

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200488

风储系统作为黑启动电源的容量配置策略

李翠萍¹, 张世宁², 李军徽¹, 尤宏飞³, 张佳星⁴, 孔明⁵

(1. 东北电力大学现代电力系统仿真与控制及可再生能源技术教育部重点实验室, 吉林 吉林 132012; 2. 内蒙古电力(集团)有限责任公司呼和浩特供电局, 内蒙古 呼和浩特 010020; 3. 国网河北省电力有限公司平山县供电分公司, 河北 石家庄 050400; 4. 南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210061; 5. 国网山东省电力公司济南供电公司, 山东 济南 250000)

摘要: 风储系统作为黑启动电源, 对解决风多水少地区水电黑启动难题具有重要作用, 但风电波动及储能高成本制约了风储黑启动的发展。为解决风电参与黑启动的功率波动问题, 在考虑风电出力波动性和电池储能系统自身运行约束的基础上, 提出了风储系统作为黑启动电源的储能容量优化配置策略。首先基于黑启动最小风速, 定义最小风速概率密度以及最佳风速概率倾向制定双目标特征函数, 从数值、时间及资源有效利用三个方面确定了参与黑启动的风电场。其次, 基于自组织特征映射神经网络(SOFM)和最小二乘法支持向量机(LSSVM)结合的风电功率预测方法, 确定了辅助风电参与黑启动的储能容量及最大充放电功率。最后, 在一个并网点并入5个风电场的内蒙古某局域电网中验证了所提模型和方法的有效性。

关键词: 黑启动; 多储能电站; 容量配置; 概率密度

Capacity configuration strategy of a wind power and energy storage system as a black-start source

LI Cuiping¹, ZHANG Shining², LI Junhui¹, YOU Hongfei³, ZHANG Jiaying⁴, KONG Ming⁵

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 2. Hohhot Power Supply Bureau, Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Hohhot 010020, China; 3. Pingshan County Power Supply Company, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050400, China; 4. NARI Technology Development Limited Company, Nanjing 210061, China; 5. Jinan Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Co., Ltd., Jinan 250000, China)

Abstract: As a black-start power source, a wind power and energy storage system plays an important role in solving the problem of hydroelectric generation in regions with more wind and less water. However, because of the fluctuation of wind power and the high cost of energy storage, their development as a black-start source is restricted. In order to solve the problem of power fluctuation caused by wind power and the operating constraints of the battery energy storage system itself, an optimal energy storage capacity configuration strategy is proposed. First, based on the minimum wind speed of a black start, the probability density of the minimum wind speed and the probability inclination of optimal wind speed are defined. The wind farms involved in a black start are determined from the three aspects of numerical value, time and effective utilization of resources. Secondly, based on a wind power prediction method combined with a Self-Organizing Feature Mapping (SOFM) neural network and the Least Squares Support Vector Machine (LSSVM), the capacity and maximum charge-discharge power of the energy storage assisting wind power in a black start are determined. Finally, the effectiveness of the proposed model and method is verified in the Inner Mongolia power grid which is connected to 5 wind farms.

This work is supported by the Joint Foundation of Natural Science Foundation of Jilin Province (No. 2020122352JC).

Key words: black start; multi-storage power station; capacity configuration; probability density

0 引言

随着人们对电力依赖程度的加深, 大停电事故

给经济和社会造成的损失也越来越严重^[1-3]。黑启动作为电网恢复的首要过程, 其关键是黑启动电源的启动。传统的黑启动电源优先考虑水电, 但由于本身劣势, 不适用于风多水少地区^[4-5]。随着电网中风电占比显著提高^[6-8], 对于风电资源丰富、风电装机大的地区, 研究风电作为黑启动电源具有重要价值^[9-10]。

基金项目: 吉林省自然科学基金联合基金项目资助 (2020122352JC)

由于风力发电的随机性和波动性, 储能系统已经成为风电稳定参与黑启动的重要环节^[11-12]。近年来, 在甘肃、江苏等地已建设多座储能电站, 兆瓦级储能示范工程已大规模建成, 多储能态势已经形成^[13-15]。采用多储能电站参与黑启动不仅是顺应储能发展的潮流, 更是解决单个储能电站辅助风电场启动需要经过多次电压变换导致操作难度增加, 难以稳定启动风电场问题的关键手段。

国内外关于储能配置的研究一般基于对风电功率数据的分析, 根据风电功率预测或风电功率波动特性, 结合具体优化目标, 对储能电站进行优化配置。文献[16]基于改进小波分析算法对混合储能系统的容量进行配置, 将风电波动分配到不同储能单元, 提高了平抑风电波动效果。但并没有考虑经济性, 配比并不十分合理。文献[17]根据风电、光伏出力关系建立连接函数, 利用混合储能系统分接不同平抑新能源任务, 间接减少了平抑新能源的储能成本。文献[18]针对多种类型混合储能, 各储能根据经典模态分解法所计算的平抑风电任务, 综合平抑效率、经济性及储能寿命三方面建立优化模型, 通过仿真验证了混合储能相较于单一储能在平抑风电方面的优越性。文献[19]以满足含风电的微电网并网需求及储能容量最小为目标, 提出了加权移动平均控制法来平抑分布式发电输出功率、同时采用上下限约束法来进行微电网系统负荷的削峰填谷。文献[20-21]以风电并网目标差最小为目标, 以储能成本最小建立优化函数。同时考虑了储能经济效益和平抑风电效率。文献[22-23]分别利用改进的粒子群算法和猫群算法, 以成本和总运行网损最小为目标得到了经济性最优的分布式储能^[24]的配置容量。

以上文献储能优化配置的目标为: 可靠性目标(储能平抑风电功率波动效果、风电并网需求、电能质量、负荷损失率)、经济性目标(储能容量最小、投资总成本最小、总损耗最小)以及风电利用率。基于某个算法或考虑某个因素的基础上对储能进行配置和容量的优化, 考虑因素的不同, 储能配置容量有很大差异。并非具体结合风储黑启动具体需求, 且关于多储能电站参与黑启动的容量配置方面的研究较少。为此, 鉴于风力发电的随机性, 本文利用风电功率预测确定黑启动时段内的风电出力, 定义风电场黑启动评估指标, 确定了参与黑启动的风电场。并基于此配置储能电站, 使得风储系统可以平稳参与此后电网恢复过程。

1 储能配置影响因素分析

1.1 结构示意图

多风储系统参与黑启动结构示意图如图 1 所示。风电集群得到配合黑启动的指令后, 储能辅助风电场启动, 由风储发电系统作为黑启动电源给输电线路充电, 逐步启动火电厂辅机, 与火电机组协同恢复整个局域电网的供电。

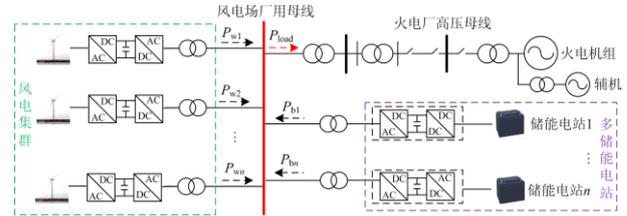


图 1 黑启动结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of black start configuration

1.2 影响因素

电网全黑后, 储能系统在风电黑启动中的主要作用是辅助风电自启动、平衡功率及稳定系统电压频率。如图 2 所示, 黑启动储能平抑风电出力与电力系统稳态运行时储能平抑风电出力的不同之处在于: 黑启动中风储系统的主要作用为启动火电机组辅机, 当风电功率小于辅机功率时(B1、B2 区), 系统缺额必须由储能补足; 当风电功率大于辅机功率时(A1、A2、A3 区), 关于系统溢出功率, 出于对储能成本的考虑, 若吸收全部功率, 可能会造成储能容量过大, 得不偿失。

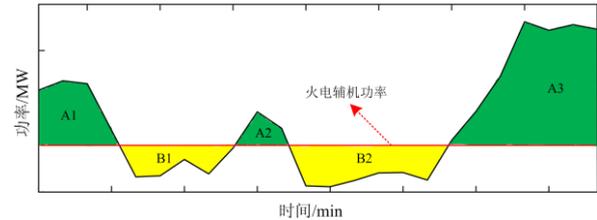


图 2 容量需求示意图

Fig. 2 Schematic diagram of required capacity

根据以上分析, 结合储能自身特性, 可得出以下几点黑启动储能配置影响因素。

1) 黑启动中, 在待启动机组确定的前提下, 往往有多个风电场可供选择, 由于风电装机及风资源情况的影响, 各风电场出力不尽相同。需选择出力最佳的风电场以减少风电黑启动系统功率缺额, 间接减少储能成本。

2) 由于风电的随机性和波动性, 不同时段内的风电出力不尽相同。为对储能准确配置, 需对黑启动 60 min 内的风电出力进行准确预测, 确定风电

功率。

3) 为使得风电场可以参与黑启动, 黑启动时段内的风速需大于风电切入风速, 否则风电场无法启动并网。即需确定此时段风储系统是否适合参与黑启动。同时, 当电源出力满足负载需求时黑启动系统才可运行。由此定义黑启动最小出力 P_{ws_min} 。

$$P_{ws_min} = (1 + \Delta P\%)P_L + P_a \quad (1)$$

式中: P_L 为待启动火电厂辅机功率; P_a 为风电场厂用电及机组辅机自用电; 系数 $\Delta P\%$ 为线损率。

4) 由于风储系统的主要目的为启动火电机组辅机, 对新能源利用为次要目的。因此, 基于对储能成本的考虑, 在容量、安全性、循环寿命、充放电效率等指标达到辅助风电黑启动标准时, 应合理弃风以确定最优储能容量。

根据以上储能配置影响因素, 基于黑启动火电机组辅机功率需求, 确定了风储系统作为黑启动电源的最优容量配置策略。具体研究思路如下: 电网全黑后, 立足于黑启动电源的供电能力、系统电压频率稳定性等约束, 定义最小风速概率密度以及最佳风速概率倾向制定双目标特征函数, 从数值、时间及资源有效利用三个方面评估并确定了参与黑启动的风电场; 其次, 利用风电功率预测, 确定未来 60 min 内的风电出力, 基于此配置储能容量, 使得风储系统可以平稳参与黑启动过程。

2 储能优化配置模型

2.1 风电场的选择

风电场评估不能基于单一条件, 应结合当地电网风能资源状况、风电机组性能、风电场装机容量及布局等因素进行综合分析判断。针对风资源丰富地区, 基于风电黑启动最小风速, 由最小风速概率密度以及最佳风速概率倾向来制定双目标特征函数, 从数值、时间及资源有效利用三个方面对区域风电场进行评估。

1) 风电黑启动最小风速

根据确定的单风电场黑启动最小出力 P_{ws_min} , 不考虑汇集效应的影响下, 假定风电场内 n 台风电机组出力基本相同, 单风电机组出力最小出力 P_{w_min} 可由式(2)确定。

$$P_{ws_min} = nP_{w_min} \quad (2)$$

黑启动最小风速 v_{min_lim} 为单风电机组满足 P_{w_min} 所对应的风速, 其可以通过各风电场实测 $V-P$ 曲线求得。由于风电场布局及地理位置的影响, 不同风电场, 同一最小出力可能对应不同风速。

2) 最小风速概率密度

黑启动不仅仅是“擦火柴”这个一瞬间的动作, 这个瞬间风电出力满足辅机功率需求即可; 黑启动是恢复电网供电的连续阶段, 包括风储系统启动及火电辅机启动等一系列步骤, 耗时约 60 min。因此, 区域风速应具有一定的连续性, 以保证风电场黑启动的顺利进行。

风速概率密度分析常选择双参数 Weibull 分布模型, 称为常规风速概率密度(一段时间内统计不同范围内的风速数据得出)。对于风电作为黑启动电源, 往往关注风电出力大于辅机出力部分; 对于少风或无风(风电出力小于辅机出力)情况, 往往不采用风电作为黑启动电源。因此, 本文在黑启动时段内, 定义一种非条件概率密度; 条件为风速大于黑启动最小风速, 将风速数据输入到条件风速概率密度函数 $f(v)$ 中, 求得最小风速概率密度 P 。

$$P = P(v_{max} > v_{min_lim}) = \int_{v_{min}}^{v_{max}} f(v) dv \quad (3)$$

3) 最佳风速概率倾向

在风储系统中, 火电厂辅机和风电功率的差额将由储能补足。当风电功率小于辅机功率时, 系统缺额必须由储能补足; 当风电功率大于辅机功率时, 关于系统溢输出功率, 若多个风电场同时接入时, 数值较大, 所需储能功率及容量大, 储能成本高昂。因此, 在保证黑启动能够成功实施的前提下, 出于对储能成本的考虑, 对风电机组采用限电弃风的控制策略。以黑启动负荷所需功率为储能最大充放电功率, 对风电资源进行合理利用。

对条件风速概率密度 $f(v)$, 设风速最大值 v_{max_lim} (取各风电场满足 2 倍负荷功率的单台机组最低发电功率的最大风速)。

$$P_1 = P(v < v_{act_min}) = \int_0^{v_{act_min}} f(v) dv \quad (4)$$

$$P_2 = P(v_{act_min} < v < v_{max_lim}) = \int_{v_{act_min}}^{v_{max_lim}} f(v) dv \quad (5)$$

$$P_3 = P(v \geq v_{max_lim}) = \int_{v_{max_lim}}^{v_{act_max}} f(v) dv \quad (6)$$

式中: v_{act_min} 、 v_{act_max} 分别为风电切入、切出风速; P_1 、 P_3 为风电不可执行黑启动时段; P_2 为风电可执行黑启动时段。由此定义最佳风速概率倾向为

$$\alpha = \frac{P_2}{P_1 + P_3} \quad (7)$$

式中, α 表示最佳风速概率倾向。当 $\alpha \in (0, 0.5)$ 时, 该风电场大部分时段不可执行黑启动; 当 $\alpha \in (0.5, 1)$ 时, 该风电场大部分时段可执行黑启动。

4) 双目标特征函数

为更直观地确定风电集群黑启动的可行性, 本文采用线性加权法构建指标优化模型, 如式(8)。

$$\min f(x) = \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 \quad (8)$$

式中: 函数 f_1 、 f_2 分别为最小风速概率密度、最佳风速概率密度; λ_1 、 λ_2 为非负值的权重, 满足 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。

指标优化模型中的权重对于模型的求解至关重要, 需评估 2 个指标的相对重要性。在保证电网黑启动能够成功实施的前提下, 考虑风电场利用, 因此权重 λ_1 大于 λ_2 。通过为权重赋值, 可以选出最适合参与黑启动的风电场。

2.2 基于风电预测的储能容量和功率的确定

电网全黑后, 储能的风电黑启动中的主要作用是辅助风电场启动、辅助风电满足黑启动火电厂辅机功率需求和平抑风电波动。由于风电出力的波动性, 需确定未来 60 min 内的风电出力来解决所需储能容量问题。

2.2.1 风电数据预处理

风力发电具有随机性和波动性, 特别是春秋两季(多风季节), 风速变化迅速多样, 短时间内波动剧烈, 气象参数有一定的不准确性; 但短期内风速相关联, 气温等气象条件变化并不十分明显。因此, 本文选择风速和温度两个样本数据作为模型训练的输入数据, 采用 SOFM 算法对训练样本进行聚类分析, 将不同种类的样本进行分类, 并针对不同样本各自进行 LSSVM 训练, 选择同一类别的 LSSVM 进行黑启动 60 min 仿真预测。具体预测流程图如 3 所示。

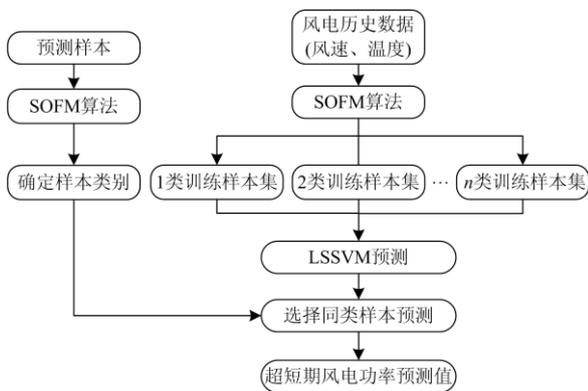


图 3 超短期风电功率预测流程图

Fig. 3 Flow chart of ultra-short-term wind power prediction

本文采用以下几种国际通用的误差指标对预测结果进行评价分析:

1) 归一化平均绝对误差 e_{NMAE}

$$e_{\text{NMAE}} = \frac{1}{P_{\text{cap}}} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |A_i - x_i| \times 100\% \quad (9)$$

2) 归一化均方根误差 e_{NRMSE}

$$e_{\text{NRMSE}} = \frac{1}{P_{\text{cap}}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - x_i)^2} \times 100\% \quad (10)$$

式中: x_i 为第 i 个预测点的预测值; A_i 为第 i 个预测点的实际值; n 为预测点的个数; P_{cap} 为风机的额定容量。

2.2.2 储能最优容量模型

当储能在容量、安全性、循环寿命、充放电效率等指标达到辅助风电黑启动标准时, 以储能容量最小为目标, 确定黑启动储能充放电功率和储能容量。

1) 黑启动储能充放电功率

系统功率平衡是风储黑启动成功的基本要素。当风电出力小于火电厂辅机出力时, 系统功率缺额需由储能补足; 当风电出力大于火电厂辅机出力时, 系统富裕功率可由储能全部吸收, 但考虑到储能成本高昂, 一般风机采用限电弃风的控制。因此, 黑启动储能的主要目的是完成系统缺额部分功率平衡。本文以风电功率和火电厂辅机功率的最大缺额确定储能的最高充放电功率 $P_{\text{bess_lim}}$ 。

$$P_{\text{bess_lim}} = \max \{ (1 + \Delta P\%) P_L + P_a - P_w \} / \eta \quad (11)$$

式中, η 为储能的充放电效率。

2) 储能容量的确定

基于黑启动储能最高充放电功率确定储能容量 E_{bess} , 如式(12)所示。

$$E_{\text{bess}} \text{SOC}_{\text{ori}} \eta \geq \int_0^t \{ (1 + \Delta P\%) P_L + P_a - P_w \} dt \quad (12)$$

2.3 整体模型求取方法

首先, 利用 SOFM-LSSVM 对风电数据预处理, 在待启动风电厂自用电系统功率以及待启动火电厂辅机功率需求约束下, 确定在未来 60 min 内需启动、组合的风电场。其次, 基于上文确定的风电场和火电厂辅机, 综合考虑黑启动稳定性和经济效益, 确定黑启动储能充放电功率和储能容量。最后, 给各风电场储能电站下达黑启动计划, 进行电网恢复操作。一种针对上述风储黑启动容量优化配置的使用计算方法步骤如图 4 所示。

其中, 由于风电的波动性, 不同风电场黑启动支持概率不一致, 本文从数值、时间及资源利用率三个角度评估风电场。数值上, 根据黑启动最小出力结合 $V-P$ 曲线确定黑启动最小风速; 时间上, 黑

启动时长 60 min 是一个连续过程, 提出由黑启动最小风速约束的条件概率密度; 资源利用率上, 风电与辅机功率差额需由储能补足, 所需储能成本高昂, 对风电采用限电弃风控制, 以黑启动负荷所需功率为储能最大充放电功率, 对风电资源进行合理利用。最后, 由最小风速概率密度和最佳风速概率倾度来制定双目标特征函数, 各风电场按函数值大小进行排序, 确定参与黑启动的风电场。

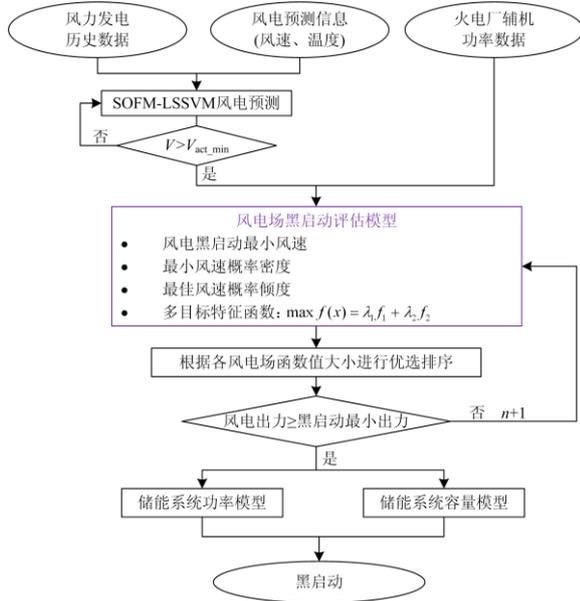


图 4 储能最优容量配置流程图

Fig. 4 Schematic diagram of optimal capacity configuration for energy storage

3 算例与分析

3.1 算例条件

以一个并网点汇集并入某局域网的 5 个风电场为研究对象, 目标负荷为待启动容量 300 MW 火电机组的辅机, 辅机总容量为 25.5 MW。具体参数如表 1 所示。

表 1 各风电场参数

Table 1 Parameters of each wind farm

| 风电场编号 | 装机容量/MW | 机组台数 | 单机容量/MW |
|-------|---------|------|---------|
| FS_1 | 49.5 | 33 | 1.5 |
| FS_2 | 49.5 | 33 | 1.5 |
| FS_3 | 99 | 66 | 1.5 |
| FS_4 | 199 | 133 | 1.5 |
| FS_5 | 49.3 | 58 | 0.85 |

3.2 储能配置结果分析

3.2.1 数据预处理

1) 仿真分析

以 FS_3 风电场 1 号机组为例, 由于不同季节

对风速、温度影响很大, 选取某年 4 月、6 月和前一年 5 月的风速和温度数据对该机组某年 5 月份数据进行预测。由于黑启动的时间大约为 30~60 min, 因此本文截取这一时段的风电预测进行分析, 预测结果如图 5、图 6 所示。

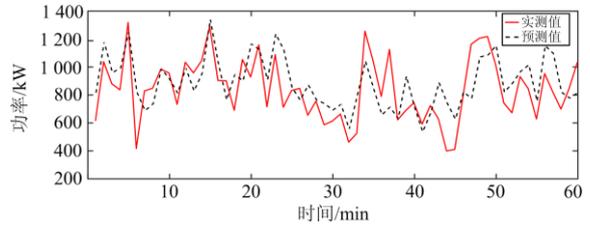


图 5 实测值与 SOFM-LSSVM 预测值分布图

Fig. 5 Distribution of measured values and predicted values of SOFM-LSSVM

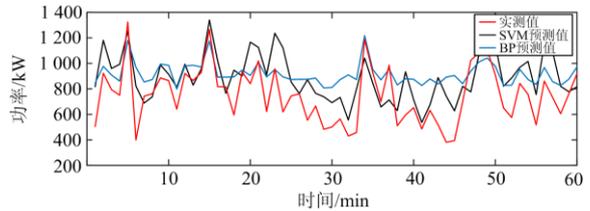


图 6 实测值与 SVM、BP 预测值分布图

Fig. 6 Distribution of measured values and SVM and BP predicted values

由图 5、图 6 可知, 三种模型的预测值和实测值的变化趋势一致, 均为有效预测。其中, 还应进行误差分析来决策出哪种模型的预测效果最好。

2) 误差分析

由表 2 可以看出, 在归一化平均绝对百分比误差 e_{NMAE} 和归一化均方根误差 e_{NRMSE} 这两个国际通用的误差指标上, SVM 的预测结果优于 BP 神经网络预测模型。而本文新提出的 SOFM-LSSVM 模型的总体效果要好于 BP 神经网络模型和传统 SVM 模型。

表 2 各预测模型主要误差指标

Table 2 Main error indexes of each prediction model

| 预测模型 | $e_{NMAE} / \%$ | $e_{NRMSE} / \%$ |
|------------|-----------------|------------------|
| BP | 11.88 | 14.43 |
| SVM | 8.02 | 9.82 |
| SOFM-LSSVM | 5.97 | 6.89 |

3.2.2 风电场的确定

根据各风电场 $V-P$ 曲线, 对黑启动时段内的风电数据进行预处理, 求得各风电场的黑启动最小风速、最小风速概率密度。如图 7 所示。

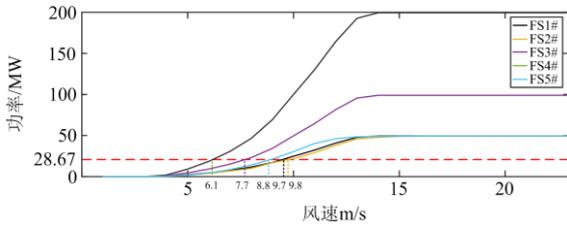


图 7 黑启动最小出力约束的各风电场 V-P 曲线
Fig. 7 V-P curves of each wind farm with black-start minimum power constraint

由图 7 可知, 虽然风电场 FS₁、FS₂ 的装机容量和机组台数均相同, 但由于所处地理位置等不同, 风电场 FS₁ 的黑启动最小风速要小于 FS₂, 黑启动能力更强; 对于风电场 FS₃、FS₄, 随着装机容量的增加, 黑启动最小风速减小, 黑启动能力增长。综述, 黑启动最小风速与风电场地理位置、装机容量等具有密不可分的关系。

根据以上求得各风电场对应的最小风速, 求得各风电场满足时间条件的黑启动最小风速概率分布如图 8 所示。

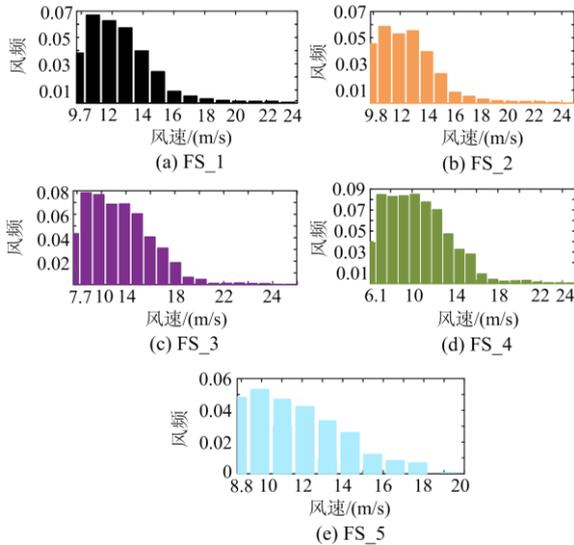


图 8 各风电场最小风速概率密度分布

Fig. 8 Probability density distribution of minimum wind speed of each wind farm

由图 8 可知, 包二区风资源丰富, 5 个风电场的风速概率密度在 9 m/s 左右处于最大值。但每个风电场的风速分布略有不同, 虽在同一厂区, 风资源情况仍不尽相同; 因此, 需评估区域的风电场, 选择最佳风电场参与黑启动。

根据式(4)一式(8)求得最佳风速概率倾度。假设权重 λ_1 、 λ_2 分别为 0.6、0.4, 求得各风电场黑启动评估指标如表 3 所示。

从表 3 中可以看出: 虽然风电场 FS₃、FS₄ 相较于其他区风电场容量大, 黑启动最小风速概率密度较大, 但风电利用率低, 若接入全部风电, 储能成本高昂。综合黑启动支持率和资源利用率, 根据总特性指标选择风电场 FS₁、FS₅ 组成的风电场群作为参与黑启动的风电场。

表 3 各风电场黑启动评估指标

Table 3 Evaluation indicators of black start of each wind farm

| 风电场编号 | 最小风速概率密度 | 最佳风速概率倾度 | 总指标特性 |
|-----------------|----------|----------|-------|
| FS ₁ | 0.34 | 0.93 | 0.58 |
| FS ₂ | 0.29 | 0.67 | 0.43 |
| FS ₃ | 0.56 | 0.35 | 0.46 |
| FS ₄ | 0.76 | 0.16 | 0.51 |
| FS ₅ | 0.19 | 0.91 | 0.52 |

相比于单个风电场, 风电场群 FS₁、FS₅ 风电利用率提高、参与黑启动的执行概率也更高。除此之外, 由于汇聚效应, 风电场群波动率相较于单个风电场降低, 有助于风电接入电网, 储能平抑出力压力降低。

3.2.3 储能容量和功率的确定

结合上文确定参与黑启动的风电场 FS₁、FS₅, 在黑启动辅机最小功率需求 28.67 MW 下, 计及 SOFM-LSSVM 风电功率预测, 确定配置在风电场侧储能容量为 18.67 MW/8.5 MWh。图 9、图 10 为黑启动 60 min 内的风速及风储出力曲线。

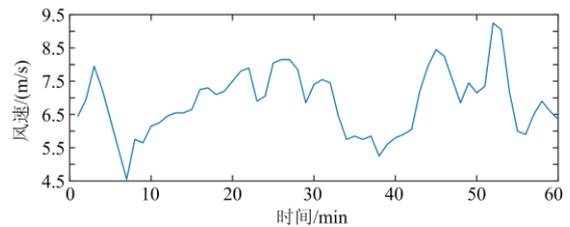


图 9 黑启动时段内风速变化图

Fig. 9 Wind speed variation during the black-start period

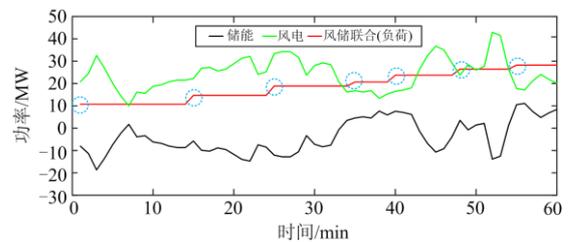


图 10 风电、储能及火电厂辅机输出功率

Fig. 10 Output power of wind power, energy storage and auxiliary power in thermal power plant

从图中可以看出, 本文所提配置策略可以满足黑启动时段内火电机组辅机功率需求。

4 结论

在黑启动最小功率约束下, 结合 SOFM-LSSVM 风电功率预测, 定义风电黑启动评估指标, 确定参与黑启动的风电场和储能电站。得出以下结论:

1) 相比于 SVM、BP, 本文提出的 SOFM-LSSVM 预测模型的预测精度较高, 仅有 5.97% 的误差, 具有一定的实用价值。

2) 受风资源情况和地理位置的影响, 同容量的风电场所对应的最小风速不尽相同。随着风电场容量的增加, 最小风速随之减小。

3) 基于风电黑启动最小风速, 由最小风速概率密度以及最佳风速概率倾度来制定双目标特征函数, 从数值、时间及资源有效利用三个方面对包二区风电场进行评估。确定包二区参与黑启动的风电场为 FS_1、FS_5, 当储能电站容量不小于 18.67 MW/8.5 MWh 时, 即可满足火电厂辅机供电需求。

参考文献

- [1] PATSAKIS G, RAJAN D, ARAVENA I, et al. Optimal black start allocation for power system restoration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6766-6776.
- [2] 刘玉田, 王洪涛, 叶华. 电力系统恢复理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [3] LENG Y J, LU Q, LIANG C Y. Black-start decision making based on collaborative filtering for power system restoration[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 100: 279-286.
- [4] GAPIK M, YILMAZ A O, CAVUSOGLU I. Hydropower for sustainable energy development in Turkey: the small hydropower case of the Eastern Black Sea Region[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(8): 6160-6172.
- [5] 吴涛, 郭嘉阳, 李华伟. 华北电网利用十三陵抽水蓄能电厂水电机组进行黑启动的试验研究[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 56-58.
WU Tao, GUO Jiayang, LI Huawei. Investigation of black station for North China power system by Shisanling hydroelectric generating sets[J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 56-58.
- [6] 王星宇, 张溪洋, 刘建国. 黑启动过程中的电压与频率校验[J]. 东北电力大学学报, 2016, 36(4): 12-18.
WANG Xingyu, ZHANG Xiyang, LIU Jianguo. Voltage and frequency calibration during black-start[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2016, 36 (4): 12-18.
- [7] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.
LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.
- [8] ZHANG Yao, YUAN Jiahai, ZHAO Changhong, et al. Can dispersed wind power take off in China: a technical & institutional economics analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 256.
- [9] 叶茂, 刘艳, 顾雪平, 等. 基于动态风电穿透功率极限的黑启动方案制定[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 744-752.
YE Mao, LIU Yan, GU Xueping, et al. Formulation of black-start scheme based on dynamic wind power penetration power limit[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 744-752.
- [10] LIU Weipeng, LIU Yutian. Hierarchical model predictive control of wind farm with energy storage system for frequency regulation during black-start[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 119.
- [11] LENG Xue, SHEN Li, HU Tian, et al. Black start research of the wind and storage system based on the dual master-slave control[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 121(5).
- [12] 刘畅, 卓建坤, 赵东明, 等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 1-18, 369.
LIU Chang, ZHUO Jiankun, ZHAO Dongming, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1-18, 369.
- [13] 李建林, 马会萌, 袁晓冬, 等. 规模化分布式储能的关键应用技术研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3365-3375.
LI Jianlin, MA Huimeng, YUAN Xiaodong, et al. Overview on key applied technologies of large-scale distributed energy storage[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3365-3375.
- [14] WANG Dajiang, GU Xueping, ZHOU Guangqi, et al. Decision-making optimization of power system extended black-start coordinating unit restoration with load restoration[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2017, 27(9).

- [15] 李建林, 牛萌, 王上行, 等. 江苏电网侧百兆瓦级电池储能电站运行与控制分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 28-38.
LI Jianlin, NIU Meng, WANG Shanghang, et al. Operation and control analysis of Hundred megawatts battery energy storage power station in Jiangsu grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 28-38.
- [16] JIANG Q, HONG H. Wavelet-based capacity configuration and coordinated control of hybrid energy storage system for smoothing out wind power fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 28(2): 1363-1372.
- [17] FENG L, ZHANG J N, LI G J, et al. Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation between wind and PV power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 86-94. DOI: 10.1186/s41601-016-0021-1.
- [18] 张峰, 梁军, 张利, 等. 考虑最佳期望输出与荷电状态的风电场储能容量优化方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 12-19.
ZHANG Feng, LIANG Jun, ZHANG Li, et al. Optimization of wind farm energy storage capacity considering optimal expected output and charged state[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 12-19.
- [19] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.
LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.
- [20] 栗然, 党磊, 周鸿鹄, 等. 基于费用效率法的风电场混合储能容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 55-62.
LI Ran, DANG Lei, ZHOU Honghu, et al. Capacity optimization disposition of hybrid energy storage in wind field based on cost efficiency method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 55-62.
- [21] 沈冠冶, 李琛, 徐冰亮, 等. 考虑风电并网系统的储能优化配置[J]. 东北电力大学学报, 2018, 38(4): 27-34.
SHEN Guanye, LI Chen, XU Bingliang, et al. Optimal allocation of energy storage considering wind power grid-connected system[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2018, 38(4): 27-34.
- [22] 杨磊, 杨晓辉, 吴越, 等. 基于改进猫群算法的分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 95-100.
YANG Lei, YANG Xiaohui, WU Yue, et al. Research on optimized distributed generations locating based on modified cat swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 95-100.
- [23] 杜鹏, 米增强, 贾雨龙, 等. 基于网损灵敏度方差的配电网分布式储能位置与容量优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 103-109.
DU Peng, MI Zengqiang, JIA Yulong, et al. Optimal placement and capacity of distributed energy storage in distribution system based on the sensitivity variance of network loss[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 103-109.
- [24] 李璞. 灵活互动的充电网络建设[J]. 新能源汽车供能技术, 2019, 3(1): 13-18.
LI Pu. Flexible and interactive charging network construction[J]. Energy Supply Techniques of New Energy Vehicles, 2019, 3(1): 13-18.

收稿日期: 2020-05-03; 修回日期: 2020-09-08

作者简介:

李翠萍(1982—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为风力发电运行分析与控制、大规模储能在新能源发电中的应用; E-mail: licuipingabc@163.com

张世宁(1995—), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事新能源参与黑启动方面的研究工作;

李军徽(1976—), 男, 博士, 教授, 研究方向为风力发电运行分析与控制、大规模储能在新能源发电中的应用。

(编辑 葛艳娜)