

储能系统平抑风电功率波动及容量动态优化控制

陈大准^{1,2}

(1. 长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410000;

2. 国网湖南省电力有限公司湘西供电分公司, 湖南 吉首 416000)

摘要: 在高比例风电主导的可再生能源电力系统中, 利用储能系统平抑风电并网功率波动, 可提高风电在电网中的渗透率。为避免储能系统过度充放电, 提出了储能系统 SOC 分区控制模型及控制方法。在此基础上, 结合风功率预测信息, 提出了风储协调动态优化控制策略, 采用超前控制及滚动时域优化方法执行储能的动态控制, 在控制允许的范围内提前进行充放电。通过实际风电场数据的仿真算例分析, 验证了文章所提方法的优越性, 在有效降低风电并网功率波动的同时, 提高了储能容量的裕度、利用效率及使用寿命。

关键词: 储能; 功率波动; 分区控制; 风储协调; 超前控制; 动态优化控制

Energy storage system suppresses wind power fluctuation and capacity dynamic optimization control

CHEN Dazhun^{1,2}

(1. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Xiangxi Power Supply Company, State Grid Hunan Electric Power Company Limited, Jishou 416000, China)

Abstract: In a renewable energy power system dominated by a high proportion of wind power, the use of energy storage systems to stabilize wind power grid-connected power fluctuations can increase the penetration rate of wind power in the grid. In order to avoid excessive charging and discharging of the energy storage system, the SOC zone control model and control method of the energy storage system are proposed. on this basis, combined with the wind power prediction information, a wind-storage coordinated dynamic optimization control strategy is proposed, using advanced control and rolling time domain the optimization method executes dynamic control of energy storage, and performs charging and discharging in advance within the range allowed by the control. The simulation example analysis of actual wind farm data verifies the superiority of the method proposed in this paper. While effectively reducing the power fluctuation of wind power grid-connected, it also improves the margin of energy storage capacity, utilization efficiency and service life.

Key words: energy storage; power fluctuation; zone control; coordination of wind storage; advanced control; dynamic optimization control

0 引言

近年来, 风力发电在一次能源供应中的占比逐渐提高, 而风电功率的波动性和随机性给电网的安全运行和可靠控制带来了巨大挑战。利用储能系统配合风电运行、平滑风功率的波动, 是一种切实有效的解决方案, 能使风电场能尽量满足调度要求的输出功率, 提高并网效益^[1]。

储能技术平滑风电功率波动方面, 现有研究主要集中在低通滤波、小波包分解、频谱分析及经验模态分解等^[2-3]。文献[4-5]提出了考虑电池荷电状态和可变滤波时间常数相结合的储能控制方法; 为降低蓄电池的充放电次数, 提高使用寿命。文献[6]提出了一种采用低通滤波时间常数追踪荷电状态的功率确定方法。文献[7]采用一阶低通滤波器对风电功率进行滤波, 提出了一种基于变平滑时间常数的储能系统控制方法。基于低通滤波器方法平滑风电功率波动等控制策略虽然取得了一定的成果, 但其时间常数大小的选择和迟延问题将直接影响风电功率的平滑效果。文献[8-9]对基于小波分解的混合储能平抑新能源功率波动、储能容量配置及其控制策略进行了研究。与此同时, 变分模态分解方法、经验模态分解及其改进的集合经验模态分解方法被成功用于平滑风电功率控制策略之中^[10-12]。文献[13-14]采用基于模糊经验模态分解的储能系统平滑风电功率波动的控制策略, 可以有效地平抑风电功率波动, 避免储能电池过充电过放电, 稳定储能荷电状态。随着人工智能的发展, 神经网络和模糊理论等智能技术被应用于储能控制过程, 文献[15]提出了基于模糊自适应卡尔曼滤波的风电场储能系统功率控制, 有效地解决了低通滤波相位延迟的问题, 提高了储能系统的使用寿命。文献[16]提出了一种采用小容量电池储能系统的基于自适应线性神经元的协调控制方法, 实现了风电功率的平抑。

上述文献表明, 利用储能系统平抑风功率波动已有较多的研究, 并取得了良好的效果。但以上基于储能平抑风电功率波动的研究方法大多是

即时调节, 即只基于当前储能SOC输出能力评估的控制策略, 而忽略了SOC累计过程以及未来的风电功率波动对当前时刻储能处理的影响, 电池的容量得不到充分的利用。同时, 部分文献虽然考虑了从减少充放电次数的方面来提高储能系统的使用寿命, 但对于避免储能系统过度充放电方面的控制方法未进行深入研究。

综上所述, 为综合考虑过度充放电对储能系统寿命的影响以及电网对储能系统平抑未来风电功率波动的出力能力需求, 本文提出了储能系统SOC分区控制模型, 并针对各个分区给出了相应的控制方法。利用风电功率预测信息, 提出了风储协调动态优化控制策略, 实现了储能时刻保持合适的充放电水平。通过实际风电场数据的仿真算例分析, 验证了本文所提方法的优越性, 在有效降低风电并网功率波动的同时, 减小了储能电池进入死区的概率, 提高了储能容量的裕度、利用效率及使用寿命。

1 储能状态控制方法

储能系统的SOC作为最重要的运行指标之一, 控制其合理的运行区间, 可以保证足够的调整裕度和不过充电或过放电, 以应对更长调度周期的风电不确定性和提高电池的使用寿命。因此, 将储能系统SOC的状态划分为危险区间、返回区间、预警区间和正常区间四个部分, 如图1所示。

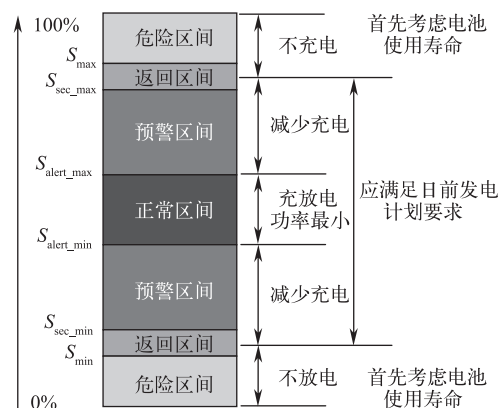


图1 储能系统SOC分区控制示意图

Fig. 1 Schematic diagram of energy storage system SOC zone control

(1) 危险区间

当储能系统SOC满足 $S < S_{\min}$ 或 $S > S_{\max}$ 时 (S 为SOC值的大小) 为危险区间, 此时, 需要对其充电和放电进行限制, 防止储能电池过度充电或者放电, 影响储能系统使用寿命。限制规则如下

$$P_{bt} = \begin{cases} \max(0, P_{dt\max} - P_{wt}) \geq 0 & S > S_{\max} \\ \min(0, P_{dt\min} - P_{wt}) \leq 0 & S < S_{\min} \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_{bt} 为储能输出功率; $P_{dt\max}$ 、 $P_{dt\min}$ 为风储联合系统出力的上限和下限; P_{wt} 为下一时刻 t 的风功率预测值。当SOC进入危险区时, 令标识 $\text{flag}=1$ 。

(2) 返回区间

在危险区间和正常区间之间设置返回区间, 以防止SOC从危险区间返回预警区间过程中再次进入危险区间, 避免储能系统SOC频繁越限。若SOC满足 $S < S_{\text{sec_min}}$ 或 $S > S_{\text{sec_max}}$ 且 $\text{flag}=1$, 则说明SOC还处于返回区间, 仍保持危险区间的控制方法; 若SOC满足 $S > S_{\text{sec_min}}$ 或 $S < S_{\text{sec_max}}$ 且 $\text{flag}=1$, 则离开返回区间进入到预警区间, 相应的控制模型切换到预警区间控制方法, 并令 $\text{flag}=0$ 。

(3) 预警区间

当储能系统SOC满足 $S_{\min} < S < S_{\text{alert_min}}$ 或 $S_{\text{alert_max}} < S < S_{\max}$ 时, SOC处于预警区间, 通过优化控制未来周期内的储能功率, 促使回到正常区间内; 同时, 可利用功率预测信息提前预留容量空间, 从而更好地实现储能系统有限容量的合理利用。如令优化周期内SOC水平趋于50%, 其控制策略的数学模型为

$$\begin{cases} \max \sum_{t=1}^m (S_t - 50\% S_{\text{rate}})^2 \\ \text{s.t.} \begin{cases} S_t = S_0 - \sum_{k=1}^t \eta_k P_{bk} \Delta t / S_{\text{rate}} \\ P_{dt\min} \leq P_{bt} + P_{wt} \leq P_{dt\max} \\ P_{b\min} \leq P_{bt} \leq P_{b\max} \\ t = 1, 2, \dots, m \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中, t 为储能控制时间间隔; S_0 为储能系统SOC当前时刻值; S_t 为 t 时刻的值; S_{rate} 为储能额定容量。

(4) 正常区间

当SOC满足 $S_{\text{alert_min}} < S < S_{\text{alert_max}}$ 时, 储能系统SOC处于正常区间, 控制逻辑如式(3)所示,

控制目标使储能系统的充放电功率最小。

$$\begin{cases} P_{dt\min} \leq P_{wt} \leq P_{dt\max}, P_{bt} = 0 \\ P_{wt} > P_{dt\max}, P_{bt} = P_{dt\max} - P_{wt} \\ P_{wt} < P_{dt\min}, P_{bt} = P_{dt\min} - P_{wt} \end{cases} \quad (3)$$

2 风储协调动态优化控制

2.1 风储协调动态优化控制

合理控制风电场储能系统的充放电, 可有效平滑风速的不确定性而导致并网功率波动。根据能量守恒定理, t 时刻并网功率、风电功率和储能功率三者的关系可表示为

$$P_g(t) = P_w(t) + P_b(t) \quad (4)$$

式中, $P_g(t)$ 为并网功率; $P_w(t)$ 为风电功率; $P_b(t)$ 为储能功率。

风电场运行期 T 内相邻时刻风电出力的差值定义为输出功率波动率, 可表示为

$$\Delta P(t) = P(t + \Delta t) - P(t) \quad (5)$$

式中, $t \in [0, T]$; Δt 为采样频率。

在运行周期 T 内, 根据风电场接入电力系统技术相关规定, 储能系统配合风电场将风电功率限制在以 $\pm P_{\text{limit}}$ 为带宽的范围内波动, 可表示为

$$-P_{\text{limit}} \leq P(t + \Delta t) - P(t) \leq P_{\text{limit}} \quad (6)$$

式中, P_{limit} 为限定波动率。

储能系统在满足自身约束条件下, 其充放电原理如图2所示。

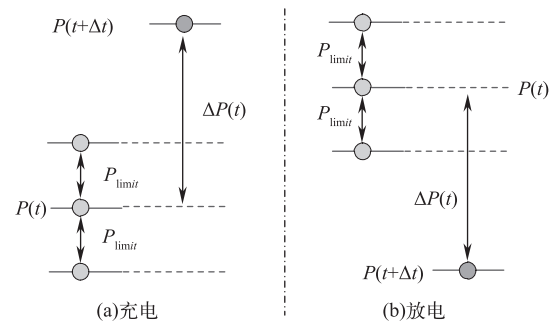


图2 电池储能系统功率输入/输出原理图

Fig. 2 Schematic diagram of power input/output of battery energy storage system

根据上述分析, 储能系统当前时刻的SOC值是之前所有时刻历史充放电累积的结果, 进而影响未来时刻的储能出力。仅考虑当前时刻储能系

统的充放电往往会导致未来某些时刻储能电池的过充电、过放电和风电功率波动的越限,影响电池的使用寿命及平抑风电功率的效果。

由式(4)、式(5)可得到 t 时刻风储联合出力功率波动 $\Delta P_g(t)$,可表示为

$$\begin{aligned}\Delta P_g(t) &= P_g(t) - P_g(t - \Delta t) \\ &= P_w(t) + P_b(t) - P_g(t - \Delta t)\end{aligned}\quad (7)$$

式中, $P_w(t)$ 为当前时刻风电功率; $P_g(t - \Delta t)$ 为前一时刻风储联合输出功率。

令 $\Delta P_z(t) = P_w(t) - P_g(t - \Delta t)$,则有

$$\Delta P_g(t) = \Delta P_z(t) + P_b(t) \quad (8)$$

将风电功率预测结果作为决策因素之一来控制储能系统当前时刻的充放电行为,为未来时刻提供更多的出力或充电空间。结合 $\Delta P_z(t)$ 波动状态,其储能充放电控制策略如下。

(1) 保持状态

当前时刻及未来周期 T_0 (风电功率预测周期)内的所有时刻 $\Delta P_z(t)$ 均不越限。可表示为

$$P_b(t) = 0, \begin{cases} -P_{limit} \leq \Delta P_z(t) \leq P_{limit} \\ \& -P_{limit} \leq \Delta P_z(t + k\Delta t) \leq P_{limit} \\ (k = 1, \dots, \frac{T_0}{\Delta t} - 1) \end{cases} \quad (9)$$

(2) 充电状态

当前时刻 $\Delta P_z(t)$ 的波动大于 P_{limit} ,或者 $\Delta P_z(t)$ 的波动虽然在规定的范围内,但在未来周期 T_0 内需储能提供出力,可表示为

$$P_b(t) = \Delta P_z(t) - P_{limit}, \begin{cases} \Delta P_z(t) > P_{limit} \\ -P_{limit} \leq \Delta P_z(t) \leq P_{limit} \\ \& \Delta P_z(t + k\Delta t) < -P_{limit} \\ (k = 1, \dots, \frac{T_0}{\Delta t} - 1) \end{cases} \quad (10)$$

(3) 放电状态

当前时刻 $\Delta P_z(t)$ 的波动小于 $-P_{limit}$,或者 $\Delta P_z(t)$ 的波动虽然在规定的范围内,但在未来周期 T_0 内需储能进行充电,可表示为

$$P_b(t) = -\Delta P_z(t) - P_{limit}, \begin{cases} \Delta P_z(t) < -P_{limit} \\ -P_{limit} \leq \Delta P_z(t) \leq P_{limit} \\ \& \Delta P_z(t + k\Delta t) > P_{limit} \\ (k = 1, \dots, \frac{T_0}{\Delta t} - 1) \end{cases} \quad (11)$$

储能系统约束条件

$$\begin{cases} E_{ESS}(t) = E_{ESS}(t - \Delta t) - P_b(t) \times \Delta t / \eta \\ SOC(t) = E_{ESS}(t) / E_{ESS, rated}(t) \\ 0 \leq SOC(t) \leq 1 \\ -P_{ESS} \leq P_b(t) \leq P_{ESS} \end{cases} \quad (12)$$

式中, $E_{ESS}(t)$ 、 $P_{ESS}(t)$ 分别为 t 时刻储能电池的电量 and 放电功率; η 为充放电效率; $E_{ESS, rated}$ 、 $P_{ESS, rated}$ 分别为储能电池的额定容量和额定功率。

2.2 动态优化方法

在上述控制模型的基础上,采用滚动时域优化方法执行该控制策略。在一个原始风电功率采样时间内,用当前时刻的值作为初始值,基于风电功率预测得到一个控制周期(风电功率预测周期)储能系统充放电的最优序列。滚动到下一个采样时刻,这一特定周期同时向前平移,不断优化更新目标值,如此反复滚动进行。

滚动优化方法可将相邻两个控制周期有机地衔接起来,及时校正控制过程中出现的误差,同时通过不断滚动修正模型的实际状态,向前修正储能系统的充放电功率,从而在优化周期内得到较为平滑的风储联合功率。整体的控制策略流程如图3所示。

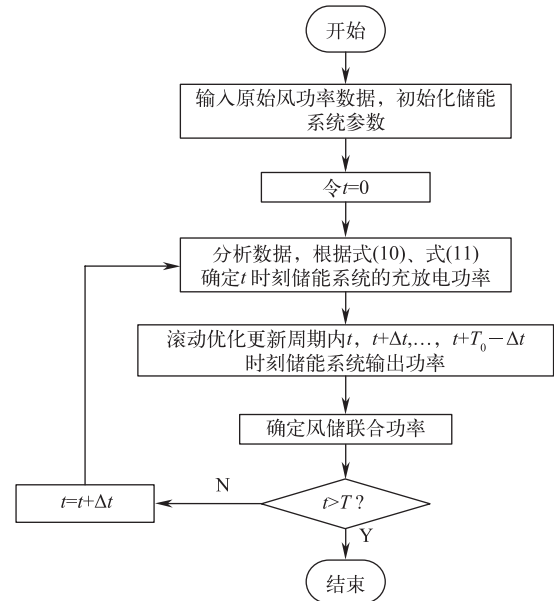


图3 储能平抑风功率动态优化控制流程

Fig. 3 Energy storage stabilizes wind power dynamic optimization control process

3 算例仿真分析

取某实际风电场数据进行仿真验证, 储能额定功率为20 MW, 额定容量为60 MW·h, 风电场装机容量为100 MW, 采样时间为15 min, 储能电池能量状态SOC初始值设为50%, SOC区间设为20%~80%, 允许并网功率波动设为5 MW。

3.1 评价指标

(1) 波动越限总量

波动越限总量为一个运行周期 T 内, 超过Lim数值的总和, 其计算公式为

$$\Delta P_{\Sigma} = \sum_{j=0}^{\frac{T}{\Delta t}} h(|\Delta P(t)| - \text{Lim}) \quad (13)$$

$$h(a) = \begin{cases} a & a > 0 \\ 0 & a \leq 0 \end{cases}$$

式中, Lim为风电并网功率允许波动的最大限值。

(2) 波动越限概率

其计算公式为

$$P_{\text{over}} = \frac{\sum_{j=0}^{\frac{T}{\Delta t}} f(|\Delta P(t)| - \text{Lim})}{T / \Delta t} \quad (14)$$

$$f(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}$$

3.2 仿真结果分析

为说明本文方法的优越性, 采用两种方案进行对比: 第一种方案, 不考虑风电功率预测信息, 只根据当前储能系统SOC的状态对风储联合出力目标值进行线性校正; 第二种方案, 根据超短期风电功率预测信息, 结合本文提出的SOC分区及风储协调动态优化控制策略来平抑风电功率波动, 储能的SOC返回区间设置为75%~80%及20%~25%, 预警区间设置为55%~80%及20%~45%, 正常区间设置为45%~55%。

某典型日实际风电出力和两种控制策略平滑后的联合出力如图4所示。从图4中可以看出, 风电场加入储能系统后, 可有效补偿风电出力的不

确定性, 将风电出力控制在要求范围内。

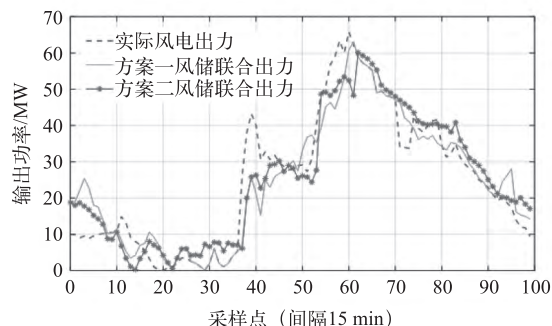


图4 不同控制方法平抑功率波动效果对比

Fig. 4 Comparison of the effects of different control methods on suppressing power fluctuations

下表为典型日实际风电出力、方案一风储联合出力和方案二风储联合出力的波动越限概率及波动越限总量的对比分析。

表 不同控制方案的控制效果比较

Tab. Comparison of control effects of different control schemes

控制方案	越限总电量 /MW·h	出力越限概率 (%)
无控制	1.077 6	51.38
方案一	0.269 8	9.72
方案二	0.019 8	2.98

由上表可知, 由于风电出力的不确定性, 实际风电功率越限总量及波动越限概率值均较大, 分别为1.077 6 MW·h和51.38%。加入储能装置之后, 采用方案一的控制策略, 其越限总量为0.269 8 MW·h, 越限概率为9.72%, 有效抑制了风电功率波动, 达到了很好的平滑效果。如采用方案二的控制策略, 其风电功率越限总量及波动越限概率值分别进一步下降到0.019 8 MW·h和2.98%, 平滑效果更佳。

图5为两种控制方法下储能系统的SOC变化曲线对比图。从图5中方案一SOC曲线可以看出, 在27~35 min以及61~68 min两个时间段内, 储能系统SOC已进入危险区间。由于方案一未采用风电功率预测信息来提前预先安排储能系统的容量空间, 导致SOC两次越限。而方案二根据未来风电出力提前预留充放电空间, 如在1~10 min时间段内, 储能系统的SOC偏低且风电出力偏小的情况下, 通过SOC分区控制方法,

减缓储能放电速度；又如在时间段38~50 min内，储能系统的SOC偏高且风电出力偏大的情况下，减缓储能充电速度，且在25~38 min时间段内提前放电为未来预留空间，提高了储能系统的容量利用效率。

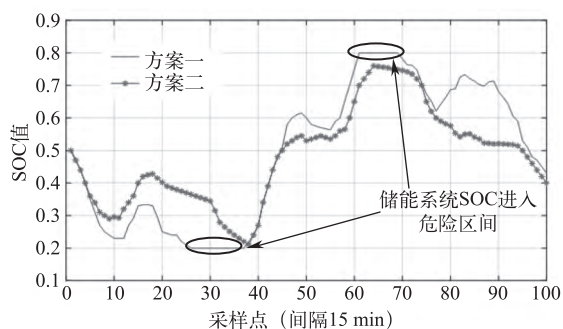


图5 不同控制方法储能系统SOC变化曲线

Fig. 5 SOC change curve of energy storage system with different control methods

图6为储能系统充放电功率曲线对比图。从图6中方案一输出功率曲线可以看出，在27~35 min和61~68 min两个时间段内，储能系统输出功率为0。由于在这两个时间段内，储能系统的SOC均进入了危险区间，通过分区控制方法对其充电和放电进行了限制，防止了储能电池过度充电或者放电。验证了本文储能状态控制方法的有效性。

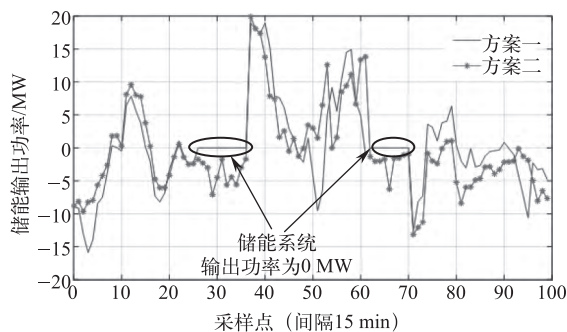


图6 不同控制方法储能系统充放电功率变化

Fig. 6 Variation of charging and discharging power of energy storage system with different control methods

从以上试验结果可知，方案二通过优化容量空间降低了储能系统SOC的越限概率，从而降低了风储联合出力的越限概率及越限总量（绝对值），在有效降低风电并网功率波动的同时，减小了储能电池进入死区的概率，提高了储能容量

的裕度、利用效率及使用寿命，验证了本文所提方法的有效性。

4 结束语

利用风电功率预测信息，本文提出了风储协调动态优化控制策略，使风储联合系统协调运行更加灵活、可靠，在有效降低风电并网功率波动的同时，提高了储能系统的使用寿命和运行经济性。

1) 方案一未对电池SOC进行控制，在一个周期 T 内出现了两次越限，而方案二采用SOC分区控制模型及控制方法，防止了SOC进入危险区间，可有效避免过度充放电，在一定程度上提高了电池的使用寿命。

2) 相比于方案一，方案二通过采用风储协调动态优化控制策略，在控制允许的范围内提前预留SOC空间。在一个周期 T 内，出力越限概率由9.72%下降到了2.98%，可有效提高储能的容量裕度及利用效率。

3) 下一步为更好地改进储能系统SOC优化控制策略，为风储系统运行风险提供有效的衡量工具，需进一步对风电出力的不确定性进行理论建模。

参考文献

- [1] 袁弘, 李建祥, 刘海波, 等. 考虑功率预测的储能电站动态优化控制方法[J]. 电子技术应用, 2015, 41(7): 121-124.
- [2] 吴铁洲, 王越洋, 张颂冀. 混合储能平抑微电网功率波动方法研究[J]. 电气应用, 2017, 36(21): 16-21.
- [3] 徐斌, 李珊. 基于双馈机组分散协调控制含储能风电场无功优化研究[J]. 电气应用, 2018, 37(21): 22-28.
- [4] GUO Li, ZHANG Ye, WANG Chengshan. A new battery energy storage system control method based on SOC and variable filter time constant[C]. Washington: IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies(ISGT), IEEE, 2012: 1-7.

- [5] 张野, 郭力, 贾宏杰, 等. 基于电池荷电状态和可变滤波时间常数的储能控制方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 34-38, 62.
- [6] 丁明, 林根德, 陈自年, 等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 1-6, 184.
- [7] 谢俊文, 陆继明, 毛承雄, 等. 基于变平滑时间常数的电池储能系统优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 96-102.
- [8] 卢芸, 徐骏. 基于小波包分解的风电混合储能容量配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 149-154.
- [9] 吴振威, 蒋小平, 马会萌, 等. 用于混合储能平抑光伏波动的小波包-模糊控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 317-324.
- [10] 刘颖明, 王晓东, 彭朝阳. 计及储能出力水平的平滑风电功率模型预测控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1723-1731.
- [11] 袁铁江, 彭生江, 胡克林, 等. 面向煤基低碳能源战略的大规模风/光-氢储能-煤多能耦合系统[J]. 电气应用, 2019, 38(1): 10-15.
- [12] 梁开勋, 蔺红. 计及设备特性的风氢系统混合储能容量优化[J]. 现代电子技术, 2021, 44(21): 1-7.
- [13] 杨锡运, 曹超, 李相俊, 等. 基于模糊经验模态分解的电池储能系统平滑风电出力控制策略[J]. 电力建设, 2016, 37(8): 134-140.
- [14] YAN Z, FANLIN M, RUI W, et al. A stochastic MPC based approach to integrated energy management in microgrids[J]. Sustainable Cities and Society, 2018 (41): 349-362.
- [15] TANG Xisheng, SUN Yushu, ZHOU Guopeng, et al. Coordinated control of multi-type energy storage for wind power fluctuation suppression[J]. Energies, 2017, 10(8): 1212.
- [16] 王晓东, 张磊, 姚兴佳, 等. 基于模糊自适应卡尔曼滤波的风电场储能系统功率控制[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1465-1470.

作者简介

陈大准（1997—），男，硕士，工程师，研究方向为电力系统继电保护及可再生能源并网发电技术。

（收稿日期：2021-07-24）