

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.06.015

基于典型风电场景的风储协同频率支撑容量优化配置

孙广宇, 胡姝博, 谢赐戡, 马欣彤
(国网辽宁电力科学研究院, 沈阳 110006)

摘要: 为了有效改善新能源渗透率下电网系统的调频能力和频率稳定性下降的问题,同时兼顾系统经济收益,文中提出了一种基于典型风电场景概率的飞轮储能与风电机组协同频率支撑容量优化配置方案。首先,利用改进的 K-means 聚类算法对风电年历史处理数据进行处理,得出 4 种风电典型运行场景及其概率;其次,基于风机和飞轮储能的特性建立风储联合系统运行模型和调频控制策略;最后,以年均经济收益最高为目标函数建立风储联合系统容量优化配置模型,并利用粒子群算法(PSO)对优化配置模型进行求解。通过仿真将该配置方案与只有风机的场景进行对比,结果显示所提出的配置方案在年经济收益和调频完成率上都有很大的改善,证明了该方案的合理性和有效性。
关键词: 风储协同; K-means 聚类; 风电场景概率; 飞轮储能系统; 频率支撑; 粒子群优化算法

Optimization Configuration of Wind Storage Collaborative Frequency Support Capacity Based on Typical Wind Power Scenarios

SUN Guangyu, HU Shubo, XIE Cijian, MA Xintong

(State Grid Liaoning Electric Power Research Institute, Shenyang 110006, China)

Abstract: For improving the issue of the frequency modulation capability and frequency stability reduction of power grid system at a high penetration rate of new energy, while taking into account the economic benefits of the system, a capacity optimized configuration scheme for frequency support of collaboration between flywheel energy storage and wind turbines based on typical wind power scenario probability is proposed in this paper. Firstly, the improved K-means clustering algorithm is used to process the annual historical processing data of wind power, and four typical operating scenarios and their probabilities of wind power are obtained. Then, the operational model and frequency regulation control strategy of the wind-storage integrated system are set up based on the characteristics of wind turbines and flywheel energy storage. Finally, a capacity optimized configuration model for wind-storage integrated system is set up with the objective function of maximizing annual economic benefits, and the optimized configuration model is solved by using the particle swarm optimization (PSO) algorithm. The configuration scheme is compared with the scenario of only having wind turbines through simulation. The results show that the proposed configuration scheme has great improvement in annual economic benefits and frequency modulation completion rate and the rationality and effectiveness of the scheme are proved.

Keywords: wind-storage integrated; K-means clustering; wind power scenario probability; flywheel energy storage system; frequency support; particle swarm optimization (PSO) algorithm

0 引言

风能是由于太阳辐射不均等原因而导致空气流动从而产生的能量,是太阳能诸多转换形式中的一种,其分布广泛,储量巨大,是重要的可再生能源^[1]。

目前,风能被广泛用于发电,截止 2023 年 9 月底,我国的风电装机容量达到了 4.0 亿千瓦,占总装机容量的比重已达 14.3%^[2]。然而,随着以风电为代表的新能源发电装机容量的增长,改变了电网原本的运行架构。相比于传统机组,风电与系统之间由电

收稿日期:2024-04-25

基金项目:国网辽宁省电力有限公司管理科技项目(2023YF-88)。

力电子变频器连接,使其机械和电气系统解耦^[3],导致风机无法响应系统频率的变化,使得系统惯性降低,调频能力和稳定性被削弱。

为了解决这一问题,现有的常见做法是风机通过超速或变桨距角控制的方式降低风能利用系数实现减载控制^[4],降低稳态输出功率来预留出一部分功率应对系统调频需求,然而该做法使得风能利用率大大降低,风力发电的经济效益变差。

储能技术的出现为此问题的解决提供了更优的方案。通过储能的充放电配合风电机组来满足系统调频的要求,以此来提高风能利用率,保证经济效益。在诸多储能形式中,飞轮储能具有功率密度高、循环寿命长、响应时间短等特点^[5],更适合用于为电网提供调频功率。

此前的相关研究已经针对风储联合系统调频容量配置方法做了一些探讨。文献[6]通过储能平抑风电波动,基于蚁狮算法进行储能容量优化配置;文献[7]基于风功率预测误差分析,采用非参数估计与经验分布相结合的方法建立容量优化模型;文献[8]考虑风电的集群效应,在风电机组间配备共享超级电容储能系统,并通过线性规划的方式对储能系统进行容量优化配置求解;文献[9]考虑频率和功率的相互影响,建立电网、风机和储能的频率响应模型,并制定联合调频策略,建立优化模型,并通过粒子群优化算法进行求解。

综上所述,目前的研究已经提供了风储联合系统调频容量配置的思路和方法,但是往往采用某一典型日的风电数据进行计算求解,使得结果不具备普适性,在实际运行中无法达到理想的调频效果和经济效益;还有很多研究只有储能系统参与调频出力,没有考虑风机和储能系统的协同作用。

因此,本文提出了一种基于典型风电场景概率的飞轮储能与风电机组协同频率支撑容量优化配置模型。采用改进的 K-means 聚类算法对风机年出力数据进行处理,得出几种能够代表风机不同出力特性的典型场景,建立风机和飞轮储能系统的协同调频控制策略,然后以系统年均收益最高为目标函数建立风储联合系统容量优化配置模型,利用粒子群算法进行求解,得出风储协同系统的最优运行配置。

1 容量配置策略整体逻辑框架

本文提出的容量配置策略的整体逻辑框架见图1。首先,利用改进的 K-means 聚类算法对风电

年历史处理数据进行处理,其中创新性地使用肘部曲线法^[10]和 Davies-Bouldin (DB)指数^[11]进行最优聚类数的确定,K-means++聚类算法对风电历史出力数据进行聚合,得出风电典型运行场景及其概率;其次,基于风机和飞轮储能的特性建立风储联合系统运行模型和调频控制策略;最后,以年均经济收益最高为目标函数建立风储联合系统容量优化配置模型,并利用粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO)^[12]对优化配置模型进行求解,得出风储联合系统参与调频的最佳方案。

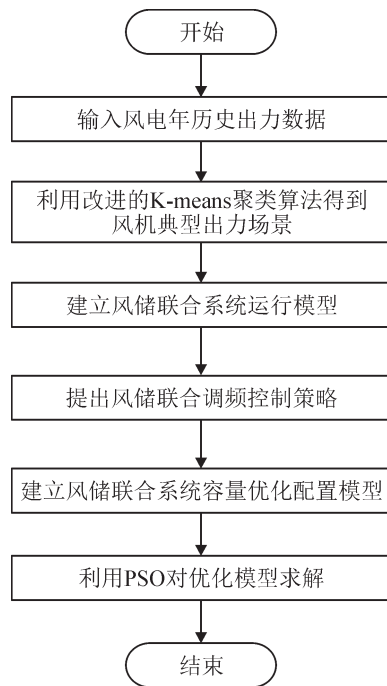


图1 容量配置策略逻辑框图

Fig. 1 Logic block diagram of capacity configuration strategy

2 风电数据处理

风力发电具有很强的不确定性,其出力功率受到地形、地理位置、温度、湿度、季节等环境因素的影响。因此为了尽可能准确地量化风机的出力情况,本文通过对风机年出力数据进行聚类,概括出几种典型的风机出力场景,实现用几种风机出力的概率来表达风电的不确定性。

2.1 K-means 聚类算法

K-means 聚类算法是由 J.B. Mac Queen 最早提出的,是一种迭代求解的聚类分析算法,是聚类分析中应用最为广泛的一种学习算法^[13]。其主要思想是从样本集中随机选择 k 个初始样本作为簇心,计算其余样本距离各个簇心的欧氏距离,寻找每一个

样本距离最近的簇心,并将其划分到该簇中,重新计算每个新簇的簇心,反复进行迭代,从而得到样本集的最优聚类划分^[14]。

然而,K-means 聚类算法存在一些缺陷,比如需要事先确定好簇的数量 k 和初始的簇心,人为地影响了算法的执行,不同的簇数量 k 和初始簇心的选择会改变最终的聚类结果,可能会导致不理想的结果出现^[15]。

2.2 改进的 K-means 聚类算法

由于传统 K-means 聚类算法的诸多不足,本文考虑采用改进的 K-means 聚类算法对风机出力数据进行处理。

改进的 K-means 聚类算法能够通过启发式的方法对初始簇心进行自动选择,避免了人为选择簇心对聚类结果产生影响,降低聚类结果对初始值的敏感性,提高聚类质量^[16]。其主要思想是在选择初始簇心时尽量使所选的样本之间的间距最大,具体步骤如下:

- 1)从样本集中随机选择一个样本作为第一个聚类中心;
- 2)计算样本集中其他样本到当前已选样本的距离,每个样本被选为下一个聚类中心的概率与所计算的距离的平方成正比,即距离越远的样本被选中的概率越大;
- 3)重复步骤(2),直至选择出所需的聚类中心;
- 4)使用标准 K-means 算法进行聚类,得出结果。

在聚类数 k 的确定上,采用肘部曲线法和 DB (davies-bouldin)指数法结合的方式,综合不同方面对聚类进行评估,选择更合适的聚类数 k ,全面了解聚类结果的优劣。

肘部曲线法的原理是根据聚类数 k 和各聚类的总方差 SSE 之间的变化趋势,选择拐点即“肘部”作为最佳聚类数,总方差 SSE 的计算公式为

$$SSE = \sum_{j=1}^k \sum_{X_i \in M_j} \|X_i - Y_j\|^2 \quad (1)$$

式中: X_i 为聚类数据; M_j 为第 j 个簇; Y_j 为聚类中心。

DB(davies-bouldin)指数法考虑了簇内的紧密度和簇间的分离度,目标是找到一个聚类结果,使得簇内紧密度高、簇间分离度大。DB 指数公式为

$$DB(k) = \frac{\sum_{j=1}^k \max_{j \neq i} \left\{ \frac{S_i + S_j}{d_{ij}} \right\}}{k} \quad (2)$$

$$S_i = \frac{1}{n_i} \sum_{X_i \in M_j} \|X_i - Y_j\| \quad (3)$$

$$d_{ij} = \|Y_j - Y_i\| \quad (4)$$

式中: S_i 为簇内的紧密度; d_{ij} 为簇间的分离度。DB 指数越小,表明簇内的紧密度高、簇间的分离度大,表示聚类效果越好。

2.3 风电数据聚类结果及分析

结合上述理论分析内容,对某地区风电年出力数据进行处理及分析。

首先,确定聚类数目 k ,通过 Matlab 软件使用改进的 K-means 聚类算法对风电数据进行聚类数目为 2 至 8 的聚类分析,求出不同聚类数目下的肘部曲线和 DB 指数曲线见图 2-3。

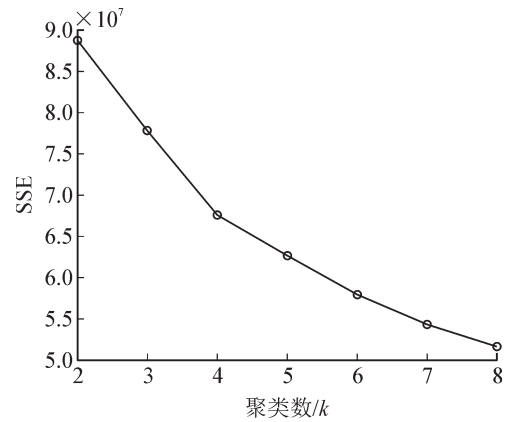


图2 风电数据聚类肘部曲线
Fig. 2 Wind power data clustering elbow curve

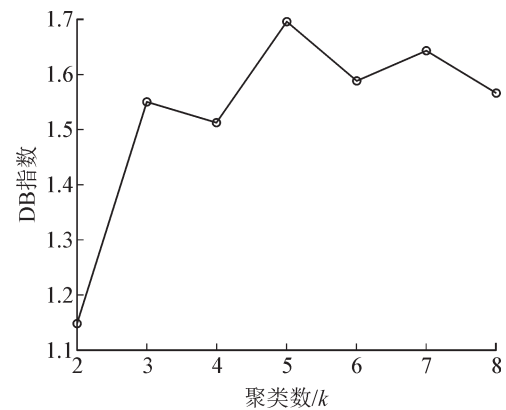


图3 风电数据聚类DB指数曲线
Fig. 3 Wind power data clustering DB index curve

根据图 2 数据可以看出,聚类数目 $k=4$ 时出现拐点,同时根据图 3 数据可以看出聚类数目 $k=4$ 时 DB 指数呈现局部最小,因此,在本文风电数据场景聚类中确定聚类数目 $k=4$ 。

然后,利用改进的 K-means 聚类算法对风电数据进行聚类,得到风电出力典型场景见图 4。

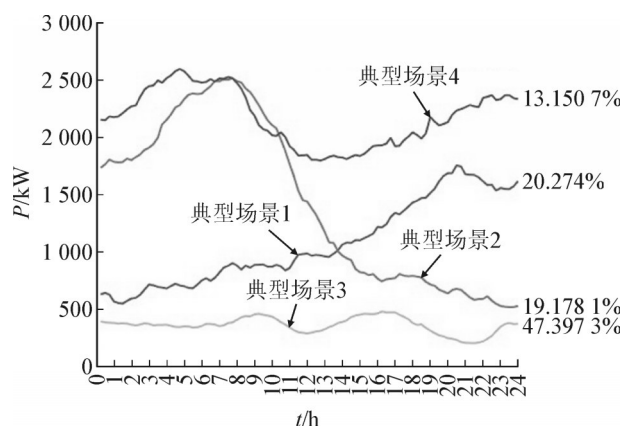


图4 风电出力典型场景

Fig. 4 Typical wind power output scenarios

利用改进的 K-means 聚类算法得出的风电典型场景分为 4 种,其中典型运行场景 1,其占比 20.274%,总体出力处于中等风力发电区间,且呈现上升趋势;典型运行场景 2,其占比 19.178%,出力先上升,后下降,波动范围较大;典型运行场景 3,其占比 47.397%,总体出力平稳但出力较低;典型运行场景 4,其占比 13.151%,总体出力较高且较为稳定。

3 风储联合系统建模和调频控制策略

风储联合系统中主要包括风力发电机和飞轮储能系统两部分,由于飞轮储能系统功率密度高、循环寿命长、响应时间短等优势,可以通过控制自身充放电配合风机进行系统调频,优化风机的运行方式,获得更大的经济效益。本节将对风储联合系统的建模和调频控制策略进行分析。

3.1 风储联合系统建模

风储联合系统相比于单一风机系统拥有更高的灵活性,飞轮储能系统选择安装在风电场的并网节点处,可以通过调节风机和飞轮储能系统的调频出力情况,改善风机的运行模式,增强电力系统频率稳定性,提高经济收益。风储联合系统的整体架构见图 5。

其中飞轮储能系统的模型考虑其充放电时 SOC 的变化^[17],公式为

$$\text{SOC}_{\text{fess}}(t) = \text{SOC}_{\text{fess}}(t-1) + P_{\text{fess}}(t-1) \times \frac{\Delta t}{W_{\text{fess}}} \quad (5)$$

式中: $\text{SOC}_{\text{fess}}(t)$ 和 $\text{SOC}_{\text{fess}}(t-1)$ 分别为当前和上一采样时刻的飞轮储能系统荷电状态; $P_{\text{fess}}(t-1)$ 为上一采样时刻的飞轮储能系统输出功率; W_{fess} 为飞轮储能系统容量; Δt 为采样时间间隔。

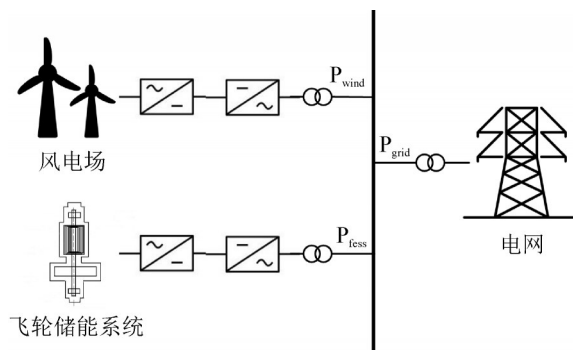


图5 风储联合系统整体架构

Fig. 5 Overall architecture of wind-storage integrated system

3.2 调频控制策略

基于风机和飞轮储能系统的运行特性,提出风储协同频率支撑控制策略,分为调频功率分配策略和飞轮储能系统电池荷电状态 (state of charge, SOC) 恢复策略两部分,其主要思想是首先由风机承担调频任务,如有缺额则根据飞轮储能系统的运行状态进行辅助补充,在无调频任务时由风机对飞轮储能系统 SOC 进行恢复,为下一次调频任务做准备。

风储协同调频功率分配策略见图 6,飞轮储能系统 SOC 恢复策略见图 7。

在风储协同调频功率分配策略中,通过判断调频需求功率 P_f 的正负,进行决策。如果调频需求功率 P_f 为 0,则不需要输出调频功率;如果调频需求功率 P_f 小于 0,则需要吸收功率,此时只有飞轮能吸收功率,风机不动作,飞轮吸收功率的约束为飞轮当前 SOC、飞轮最大功率、飞轮 SOC 上限和调频需求功率 P_f ;如果调频需求功率 P_f 大于 0,则需要释放功率,风机优先释放功率,如果风机预留功率大于当前调频需求功率,那么飞轮不动作,如果风机预留功率小于当前调频需求功率,那么飞轮动作来补充剩余的功率缺额,飞轮吸收功率的约束为飞轮当前 SOC、飞轮最大功率、飞轮 SOC 下限和调频需求功率缺额。

在飞轮储能系统 SOC 恢复策略中,如果调频需求功率 P_f 为 0,则不需要输出调频功率,此时以飞轮当前 SOC、风机预留功率、飞轮最大功率、飞轮基准 SOC 等为约束,考虑对飞轮 SOC 进行恢复,为后续调频做准备;如果调频需求功率 P_f 小于或大于 0,则需要输出调频功率,此时不进行飞轮 SOC 恢复。

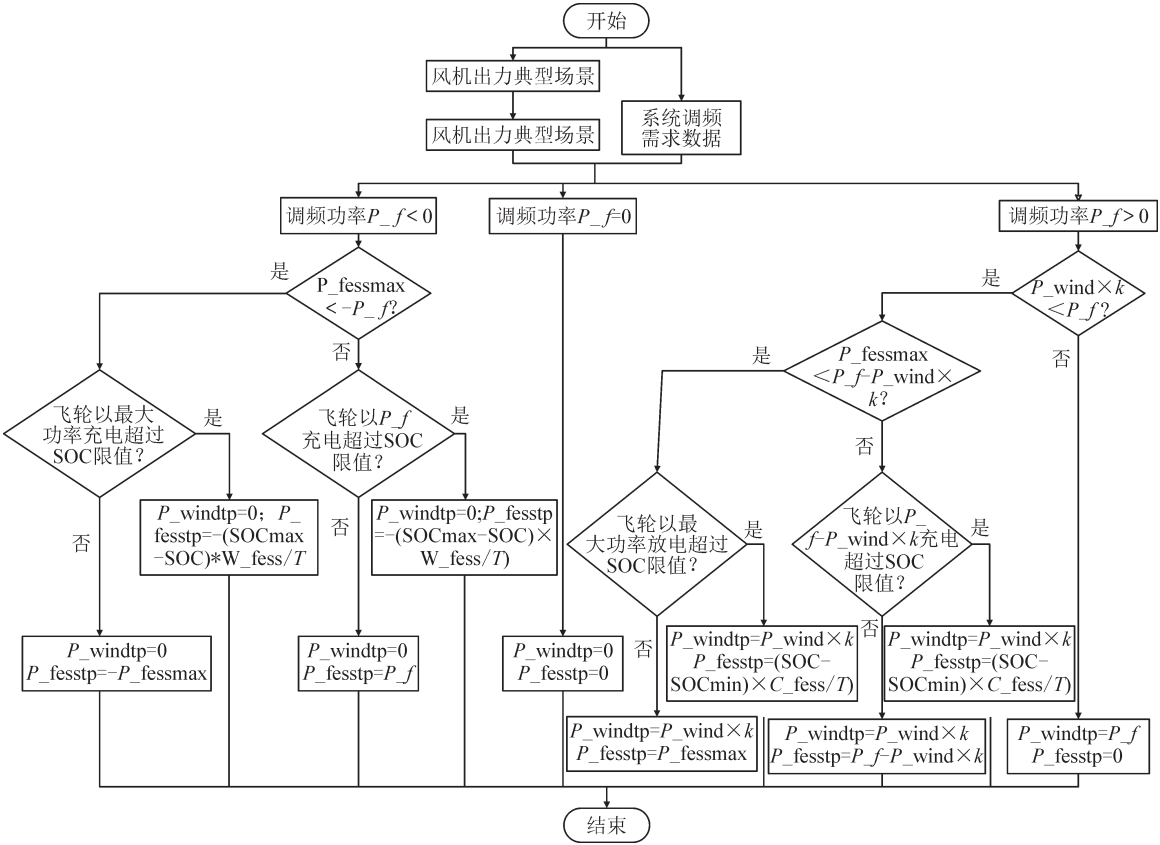


图 6 风储协同调频功率分配策略
Fig. 6 Wind storage collaborative frequency modulation power allocation strategy

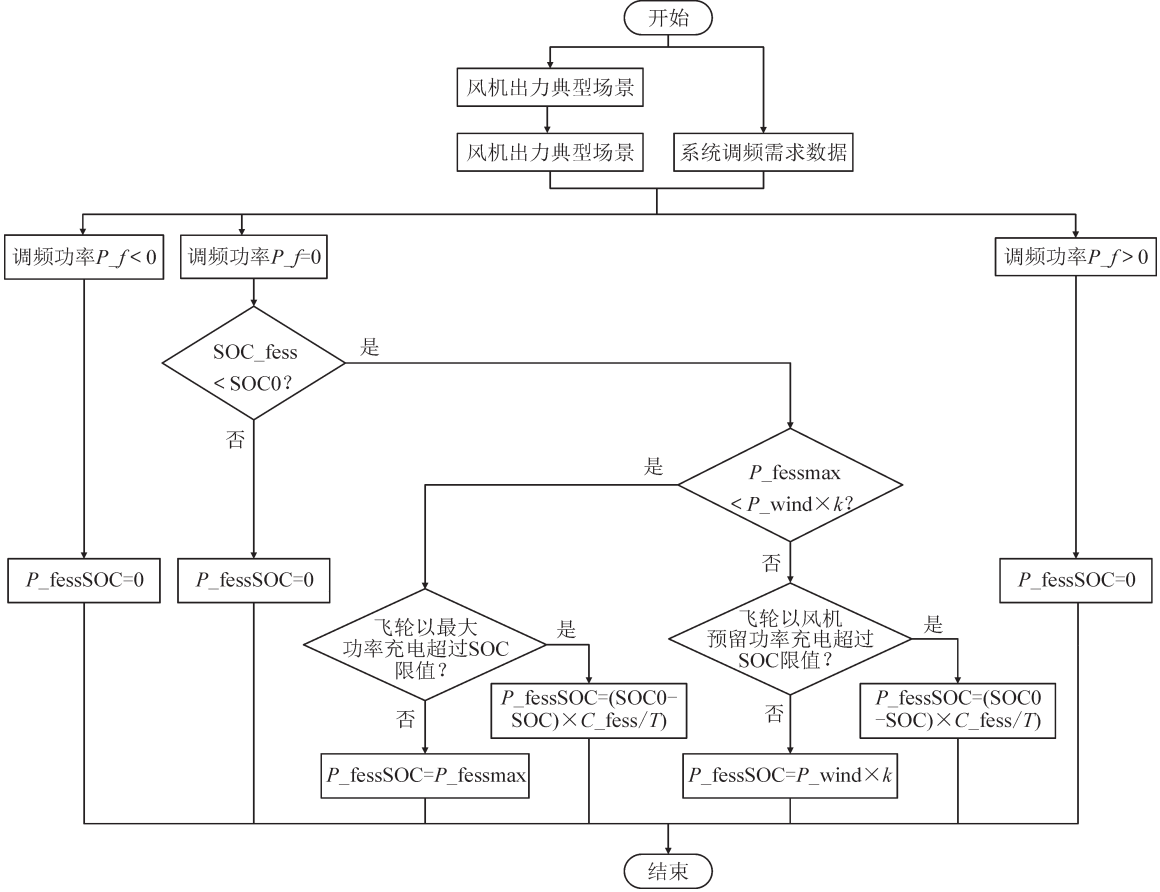


图 7 飞轮储能系统 SOC 恢复策略
Fig. 7 SOC recovery strategy for flywheel energy storage system

4 风储联合系统容量优化配置模型

4.1 目标函数

以风储联合系统参与频率支撑的年均经济收益最高为目标,建立容量配置优化模型。由于容量优化配置的结果要应用在各个场景中,因此将聚类的几种风机典型场景出现的概率以权值的形式加入目标函数。目标函数公式为

$$f = \min \left(\sum_{k=1}^{K_0} P_k \times E_k \right) \quad (6)$$

$$E_k = E_{\text{gain},k} - E_{\text{pun},k} - E_{\text{js},k} - E_{\text{yw},k} - E_{\text{wind_lost},k} \quad (7)$$

式(6)中: P_k 为场景 k 出现的概率; E_k 为风电典型场景 k 下的年均经济收益。式(7)为风电典型场景 k 下的年均经济收益 E_k 的具体组成,其中: E_{gain} 为参与系统调频的经济收益; E_{pun} 为调频不足的惩罚; E_{js} 为飞轮储能系统年均建设成本; E_{yw} 为飞轮储能系统运行和维护的成本; $E_{\text{wind_lost}}$ 为风机预留备用容量造成的经济损失。

参与系统调频的经济收益公式为

$$E_{\text{gain}} = k_{\text{gain}} \times W_{\text{tp}} \quad (8)$$

式中: k_{gain} 为调频收益系数,元/kW·h; W_{tp} 为参与系统调频的总电量,kW·h。

调频不足的惩罚公式为

$$E_{\text{pun}} = k_{\text{pun}} \times W_{\text{tplack}} \quad (9)$$

式中: k_{pun} 为调频惩罚系数,元/kW·h; W_{tplack} 为系统调频缺额的总电量,kW·h。

飞轮储能系统年均建设成本为

$$E_{\text{js}} = \frac{1}{N} (k_{\text{js_p}} \times P_{\text{fess}} + k_{\text{js_w}} \times W_{\text{fess}}) \quad (10)$$

式中: N 为飞轮寿命,年; $k_{\text{js_p}}$ 为飞轮储能系统单位功率建设成本,元/kW; P_{fess} 为飞轮储能系统额定功率,kW; $k_{\text{js_w}}$ 为飞轮储能系统单位容量建设成本,元/kW·h; W_{fess} 为飞轮储能系统额定容量,kW·h。

飞轮储能系统运行和维护的成本为

$$E_{\text{yw}} = k_{\text{yw_p}} \times P_{\text{fess}} + k_{\text{yw_w}} \times W_{\text{fess}} \quad (11)$$

式中: $k_{\text{yw_p}}$ 为飞轮储能系统单位功率运维成本,元/kW·年; $k_{\text{yw_w}}$ 为飞轮储能系统单位容量运维成本,元/kW·h·年。

风机预留备用容量造成的经济损失为

$$E_{\text{wind_lost}} = k_{\text{wind}} \times W_{\text{wind_lost}} \quad (12)$$

式中: k_{wind} 为风机发电收益系数,元/kW·h; $W_{\text{wind_lost}}$ 为风机由于预留备用容量损失的发电量,kW·h。

4.2 约束条件

4.2.1 风电功率约束

风电功率方面需要满足最大可发功率为风机实际稳态输出功率与预留功率之和,公式为

$$P_{\text{wind_max}} = P_{\text{wind}} + P_{\text{wind_reserve}} \quad (13)$$

式中: $P_{\text{wind_max}}$ 为风机最大可发功率; P_{wind} 为风机实际稳态输出功率; $P_{\text{wind_reserve}}$ 为风机预留功率。

4.2.2 飞轮 SOC 约束

飞轮实际运行的 SOC 要始终处于 SOC 的最大值和最小值之间,公式为

$$\text{SOC}_{\text{fess_min}} \leq \text{SOC}_{\text{fess}} \leq \text{SOC}_{\text{fess_max}} \quad (14)$$

式中: $\text{SOC}_{\text{fess_min}}$ 为飞轮储能系统荷电状态的最小值; $\text{SOC}_{\text{fess_max}}$ 为飞轮储能系统荷电状态的最大值。

4.2.3 飞轮功率约束

飞轮功率需要满足飞轮并网点在单位采样时间交换的电量不超过飞轮能释放或吸收的理论最大电量,公式为

$$\begin{cases} P_{\text{fess}} \leq \frac{(\text{SOC}_{\text{fess_max}} - \text{SOC}_{\text{fess_min}}) \times W_{\text{fess}}}{\Delta t} \text{ (放电)} \\ P_{\text{fess}} \geq \frac{(\text{SOC}_{\text{fess_min}} - \text{SOC}_{\text{fess_max}}) \times W_{\text{fess}}}{\Delta t} \text{ (充电)} \end{cases} \quad (15)$$

式中: 飞轮放电时飞轮功率 P_{fess} 为正; 充电时飞轮功率 P_{fess} 为负; W_{fess} 为飞轮储能系统额定容量; Δt 为单位采样时间。

4.2.4 调频功率约束

调频功率方面,需要满足风机提供的调频功率与飞轮储能系统提供的调频功率之和不超过电网需求的调频功率,公式为

$$\begin{cases} P_{\text{wind_tp}} + P_{\text{fess_tp}} \geq P_{\text{f}}, P_{\text{f}} < 0 \\ P_{\text{wind_tp}} + P_{\text{fess_tp}} \leq P_{\text{f}}, P_{\text{f}} > 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P_{\text{wind_tp}}$ 为风机提供的调频功率; $P_{\text{fess_tp}}$ 为飞轮储能系统提供的调频功率; P_{f} 为电网调频需求功率。

5 算例分析

5.1 容量配置数据及参数

本文采用某地区的风电年出力数据,并通过上述改进的 K-means 聚类算法得出 4 种风电出力典型场景及概率,结果见图 4;调频需求的数据采用某地区典型日调频功率见图 8。

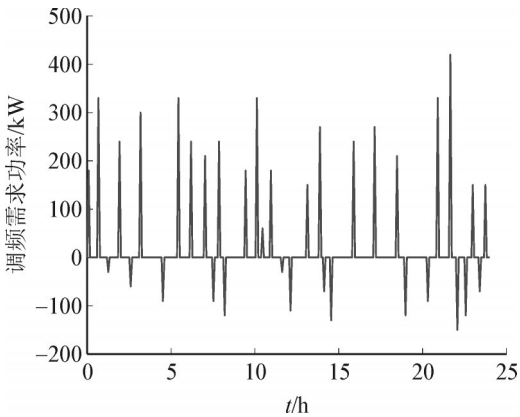


图8 调频需求功率数据
Fig. 8 Frequency modulation demand power data

风力发电收益即电价取 0.2 元/度,调频收益取 1 元/度,调频不足惩罚取 2 元/度,飞轮储能系统的运行参数详见表 1。

表1 飞轮储能系统运行参数
Table 1 Operating parameters of flywheel energy storage system

参数	数值
飞轮单位容量成本/(元/kW·h)	5 000
飞轮单位功率成本/(元/kW)	1 000
飞轮单位容量运维成本/(元/kW·h)	50
飞轮单位功率运维成本/(元/kW)	50
飞轮寿命/年	20
飞轮 SOC 初始值	0.4
飞轮 SOC 下限	0
飞轮 SOC 上限	1

以飞轮储能系统功率、飞轮储能系统容量和风机发电预留率 3 个变量作为决策变量,其中飞轮储能系统功率与容量成固定比例,功率是容量的两倍,利用粒子群算法对上述的容量配置模型进行优化求解,粒子群算法的参数选取见表 2^[18]。

表2 粒子群算法相关参数
Table 2 Related parameters of swarm algorithm

参数	数值
粒子群规模	100
最大迭代次数	500
粒子维度	2
惯性权重	0.8
加速常数	2

5.2 容量配置结果分析

粒子群算法优化的结果是风机发电预留率为 3.46%,飞轮储能系统容量为 156.09 kW·h,飞轮储能系统功率为 312.18 kW。风储联合系统调频收益,调频不足惩罚,风机减载损失,飞轮年均建设成本,飞轮运维成本,年均总收益见图 9。

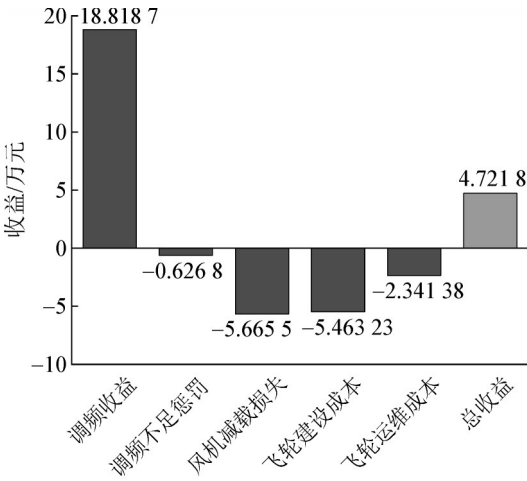


图9 风机-飞轮联合调频收益
Fig. 9 Wind turbine-flywheel integrated frequency regulation benefits

当风储联合系统按照粒子群算法优化的结果进行容量配置时,到达了经济性最优。同时,对于调频需求的响应上,年均完成的调频任务为 188.187 MW·h,占 98.36%,对系统调频的完成率优秀,同时实现了经济性和系统稳定性的要求。

5.3 风储协同优势分析

为了验证本文提出的风储协同容量配置方案的优势,将其与没有储能,只有风电参与频率支撑的方案做对比。同样利用粒子群算法对只有风电参与频率支撑的方案进行优化求解,选择风机发电预留率作为决策变量。两种方案的容量优化结果见表 3。

表3 容量优化结果对比
Table 3 Comparison of capacity optimization results

方案	仅风机	风储协同
风机发电预留率/%	8.32	3.41
飞轮储能系统容量/kW·h	0	156.09
飞轮储能系统功率/kW·h	0	312.18
调频收益/万元	4.947 2	18.818 7
调频不足惩罚/万元	28.369 8	0.626 8
风机减载损失/万元	13.829 8	5.665 5
飞轮年均建设成本/万元	0	5.463 2
飞轮运维成本/万元	0	2.341 4
年均总收益/万元	-37.252 4	4.721 8
调频完成率/%	25.86	98.36

从表 3 中可以看出,风储协同方案和仅风机的方案相比,风机发电预留率更低,使风机发电的效率更高,同时调频完成率高了 72.5%,为系统频率支撑提供了更大的帮助,能够有效提升系统频率稳定性,而且由于增加了飞轮储能系统,使得风机的减载损失更小,调频收益更高,尽管存在飞轮的建设

和运维成本,但是整体上使得年均总收益更高,提高了整个系统有更好的经济效益。因此,综合来看,本文提出的风储协同容量配置方案比只有风机的方案更有优势。

5.4 不同风电场景运行结果分析

为了验证文中提出的风储协同频率支撑容量配置策略和运行控制策略的可行性,采用上述的容量配置结果,对4种典型风电场景进行仿真分析,得出4种不同场景下的调频功率分配情况和经济性。

5.4.1 风电场景1

风电场景1的出力曲线见图10,场景1风电出力整体处于中等水平,并且随着时间呈上升趋势。风电场景1调频功率分配情况见图11,可以看出在本文的容量配置结果下,风机和飞轮储能系统基本可以满足系统的调频需求,完成度优秀,其中风机的调频输出功率整体上呈上升趋势,与其总出力情况保持一致。风电场景1调频收益具体情况见图12,可以看出由于场景1风电出力处于中等水平,因此在固定风机预留率的情况下,风机减载损失中等,使得系统总收益相对可观。

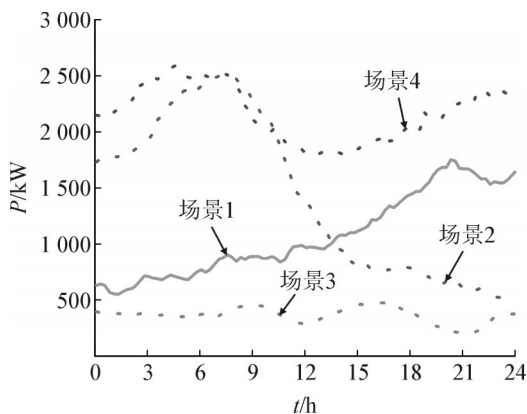


图10 风电场景1出力曲线

Fig. 10 Output curve of wind power scenario 1

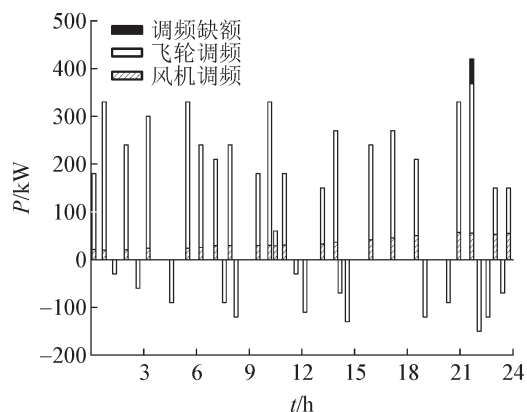


图11 风电场景1调频功率分配情况

Fig. 11 Frequency regulation power distribution of wind power scenario 1

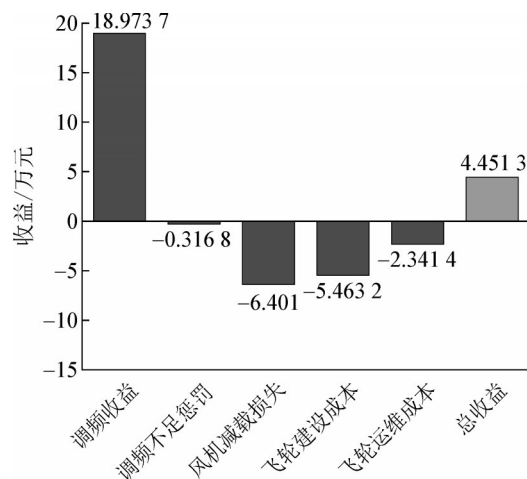


图12 风电场景1调频收益

Fig. 12 Frequency regulation benefits of wind power scenario 1

5.4.2 风电场景2

风电场景2的出力曲线见图13,场景2风电出力整体处于中上水平,并且随着时间先上升后下降。风电场景2调频功率分配情况见图14,可以看出在本文的容量配置结果下,风机和飞轮储能系统基本可以满足系统的调频需求,完成度优秀,其中风机的调频输出功率的变化趋势与其总出力情况基本保持一致,先上升后下降。

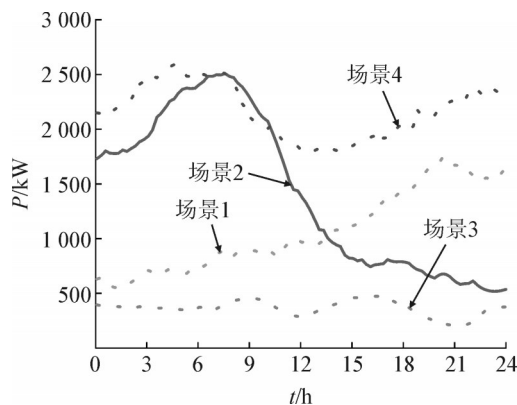


图13 风电场景2出力曲线

Fig. 13 Output curve of wind power scenario 2

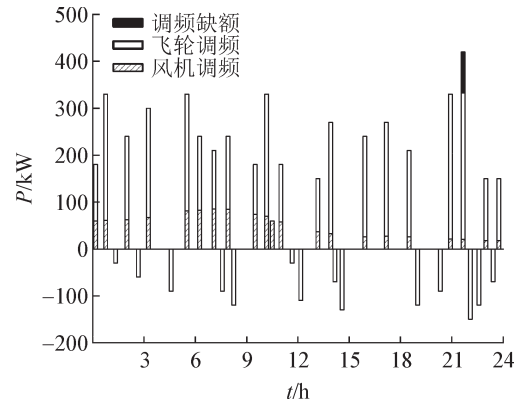


图14 风电场景2调频功率分配情况

Fig. 14 Frequency regulation power distribution of wind power scenario 2 power distribution

风电场景 2 调频收益见图 15,可以看出由于场景 2 风电出力处于中上水平,因此在固定风机预留率的情况下,风机减载损失比场景 1 略大,使得系统总收益相对较差。

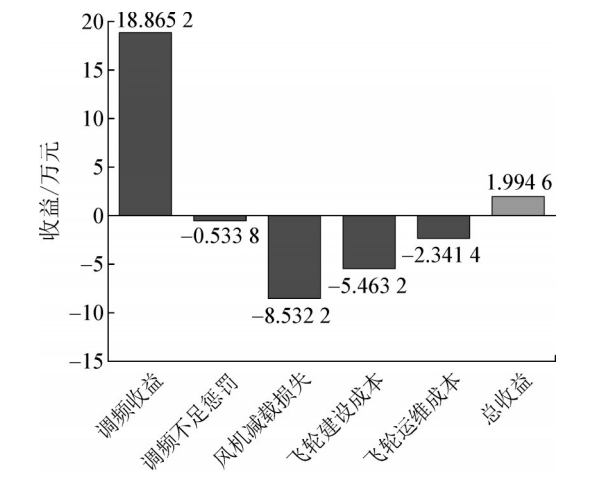


图 15 风电场景 2 调频收益
Fig. 15 Frequency regulation benefits of wind power scenario 2

5.4.3 风电场景 3

风电场景 3 的出力曲线见图 16,场景 3 风电出力整体处于较低水平,基本保持稳定,变化幅度不大。风电场景 3 调频功率分配情况见图 17。

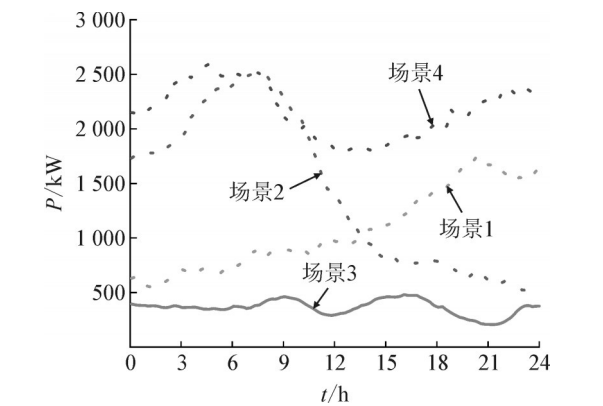


图 16 风电场景 3 出力曲线
Fig. 16 Output curve of wind power scenario 3

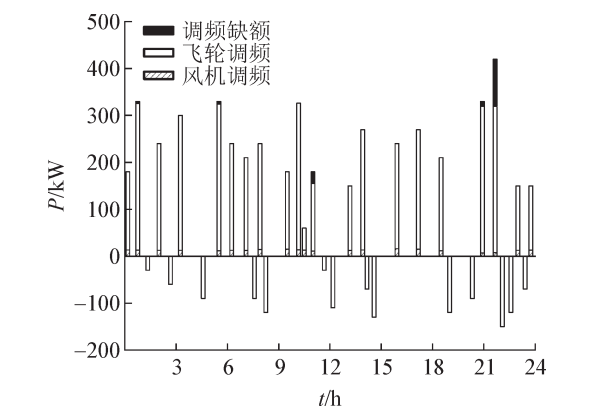


图 17 风电场景 3 调频功率分配情况
Fig. 17 Frequency regulation power distribution of wind power scenario 3

可以看出在本文的容量配置结果下,由于风机出力的减少,风储协同系统的调频完成度相比于场景 1 和场景 2 较低,出现调频缺额的频次变高。图 18 为风电场景 3 调频收益具体情况,可以看出由于场景 3 风电出力处于较低水平,因此在固定风机预留率的情况下,风机减载损失相比于场景 1 和场景 2 较低,使得系统总收益表现更加优秀。

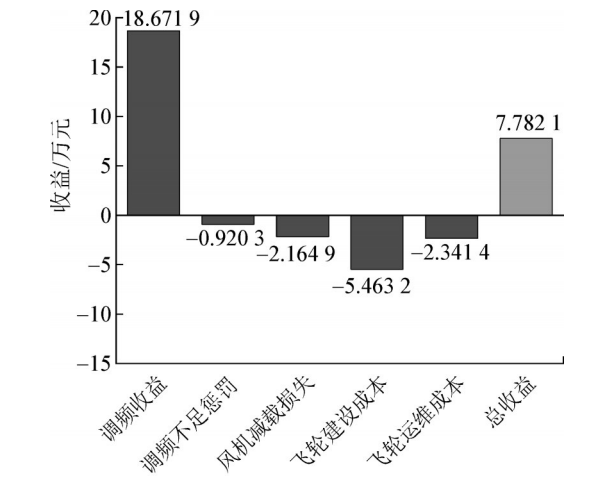


图 18 风电场景 3 调频收益
Fig. 18 Frequency regulation benefits of wind power scenario 3

5.4.4 风电场景 4

风电场景 4 的出力曲线见图 19,场景 4 风电出力整体稳定处于较高水平,是场景 3 风机出力的 4~5 倍。风电场景 4 调频功率分配情况见图 20,可以看出在本文的容量配置结果下,风机和飞轮储能系统基本可以满足系统的调频需求,完成度优秀,其中风机的调频输出功率相比前 3 个场景更大,体现出了本文控制策略中首先由风机提供调频功率,其次由飞轮来补充调频缺额的功率分配思想。风电场景 4 调频收益具体情况见图 21,可以看出由于场景 4 风电出力处于较高水平,因此在固定风机预留率的情况下,风机减载损失比前 3 个场景更大,使得系统总收益处于最差的水平。

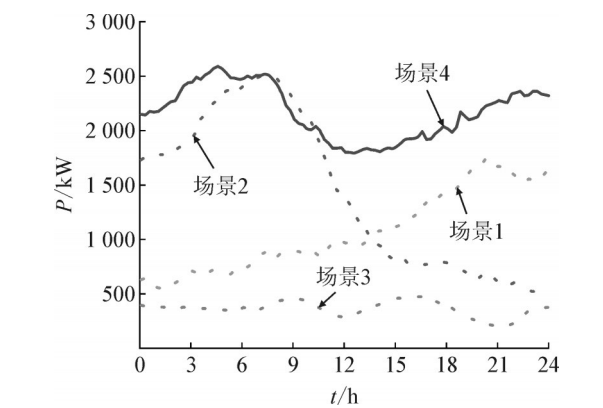


图 19 风电场景 4 出力曲线
Fig. 19 Output curve of wind power scenario 4

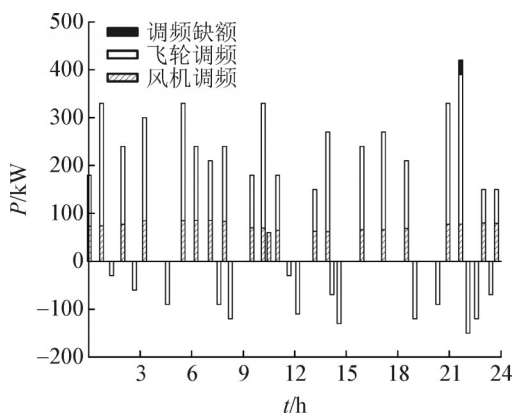


图20 风电场景4调频功率分配情况

Fig. 20 Frequency regulation power distribution of wind power scenario 4

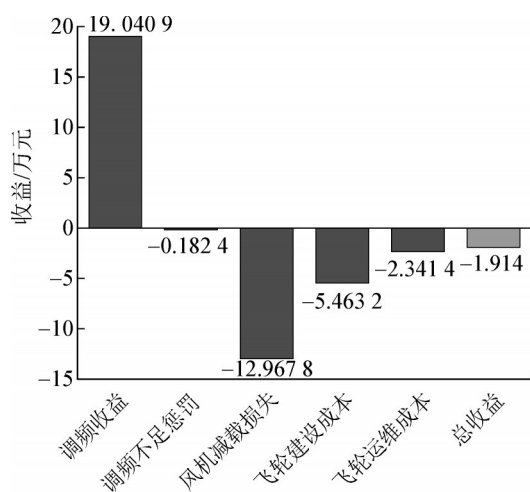


图21 风电场景4调频收益

Fig. 21 Frequency regulation benefits of wind power scenario 4

综上所述,本文中用4个典型场景及其概率来代表风机的出力情况,同时提出了风储协同频率支撑的控制策略和容量配置方案,将风机典型场景以权值的形式加入模型中,计算出4种风机场景加权综合收益最高的结果,使得结果更贴近真实运行场景。

6 结语

随着风电并网的规模越来越大,电网频率稳定性相比于传统电网更差,需要风机预留功率提供频率支撑,然而这会使得风能利用率下降,经济性变差。因此,本文考虑在风机系统中加入飞轮储能,通过飞轮储能的充放电帮助风机提供频率支撑,提出了一种基于典型风电场景概率的飞轮储能与风电机组协同频率支撑容量优化配置模型,通过改进的 K-means 聚类算法对风机年出力数据进行典型场景划分,建立风机和飞轮储能系统的协同调频控

制策略,并建立风储联合系统容量优化配置模型,利用粒子群算法进行求解,得出风储协同系统的最优配置方案。具体结论如下:

1)采用改进的 K-means 聚类算法进行风机场景划分,其中使用肘部曲线法和 Davies-Bouldin (DB)指数进行最优聚类数的确定,得出了4种风机典型场景及概率;

2)提出了风储协同频率支撑控制策略,首先由风机的备用提供调频功率,如有缺额则根据飞轮储能系统的运行状态进行辅助补充,在无调频任务时由风机对飞轮储能系统 SOC 进行恢复,为下一次调频做准备;

3)基于所提出的控制策略,以年均经济收益最高为目标函数建立风储联合系统容量优化配置模型,并利用粒子群算法进行求解,得出了风储协同系统的最优配置方案,风机发电预留率为3.46%,飞轮储能系统容量为156.09 kW·h,飞轮储能系统功率为312.18 kW,相比于只有风机的系统在调频完成率和年均经济收益上都有了较大改善。

参考文献

- [1] 白晓红. 风力发电及其技术发展综述[J]. 环球市场, 2017(2):119.
BAI Xiaohong. Overview of wind power generation and its technological development[J]. Global Market, 2017(2): 119.
- [2] 安洪光. 我国电力工业现状及发展趋势[J]. 电气时代, 2024(1):32-33.
AN Hongguang. Current situation and development trends of China's electric power industry[J]. Electric Age, 2024(1):32-33.
- [3] 刘斯伟,李庚银,周明. 双馈风电机组对并网电力系统暂态稳定性的影响模式分析[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 471-476.
LIU Siwei, LI Gengyin, ZHOU Ming. Influence mechanism of doubly fed induction generator on power system transient stability[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 471-476.
- [4] 张巍,杨新宇. 双馈风机超速与变桨协调频率控制策略研究[J]. 控制工程, 2022, 29(4): 743-749.
ZHANG Wei, YANG Xinyu. Coordinated frequency control strategy based on over-speeding and variable pitch for doubly-fed induction generator[J]. Control Engineering of China, 2022, 29(4): 743-749.
- [5] 张兴,阮鹏,张柳丽,等. 飞轮储能装置性能测试[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1674-1678.
ZHANG Xing, RUAN Peng, ZHANG Liuli, et al. Performance test of flywheel energy storage device[J]. Energy

- Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1674-1678.
- [6] 刘颖明, 王瑛玮, 王晓东, 等. 基于蚁狮算法的风电集群储能容量配置优化方法[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 431-437.
- LIU Yingming, WANG Yingwei, WANG Xiaodong, et al. Optimization of storage capacity allocation in wind farm cluster based on ant lion optimization algorithm[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(1): 431-437.
- [7] 叶瑞丽, 郭志忠, 刘瑞叶, 等. 基于风电功率预测误差分析的风电场储能容量优化方法[J]. 电力系统自动化, 2014(16): 28-34.
- YE Ruili, GUO Zhizhong, LIU Ruiye, et al. A method for designing optimal energy storage system based on analysis of wind power forecast error[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014(16): 28-34.
- [8] 李长霖, 贾燕冰, 石俊逸, 等. 考虑风电集群效应的风储系统一次调频容量配置策略[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-13 [2022-07-12].
- LI Changlin, JIA Yanbing, SHI Junyi, et al. A primary frequency regulation capacity configuration strategy for wind storage systems considering wind power cluster effects[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-13[2022-07-12].
- [9] 朱瑛, 秦立宽, 颜全椿, 等. 考虑频率响应过程的风储联合调频策略及储能系统优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 28-35.
- ZHU Ying, QIN Likuan, YAN Quanchun, et al. Wind-storage combined frequency regulation strategy and optimal configuration method of energy storage system considering process of frequency response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 28-35.
- [10] 吴广建, 章剑林, 袁丁. 基于K-means的手肘法自动获取K值方法研究[J]. 软件, 2019, 40(5): 167-170.
- WU Guangjian, ZHANG Jianlin, YUAN Ding. Automatically obtaining K value based on K-means elbow method[J]. Computer Engineering & Software, 2019, 40(5): 167-170.
- [11] 刘良凤, 刘三阳. 基于权重差异度的动态模糊聚类算法[J]. 吉林大学学报(理学版), 2019, 57(3): 574-582.
- LIU Liangfeng, LIU Sanyang. Dynamic fuzzy clustering algorithm based on weighted difference degree[J]. Journal of Jilin University Science Edition, 2019, 57(3): 574-582.
- [12] 冯茜, 李擎, 全威, 等. 多目标粒子群优化算法研究综述[J]. 工程科学学报, 2021, 43(6): 745-753.
- FENG Qian, LI Qing, QUAN Wei, et al. Overview of multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(6): 745-753.
- [13] 章永来, 周耀鉴. 聚类算法综述[J]. 计算机应用, 2019, 39(7): 1869-1882.
- ZHANG Yonglai, ZHOU Yaojian. Review of clustering algorithms[J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39(7): 1869-1882.
- [14] 杨俊闯, 赵超. K-means聚类算法研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(23): 7-14.
- YANG Junchuang, ZHAO Chao. Survey on K-means clustering algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(23): 7-14.
- [15] 李召鑫, 孟祥印, 肖世德, 等. 基于Flink框架的K-means算法优化及并行计算策略[J]. 计算机与数字工程, 2023, 51(10): 2231-2235.
- LI Zhaoxin, MENG Xiangyin, XIAO Shide, et al. K-means algorithm optimization and parallel computing strategy based on flink framework[J]. Computer and Digital Engineering, 2023, 51(10): 2231-2235.
- [16] 郭靖, 侯苏. K-means算法最佳聚类数评价指标研究[J]. 软件导刊, 2017, 16(11): 5-8.
- GUO Jing, HOU Su. Study on the index of determining the optimal clustering number of K-means algorithm[J]. Software Guide, 2017, 16(11): 5-8.
- [17] 陈彪, 王玮, 高嵩, 等. 计及灵活经济环保运行的火电-飞轮储能系统容量配置与调频参数协同优化[J]. 动力工程学报, 2024, 44(3): 376-384.
- CHEN Biao, WANG Wei, GAO Song, et al. Co-optimization of capacity allocation and frequency control parameters for thermal power-flywheel energy storage system considering flexible, economical and environment friendly operation[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(3): 376-384.
- [18] 周俊, 陈璟华, 刘国祥, 等. 粒子群优化算法中惯性权重综述[J]. 广东电力, 2013, 26(7): 6-12.
- ZHOU Jun, CHEN Jinghua, LIU Guoxiang, et al. Summary on inertia weight in particle swarm optimization algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(7): 6-12.
- 作者简介:**
- 孙广宇(1990—), 男, 工程师, 主要研究方向为新能源及储能控制技术。E-mail: 126543289@qq.com。
- 胡妹博(1989—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为系统及新能源优化技术。
- 谢赐敬(1980—), 男, 副高级工程师, 主要研究方向为新能源及储能测试技术。
- 马欣彤(1993—), 女, 工程师, 主要研究方向为新能源仿真及建模。