

DOI: 10.7667/PSPC160209

储能电池平抑风功率波动策略

章竹耀, 郭晓丽, 张新松, 吴大明

(南通大学电气工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要: 为了平抑风功率波动, 并优化风电场出力特性, 基于双电池组拓扑结构的电池储能系统(Battery Energy Storage System, BESS)提出了在短期内平抑风功率波动的新型控制策略。该策略基于即时控制策略, 把未来风功率波动对当前储能电池充放电行为的影响纳入考虑范围。双 BESS 则根据策略需求进行充电或放电, 任一电池组电量达到满充或满放, 则两组电池的工作状态同时切换。在新型控制策略中通过风电预测并结合滚动优化法实现双 BESS 动态控制。实践表明该策略在风电出力特性上不仅取得了较好的平抑效果, 而且能降低因储能容量不足引起的瞬时大功率波动。在电池特性上, 由于采用双 BESS, 很大程度上降低了电池充放电次数, 延长了电池寿命。**关键词:** 风力发电; 风功率波动; 电池储能系统; 新型控制策略; 风电预测

Strategy of smoothing wind power fluctuation based on storage battery

ZHANG Zhuyao, GUO Xiaoli, ZHANG Xinsong, WU Daming

(School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: On the basis of double battery energy storage systems (BESSs), a new control strategy is proposed to smooth fluctuating components of wind power and improve output characteristics of wind farm. It is based on the current control strategy and the effect of wind power fluctuations in future which can affect the charge and discharge behavior of BESS what can be taken into account. Double BESSs charge or discharge according to policy requirements, once any BESS arrives at its state of full charging or discharging, two BESSs switch their states immediately. The new control strategy reaches to dynamic control with wind forecast and rolling optimization. Practice shows that the new control strategy not only achieves good stabilizing effect in wind power output characteristics but also reduces instant power fluctuations because of insufficient storage capacity. It can reduce battery charge and discharge times and extend battery life because of using double BESSs.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407097), The 12th Fund Project of Jiangsu "Six Talents Summits" Plan (No. 2015-ZNDW-009), and Natural Science Foundation of Jiangsu Universities (No. 16KJB470014).

Key words: wind power generation; wind power fluctuation; battery energy storage system; new control strategy; wind power forecast

0 引言

近年来, 风电在全球迅速发展。截至 2015 年底, 全球风电累积装机容量 432 GW, 当年新增装机容量 63 GW。其中, 我国累积风电装机容量 145 GW, 当年新增装机容量 30 GW, 两者均居世界第一。然而, 随着风电在电网中的渗透率不断增加, 风功率的随机波动特性对电网调度、运行的负面影响日益

显著, 甚至有可能制约电网对风电的消纳^[1]。因此, 有必要采取技术措施改善风功率的随机波动特性。

近年来, 电池储能技术的快速发展为彻底解决风电功率的随机波动提供了一种全新的技术选择。目前, 采用 BESS 平抑风功率的随机波动成为电气工程领域的研究热点之一。文献[2]在运用小波包分解光伏波动频率的基础上, 提出了基于 2 组电池组拓扑结构的电池储能系统在线运行策略, 该策略由于采用双 BESS, 很大程度上减少了 BESS 的充放电次数, 节约了储能投资成本。文献[3]提出了由两种控制算法组合的新型控制策略, 该策略能最大限度控制 BESS 的 SOC 在限定区域内, 从而不仅拥有

基金项目: 国家自然科学基金项目(51407097); 江苏省“六大人才高峰”计划第 12 批资助项目(2015-ZNDW-009); 江苏省高校自然科学基金(16KJB470014)

较好的风功率波动平抑效果, 还能提高 BESS 的利用效率。文献[4]提出以储能荷电状态为约束条件的控制策略来平抑风功率波动。该方案的新颖之处在于储能电池的荷电状态始终在 50% 上下波动, 备用容量充足。文献[5]提出风电输出功率平滑度判断标准, 综合考虑储能技术性和经济性, 并用遗传算法求储能系统成本特性模型的最优解。文献[6]基于对伪时序状态转移抽样法的时序信息进行改进, 即讨论了新的算法在提高系统短期可靠性上效果更为显著。

然而, 上述文献提出的 BESS 运行策略均仅从实时时间角度考虑 BESS 充、放电功率, 而未考虑未来功率波动的影响。实际上, BESS 运行具有时序耦合特性, 也就是说, BESS 当前在线运行策略不仅影响当前系统出力, 而且对未来功率波动的平抑效果也会产生影响。文献[7]采用电池和电容的混合储能, 并提出了新的控制算法来减少储能电池的充放电次数。即便如此, 较单一电池组一天的充放电次数而言仅减少了 20 多次, 并没有很大程度上提高储能电池的使用寿命。

鉴于此, 本文基于双 BESS 拓扑结构的风储混合电站, 提出了在短期内平抑风功率波动的新型控制策略, 从而更有效地提高了风功率波动的平抑效果, 改善了风电出力的波动特性, 提升了风电并网效益。根据在风功率超短期预测系统提供的信息, 新型控制策略在综合考虑未来风功率波动的基础上确定当前时刻的储能充、放电功率。从而使风储联合输出功率波动更为平缓, 即便某一时刻风电出现大功率波动也能较好地平抑。通过算例分析以验证本文所提方案的有效性。

1 风储混合系统

在风电场侧配置两组同容量的储能电池, 通过变流器接入并网连接点, 构成风储联合系统, 其系统结构见图 1。

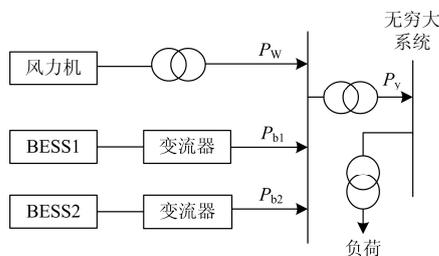


图 1 风储混合系统结构

Fig. 1 Schematic diagram of BESS-integrated wind farms

图 1 中, P_w 为风电场出力; P_{b1} 为 BESS1 的充

放电功率; P_{b2} 为 BESS2 的充放电功率; P_y 为风储联合输出功率。其中:

$$P_y = P_w + P_{b1} + P_{b2} \quad (1)$$

P_{b1} 与 P_{b2} 取值为正表示 BESS 处于放电状态, 取值为负表示 BESS 处于充电状态。通过制定 BESS 运行策略, 使之与风电场协调运行出力, 将 P_y 控制在一定的波动范围内, 尽量减小风功率随机波动对电网的不利影响。

2 BESS 与风电协同运行策略

本文以改善风功率短期波动为研究对象。为了充分发挥储能效益并延长储能电池的使用寿命, 采用双电池组拓扑结构。实际中, 平抑效果并不要求为一条平稳的直线, 只要求风功率波动满足并网要求即可。

为了定量说明所列方案对风功率波动的平抑效果, 本文列出了两个评价指标: 风储联合电站输出功率波动越限幅值总和 ΔW 和波动越限概率 P_D 。 ΔW 和 P_D 越小表明波动平抑效果越好。

2.1 相关参数定义及说明

1) 预测周期 T_0 [8-9]。根据当前风电研究成果, 风电预测都有一定的误差, 假设在预测周期 T_0 内, 近似认为风电出力的预测精度是一个定值, 并且在某一预测精度下, 风电出力要保持在一定的范围内。

2) 功率波动 ΔP 。风电任意 t 时刻功率与 $t-\Delta t$ 时刻功率之差表示为

$$\Delta P_y(t) = P_y(t) - P_y(t - \Delta t) \quad (2)$$

式中: t 是系统运行时任意时刻; $P_y(t)$ 为 t 时刻风储联合出力。

3) 允许波动率 D_1 。是指风电功率波动允许并网的上下限。即通过 BESS 平滑风功率波动, 尽量将风功率波动控制在允许的范围之内。表达式为

$$|P_y(t) - P_y(t - \Delta t)| \leq D_1 \quad (3)$$

系统规模不同, 其能接受的风功率允许波动范围也不同。因此, 允许波动率应根据具体的系统来确定。

4) 波动越限幅值总和 ΔW 。任意相邻时刻在整个运行周期 T 内功率波动超过允许波动率的差值之和。表达式为

$$\Delta W = \sum_{k=0}^{\frac{T}{\Delta t}-1} f(|\Delta P_y(t+k\Delta t)| - D_1) \quad (4)$$

$$f(a) = \begin{cases} a & a > 0 \\ 0 & a \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

5) 波动越限概率 P_D 。运行周期 T 内任意相邻的

时刻功率波动超过允许波动率的时间占总时间的比例。表达式为

$$P_D = \frac{\sum_{k=0}^{\frac{T}{\Delta t}-1} S(|\Delta P_y(t+k\Delta t)| - D_t)}{\frac{T}{\Delta t}} \quad (6)$$

$$S(a) = \begin{cases} 1 & a > 0 \\ 0 & a \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

2.2 双 BESS 运行策略

2.2.1 即时控制策略

即时控制策略即储能电池充放电状态只受当前风功率波动的影响。BESS 出力受其额定容量及功率的限制, 约束条件为^[10]

$$E_B(t) = E_B(t - \Delta t) - P_B(t) \frac{\Delta t}{\eta} \quad (8)$$

$$S_{oc}(t) = \frac{E_B(t)}{E_m} \quad (9)$$

$$-P_m \leq P_B(t) \leq P_m \quad (10)$$

$$0.2 \leq S_{oc}(t) \leq 1 \quad (11)$$

式中: $E_B(t)$ 为 t 时刻储能电池剩余电量; E_m 为储能电池额定容量; P_m 为储能电池额定功率; $P_B(t)$ 为 t 时刻储能电池出力, 其值为正表示放电, 反之则为充电; η 为充放电效率; $S_{oc}(t)$ 为储能电池 t 时刻荷电状态。由于储能电池使用寿命与最大放电深度有关, 因此, 本文 SOC 最低标准为额定容量的 20%。

在满足自身约束条件下, 当风功率波动超过允许波动率 D_t 时, BESS 根据其运行状况进行充放电, 否则状态与上一时刻保持不变。BESS 的控制策略为^[11-12]

$$BESS(\text{状态}) = \begin{cases} \text{不变} & |\Delta P_w(t)| \leq D_t \\ \text{充电} & \Delta P_w(t) > D_t \\ \text{放电} & \Delta P_w(t) < -D_t \end{cases} \quad (12)$$

该策略的不足表现为, 由于受到自身 SOC 限制, 储能容量不能得到充分发挥。因为 BESS 某时刻的 SOC 是自风电场投入使用后, 前面所有时刻所累积的结果。BESS 当前出力不仅受到当前 SOC 的影响, 还将累积到 SOC 上, 从而影响下一时刻 BESS 的出力。假设某时刻 BESS 的 SOC 为 $0.2E_m$ 或 E_m , 若是单一 BESS, 那么此刻的风功率波动 BESS 将不能平抑。若是双 BESS 则会通过切换状态进行平抑。然而, 若某时刻 BESS 的 SOC 为 $0.3E_m$ 或 $0.9E_m$, 而此刻的风功率波动的绝对值 $> 0.1E_m$, 那么不管是单一 BESS 还是双 BESS 都将不能完全平抑风功率

波动。倘若在之前波动不越限时刻, 在满足自身的约束条件下, BESS 能够继续充放一部分电能, 那么就能满足下一时刻因 SOC 限制不能平抑波动的需求, 继而也就减少了波动越限幅值总和及波动越限概率。因此, 本文提出了基于即时控制策略的新型控制策略。

2.2.2 新型控制策略

新型控制策略既考虑了 BESS 充电和放电的历史叠加结果以及当前时刻的风功率波动, 又考虑了预测周期 T_0 内的波动对当前 BESS 充放电行为的影响。下面将具体讨论新型控制策略下 BESS 的充放电准则。

由式(1)和式(2)可知:

$$\Delta P_y(t) = P_y(t) - P_y(t - \Delta t) = P_w(t) + P_{b1}(t) + P_{b2}(t) - P_y(t - \Delta t) = \quad (13)$$

$$P_w(t) - P_y(t - \Delta t) + P_{b1}(t) + P_{b2}(t)$$

$$\text{令} \quad \Delta P_t = P_w(t) - P_y(t - \Delta t) \quad (14)$$

$$\text{则} \quad \Delta P_y(t) = \Delta P_t + P_{b1}(t) + P_{b2}(t) \quad (15)$$

上述式中, ΔP_t 为 t 时刻风电功率与相邻上一时刻风储联合功率的差值。运用 ΔP_t 和新型控制策略思想来决定当前 $P_{b1}(t)$ 与 $P_{b2}(t)$, 从而尽可能控制风储联合功率波动不越限。BESS 具体控制策略如下: 正常情况下, 让 BESS1 充电, BESS2 放电, 若遇到以下状况应按规则变动。

1) 状态不变。如果当前时刻和预测周期 T_0 内任意时刻的 $\Delta P(t+k\Delta t)$ 都不越限, 那么 $P_{b1}(t) = 0$, $P_{b2}(t) = 0$ 。由式(15)可知, $\Delta P_y(t) = \Delta P_t$ 不越限。

2) 充电状态

如果 $\Delta P(t) > D_t$, 那么此刻风功率波动越限, 为了让波动满足并网要求, 令 BESS1 充电, 则 $P_{b1}(t) < 0$ 。

如果 $\Delta P(t) > D_t$ 或 $-D_t \leq \Delta P(t) \leq D_t$, 但在预测周期 T_0 内, 根据风电预测估计值, 某 $t+k\Delta t$ 时刻要求 BESS2 放电 ($\Delta P(t+k\Delta t) < -D_t$), 但此刻 BESS2 没有足够的电量, 则让 BESS2 当前时刻充一部分电能以满足 $t+k\Delta t$ 时刻拥有足够的放电电量。表达式为

$$\begin{cases} P_{b1}(t) = -D_t - \Delta P(t), (\Delta P(t) > D_t) \\ P_{b2}(t) = -D_t - \Delta P(t), (\Delta P(t) > D_t) \\ \text{且} \Delta P(t+k\Delta t) < -D_t \text{ 或 } |\Delta P(t)| \leq D_t \\ \text{且} \Delta P(t+k\Delta t) < -D_t \end{cases} \quad (16)$$

式中, $k=1,2,3,\dots,\frac{T_0}{\Delta t}-1$ 。

3) 放电状态

如果 $\Delta P(t) < -D_t$, 那么此刻让 BESS2 放电, 则 $P_{b2}(t) > 0$ 。

如果 $\Delta P(t) < -D_t$ 或 $-D_t \leq \Delta P(t) \leq D_t$, 但在 T_0 内, 由预测值推算出某 $t+k\Delta t$ 时刻要求 BESS1 充电 ($\Delta P(t+k\Delta t) > D_t$), 但此刻 BESS1 容量不足, 为了使平滑效果更好, 让 BESS1 此刻放一部分电能, 从而 $t+k\Delta t$ 时刻有足够的容量去充电。表达式为

$$\begin{cases} P_{b2}(t) = D_t - \Delta P(t), (\Delta P(t) < -D_t) \\ P_{b1}(t) = D_t - \Delta P(t), (\Delta P(t) < -D_t) \\ \text{且 } \Delta P(t+k\Delta t) > D_t \text{ 或 } |\Delta P(t)| \leq D_t \\ \text{且 } \Delta P(t+k\Delta t) > D_t \end{cases} \quad (17)$$

式中, $k=1,2,3,\dots,\frac{T_0}{\Delta t}-1$ 。

由上述阐述可知, 新型控制策略能够利用 BESS 有限的容量得到更好的平抑效果, 将风储联合功率波动控制在允许波动率之内。在风储联合系统中, 本文采用滚动优化法, 它根据当前计划执行的情况和环境变化的特点来调整和修订未来的计划。本文所提方案中, 令滚动期为 15 min, 运行周期为 24 h。以式(16)、式(17)为策略核心, 采用滚动优化法制定新型控制策略流程图, 如图 2 所示。

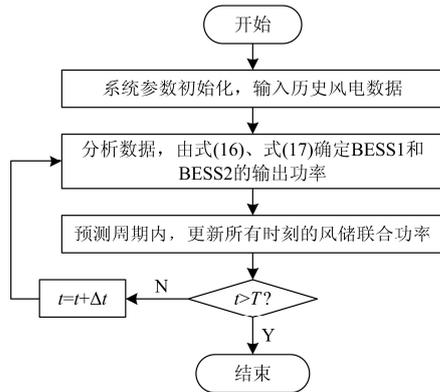


图 2 新型控制策略流程图

Fig. 2 Flow chart of new control strategy

3 算例分析

算例风电场位于中国西部某区域, 容量 180 MW。风电数据每 15 min 采集一次, BESS1 和 BESS2 的充放电周期也与之同步。选取风电场 2014 年中的两个典型日 A、B。其中, 典型日 A 属于风功率波动较大的例子, 典型日 B 则属于波动较小的例子。其实测风功率如图 3 和图 4 所示。

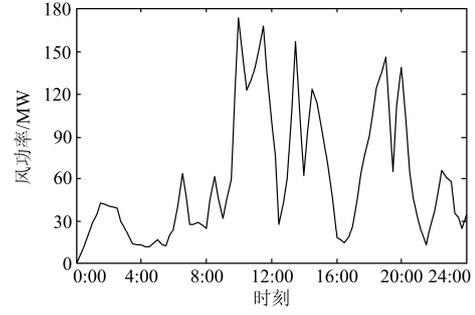


图 3 典型日 A 风功率曲线

Fig. 3 Wind power output curves during typical day A

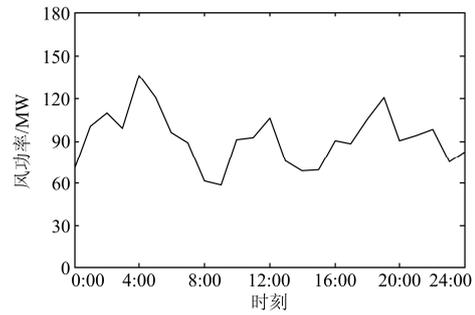


图 4 典型日 B 风功率曲线

Fig. 4 Wind power output curves during typical day B

因允许波动率受系统调频能力限制, 所以 D_t 取值须根据具体系统调整。文献[13-15]列举德国 E.ON 电网公司要求装机容量大于 100 MW 的风电场, 其一次调频容量至少为 $\pm 2\%$ 的额定功率, 本文以此为标准, 允许波动率 D_t 取 0.02, 即 3.6 MW。

因 BESS 额定容量 P_m 限制风功率波动平抑效果, 又受其昂贵价格制约, 所以为了选取合适的储能容量, BESS 额定功率分别取标么值 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 以电池在额定功率下持续放电 1 h 计算额定容量, 根据其在两个典型日的计算结果选取最佳标么值。表 1 给出了在新型控制策略下不同储能容量在典型日 A 和 B 的平抑效果。

表 1 风功率波动不同容量 BESS 平抑效果

Table 1 Effect of smoothing wind power fluctuations with different BESS capabilities

| P_m | 典型日 A 风电功率 | | 典型日 B 风电功率 | |
|-------|------------|-----------|------------|-----------|
| | ΔW | $P_D(\%)$ | ΔW | $P_D(\%)$ |
| 0 | 1.38 | 39.97 | 0.85 | 23.37 |
| 0.05 | 0.291 | 5.93 | 0.095 | 1.29 |
| 0.1 | 0.194 | 3.09 | 0.065 | 0.68 |
| 0.15 | 0.194 | 3.09 | 0.06 | 0.59 |
| 0.2 | 0.194 | 3.09 | 0.06 | 0.59 |

由表 1 可知, 风功率波动平抑效果随 BESS 额定容量增加而变好, 但 P_m 为 0.1 时, ΔW 和 P_D 数值已相当小, 继续增大 P_m 对波动平滑效果已不再显著。所以最佳标么值选取 0.1 既能满足波动平抑需求又能满足经济要求。

以 180 MW 为基准值, BESS1 和 BESS2 的功率标么值取 0.1, 则实际容量为 18 MWh。BESS1 初始容量为额定值的 20%, 即 3.6 MWh。BESS2 满充为 18 MWh。预测周期 T_0 为 3 h。

风电功率预测值精度精确与否直接影响风功率波动曲线的平滑效果。图 5 和图 6 给出了不同预测精度下即时控制策略和新型控制策略在典型日 A 和典型日 B 中平抑波动的效果。在该图中, 横轴表示预测误差标准差的相对值, 纵轴表示平抑的风功率波动占总波动的百分比。

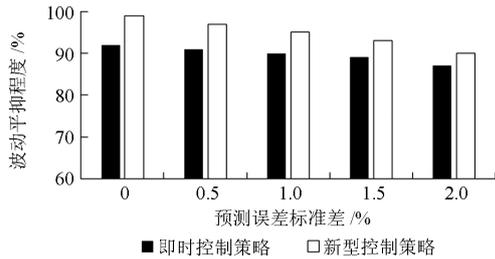


图 5 不同预测精度下典型日 A 的平抑效果

Fig. 5 Effectiveness of suppression with different prediction precision during typical day A

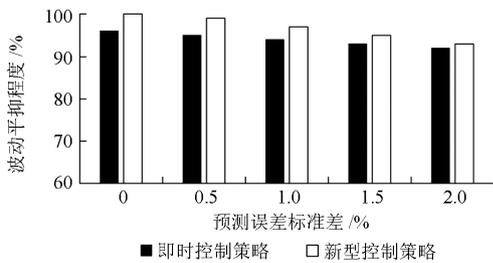


图 6 不同预测精度下典型日 B 的平抑效果

Fig. 6 Effectiveness of suppression with different prediction precision during typical day B

从图 5 和图 6 中可以看出, 即时控制策略和新型控制策略能平抑绝大多数风功率波动, 且平抑效果随风功率预测误差的减小而变好。典型日 A 属于风功率大波动, 可明显看出新型控制策略较即时控制策略在波动平抑程度上取得了更好的效果, 且随着预测误差精度的提高效果变得更显著。典型日 B 属于小波动, 虽然新型控制策略相比即时控制策略而言, 波动平抑效果的优越性没有典型日 A 来的显著, 但很大程度上仍旧优越于当前控制策略。

由文献[12]可知, 风功率预测精度对 BESS 状

态的切换次数影响不大。因此, 本文只列出在某一精度下单 BESS 与双 BESS 在两种控制策略下的充放电次数。如图 7 所示。

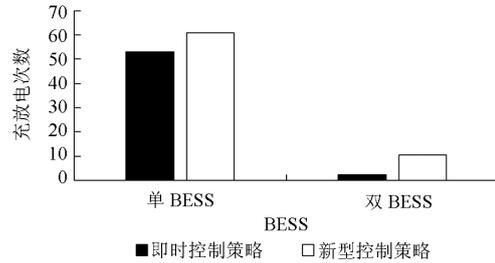


图 7 两种控制策略下单 BESS 和双 BESS 的充放电次数

Fig. 7 Charge and discharge times of single and double BESS in two control strategies

由图 7 可知, 采用双 BESS 的状态切换次数明显少于单 BESS。采用单 BESS 一天中充放电次数最高可达 61 次, 而双 BESS 仅为 10.5 次。虽然在充放电次数上当前控制策略优于新型控制策略, 但后者在波动平抑效果上取得了更大的优势。

为了进一步验证新型控制策略的有效性, 设在初始时刻 BESS1 处于充电状态, 荷电状态为 0.2, BESS2 处于放电状态, 荷电状态为 1.0。风功率预测误差标准差为 2%。两种控制策略在典型日 A 下的 ΔP_t 如图 8 所示。

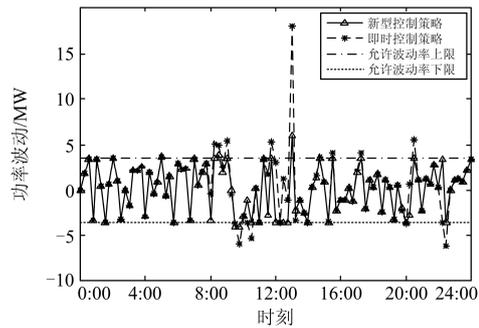


图 8 两种控制策略下的风储联合功率波动

Fig. 8 Combined power output under two control strategies

由图 8 可知, 两种控制策略在绝大多数情况下都平抑了风功率波动, 只有少数情况下波动超过允许波动率。而新型控制策略较即时控制策略而言, 不仅波动越限的幅值更小而且越限的时刻更少。在图中 14:00 左右的某一时刻, 由于储能容量限制, 采用即时控制策略平抑波动后, 波动仍高达 18 MW, 将会对电力系统产生重大影响。而采用新型控制策略, 波动平抑后仅为 6 MW。

为了具体体现本文所提策略的优越性, 表 2 给出了典型日 A 和典型日 B 的 ΔW 和 P_D 。

从表 2 中可以看出, 原始风功率波动的越限幅

值总和 ΔW 和越限概率 P_D 数值很大。采用即时控制策略很大程度上减少了 ΔW 和 P_D , 而新型控制策略较即时控制策略取得了更好的平滑效果。

表 2 典型日 A 与 B 风功率波动平抑效果

Table 2 Effect of smoothing wind power fluctuation on typical day A and B

| 项目 | 典型日 A 风电功率 | | 典型日 B 风电功率 | |
|--------|------------|-----------|------------|-----------|
| | ΔW | $P_D(\%)$ | ΔW | $P_D(\%)$ |
| 原始风电 | 1.38 | 39.97 | 0.85 | 23.37 |
| 即时控制策略 | 0.78 | 14.13 | 0.32 | 4.61 |
| 新型控制策略 | 0.194 | 3.09 | 0.065 | 0.68 |

4 结论

1) 为平抑风功率波动, 优化风电场出力特性, 在单 BESS 基础上构建了基于双 BESS 拓扑结构的风储混合电站。

2) 根据电池技术特性, 提出基于即时控制策略的新型控制策略。该策略既考虑了 BESS 充电和放电的历史叠加结果以及当前时刻风功率波动, 又考虑了未来风功率波动对当前 BESS 充放电行为的影响。

3) 基于风电场实测数据的仿真验证所提技术方案, 在风电出力特性上不仅取得了较好的平滑效果, 而且能降低因储能容量不足引起的瞬时大功率波动, 如文中采用即时策略平抑波动后仍高达 18 MW, 而新型控制策略仅为 6 MW。在电池特性上, 单 BESS 充放电次数 61 次, 而双 BESS 仅为 10.5 次, 很大程度上降低了电池充放电次数, 延长了电池寿命。

4) 尚未考虑预测周期 T_0 变化对风功率波动平抑效果的影响, 没有对储能容量的配置做进一步优化设计, 作者将对这问题做进一步研究。

参考文献

[1] 李晓东, 刘广一, 贾宏杰, 等. 基于电压调节的分布式可再生能源发电功率波动平抑策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 76-82.
LI Xiaodong, LIU Guangyi, JIA Hongjie, et al. Mitigation of output power fluctuations for distributed renewable energy generation based on voltage regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 76-82.

[2] 章竹耀, 肖欣, 郭晓丽, 等. 基于储能电池的光伏功率波动平抑策略[J]. 电力建设, 2016, 37(8): 90-95.
ZHANG Zhuyao, XIAO Xin, GUO Xiaoli, et al. Restraining strategy of photovoltaic power fluctuation

based on energy storage battery[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(8): 90-95.

[3] 邵丽华, 章竹耀, 张春龙, 等. 储能电池荷电状态与平抑风电出力波动协调运行策略[J]. 电力建设, 2017, 38(1): 84-88.
SHAO Lihua, ZHANG Zhuyao, ZHANG Chunlong, et al. Coordinated operation strategy of storage battery SOC and smoothing wind power fluctuation[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(1): 84-88.

[4] 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.

[5] 张坤, 毛承雄, 谢俊文, 等. 风电场复合储能系统容量配置的优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 79-87, 13.
ZHANG Kun, MAO Chengxiong, XIE Junwen, et al. Optimal design of hybrid energy storage system capacity for wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 79-87, 13.

[6] 程林, 常垚, 刘满君, 等. 基于伪时序状态转移抽样法评估含储能电力系统可靠性[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(7): 53-59.
CHENG Lin, CHANG Yao, LIU Manjun, et al. Reliability based on a pseudo state transition timing sampling method to assess power system including energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7): 53-59.

[7] 娄素华, 易林, 吴耀武, 等. 基于可变寿命模型的电池储能容量优化配置[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 265-271.
LOU Suhua, YI Lin, WU Yaowu, et al. Optimizing deployment of battery energy storage based on lifetime predication[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 265-271.

[8] 南晓强, 李群湛. 考虑风功率预测误差分布的储能功率与容量配置法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 117-122.
NAN Xiaoqiang, LI Qunzhan. Power and storage capacity configuration method of wind power prediction error distribution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 117-122.

[9] 田中大, 李树江, 王艳红, 等. 基于小波变换的风电场

- 短期风速组合预测[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 112-120.
- TIAN Zhongda, LI Shujiang, WANG Yanhong, et al. Short-term wind speed combined prediction for wind farms based on wavelet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(9): 112-120.
- [10] 张蕴昕, 孙运全. 混合储能在风光互补微网中的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 93-98.
- ZHANG Yunxin, SUN Yunquan. Control strategy of a hybrid energy storage in wind-solar hybrid generation micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 93-98.
- [11] 张川, 杨雷, 牛童阳, 等. 平抑风电出力波动储能技术比较及分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 149-154.
- ZHANG Chuan, YANG Lei, NIU Tongyang, et al. Comparison and analysis of energy storage technology to balance fluctuation of wind power output[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 149-154.
- [12] 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): 1-7.
- 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): 1-7.
- [13] 唐西胜, 苗福丰, 齐智平, 等. 风力发电的调频技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4304-4314.
- TANG Xisheng, MIAO Fufeng, QI Zhiping, et al. Survey on frequency control of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4304-4314.
- [14] 孙鹏, 蔡勇, 万黎, 等. 基于混合储能的风电场一次调频控制[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(2): 133-139.
- SUN Peng, CAI Yong, WAN Li, et al. Wind farms' primary frequency regulation control based on the hybrid energy storage system[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(2): 133-139.
- [15] 赵飞, 许剑, 徐玉杰, 等. 基于复合储能系统平抑风电场波动功率研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(7): 98-105.
- ZHAO Fei, XU Jian, XU Yujie, et al. Research on smoothing wind power fluctuations based on hybrid energy storage system[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(7): 98-105.

收稿日期: 2016-02-22; 修回日期: 2016-03-20

作者简介:

章竹耀(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电技术; E-mail: 617677228@qq.com

郭晓丽(1971-), 女, 通信作者, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为新能源发电技术、智能电网与微网、电力系统规划运行等; E-mail: guo.xl@ntu.edu.cn

张新松(1980-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行控制、可再生能源发电技术等。E-mail: zhang.xs@ntu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)