

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.06.002

光储微电网混合储能系统的控制策略及开关优化

毕晓辉^{1,2}, 孙 韬¹, 毛 瑞³, 房 勇⁴, 侯世英¹

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 国网四川省电力公司天府新区供电公司, 成都 610041; 3. 国网四川省电力公司仁寿县供电分公司, 四川 眉山 620500; 4. 西安黄河光伏科技有限公司, 西安 710000)

摘要:传统光储微电网混合储能系统控制策略将蓄电池视为容量无限大的理想元件,而实际上蓄电池容量有限,当蓄电池剩余电量达到阈值无法正常工作时传统控制策略将不适用。在二阶低通滤波法的基础上提出一种光储微电网混合储能系统的新型控制策略,同时考虑超级电容与蓄电池的剩余电量,根据储能元件的荷电状态调整储能元件输出电流参考值,维持储能元件剩余电量,但在极端天气情况下,仍需与储能元件保护开关相配合。由于采用传统储能元件保护开关的储能系统需独立的充放电电路,存在成本较高、充放电不连续等问题,因此,对储能元件的保护开关进行了改进,利用开关与二极管并联使其具有 4 种工作状态,在储能元件剩余电量达到阈值时,可自动恢复电量,降低了成本,提高了并网输出电能质量。最后结合新型控制策略与改进的保护开关,提出整体的混合储能系统控制方案,并用 Matlab/Simulink 对其进行仿真验证,结果证明了所提方法的正确性与可行性。

关键词:光储微电网;混合储能;低通滤波;保护开关

中图分类号:TM 344.1

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2016)06-011-08

Control strategy and protection switch optimization of hybrid energy storage system for PV-storage microgrid system

BI Xiaohui^{1,2}, SUN Tao¹, MAO Rui³, FANG Yong⁴, HOU Shiyong¹

(1.State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China; 2. State Grid SichuanTianfu

Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, P.R.China; 3.State Grid Sichuan Renshou County Electric Power Supply Branch, Meishan 620500, Sichuan, P.R. China; 4.Xi'an Huanghe Photovoltaic Technology Co.,Ltd., Xi'an 710000, P.R.China)

Abstract:In the conventional control strategy of the PV-storage micro-grid hybrid energy storage system (HESS), battery is regarded as an ideal element which has infinite capacity. However, the battery capacity is limited and the conventional control strategy is no longer suitable when the threshold of battery state-of-charge (SOC) is reached and can not work properly. Thus, we proposed a new control strategy for the PV-storage micro-grid HESS based on the second-order low-pass filtering method. This strategy takes the SOC

收稿日期:2016-07-02

基金项目:国家“111”计划项目(B08036)资助项目。

Supported by the National 111 Program(B08036).

作者简介:毕晓辉(1990-), 硕士, 主要从事新能源发电技术研究。

侯世英(联系人), 女, 重庆大学教授, 主要从事电力系统谐波抑制与无功补偿、电力电子新技术及应用、新能源发电技术、智能控制理论与应用等研究, (E-mail)houshiying@163.com。

of super-capacitor and battery into account, adjusts the reference value of output current of energy storage element and maintains the SOC of storage element. But in extreme weather conditions, the strategy still needs to cooperate with the protection switch of energy storage element. Furthermore, the HESS using conventional protection switch of energy storage element needs separate charging and discharging circuits, which leads to some problems such as high cost, discontinuous of charge and discharge, etc. So the protection switch of energy storage elements was improved in this paper, which has four working states based on the shunt of switch and diode. The modified protection switch can make SOC back to normal when it reaches threshold, which can reduce cost and improve the quality of grid-connected power output. The overall control scheme of hybrid energy storage system that combines new control strategy with improved protection switch was proposed and simulated in MATLAB Simulink, and the results validate the correctness and the feasibility of the proposed method.

Keywords: PV-storage microgrid system; hybrid storage; low-pass filtering; protection switch

化石能源向新能源转型已成为一种必然的趋势,但可再生能源运行状态具有间歇性,大规模并网运行会对电网的可靠性和安全性带来重大影响^[1],因此,有专家提出微网的概念^[2],利用储能系统平抑功率波动,在并网运行时,对可再生能源的输出功率进行削峰填谷,抑制功率波动,提高并网功率的电能质量^[3]。

储能系统需要具有较大的能量密度,用于存储及释放更多的能量,还需具有较大的功率密度,满足频繁大功率充放电的需求,同时考虑经济性。单一的储能元件很难同时满足多方面的要求。经过专家学者的研究,超级电容与蓄电池混合储能系统是一种可行的解决方案^[4]。

针对光储微电网并网运行状态下混合储能系统控制策略进行研究。混合储能的控制策略直接影响并网电能质量、储能系统的成本、寿命周期和效率等。目前已有很多专家学者对此进行研究,文献[5]采用规则法,可使超级电容的输出功率限定在较小范围,但蓄电池输出功率变化率较大,影响其使用寿命^[6];文献[7-8]采用低通滤波法,控制过程简单,高低功率分离效果好;文献[9-11]在滤波法的基础上考虑了超级电容的剩余电量(the state of charge, SOC),根据超级电容 SOC 的状态调整超级电容及蓄电池的输出功率参考值,可有效控制超级电容的 SOC。以上控制策略前提都是将蓄电池视为容量无限大的理想储能元件,实际上,相对于发电单元,蓄电池的容量仍较小,易出现过充与过放现象,一旦蓄电池的 SOC 达到阈值,传统控制方法都将不具有适用性,并且过充与过放会严重缩短蓄电池的使用寿命。因此,在二级低通滤波法的基础上进行改进,提出一种新型混合储能控制策略,同时考虑超级电容与蓄电池的 SOC,根据储能元件的荷电状态调整储能元件输出电流参考值,将超级电容与蓄电池 SOC 控制在最优工作区间,从而延长蓄电池的使用寿命,提高控制策略的实用性。但在极端天气情况或发生故障时,控制策略需要与保护开关相配合,才能防止蓄电池过充或过放。传统的保护开关功能单一,当储能元件 SOC 达到阈值时仅能将储能元件从电网切除,再经单独的充放电电路将 SOC 恢复到正常水平后接入电网,造成储能元件工作不连续,独立的充放电电路也增加了成本^[11-12]。因此,对储能元件保护开关进行改进,使储能元件有 4 种工作状态,无需独立充放电电路就可自动恢复 SOC,可降低成本、延长储能系统的工作寿命、提高光储微电网并网电能质量。

本文中,首先介绍光储微电网的拓扑结构,以国网新源张家口风光储示范电站光储微网部分作为研究对象;其次介绍传统的二级低通滤波法,并在其基础上进行改进,可同时控制蓄电池与超级电容的 SOC;再对传统保护开关进行改进,并结合改进的二级低通滤波法,提出总的光储微电网混合储能控制方案;最后,基于 Matlab/Simulink 搭建光储微电网仿真实验平台,仿真结果证明了本文所提方法及改进保护开关的正确性与可行性。

1 光储微电网的拓扑结构

针对国网新源张家口风光储示范电站有限公司光储微网部分结构进行研究,图 1 为光储微网结构图。包含四大部分:光伏阵列、本地负载、电网以及混合储能系统。蓄电池组与超级电容器组通过变流器连接到

交流母线。

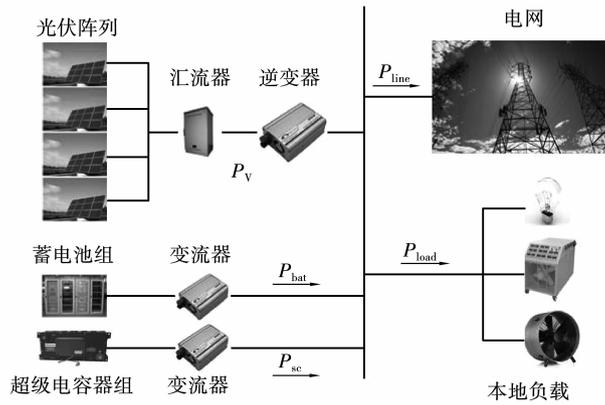


图 1 光储微网拓扑结构

Fig.1 Structure of PV-storage microgrid system

2 混合储能控制策略

2.1 二级低通滤波法

如图 1 所示,各部分输出功率间的关系可表示为

$$P_V + P_{bat} + P_{sc} = P_{line} + P_{load}, \quad (1)$$

式中: P_V 为光伏的输出功率; P_{sc} 为超级电容的输出功率, P_{bat} 为蓄电池的输出功率,储能元件放电时为正,充电时为负; P_{line} 为并网功率,向电网放电时为正,从电网取电时为负; P_{load} 为本地负载功率,由于 P_{load} 较小,故后文将其忽略。

图 2 所示为光储微网并网运行时各部分理想出力的频谱图^[8]。 P_{sc} 频率最高,充分发挥超级电容充放电速度快的优势, P_{line} 频率最低,保证并网输出功率平滑,提高并网的电能质量; P_{bat} 频率处于中间位置,可提高蓄电池使用寿命。

二级低通滤波法可以实现上述各部分出力频率。如图 3 所示,利用 2 个截止频率不同的低通滤波器将 P_V 分成 3 个频段,低频部分为并网输出功率,中频部分由蓄电池补偿,高频部分由超级电容补偿。其中 P_{bat_ref} 为蓄电池输出功率的参考值, P_{sc_ref} 为超级电容输出功率的参考值。时间常数 $T_{sc} < T_{bat}$ 。

由图 3 可得:

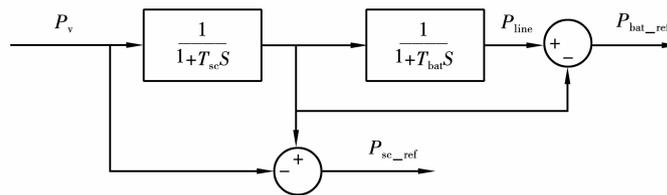


图 3 二级低通滤波法

Fig. 3 Two stage low pass filter method

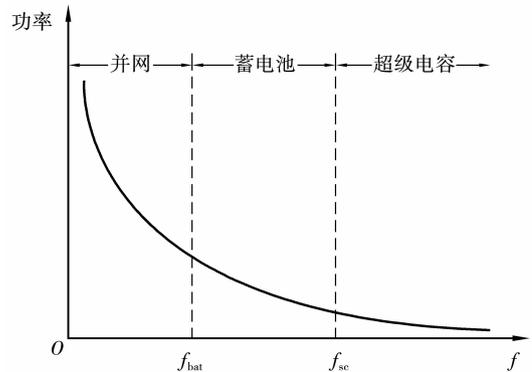


图 2 分布式电源出力波动频谱图

Fig. 2 Distributed power output fluctuation spectrum

$$\begin{cases} P_{sc_ref} = -\frac{T_{sc}S}{1+T_{sc}S}P_V, \\ P_{bat_ref} = -\frac{1}{(1+T_{sc}S)}\frac{T_{bat}S}{(1+T_{bat}S)}P_V. \end{cases} \quad (2)$$

2.2 考虑剩余电量的改进方法

由于蓄电池与超级电容有容量限制,需要对 SOC 进行控制。在二级低通滤波法基础上进行改进,如图 4 所示。

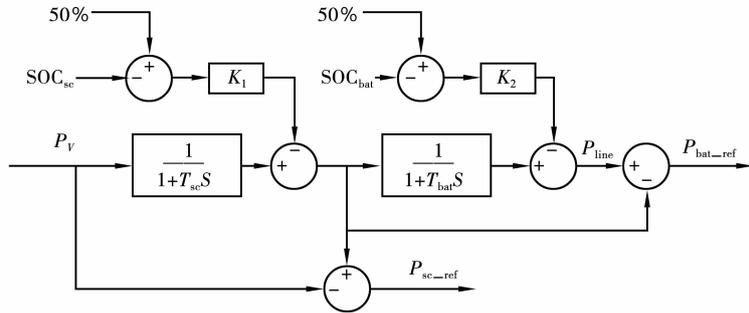


图 4 改进的混合储能控制策略
Fig. 4 Improved control strategy of HESS

在图 3 的基础上,实时采集蓄电池组与超级电容器组的 SOC,分别将其与 50% 相比较,再经过比例放大,反馈到二级低通滤波法中,可用公式表示为

$$\begin{cases} P_{sc_ref} = -\frac{T_{sc}S}{1+T_{sc}S}P_V - K_1(50\% - SOC_{sc}), \\ P_{bat_ref} = -\frac{1}{(1+T_{sc}S)}\frac{T_{bat}S}{(1+T_{bat}S)}P_V - K_2(50\% - SOC_{bat}). \end{cases} \quad (3)$$

式中: K_1, K_2 为比例放大系数,可知当 SOC_{sc} 小于 50% 时,超级电容输出功率的参考值减小,减缓其剩余电量继续减小;当 SOC_{sc} 大于 50% 时,超级电容输出功率参考值变大,减缓其剩余电量继续增大,并且 SOC 越接近阈值调节量越大,蓄电池也是同理。由此可以做到同时对蓄电池与超级电容 SOC 有效控制。

可见,改进的二级低通滤波法有以下优点:

- 1) 传统控制方法没有或只能对超级电容 SOC 进行控制,所提方法可以同时控制超级电容与蓄电池 SOC 进行控制。
- 2) 由于储能元件的 SOC 是缓慢的连续变量,作为调节量不会影响 P_{line} 与 P_{bat} 的平滑性,可保证并网功率电能质量。
- 3) 控制简单,响应速度快。

2.3 储能元件保护开关的优化

在极端天气情况或发生故障时,储能元件的保护开关发挥着重要的作用,在储能元件 SOC 达到阈值时将其从电网断开,防止储能元件过充与过放。传统保护开关如图 5 所示,仅有断开和闭合功能,因此,断开后需要独立的充放电电路将储能元件 SOC 恢复到正常水平,再闭合接入电网,过程较为繁琐且成本较高。因此,笔者对保护电路进行改进,由 2 个开关和 2 个二极管并联组成,如图 6 所示,通过控制 2 个开关,可以得到 4 种不同的工作状态。如表 1 所示,其中 0 代表关断,1 代表导通。

表 1 保护开关控制方式
Table 1 Protection switch control

S_1 状态	S_2 状态	储能元件状态
0	1	只充电不放电
1	0	只放电不充电
1	1	正常工作
0	0	断开

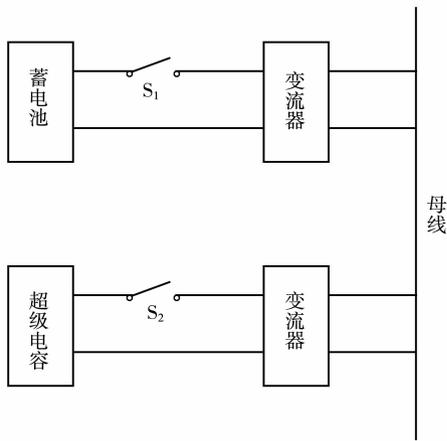


图 5 传统保护开关

Fig. 5 The traditional protection switch

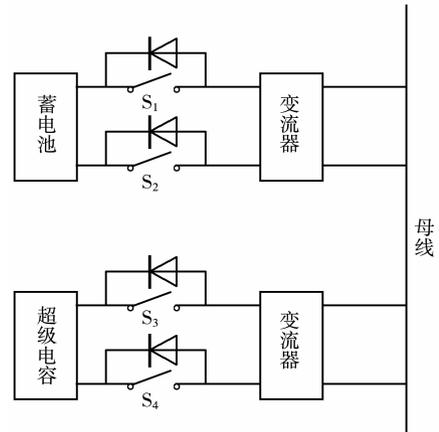


图 6 改进保护开关

Fig. 6 The Improved protection switch

在储能元件 SOC 达到上限时, S_1 导通、 S_2 关断, 储能元件只放电不充电, 在防止储能元件过充的同时自动恢复电量, 省去独立的放电电路, 降低了成本; SOC 达到下限时同理。

改进的保护开关结合上文提出的改进控制策略, 可以在储能元件恢复电量的同时平抑光伏输入的功率波动, 平滑并网输出功率, 提高并网电能质量。控制逻辑框图如 7 所示。

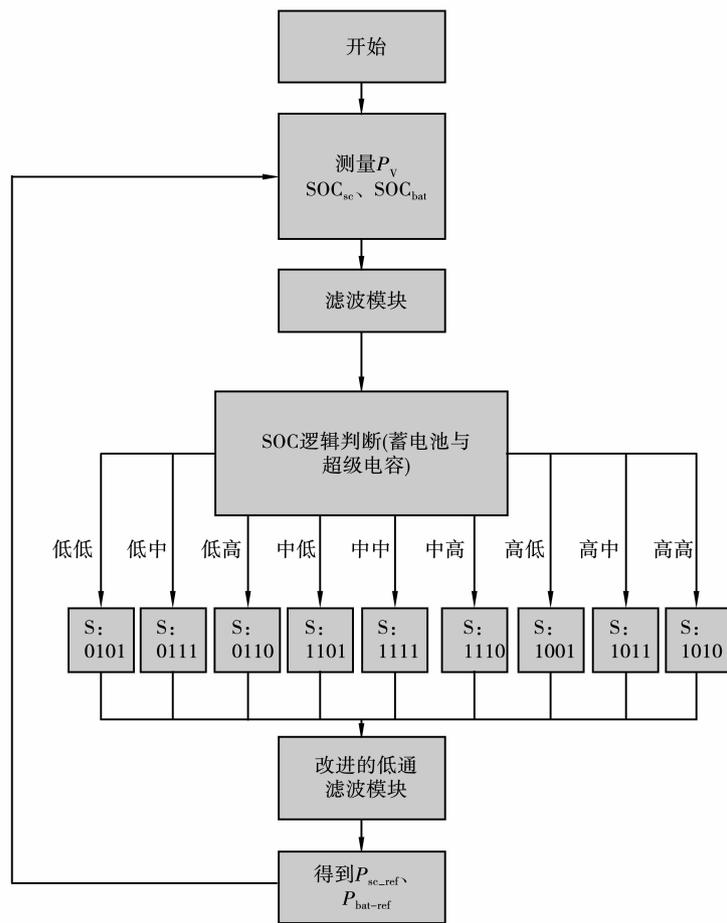


图 7 混合储能系统控制逻辑框图

Fig. 7 Control logic diagram of HESS

如图 7 所示,通过传感器监测光伏输出功率及储能元件的剩余电量,经过滤波模块,根据蓄电池和超级电容的 SOC 进行逻辑判断,如果 SOC 低于 20% 则为“低”,高于 80% 为“高”,在二者之间为“中”,“低中”表示蓄电池的 SOC 小于 20%,超级电容的 SOC 在 20% 和 80% 之间,以此类推,根据不同的情况确定开关 $S_1 \sim S_4$ 的开关状态,接着将 P_V 、 SOC_{sc} 、 SOC_{bat} 输入图 4 所示的改进低通滤波模块,最终得到超级电容和蓄电池输出功率的参考值,并循环检测及计算。

3 仿真验证

3.1 仿真模型

以张家口 140 kW 光储微电网为例,光伏阵列最大输出功率为 98 kW。利用 Matlab/Silulink 进行仿真,光伏模拟输出功率波形如图 8 所示。

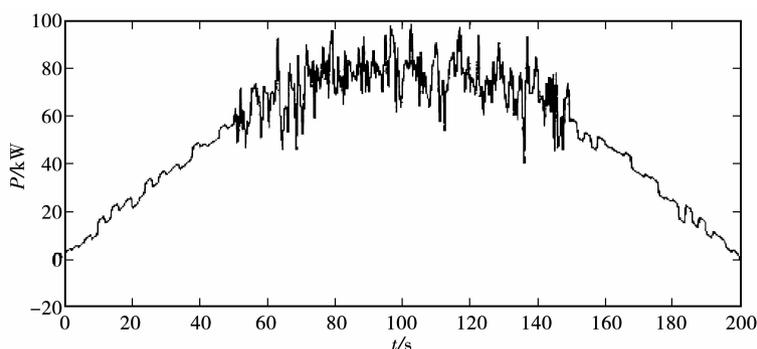


图 8 光伏输出功率波形

Fig. 8 Output power waveform of P_V

3.2 仿真结果与分析

3.2.1 传统低通滤波法仿真结果

使用传统的低通滤波法进行仿真,并令 $T_{sc} = 2.5$ s, $T_{bat} = 20$ s。从图 9(b)中可以看出,由于光伏输出的不断增强,蓄电池和超级电容的 SOC 不断升高,经过 24 s 时超级电容 SOC 达到 80% 保护开关动作,78 s 时蓄电池的 SOC 同样达到 80% 保护开关动作,因此,图 9(a)中并网功率 P_{line} 质量很差,波动较大。

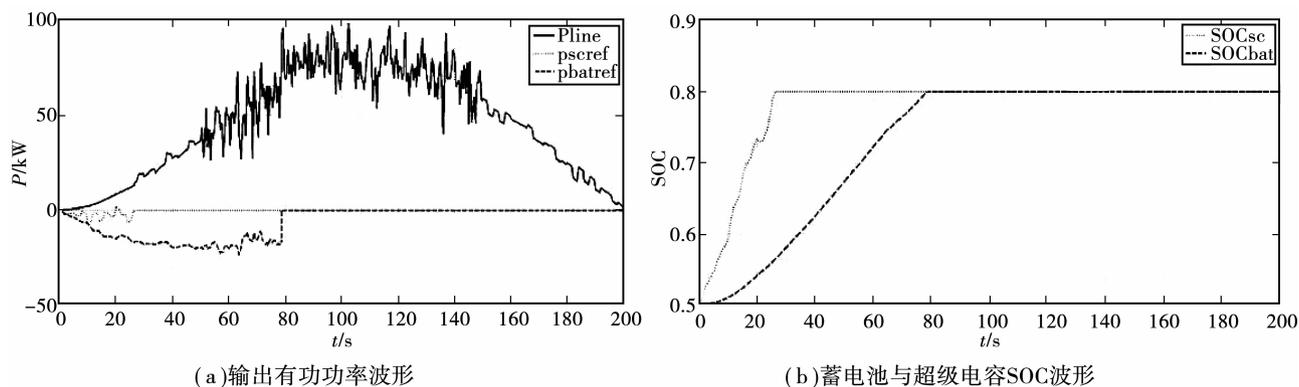


图 9 传统低通滤波法仿真结果

Fig. 9 Simulation results of low pass filter method

3.2.2 改进的低通滤波法

在不改变光伏输出功率及滤波时间常数的情况下,采用本文中提出的改进型低通滤波控制方法,取 $K_1 = 10$, $K_2 = 20$,仿真结果如图 10 所示,蓄电池和超级电容的 SOC 都保持在 20% 到 80% 之间,并网输出功率 P_{line} 平滑,证明本文提出的改进型控制策略可以根据 SOC 状态调节输出功率的参考值,起到智能调节超级电容与蓄电池 SOC 的作用。

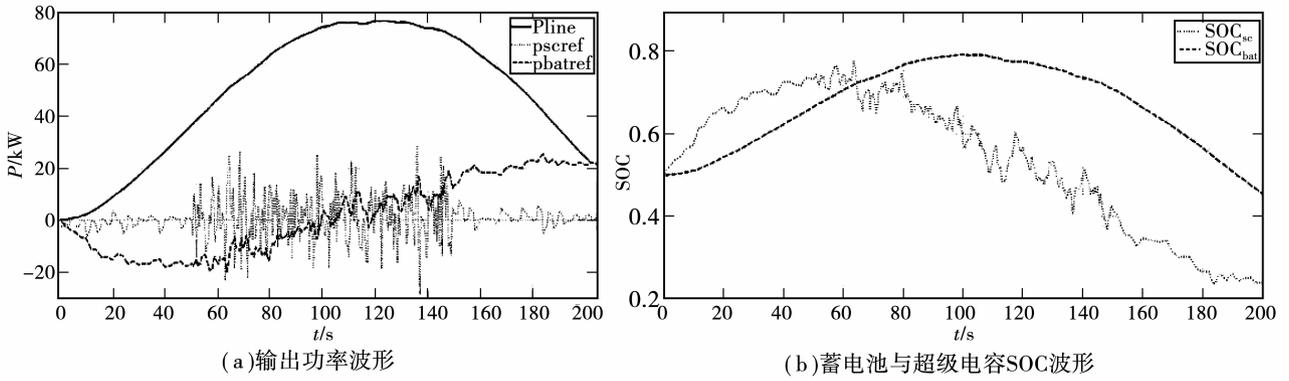


图 10 改进低通滤波法仿真结果

Fig. 10 Simulation results of Improved control strategy of HESS

3.2.3 改进的保护开关仿真结果

由于图 8 所示的情况,在使用改进型控制策略时不能使储能元件 SOC 达到阈值,为了观察储能元件 SOC 达到阈值时开关的工作效果,下面增大光伏输出,选取强烈日照下的光伏输出功率,如图 11 所示,最大输出功率增大为 190 kW。

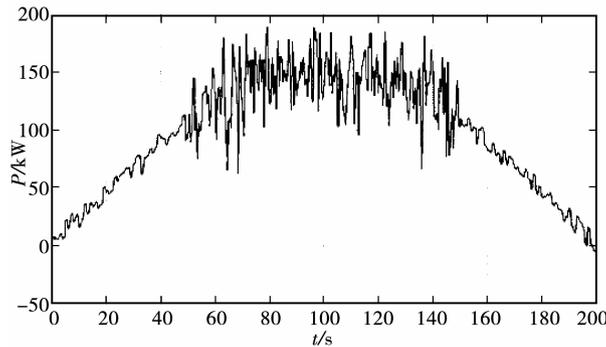


图 11 强烈日照下光伏输出功率波形

Fig. 11 Output power waveform of Strong P_v power generation

采用改进型低通滤波法及改进的保护开关,仿真结果如图 12 所示,超级电容 SOC 在工作后 22 s 达到 80%,并于 160 s 降到 20%,蓄电池在 46 s 到达 80%,但是蓄电池和超级电容 SOC 并未超过限定,并且自动回到正常工作范围,并网功率虽然有些抖动,但相对于传统控制方法,已有较大改善。

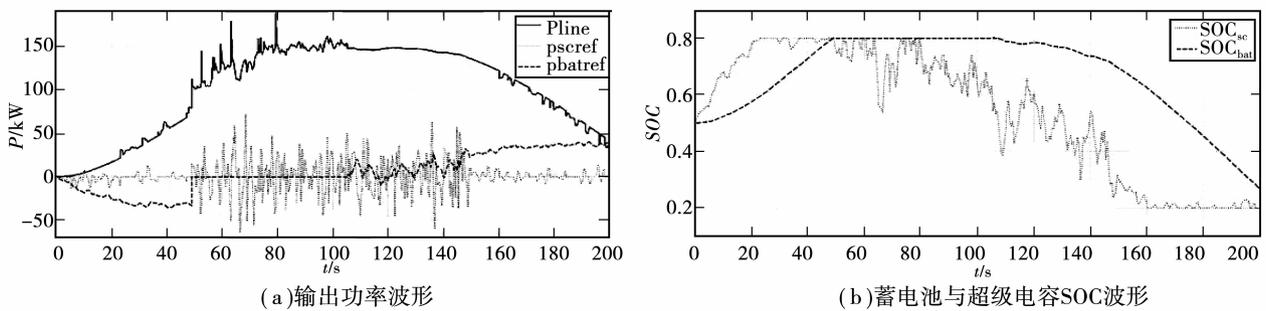


图 12 强日照条件下仿真结果

Fig.12 Simulation results under Strong P_v power generation

4 结 语

笔者针对光储微电网混合储能控制策略与储能元件保护开关进行研究,对传统的二级低通滤波法进行改进,可同时控制蓄电池与超级电容的 SOC,并对传统保护开关进行改进,结合改进混合储能控制策略,可以省去单独的充放电电路,降低了成本、延长储能系统的工作寿命、提高光储微网并网电能质量,对光储微电网的建设有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 任磊.基于孤岛概率的微电网可靠性评估[J].重庆大学学报,2014,37(Z2):203-208.
Ren Lei. Reliability assessment of microgrid based on the probability of island probability[J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(Sup2):203-208. (in Chinese)
- [2] Hatziaargyriou N, Asano H, Iravani R, et al. Microgrids[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(4):78-94.
- [3] 卢继平,朱三立,韩涛,等.风电场储能容量合理取值范围分析[J].重庆大学学报,2010, 33(8):46-51.
LU Jiping, ZHU Sanli, HAN Tao, et al. Analysis of reasonable wind farm energy storage capacity range[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(8):46-51. (in Chinese)
- [4] 戴崇,孙雯,金明.微电网中混合储能技术应用前景的探讨[J].电源技术,2013, 37(5):817-820.
DAI Chong, SUN Wen, JIN Ming. Discussion about prospects of hybrid energy storage system in micro-grid[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2013, 37(5):817-820.(in Chinese)
- [5] Zhu Y X, Zhuo F, Shi H T. Power management strategy research for a photovoltaic-hybrid energy storage system[C]// Ecce Asia Downunder. [S.l.]: IEEE Press, 2013:842-848.
- [6] Choi S S, Hong S L. Factors that affect cycle-life and possible degradation mechanisms of a Li-ion cell based on LiCoO₂ [J]. Journal of Power Sources, 2002, 111(1):130-136.
- [7] 廖毅.风光储联合发电系统输出功率特性和控制策略的研究[D].北京:华北电力大学,2012.
LIAO Yi. An optimization strategy of smoothing control of HPWS active power output [D]. Beijing:North China Electric Power University press, 2012. (in Chinese)
- [8] 桑丙玉,陶以彬,郑高,等. 超级电容-蓄电池混合储能拓扑结构和控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2014, 42(2): 1-6.
SANG Bingyu, TAO Yibin, ZHENG Gao, et al. Research on topology and control strategy of the super-capacitor and battery hybrid energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2):1-6. (in Chinese)
- [9] 谢石骁.混合储能系统控制策略与容量配置研究[D].杭州:浙江大学,2012.
XIE Shixiao. Research of control strategy and capacity configuration method hybrid energy storage system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] Liu F C, Liu J J, Zhang B, et al. Energy management of hybrid energy storage system (HESS) based on sliding mode control[C]// International Power Electronics and Motion Control Conference. [S.l.]:IEEE,2012:406-410.
- [12] 王昌贤.光伏电站中蓄电池的维护[J].青海科技,2006, 13(5):10-12.
WANG Changxian. Maintenance of storage battery in photovoltaic power station[J]. Qinghai Science and Technology, 2006, 13(5):10-12. (in Chinese)

(编辑 王维朗)