

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

王伟¹, 薛金花², 叶季蕾², 王晓华², 吴福保², 杨波²

(1. 国网公司科技部, 北京 100190; 2. 中国电力科学研究院, 江苏 南京 210003)

摘要: 针对平抑可再生能源功率波动的应用需求, 在低通滤波原理的基础上, 根据电池储能的荷电状态 (SOC) 实时调整滤波时间常数, 分析了电池储能的能量与光伏发电功率波动之间的关系, 提出了优化配置电池储能的功率和能量的计算方法。这种方法可以通过电池储能在光伏发电系统中的合理配置规划, 大大简化电池储能在实际运行中的控制策略, 避免电池的过充过放, 优化电池运行参数, 从而延长使用寿命。在 Matlab 中搭建了控制仿真模型, 结果验证了该方法的可行性。

关键词: 电池储能; 能量; 滤波时间常数; SOC

An optimization control design of battery energy storage based on SOC for leveling off the PV power fluctuation

WANG Wei¹, XUE Jin-hua², YE Ji-lei², WANG Xiao-hua², WU Fu-bao², YANG Bo²

(1. Ministry of Science and Technology, State Grid Corporation of China, Beijing 100190, China; 2. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: Due to the requirement of leveling off the output power fluctuations, the relationship between the battery energy capacity and PV power fluctuation is analyzed by adjusting the filter time constant according to the state of charge (SOC) based on the low-pass filtering principle, and the optimization design method of battery power capacity and energy capacity is put forward. With the reasonable battery configuration for PV power system, the battery over-charge and over-discharge can be avoided, and the best operation condition and long service life would be obtained. A simulation Matlab model is tested to verify the feasibility of this method.

Key words: battery energy storage; energy capacity; filter time constant; SOC

中图分类号: TM615 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)02-0075-06

0 引言

近年来, 可再生能源, 如光伏发电和风力发电得到了迅猛发展, 但其间歇性和随机性对电网的安全性、稳定性和电能质量等造成了巨大的冲击和影响^[1-2]。目前, 不少国家都制定了严格的间歇式电源并网标准^[3-4], 一般都通过自我调节使得功率波动达到并网要求。然而, 这种方式降低了间歇式电源有功功率的利用率和灵活性。将储能系统与可再生能源配合使用, 能够有效平抑其功率波动, 降低对电网的冲击, 提升电网对大规模可再生能源的接纳能力, 同时提高可再生能源的利用率。

储能系统容量配置的不合理会导致储能系统的

运行条件越限, 不仅无法满足实际工程需求, 同时也极大地缩短了储能系统运行寿命。学术界已提出了多种利用储能系统抑制可再生能源功率波动的控制方法, 如低通滤波、傅里叶变换^[5]、饱和控制理论^[6]等。文献[7]提出了基于风电预测的定功率控制方法, 以电池 SOC、充放电功率限制和使用寿命等为约束条件, 将每小时风电输出功率控制为定值, 这种方法需要的储能容量很大, 成本过高, 且要求储能具有较快的充放电响应速度和较强的充放电频繁切换能力。文献[8-9]通过电池储能平抑风力发电的功率波动, 将风电场输出功率控制为某一定值, 但未考虑电池的 SOC 和充放电倍率, 导致电池过充过放且输出功率越限。文献[10]介绍了钒电池用于可再生能源并网中的功率控制策略, 但未说明容量配置的原则和合理性。

本文以光储发电系统为例, 根据低通滤波原理,

基金项目: 江苏省科技成果转化专项资金 (BA2010004); 江苏省科技支撑计划项目 (BE2011011)

基于电池 SOC 实时调整滤波时间常数,建立了储能系统的容量优化配置方法,为储能系统在可再生能源发电中的规划设计提供理论支持。以铁锂电池为储能对象,在 Matlab 中搭建了仿真模型,验证了该方法的可行性。

1 基于低通滤波原理的储能配置方法

本文以带电池储能的可再生能源发电系统为研究对象,系统拓扑结构如图 1 所示。以光伏发电系统为例,太阳能阵列和储能电池分别通过逆变器和储能变流器在交流侧并联接入电网。储能用于平抑功率波动的容量配置采用低通滤波基本原理予以实现^[11-13],利用储能系统补偿光伏发电在截止频率(f_c)以上的高频分量,基本原理如图 2 所示。其中, P_{pv} 表示光伏发电功率; P_{pv_ref} 为光伏发电经滤波后注入电网的功率,即联络线功率; P_{bat_ref} 为电池储能的输出功率。

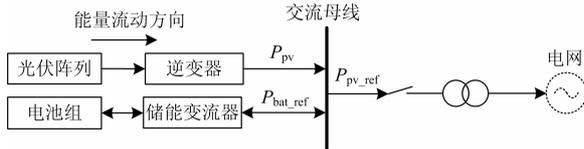


图 1 光储系统结构图

Fig. 1 Diagram of PV-ES system structure

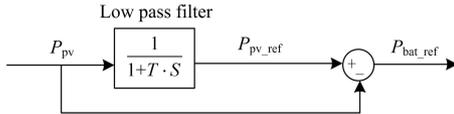


图 2 基本低通滤波原理

Fig. 2 Diagram of low-pass filter

根据能量守恒, P_{pv_ref} 、 P_{pv} 、 P_{bat_ref} 三者之间的关系为

$$P_{pv_ref} - P_{pv} = P_{bat_ref} \quad (1)$$

P_{bat_ref} 为正时,表示电池放电,反之表示电池充电。

低通滤波环节采用一阶巴特沃兹低通滤波器,其传递函数为

$$H(s) = \frac{1}{1+sT} \quad (2)$$

式(2)中: s 为微分算子; T 为滤波时间常数。联络线功率 P_{pv_ref} 和电池输出功率 P_{bat_ref} 的表达式为

$$P_{pv_ref}(s) = \frac{1}{1+sT} \cdot P_{pv}(s) \quad (3)$$

$$P_{bat_ref}(s) = P_{pv_ref}(s) - P_{pv}(s) = -\frac{sT}{1+sT} \cdot P_{pv}(s) \quad (4)$$

将式(3)中的 s 用 d/dt 来表示,并差分后可得

$$P_{pv_ref}(t) = \frac{T_c}{T} [P_{pv}(t) - P_{pv_ref}(t-1)] + P_{pv_ref}(t-1) \quad (5)$$

由式(4)可得

$$P_{bat_ref}(t+1) = P_{pv_ref}(t) - P_{pv}(t) \quad (6)$$

其中: T_c 为计算周期; $P_{pv_ref}(t-1)$ 为光伏发电功率; $P_{pv}(t)$ 为上一时刻的参考值。 $P_{bat_ref}(t+1)$ 为下一时刻电池输出功率的参考值,与 t 时刻的光伏发电功率 $P_{pv}(t)$ 和滤波时间常数 T 相关。

电池储能输出功率传递函数的波特图如图 3 所示,其中 ω 为滤波时间常数 T 所对应的角频率。对于时间常数为 T_1 的曲线,角频率大于 ω_1 后波动分量的输出幅值为 1,即理论上电池储能可以补偿所有角频率大于 ω_1 的高频分量。

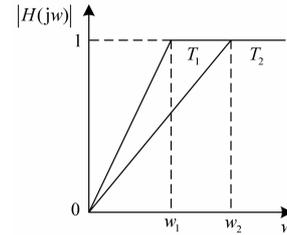


图 3 电池输出功率传递函数波特示意图

Fig. 3 Bode schematic diagram of transfer function of battery output power

当电池储能平抑光伏发电功率波动过程结束后,通过式(6)可得到 n 个 P_{bat_ref} 值,从而获得电池储能的能量配置依据^[8],如式(7)所示。

$$E_{bat} = E_0 - \sum_{m=1}^k P_{bat_ref} \cdot T_c, \quad k=1,2,\dots,n \quad (7)$$

式(7)中, E_0 为储能系统的初始能量,通常取值为 0。通过式(7)可获得电池储能的能量参考值 E_{bat_ref} 可表示为

$$E_{bat_ref} = E_{bat,max} - E_{bat,min} \quad (8)$$

2 基于电池荷电状态的储能优化设计

根据低通滤波原理可获得电池储能的能量参考值 E_{bat_ref} ,但没有考虑储能自身的运行特性和约束条件,如电池荷电状态(SOC),可能导致电池储能系统在实际运行中出现过充过放或功率输出受限等现象。一方面影响电池的使用寿命,另一方面影响光伏发电功率的平抑效果,导致联络线功率出现剧烈波动。因此,应充分结合反映电池储能系统运行特征的荷电状态进一步优化储能系统的能量。

基于电池荷电状态的储能能量优化方法是指在低通滤波的基础上, 根据电池储能的实时 SOC 值调整滤波时间常数, 既满足光伏功率的平滑输出, 又能保证电池储能系统具有最佳的运行条件。当 SOC 值在允许范围内时, 电池储能系统按照初始设定的滤波时间常数输出功率; 当 SOC 超过允许值时, 通过调整滤波时间常数修正电池储能的输出功率, 使得 SOC 值限定在可控范围内, 从而有效地避免电池的过充过放。

基于 SOC 反馈修正的储能电池能量配置方法应设置 $SOC_{min} < SOC_{down} < SOC_{up} < SOC_{max}$ [10]。其中, SOC_{max} 和 SOC_{min} 分别表示储能电池允许的 SOC 最大值和最小值, SOC_{up} 和 SOC_{down} 为调整滤波时间常数的 SOC 上、下限值, 即在 SOC 达到上、下限值之时, 按照一定的调整规则对滤波时间常数进行修正。电池储能的 SOC 调整规则如图 4 所示。

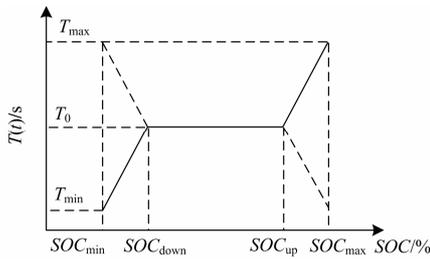


图 4 电池 SOC 与滤波时间常数的关系

Fig. 4 Relationship between SOC and filter time constant

图 4 中, 纵坐标 $T(t)$ 为滤波时间常数, T_{max} 、 T_{min} 为滤波时间常数的上下限, T_0 为滤波时间常数的初始值, K 为滤波时间常数的变化率, T_K 为控制周期。滤波时间常数的修正量为: $dT=K \cdot T_K$ 。如图 4 所示, 利用 4 个 SOC 特征量划分出 5 个工作区域, 运行原则如下:

1) SOC 越上限区: $SOC \geq SOC_{max}$ 时, 储能电池限制充电, 只允许放电, 即 $P_{bat_ref} > 0$, $T=T+dT$ 。

2) SOC 高限值区: $SOC_{up} \leq SOC < SOC_{max}$ 时, 储能电池以少充电多放电为基本原则, 尽量减缓 SOC 的增加率。若 $P_{bat_ref} > 0$, 则 $T=T+dT$; 否则, $T=T-dT$ 。

3) SOC 正常工作区: $SOC_{down} \leq SOC < SOC_{up}$ 时, 滤波时间常数 T 不作调整, 储能电池按照参考功率输出。

4) SOC 低限值区: $SOC_{min} \leq SOC < SOC_{down}$ 时, 储能电池以少放电多充电为基本原则, 尽量减缓 SOC 的下降率。若 $P_{bat_ref} < 0$, 则 $T=T+dT$; 否则, $T=T-dT$ 。

5) SOC 越下限区: $SOC < SOC_{min}$ 时, 储能电

池限制放电, 只允许充电, 即 $P_{bat_ref} < 0$, $T=T+dT$ 。

综上可知, 电池储能的功率和能量与滤波时间常数密切相关。通常, 滤波时间常数越大, 给定角频率 ω 越小, 电池储能补偿的频率范围越大, 整体的平滑效果越好, 电池储能需要的功率和能量越大。

3 光储发电系统中储能优化配置方法的 Matlab 仿真验证

以 132 kW 屋顶光伏电站为功率平滑对象, 其典型的日发电曲线如图 5 所示。

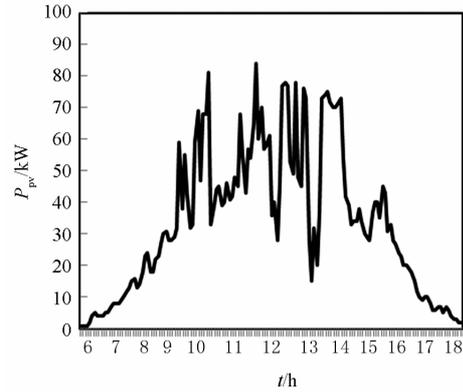


图 5 典型的日光伏发电曲线

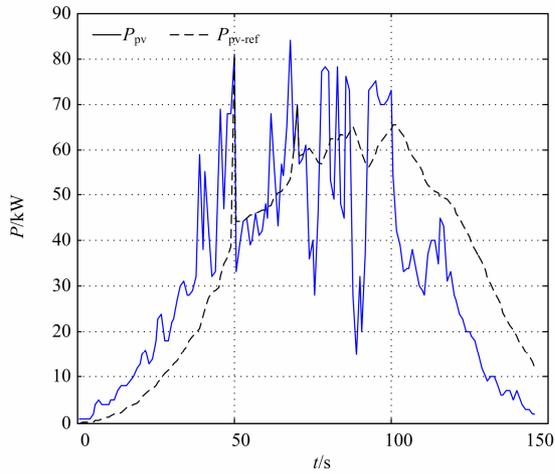
Fig. 5 Typical daily PV power curve

以铁锂电池为储能对象, SOC 各个限值的取值情况如下: $SOC_{max}=100\%$, $SOC_{up}=80\%$, $SOC_{down}=20\%$, $SOC_{min}=0$ 。在实际应用中, 可根据不同储能电池的类型和特性对以上限值进行调整。设定 SOC 的初始值为 SOC_0 , 可以通过电池的充放电功率实时计算电池的 SOC 值为

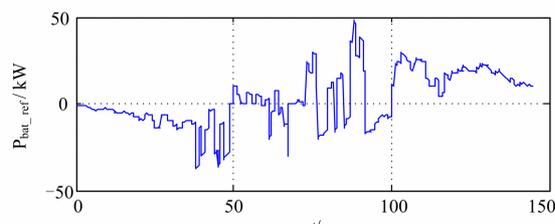
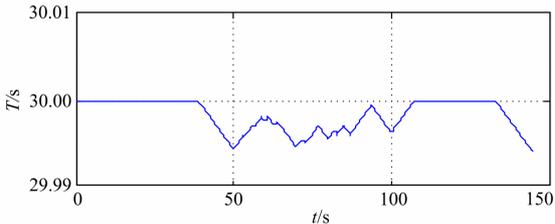
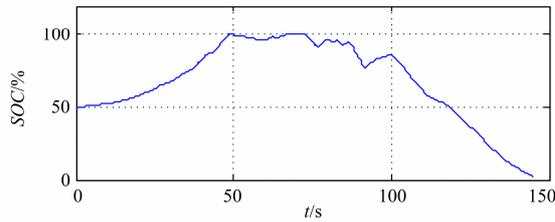
$$SOC = SOC_0 - \frac{\int P_{bat_ref} \cdot t}{E_{bat_ref}} \quad (9)$$

在 Matlab 中分别搭建基本低通滤波模型和基于 SOC 的可变时间常数滤波模型。基本滤波时间常数 T 取 30 s, 根据基本低通滤波的结果, 电池储能系统的额定能量参考值 E_{bat_ref} 为 120 kWh。在基于 SOC 的可变滤波时间常数模型中, T_0 取 30 s, T 的变化范围为 20~40 s, SOC_0 为 50%, 储能的额定能量分别为 80 kWh、120 kWh 和 160 kWh。根据光伏发电曲线的变化特征, 可分为三个阶段: 功率上升阶段、功率波动阶段和功率下降阶段。

铁锂电池的储能能量为 80 kWh, 仿真结果如图 6 所示。



(a) 光伏发电和联络线功率曲线



(b) 电池SOC、时间常数T及电池充放电功率曲线

图 6 储能额定能量为 80 kWh 时的仿真结果

Fig. 6 Simulation results for 80 kWh rated energy capacity

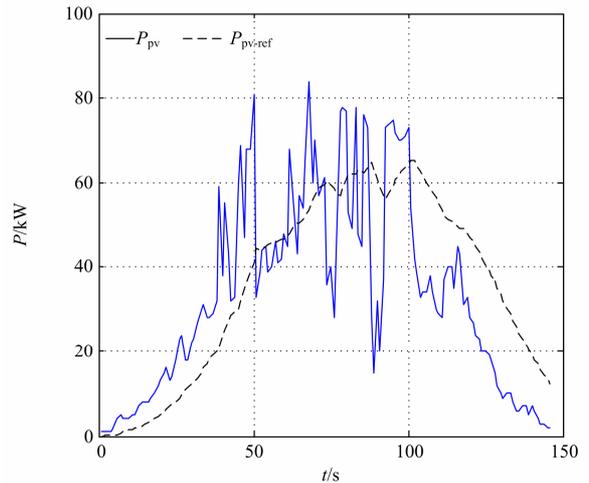
1) 光伏功率上升阶段 (0~49 s)。该阶段光伏出力 P_{pv} 总体呈上升趋势, 电池处于充电状态。 $t=39$ s 时, SOC 达到高限值区 ($\geq 80\%$), 采用可变滤波控制, T 值开始减小; $t=49$ s 时, SOC 达到最大值 ($=100\%$), 电池不允许存储能量, 即只允许放电, $P_{bat-ref}$ 立即变为 0。此时, 电池储能系统不能充分吸收 P_{pv} 的功率波动, 联络线出现明显的波动。

2) 光伏功率波动阶段 (49~100 s)。该阶段光伏出力 P_{pv} 波动较为剧烈, 电池的充放电交替出现, 采用可变滤波控制。 SOC 基本处于高限值区

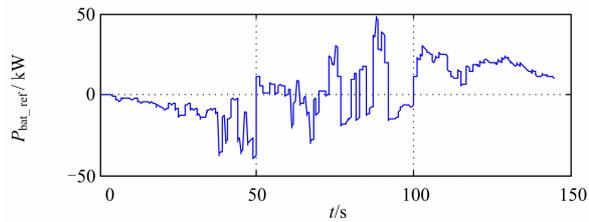
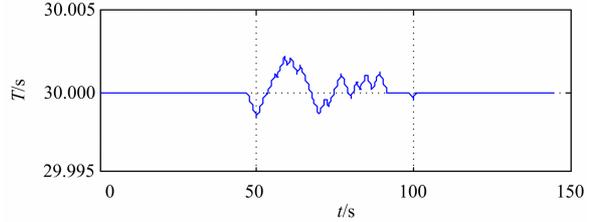
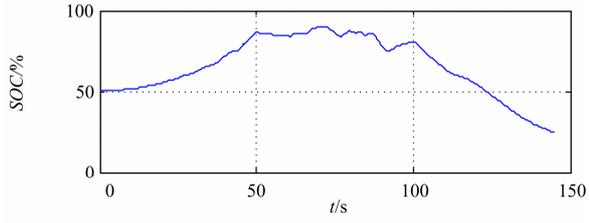
($\geq 80\%$), $t=68$ s 时, SOC 又一次达到最大值 ($=100\%$), $P_{bat-ref}$ 立即变为 0, 联络线再次出现剧烈波动。

3) 光伏功率下降阶段 (100~150 s)。该阶段光伏出力 P_{pv} 总体呈下降趋势, 电池处于放电状态, 采用可变滤波控制。 SOC 从高限值区 ($\geq 80\%$) 减小至低限值区 ($\leq 20\%$), $P_{bat-ref}$ 未受限制, 联络线功率较为平滑。

铁锂电池的储能能量为 120 kWh, 仿真结果如图 7 所示。



(a) 光伏发电和联络线功率曲线



(b) 电池SOC、时间常数T及电池充放电功率曲线

图 7 储能额定容量为 120 kWh 时的仿真结果

Fig. 7 Simulation results for 120 kWh rated energy capacity

1) 光伏功率上升阶段 (0~50 s)。该阶段光伏出力 P_{pv} 总体呈上升趋势, 电池处于充电状态, SOC 不断上升。采用基本滤波控制, T 为 30 s 不变, 通过电池吸收 P_{pv} 的功率波动, 减缓其上升速度。此时, 联络线功率较为平滑。

2) 光伏功率波动阶段 (50~101 s)。该阶段光伏出力 P_{pv} 波动较为剧烈, 电池的充放电过程交替出现。 $t=50$ s 时, SOC 达到高限值区 ($\geq 80\%$), 储能系统采用可变滤波控制, 充电时 T 值减小, 放电时 T 值增大。此时, 联络线功率较为平滑。

3) 光伏功率下降阶段 (101~150 s)。该阶段光伏出力 P_{pv} 总体呈下降趋势, 电池处于放电状态。采用基本滤波控制, T 为 30 s 不变, 通过电池储能系统弥补 P_{pv} 的功率波动, 减缓其下降速率。此时, 联络线功率较为平滑。但需要注意的是, $t=150$ s 时, SOC 值已接近低限值区 (20%)。

铁锂电池的储能能量为 160 kWh, 仿真结果如图 8 所示。在光伏发电的三个不同阶段, 电池储能系统都采用基本滤波控制, T 为 30 s 不变, 联络线功率平滑。

对比以上三组不同储能额定能量下的仿真示例, 可获得:

1) 采用基于电池 SOC 的可变滤波时间常数控制方法可以使 SOC 值保持在合理的范围内 (0~100%), 有效避免电池的过充过放, 保证电池处于最优的工作状态, 延长电池寿命。

2) 电池储能系统的能量配置与光伏功率平滑效果密切相关。当能量配置过低时, 如 E_{bat_ref} 为 80 kWh 时, 由于受电池运行条件的限制, 联络线的功率曲线明显波动; 当 E_{bat_ref} 增加为 120 kWh, 虽然联络线的功率曲线较为平滑, 但电池在较长一段时间内工作在 SOC 高限值区 ($\geq 80\%$), 运行条件苛刻, 且 SOC 终值接近低限值区 (20%), 影响电池使用性能和寿命。当 E_{bat_ref} 增加为 160 kWh 时, 电池一直处于 SOC 正常工作区 (20%~80%), 充放电功率不受限制, 联络线的功率曲线平滑。因此, 文中光储联合发电系统中电池储能系统的最佳能量配置为 160 kWh。

3) 一天光伏发电结束后, 铁锂电池储能系统的 SOC 下降至 20% 左右, 甚至接近 0%。为保证第二天电池储能系统满足平滑光伏波动的能量条件, 应在当天晚上给电池储能系统进行合理地充电。

4) 以配置 160 kWh 的结果为参考, 电池的最大充放电功率, 即吸收或释放光伏功率的最大值分别为 -40 kW 和 48 kW, 约为光伏额定功率的 30%~37%。

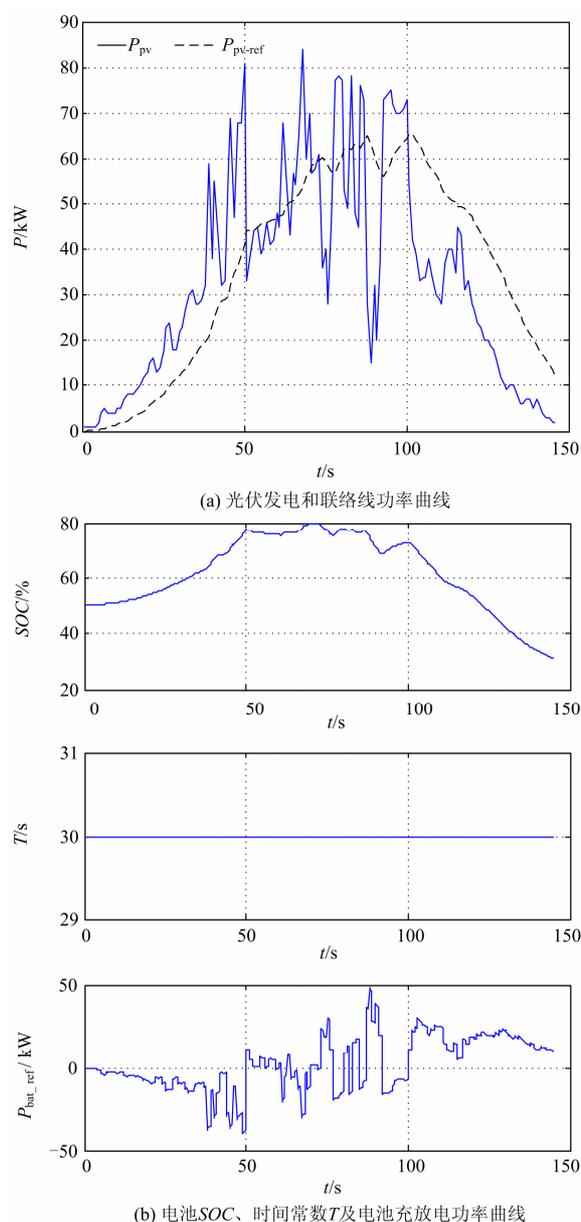


图 8 储能额定容量为 160 kWh 时的仿真结果

Fig. 8 Simulation results for 160 kWh rated energy capacity

根据上述结果, 建议 132 kW 屋顶光伏系统配置 50 kW/160 kWh 铁锂电池储能系统, 额定工作时间为 3.2 h。实际工程中, 应考虑电池储能系统的充放电倍率, 结合实际储能系统的工作电压范围计算出安时容量, 确保满足不同温度条件下的充放电倍率要求。目前, 铁锂电池的标准充放电倍率为 0.5C, 上述配置满足要求。

4 结语

本文在基本滤波控制方法的基础上, 首先确定了储能系统的能量参考值, 建立了基于电池 SOC 的可变滤波时间常数控制方法, 即根据电池 SOC 的变

化调整滤波时间常数, 从而对电池的输出功率进行修正, 优化电池储能系统的功率和能量配置。Matlab 仿真证明, 该方法可有效避免电池的过充过放, 根据不同能量配置对电池输出功率、SOC 运行区间和并网发电功率平滑效果的影响, 确定了用于平抑光伏功率波动的电池储能系统的最佳功率和能量值, 为储能系统的初期规划设计提供了理论参考。

参考文献

- [1] 周卫, 张尧, 夏成军, 等. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 1-5.
ZHOU Wei, ZHANG Yao, XIA Cheng-jun, et al. Effect of distributed generation on relay protection of distributed system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 1-5.
- [2] 陈宁, 于继来. 兼顾系统调频需求的分布式风电分散自治调控策略[J]. 电工技术学报, 2008, 23(11): 123-130.
CHEN Ning, YU Ji-lai. Strategy for decentralized autonomous regulation of distributed wind power considering system frequency regulation demand[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(11): 123-130.
- [3] Standards Coordinating Committee 21. IEEE Std 1547-2003 IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power system[S]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2003.
- [4] 全国电力监管标准化技术委员会. GB/T 19963-2011 风电场接入电网技术规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
SAC/TC 296. GB/T 19963-2011 technical rule for connecting wind farm to power system[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [5] 于慎航. 风电场储能容量计算及虚拟储能技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
YU Shen-hang. Calculation of energy storage capacity in wind farm and research on virtual storage technology[D]. Jinan: Shandong University, 2011.
- [6] 吴云亮, 孙元章, 徐箭, 等. 基于饱和控制理论的储能装置容量配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 32-39.
WU Yun-liang, SUN Yuan-zhang, XU Jian, et al. Determination methodology for energy storage capacity based on saturation control theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 32-39.
- [7] Teleke Sercan, Baran M E, Huang A Q, et al. Control strategies for battery energy storage for wind farm dispatching[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2009, 24(3): 725-732.
- [8] 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.
- [9] 张坤, 吴建东, 毛承雄. 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 Jian-dong, MAO Cheng-xiong. Optimal control of energy storage system for wind power generation based on fuzzy algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 27(10): 235-241.
- [10] 胡国珍, 段善旭, 蔡涛, 等. 基于液流电池储能的光伏发电系统容量配置及成本分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 260-267.
HU Guo-zhen, DUAN Shan-xu, CAI Tao, et al. Sizing and cost analysis of photovoltaic generation system based on vanadium redox battery[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 260-267.
- [11] 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): 36-38.
ZHANG Ye, GUO Li, JIA Hong-jie, 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): 36-38.
- [12] 杨瑶, 张建成, 高阳, 等. 针对独立风光发电中混合储能容量优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 38-44.
YANG Yao, ZHANG Jian-cheng, GAO Yang, et al. Research on capacity optimization of hybrid energy storage system in stand-alone wind/PV power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 38-44.
- [13] 邱培春, 葛宝明, 毕大强, 等. 基于蓄电池储能的光伏并网发电功率平抑控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 29-33.
QIU Pei-chun, GE Bao-ming, BI Da-qiang, et al. Battery energy storage-based power stabilizing control for grid-connected photovoltaic power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 29-33.

收稿日期: 2013-05-03; 修回日期: 2013-05-28

作者简介:

王伟(1980-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为智能电网试点示范工程和科技项目管理;

薛金花(1984-), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究方向为储能在不同应用中的容量配置技术; E-mail: xuejinhua@epri.sgcc.com.cn

叶季蕾(1983-), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为储能在不同应用中的技术/经济性分析。