong, LIN Yanling, QIU Aici. Concept and research prospects of power system resilience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 1-9.
- [6] 王侨侨,曾君,刘俊峰,等.面向微电网源-储-荷互动的分布式多目标优化算法研究[J].中国电机工程学报,2020,40(5):1421-1432.
- WANG Qiaoqiao, ZENG Jun, LIU Junfeng, et al. A distributed multi-objective optimization algorithm for resource-storage-load interaction of microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1421-1431.
- [7] 蒋春容,朱博汶,周旭峰,等.基于分布式光伏集群控制的主动配电网电压优化策略[J].电力工程技术,2025,44(3):188-200.
- JIANG Chunrong, ZHU Bowen, ZHOU Xufeng, et al. Voltage optimization strategy for active distribution network based on distributed photovoltaic cluster control[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(3): 188-200.
- [8] 王艺涵,吴俊勇,原梦遥,等.面向光伏消纳的配电网集群动态划分方法与优化运行策略[J].电力自动化设备,2025,45(8):122-129,147.
- WANG Yihan, WU Junyong, YUAN Mengyao, et al. Dynamic partitioning method and optimized operation strategy for distribution network clusters considering photovoltaic integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(8): 122-129, 147.
- [9] 陈琼.规模化分布式光伏集群的划分方法及其优化控制策略研究[J].电工技术,2025(14):169-172.
- CHEN Qiong. Research on the division method and optimization control strategy of large scale distributed photovoltaic clusters[J]. Electric Engineering, 2025(14): 169-172.
- [10] 文贤馗,何明君,张俊玮,等.基于K均值聚类的光伏集群发电功率超短期预测研究[J].电力系统保护与控制,2025,53(12):165-172.
- WEN Xiankui, HE Mingjun, ZHANG Junwei. Research on ultra-short-term power forecasting of photovoltaic clusters based on K-means clustering[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(12): 165-172.
- [11] 张翔颖.海量分布式光伏集群动态划分与短期功率预测技术研究[D].南京:东南大学,2023.
- ZHANG Xiangying. Research on dynamic segmentation and short-term power prediction techniques for massive distributed PV clusters[D]. Nanjing: Southeast University, 2023.
- [12] 胡迪.含分布式可再生能源集群的配电系统规划研究[D].合肥:合肥工业大学,2020.
- HU Di. Research on planning of distribution systems with distributed renewable energy clusters[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [13] 周毅斌,肖浩,裴玮,等.基于纵向联邦学习的微电网群协同优化运行与策略进化[J].电力系统自动化,2023,47(11):121-132.
- ZHOU Yibin, XIAO Hao, PEI Wei, et al. Cooperative optimization and strategy evolution of microgrid groups based on vertical federated learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(11): 121-132.
- [14] 李希俊,郝飞,李杰,等.基于非合作博弈的多微电网协同运行策略[J].电气工程学报,2025,20(5):283-293.
- LI Xijun, HAO Fei, LI Jie, et al. Distributed collaborative optimization strategy of multi-microgrid based on non-cooperative game[J]. Journal of Electrical Engineering, 2025, 20(5): 283-293.
- [15] 陈鸿鑫,惠恒宇,包铭磊,等.考虑动态分区可靠性约束的新能源电力系统备用优化模型[J].电力系统自动化,2024,48(23):65-75.
- CHEN Hongxin, HUI Hengyu, BAO Minglei, et al. Optimization (下转第22页)

的电网侧储能优化配置[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(7): 62-68, 85.

ZHANG Jinming, OUYANG Sen, WU Han, et al. Optimal configuration of grid-side energy storage considering reliability and operation economy of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 62-68, 85.

[19] 赵晶晶, 樊濠诚, 王涵, 等. 考虑碳减排的配电网电-氢混合储能系统优化配置[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(11): 153-160.

ZHAO Jingjing, FAN Haocheng, WANG Han, et al. Optimal configuration of electricity-hydrogen hybrid energy storage system in distribution network considering carbon emission reduction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(11): 153-160.

[20] 张云晓. 计及供电可靠性与经济性的混合储能容量优化配置研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2024.

ZHANG Yunxiao. Research on the optimal configuration of hybrid energy storage capacity considering power supply reliability and economy[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2024.

[21] 闫大威, 张天宇, 李天翔, 等. 考虑静态电压稳定性的城市电网储能优化配置研究[J]. 浙江电力, 2024, 43(7): 76-85.

YAN Dawei, ZHANG Tianyu, LI Tianxiang, et al. Research on optimal allocation of energy storage in urban power grids considering static voltage stability[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(7): 76-85.

[22] 花赟玥, 杨超然, 何国庆, 等. 考虑小干扰稳定和频率稳定的虚拟惯量配置分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(5): 437-445.

HUA Yunyue, YANG Chaoran, HE Guoqing, et al. Virtual inertia configuration analysis considering small-signal stability and frequency stability[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(5): 437-445.

[23] 张景淳, 陈胜, 彭琰, 等. 计及灵活爬坡的气-电耦合综合能源系统低碳经济调度研究[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3315-3325.

ZHANG Jingchun, CHEN Sheng, PENG Yan, et al. Low carbon economic scheduling of gas-electric coupling integrated energy system considering flexible ramping products[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3315-3325.

收稿日期: 2025-05-16
修改稿日期: 2025-06-06

(上接第13页)

tion model for reserve of power system with renewable energy considering reliability constraints of dynamic partitioning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(23): 65-75.

[16] 葛维春, 张艳军, 高超, 等. 基于风电消纳能力态势划分的源荷储系统分阶段优化策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 26-33, 70.

GE Weichun, ZHANG Yanjun, GAO Chao, et al. Phased optimal strategy of source-load storage system based on state partition of accommodation capacity of wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 26-33, 70.

[17] 苏永新, 聂伟棋, 谭貌. 考虑风电接入和气电转换的综合能源系统日前区间优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 63-71.

SU Yongxin, NIE Weiqi, TAN Mao. Day-ahead interval optimization of integrated energy system considering wind power integration and gas-electricity transformation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 63-71.

[18] 孙浩锋. “源网荷储”协调的主动配电网运行优化分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2022.

SUN Haofeng. Operation optimization analysis of active distribution network based on “source-network-load-storage” coordination[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022.

[19] 王成山, 于波, 肖峻, 等. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 1-8.

WANG Chengshan, YU Bo, XIAO Jun, et al. Sizing of energy storage systems for output smoothing of renewable energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 1-8.

[20] 汪赛. 储能辅助电力系统调峰的容量需求研究[D]. 南宁: 广西大学, 2018.

WANG Sai. Research on capacity demand of the energy storage in power system peak shaving[D]. Nanning: Guangxi University, 2018.

收稿日期: 2025-10-31
修改稿日期: 2025-12-08