

DOI: 10.7667/PSPC170315

## 基于风电场集中储能的风储柔性控制策略研究

贾成真<sup>1</sup>, 王灵梅<sup>1</sup>, 孟恩隆<sup>1</sup>, 张学军<sup>1</sup>, 孟秉贵<sup>2</sup>, 赵俊屹<sup>3</sup>

(1. 山西大学自动化系, 山西 太原 030013; 2. 大唐山西新能源有限公司, 山西 太原 030032;  
3. 山西省电力公司, 山西 太原 030001)

**摘要:** 为了平抑风电波动并且保证储能荷电状态(SOC)跟踪给定目标值, 针对风储协调优化控制, 给出了一种风储多时间尺度的柔性控制策略。首先, 采用正态分布的方法分析了风储的容量配比。其次, 采用带死区的滑动平均值滤波算法对风电场分钟级运行数据进行平滑, 利用模型预测控制(MPC)原理, 结合风电场超短期风功率预测数据, 实现了储能小时级充放电功率的滚动优化。最后, 在 Matlab 中搭建了钒液流电池模型和柔性控制策略模型, 采用风电场的实际运行数据对模型进行了仿真验证。仿真结果表明, 风储柔性控制策略是正确和有效的, 在降低风电波动的同时又能保证储能 SOC 不偏离目标值。

**关键词:** 容量配比; 移动平均值; 滚动优化; 柔性控制; 钒液流电池

### Research on flexible control strategy based on the centralized storage joint with wind farm

JIA Chengzhen<sup>1</sup>, WANG Lingmei<sup>1</sup>, MENG Enlong<sup>1</sup>, ZHANG Xuejun<sup>1</sup>, MENG Binggui<sup>2</sup>, ZHAO Junyi<sup>3</sup>

(1. Department of Automation Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030013, China; 2. Datang Shanxi New Energy Co., Ltd, Taiyuan 030032, China; 3. Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030001, China)

**Abstract:** In order to stabilize the fluctuation of wind power and guarantee the energy storage state (SOC) to track a given target value, a multiple time-scale flexible control strategy is proposed for the coordinated optimization control. Firstly, the normal distribution method is used to analyze the capacity ratio of wind farm and energy storage; secondly, the moving average filter algorithm with dead zone is used to smooth the wind farm real-time data, the short-term power forecasting data of wind farm is used to achieve rolling optimization of energy storage charge-discharge power based on the principle of Model Predictive Control (MPC); finally, a vanadium redox flow battery model and flexible control strategy model are built in Matlab, the wind farm operation data is used to verify the model. The simulation results verify the correctness and effectiveness of this method which can not only avoid the fluctuation of wind power, but also ensure the energy storage SOC does not deviate from the target value.

This work is supported by Coal-based Key Scientific and Technological Projects of Shanxi Province (No. MD2014-06) and the Large-scale Energy Storage Technology and Industrialization Research Subject in Shanxi Province (No. 201603D112004).

**Key words:** capacity ratio; moving average; rolling optimization; flexible control; vanadium redox flow battery

## 0 引言

“十三五”期间, 全国风电累计并网装机容量将会达到 2.1 亿 kW 以上。作为能源大省的山西到 2020 年风电装机容量将达到 1 600 万 kW, 新能源的发展对促进山西经济转型具有重要意义。然而风电

场不稳定的输出功率直接并入电网, 会对电网稳定、发电计划和调度等方面产生较大的影响, 严重制约了风能的利用及风电的大规模发展<sup>[1]</sup>。以山西省为例, 风电装机大部分集中在北部, 而山西的水电又比较少, 电网用于为风电调峰的任务主要由火电机组承担, 尤其到冬季, 一部分火电机组要用于供热, 电网的调峰形式更为严峻。随着储能成本的降低, 储能能够补偿风电输出的波动, 降低了电网的不稳定性<sup>[2-3]</sup>。大规模电化学储能应用于风电场, 能够改

**基金项目:** 山西省煤基重点科技攻关项目 (MD2014-06); 山西省大规模储能技术及产业化研究课题 (201603D112004)

变风电场的输出功率特性, 实现风电场平抑波动、削峰填谷、跟踪计划和参与调频, 可以减少电网的备用容量。因此, 平抑风电输出的波动对提高电网对风电的接纳能力和电网经济、安全运行具有重要意义。

利用储能系统的充放电能力是抑制风电输出波动对电网不利影响的有效途径之一<sup>[4-8]</sup>。风储构成的联合发电系统能够实现风电的可控、可调、可预测, 提高风电场预测精度。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<sup>[9-10]</sup>。一方面要求储能系统对风电场输出的不稳定功率进行调节, 使其满足风电并网条件; 另一方面控制电池储能系统的合理充放电, 使其荷电状态 (SOC) 保持在适宜的范围内, 提高储能电池的控制有效性, 延长其使用寿命<sup>[11-12]</sup>。

文献[13]以张北风光储输示范工程为基础, 介绍了采用一阶低通滤波算法平抑风功率波动的原理, 为了防止储能系统过充或者过放引入了 SOC 反馈。文献[14]采用了经验模态分解与小波分析相结合的方法, 对储能的容量配置进行了研究与分析, 并与低通平滑下的容量配置进行了对比。文献[15]基于模糊控制器解决了储能使用寿命和风功率波动平抑度之间的矛盾。也有学者将模型预测控制(MPC)应用到风储平滑控制中来。文献[16-19]利用超短期、短期风功率预测数据, 通过建立不同的优化目标模型, 进行滚动优化实现对风功率波动的平抑。一阶低通滤波原理简单实用, 但其存在明显的“滞后”现象, 为此需要较大的储能功率和容量, 在实际工程应用中也容易使储能装置不停工作, 而且采用单一的滤波控制缺乏对未来风电功率变化的预知能力, 在风电功率波动频繁时容易因储能系统 SOC 超限而失去平滑功能, 因此本文采用带死区的滑动平均值滤波算法与 MPC 相结合, 既兼顾了风功率短期波动, 也充分利用了 MPC 滚动优化控制的优势, 实现了多时间尺度的风储柔性控制。

本文首先分析了风储联合发电系统的拓扑结构和容量配比, 其次提出了风储柔性控制策略, 详细分析了控制策略具体的原理和方法, 最后在 Matlab/Simulink 中搭建了液流电池模型, 分析了液流电池充放电特性, 采用实际风电场的运行数据对柔性控制策略进行仿真验证, 证明了该方法既能够平抑风功率的分钟级波动, 又能保证储能 SOC 运行在合理范围内。

## 1 风储联合发电系统的结构和容量配比

### 1.1 系统的拓扑结构

由风电场和储能系统组成的联合发电系统的拓扑结构如图 1 所示。图 1 中实线代表能量流, 虚线代表信号流。 $P_w$  是风电场有功功率,  $P_y$  是风电场超短期预测功率,  $P_{b\_ref}$  是储能功率的给定值,  $P_b$  是储能实际的充放电功率值,  $P_g$  为联合发电系统并网功率值, 其中  $P_g = P_w \pm P_b$  (“+”表示储能放电, “-”表示储能充电)。储能系统采用钒液流电池储能, 利用储能快速充放电的特性, 实现对风电有功功率的平抑, 使其波动满足并网要求。

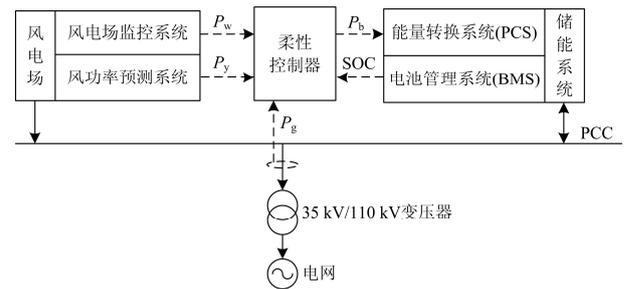


图 1 联合发电系统的拓扑结构

Fig. 1 Topology of combined power generation system

在联合发电系统中, 风电场中的风电机组经升压变压器升压到 35 kV, 组成风电场内的 35 kV 母线, 再经过升压变压器升压到 110 kV, 把电能送入电网。风储联合发电系统中的储能采用集中式布置, 把储能系统接入到风电场原有的 35 kV 母线上, 通过合理控制储能的充放电功率, 减小了风功率波动性对电网的影响, 实现风力发电从源端的“自律”。

### 1.2 风储容量配比

在实际工程中, 考虑到储能系统的成本和整个风储联合发电系统的经济性, 并不是依据风电场最恶劣情况下所需功率来配置储能系统的额定功率, 而是根据风电场长时间的运行数据得出储能系统输出功率的变化范围, 根据其正态分布来选取储能系统的额定输出功率。储能系统输出功率变化范围如式(1)。

$$|P_{b1}| \leq |P_w - P_g^*| \quad (1)$$

$P_g^*$  表示利用本文中带死区的滑动平均值滤波方法, 考虑了风电场的波动率限制而得出的风电场合理的并网功率区间。对  $P_{b1}$  进行概率统计, 其符合正态分布密度函数<sup>[20-21]</sup>。

$$\mu = \frac{1}{N} \times \sum_{k=1}^N P_{b1}(k) \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (P_{bi}(k) - \mu)^2} \quad (3)$$

式中： $N$ 为样本数量； $\mu$ 、 $\sigma$ 为储能充放电功率样本的平均值和标准差。

储能系统的额定输出功率可选取为

$$P_N = \max \{ |\mu - 3\sigma|, |\mu + 3\sigma| \} \quad (4)$$

以时间窗口  $T=24$  h 为例，计算电池储能的额定功率，得到  $\mu=-0.022$ ， $\sigma=4.789$ ，根据正态分布的  $3\sigma$  原理，包括 99.7% 的情况下平抑风电场功率波动所需要的储能系统功率输出值为 14.389 MW，本文中  $P_N$  取 14 MW。按照工程中提出的风电场配置储能容量不能低于风电场容量的 10%，储能系统容量按照式(5)和式(6)计算。

$$E_b = \frac{24}{N} \times \sum_1^N P_{bi}(k) \quad (5)$$

储能系统的容量用  $W$  表示为

$$W = \max \{ |E_{b\_c}|, |E_{b\_d}| \} \quad (6)$$

式中： $E_{b\_c}$  是一天中储能系统所充的电量； $E_{b\_d}$  是一天中储能系统所放的电量；经计算  $W$  取 41.6 MWh。所以本文用到的储能容量为 14 MW/42 MWh。

## 2 风储柔性控制策略

### 2.1 柔性控制的原理

风储的柔性控制通过柔性控制器来实现。柔性控制器包含 3 个输入和 1 个输出，首先采用带死区的移动平均值滤波算法对风电场实时功率数据进行滤波，由大规模储能装置来弥补滤波值与平滑值之间的功率差，实现平抑风电波动的目的。其次，根据风电并网国家标准，风电场每 15 min 自动向电力系统调度机构滚动上报未来 15 min~4 h 的风电场发电功率预测曲线，预测值的时间分辨率为 15 min，利用 MPC 滚动优化的特性，以 4 h 为优化周期，15 min 为 MPC 的控制周期，得到储能的充放电优化功率值，将分钟级的实时控制与小时级的优化控制相结合，从而实现多时间尺度的风储柔性控制策略。平抑风电波动的柔性控制策略原理框图如图 2 所示。

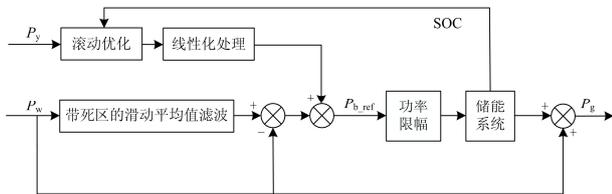


图 2 柔性控制策略原理框图

Fig. 2 Schematic diagram of flexible control strategy

图 2 中带死区的滑动平均值滤波算法能够实时生成风储并网的功率区间，若风功率在此功率区间外，则对风功率数据进行滑动平均值滤波，此时储能功率指令为风场功率与滤波后的功率之差；若风功率波动在区间范围内，则储能系统不动作，避免了储能系统频繁地充放电控制。在储能系统前面加了功率限幅环节，保证了储能功率给定值在合理的范围内。MPC 的滚动优化原理与其他优化原理不同，MPC 仅将优化后得到的最优解序列的第一个元素施加到储能系统的充放电功率指令中，并以 15 min 的控制周期为步长不断地滚动向前进行优化，通过滚动优化可以不断修正由于风功率预测误差带来的优化偏差，通过利用短期风功率预测数据，建立适当的目标函数，提前控制储能充放电，优化储能装置充放电功率值，避免储能系统 SOC 越限情况的发生，使风储协调控制策略具有可持续性。

单纯使用 MPC 滚动优化后的风储并网优化功率值如图 3 中实线所示。图中风功率预测数据的分辨率为 15 min，且数据保持 15 min 内不变，通过对储能充放电功率的优化实现了对风储联合发电系统并网功率的优化。

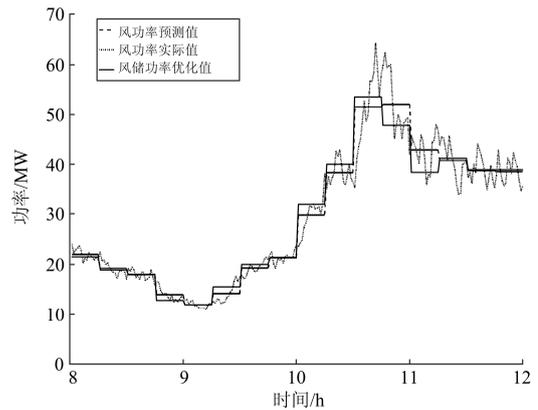


图 3 MPC 控制下的风储功率输出

Fig. 3 Wind storage power output under MPC control

例如，在 10 时由于风功率预测到未来 1 h 内风电功率呈上升趋势，考虑到储能 SOC 有越限的可能，所以提前对储能进行放电。从图中可以明显看出，相邻 15 min 的值会出现变化幅度越限的情况，本文对其进行了线性化处理，具体的原理在后文中会提到。

要实现柔性控制策略，本文还需要解决两个关键问题：第一，MPC 中优化模型的建立与求解；第二，MPC 与移动平均值滤波的有效结合。

### 2.2 优化模型的建立与求解

本文中用  $k$  表示 MPC 的控制时刻，其时间间

隔为 15 min, 忽略储能系统的自放电现象和储能系统的充放电效率, 柔性控制器周期性获取储能系统的 SOC 数值。优化模型以优化时段内储能 SOC 距离目标值的误差平方和和联合发电系统输出功率波动率的平方和最小为目标函数, 利用线性加权法和将多目标优化问题化为单目标优化, 在一个优化时段内分别取不同的加权系数, 通过多次试验分析得到表 1 中的数据。

表 1 不同权重系数的单目标适应值

$\alpha$	$\beta$	$\sum_{k=1}^M (S(k) - L)^2$	$\sum_{k=1}^M \left(\frac{\Delta P_g(k)}{C}\right)^2$
0.1	0.9	0.024 9	0.004 6
0.3	0.7	0.013 9	0.008 1
0.5	0.5	0.008	0.012 6
0.7	0.3	0.003 4	0.018 4
0.9	0.1	0.0006 8	0.029 9

从表 1 中可以明显看出, 目标函数的加权系数决定了单目标的优化侧重, 实际运行中可以根据自己的需求选取不同的加权系数, 在这里加权系数  $\alpha$ 、 $\beta$  取折中值, 都设为 0.5, 优化模型如式(7)。

$$\min J = \alpha \times \sum_{k=1}^M (S(k) - L)^2 + \beta \times \sum_{k=1}^M \left(\frac{\Delta P_g(k)}{C}\right)^2 \quad (7)$$

式中:  $S(k)$  表示储能系统  $k$  时刻的荷电状态值;  $M$  表示优化序列个数;  $L$  表示储能系统 SOC 的目标值;  $C$  表示风电场的装机容量。  $\Delta P_g(k) = P_g(k) - P_g(k-1)$ ,  $P_g(k)$  表示  $k$  时刻风储联合输出功率。

约束条件为:

$$P_g(k) = P_w(k) + P_b(k) \quad k=1, 2, 3, \dots, M \quad (8)$$

$$S(k) = S(k-1) + P_b(k) \times T_s / C_b \quad k=1, 2, 3, \dots, M \quad (9)$$

$$S_{\min} \leq S(k) \leq S_{\max} \quad k=1, 2, 3, \dots, M \quad (10)$$

$$-P_N \leq P_b(k) \leq P_N \quad k=1, 2, 3, \dots, M \quad (11)$$

式中:  $C_b$  表示储能系统的容量;  $S_{\min}$  和  $S_{\max}$  分别为储能系统 SOC 的上下限;  $P_N$  表示储能系统的额定充放电功率值。该目标函数为非线性函数, 且最优解是一个  $M$  维的向量。实践证明, 粒子群算法适合在动态、多目标优化环境中寻优, 与传统的优化算法相比具有更快的计算速度和更好的全局搜索能力。

本文采用了一种健壮性好、系统收敛迅速的快速粒子群优化算法(PSO)来对目标函数进行求解, 粒子种群取 100, 迭代次数为 300。算法的流程图如图 4 所示。

与传统的粒子群算法(PSO)相比, APSO 算法从以下方面进行了改进。首先, 引入了惩罚函数, 把有约束条件的优化问题转变为无约束条件的优化问

题; 其次, 在对粒子进行更新时, 除了引入个体最优  $pbest$  和全局最优  $gbest$  之外, 还增加了粒子在上下边界区间内的随机动态目标点, 避免了传统粒子群早熟收敛的缺陷。

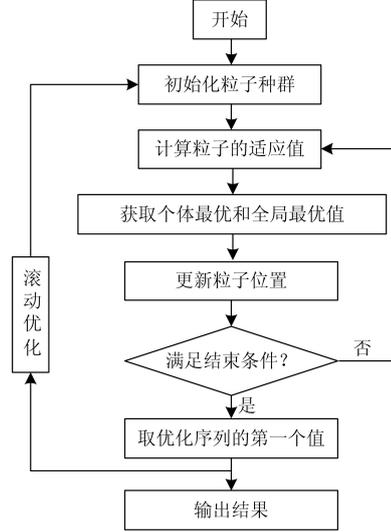


图 4 APSO 算法流程图

Fig. 4 APSO algorithm flow chart

### 2.3 MPC 与移动平均值的有效结合

利用 MPC 的优化结果对移动平均值滤波后得到的储能功率值进行优化, 弥补了移动平均值滤波控制缺乏前瞻性的缺点。移动平均值滤波的原理如式(12)所示。

$$P_g(i) = \frac{P_w(i-n+1) + P_w(i-n+2) + P_w(i-n+3) \cdots + P_w(i)}{n} = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} P_w(i-j) \quad i \geq n, i = n, n+1, \dots, N \quad (12)$$

为了便于与 MPC 的控制时刻  $k$  区分, 用  $i$  表示移动平均值滤波算法的控制时刻,  $N$  为风电有功数据总的采样点数。由于本文中采集的风电场数据有限, 对于前  $n-1$  个数据的平滑采用式(13)进行处理。

$$P_g(i) = \frac{1}{i} \sum_{j=1}^{i-1} P_w(j) \quad i < n, i = 1, 2, 3, \dots, n-1 \quad (13)$$

由上文可知, 风储并网功率值  $P_g(i)$  不是每个时刻都是等于移动平均值平滑过后的值, 只有当风电功率  $P_w(i)$  不在并网功率带内才需要对其进行平滑。

$$P_b(i) = P_g(i) - P_w(i) \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (14)$$

储能的充放电功率值  $P_b(i)$  如式(14)所示, 风储联合发电系统的功率输出值减去风电的功率输出值就是需要储能补偿的功率值。

此外,为了克服相邻 15 min 储能功率优化值的突变,在每 15 min 初段对功率优化值采用线性处理,使相邻时刻的功率补偿值小于阈值  $P_{th}^{[22]}$ 。这里  $P_{th}=2\text{ MW}$ 。

$$P_b(w)^* = \begin{cases} P_b(k) + \frac{w}{m}(P_b(k+1) - P_b(k)) & 1 \leq w < m \\ P_b(k+1) & m \leq w < n \end{cases} \quad (15)$$

$P_b(w)^*$ 为经过线性处理后新的储能功率补偿值,  $w=1$  表示每个优化周期的初始时刻。 $P_b(k)$ 和  $P_b(k+1)$ 分别表示优化后前一个优化时刻和当前优化时刻的储能优化功率值。 $m=[(P_b(k+1)-P_b(k))/P_{th}]$ ,  $m$  向上取整数。

$$P_b(i)' = P_b(i) + P_b(w)^* \quad (16)$$

由式(16)得到储能的最终充放电功率值,实现了风储多时间尺度的柔性控制。

### 3 仿真分析

本文取实际风电场的运行数据,该风电场的装机容量为 100 MW,预配置的液流电池储能容量为 14 MW/42 MWh,单个液流电池的容量为 5 kW/30 kWh,储能系统经过 DC/DC、DC/AC 两级并入风电场。风电场波动率的限制按照 1 min 功率变化最大值不超过装机容量的 1/50, 10 min 功率变化最大值不超过装机容量的 7/100,高于国家标准。我国关于风电场并网运行时功率的最大变化率的规定如表 2 所示。

表 2 风电场有功功率变化最大限值

Table 2 Maximum change value of wind farm output power

风电场装机容量/MW	10 min 有功功率变化最大限值/MW	1min 有功功率变化最大限值/MW
<30	10	3
30~150	装机容量/3	装机容量/10
>150	50	15

#### 3.1 液流电池的充放电特性

依据文献[23]所提供的模型和参数,在Matlab/Simulink中建立了 5 kW/30 kWh的液流电池模型,模拟了其充放电特性,如图 5 和图 6 所示。

从图 5 和图 6 可以看出,恒功率充电时,充电功率越大,液流电池所需要的充电时间越短。负载不同,液流电池的放电电流不同,放电电流越大,放电的时间就越短。液流电池的端电压在充放电时并不是线性变化,当电池SOC维持在 0.2~0.8 时,电压的变化平缓且呈线性,故后文取SOC为 0.2~0.8 为液流电池的合理运行范围。

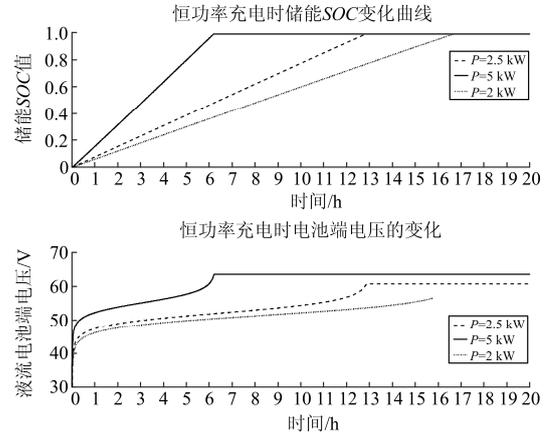


图 5 恒功率充电时液流电池特性

Fig. 5 Characteristics of vanadium redox flow battery charge in constant power

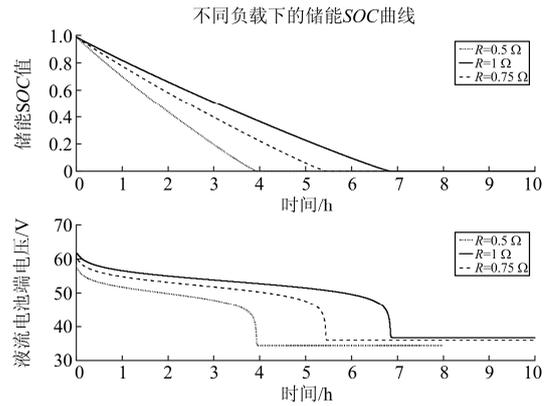


图 6 不同负载放电时液流电池特性

Fig. 6 Characteristics of vanadium redox flow battery discharge with different load

#### 3.2 平抑风功率波动效果

实际风电场一天的运行数据如图 7 所示。从图中可以明显看出风电场的功率波动幅度并不是每个时刻都特别大,0~10 时,风电的分钟级波动幅度不大,10~20 时,风电的波动频繁且变化幅度比较大,越限的概率增大。通过在风电场配置储能,可以降低风电功率波动,使其维持在本文要求的波动范围内。

选取 10~20 时风功率数据,采用本文提出的柔性控制策略对风电场的波动进行平抑。为了满足本文中提出的风电场并网功率波动要求,本文取滑动平均值滤波的平均项数为 50。图 8 从概率统计的角度给出了风电场原始功率波动率和利用本文的控制策略后风储联合输出功率的波动率对比。

从图中可以看出,经过平滑控制后,风电场的波动明显减小,越限的概率有所降低,达到了平滑风电场输出功率波动的目的。由于风电场配置的储能额

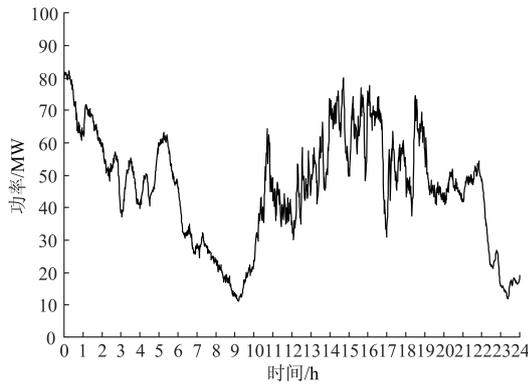


图 7 风电场有功功率输出  
Fig. 7 Output power of wind farm

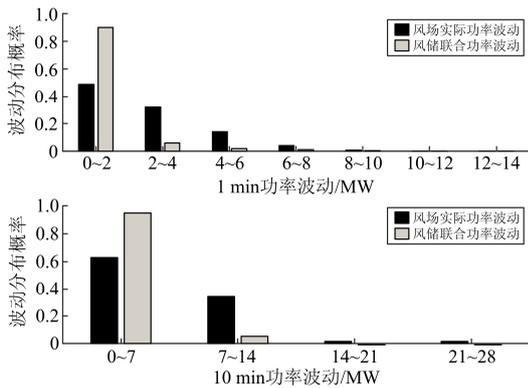


图 8 1 min 和 10 min 风功率波动率对比  
Fig. 8 Comparison of wind power fluctuation  
in 1 min and 10 min

定充放电功率和储能额定容量的限制, 偶尔也会出现波动超限的情况, 对储能的平滑效果有所影响。

### 3.3 储能 SOC 变化

图 9 中给出了使用柔性控制策略和带死区的移动平均值滤波两种方法时储能 SOC 的变化曲线。假定储能能在 10 时的 SOC 值为 0.7, 本文提出的风储柔性控制策略可以保证储能 SOC 维持在目标值附近波动, 不会出现越限的情况, 而采用单一的带死区的移动平均值滤波则无法保证储能 SOC 维持在目标值附近。

储能系统的充放电功率由 PCS 控制, 当储能 SOC 达到极限值时, 储能系统是禁止充放电的, 此时储能系统丧失了对风电功率的平抑。采用本文的柔性控制策略, 利用了未来 4 h 的风功率预测数据, 以式(1)为优化目标, 通过提前控制储能合理充放电, 维持储能 SOC 跟踪目标指令, 保证了储能平抑效果的持续性, 延长了储能的使用寿命。

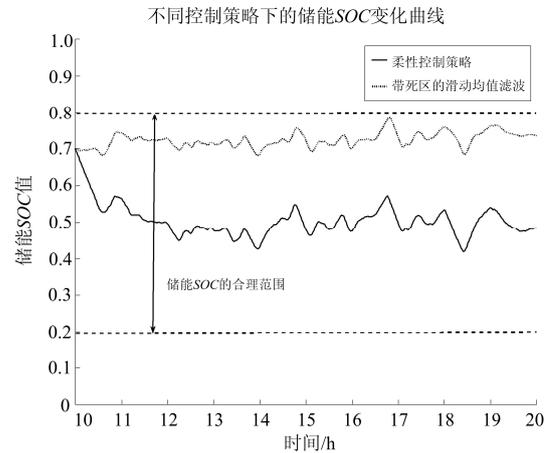


图 9 储能 SOC 曲线  
Fig. 9 SOC curves of energy storage

## 4 结论

风储联合发电系统是解决弃风问题的有效途径之一, 选择合适的滤波算法对风储的平滑控制非常重要。滤波控制与 MPC 控制相结合能够实现风储多时间尺度的柔性控制。

本文从柔性控制策略出发, 利用正态分布的方法研究了风储的容量配比, 但并没有对储能的容量配置进行优化, 有待后续进一步研究。

采用带死区的移动平均值滤波算法能够减少储能系统的充放电次数, 避免其频繁的充放电控制, 延长了储能系统的使用寿命。

本文采用的柔性控制策略, 充分利用了风功率短期预测数据对储能充放电功率值进行了优化, 运行 Matlab 的电脑采用 i7-4790 CPU, 主频为 3.6 GHz, 每 15 min 优化一次所用的时间为 10 s, 远小于移动平均值滤波算法的控制周期。该控制策略不仅能够降低风电场有功功率波动, 而且能够维持储能 SOC 在合理范围内, 保证了平滑控制策略的可持续性。通过制定科学合理的协调控制策略是风储实现可控、可调和可预测的关键, 也是以后研究的重点。

### 参考文献

- [1] 韩晓娟, 李建林, 田春光, 等. 风光储系统容量优化配置及经济性评估[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [2] FENG Lin, ZHANG Jingning, LI Guojie, 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(1): 86-94. DOI 10.1186/s41601-016-0021-1.
- [3] 王守凯, 刘达. 风电消纳途径综述[J]. 陕西电力, 2016,

- 44(7): 15-19+24.  
WANG Shoukai, LIU Da. Review of wind power accommodation approaches[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(7): 15-19+24.
- [4] 丁明, 徐宁舟, 毕锐. 用于平抑可再生能源功率波动的储能电站建模及评价[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(2): 66-72.  
DING Ming, XU Ningzhou, BI Rui. Modeling of BESS for smoothing renewable energy output fluctuations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(2): 66-72.
- [5] 王境彪, 李江, 胡立强, 等. 基于双目标时变交集的电池储能改善风电场出力控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 31-40.  
WANG Jingbiao, LI Jiang, HU Liqiang, et al. A control of BESS to improve the wind farm output based on time-varying intersection of dual targets[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 31-40.
- [6] 于芑, 周玮, 孙辉, 等. 用于风电功率平抑的混合储能系统及其控制系统设计[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(17): 127-133.  
YU Peng, ZHOU Wei, SUN Hui, et al. Hybrid energy storage system and control system design for wind power balancing[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(17): 127-133.
- [7] KHALID M, SAVKIN A V. Minimization and control of battery energy storage for wind power smoothing: Aggregated, distributed and semi-distributed storage[J]. Renewable Energy, 2014, 64(4): 105-112.
- [8] 陈璟华, 梁丽丽, 郭壮志, 等. 有效消纳风电的储热与储能装置热-电联合系统[J]. 陕西电力, 2017, 45(5): 69-74.  
CHEN Jinghua, LIANG Lili, GUO Zhuangzhi, et al. Wind power accommodated electricity-heat combined system with thermal storage and energy storage device[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(5): 69-74.
- [9] 章竹耀, 郭晓丽, 张新松, 等. 储能电池平抑风功率波动策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 62-68.  
ZHANG Zhuyao, GUO Xiaoli, ZHANG Xinsong, et al. Strategy of smoothing wind power fluctuation based on storage battery[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 62-68.
- [10] 吴峰, 王鹏翔. 储能位置对多风电场电网平稳控制的影响研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(1): 88-94.  
WU Feng, WANG Pengxiang. Research on the Influence on Placidity Control of Power Grid Integrated With Multi-Wind Farms by the Location of Energy Storage[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(1): 88-94.
- [11] 李相俊, 张晶琼, 何宇婷, 等. 基于自适应动态规划的储能系统优化控制方法[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1355-1362.  
LI Xiangjun, ZHANG Jingqiong, HE Yuting, et al. Optimal control method of energy storage system based on adaptive dynamic programming[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1355-1362.
- [12] 赵贺, 李子矜, 闫浩然, 等. 基于模型预测控制的微电网经济调度[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(9): 119-123.  
ZHAO He, LI Ziqin, YAN Haoran, et al. Economical Dispatch of Microgrid Based on Model Predictive Control[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(9): 119-123.
- [13] 任洛卿, 白泽洋, 于昌海, 等. 风光储联合发电系统有功控制策略研究及工程应用[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(7): 105-111.  
REN Luoqing, BAI Zeyang, YU Changhai, et al. Research on active power control strategy for wind/photovoltaic/energy storage hybrid power system and its engineering application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7): 105-111.
- [14] 史林军, 周佳佳, 温荣超, 等. 基于经验模态分解与小波分析相结合的风电功率平滑控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 9-16.  
SHI Linjun, ZHOU Jijia, WEN Rongchao, et al. Power smoothing control of wind power based on combination of empirical mode decomposition and wavelet analysis[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 9-16.
- [15] 蒋小平, 彭朝阳, 魏立彬, 等. 基于模糊控制的混合储能平抑风电功率波动[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 126-132.  
JIANG Xiaoping, PENG Chaoyang, WEI Libin, et al. Hybrid energy storage for smoothing wind power fluctuations based on fuzzy control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 126-132.
- [16] 陈跃燕, 李相俊, 韩晓娟, 等. 基于移动平均法和风电波动率约束的电池储能系统平滑风电出力控制策略[J]. 电力建设, 2013, 34(7): 1-5.  
CHEN Yueyan, LI Xiangjun, HAN Xiaojuan, et al. Control strategy of smoothing wind power output using battery energy storage based on moving average method and wind power volatility rate constraint[J]. Electric

- Power Construction, 2013, 34(7): 1-5.
- [17] 罗毅, 李达. 电池储能平抑风电功率波动的预测控制方法[J]. 电力科学与工程, 2015, 31(11): 1-5.  
LUO Yi, LI Da. A model predictive control method of battery energy storage for smoothing wind power fluctuation[J]. Electric Power Science and Engineering, 2015, 31(11): 1-5.
- [18] 王颖, 张凯锋, 付嘉渝, 等. 抑制风电爬坡率的风储联合优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 17-23.  
WANG Ying, ZHANG Kaifeng, FU Jiayu, et al. Optimization control method of wind/storage system for suppressing wind power ramp rate[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 17-23.
- [19] 洪海生, 江全元, 严玉婷. 实时平抑风电场功率波动的电池储能系统优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 103-109.  
HONG Haisheng, JIANG Quanyuan, YAN Yuting. An optimization control method of battery energy storage system with wind power fluctuations smoothed in real time[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 103-109.
- [20] 靳文涛, 李建林. 电池储能系统用于风电功率部分“削峰填谷”控制及容量配置[J]. 中国电力, 2013, 46(8): 16-21.  
JIN Wentao, LI Jianlin. BESS for wind power “peak shaving” control and capacity configuration[J]. Electric Power, 2013, 46(8): 16-21.
- [21] 李文斌. 储能系统平抑风电场功率波动研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.  
LI Wenbin. Study on smooth up wind farm output fluctuation by energy storage system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [22] 沈枢, 张沛超, 李中豪, 等. 平抑长短期风电功率波动的风储协调运行方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 12-18.  
SHEN Shu, ZHANG Peichao, LI Zhonghao, et al. A coordination operation method of wind power and energy storage hybrid system for smoothing short-term and long-term wind power fluctuations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 12-18.
- [23] 陈星邑. 箱式全钒液流电池组协调控制技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.  
CHEN Xingyi. Research on coordinated control of box-layout vanadium redox flow battery pack[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.

收稿日期: 2017-03-07; 修回日期: 2017-06-26

作者简介:

贾成真(1989—), 男, 硕士, 通信作者, 主要研究方向为风储协调并网控制; E-mail: 1059199241@qq.com

王灵梅(1964—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为新能源优化控制、电网智能调度; E-mail: wanglingmei08@163.com

孟恩隆(1965—), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为智能电网。E-mail: tymj52@163.com

(编辑 张爱琴)