

基于滑动最小二乘算法和电池荷电状态的储能系统平滑控制策略

谢涛¹, 曹军威², 高田², 廉小亲¹, 董良³

(1. 北京工商大学计算机与信息工程学院, 北京 100048; 2. 清华大学信息技术研究院, 北京 100084;
3. 华电山东乳山新能源有限公司, 山东 乳山 264500)

摘要: 利用电池储能系统平滑间歇式电源的输出功率波动可以提高该类电源输出功率的稳定性。提出一种基于滑动最小二乘算法和电池荷电状态的电池储能系统实时控制策略。通过滑动最小二乘拟合算法确定储能系统的功率输出量, 并辅助以荷电状态和最大波动功率限制调节, 从而有效降低平滑控制过程中电池的充放电深度。实验结果显示, 与传统基于滤波算法的控制策略相比, 在获得相同平滑效果的情况下, 新的控制策略具有更小的荷电状态波动量, 可以较大程度降低所需电池容量, 并延长电池的寿命。

关键词: 间歇式电源; 电池储能系统; 平滑控制; 滑动最小二乘算法; 荷电状态

An energy storage system smoothing control strategy based on sliding least square algorithm and battery SOC

XIE Tao¹, CAO Junwei², GAO Tian², LIAN Xiaoqin¹, DONG Liang³

(1. School of Computer and Information Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;
2. Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. Huadian Shandong Rushan New Energy Corporation, Rushan 264500, China)

Abstract: Output fluctuation of intermittent sources can be mitigated by coordinating with ESS (energy storage system) so that output stability can be improved. This paper proposes a real time control strategy for ESS based on sliding least square algorithm and SOC (state of charge). Output power can be determined by sliding least square algorithm. Combined with regulation of SOC and maximum fluctuation power limit, discharge depth of ESS can be effectively reduced during the smoothing control process. The simulation results show that compared with traditional filter algorithm based control strategy, the proposed control strategy can achieve less SOC fluctuation, largely reduce required ESS energy capacity and lengthen battery lifecycle with identical smoothing effectiveness.

This work is supported by National program on Key Basic Research project (No. 2013CB228206) and National Natural Science Foundation of China (No. 61233016).

Key words: intermittent source; battery energy storage system; smoothing control; sliding least square algorithm; state of charge

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)05-0001-07

0 引言

风力发电、光伏发电等可再生能源的输出功率会跟随外界变化而具有较大波动性, 随着在电网中

的渗透率提高, 其对传统电网的安全性、稳定性、电能质量等多方面造成了冲击和影响, 国家标准和电网公司标准都对此进行了规范^[1-2]。在间歇性电源出口配置一定容量和功率的储能装置, 可以有效抑制输出功率的波动及骤变, 提高并网稳定性和调度性, 增强此类可再生能源发电的可利用性^[3-4]。鉴于目前储能装置的成本较高, 使用寿命较短, 如何利

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2013CB228206); 国家自然科学基金(61233016)

用有限容量的储能系统平滑波动性功率输出, 并保证储能系统的安全持续运行, 对控制算法提出了较高的要求, 在该类控制算法中获得合理的储能系统出力是其中一个重要的问题。

文献[5-6]通过电池储能平抑风力发电输出功率波动, 将输出的功率控制在某一定值, 这种方法可以获得恒定的输出功率, 但需要的储能容量大, 成本过高。文献[7]采用一阶低通滤波原理对间歇性电源功率滤波获得总输出功率参考值, 实现较小电池容量条件的输出功率平滑控制, 在此基础上, 文献[8-10]分别尝试通过采用不同的方法将电池的荷电状态(SOC)反馈到一阶低通滤波器的时间常数中, 根据实时状态调整储能的出力值, 保护充电电池。文献[11]通过加权移动平均算法对风电场功率波动进行平滑, 并根据电池SOC值和功率波动程度调整算法中的权重及窗口宽度。文献[12]改变对原始数据进行滤波获得参考功率的方式, 通过对某一地区历史发电数据统计分析获得控制策略, 该方法也获得了较好的控制效果, 但需要针对发电区域进行特定的分析。文献[13]更多地在控制过程中考虑了储能电池的状态, 尽可能平滑功率波动的同时增强了对电池持续工作能力的优化。目前平滑控制多采用储能电池作为能量存储介质, 而电池存在价格较高、使用寿命较短的缺点。上述文献所提出的控制方法都显示了较好的控制效果, 但缺少在控制过程中对电池寿命的考虑。电池的寿命主要是由充放电深度决定的, 浅充浅放有助于延长电池的使用寿命^[14]。文献[15]提出在风电出力持续预测的基础上进行平滑控制, 在此过程中尽量使电池工作于浅充浅放状态, 对延长电池寿命起到了一定的作用, 但该方法需要获得详细的间歇电源种类和状态, 并且在预测误差较大时需要较大容量电池。为更加有效地利用宝贵的储能电池, 研究新型的控制策略实现在平滑控制过程中降低电池的充放电深度具有重要的理论和工程意义。

本文提出基于最小二乘算法的平滑控制策略, 通过利用所提出的滑动最小二乘拟合算法获得并网功率参考值, 所获得的并网功率参考值可作为局部功率补偿量的优化解, 使充放电的深度和累计容量在统计意义上最小化。兼顾平滑效果和对电池的保护控制, 根据储能电池的SOC值和功率波动限制对并网功率参考值进行调整, 最终实现通过储能抑制平滑间歇式能源并网功率的波动。所提控制策略能够在控制并网功率平滑度的同时, 有效降低电池充放电的深度。

1 传统储能平滑控制系统

利用储能系统对间歇式电源输出的功率进行平滑处理的基本原理是通过实时调节储能系统的输出功率, 对间歇式电源输出功率中高频段的波动成分进行补偿, 以达到平滑间歇式电源输出功率的目的, 集成了电池储能系统(BESS)的间歇式电源系统结构如图1所示。

本文以风力发电机组代表间歇式电源, 以下的分析也采用风力发电实测数据。

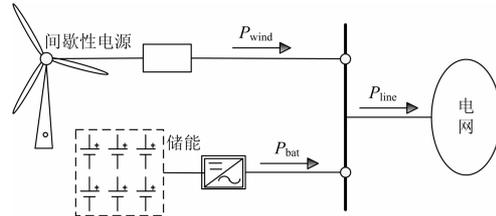


图1 集成储能的间歇式电源系统

Fig. 1 Intermittent power sources with BESS

图1中: P_{wind} 表示风力发电输出功率; P_{bat} 表示电池输出功率; P_{line} 则是连接到电网的联络线功率。

图1所示的系统, 由基尔霍夫定律可得

$$P_{wind} + P_{bat} - P_{line} = 0 \quad (1)$$

以基于滤波原理的风力发电输出功率平滑控制为例说明储能平滑控制的基本原理。图2所示是利用一阶巴特沃兹低通滤波器实现对间歇式电源功率平滑控制的基本框图, 该方法中滤波器的时间常数可以固定, 也可以通过储能装置的状态实时调整^[7-10]。波动的风电输出功率 P_{wind} 通过低通滤波器之后得到一个功率参考值 P_{ref} , P_{ref} 是期望平稳输出到联络线上的功率值, 如果储能装置可以提供功率 $P_{bat} = P_{ref} - P_{wind}$, 则联络线功率达到期望的 $P_{line} = P_{ref}$ 。其中, $P_{bat} > 0$ 表示电池放电, $P_{bat} < 0$ 表示电池充电。

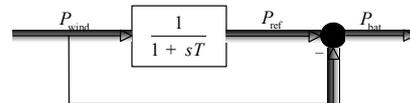


图2 基于低通滤波器的基本控制框图

Fig. 2 Basic control block diagram based on low pass filter

图1所示物理系统通过图2所示的控制系统实现平滑控制, 输出结果如图3所示。图3中包含原始风力发电输出功率波形以及基于低通滤波原理获得的并网参考功率波形。图中的细实线描绘了1天内风力发电机组输出的功率, 可见具有波动较大的特性, 粗虚线描绘了产生的并网参考功率曲线, 在电池储能系统提供 P_{wind} 和 P_{ref} 之间部分的功率后 $P_{line} = P_{ref}$ 。

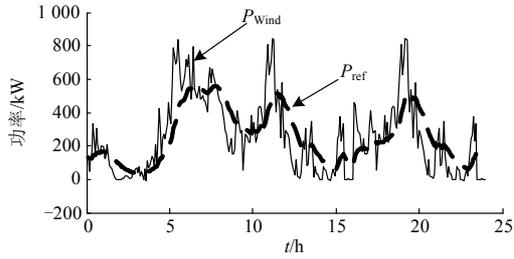


图3 基于低通滤波算法的平滑控制输出

Fig. 3 Curves of smoothing control output based on low pass filter algorithms

经过一阶巴特沃兹低通滤波器后, 相对于 P_{wind} , P_{ref} 曲线产生了延迟, 这种延迟使储能系统需要较大的容量对原始功率进行平滑处理, 而这种延迟特性也正是较大电池充放电深度产生的根源。除了上述基于巴特沃兹低通滤波器原理的平滑控制策略, 基于加权平滑滤波算法的控制策略也具有其本质的输出延迟性, 因此也需要较大的储能容量实现平滑功能。

2 基于最小二乘算法的储能控制策略

2.1 基本控制策略的提出

本文采用最小二乘拟合算法, 期望获得位于功率波动中心位置的平滑参考功率曲线, 以尽可能减少电池充放电的动作深度, 从而降低对储能容量的需求。这一目标可以转换成优化目标: 要求一段时间内电池的充电功率和最小, 并且放电的功率和也最小。

设 $P_{wind}(k)(0 < k \leq N)$ 为一段时间内离散采样的风电输出功率, 其中, N 为采样的功率点数。则优化目标可表示成式(2)和式(3)。式(2)中 J_1 表示大于参考值的实际风电功率数据与参考值的均方差之和, 式(3)中 J_2 表示小于参考值的实际风电功率数据与参考值的均方差之和。

$$J_1 = \sum (P_{wind-h} - P_{ref})^2 \quad (2)$$

式中, $P_{wind-h} \in P_{wind}$, 且满足 $P_{wind-h} > P_{ref}$ 。

$$J_2 = \sum (P_{wind-l} - P_{ref})^2 \quad (3)$$

式中, $P_{wind-l} \in P_{wind}$, 且满足 $P_{wind-l} < P_{ref}$ 。

如果可以同时满足 $\min(J_1)$ 和 $\min(J_2)$, 可以认为在这段时间内对电池的充电功率和放电功率最小, 而 $\min(J_1+J_2)$ 即是最小二乘问题求解。

由此可得, 可以针对 $P_{wind}(k)$ 进行最小二乘多项式拟合处理, 获得曲线上的离散点 $P_{ref}(k)$, 所得 $P_{ref}(k)$ 代表了距离 $P_{wind}(k)$ 最近的点集合, 即 $P_{ref}(k)$

的所有点在一条曲线上, 而该曲线具备的特性是距离 $P_{wind}(k)$ 所有点的均方差最小, 意味着统计意义上电池充放电的功率达到最小。

2.2 滑动最小二乘拟合算法及控制策略

由 2.1 节的分析得出, 通过最小二乘拟合可以获得一段时间内电池充放电功率动作深度最小的 P_{ref} , 然而, 常规最小二乘拟合仅仅适用于对历史数据的处理, 针对间歇式电源功率平滑实时控制问题, 本文提出一种滑动最小二乘拟合算法, 以实时获得 $P_{ref}(k)$ 。

取 k 时刻实时获得的风电功率数据 $P_{wind}(k)$ 及 k 时刻之前连续的 N_1-1 个风电功率数据构成式(4), 通过最小二乘拟合算法可获得多项式方程 $\varphi_k(x)$ 使得 J_k 最小, 则 $P_{ref}(k) = \varphi_k(k \times \Delta t)$, 其中 Δt 为计算窗口, N_1 为滑动窗口宽度。

$$J_k = \sum_{i=k-N_1+1}^k (P_{wind}(k) - \varphi_k(k))^2 \quad (4)$$

根据线性最小二乘拟合的原理, 由式(4)获得的 $P_{ref}(k)$ 是局部数据获得的优化结果, 如果在 $N_1 \times \Delta t$ 时间段内功率数据波动较小, 则式(4)中满足 $\min(J_k)$ 的 $\varphi_k(x)$ 和满足 $\min(J_{k+1})$ 的 $\varphi_{k+1}(x)$ 差异也较小, 此时 $\varphi_{k+1}(k+1)$ 可以看作是下一步调整过程中满足最小能量波动的 $P_{ref}(k+1)$ 。反之, 如果该时间段内功率数据波动较大, 则 $\varphi_{k+1}(x)$ 相对于 $\varphi_k(x)$ 是摒弃最旧的功率数据并加入最新功率数据获得的拟合, 具备跟随最新功率数据变化趋势的特性, 通过滑动最小二乘拟合算法获得的参考功率全局上并不一定是功率波动最小的曲线, 却可以认为是符合局部区域功率最小的参考功率值。考虑到该方法对部分功率的骤变不具有平滑性, 可采取输出功率限制, 使 ΔP_{ref} 变化不会太剧烈, 以符合平滑控制的需要。图 4 给出了基于该控制策略的实现流程。

实现最小二乘拟合的过程中, 可以使 $\varphi_k(x)$ 是线性的或者是非线性的, 在本文的章节 4 将对这个问题进行专门的分析。

根据图 4 所示的流程图, 设滑动窗口宽度为 N_1 , 在起始时刻, 功率数据长度小于 N_1 时, 采取最大可用的数据长度进行运算, 及至功率数据长度达到 N_1 时, 开始采取窗口宽度为 N_1 的拟合运算。通过最小二乘拟合算法获得功率参考值后, 与前一时刻联络线功率值对比, 如果超出了允许的最大波动量则需以最大波动量作为调节量, 最后给出的期望电池充放电功率要根据电池的 SOC 值进行调整后送给储能装置。

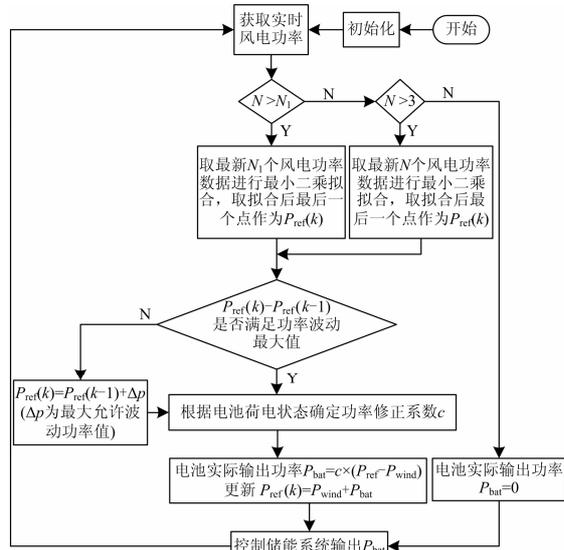


图 4 BESS 控制的实现流程

Fig. 4 Software procedure flowchart of BESS control

滑动窗口宽度 N_1 可采取固定的方式, 初始设定根据联络线功率的波动进行调整, N_1 越大则平滑的效果越好, 但也会降低参考功率曲线对原始功率的快速跟随性能, 所需电池充放电功率也越偏离实际的最小功率曲线。

3 SOC 调节器设计及特性分析

3.1 SOC 调节器设计

储能电池的充放电过程应当实时考虑电池当前的 SOC 水平以及这一时刻的功率指令状况。在图 4 所示的控制流程中, 对获得的 P_{bat} 乘以一个修正系数 c , 修正系数 c 的作用就是根据当前 SOC 水平及功率指令状况对实际电池输出功率进行调整, 本节提供 SOC 调节器设计。

根据电池的工作特性, 电池充放电功率采取以下规则进行修正:

1) 当 SOC 较大时, 表示储能趋于饱和, 可充分放电而尽可能少充电或者不充电, 可通过保持电池放电功率而逐渐减小充电功率实现。

2) 当 SOC 较小时, 表示储能不足, 可充分充电而尽量少放电或者停止放电, 可通过保持电池充电功率而逐渐减小放电功率实现。

本文所设计的 SOC 调节器采用坐标图形给出, 如图 5 所示, 其中 SOC 值根据文献[16]中提供的方法进行计算。

放电状态时: 当 SOC 小于电池最小允许放电深度(此处定为 10%, 可根据电池实际参数调整)时, 功率修正系数 $c=0$, 使电池放电功率为零; 当 SOC

大于电池最小允许放电深度并小于最优调节 SOC 值(50%)时, 功率修正系数 c 从 0 到 1 均匀增大; 当 SOC 大于 50% 时, 功率修正系数 $c=1$, 电池可按照平滑控制需要的功率放电。

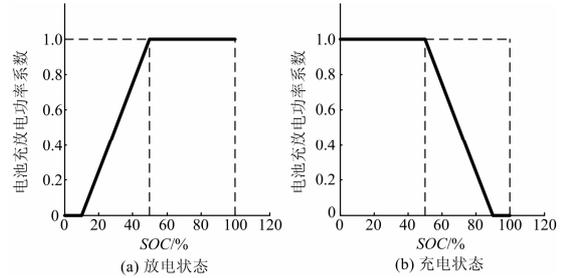


图 5 充放电工况下功率修正系数

Fig. 5 Power correction factor under charge and discharge modes

充电状态时: 当 SOC 大于电池最大允许充电深度(此处定为 90%, 可根据电池实际参数调整)时, 功率修正系数 $c=0$, 使电池充电功率为零; 当 SOC 大于最优调节 SOC 值(50%)并小于电池最大允许充电深度时, 功率修正系数 c 从 0 到 1 均匀减小; 当 SOC 小于 50% 时, 功率修正系数 $c=1$, 电池可按照平滑控制需要的功率充电。

3.2 SOC 调节器的性能分析

针对 3.1 节所设计 SOC 调节器的性能进行测试。首先针对该 SOC 调节器在控制过程中 SOC 变化曲线的收敛性进行测试, 分别将初始 SOC 值设置为 10%、50% 和 90%, 利用原始风电功率数据进行测试。

测试结果如图 6 所示。无论初始 SOC 值如何, 最终 SOC 调节器都尽量将电池的 SOC 调节到 50% 左右, 以有利于应对下一步未知的充放电工作。表明该 SOC 调节器对控制过程中储能电池的 SOC 状态具备较好的调节能力。

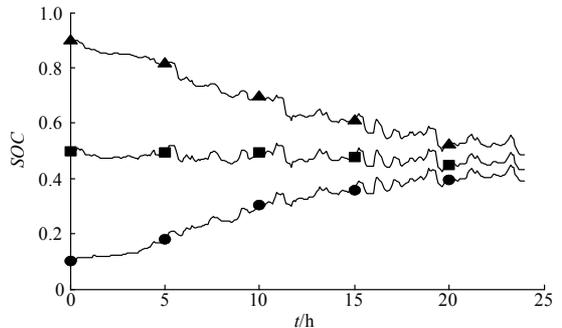


图 6 不同初始值的 SOC 曲线

Fig. 6 Curve of SOC under different initial values

以上所分析 SOC 调节器的收敛性是在充放电波

动较小的情况下进行的, 并未显示出电池在输出电量较大情况下的调节性能, 此处保持原始风电测试数据不变, 降低储能电池的容量, 对有、无 SOC 调节器的状况进行分析, 结果如图 7 所示。图 7 中, 粗实线显示为有 SOC 调节器时控制过程中的 SOC 变化, 细实线显示为无 SOC 调节器时控制过程中 SOC 变化。可见, 有 SOC 调节器的控制系统抑制了电池荷电状态向两极方向的偏移, 有效避免了电池的过充和过放。

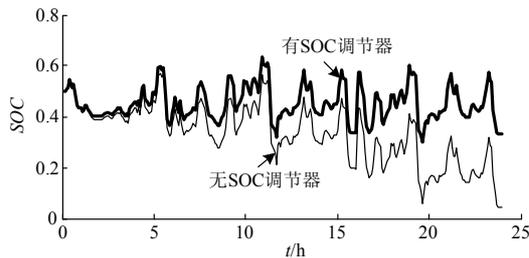


图 7 有无 SOC 调节器荷电状态趋势

Fig. 7 State of charge trends comparison between with and without SOC regulator

结果表明本文所设计的 SOC 调节器对储能电池的 SOC 产生了期望的调整效果, 电池充放电深度较小时可以将 SOC 实时调整到中心的位置, 为下一阶段的平滑控制提供最大电池容量, 而电池充放电深度较大时又可以在尽可能提供平滑功率的同时有效避免电池的过充和过放。

4 算例分析

4.1 采取线性拟合算法和非线性拟合算法的控制策略分析

算例中间歇性电源输出采用某额定功率为 1 MW 的风力发电机组五月份 1 天的实际输出功率数据。储能系统的储能介质采用国内外逐渐普及应用的锂离子电池, 电池额定容量为 800 kWh, 额定放电功率不小于 200 kW, 允许充放电深度为 10%~90%, 初始荷电状态设为 50%。分析中计算窗口时长 Δt 取 5 min, 滑动窗口宽度 N_1 取 5, 对比文献[1-2]中风电场和光伏电站对输出功率波动限制的要求, 风电场对输出功率波动的限制更为严格。本文算例分析数据也来自于风电场, 因此分析中设定间歇性电源输出功率波动不超过额定功率的 20%/10 min, 该参数可以同时满足风电场和光伏电站对输出功率波动的限值要求。

首先采用 2 次多项式拟合算法, 按照 2.2 节中所描述的算法流程, 针对上述算例进行分析, 输出

结果如图 8 所示。图 8(a)所示为联络线功率波形, 图 8(b)所示为电池充放电电量变化波形, 其中大于零的部分代表电池充电, 小于零的部分代表电池放电。

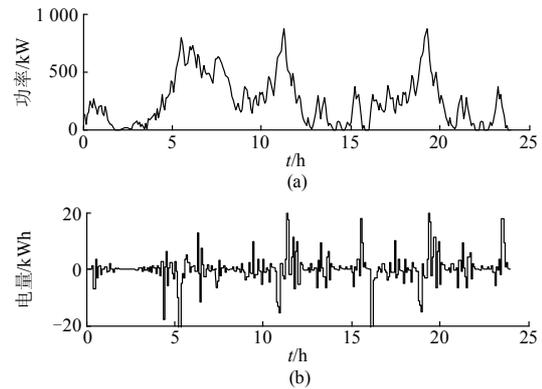


图 8 联络线功率及电池充放电电量曲线 1

Fig. 8 Curve 1 of line power and battery charge and discharge power

将上述分析中的 2 次多项式拟合算法换成线性拟合算法, 进行相同的实验, 结果如图 9 所示。

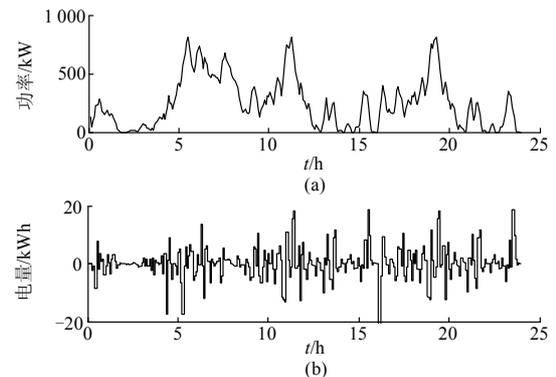


图 9 联络线功率及电池充放电电量曲线 2

Fig. 9 Curve 2 of line power and battery charge and discharge power

分别将图 8(b)和图 9(b)中的电池充放电电量进行统计, 可得采用 2 次多项式拟合算法时, 控制过程中电池组充放电电量之和总计 848 kWh, 而采用线性拟合算法时, 控制过程中电池组充放电电量之和总计 1 059 kWh。

基于同样的储能系统, 采用线性拟合算法的控制流程所获得联络线功率曲线略微平滑, 但采用 2 次多项式拟合算法的控制流程电池的充放电电量较小, 可见采用 2 次多项式拟合算法的控制流程更符合电池浅充、浅放的特性, 可延长电池的使用寿命。

通过对比图 10 所示 SOC 曲线, 分析采取不同拟合算法对电池容量需求的影响, 图中粗实线所示

采用2次多项式拟合算法的控制过程中SOC曲线的波动性要小于细实线所示采用线性拟合算法控制过程中SOC曲线的波动性。

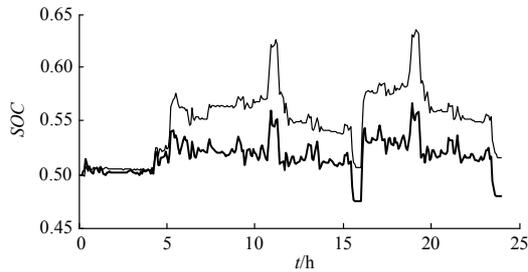


图 10 基于不同拟合算法的 SOC 曲线对比

Fig. 10 SOC comparison between different fitting algorithms

综上所述可以得出,在 $N_1=5$ 的条件下,2次多项式拟合算法在控制过程中可以产生更好的控制效果。

4.2 与其他控制策略的性能比较

采取与4.1节相同的算例参数,对比基于2次多项式拟合算法和传统滤波算法的控制策略对电池容量的需求和电池充放电电量。基于2次多项式拟合算法的控制策略产生的SOC曲线如图11中的粗实线所示,基于滤波算法的控制策略产生的SOC曲线如图11中的细实线所示。

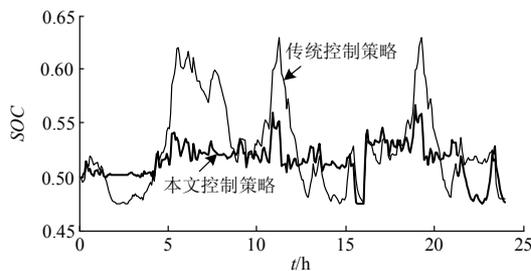


图 11 基于不同控制算法的 SOC 曲线对比

Fig. 11 SOC trends based on different control algorithms

计算结果显示,传统控制策略在所示1天的控制过程中 $\text{MAX}(\text{SOC})-\text{MIN}(\text{SOC})$ 值为15.6%,基于新策略的控制过程中该值则降低为9.2%,表明新的控制策略比传统控制策略对电池容量的需求降低了40%。相应地,统计传统控制策略在所述1天的控制过程中电池组充放电电量之和总计1412 kWh,与此相比,4.1节分析中所得出的848 kWh和1059 kWh都具有较大程度的改善效果,尤其是采用基于2次多项式拟合的控制策略其充放电总电量降低了40%。可见,相比于传统控制策略,本文所提出的控制策略在电池容量需求和电池充放电深度上都有了大幅度的改善。

5 结语

利用储能系统可以抑制风力发电、光伏发电等间歇式可再生能源发电系统对电网运行的不利影响,由于目前储能设备的成本较高,合理使用和保护储能系统也就具备较为重要的经济和工程意义。本文提出一种基于滑动最小二乘拟合算法和电池SOC的储能控制策略,可在间歇性电源输出的波动功率中实时寻找使电池充放电电量之和最小的参考点,降低了控制系统电池容量的需求,减少控制过程中对电池的充放电电量。将所提控制策略应用于间歇式电源输出功率实时平滑控制,结果显示,与传统控制策略相比较,新的控制策略在电池容量需求和对电池充放电总电量方面的性能实现了大幅度的提高。

参考文献

- [1] 全国电力监管标准化技术委员会. GB/T 19963-2011 风电场接入电力系统技术规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
National Electricity Regulatory Standardization Technical Committee. GB/T 19963-2011 technical rule for connecting wind farm to power system[S]. Beijing: Standard Press of China, 2011.
- [2] 国家电网公司. Q/GDW617-2011 光伏电站接入电网技术规定[S]. 北京: 国家电网公司办公厅, 2011.
State Grid Corporation of China. Q/GDW617-2011 technical rule for photovoltaic power station connected to power grid[S]. Beijing: General Office of State Grid Corporation of China, 2011.
- [3] BARTON J P, INFELD D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(2): 441-448.
- [4] 张步涵, 曾杰, 毛承雄, 等. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 54-58.
ZHANG Buhuan, ZENG Jie, MAO Chengxiong, et al. Improvement of power quality and stability of wind farms connected to power grid by battery energy storage system[J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 54-58.
- [5] 于芑, 赵瑜, 周玮, 等. 基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 35-40.
YU Peng, ZHAO Yu, ZHOU Wei, et al. Research on the method based on hybrid energy storage system for balancing fluctuant wind power[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 35-40.

- [6] 张纯江,董杰,刘君,等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 334-340.
ZHANG Chunjiang, DONG Jie, LIU Jun, et al. A control strategy for battery ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 334-340.
- [7] YOSHIMOTO K, NANAHARA T, KOSHIMIZU G. New control method for regulating state-of-charge of a battery in hybrid wind power/battery energy storage system[C] // Power Systems Conference and Exposition, October 29-November 1, 2006, Atlanta, America: 7p.
- [8] 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. An energy storage control method based on state of charge and variable filter time constant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 34-38.
- [9] 王伟,薛金花,叶季蕾,等. 基于SOC调控的用于抑制光伏波动的电池储能优化控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 75-80.
WANG Wei, XUE Jinhua, YE Jilei, et al. An optimization control design of battery energy storage based on SOC for leveling off the PV power fluctuation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 75-80.
- [10] 张坤,吴建东,毛承雄,等. 基于模糊算法的风电储能系统的优化控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 235-241.
ZHANG Kun, WU Jiandong, MAO Chengxiong, et al. Optimal control of energy storage system for wind power generation based on fuzzy algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 235-241.
- [11] 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.
- [12] 袁铁江,陈洁,刘沛汉,等. 储能系统改善大规模风电场出力波动的策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 47-53.
YUAN Tiejiang, CHEN Jie, LIU Peihan, et al. Strategy of improving large-scale wind farm output fluctuation based on energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 47-53.
- [13] TELEKE S, BARAN M E, ALEX Q, et al. Control strategies for battery energy storage for wind farm dispatching[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(3): 725-732.
- [14] KEMPTON W, TOMIC J. Vehicle-to-grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue[J]. Journal of Power Sources, 2005, 144(1): 268-279.
- [15] 施琳,罗毅,涂光瑜,等. 考虑风电场可调度性的储能容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 120-127.
SHI Lin, LUO Yi, TU Guangyu, et al. Energy storage sizing method considering dispatchability of wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 120-127.
- [16] BARSALI S, CERAOLO M. Dynamical models of lead-acid batteries: implementation issues[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(1): 16-23.

收稿日期: 2014-06-03; 修回日期: 2014-07-02

作者简介:

谢涛(1978-),男,博士,讲师,从事分布式发电与储能、状态监测与故障诊断研究工作; E-mail: timonxie@126.com

曹军威(1973-),男,博士,研究员,从事智能电网、先进计算技术及应用研究工作;

高田(1982-),男,博士,讲师,从事分布式发电与储能、能量管理研究工作。

(编辑 魏小丽)