

平抑风能波动的储能电池 SOC 与滤波协调控制策略

雷 珽¹, 欧阳曾恺², 李 征², 蔡 旭²

(1. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200433;

2. 上海交通大学 风力发电研究中心, 上海 200240)

摘要: 风电功率波动率是风电并网考核的重要内容之一, 采用蓄电池储能装置是平滑风能波动最常用的方案。为提高储能设备的使用寿命, 提出一种蓄电池充放电控制策略, 在最小容量配置下能保持蓄电池荷电量(SOC)水平, 同时实现对风电功率的滤波。MATLAB 仿真结果表明所提控制策略可以在满足风功率波动指标的基础上取得良好的 SOC 控制效果, 且实际并网储能系统的模拟测试验证了该策略的可行性和有效性。

关键词: 风电; 储能; 荷电量; 控制; 一阶低通滤波; 波动; 滤波

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.07.020

0 引言

随着风电的大规模开发利用, 风功率的间歇性和波动特性对电网的冲击也日益显著, 这将使风电的入网受到限制, 而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。

电池储能系统有快速动态吸收和释放能量的特点, 在风电场中合理配置储能设备可有效弥补风电波动, 改善风电输出功率的可控性、电能质量等^[1-2]。国内外在储能平滑风电波动方面已开展了较多研究, 通常认为需要用储能平滑的风电输出功率随风速波动的频率范围主要为中频区, 即处于 0.01~1 Hz^[3], 高频区的波动可以被风力机的惯量吸收, 而低频区功率变化较缓慢, 可以由与其相连电网中的同步发电机补偿。平抑风功率波动最常用的方法是采用一阶低通滤波原理^[4-11]。研究表明, 随滤波时间常数增大, 平滑后的风电功率变化率会明显减小, 但同时所需的储能容量增大, 成本增高。因而要按平滑指标^[12]来确定时间常数和储能容量^[6]。此外, 由于储能电池过度充放电均会降低其使用寿命进而增大系统运维成本, 因此运行中一般需要将储能电池的荷电量(SOC)控制在[20%, 80%]之间。文献[7, 9, 11]提出依据储能 SOC 所处区间改变滤波常数以兼顾功率波动平滑和 SOC 控制的滤波算法, 并优化了储能的配置容量。但此方法当 SOC 超出限值时不能较快回到设定区间, 储能电池因充放电限制而不能按照给定的平滑指标工作。文献[10, 13]提出了基于小波分析理论的功率平滑控制策略, 并引入了模型预测控制 MPC(Model Predictive Control)以提高滤波效果, 但未考虑储能电池的使用寿命。文献[14]采用实时 5

点滚动法制定多时间尺度风电波动平滑指标, 同时引入补偿度修正储能容量, 并基于模糊控制原理优化 SOC, 实现了对风电波动的分时跟踪平抑; 文献[15]对电池 SOC 进行分级优化, 根据平滑要求和总体 SOC 状态计算混合储能系统总功率并根据各设备特性进行功率的协调分配; 文献[16]基于 MPC, 以储能出力最小为目标采用约束软化和能量反馈控制避免过度充放电。然而, 上述文献的 SOC 控制本质上只进行了边界控制, 当风功率波动持续增大或减小导致 SOC 达到边界时就要停止充电或放电, 导致风功率平滑的效果下降。

本文基于低通滤波原理, 提出了一种在满足风电并网功率波动指标^[12]前提下, 可保证 SOC 在风功率单向持续变化下不超出波动范围的协调控制策略。动态仿真表明该策略可实现在保证平滑指标的前提下保持电池 SOC 在一定范围内, 有助于延长储能寿命并减小配置容量。该控制策略形式简洁, 计算量小, 参数调节方便, 因而具有较强的可行性和工程实用性, 可用于大型风电场接入储能的相关示范工程中。

1 风-储协调控制滤波算法原理

若将风电出力的中频段功率看作是数字信号中需要消除的高频噪声信号, 则可用低通滤波的方法滤除风电出力中高频功率。在滤波过程中, 储能系统相当于一个离散低通滤波器, 通过蓄电池充、放电, 平滑调整风-储系统的输出总功率, 减小风功率的波动, 平滑风功率的输出, 从而提高并网风电接入率。

图 1 是风电场配置储能系统的结构示意图。现以双馈风力发电机为例, 储能系统采用锂蓄电池组。 P_w 是风电场输出的原始风功率; P_g 是经过储能系统平滑后的并网功率; P_b 是储能系统发出的功率, P_b 为正时电池放电, P_b 为负时电池充电。功率关系为:

$$P_g = P_b + P_w \quad (1)$$

收稿日期: 2014-12-12; 修回日期: 2015-03-04

基金项目: 上海市科委项目(11dz1210300)

Project supported by the Science and Technology Committee of Shanghai(11dz1210300)

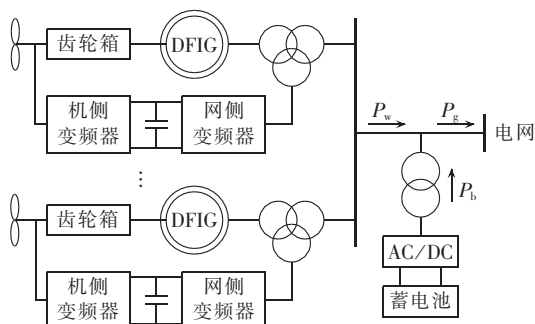


图 1 风电场配置电池储能系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of wind farm with battery energy storage system

按照一阶低通滤波原理:

$$\tau y' + y = x \quad (2)$$

其中, τ 为滤波时间常数, $f=1/(2\pi\tau)$ 为低通滤波器的截止频率, τ 越大, 截止频率越小, 滤波带宽越窄, 平滑效果越好; y' 为 y 的一阶微分, y 为平滑后输出信号; x 为滤波函数的输入信号。对离散数字信号进行低通滤波处理时, 令信号采样周期为 Δt , 则 y' 为 $[y(n)-y(n-1)]/\Delta t$, 式(2)可表示为:

$$\tau \frac{y(n)-y(n-1)}{\Delta t} + y(n) = x(n) \quad (3)$$

其中, n 表示第 n 个采样点。可得解:

$$y(n) = \frac{\tau}{\tau + \Delta t} y(n-1) + \frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} x(n) \quad (4)$$

对风功率进行平滑时, 代入 P_w 和 P_g 有:

$$P_g(n) = \frac{\tau}{\tau + \Delta t} P_g(n-1) + \frac{\Delta t}{\tau + \Delta t} P_w(n) \quad (5)$$

此时并网功率即为滤波去除较高频后的功率。

储能系统发出的功率 $P_b(n)$ 为:

$$P_b(n) = P_g(n) - P_w(n) \quad (6)$$

风-储协调控制器根据获得的风电功率, 算出储能有功功率指令, 发送给储能控制器控制电池充放电。风、储及协调控制器之间的信号连接关系见图 2。

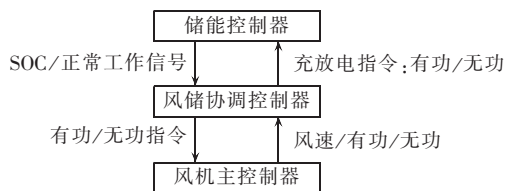


图 2 风-储控制器信号连接示意图

Fig.2 Signal connections between wind and storage controllers

2 储能系统 SOC 水平协调控制方法原理

为延长储能系统使用寿命, 应限制电池的充放电深度, 即在储能运行的时段内, 应尽可能让 SOC 变化区间在 $[20\%, 80\%]$ 之内。常规 SOC 控制是 SOC 达到设定阈值后, 为了不让其越限, 控制电池停止相

应的充/放电操作。因而为了保证平滑任务的进行就需要配置更多的储能容量。SOC 水平协调控制方法是指以保证规定时间内的风功率变化量不越界为控制目标, 通过电池充/放电控制, 保证 SOC 在一定范围内。其可以在较小的电池容量需要下, 兼顾风功率波动平滑的要求和保持储能系统 SOC 的水平。

根据风功率波动量的要求, 有:

$$|P_g(n) - P_g(n-1)| \leq K\Delta t \quad (7)$$

其中, n 和 $n-1$ 分别表示第 n 个和上一个采样点; 采样间隔 Δt 文中设为 $1s$; K 为规定的风功率变化量最大值, 其值参照文献[12]推荐的风电场 $1min$ 内有功功率变化最大限值计算得到。本文仿真所采用的风电场额定容量为 $60MW$, 根据规定, 要求 $1min$ 有功功率变化量(任意 2 个间隔在 $1min$ 以内的采样点功率差值)小于 $6MW$, 则这里认为对应到每 $1s$, 有 $K=0.1MW/s$, 利用式(7)对全部采样点进行判别, 则可以保证在任意的 $1min$ 区间内有功功率变化量符合要求。极限情况下, 式(7)取等号, 结合式(1)有:

$$P_b(n) = P_g(n-1) - P_w(n) \pm K\Delta t \quad (8)$$

按式(8)给出储能有功指令可保证系统在给定时间尺度上的有功变化量满足要求。由式(8)可见, $K\Delta t$ 项前的符号表示是充电还是放电, 调节 K 的大小可改变充放电速度, 因此当 SOC 超过上限时该符号取“+”, 反之当 SOC 处于下限时取“-”。由于 P_w 实际上是实时变化的, 故当储能系统需放电时, 须保证 P_b 随 n 递增, 反之充电时随 n 递减, 故有约束关系式(9):

$$P_b(n) = \begin{cases} \max\{P_b(n-1), P_g(n-1) - P_w(n) + K\Delta t\} & SOC(n-1) > 80\% \\ \min\{P_b(n-1), P_g(n-1) - P_w(n) - K\Delta t\} & SOC(n-1) < 20\% \end{cases} \quad (9)$$

由此得到的并网功率还需满足式(7)约束, 所以当 $|P_g(n) - P_g(n-1)| > K\Delta t$ 时仍要按式(8)确定 P_b 。

由上述可知, SOC 水平协调控制算法通过充放电切换控制, 在并网功率变化量符合规定的前提下通过引入一定的小幅波动获得了更大的 SOC 调节空间。

3 控制算法的切换

当风功率波动较大时, 风-储协调应以平滑风功率为主, 因此系统控制策略要在适当的条件下, 在低通滤波算法和 SOC 水平协调控制算法间合理切换。

可以看出, 切换算法的合理时机实际上取决于风功率的波动情况, 在风功率波动不大的情况下, 系统可以进行 SOC 水平控制, 当风功率波动较大的情况下, 系统应该进行滤波算法的风功率平滑工作。

在本文的研究中, 判定风功率波动越限的极值定为式(7)中的 K 值。当风功率的波动小于 K 值时, 表示系统有调节 SOC 的空间; 而当检测到风功率波动

大于 K 值时,表示必须要对风功率进行平抑。风功率波动量的计算如下:

$$K_w=(P_w(n)-P_w(n-1))/\Delta t \tag{10}$$

也可以表示为:

$$K_w=(P_w(n)-P_w(n-l))/(l\Delta t) \tag{11}$$

式(10)和式(11)的区别是用于越限判别的 时间尺度不同,在一定功率变化值下,式(11)中判 别步长 l 值越大,计算的 K_w 值越小,那么系统执 行时将更多地切向 SOC 水平控制,而任意时刻与 前后秒的并网功率差值就越难保证一定满足式 (7)约束。风电入网标准中考核的风电波动时间 段为 1 min 内和 10 min 内,故在秒级采样数据 中, l 最大不可超过 60。

由于风-储协调控制的首要目的是保证并 网功率变化量符合规定,因此在 SOC 处于正常变 化区间时,应遵从一阶低通滤波算法。由于要保 证 SOC 在 [20%,80%] 区间内波动,考虑到风功 率的波动性,若过于接近限值,可能出现因优先 平抑风电波动而造成 SOC 越限,故应留有裕量 地设置控制阈值,一旦采样到 SOC 越过阈值,若 检测到风电波动符合规定,则切换至水平协调控 制以便为以后的风功率平滑保留 SOC 变动空 间。考虑到应将 SOC 尽量保持在中值,控制阈 值设为 40% 和 60%。

第 n 个采样点的含 SOC 控制的风-储协调 控制策略算法流程如图 3 所示。

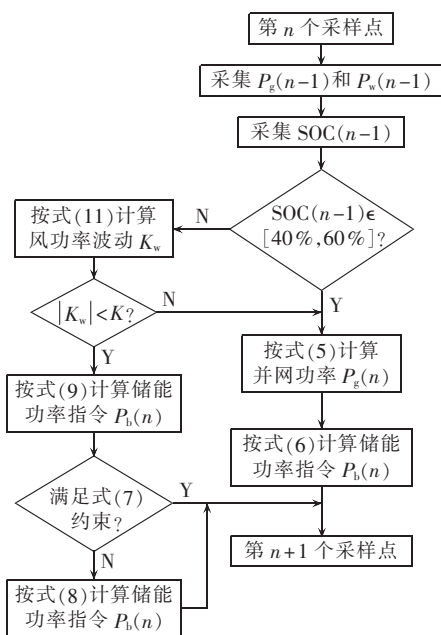


图 3 控制算法流程图

Fig.3 Flowchart of control algorithm

4 仿真验证

本文中利用 MATLAB/Simulink 实现带 SOC 水平控制的风-储协调控制仿真验证,仿真系统的参 数如下:风电场侧参数,风电场额定输出功率 60 MW;

储能侧参数,初始 SOC 50%,额定容量 6 MW·h;协 调算法参数,滤波常数 10 s,风功率变化量限值 6 MW/min,控制阈值 40%、60%;仿真时间 600 s。

图 4 为实际风电场的输出功率,其 1min 变化量 分布图(任意 1 min 区间内风功率最大变化量)见图 5,图中百分比指相应点数占总数的比例,后同。可见 该段功率 1 min 变化量大于所要求的 6 MW/min 的 点数占总数的 30% 左右,需要对风功率进行平滑。

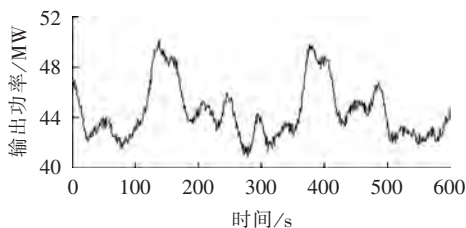


图 4 仿真风电场输出功率

Fig.4 Wind power output of simulated wind farm

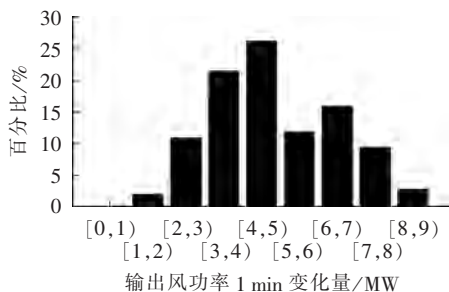


图 5 风电场输出功率 1 min 变化量分布图

Fig.5 Minute-variation distribution of wind farm output power

对不含 SOC 水平控制的一阶低通滤波算法仿 真,平滑前后的电网输出功率如图 6 所示。平滑后 并网功率 1 min 变化量分布图如图 7 所示,可见经 一阶低通滤波后输出的并网功率 1 min 变化量已经 全部小于 6 MW/min,符合规定中的要求。

但从图 8 可以看出 SOC 最低已经小于 20%,属 于过度放电,对储能电池损耗很大。按照一般储能 系统的要求,SOC 小于 20% 后不再输出功率,这里 为示意取消了该限制才获得上述的平滑效果。

在同样风功率情况下,采用 SOC 水平协调控 制的控制策略进行仿真,结果如图 9 和图 10 所示,2 种

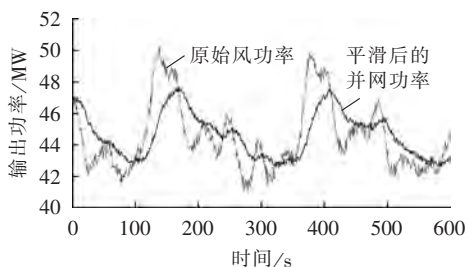


图 6 原始风功率/平滑后并网功率对比

Fig.6 Comparison between original wind power and smoothed grid-connecting power

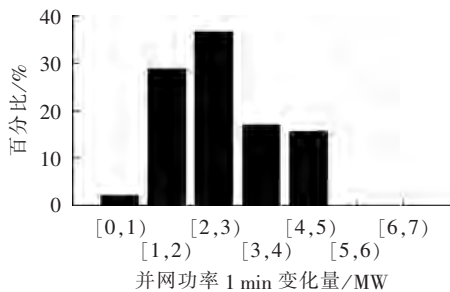


图 7 并网功率 1 min 变化量分布图
Fig.7 Minute-variation distribution of grid-connecting power

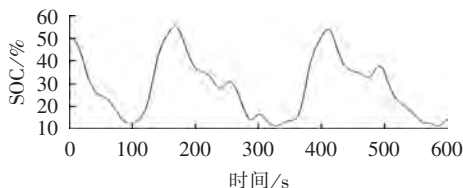


图 8 原低通滤波算法下的 SOC 变化曲线
Fig.8 SOC curve of LPF algorithm

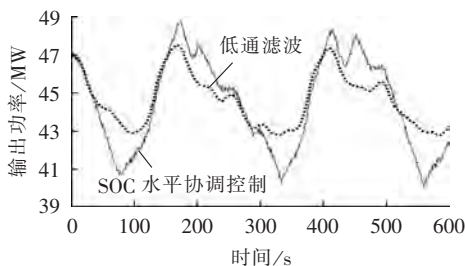


图 9 输出功率对比图
Fig.9 Comparison of output power

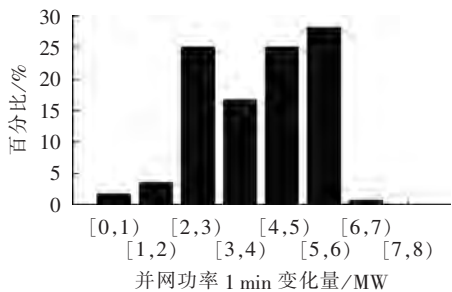


图 10 新控制策略下并网功率 1min 变化量分布图
Fig.10 Minute-variation distribution of grid-connecting power with proposed control strategy

控制策略下的 SOC 变化情况如图 11 所示。

由图 11 可以看出,储能 SOC 在超出控制阈值后由于切入了 SOC 水平协调控制而尽可能减缓了变化趋势,通过调节储能功率较快返回到理想运行区间 [40%,60%]内。由图 10 看出,此时约 99%的 1 min 有功变化量是符合并网规定中的要求的,小于限制值的小波动有所增加,这即是 将大波动调换成小波动的现象,也是该算法能够兼顾平滑风功率和控制 SOC 在规定水平内的原因。对于极少数不合格采样点,

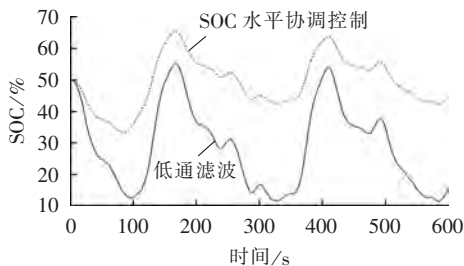


图 11 不同控制策略下 SOC 变化曲线对比
Fig.11 Comparison of SOC curve between different control strategies

考虑到其有功变化量均小于 7 MW,与规定限值较为接近,可以认为对风电并网影响很小。

需要注意的是,上述采用的控制算法中,式(11)中的系数 l 取为 20,即用于有功变化量越限判别计算的时间尺度选为 20 s。根据上文所述, l 取值越大,则切向 SOC 水平控制的次数就越多,但这并不意味着整体控制的效果就越好,在本文的仿真条件下,对全部的 $l \in [1,60]$ 进行考察,以全仿真时段的 SOC 变化范围作为评价标准,当满足 $SOC \in [20\%,80\%]$ 时,令其变化范围较小的 l 具有更好的控制效果。

不同 l 取值下的 SOC 变化范围见图 12。当 $l=1$ 时,虽然 SOC 变化范围小,但下限小于 20%,故不符合要求。从整体变化趋势看,若除去风功率变化带来的偶然性影响, l 在中部区间(20,30)控制效果较好。这可能是由于必须满足波动量判别式

$$K_w = \frac{P_w(n) - P_w(n-l)}{l\Delta t} < K = \frac{6}{60} \text{ (MW/s)}$$

才能启动 SOC 控制,其认为若 1 min 功率变化量小于 6 MW,则必须满足每秒变化量小于 0.1 MW,但前者只是后者的必要条件, l 的增大即是逐渐放宽对前后两采样时刻功率变化量的限制,过小的 l 减少了 SOC 控制次数,降低了调节能力,而过大的 l 造成功率波动较大,启动 SOC 控制时已不是调节 SOC 的较佳时机,反而造成 SOC 变化范围变大,因此位于取值区间中部的 l 具有较好的调节效果。

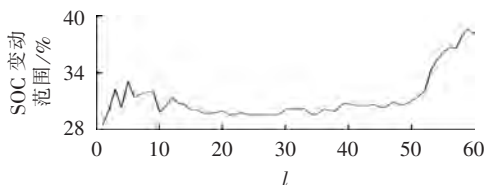


图 12 不同 l 取值下的 SOC 变化范围
Fig.12 Curve of SOC variation range vs. l

5 储能系统样机实测

对上海崇明岛某风-储示范工程中接入的电池储能系统进行所提控制策略的现场实测,储能并网系统架构和电池成组方案如图 13 和 14 所示。

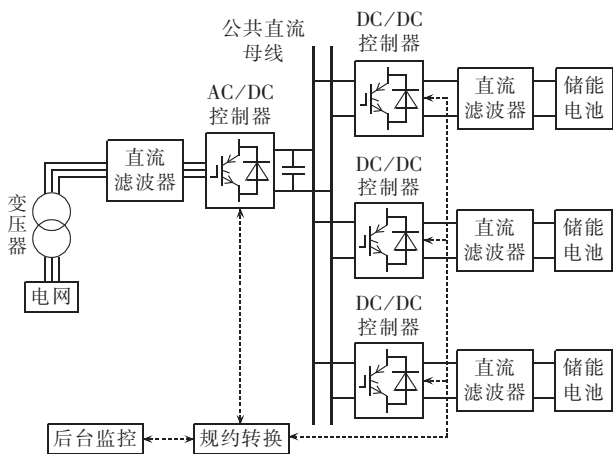


图 13 储能并网架构

Fig.13 Structure of energy storage grid-connection system

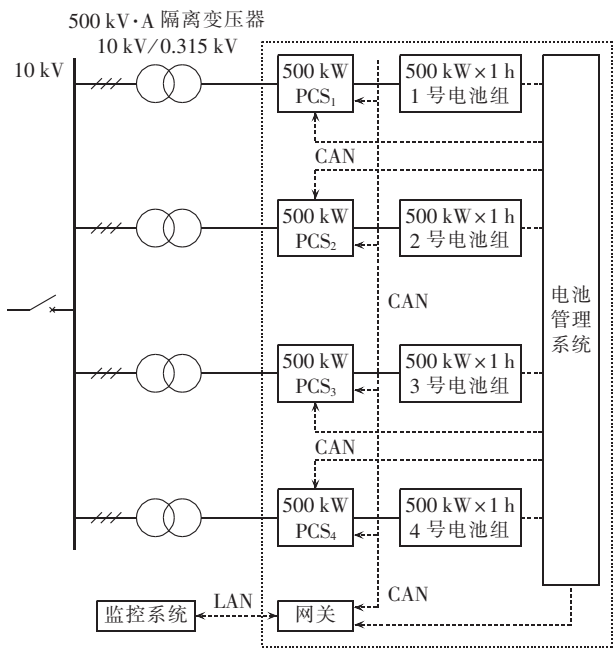


图 14 电池成组方案

Fig.14 Battery pack configuration

储能系统由 4 组 500 kW 磷酸铁锂电池组、电池管理系统 BMS (Battery Management System)、后台监控系统、通信控制器以及两级变换型变流器 PCS (Power Convert System) 组成。

两级变换型 PCS 基于工频隔离+AC/DC+多路 DC/DC 的结构控制储能电池充放电,并通过交直流转换完成系统并网;BMS 实时监控电池组运行信息,如端电压、电流、SOC 等;通信控制器负责 PCS、BMS、监控系统间的通信,确保功率指令能正常下放至 PCS;监控系统兼顾实时数据监测、采集、处理、运算及波形显示等,涵盖了储能控制器的功能。基于实测的风电场输出功率数据,对储能系统着重进行了平抑风功率波动的功能测试,测试时间为 22:05—22:50,演示截图如图 15 和 16 所示。

由此可见控制策略确实可以起到平抑风功率波

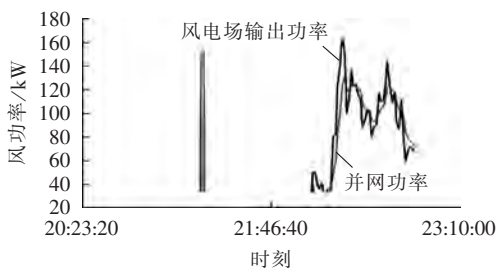


图 15 平滑前后风功率对比

Fig.15 Comparison between original and smoothed wind power outputs

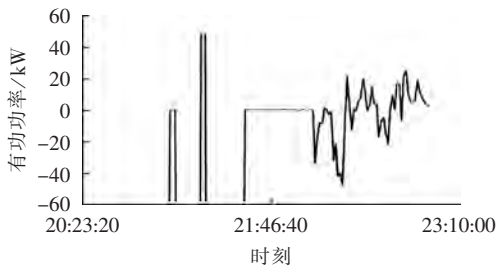


图 16 储能有功功率

Fig.16 Active power of energy storage

动的效果,但由于现场 BMS 通信和数据连接问题,未能显示出 SOC 运行曲线,后期将结合电池状态对综合控制效果进行评估。

6 结论

本文提出了基于一阶低通滤波的带 SOC 水平协调控制的风功率波动平抑控制策略,在进行风功率变化量和 SOC 越限判别的基础上通过策略切换,兼顾了维持 SOC 水平和平滑风功率波动的目标。基于 MATLAB/Simulink 平台,与传统平滑策略进行了对比分析,得出如下结论:

a. 通过将风功率中的大幅波动有条件地替换为小幅波动,所提策略实现了兼顾 SOC 控制和平抑风功率波动的功能,有助于延长设备寿命并减少其需求容量;

b. 调节用于计算风功率波动量的判别时间尺度 (l 值),可以改变总体控制的效果,并发现取值适中的 l 具有更好的调节能力。

最后在风-储示范工程的储能系统样机上进行了控制策略的实测模拟,验证了策略的可行性和有效性。

参考文献:

[1] 张文亮,丘明,来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术,2008,32(7):1-9.
ZHANG Wenliang,QIU Ming,LAI Xiaokang. Application of energy storage technologies in power grids[J]. Power System Technology, 2008,32(7):1-9.
[2] 贾宏新,张宇,王育飞,等. 储能技术在风力发电系统中的应用

- [J]. 可再生能源,2009,27(6):10-15.
- JIA Hongxin,ZHANG Yu,WANG Yufei,et al. Energy storage for wind energy applications[J]. Renewable Energy Resources,2009,27(6):10-15.
- [3] ROHATGI J S,NELSON V. Wind characteristics-an analysis for the generation of wind power[M]. Canyon,USA:Alternate Energy Institute,West Texas A&M University,1994.
- [4] YOSHI M K,NANAHARA T,KOSHLIMIZU G. Analysis of data obtained in demonstration test about battery energy storage system to mitigate output fluctuation of wind farm[C]//CIGRE/IEEE PES Joint Symposium on Integration of Wide-Scale Renewable Resources Into the Power Delivery System. Paris,France: IEEE,2009:1-5.
- [5] LUO Changling,BOONTECK O. Frequency deviation of thermal power plants due to wind farms[J]. IEEE Trans on Energy Conversion,2006,21(3):708-716.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] PAATERO J V,LUND P D. Effect of energy storage on variations in wind power [J]. Wind Energy,2005,8(4):421-441.
- [9] 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.
- [10] KIHARA Y,YAMAMURA N,ISHIDA M. Proposal of evaluation method of electric power fluctuation using wavelet transform [C]//International Conference on Electrical Machines and Systems. Tokyo,Japan:IEEE,2009:1-4.
- [11] 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.
- [12] 中国电力科学研究院. GB/T 19963—2011 风电场接入电力系统技术规定[S]. 北京:全国电力监管标准化技术委员会,中国标准出版社,2011.
- [13] 李勇. 基于混和储能技术的风电场功率平滑控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.
- LI Yong. Research of power smoothing control strategy for wind farm based on hybrid storage energy technology [D]. Beijing:North China Electric Power University,2012.
- [14] 刘春燕,晁勤,魏丽丽. 基于实证数据和模糊控制的多时间尺度风储耦合实时滚动平抑波动[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):35-41.
- LIU Chunyan,CHAO Qin,WEI Lili. Wind-storage coupling based on actual data and fuzzy control in multiple time scales for real-time rolling smoothing of fluctuation[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):35-41.
- [15] 邹见效,戴碧蓉,彭超,等. 基于荷电状态分级优化的混合储能风电功率平抑方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(24):1-6.
- ZOU Jianxiao,DAI Birong,PENG Chao,et al. Wind power smoothing method using hybrid energy storage system based on SOC hierarchical optimization[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(24):1-6.
- [16] 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.

作者简介:



雷 珽

雷 珽(1986—),男,上海人,硕士,从事智能电网、分布式电源、电动汽车等方面的研究(E-mail:lt1986130@163.com);

欧阳曾恺(1990—),男,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为新能源并网、储能接入技术。

Coordinated control of battery SOC maintaining and filtering for wind power fluctuation smoothing

LEI Ting¹, OUYANG Zengkai², LI Zheng², CAI Xu²

(1. Electric Power Research Institute of Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200433, China;

2. Wind Power Research Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Wind power fluctuation rate is a key performance indicator of its grid-connection and the battery energy storage device is widely used to smooth the wind power fluctuation. For prolonging the device lifetime, a strategy of battery charge/discharge control is proposed to maintain the SOC(State Of Charge) level of the battery under the minimum capacity configuration while filter the wind power fluctuation. Simulative results of MATLAB show that, a better SOC control effect is achieved while the wind power fluctuation rate satisfied. And test on practical integrated BESS(Battery Energy Storage System) verifies the feasibility and effectiveness of the proposed strategy.

Key words: wind power; energy storage; SOC; control; first-order low-pass filtering; fluctuation; filtering