

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.05.003

基于改进 K-means 算法的轨道交通风光储系统 容量配置优化

韦庭三¹, 周航¹, 张宇龙², 高波², 侯少彬³

(1. 南宁轨道交通运营有限公司, 广西 南宁 530022; 2. 华东交通大学电气与自动化工程学院,
南昌 330013; 3. 中铁电气化铁路运营管理有限公司, 北京 100036)

摘要: 针对轨道交通供电系统中大规模风光接入引发的出力波动剧烈与储能容量配置不合理等问题, 本文提出一种基于改进 K-means 算法的风光储系统容量优化配置方法。该方法创新地结合轮廓系数与手肘法来联合判定聚类数, 从而提取出具有代表性的典型日场景并赋予概率权重, 这一设计兼顾了数据的典型性与全面性, 避免了传统全年法计算复杂度过高与两周法代表性不足的缺陷。在此基础上, 本文构建了以系统全寿命周期成本最小化与供电可靠性指标(LPSP、EWR)改善为双目标的优化模型, 并采用粒子群优化算法实现风光储容量的全局寻优。基于轨道交通典型运行数据的仿真结果表明, 在平日典型负荷工况下, 所提模型相较传统方法成本节约率可达 32.56%, 可靠性指标改善率可达 28.10%, 验证了该方法的有效性与优越性。

关键词: 轨道交通; 风光储系统; 容量配置; 改进 k-means 算法; 粒子群优化

Capacity Configuration Optimization of Rail Transit Wind-solar-storage System Based on Improved K-means Algorithm

WEI Tingsan¹, ZHOU Hang¹, ZHANG Yulong², GAO Bo², HOU Shaobin³

(1. Nanning Rail Transit Operation Co., Ltd., Guangxi Nanning 530022, China; 2. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. China Railway Electrification Railway Operation and Management Co., Ltd., Beijing 100036, China)

Abstract: In view of such problems as violent output fluctuation and unreasonable energy storage capacity allocation due to large-scale wind-solar integration in power supply system of rail transit, in this paper a optimal capacity allocation method of wind-solar energy storage system based on improved *k*-means clustering algorithm is proposed. The method innovatively combines the contour coefficient and elbow method to jointly determine the number of clusters, thus extracting the representative typical day scenes and gives probability weights, and this design takes into account the typicality and comprehensiveness of the data, and avoids the defects of high computational complexity of the traditional year-round method and insufficient representativeness of the two-week method. Furthermore, an optimization model with double objectives of minimizing the system life cycle cost and improving the power supply reliability index (LPSP, EWR) is constructed, and the particle swarm optimization algorithm is used to achieve the global optimization of the wind-solar energy storage capacity. The simulation results based on the typical operation data of rail transit show that under the typical daily load conditions, the proposed method can, compared with the traditional method, save 32.56% in cost and the the improvement rate of reliability index can be up to 28.10%, which varifies both effectiveness and superiority of the method.

Keywords: rail transit; wind-solar-energy storage system; capacity configuration; improved K-means clustering algorithm; particle swarm optimization

0 引言

大规模可再生能源接入电网是实现“双碳”目标与轨道交通低碳转型的重要途径。然而,轨道交通负荷具有刚性强、峰值高、时空分布不均等特征^[1],而风电与光伏出力则表现出明显的随机性与间歇性。这种源荷之间在时间和强度上的不匹配,容易导致容量配置偏差,进而引起资源利用效率低下、净负荷波动性显著及容量投资成本增加等问题,严重制约了可再生能源的高效消纳与轨道交通供电系统的安全稳定运行^[2]。因此,合理配置风电、光伏和储能是实现风光储接入轨道交通供电系统高效运行的关键。

围绕轨道交通风光储系统的容量结构优化与调度需求,已有研究提出了多种思路。文献[3-4]基于粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)构建风光储容量优化模型,在降低系统投资成本方面取得了一定成效,但其对风光资源波动性的考虑不足,难以保证容量配置与典型负荷特征的匹配。为进一步改善这一问题,文献[5-6]分别采用遗传算法(genetic algorithms, GA)与灰狼优化(grey wolf optimizer, GWO)对容量配置与运行策略进行了优化,在一定程度上平滑了系统出力、缓解了峰谷差,但由于未能有效结合轨道交通负荷的刚性特征,其结果仍存在配置比例不合理、运行稳定性不足的缺陷。文献[7-8]尝试利用模型预测控制(model predictive control, MPC)进行动态调度,提高了出力的实时性与灵活性,但其建模复杂、计算量大,难以适应轨道交通场景中对快速决策的要求。总体而言,上述方法在经济性、可靠性与实时性方面仍难以兼顾。

针对传统方法在容量优化中的不足,部分研究开始关注场景生成与典型日选取问题,以缓解风光出力随机性带来的计算复杂度。文献[9]采用蒙特卡洛方法生成大量运行场景,能够更全面地反映风光资源不确定性,但其样本规模过大,导致后续优化计算量显著增加。文献[10-11]则通过K-means等聚类方法提取典型日,有效降低了计算复杂度,但在聚类数选择与评价指标上存在一定主观性,容易导致典型场景代表性不足,进而影响容量优化的准确性与可靠性。文献[12-13]提出结合模糊聚类与多目标优化的方法,虽然一定程度上提升了结果的鲁棒性,但在目标权衡与权重选取方面依然存在困难。可以看出,现有研究在场景选取合理性、容量配置经济性与运行可靠性之间仍存在矛盾。为此,本文引入基于轮廓系数与手肘法改进的K-means聚类算法,能够在兼顾代表性与计算效率的同时,为后

续的容量配置优化提供更加准确的典型场景,从而实现经济性与可靠性的综合提升。

针对上述问题,本文提出一种基于改进K-means聚类算法的轨道交通风光储系统容量优化配置方法。该方法通过结合轮廓系数与手肘法对典型场景进行自动聚类,避免了传统“全年法”计算复杂、以及“两周法”代表性不足的局限性,从而获得兼具全面性与典型性的日场景集。进一步构建以系统全生命周期成本最小化与供电可靠性提升为双目标的优化模型,并采用粒子群优化算法实现风光储容量配置的全局寻优。最后,基于轨道交通典型运行数据的仿真结果表明,该方法能够在保证可靠性的同时显著降低系统成本,相较传统方法在经济性与可靠性方面均展现出明显优势。

1 轨道交通风光储系统分析

1.1 系统结构

轨道交通系统作为城市基础设施的重要组成部分,其典型结构见图1。其中,风电与光伏分别接入交流母线并通过牵引变电所转换为直流形式后,向列车负荷供电;储能部分则包含蓄电池与超级电容两种类型,分别用于能量平衡与快速动态调节^[14]。

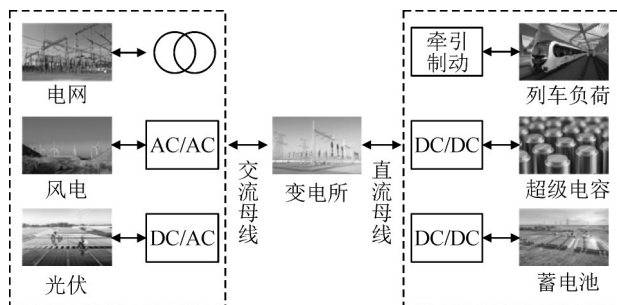


图1 轨道交通风光互补储能供电模型
Fig. 1 Rail transit wind-solar-energy storage power supply model

1.2 源荷特性分析

图2给出了典型的轨道交通光伏与风电出力曲线。风电受风速影响波动,光伏受天气变化影响出力剧烈,均难以准确预测^[15]。这种高度不确定性的出力特征与轨道交通刚性负荷需求之间存在明显的不匹配性。

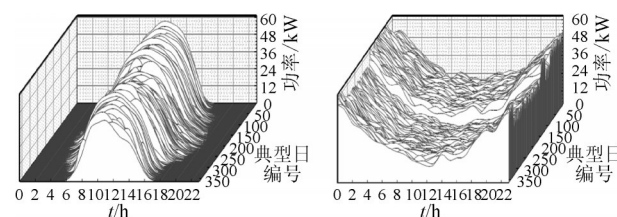


图2 光伏和风电出力曲线
Fig. 2 Photovoltaic and wind power output curves

风光出力的标准差或方差可衡量其波动程度,波动性越大,其输出的不确定性越强,与负荷的匹配难度也随之提高。若配置与运行方法不当,将降低可再生能源利用率并增加系统负担^[16-17]。

轨道交通日负荷波动图见图3所示,从图3可看出,轨道交通负荷具有典型的早晚高峰特征,峰值负荷远高于日均值。

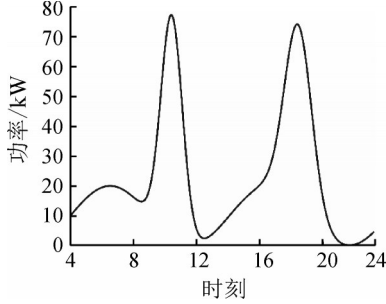


图3 轨道交通日负荷波动图

Fig. 3 Daily load fluctuation diagram of rail transit

1.3 风光储模型建立

为了准确刻画轨道交通风光储系统的运行机理,需要建立风电、光伏与储能的数学模型。

1.3.1 风力发电模型

风力发电机实际输出功率公式为

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, & 0 \leq v \leq v_{ci} \\ P_n \frac{v - v_{ci}}{v_n - v_{ci}}, & v_{ci} \leq v \leq v_n \\ P_n, & v_n \leq v \leq v_{co} \\ 0, & v_{co} \leq v \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{WT} 、 v 分别对应风力发电机实际输出功率和实际风速; P_n 和 v_n 分别为风力发电机额定输出功率和额定风速; v_{ci} 和 v_{co} 分别切入和切出风速。

1.3.2 光伏发电模型

光伏电池输出功率公式为

$$P_{PV} = P_n \frac{G}{G_n} (1 + \lambda(T_c - T_r)) \quad (2)$$

式中: P_{PV} 为光伏电池输出功率; 设定光谱辐照度 G_n 为 1000 W/m^2 ; 太阳能电池温度 T_c 为 25°C ; P_n 为太阳能峰值功率(peak watt); λ 为温度条件系数。

1.3.3 蓄电池模型

$$\begin{cases} SOC_{(t)} = (1 - \xi)SOC_{(t-1)} - \frac{P_{dh}(t)}{P_{sb} \times \eta_{sb}} \\ SOC_{(t)} = (1 - \xi)SOC_{(t-1)} + \frac{P_{ch}(t) \times \eta_{sb}}{P_{sb}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_{ch}(t)$ 、 $P_{dh}(t)$ 分别为蓄电池 t 时充电和放电量; P_{sb} 为电池的输出功率; ξ 和 η_{sb} 分别为蓄电池自放电和充放电转化率; $SOC_{(t)}$ 为蓄电池在 t 时刻的荷电状态。

2 多目标优化模型构建

2.1 模型分析

针对轨道交通风光储系统在容量配置过程中存在的经济性欠佳与可再生能源利用率偏低等问题^[18-19], 本文建立了双目标优化模型, 综合考虑系统全生命周期成本和弃电率两个方面。该模型的构建旨在在降低系统投资与运行成本的同时, 提升风光资源的消纳水平, 从而实现轨道交通供电系统的经济性与可再生能源利用率的协同优化。优化目标如下: 1) 最小化系统全生命周期成本; 2) 最小化系统弃电率。

2.1.1 最小化系统全生命周期经济成本

轨道交通系统为基础设施项目, 强调全生命周期经济性。成本目标综合考虑设备投资、运维与电网交互成本^[20], 构建函数

$$\min f_1 = C_p + C_w + C_h + C_g \quad (4)$$

其中:

$$C_p = P_{pr} (k_{pi} CRF_p + k_{po}) \quad (5)$$

式中: C_p 为光伏系统年综合成本; P_{pr} 为光伏系统额定装机功率; k_{pi} 为光伏系统单位投资成本;

$CRF_p = \frac{r(1+r)^{Y_p}}{(1+r)^{Y_p} - 1}$ 为光伏系统资本回收系数; Y_p 为

光伏设备使用寿命; k_{po} 为光伏系统单位运维成本。

$$C_w = P_{wr} (k_{wi} CRF_w + k_{wo}) \quad (6)$$

式中: C_w 为风电系统年综合成本; P_{wr} 为风电系统额定装机功率; k_{wi} 为风电系统单位投资成本;

$CRF_w = \frac{r(1+r)^{Y_w}}{(1+r)^{Y_w} - 1}$ 为风电系统资本回收系数; Y_w 为

风电设备使用寿命; k_{wo} 为风电系统单位运维成本。

$$C_h = C_B + C_C + C_k + C_s \quad (7)$$

式中: C_h 为混合储能系统年综合成本; C_B 为蓄电池年综合成本; C_C 为超级电容年综合成本; C_k 为系统年度维护成本; C_s 为系统年度处置成本。

$$C_g = \sum_{t=1}^{8760} P_b(t) p_b(t) \Delta t \quad (8)$$

式中: C_g 为电网年交互成本; P_b 为 t 时刻的购电功率; p_b 为 t 时刻的购电电价; Δt 为时间步长, 这里取值为 1。

2.1.2 最小化系统弃电率

风电与光伏出力具有随机性与波动性, 若容量配置不合理, 往往会出现部分电能无法消纳而被弃电的现象, 降低了可再生能源利用效率^[21]。为了提升系统的清洁能源利用水平, 本文将弃电率最小化

作为第2个优化目标,其数学模型为

$$\min f_2 = \frac{\sum_{t=1}^{8760} P_s(t)}{\sum_{t=1}^{8760} P_L(t)} \quad (9)$$

其中:

$$P_s(t) = P_L(t) - P_p(t) - P_w(t) - P_H(t) - P_b(t) \quad (10)$$

式中: P_s 为 t 时刻的功率缺口; P_L 为 t 时刻的系统总负荷; P_p 为 t 时刻光伏系统的实际输出功率; P_w 为 t 时刻风电系统的实际输出功率; P_H 为 t 时刻混合储能系统的放电功率。

2.2 约束条件

2.2.1 功率平衡约束

功率平衡约束公式为

$$P_p(t) + P_w(t) + P_H(t) + P_b(t) = P_L(t) + P_C(t) \quad (11)$$

式中: P_C 为 t 时刻混合储能系统的充电功率。

2.2.2 新能源出力约束

新能源出力约束公式为

$$\begin{cases} 0 \leq P_p(t) \leq P_{Pr}(t) P_{Pr} \\ 0 \leq P_w(t) \leq P_{Wf}(t) P_{Wf} \end{cases} \quad (12)$$

式中: P_{Pr} 为 t 时刻的单位容量光伏出力预测值; P_{Wf} 为 t 时刻的单位容量风电出力预测值。

2.2.3 电网交互约束

电网交互约束公式为

$$0 \leq P_b(t) \leq P_{g,m} \quad (13)$$

式中: $P_{g,m}$ 为电网联络线最大输送功率。

$$\begin{cases} SOC_{b,min} \leq SOC_B(t) \leq SOC_{b,max} \\ SOC_{c,min} \leq SOC_C(t) \leq SOC_{c,max} \end{cases} \quad (14)$$

式中, $SOC_B(t)$ 、 $SOC_C(t)$ 为 t 时刻蓄电池和超级电容的荷电状态; $SOC_{b,min}$ 、 $SOC_{b,max}$ 为蓄电池允许的最小和最大荷电状态; $SOC_{c,min}$ 、 $SOC_{c,max}$ 为超级电容允许的最小和最大荷电状态。

2.2.4 充放电功率约束

充放电功率约束公式为

$$\begin{cases} -P_{Br} \leq P_B(t) \leq P_{Br} \\ -P_{Cr} \leq P_C(t) \leq P_{Cr} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $P_B(t)$ 、 $P_C(t)$ 为 t 时刻蓄电池和超级电容和实际工作功率; P_{Br} 、 P_{Cr} 为蓄电池和超级电容的额定功率。

2.2.5 决策变量非负约束

决策变量非负约束公式为

$$\begin{cases} P_{Wf} \geq 0 \\ P_{Pr} \geq 0 \\ P_{Br} \geq 0 \\ P_{Cr} \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

3 改进K-means聚类算法构建

3.1 K-means聚类算法方法应用

本文方法基于传统K-means聚类思想,通过加权初始化与多指标综合评价机制改进聚类中心敏感、易陷入局部最优的问题^[22-23],提升轨道交通风光储系统典型日识别的合理性与稳定性。

图4为改进K-means算法的求解流程,包含数据预处理、中心点初始化、迭代优化与结果评价模块等。

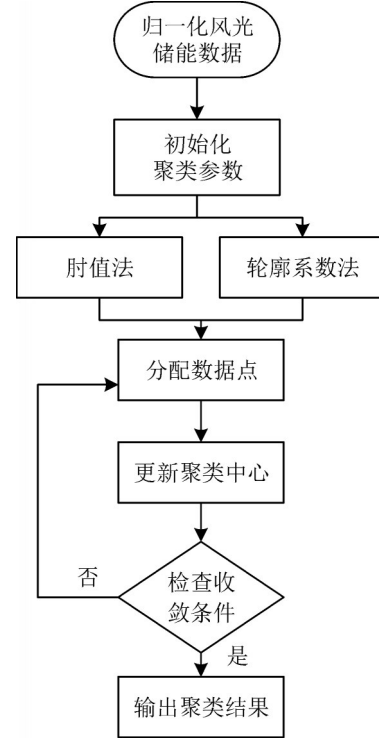


图4 改进K-means算法求解流程图

Fig. 4 Solution flow chart of improved K-means algorithms

该框架包括数据预处理、初始中心确定、迭代优化与收敛判定4个环节。风光储能典型日数据经清洗与归一化处理后,通过肘值法与轮廓系数法联合确定聚类数,以兼顾聚类紧密性与分离性;在此基础上,样本被分配至各簇并不断更新聚类中心,直至收敛条件满足,输出最终结果。该方法在保持K-means算法高效性的同时,提升了初始中心设定的合理性与聚类结果的稳定性。

3.2 极差归一化方法描述

考虑到风光储典型日数据在量纲和数量级上存在差异,本文采用极差归一化方法对各类数据进行处理,统一压缩至[0,1]区间,以避免大数值变量在聚类过程中主导聚类结果,从而保证不同维度数据的可比性与均衡性。

$$x_k = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (17)$$

储容量聚类优化器与容量配置优化模型实现迭代求解,最终输出最优容量配置方案。该图系统阐明了本文在多目标优化框架下,通过引入联合判据与权衡系数自适应调整,实现容量配置结果在经济性与可靠性之间的动态平衡与全局最优选取的技术路线。

4 算例分析

为验证所提出的基于改进K-means聚类算法的轨道交通风光储容量配置优化方法的有效性与优越性,本文选取典型轨道交通负荷曲线与风电、光伏实测出力数据作为输入,设定风电机组、光伏组件与储能系统的容量范围与约束条件,构建双目标优化模型。仿真过程中,首先采用轮廓系数法与手肘法对聚类数进行确定,再利用改进K-means聚类对典型负荷场景进行分类,最后结合优化模型对系统容量配置进行求解与性能对比分析。

4.1 仿真算例

本节选取南宁某地铁线路典型负荷数据及光伏、风电资源实测数据构建仿真算例。设定系统调度周期为24小时,将全日负荷与可再生能源出力数据作为优化输入。为进一步提高优化的针对性,本文引入改进K-means聚类方法对负荷与可再生能源典型出力场景进行分类,以减少样本冗余、突出代表性特征。

在聚类数的确定过程中,采用轮廓系数法与手肘法联合判据:其中,轮廓系数用于衡量类内紧密度与类间分离度,其值越大说明聚类效果越优;手肘法通过类内平方和(SSE)随聚类数变化的趋势,寻找拐点位置以确定最优聚类数。如图6、图7分别为轮廓系数法与手肘法的仿真结果

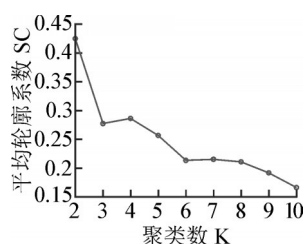


图6 轮廓系数法

Fig. 6 Contour coefficient method

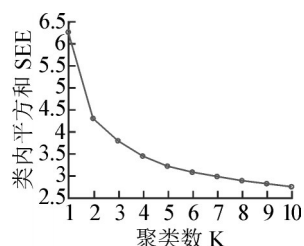


图7 手肘法

Fig. 7 Elbow method

其中,轮廓系数用于衡量类内紧密度与类间分离度,其值越大说明聚类效果越优;手肘法通过类内平方和(sum of squared error, SSE)随聚类数变化的趋势,寻找拐点位置以确定最优聚类数。图6展示了不同聚类数下的平均轮廓系数变化,结果表明在 $K=2$ 时达到最大值;图7给出了SSE的变化趋势,在 $K=2$ 和3附近出现明显拐点。综合两种方法的结果,本文最终选取 $K=2$ 作为合理聚类数。

图8(a)、(b)进一步展示了不同典型场景下风电、光伏与储能的出力分布特征。结果表明:聚类(a)中光伏与储能出力占主导,风电贡献较小;而聚类(b)则表现为储能出力占比更高、风光出力相对平稳。该结果验证了改进K-means方法能够有效识别轨道交通系统在不同运行条件下的典型场景,为后续容量配置优化提供了合理基础。

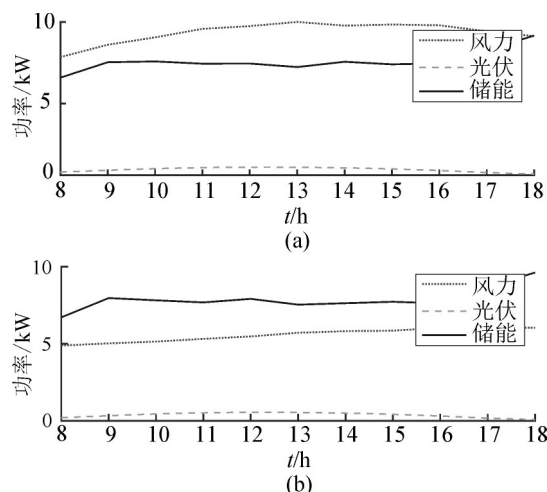


图8 不同典型场景下风光储出力分布特征

Fig. 8 Wind-solar-energy storage output distribution characteristic at different typical scenarios

4.2 不同工况下对比仿真分析

为验证改进K-means聚类容量优化方法在不同负荷工况下的适用性与综合优化优势,本文选取典型平日、夏季高峰日与冬季低谷日3个代表性负荷场景,分别与传统全年法、传统两周法进行对比实验。不同工况下轨道交通系统负荷波动特性、光伏/风电出力特征各异,可以充分考察所提方法的普适性与鲁棒性。

4.2.1 平日典型负荷工况对比

在典型平日负荷下,分别采用改进K-means、传统全年法与传统两周法进行优化配置。选取4h、8h、12h、16h等运行节点,统计成本节约率与可靠性提升率等指标的累计变化。图9与表1展示了对比结果。

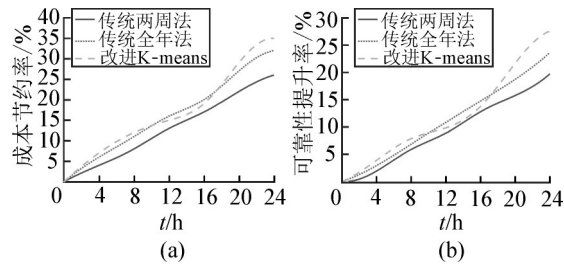


图9 平日典型负荷工况对比分析图
Fig. 9 Comparison analysis diagram of daily typical load condition

表1 各优化方法在典型平日工况下的改善率对比
Table 1 Comparison of improvement rate of various optimization methods at typical daily condition

方法	成本节约率/%	可靠性提升/%
改进 K-means	34.56	28.10
传统全年法	30.21	23.40
传统两周法	21.50	18.25

改进 K-means 方法在成本节约率与可靠性提升率两项指标中均优于传统方法,特别是在可靠性方面最终提升率接近 28%,显著领先。

4.2.2 夏季高温负荷工况对比

在夏季高温负荷工况下,对比 3 种方法的优化性能,图 10 与表 2 反映其在成本节约率与可靠性提升率两项指标上的变化趋势及最终改善情况。

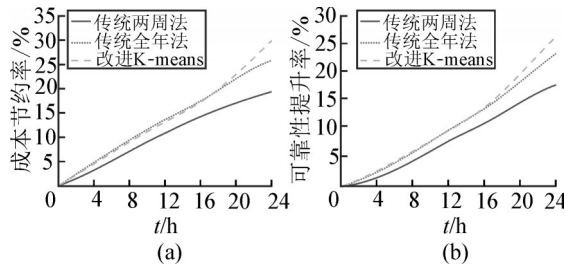


图10 夏季高温负荷工况对比分析图
Fig. 10 Comparison and analysis diagram at high temperature load condition in summer

表2 各种优化方法在夏季高温工况下的改善率对比
Table 2 Comparison of improvement rate of various optimization methods at high temperature condition in summer

方法	成本节约率/%	可靠性提升/%
改进 K-means	29.85	24.62
传统全年法	25.77	21.83
传统两周法	19.32	16.70

改进 K-means 方法在夏季高峰工况下同样展现出稳健的优化性能,两项指标均优于传统方法,其中可靠性提升率达到 24.62%,与传统全年法结果接近但保持领先优势。

4.2.3 冬季低温负荷工况对比

冬季高负荷工况下,对 3 种方法进行优化对比,结果如图 11 和表 3 所示。

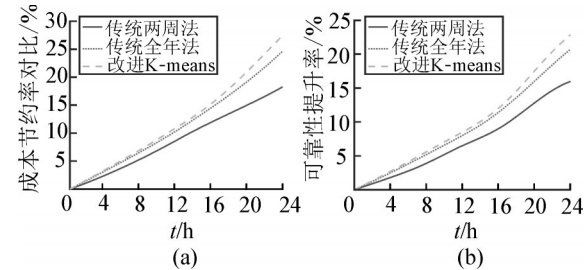


图11 冬季低温负荷工况对比分析图
Fig. 11 Comparison and analysis diagram of low temperature load condition in winter

表3 各优化方法在冬季低温工况下的改善率对比
Table 3 Comparison of improvement rate of various optimization methods at low temperature condition in winter

方法	成本节约率/%	可靠性提升/%
改进 K-means	27.41	22.85
传统全年法	24.63	20.72
传统两周法	18.27	15.98

改进 K-means 方法在冬季低谷工况下各项指标均优于传统方法,整体优化性能最优,验证了其在负荷刚性条件下的稳健性与鲁棒性。

综上所述,改进 K-means 方法在平日、夏季高峰与冬季低谷 3 种典型运行工况下均表现出突出的优势,能够在不同负荷波动和运行环境下保持稳定性与适应性,不仅提升了系统运行的经济性,降低了长期运维成本,也为同类复杂能源系统的优化配置提供了可复制、可推广的有效解决方案,证明其在轨道交通风光储系统容量优化中的广泛适用性与工程实践价值。

5 结语

本文面向轨道交通风光储系统容量结构与调度优化中存在的多目标冲突问题,提出了一种基于改进 K-means 聚类算法的轨道交通风光储系统容量配置优化方法。结论如下:

1)改进 K-means 方法能够有效识别轨道交通风光储系统在不同负荷条件下的典型运行场景,相较传统聚类方法具有更高的类内一致性与代表性。在此基础上得到的容量配置方案能够兼顾经济性与可靠性,其中光伏与储能的配置变化对系统性能提升起到关键作用。

2)在平日、夏季高峰和冬季低谷 3 种典型工况下,改进 K-means 方法均展现出良好的适应性与鲁

棒性。以夏季高峰工况为例,成本节约率达 29.85%,可靠性提升率达 24.62%,整体性能优于传统全年法与两周法。

3)从优化趋势来看,改进 K-means 方法通过联合判据确定合理聚类数,并利用典型场景驱动容量优化,有效避免了传统方法在样本冗余和场景代表性不足下的优化偏差问题,实现了在多工况、多目标条件下的平稳、协调优化,适用于轨道交通这类高刚性负荷场景。

参考文献

- [1] 向超群,范子寅,李兆龄,等.基于牵引力动态分配的城轨列车运行节能优化研究[J/OL].铁道学报,1-13[2025-08-01]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=F0lYAGTXfx9H2JShYynyV6Lu8nsWIWoptdW90hNn3>
XIANG Chaoqun, FAN Ziyin, LI Zhaoling, et al. Research on energy-saving optimization of urban rail train operation based on dynamic allocation of traction force[J/OL]. Journal of the China Railway Society, 1-13[2025-08-01]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=F0lYAGTXfx9H2JShYynyV6Lu8nsWIWoptdW90hNn3>
- [2] 冯晓云,黄德青,王青元,等.轨道交通列车综合节能研究综述[J].铁道学报,2023,45(2):22-34.
FENG Xiaoyun, HUANG Deqing, WANG Qingyuan, et al. Overview on comprehensive energy saving schemes for rail transit train operation system[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(2): 22-34.
- [3] 周成伟.基于风光储微电网下的储能容量优化配置研究[D].南京:南京信息工程大学,2023.
- [4] 李圣清,乔靖潇,高泽华,等.基于改进灰狼算法的风光储微电网容量优化配置[J].智慧电力,2025,53(8):11-19.
LI Shengqing, QIAO Jingxiao, GAO Zehua, et al. Capacity optimization configuration of wind-PV-storage microgrids based on improved grey wolf optimizer[J]. Smart Power, 2025, 53(8): 11-19.
- [5] 胡海涛,杨凯,葛银波,等.电气化铁路分区所再生制动能量利用系统及其控制策略[J].中国电机工程学报,2024,44(11):4286-4298.
HU Haitao, YANG Kai, GE Yinbo, et al. Regenerative braking energy utilization system and control strategy for sectioning post in electrified railway[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11): 4286-4298.
- [6] 付誉咏.光储联合发电系统的容量配置及功率控制策略研究[D].武汉:华中科技大学,2020.
- [7] 巫春玲,程琰清,徐先峰,等.基于蒙特卡洛和SH-AUKF算法的锂电池SOC估计[J].电气工程学报,2022,17(3):66-75.
WU Chunling, CHENG Yanqing, XU Xianfeng, et al. SOC estimation of Lithium battery based on Monte Carlo and SH-AUKF algorithm[J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 17(3): 66-75.
- [8] ZHENG Y, ZHANG Y, YANG J. K-means clustering and deep q-network enhanced fault diagnosis for ZPW-2000A joint less track circuits[J]. Engineering Research Express, 2025, 7(3): 352-364. .
- [9] EQUBAL S M, ALSADUNI I, ALHODAIB A, et al. An experimental analysis of photovoltaic panel performance using rice husk-derived cellulose nanocrystals: a response surface methodology based K-means clustering approach[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2025(1): 1-19.
- [10] 杨芬,陈江艳,邹子恒.基于改进模糊聚类的配电网源网储协同规划[J].电力电子技术,2025,59(6):91-96.
YANG Fen, CHEN Jiangyan, ZOU Ziheng. Coordinated planning of source-network-storage in distribution networks based on improved fuzzy clustering mean algorithm[J]. Power Electronics, 2025, 59(6): 91-96.
- [11] 周军.含风光发电的电力系统优化调度模型研究[D].镇江:江苏大学,2021.
- [12] RUAN X, ZHANG L, ZHOU J, et al. Dynag algorithm-based optimal power flow design for hybrid wind-solar-storage power systems considering demand response[J]. Energies, 2025, 18(17): 4576-4576.
- [13] 徐勤睿.风光储多能接入牵引网的容量优化配置[D].兰州:兰州交通大学,2023.
- [14] LAN Y, LU J, WANG S. Multi-objective optimization of a low temperature thermoelectric generation system with variable material properties and air gap heat dissipation based on energy, economic and environmental analysis method[J]. Energy, 2025, 330(9): 136835.
- [15] 彭春华,熊志盛,张艺,等.基于多场景置信间隙决策的风光储联合鲁棒规划[J].电力系统自动化,2022,46(16):178-187.
PENG Chunhua, XIONG Zhisheng, ZHANG Yi, et al. Joint robust planning of wind-photovoltaic-energy storage system based on multi-scenario confidence gap decision[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 178-187.
- [16] 魏璵琪,王永顺,杨鲁月.城市轨道交通再生制动能量利用研究[J].现代电子技术,2020,43(1):131-135.
WEI Congqi, WANG Yongshun, YANG Luyue. Research of regenerative braking energy utilization in urban rail transit[J]. Modern Electronics Technique, 2020, 43(1): 131-135.
- [17] 王红,谢红太.新型高速列车风阻制动装置气动特性及制动性能研究[J].铁道学报,2025,47(1):38-46.
WANG Hong, XIE Hongtai. Research on aerodynamic characteristics and braking performance of new type of wind resistance braking device for high-speed trains[J]. Journal of the China Railway Society, 2025, 47(1): 38-46.
- [18] CHEN Y, XIAO Z, YANG Y, et al. Multi-objective optimi-

- zation for impact resistance of composite laminates with non-conventional ply orientations: an integrated finite element and machine learning framework[J]. Thin Walled Structures, 2025, 216(11): 113687.
- [19] ZAHRA K, JAVAD M M, EHSAN N. Multiobjective optimization framework for irrigation scheduling under uncertainty[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2025, 151(5): 116-128.
- [20] 刘春雨. 基于改进 K-means 聚类算法的分布式储能集群划分方法[J]. 东北电力技术, 2025, 46(1): 1-5.
LIU Chunyu. Distributed energy storage cluster partitioning method based on improved K-means clustering algorithm[J]. Northeast Electric Power Technology, 2025, 46(1): 1-5.
- [21] 韩培东, 王伟胜, 李湃, 等. 基于多目标优化的大型新能源基地风光储容量联合规划配置[J/OL]. 电网技术, 1-9 [2025-08-13]. <https://kns.cnki.net/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.2229>.
HAN Peidong, WANG Weisheng, LI Pai, et al. Joint planning and configuration of wind-solar-storage capacity for large-scale renewable energy bases based on multi-objective optimization[J/OL]. Power System Technology, 1-9 [2025-08-13]. <https://kns.cnki.net/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.2229>.
- [22] 张俊杰. 基于多目标优化算法的城轨柔性牵引供电系统控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2024.
- [23] 谢成. 货运列车运行策略多目标优化研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2024.
- [24] 侯力枫. 提高风储发电经济性的双储能系统模型预测控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(5): 97-106.
HOU Lifeng. A model predictive control method of the dual energy storage system for improving wind storage economy [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(5): 97-106.
- [25] 侯恺, 刘泽宇, 贾宏杰, 等. 含高比例可再生能源的电力系统运行可靠性解析评估方法综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2697-2710.
HOU Kai, LIU Zeyu, JIA Hongjie, et al. Review of analytical methods for operation reliability assessment of power systems with high-penetration renewable energy[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2697-2710.

作者简介:

周航(1975—), 男, 高级工程师, 主要从事地铁运营管理工作。E-mail: 34877463@qq.com。

韦庭三(1979—), 男, 高级工程师, 主要从事柔性交直流输电技术。E-mail: bswts@163.com。

张宇龙(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源接入轨道交通技术应用。E-mail: 522658886@qq.com。

高波(1990—), 男, 副教授, 研究方向为新能源并网谐振及稳定性。E-mail: gbgaobo@163.com

侯少彬(1983—), 男, 高级工程师, 研究方向为牵引供电方向。E-mail: 278365383@qq.com。

《电力电容器与无功补偿》2025 年 5 期广告单位

- | | | | |
|--------------------------|------|--------------------------|-------|
| 1 上海思源电力电容器有限公司 | 封面 | 12 西安高压电器研究院股份有限公司(认证中心) | |
| 2 西安金叶电力科技有限公司 | 封二 | | 前插 8 |
| 3 山东哈大电气有限公司 | 封三 | 13 宁国市裕华电器有限公司 | 前插 9 |
| 4 西安高压电器研究院股份有限公司(业务) 封底 | | 14 新程(辽宁)电力电容器科技有限公司 | 前插 10 |
| 5 深圳市紫宸激光设备有限公司 | 前插 1 | 15 深圳市三和电力科技有限公司 | 前插 11 |
| 6 陕西泰普瑞电工技术有限公司 | 前插 2 | 16 山东海源泰和电气有限公司 | 前插 12 |
| 7 东莞市东和电子制程有限公司 | 前插 3 | 17 温州市凯泰特种电器有限公司 | 前插 13 |
| 8 杭州精诚电力设备有限公司 | 前插 4 | 18 赛晶科技集团有限公司 | 前插 14 |
| 9 桂林明富金属股份有限公司 | 前插 5 | 19 保护环境公益广告 | 前插 15 |
| 10 日新电机(无锡)有限公司 | 前插 6 | 20 西安唯实输配电技术有限公司 | 前插 16 |
| 11 陕西凯瑞宏星电器有限公司 | 前插 7 | | |