

文章编号:0254-0096(2019)05-1414-09

考虑最小舍弃风量的塔筒电梯供电优化调度

谢丽蓉¹, 范伟明¹, 晁 勤¹, 李永东², 李进卫³, 詹非凡⁴

(1. 新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830047; 2. 清华大学电机工程系, 北京 100084;
3. 中船重工海为(新疆)新能源有限公司, 乌鲁木齐 830002; 4. 江汉大学商学院, 武汉 430100)

摘 要: 针对目前风电场存在弃风严重与风电机组维护量巨大的问题, 该文提出在“弃风量+储能补偿电量=塔筒电梯消耗电量”的供电模式下, 构建基于最小舍弃风量的塔筒电梯供电优化调度经济模型。首先分析塔筒电梯供电模式, 建立塔筒电梯日耗电量模型; 其次构建包含储能成本、风电场内部购电成本、储能补偿火电排污和环境治理成本等相关指标的目标函数, 提出采用改进粒子群算法, 高效解决塔筒电梯供电优化调度问题; 最后以新疆达坂城某风电场对该优化调度模型验证, 通过算例验证该模型对塔筒电梯供电优化调度的可行性与有效性。

关键词: 风电消纳; 供电模式; 改进粒子群算法; 优化调度; 风电弃风

中图分类号: TK89; TM614 **文献标识码:** A

0 引 言

随着地球化石能源逐渐枯竭, 国内外普遍关注可再生能源的利用, 风电作为一种可再生能源其装机规模不断扩大^[1-3]。新疆风能资源丰富, 新疆风电场依据风资源区域优势, 其风电场装机容量逐渐增大, 在电力网架中的比例不断升高, 预计到 2020 年将形成 5 个百万 kW 级风电基地, 总装机规模达到千万 kW^[4]。因此, 对大型风电场的科学运行、降低能耗成本越来越受到高度的关注。

目前大型风电场运行与维护主要存在 2 个问题: 1) 弃风严重; 2) 风电场风电机组维护工作量巨大。针对上述 2 个突出问题, 若在风电场所有风电机组塔筒上安装电梯, 将弃风电量直接给风电机组塔筒电梯供电, 同时加装储能装置, 在弃风量大时存储电量, 在弃风量小或无弃风阶段, 由储能装置给塔筒电梯供电, 既解决了紧急状况下急需使用电梯检修问题, 又充分利用弃风量。而考虑最小舍弃风量的塔筒电梯供电优化调度是目前的一个难题。国内外学者对此研究较少, 文献[5]通过对电源调峰能力的分析, 提出评估弃风电量的方法; 文献[6]通过经验模态分解和马尔科夫链结合对

弃风电量进行预测; 文献[7]提出一种考虑风电机组运行健康度的风电场功率优化调度策略, 改善运行风电机组的整体健康程度, 优化机组的启停计划、提高风电场功率控制可靠性; 文献[8]采用基于模拟退火遗传算法的模糊 C-均值聚类算法建立机组优先级分类模型, 对风电场内的机组进行分类优化调度; 文献[9]提出一种动态调整学习因子的免疫粒子群算法, 以平抑功率波动和风-光-水联合发电系统达到经济效益最大化进行优化调度; 文献[10]以系统运行费用最小为目标建立机组检修计划优化模型; 文献[11]以检修成本和期望缺供电量最小为目标, 并提出一种基于小生境的改进多目标粒子群算法对其进行求解。综上可看出, 学者对优化调度模型有一定的研究, 但基于弃风电量的塔筒电梯供电优化调度鲜有研究。

本文提出在“弃风量+储能补偿电量=电梯消耗电量”的供电模式下, 以经济性最优为目标, 构建基于最小舍弃风量的塔筒电梯供电优化调度模型, 通过算例验证该模型对塔筒电梯供电优化调度的可行性与有效性, 可有效提高弃风消纳能力, 为风电消纳开辟一条新路径。

收稿日期: 2018-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(51667021); 国家国际科技合作专项(2013DFG61520); 新疆自治区重点创新项目(XJZDCX2017039)

通信作者: 谢丽蓉(1969—), 女, 硕士、教授, 主要从事控制系统优化、新能源发电方面的研究。wzywwwxr@163.com

1 塔筒电梯供电模式与塔筒电梯日耗电量模型

1.1 塔筒电梯供电模式

在“弃风量+储能补偿电量=电梯消耗电量”的供电模式下,以经济性最优为目标,构建基于最小舍弃风量的塔筒电梯供电优化调度经济模型,必须分析弃风电量、储能补偿电量与电梯消耗电量三者之间的关系,如图1所示。

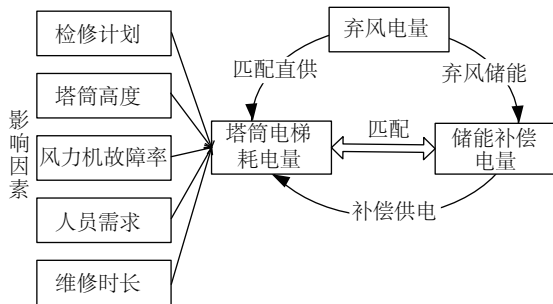


图1 塔筒电梯供电模式结构图

Fig. 1 Structure diagram of power supply mode of tower tube elevator

将弃风量与塔筒电梯运行耗电量进行对比,当弃风量与塔筒电梯所需电量匹配时,弃风电量全部用于塔筒电梯;弃风电量与负载所需电量不匹配时,若弃风电量大于负载所需电量,将弃风的一部分电量用于塔筒电梯供电,另一部分给储能装置充电;弃风电量小于负载所需电量,储能补充塔筒电梯用电;无弃风电量且储能供电量不足,放弃向负载供电。利用实时弃风电量、塔筒电梯实时消耗量和储能容量系统,动态调整实时维修计划。由于目前对于弃风量的预测大多是日前预测^[6],且塔筒电梯实时耗电量受实时的随机不确定性特征的影响,因此必须分析塔筒电梯日耗电量模型。

1.2 塔筒电梯日耗电量模型

塔筒电梯的实时耗电量与风电机组塔筒电梯运行次数及时长有直接的关系。在风电场风电机组检修维护时,根据风电场风电机组检修维护工作人员的基本需求、塔筒电梯高度和风电机组检修维护计划,兼顾实时的随机不确定性特征,确定电梯每次运行间隔时长阈值、电梯运行次数和电梯单次运行耗电量。电梯运行每日实时耗电量计算模型,如图2所示。

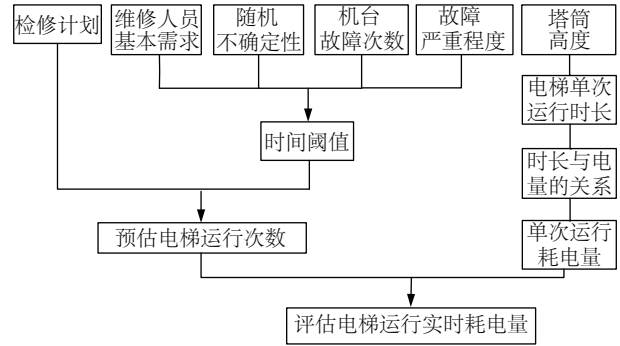


图2 电梯运行实时耗电量计算模型图

Fig. 2 Model diagram of real time power consumption calculation for elevator operation

由于塔筒电梯的运行包括加速、匀速和减速3个运行阶段,设塔筒电梯运行时加减速速度相同的情况下:电梯在加速段运行时(提升力 $F >$ 提升系统重力)电梯功率从零开始逐渐增大,电梯在匀速运行时(提升力 $F =$ 提升系统重力),电梯功率保持不变;电梯在减速运行时(提升力 $F <$ 提升系统重力),电梯功率逐渐减小至零。则塔筒电梯一次耗电量如式(1)所示:

$$W = \frac{K_t(Q + SWP) \cdot gH}{1000 \cdot \eta_d \cdot 3600 \cdot \eta} \quad (1)$$

式中, W ——电梯一次运行耗电量,kWh; K_t ——电梯辅助装置内部能耗系数; Q ——电梯载荷量,kg; SWP ——电梯自重,kg; g ——重力加速度,一般为 9.8 m/s^2 , H ——塔筒高度,m; η_d ——电动机效率; η ——电梯效率。

塔筒电梯的日耗电量由单次运行耗电量和次数决定。在风电场风电机组检修维护时,由于风电机组突发故障次数、严重程度与所在塔筒高度的多变复杂性和不确定性,每日检修维护时长将会发生变化,引起电梯运行次数也将随之而变。针对上述问题,以不确定性测度值为加权因子,根据风电场风电机组检修维护工作人员的基本需求、塔筒电梯高度和风电机组检修维护计划,计算电梯运行每日实时耗电量如式(2)所示:

$$W_{\text{sum}} = W_{\text{plan}} + (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)W \quad (2)$$

式中, W_{sum} ——塔筒电梯实时日耗电总量,kWh; W_{plan} ——按检修计划的塔筒电梯耗量,kWh; α_1 、 α_2 、 α_3 ——加权因子且为整数,由维修人员基本需求、风电机组故障和故障程度决定。

2 塔筒电梯供电优化调度模型

2.1 目标函数

在“弃风量+储能补偿电量=电梯消耗电量”的供电模式下,利用实时弃风电量、塔筒电梯实时消耗量和储能系统容量,动态调整实时维修计划,构建基于最小舍弃风量的塔筒电梯供电优化调度经济模型。目标函数包含储能成本、风电场内部购电成本、储能补偿火电排污和环境治理成本之和,考虑成本最小,即:

$$\min F = F_{ty} + F_{dw} - F_{hc} \quad (3)$$

式中, F_{ty} ——储能成本, 万¥; F_{dw} ——风电场内部购电成本, ¥; F_{hc} ——储能补偿火电排污和环境治理成本, ¥。

2.1.1 储能成本

本文以蓄电池为储能系统,主要包括投资成本和运营成本^[12]。

①投资成本:

$$F_{tz} = C_m \times C_{ap} \quad (4)$$

式中, F_{tz} ——储能系统投资成本, 万¥; C_m ——储能系统单位容量的造价, 万¥; C_{ap} ——储能总容量, MW。

②运营成本:

$$F_{yy} = K_1 \int_{t_1}^{t_2} P_{eni} \quad (5)$$

式中, F_{yy} ——储能运营成本, 万¥; K_1 ——储能运行成本折中系数; P_{eni} ——在电梯运行时刻的储能有功输出功率; t_1 、 t_2 ——储能系统工作时刻。

2.1.2 风电场内部购电成本

当无弃风量或储能装置放电至最低保护电量时,此时的塔筒电梯仍需运行就必须向风电场内部购电,所以风电场内部购电成本为:

$$F_{dw} = c_{dw} W_{dw} \quad (6)$$

式中, c_{dw} ——风电场内部购电单价, ¥; W_{dw} ——购电量, kWh。

2.1.3 储能补偿火电排污成本和环境治理成本

储能补偿火电排污成本和环境治理成本包括:

1) 火电排污成本为^[12]:

$$F_{ep} = c_{ep} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_i(P_j) P_{ij} \quad (7)$$

式中, c_{ep} ——火电排污成本折算单价, 万¥/MW; n ——火电机组总数量; m ——参与发电的火电机组数量; P_{ij} ——第 i 台火电机组在 j 时刻的出力, MW; $W_i(P_j)$ ——第 i 台火电机组在 j 时刻的单位出力排污量, t/MW。

2) 环境治理成本为^[12]:

$$F_{pl} = c_{pl} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_i(P_j) P_{ij} \quad (8)$$

式中, c_{pl} ——火电单位治污成本, 万¥/t。

综上, 储能补偿火电排污和环境治理成本为:

$$F_{hc} = F_{ep} + F_{pl} \quad (9)$$

2.2 主要约束条件

检修连续性约束, 指机组检修必须在一个给定的连续时段内完成, 即:

$$\begin{cases} x_{it} = 1, s_i \leq t \leq s_i + d_i \\ x_{it} = 0, t < s_i \text{ 或 } t > s_i + d_i \end{cases} \quad (10)$$

检修开始时间约束:

$$t_{is}^* \leq t_{i0}^* \leq t_{ie}^* \quad (11)$$

储能放电功率约束:

$$0 \leq P_{b,t} \leq P_{b,max} \quad (12)$$

储能剩余容量约束:

$$\begin{cases} \beta_1 C_{bN} \leq C_s(t) \leq \beta_2 C_{bN} \\ \beta_1 < 1 \\ 0 < \beta_2 \end{cases} \quad (13)$$

式中: t_{is}^* ——第 i 风电机组可检修的最早时间; t_{ie}^* ——第 i 个机组可检修的最迟时间; t_{i0}^* ——第 i 个机组检修时间段; d_i ——第 i 个机组检修周期; $P_{b,t}$ ——储能在 t 时刻的放电功率; $P_{b,max}$ ——储能放电功率; $C_s(t)$ ——储能 t 时刻的剩余容量; C_{bN} ——储能额定容量; β_1 、 β_2 ——储能过放和过充的保护系数。

3 粒子群算法及其改进

3.1 粒子群算法基本原理

粒子群算法(PSO)的基本原理是将一群无质量无体积的粒子进行初始化且在一定区域内运动, 将待求解问题的每个解看成 1 个粒子, 用适应度函数来衡量粒子的优劣, 且所有粒子始终跟随当前最优粒子, 在可行解区域内按一定的速度和方向运动, 迭代多次后得到该问题的最优解^[13]。

$$v_i^{d+1} = \omega v_i^d + c_1 f_{\text{rand}}(p_{\text{best},i}^d - x_i^d) + c_2 f_{\text{rand}}(p_{\text{best},i}^d - x_i^d) \quad (14)$$

$$x_i^{d+1} = x_i^d + \delta v_i^{d+1} \quad (15)$$

式中, i ——粒子数量; d ——次数; $p_{\text{best},i}^d, g_{\text{best},i}^d$ ——第 i 个粒子在第 d 次迭代中的个体最优与全局最优; v_i^d, x_i^d ——第 i 个粒子在第 d 次迭代中的速度和位置; ω, c_1, c_2 ——在速度更新过程中的权重系数; f_{rand} ——(0,1)的随机数; δ ——约束因子, 通常设置为 1, 其中粒子群按式(15)更新。由于粒子具有一定的惯性速度, 且总是跟随最好粒子位置。当参数选择不当, 算法速率较低且粒子只能搜索一定的区域, 不能搜索整个可行解空间, 无法达到全局最优。

3.2 改进算法

3.2.1 速度的定义

为解决上述问题, 速度重新定义为粒子 x 中 0 元素与 1 元素的互换。

当 $x_p = 0, x_q = 1$, 为交换这 2 个粒子 x 中的元素 0 与 1, 则速度 v 需定义为: $v_p = 1, v_q = -1$ 。通过式(16)可实现粒子 x 中的 0 与 1 的互换, 且不会改变粒子 x 中 0、1 元素的数量。其中元素互换如图 3 所示。

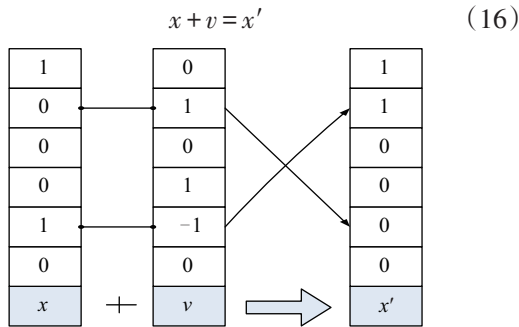


Fig. 3 Exchange of elements

假设速度 v 中含有 Q 个 1 和 Q 个 -1, 其余元素全为 0, 常数 $c > 0$ 。因此重新定义常数 c 与速度 v 相乘的规则:

①速度 v 中 0 元素不变;

②随机选择速度 v 中 $\min\{Q, \text{int}(c \times Q)\}$ 个元素 1 与 -1 不变, 其余的 1 和 -1 元素全变为 0。

3.2.2 速度与位置的更新

设最大迭代次数为 M , 则第 i 个粒子在第 j 次迭代时速度与位置的更新公式为:

$$v_i = \left[w_{\min} + (w_{\max} - w_{\min}) \frac{j}{M} \right] \times r \times (p_g - x_i) \quad (17)$$

$$x_i = x_i + v_i \quad (18)$$

式中, w_{\min}, w_{\max} ——最小惯性系数与最大惯性系数, 其中 $0 < w_{\min} < w_{\max} < 1$; r ——(0,1)的随机数; p_g ——全局最优解^[12]。

为确保粒子能够在大范围搜索可行解, 并有效提高算法的收敛速度, 当有 $x_i = p_g$ 时, v_i 就变为满足 x_i 交换规则的任意值^[14]。

3.3 算法实现步骤

以式(3)目标函数为粒子的适应度值, 改进粒子群算法流程如图 4 所示。

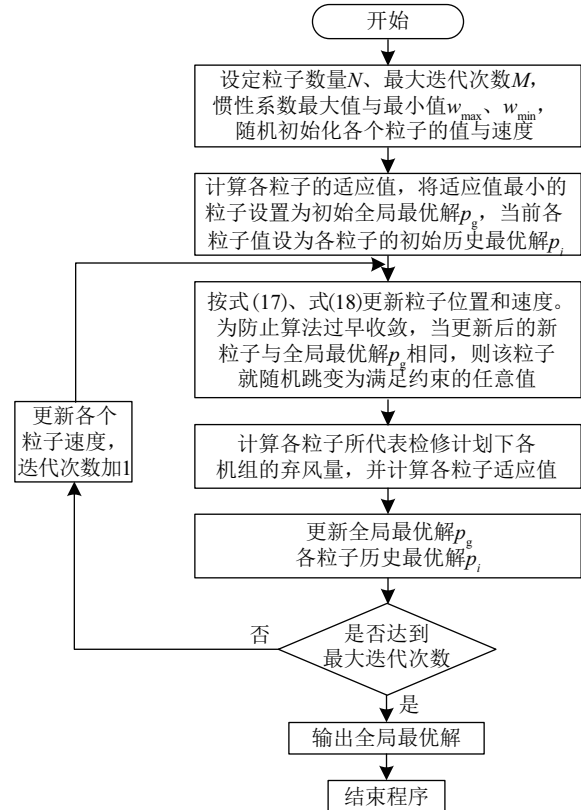


图 4 算法流程图

Fig. 4 Algorithm flow chart

4 算例研究

本文以新疆达坂城某风电场为例, 该风电场有 25 台 2 MW 的风电机组, 考虑某日 24 个时段的机组检修计划。在“弃风量+储能补偿电量=电梯消耗电量”的供电模式下, 以经济性最优为目标, 研究基

于最小舍弃风量的塔筒电梯供电优化调度,必须要明确弃风电量、储能补偿电量与电梯消耗电量三者之间的关系。为便于计算验证,统一以提升阶段能耗作为塔筒电梯一次运行能耗,并以此计算整个风电场塔筒电梯运行总能耗。以该风电场为例, $H = 80 \text{ m}$, 根据式(1)计算得该风电场塔筒电梯一次耗电量 $W = 0.175 \text{ kWh}$ 。

在以舍弃风电量最小、经济性最优为目标的模型下,根据对历史弃风数据和塔筒电梯消耗功率的对比分析,可看出:塔筒电梯的耗电量较低,塔筒电梯的耗电功率远远小于弃风功率。因此,该风电场在大部分时刻产生的弃风电量能满足塔筒电梯运行所需电量。只有无弃风时,也是电场因为风速太小等原因输出功率为零时,才会出现弃风功率低于电梯消耗功率的情况。

弃风为塔筒电梯供电存在较大不确定性,需配置一定的储能装置用来在无弃风时为塔筒电梯供电,从而满足塔筒电梯运行可靠性的要求。在进行储能系统的优化配置时,需根据实际情况进行合理的规划,寻找储能经济性最优容量。图 5 为电梯消耗功率和需配置储能部分电梯消耗功率的对比图。由于储能成本较高,而本文的研究是基于日前调度的,因此只需配置满足塔筒电梯一日所需电量即可。现在将电梯消耗功率减去弃风功率,大于零的部分即为弃风电量不足需要配置储能的地方。

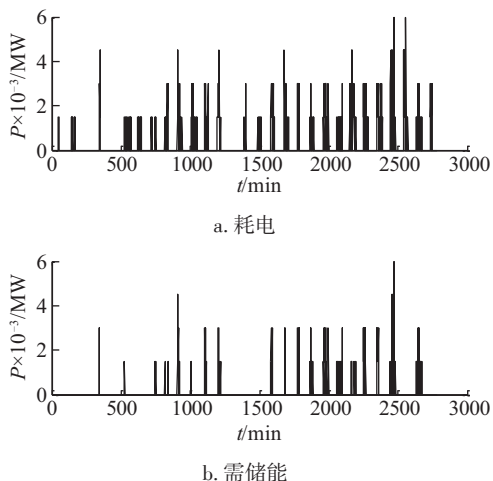


图 5 电梯耗电曲线及电梯需储能曲线

Fig. 5 Elevator energy consumption curve and elevator demand energy storage curve

图 5 中的 a 曲线图代表的是电梯耗电量曲线, b 曲线图是 a 曲线电梯耗电量曲线减去弃风曲线所得结果的正数部分,为需要配置储能部分电梯消耗功率。由图 5 可知, b 曲线和 a 曲线有部分重合,这部分是因为弃风为零需要配置储能的地方。其中储能容量和功率最大不超过数据记录中的最大值,功率最小值不低于数据记录的众数值。

由于式(2)中存在不确定加权因子,而这些加权因子与检修维护工作人员的基本需求、随机不确定性特征、风电机组突发故障次数以及严重程度有关。因此可根据专家调查法确定加权因子的值。采用专家调查法评估风电机组检修时长及塔筒电梯上下次数有以下特点:

- 1) 工作人员检修过程中遇就餐时间仍未完成检修任务,需先统一就餐后继续检修;
- 2) 风电机组一般巡检时长在 3 h 以内,且一般不经过就餐时间;
- 3) 大故障检修时长视当时情况而定,考虑检修人员生理原因,因此 3~6 h 检修时长统一在 3 h 以内上升次数上增加 2 次, 3~6 h 增加 4 次, 6~9 h 增加 6 次, 9 h 以上增加 8 次数。

综合考虑各种原因及专家经验描述,设定检修时长与上升次数关系如表 1 所示。

表 1 检修时长与上升次数对应表

Table 1 Maintenance time and rise times of correspondence table

时长/h	≤3	3~6	6~9	≥9
上升次数/次	4	6	8	10

而对于风电机组的强迫停运率 R 可由式(20)计算^[15]:

$$R = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{t_{\text{MTTR}}}{t_{\text{MTTR}} + t_{\text{MTTF}}} \quad (19)$$

式中, λ 、 μ ——失效率和修复率; t_{MTTF} 、 t_{MTTR} ——平均无故障运行时间和平均修复时间。

由式(19)可得风电机组的强迫停运率如表 2 所示(其中 1#与 23#故障停机,故不列)。由表 2 可知风电机组的强迫停运率较小,可考虑不计。

表2 机组数据

Table 2 Data of generators

机组编号	强迫停运率/%	机组编号	强迫停运率/%	机组编号	强迫停运率/%	机组编号	强迫停运率/%
2#	08	8#	1.2	14#	1.1	20#	0.3
3#	0.2	9#	0.9	15#	1.5	21#	0.2
4#	0.5	10#	0.6	16#	1.8	22#	2.1
5#	0.8	11#	0.5	17#	2.9	24#	1.3
6#	0.7	12#	0.6	18#	0.6	25#	2.3
7#	1.1	13#	1.0	19#	0.9	—	—

根据前文对塔筒电梯耗电量的评估以及储能配置的分析,取 $T_h=24\text{ h}$, T_h 为检修时长。设粒子数为30,最大迭代次数为200次, $w_{\max}=0.9, w_{\min}=0.4$, $c_1=c_2=2$ 。根据上文的分析,该日 $\alpha_1=2$, $\alpha_2=2$, $\alpha_3=4$,且各参数如表3所示。

表3 参数选取

Table 3 Parameter selection

参数	数值
最大放电功率 $P_{b,\max}/\text{MW}$	0.003
风电装机容量 P_m/MW	50.000
单位储能容量价格 $C_m/\text{万}\text{¥}$	0.250
单位储能功率价格 $C_p/\text{万}\text{¥}$	0.300
防止储能过放保护系数 β_1	0.150
防止储能过充保护系数 β_2	0.850
风电场内部购电电价 $c_{dw}/\text{¥}$	0.030
储能运营成本的折中系数 K_l	1.125

由于该塔筒电梯的供电模式与弃风电量、储能补偿电量有关,而弃风电量的预测可通过对风电场历史功率数据和风电机组功率数据的分析,将两组数据之差作为弃风电量时间序列,然后将这些序列以经验模态分解进行信号处理,再结合马尔科夫链对每个分量进行预测^[6]。该风电场在某日检修为4#、8#、10#与21#,日常维护3#、5#与6#台,风电机组组切入风速3 m/s,额定风速10.9 m/s,切出风速25 m/s。该风电场的弃风电量预测如图6所示。

在基于某日的日前调度,配置满足塔筒电梯一日所需电量,其储能系统优化结果如表4所示,表5为按计划检修与考虑最小舍弃风量小的日检修计划的优化对比结果。图7为粒子群算法与改进粒群算法的对比,图8为2种方案的寻优曲线。分析结果可发现考虑最小舍弃风量的检修比按计划

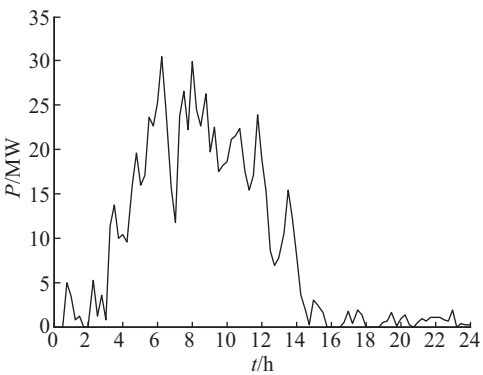


图6 新疆风电场某日的弃风电量预测

Fig. 6 Prediction of abandoned wind power of a Xinjiang wind farm a day

表4 储能系统优化结果

Table 4 Optimization results of energy storage system

容量/MWh	功率/MW	储能成本/¥
0.58	0.43	1528.65

表5 2种方案优化结果比较

Table 5 Comparison of optimization results of two schemes

机组编号	2种方案下的各机组检修时段	
	按计划检修	考虑最小舍弃风量的检修
3#	10~12	10~12
4#	11~19	11~19
5#	12~14	13~15
6#	15~18	12~15
8#	11~19	11~19
10#	15~18	10~13
21#	12~16	14~18
日经济性/¥	8.47	4.78
季经济性/¥	782.56	382.37

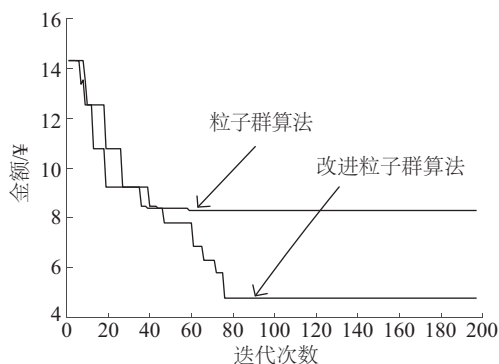


图7 粒子群算法与改进粒子群算法的对比

Fig. 7 Comparison of PSO and improved PSO

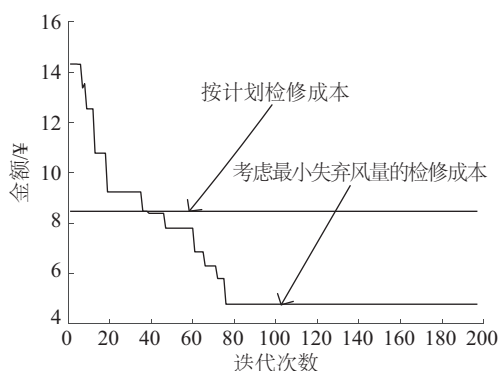


图8 寻优曲线

Fig. 8 Optimization curve

检修的经济性更好,验证了在“弃风量+储能补偿电量=电梯消耗电量”的供电模式下基于最小失弃风量的塔筒电梯供电优化调度模型的可行性,为弃风消纳开辟一条新路径。并且本文所提算法得出的风电机组检修时段几乎安排在弃风电量充足的时段,这也十分符合充分利用风能,合理安排风电机组检修的规律,验证了算法的合理性。

5 结 论

本文在“弃风量+储能补偿电量=塔筒电梯消耗电量”的塔筒电梯供电模式下,以经济性最优为目标,构建基于最小失弃风量的塔筒电梯供电优化调度模型。为了高效解决塔筒电梯供电优化调度问题,提出了改进粒子群算法,通过定义新速度与新速度的更新方法,能有效提高粒子群算法的计算效率。同时通过算例验证该模型对塔筒电梯供电优化调度的可行性与有效性。由于选取风电场的装机容量较小,储能的经济效益不是非常明显,多余能量也可用于平抑波动、修正预测误差、参与系统

调频等方面。

[参考文献]

- [1] 汪 锋, 豆南南, 喻冬梅. 基于电力系统碳排放流的分省化石能源消费 CO₂ 排放量测算[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 105—112.
- [1] Wang Feng, Dou Nannan, Yu Dongmei. Power system based on carbon emission flow provincial fossil CO₂ emissions from energy consumption calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 105—112.
- [2] 韩 芳. 我国可再生能源发展现状和前景展望[J]. 可再生能源, 2010, 28(4): 137—140.
- [2] Han Fang. Development status and prospect of renewable energy in China[J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(4): 137—140.
- [3] 马艺玮, 杨 苹, 郭红霞, 等. 风-光-沼可再生能源分布式发电系统电源规划[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 9—14.
- [3] Ma Yiwei, Yang Ping, Guo Hongxia, et al. Wind-light-biogas renewable distributed generation power system planning[J]. Power System Technology, 2012, 36(09): 9—14.
- [4] 蔺 红, 孙立成, 常喜强. 新疆风电出力波动特性的概率建模[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1616—1620.
- [4] Lin Hong, Sun Licheng, Chang Xiqiang. Xinjiang wind power output fluctuation characteristics of the probability model[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1616—1620.
- [5] 吕 泉, 王 伟, 韩 水, 等. 基于调峰能力分析的电网弃风情况评估方法[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1887—1894.
- [5] Lyu Quan, Wang Wei, Han Shui, et al. Based on the analysis of peak capacity analysis of power grid discarding wind condition[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1887—1894.
- [6] 高 磊, 谢丽蓉, 晁 勤, 等. 基于经验模态分解和马尔科夫链的弃风电量[J]. 可再生能源, 2017, 35(7): 1081—1087.
- [6] Gao Lei, Xie Lirong, Chao Qin, et al. A hybrid model for wind farm abandoned wind power forecasting based on empirical mode decomposition and Markov[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(7): 1081—1087.
- [7] 王昆朋. 风电场功率控制与优化调度研究[D]. 北京:

- 华北电力大学, 2014.
- [7] Wang Kunpeng. Power control and optimal dispatch of wind farms[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [8] 张晋华, 黄 慧, 刘永前, 等. 基于风力发电机组分类的风电场内优化调度[J]. 太阳能学报, 2016, 37(7): 1711—1718.
- [8] Zhang Jinhua, Huang Hui, Liu Yongqian, et al. Optimal dispatch in wind farm based on unit classification[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2016, 37(7): 1711—1718.
- [9] 罗 毅, 张若含. 风-光-水联合发电系统优化调度研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(10): 2492—2498.
- [9] Luo Yi, Zhang Ruohan. Research of scheduling of hybrid PV and wind power system [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2015, 36(10): 2492—2498.
- [10] 院晓涛, 姚建刚, 陈 亮. 基于改进蚁群算法的发电机组检修计划优化[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 42—46.
- [10] Yuan Xiaotao, Yao Jiangang, Chen Liang. Based on improved ant colony algorithm for generating unit maintenance plan optimization [J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 42—46.
- [11] 刘文颖, 谢 昶, 文 晶, 等. 基于小生境多目标粒子群算法的输电网检修计划优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 141—148, 19.
- [11] Liu Wenying, Xie Chang, Wen Jing, et al. Optimization of transmission network maintenance scheduling based on niche multi-objective particle swarm optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 141—148, 19.
- [12] 殷志敏, 晁 勤, 王纯琦, 等. 基于风储经济调度的储能容量优化配置[J]. 可再生能源, 2016, 34(1): 64—71.
- [12] Yin Zhimin, Chao Qin, Wang Chunqi, et al. Optimal allocation of energy storage capacity based on wind storage economic dispatch[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(1): 64—71.
- [13] 卢锦玲, 苗雨阳, 张成相, 等. 基于改进多目标粒子群算法的含风电场电力系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 25—31.
- [13] Lu Jinling, Miao Yuyang, Zhang Chengxiang, et al. Optimal dispatching of power system with wind farms based on improved multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 25—31.
- [14] 王海彪, 郭瑞鹏, 姜忠民, 等. 考虑大规模风电接入的发电机组检修计划最小负荷期望模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 26—32.
- [14] Wang Haibiao, Guo Ruipeng, Jiang Zhongmin, et al. Minimum load loss expectation model for generator maintenance scheduling considering large scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 26—32.
- [15] 陈 凡, 卫志农, 张小莲, 等. 计入风速与风电机组故障相关性的风电场可靠性建模及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 2900—2908.
- [15] Chen Fan, Wei Zhinong, Zhang Xiaolian, et al. The reliability modeling and application of wind power field based on wind speed and wind turbine fault correlation [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2900—2908.

OPTIMAL DISPATCHING OF TOWER ELEVATOR POWER SUPPLY CONSIDERING MINIMUM LOSS OF WIND POWER CURTAILMENT

Xie Lirong¹, Fan Weiming¹, Chao Qin¹, Li Yongdong², Li Jinwei³, Zhan Feifan⁴

(1. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. CSIC of Haiwei (Xinjiang) New Energy Co., Ltd., Urumqi 830002, China;

4. College of Business, Jiangnan University, Wuhan 830100, China)

Abstract: To solve the issues of wind power curtailment and wind turbine maintenance, the economic dispatch model of tower elevator power supply optimization dispatch based on minimum wind power curtailment is constructed under the power supply mode of “wind power curtailment+energy storage compensation power=tower elevator energy consumption”. Firstly, a power supply mode of the tower elevator is analyzed and a daily power consumption model of the tower elevator are establish, Secondly, the objective function including the energy storage cost, the internal electricity purchase cost of the wind farm, the energy storage compensation for thermal power discharge and the environmental governance cost are constructed, the improved particle swarm optimization algorithm (IPSO) is proposed to solve the issues of optimal of tower elevator power supply. Finally, a wind farm in Dabancheng, Xinjiang, is used to verify the optimal dispatch model, and a case study shows that the feasibility and effectiveness of the model for optimal dispatch of tower elevator power supply is verify

Keywords: wind power accommodation; power supply mode; improved particle swarm optimization algorithm; optimal dispatch; wind power curtailment