

考虑储能荷电状态平抑风电功率的 抛物线规则变滤波时间常数方法

冯春生, 杨秀媛, 陈小波

(北京信息科技大学自动化学院, 北京市 海淀区 100192)

Parabola Regular Variable Filtering Time Constant Method Considering Energy Storage SOC State to Smooth Wind Power

FENG Chunsheng, YANG Xiuyuan, CHEN Xiaobo

(College of Automation, Beijing Information Science and Technology University, Haidian District Beijing 100192, China)

摘要: 利用电池储能系统平滑风电功率波动提高风力发电并网的可靠性, 考虑储能系统荷电状态的调节问题, 提出一种抛物线规则变滤波时间常数的电池储能系统平滑风电功率控制策略。通过抛物线规则变滤波时间常数算法获得风储系统有功功率并网目标值, 经过变化率限制、荷电状态功率修正、功率限幅等环节获得电池储能系统实际出力, 下达给储能变流器进行对电池的充放电动作, 平滑风电功率, 保证 SOC 维持在安全范围。通过 MATLAB 仿真验证该策略的可行性和有效性。

关键词: 风力发电; 电池储能系统; 变滤波时间常数; 平滑风电功率; 荷电状态

Abstract: It is feasible to enhance the grid-connecting reliability of wind power generation by smoothing the wind power fluctuation with the help of battery energy storage system. Considering the adjustment of state of charge (SOC) in energy storage system, a control strategy of smoothing wind power fluctuation based on parabola regular variable filtering time constant was proposed. Through parabola regular variable filtering time constant algorithm the target value of grid-connected active power of energy storage system was obtained, and through such links as restriction of change rate, correction SOC and power amplitude limiting the actual power output of battery energy storage system was determined and issued to stored energy converter to perform charging and discharging of the battery. Thus, the wind power fluctuation could be smoothed and the SOC could be maintained within the safe range. Simulation results show that the proposed control strategy is feasible and effective.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51377011)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51377011)

Keywords: wind power generation; battery energy storage system; variable filtering time constant; smooth wind power; state of charge (SOC)

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0133

0 引言

随着社会的发展, 传统能源经过人类日益开发和利用日渐枯竭, 新能源引起人们越来越多的关注^[1]。风能作为一种清洁可再生能源, 以其无污染、可再生、分布广等特点, 成为研究热点^[2], 风能具有随机性、间歇性的特点^[3]。近几年储能系统及电动汽车^[4-6]用来平抑风电波动。储能系统较高的充放电效率、响应时间较短、配置灵活等特点^[7]受到广泛使用。风力发电系统中配置一定容量和功率的储能系统可有效地平抑风电波动, 提高风能的利用率, 保证电网的稳定性^[8-9]。

一阶低通滤波原理是平抑风电波动中最常用的方法^[10], 目前国内外学者做了大量工作取得了一定进展。文献^[11-13]提出了根据当前储能系统所处的荷电状态 (state of charge, SOC) 区间改变滤波时间常数从而达到功率平滑和 SOC 控制的效果, 但设计规则相对简单, 超出 SOC 限值时, 不能较快回到安全区间; 文献^[14-15]对 SOC 区间进行了更深入的分析及划分, 考虑了限幅环节, 从而得到更优的滤波时间常数; 文献^[16-17]采用了智能算法对滤波时间常数进行动态寻优, 有效地减小了储能系统所需的容量并获得了良好的平滑效果; 文献^[18]分段采用不同滤波时间常数进

行平滑风电功率波动的方法达到了平滑目的，但没有考虑储能系统充放电限制及 SOC 调节的问题；文献 [19] 设计了模糊控制策略以灵活自适应调节低通滤波器时间常数，但是仅以时间常数的变化改变系统充放电功率值，不能避免因储能系统滞后性导致的 SOC 越限情况的发生。

针对以上问题，提出使用抛物线规则改变滤波时间常数，动态考虑 SOC 状态以增加叠加功率方法平抑风力发电波动的控制策略（Parabola regular variable filtering time constant method considering energy storage SOC state to smooth wind power, PVTSW）。对风功率输入样本通过抛物线规则变滤波时间常数的低通滤波平滑处理，引入变化率限制模块、SOC 功率修正模块、功率限幅模块，起到有功功率限制保护和避免 SOC 的频繁切换的作用。

1 储能系统的基本平滑控制策略

图 1 所示是风力发电与储能组成的系统结构示意图， P_w 为风力发电风功率； P_{bat} 为电池输出功率； P_{bat_ref} 为电池功率参考值； P_{ref} 为并网功率参考值。风力发电功率与风速有关具有波动性，通过储能系统补偿有功功率 P_{bat} ，从而获得较为平滑的并网功率参考值 P_{ref} 。 P_{bat_ref} 根据监控系统采集到的风功率 P_w 而进行变化，再将控制充放电指令下达到储能逆变器中。

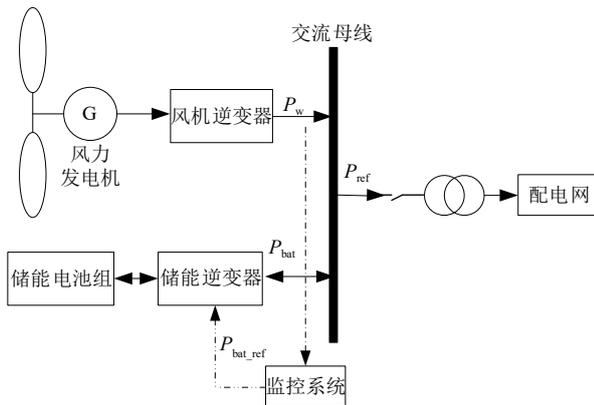


图 1 系统示意图
Fig. 1 System diagram

图 2 所示为常用的定滤波时间常数的平滑控制模型， P_w 、 P_{bat} 、 P_{ref} 与图 1 相对应，分别为风力发电风功率、储能系统补偿有功功率及并网功

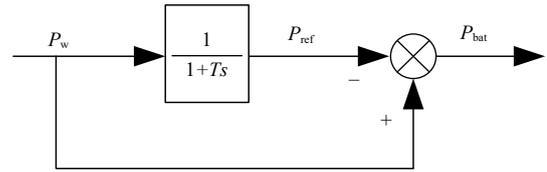


图 2 基于定滤波时间常数的平滑控制模型
Fig. 2 Smooth control model based on fixed filter time constant

率参考值。含有大量高频波动分量的风功率 P_w 经过一阶低通滤波器的过滤，可获得较平滑的并网功率参考值 P_{ref} ，平滑效果与滤波时间常数 T 有关 [20-21]，随着滤波时间常数增大，平滑效果更佳，但同时所需储能设备容量增大，成本增高。

并网参考功率值 P_{ref} 为：

$$P_{ref} = \frac{1}{1+Ts} P_w \quad (1)$$

式中： T 为滤波时间常数； P_w 、 P_{bat} 、 P_{ref} 关系如式 (2) 所示，当 $P_w < P_{ref}$ 时，储能系统释放功率，当 $P_w > P_{ref}$ 时，储能系统吸收功率。

$$P_{bat} = P_w - P_{ref} = \frac{Ts}{1+Ts} P_w \quad (2)$$

实际风电场中的数据属于离散数据，故需对式 (2) 进行离散化得：

$$P_{ref}(n) = \frac{T}{T+\Delta t} P_{ref}(n-1) + \frac{\Delta t}{T+\Delta t} P_w(n) \quad (3)$$

$$P_{bat}(n) = \frac{T}{T+\Delta t} (P_w(n) - P_{ref}(n-1)) \quad (4)$$

式中： n 表示第 n 个采样点； Δt 为信号采样步长。

2 抛物线规则变滤波时间常数的储能系统控制方法

储能系统在进行平抑风电作业时，SOC 会随着风电功率波动而变化，为避免储能系统陷入危险荷电状态区间，防止储能系统过充、过放，从而降低储能系统寿命，增加额外经济损失。基于此，本文提出一种带有 SOC 功率修正的可变滤波时间常数的储能系统控制方法，原理控制框图见图 3 所示， P_w 为历史风功率； SOC_{ref} 为 SOC 目标值； SOC 为当前储能 SOC 值； ΔSOC 为误差信号； P_{soc} 为 SOC 功率修正环节输出的控制量； P_1 为经过变化率限制后的目标值； P_2 为 P_1 与 P_{soc} 的代数

和, 经过限幅环节后得到功率 P_3 。

图4表示电池电量的划分区间。

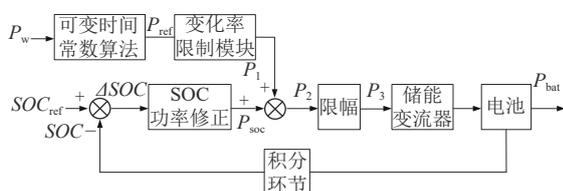


图3 控制框图

Fig. 3 Block diagram of the proposed control method

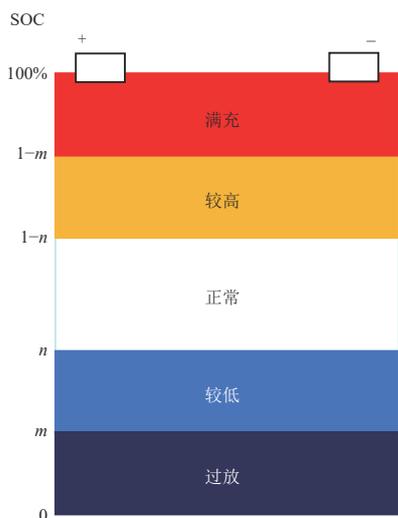


图4 电池电荷状态示意图

Fig. 4 Diagram of battery charge state

为了更方便地了解储能电池的健康状况, 本文将电池的健康状况定义为3部分: 满充和过放定义为不健康状态、较高和较低定义为亚健康状态、正常定义为健康状态。

抛物线规则可滤波变时间常数的控制方法, 根据动态SOC值, 依靠设定的抛物线控制规则改变滤波时间常数 T , 从而间接地动态调整储能充放电功率, 以维持储能SOC在一定范围内的变化, 防止储能系统的寿命因充放电功率过大而减小。

表1根据电池电量区间划分的变滤波时间常数 T 控制规则。将电池状态划分为过放、较低、正常、较高、满充等5个区间, 显然 m 和 n 是SOC区间分段的转折点, 其取值决定于电池充放电深度、外部特性等, 需根据实际情况进行选取。储能系统在运行中的大多数时间是处于正常情况, 此时 T 取 T_0 , 故 T_0 的选取是控制规则中比较重要的一环, 有如下指标: 一是储能系统一般用于分钟至小时级的功率平抑, 故 T_0 一般不要小于60s。二是结合需要进行平抑作业的风电功率波

表1 变滤波时间常数 T 控制规则

Table 1 Control rule table of variable filtering time constant T

电池SOC区间	电池状态	滤波时间常数
$[0, m)$	过放	$T_c = a(SOC - 0.5)^2 + b$ $T_d = 0$
$[m, n)$	较低	$T_c = a(SOC - 0.5)^2 + b$ $T_d = k_1 SOC + f_1$
$[n, 1-n)$	正常	$T_c = T_0$ $T_d = T_0$
$(1-n, 1-m]$	较高	$T_c = k_2 SOC + f_2$ $T_d = a(SOC - 0.5)^2 + b$
$(1-m, 1]$	满充	$T_c = 0$ $T_d = a(SOC - 0.5)^2 + b$

动频段。 T_c 、 T_d 分别是充电和放电工况下的滤波时间常数。

可变滤波时间常数 T 变化示意图如图5所示。由图5可知, 当SOC处于 $n \sim (1-n)$ 状态时, T 取 T_0 ; 当SOC小于 n 时, 表示电量已偏离正常范围内, 属于较低甚至过放的状态, 若处于充电工况, 则以抛物线作为 T 的变化曲线, 放电工况则以一次函数作为 T 的变化曲线($m < SOC < n$); 当SOC大于 $(1-n)$ 时, 表示电量属于较高甚至满充的状态, 若处于放电工况, 也同样以抛物线作为 T 的变化曲线, 充电工况以一次函数作为 T 的变化曲线($1-n < SOC < 1-m$)。选取抛物线作为 T 的变化曲线的目的是当SOC趋近于危险(SOC过大或过小)时, 变化率越大, T 值变化越快, 能够更加适应风储系统平抑功率波动的任务。

充放电工况则由式(4)判断, 若 $P_{bat} > 0$, 则代表储能系统属于充电工况, 反之则属于放电工况。

为满足风电并网指标, 使其在一定时间内(1min或10min)的最大有功功率变化量在电网允许范围内, 实现友好并网, 本文考虑在可变滤波时间常数模块后加入变化率限制模块。具体实现方法如图6所示。其中 T_s 为规定时间(1min

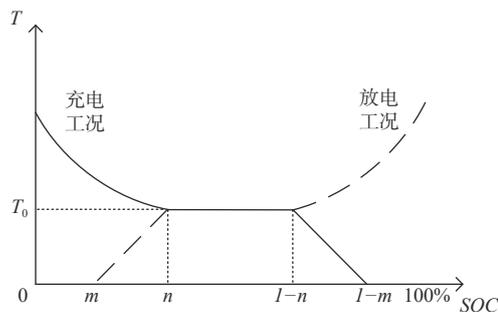


图5 可变滤波时间常数 T 的变化

Fig. 5 Schematic diagram of variable filtering time constant T

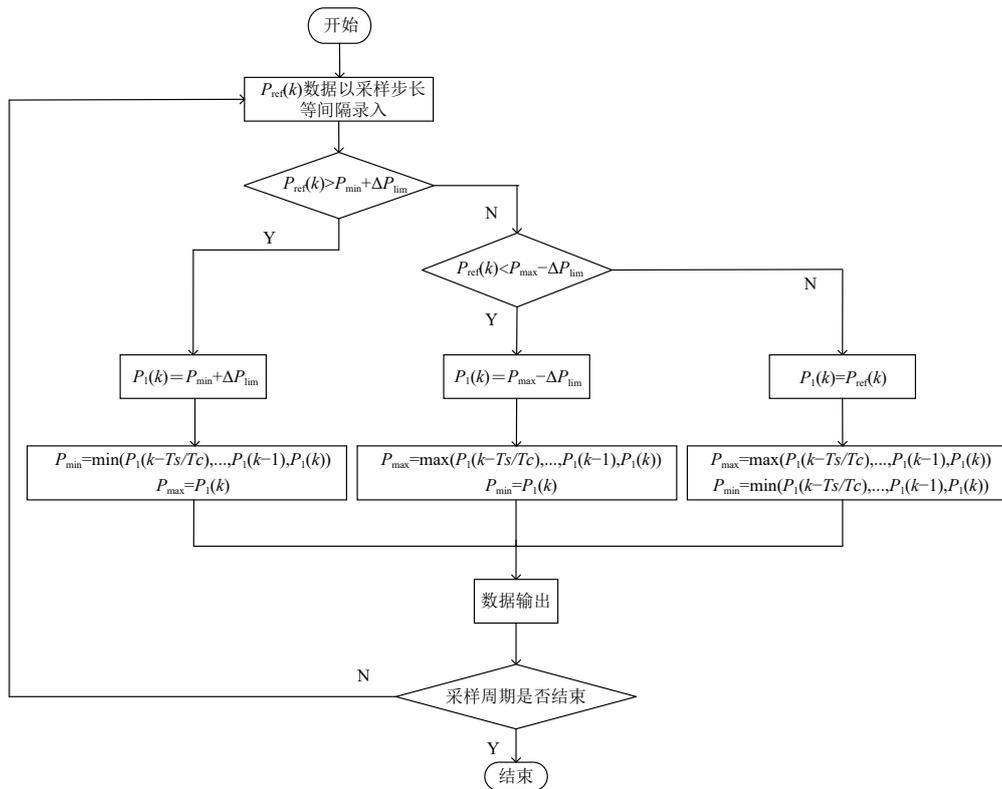


图 6 变化率限制流程

Fig. 6 Flow chart of restriction of change rate

或 10 min)， T_c 为控制周期； ΔP_{lim} 为设定有功功率变化最大允许值。设计思路为：当上一环节的输出数据进入环节后首先与下限进行对比，是否超过允许限定值，如若超过限定值，那么输出则取限定值与最小值之和，并更新最小值和最大值，最小值为历史输出值的最小值，最大值为此次输出功率值。如若未超过限定值，将输入功率值与最大值进行比较。如果超过最大值允许的限定值，那么输出功率值取最大值与限定值之差，接着更新最大值和最小值，最大值为历史输出值的最大值，最小值为此次输出功率值。如果未超过最大值允许的限定值，那么输出值就为此次输入值，也代表着该功率值未超限，接着更新最大值和最小值，最大值为历史输出值的最大值，最小值为历史输出值的最小值。判断后进行数据输出，判断采样周期是否结束，未结束则录入下一个功率值并进行上述判断及输出处理，若采样周期结束则程序结束。

在储能系统运行过程中，一旦能量达到限值时，系统便不能主动对 SOC 进行调节，只能依靠

随机性变化的风功率对其进行调节，显然这样的方法并不实际，故而引入 SOC 功率修正 [22-23] 模块使其作用于储能系统的能量达到上下限值。SOC 功率修正模块如图 7 所示。

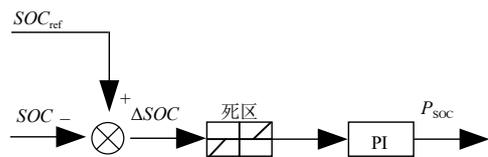


图 7 SOC 功率修正模块

Fig. 7 Power correction module for SOC

模块输入为系统当前 SOC 值和给定值 SOC_{ref} （通常取 50%），得到一个误差信号 ΔSOC ，经过死区控制，避免了 SOC 频繁的控制，也避免了正常情况下的平抑效果的影响。接着通过 PI 控制模块，输出为 SOC 功率修正模块控制量 P_{soc} 。

控制策略可表示如下：

$$\Delta SOC = SOC_{ref} - SOC \quad (5)$$

$$\Delta SOC = \begin{cases} \Delta SOC & |\Delta SOC| \geq c_1 \\ 0 & |\Delta SOC| < c_1 \end{cases} \quad (6)$$

$$P_{SOC} = \Delta SOC \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \quad (7)$$

$$P_2 = P_1 + P_{SOC} \quad (8)$$

$$P_3 = \begin{cases} 0 & SOC \geq c_2 \text{ 且 } P_2 > 0 \text{ 或 } SOC \leq c_3 \text{ 且 } P_2 < 0 \\ P_L & SOC \geq c_2 \text{ 且 } P_2 \leq P_L \\ P_2 & SOC \geq c_2 \text{ 且 } P_H < P_2 \leq 0 \text{ 或 } c_2 > SOC > c_3 \\ & \text{或 } SOC \leq c_3 \text{ 且 } P_L > P_2 \geq 0 \\ P_H & SOC \leq c_3 \text{ 且 } P_2 \geq P_H \end{cases} \quad (9)$$

式中： c_1 为调节死区； c_2 为功率达到上限时的SOC值； c_3 为功率达到下限时的SOC值； P_L 为设定的限制放电功率值； P_H 为设定的限制充电功率值。 P_3 为正时，表示储能系统正在充电，为负时，表示储能系统正在放电。

为了保护电池的安全性，采用式(9)所示的功率限幅策略。当储能电池SOC过高时，对放电功率进行限幅措施， $P_L \leq P_2 \leq 0$ ；当储能电池SOC过低时，对充电功率进行限幅措施， $0 \leq P_2 \leq P_H$ 。

3 算例分析与仿真验证

3.1 平抑效果指标

为验证本文方法的有效性，评估如下指标：

1) 1 min有功功率波动量最大值。

$$\Delta P_{1\min_max} = \max\{P(t+\Delta t) - P(t)\} t = 1, 2, \dots, i-1 \quad (10)$$

式中： $\Delta P_{1\min_max}$ 为1 min有功功率波动量最大值； $P(t+\Delta t)$ 为 $t+\Delta t$ 时刻功率值， Δt 为1 min； $P(t)$ 为 t 时刻功率值； i 为最大时刻。

2) 10 min有功功率波动量最大值。

$$\Delta P_{10\min_max} = \max\{P(t+\Delta t) - P(t)\} t = 1, 2, \dots, i-1 \quad (11)$$

式中： $\Delta P_{10\min_max}$ 为10 min有功功率波动量最大值， Δt 为10 min。

3) 标准差。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (12)$$

式中： σ 为标准差； N 为数据个数； $x_i (i=1, \dots, N)$ 为数据值； $\mu = 1/N(x_1 + x_2 + \dots + x_N)$ 为数据平均值。该指标越小，则功率曲线的平滑度和平抑效果越好。

3.2 仿真验证

在MATLAB中搭建模型进行仿真验证。算例采用某风电场历史风电数据。风电场由单台额定功率为2 MW的25台机组组成，储能系统的功率为25 MW，额定容量为10 MW·h，SOC初始

值为50%，储能容量上下限分别为8 MW·h和2 MW·h。采用抛物线规则变滤波时间常数的储能系统控制方法，达到平抑风电功率的同时保护电池。 ΔSOC 死区设置为10%， m 和 n 分别为20%和40%； a 和 b 分别为0.5和850； k_1 和 k_2 分别为45和-45； k_p 为5； k_i 为0.1； c_2 和 c_3 分别为80%和20%； P_H 和 P_L 设置为储能系统功率容量的10%。为验证所提方法的有效性，采用3个案例进行平抑对比分析，平抑效果见图8至图10。

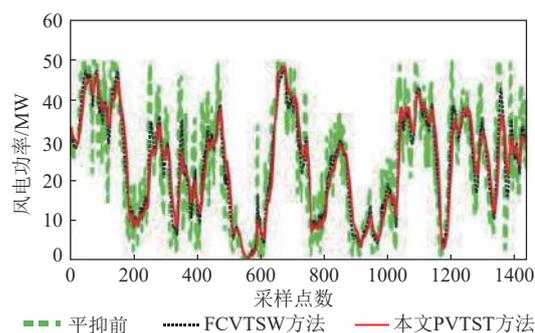


图8 案例1及其平抑效果

Fig. 8 Case 1 and smoothing effect

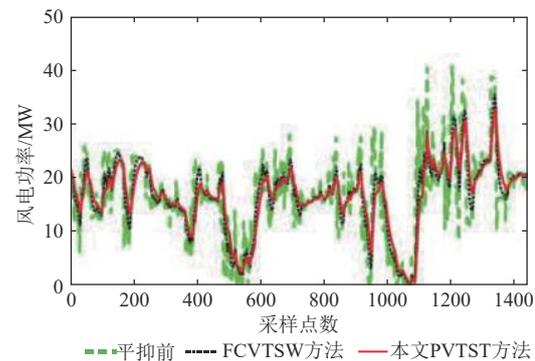


图9 案例2及其平抑效果

Fig. 9 Case 2 and smoothing effect

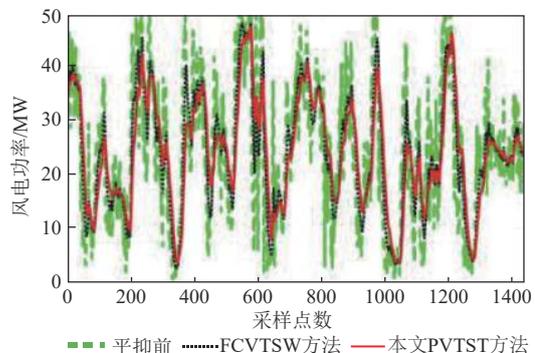


图10 案例3及其平抑效果

Fig. 10 Case 3 and smoothing effect

图中给出了平抑前风电功率曲线和采用本文提出方法得到的曲线，并且将本文结果与文献[19]

模糊控制变滤波时间常数方法的平抑效果进行了比较。3 个案例平抑前后的评价指标见表 2。

表 2 评价指标比较
Table 2 Comparison evaluation indices

算例	参数类型	ΔP_{1min_max}	ΔP_{10min_max}	σ
Case1	原始功率	25.21	34.35	14.41
	FCVTSW方法	3.00	9.58	12.50
	PVTSW方法	2.11	7.66	12.06
Case2	原始功率	21.67	24.34	7.65
	FCVTSW方法	2.72	6.64	6.47
	PVTSW方法	2.00	5.23	6.01
Case3	原始功率	18.20	37.67	13.18
	FCVTSW方法	3.35	9.52	10.99
	PVTSW方法	2.22	7.64	9.94

通过图 8 至图 10 以及表 2 可知，本文所提方法可以达到良好平滑风功率曲线的效果，且有效降低风电波动程度。满足风电场接入电力系统技术规定。以上两种平抑算法都能满足并网要求，但通过本文方法得到的并网功率曲线更加平滑，对降低风电功率波动效果更好。图 11 至图 13 为本文 SOC 功率修正模块优化效果图。

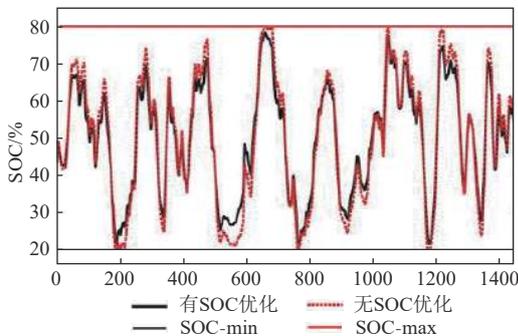


图 11 电池储能系统 SOC 对比
Fig. 11 Comparison of BESS SOC

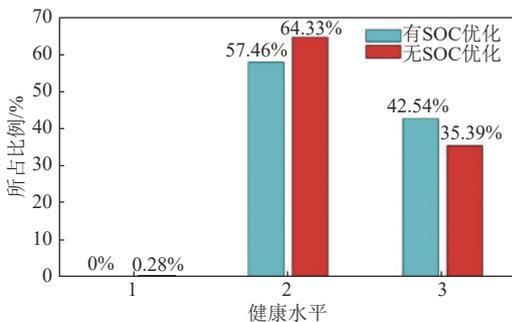


图 12 健康状况对比
Fig. 12 Comparison chart of health status

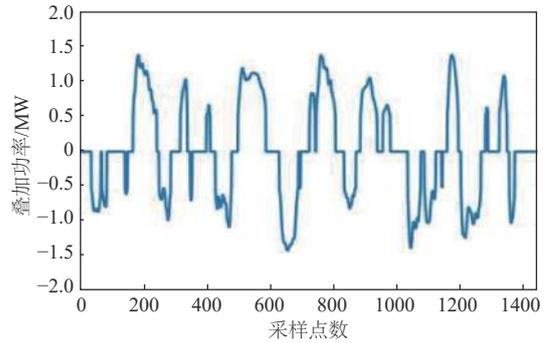


图 13 叠加功率曲线
Fig. 13 Superposed power curve

综合几张图可知，当未采用 SOC 优化控制时，储能系统出现了过充过放情况的发生，对电池造成伤害，并且 SOC 发生越限次数占比可达 0.28%，通过上文对电池健康状况的定义区间，采用 SOC 优化控制后的两者所占比例分别为 57.46% 和 42.54%，皆优于未经 SOC 优化控制的对应数据，表明健康效果更好。本文 SOC 功率修正模块的优化控制通过释放叠加功率，有效避免了储能系统处于不健康区间的使用并增加了储能系统位于健康区间的使用，达到延长储能元件寿命的目的。

储能系统充放电功率限幅效果如图 14 至图 15 所示。更改储能系统初始 SOC 为 15% (<20%)，在第 635 个采样点将 SOC 值叠加 15% (使该时刻 SOC 值大于 80%)。观察限幅前后的储能系统有功功率曲线可知，由于限幅环节的设置，在 SOC 低于 20% 区间内，储能系统进行充电作业，将控制其充电功率并有效限幅至 $[0, P_H]$ ，保护储能系统。当到第 62 点时，储能系统 SOC 高于 20% 方才进行放电作业。在第 636, 642, 645 三个采样点时，由于平抑风电作业需储能进行充电动作，但由于此时储能系统 SOC 已外加至 80% 以上，不能进行充电作业，故而此时储能功率为 0。验证了功率限幅策略的可行性。

4 结论

1) 仿真结果表明，本文所搭建的动态考虑 SOC 状态结合抛物线规则变滤波时间常数进行平抑风力发电波动的控制策略，可以较好的实现风功率波动平抑效果，保证了储能系统避免过充与过放的发生，从而延长了电池的使用寿命。

2) 功率限幅和 SOC 优化控制可以改变充放电

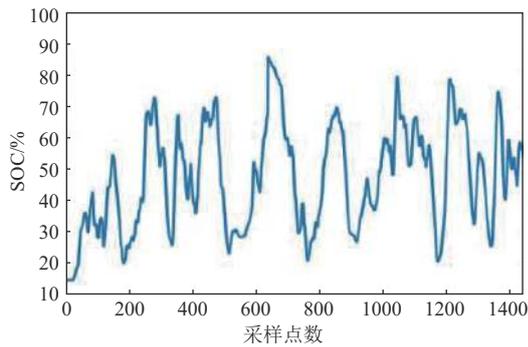


图 14 功率限幅策略 SOC 曲线

Fig. 14 SOC curve of power amplitude limiting strategy

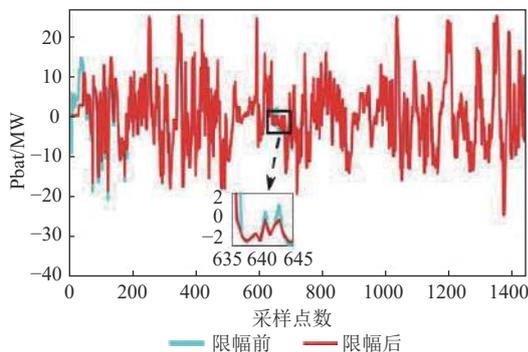


图 15 功率限幅策略下储能系统有功功率参考值曲线

Fig. 15 Reference value curve of active power of energy storage system under power amplitude limiting strategy

功率, 增加储能电池处于健康状况区间的使用时间, 从而有效保护电池。

后续将考虑多种储能方式的参与, 并将经济性考虑进研究内容当中, 以期能够探索出经济性与有效性共优的成果。

参考文献

- [1] 谷俊和, 刘建平, 江浩. 风电接入对系统频率影响及风电调频技术综述 [J]. *现代电力*, 2015, 32(1): 46-51.
GU Junhe, LIU Jianping, JIANG Hao. Literature Review on the Influence of Wind Power on System Frequency and Frequency Regulation Technologies of Wind Power [J]. *MODERN ELECTRIC POWER*, 2015, 32(1): 46-51 (in Chinese).
- [2] 王旭强, 张鑫, 刘红昌, 刘怡, 刘乙召. 考虑源荷双重不确定性的电气互联综合能源系统分布鲁棒优化调度 [J]. *现代电力*, 2019, 36(6): 52-60.
WANG Xuqiang, ZHANG Xin, LIU Hongchang, LIU Yi, LIU Yizhao. Robust Optimal Scheduling of Power-Gas Interconnected Integrated Energy System with Double Uncertainty of Source and Load [J]. *Modern Electric Power*, 2019, 36(6): 52-60 (in Chinese).
- [3] 许焜增, 刘禾. 风电并网下计及机组特性的AGC动态优化控制策略研究 [J]. *现代电力*, 2018, 35(6): 33-38.
XU Wenzeng, LIU He. Research on AGC Dynamic Optimal Control Considering Units' Characteristics Under the Condition of Integration of Wind Power [J]. *Modern Electric Power*, 2018, 35(6): 33-38 (in Chinese).
- [4] 蒋燕萍, 陈佩军, 陈海燕. 电动汽车集约型换电设施的设计研究 [J]. *发电技术*, 2019, 40(6): 535-539.
JIANG Yanping, CHEN Peijun, CHEN Haiyan. Research and Design on Intensive Power Exchange Facility of Electric Vehicles [J]. *Power Generation Technology*, 2019, 40(6): 535-539 (in Chinese).
- [5] 王军亮, 李永, 李建设, 等. 电动汽车充电对电网安全风险影响及管控措施研究 [J]. *发电技术*, 2018, 39(5): 405-411.
WANG Junliang, LI Yong, LI Jianshe, et al. Research of Safety Risk Impact and Management Controls of Electric Vehicle Charging on Power Grid [J]. *Power Generation Technology*, 2018, 39(5): 405-411 (in Chinese).
- [6] 陈宇, 彭潇, 丁婧, 等. 电动汽车参与风电场输出功率波动平抑方法研究 [J]. *发电技术*, 2019, 40(1): 91-98.
CHEN Yu, PENG Xiao, DING Jing, et al. Research on the Method of Stabilizing the Power Output Fluctuation of Wind Farm by Electric Vehicles [J]. *Power Generation Technology*, 2019, 40(1): 91-98 (in Chinese).
- [7] 林俐, 费宏运. 规模化分布式光伏并网条件下储能电站削峰填谷的优化调度方法 [J]. *现代电力*, 2019, 36(5): 54-61.
LIN Li, FEI Hongyun. Optimal Scheduling Method for Peak Load Shifting of Energy Storage Station with Large-scale Distributed Photovoltaic Integration [J]. *Modern Electric Power*, 2019, 36(5): 54-61 (in Chinese).
- [8] TENG Xianliang, GAO Zonghe, ZHANG Yingyuan, et al. Key technologies and the implementation of wind, PV and storage co-generation monitoring system [J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2014, 2(2): 104-113.
- [9] XU Guoyi, XU Lie, YAO liangzhong. Wind turbines output power smoothing using embedded energy storage systems [J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2013, 1(1): 49-57.
- [10] 靳文涛, 马会萌, 谢志佳. 电池储能系统平滑风电功率控制策略 [J]. *电力建设*, 2012, 33(7): 7-11.
JIN Wentao, MA Huimeng, XIE Zhijia. Wind power

- smoothing control strategy of battery energy storage system [J]. *Electric Power Construction*, 2012, 33(7): 7–11 (in Chinese).
- [11] GUO Li, ZHANG Ye, WANG Chengshan. A new battery energy storage system control method based on SOC and variable filter time constant [C]//IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT). Washington, USA: IEEE, 2012: 1-7. 2.
- [12] 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.
ZHANG Ye, GUO Li, JIA Hongjie, *et al.* A new battery energy storage system control method based on SOC and variable filter time constant [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(6): 34–38 (in Chinese).
- [13] 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 (in Chinese).
- [14] 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.
XIE Junwen, LU Junming, MAO Chengxiong, *et al.* Optimal Control of Battery Energy Storage System Based on Variable Smoothing Time Constant [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(1): 96–102 (in Chinese).
- [15] 李凯, 马倩, 徐红兵, 等. 储能系统的荷电状态管理策略及其影响评价 [J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(8): 27–32.
LI Kai, MA Qian, XU Hongbing, *et al.* SOC management strategy of storage system and its impact assessment [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(8): 27–32 (in Chinese).
- [16] JIANG Quanyuan, GONG Yuzhong, WANG Haijiao. A Battery Energy Storage System Dual-Layer Control Strategy for Mitigating Wind Farm Fluctuations [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3): 3263–3273.
- [17] Nguyen C L, Lee H H. Optimization of Power Dispatch to Minimize Battery Storage Capacity in Wind Farm [C]//2014 IEEE, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2014.
- [18] 林建新, 温步瀛, 陈冲. 基于分段平滑风电输出功率波动的储能系统容量配置方法 [J]. *电力电容器与无功补偿*, 2016, 37(02): 110–114.
LI Jianxin, WEN Buying, Chen Chong. An Energy Storage System Capacity Configuration Method Based on Piecewise Smoothing Wind Power Output Fluctuations [J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2016, 37(02): 110–114 (in Chinese).
- [19] 林莉, 金鑫, 朱丽云, 等. 考虑充放电能量不均衡的双电池系统状态评估与控制策略 [J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(10): 128–134.
LIN Li, JIN Xin, ZHU Liyun, *et al.* State Evaluation and Control Strategy of Dual-battery System Considering Unbalance of Charging and Discharging Energy [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(10): 128–134 (in Chinese).
- [20] Paatero J V, Lund P D. Effect of energy storage on variations in wind power [J]. *Wind Energy*, 2005, 8(4): 421–441.
- [21] 雷琰, 欧阳曾恺, 李征, 等. 平抑风能波动的储能电池 SOC 与滤波协调控制策略 [J]. *电力自动化设备*, 2015, 35(07): 126–131.
LEI Ting, OUYANG Zengkai, LI Kai, *et al.* Coordinated control of battery SOC maintaining and filtering for wind power fluctuation smoothing [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(07): 126–131 (in Chinese).
- [22] 张野, 郭力, 贾宏杰, 等. 基于平滑控制的混合储能系统能量管理方法 [J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(16): 36–41.
ZHANG Ye, GUO Li, JIA Hongjie, *et al.* An Energy Management Method of Hybrid Energy Storage System Based on Smoothing Control [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(16): 36–41 (in Chinese).
- [23] 丁明, 吴建锋, 朱承治, 等. 具备荷电状态调节功能的储能系统实时平滑控制策略 [J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(1): 22–29.
DING Ming, WU Jianfeng, ZHU Chengzhi, *et al.* A Real-time Smoothing Control Strategy With SOC Adjustment Function of Storage Systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(1): 22–29 (in Chinese).

收稿日期：2020-03-23

作者简介：

冯春生 (1995)，通信作者，男，硕士研究生，研究方向：控制理论与控制工程及新能源储能技术，E-mail: fcs_2019@163.com;

杨秀媛 (1962)，女，教授，研究方向：新能源的电力系统分析与规划，E-mail: yangxy0912@163.com;

陈小波 (1991)，男，硕士研究生，研究方向：控制理论与控制工程及新能源发电，E-mail: 170213@mail.bistu.edu.cn。