

DOI: 10. 13382/j. jemi. B2104299

基于三频段分解的混合储能功率分配策略研究*

於 跃 高文根 何飞帆 王 瑞

(安徽工程大学 检测技术与节能装置安徽省重点实验室 芜湖 241000)

摘 要:从维持微电网安全稳定运行,延长蓄电池使用寿命的角度出发,提出一种改进型混合储能控制策略,通过将待平抑功率分解为高、中、低频段 3 种分量,引入储能系统 SOC 的反馈来设计混合储能功率分配策略,减少蓄电池充放电次数,延长其使用寿命,同时防止储能系统出现过充/过放现象,使混合储能稳定安全响应电网能量调度。实际算例证明,与传统控制策略相比,在相同工况下改进型控制策略使蓄电池充放电次数降低了 58.3%,并且能够有效解决由于储能设备的过充/过放而导致系统不能正常稳定运行的问题。

关键词:微电网;混合储能;功率分配;能量管理;荷电状态

中图分类号: TM615 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510. 80

Research on power allocation strategy of hybrid energy storage
based on three-band decomposition

Yu Yue Gao Wengen He Feifan Wang Rui

(Anhui Polytechnic University, Key Laboratory of Detection Technology and Energy Saving
Devices of Anhui Province, Wuhu 241000, China)

Abstract: From the perspective of maintaining the safe and stable operation of the microgrid and prolonging the service life of the battery, an improved hybrid energy storage control strategy is proposed, which is designed by decomposing the power to be stabilized into three components in the high, middle and low frequency bands, and introducing the feedback of the energy storage system SOC. The hybrid energy storage power distribution strategy reduces the number of charging and discharging of the battery and prolongs its service life. At the same time, it prevents the energy storage system from overcharging/overdischarging, so that the hybrid energy storage can respond stably and safely to the grid energy dispatch. The actual calculation examples and the comparison simulation experiment results prove that: compared with the traditional control strategy, the improved control strategy reduces the charge and discharge times of the battery by 58.3% under the same working conditions, and can effectively solve the problem that the system cannot operate normally and stably due to the overcharge/overdischarge of the energy storage equipment.

Keywords: microgrid; hybrid energy storage; power distribution; energy management; state of charge

0 引 言

光伏发电具有灵活、经济和环保的优点,是未来世界上发展最快、最有前途的新能源技术之一^[1-2]。但光伏本身具有的随机性和间歇性^[3-5],使得无论是分布式发电还是集中并网,直接接入光伏都会给微网系统带来稳定性、

安全性问题^[6-8],通常需要在微网中加入储能系统增强系统的调节能力以达到平抑系统扰动、维持系统内功率平衡、保持直流母线电压稳定的目的。考虑到各种储能本身不同的物理特性,以及在面对系统扰动过程中不同的响应特性,因此对储能系统辅以适当的控制策略以协调储能单元各自承担功率,对微电网的稳定性和安全性尤为重要^[9]。

收稿日期: 2021-05-15 Received Date: 2021-05-15

* 基金项目:安徽省重点研究与开发计划(201904a05020007)、安徽省自然科学基金(1908085MF215)、国家级大学生创新创业训练计划(201910363028)项目资助

目前对微网混合储能系统的研究主要集中在功率分配和能量管理方向。文献[10]设计了多种微电网系统运行模式,但未考虑加入超级电容的控制策略,仅使用了单一的蓄电池储能,系统稳定性有所欠缺。文献[11-15]的功率分配策略使用了低通滤波法把系统功率波动分解为高频部分和低频部分,利用混合储能系统分别加以吸收/释放来保持系统稳定性。文献[16]采用了分层控制策略,根据系统不同情况对储能系统进行协调控制。

现有文献对储能系统的控制策略的研究已经较为成熟,但同时考虑储能系统安全性和经济性的研究较少。故本文从不同储能本身固有特性出发,借助低通滤波器将待平抑功率分为高中低 3 种频段功率分量,根据储能系统的实时状态设计多种系统运行模式,以减少蓄电池需承担功率,在很大程度上缓解了蓄电池的出力,使蓄电池的充放电次数大大减少,有效延长蓄电池的使用寿命,同时有效改善了因储能单元过充或过放导致系统不能正常工作的缺点,维持系统稳定运行。采用微电网平台实际数据进行算例分析,分析结果验证了本文所提方法的有效性。

1 含混合储能的光伏微电网系统结构

本文以所在单位的实际微电网平台为研究对象,该平台结构如图 1 所示,设计采用交直流混合微电网架构,系统包括光伏发电单元、微电网储能单元、并网逆变器单元、可控负荷单元、电能质量监测单元、微电网能量调度与管理系统和微电网综合保护系统等。光伏发电系统和混合储能系统通过双向 DC/DC 变换器先并入直流电网,然后通过双向 DC/AC 并入交流电网。

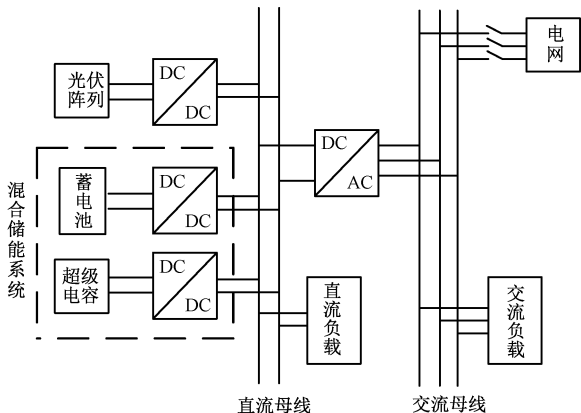


图 1 光伏微电网结构

Fig. 1 Photovoltaic microgrid structure

为达到平抑系统扰动、保持直流母线电压稳定的目的,功率分配模块以微网系统内光伏系统输出功率、负载功率和配电网功率实时变化值为依据,来完成储能系统

出力参考值的计算,使储能系统实时响应系统内功率需求,实现系统内功率平衡,维持微网系统稳定运行。

系统各单元的功率关系为:

$$\begin{cases} \eta(P_{PV} + P_{Hess} - P_{DCLoad}) = P_G - P_{ACLoad} \\ P_{Hess} = P_{SC} + P_{bat} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{Hess} 为储能系统所需承担总功率,为超级电容和蓄电池需承担功率之和; P_{PV} 、 P_G 、 P_{DCLoad} 、 P_{ACLoad} 分别为光伏系统输出功率、并网口功率、直流负载消耗的功率、交流负载消耗的功率; η 为逆变器的转换效率; P_{bat} 为蓄电池吸收/释放的功率, P_{SC} 为超级电容吸收/释放的功率。当 $P_{bat} > 0$ 时,蓄电池放电, $P_{bat} < 0$ 时,蓄电池充电,当 $P_{SC} > 0$ 时,超级电容放电, $P_{SC} < 0$ 时,超级电容充电。

2 混合储能传统控制策略

2.1 混合储能传统功率分配策略

根据微电网中各单元功率关系式与低通滤波器的原理,传统策略中蓄电池和超级电容功率分配如图 2 所示。

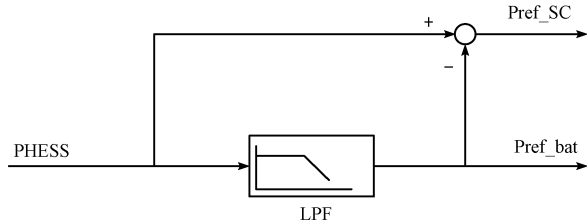


图 2 传统功率分配策略

Fig. 2 Traditional power allocation strategy

功率分配数学模型如式(2)所示。

$$\begin{cases} P_{ref_bat} = P_{Hess} \cdot \frac{1}{\tau s + 1} \\ P_{ref_sc} = P_{Hess} - P_{Hess} \cdot \frac{1}{\tau s + 1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: τ 为低通滤波器的时间常数; P_{ref_bat} 为蓄电池承担功率的参考值; P_{ref_sc} 为超级电容承担功率的参考值。在蓄电池和超级电容端电压确定的情况下,得到蓄电池和超级电容的参考电流值 i_{bat_ref} 、 i_{sc_ref} ,通过与蓄电池和超级电容的实际电流值比较得到电流差值,最后利用电力电子装置实现储能单元对功率的吸收和释放。

2.2 混合储能传统能量管理策略

传统能量管理策略为了实现对储能系统电量的限制,通过设置储能单元的最大值和最小值防止蓄电池和超级电容出现过充/过放现象。

如图 3 所示,第 1 象限与第 4 象限分别表示储能单元的放电区及充电区。当储能单元 SOC 高于最大限制 SOC_{max},则停止充电,同理,当储能单元 SOC 低于最小限

制 SOC_{min} 时,停止放电。然而由于系统内参数固定不够灵活,超级电容储能容量较小,容易发生过充和过放现象。

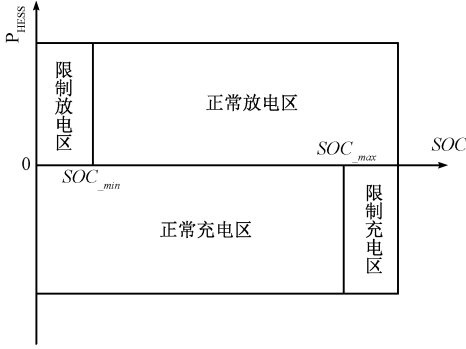


图3 传统能量管理策略

Fig. 3 Traditional energy management strategies

3 改进型混合储能控制策略

3.1 改进型功率分配控制策略

传统功率分配策略中,超级电容和蓄电池分别处理高频分量和低频分量,但是由于参数设置不够灵活,蓄电池在系统功率波动比较频繁时充放电次数增加,势必会影响其使用寿命。本文中从储能单元各自不同固有特性出发,根据各单元功率关系与低通滤波器的原理,改进型功率分配策略如图4所示。

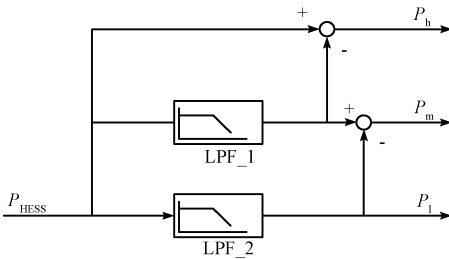


图4 改进型功率分配策略

Fig. 4 Improved power allocation strategy

通过低通滤波器将待处理功率分为高中低频段3种功率分量,响应频率分布如图5所示。图5中 f_L 为低频截止频率, f_H 为高频截止频率。

功率分配模型如式(3)所示。

$$\begin{cases} P_h = P_{HESS} \cdot \frac{1}{\tau_2 s + 1} \\ P_m = P_{HESS} \cdot \frac{1}{\tau_1 s + 1} - P_{HESS} \cdot \frac{1}{\tau_2 s + 1} \\ P_l = P_{HESS} - P_{HESS} \cdot \frac{1}{\tau_1 s + 1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: τ_1 、 τ_2 分别为低通滤波器的时间常数。

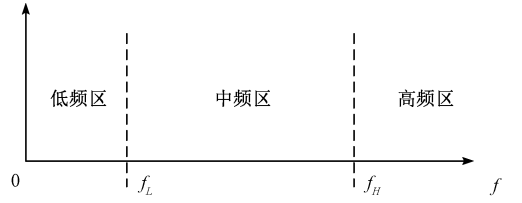


图5 响应频率分布

Fig. 5 Response frequency distribution chart

通过低通滤波法可以得到3种频段功率分量,其中 P_h 为高频段功率分量, P_m 为中频段功率分量, P_l 为低频段功率分量。

根据系统不同情况设计3种频段功率分量分配方式,使储能系统各自承担的功率更加合理。

3.2 考虑储能系统 SOC 能量管理策略

蓄电池与超级电容的剩余电量的表达式如式(4)所示。

$$\begin{cases} E_{HESS}(t) = E_{HESS}(t-1) + \int \Delta P_t \cdot \Delta t \\ SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{\int \Delta P_t \cdot \Delta t}{E_{HESS}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: ΔP 为功率吞吐量, SOC 为荷电状态, SOC 表示储能单元的剩余电量。

储能单元的过充过放现象会对储能系统造成损害,影响电网安全,通过设置储能单元的限制值和最值来防止储能系统出现过充/过放现象。

$$\begin{cases} SOC_{max} = 95\% \\ SOC_{high} = 85\% \\ SOC_{low} = 15\% \\ SOC_{min} = 5\% \end{cases} \quad (5)$$

式中: SOC_{max} 、 SOC_{min} 为储能单元 SOC 的最大值与最小值, SOC_{high} 、 SOC_{low} 为储能单元 SOC 充/放电的限制值。

为确定储能系统实时运行状态以便协调分配功率,设置5个范围来确定储能单元 SOC 状态:

$$\begin{cases} \text{过低: } 0\% \leq SOC \leq 5\% \\ \text{低: } 5\% < SOC \leq 15\% \\ \text{中: } 15\% < SOC \leq 85\% \\ \text{高: } 85\% < SOC \leq 95\% \\ \text{过高: } 95\% < SOC \leq 100\% \end{cases} \quad (6)$$

其中,过高/过低状态表示储能单元 SOC 已快达到过充/过放状态,高/低状态表示储能单元 SOC 已经达到充/放限制,中状态表示储能单元 SOC 处于正常范围,储能单元可以正常充放电。

储能单元各自的额定充放电次数不同,与超级电容相比,蓄电池的额定充放电次数较少,不适合频繁充放

电。因此要在系统安全稳定运行的前提下,尽量使蓄电池 SOC 变化平缓,降低蓄电池的充放电次数。为此,以减少蓄电池充放电次数为原则设置 5 个工作区,在储能系统不会发生过充过放的条件下,使超级电容承担更多不平衡功率,减少蓄电池出力,以延长蓄电池使用寿命。储能单元区域划分如图 6 所示。

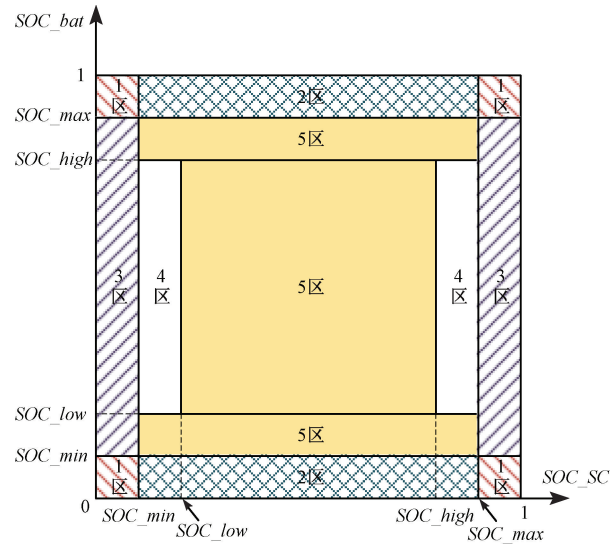


图 6 储能单元的区域划分

根据蓄电池和超级电容的 SOC 状态设计 5 种运行模式协调控制不同储能单元的承担功率,使储能系统稳定响应系统内能量调度,满足系统功率平衡。储能系统运行模式如表 1 所示。

表 1 不同工作区的储能系统运行模式

Table 1 Energy storage system operating modes in different working areas

参数	1 区	2 区	3 区	4 区	5 区
SOC_{SC}	过高/过低	高/中/低	过高/过低	高/低	高/中/低
SOC_{bat}	过高/过低	过高/过低	高/中/低	中	高/中/低
P_{ref_SC}	0	$P_h + P_m + P_l$	0	P_h	$P_h + P_m$
P_{ref_bat}	0	0	$P_h + P_m + P_l$	$P_m + P_l$	P_l

在本文所提的控制策略中,通过改进型功率分配策略将待平抑功率分解为高中低频段 3 种功率分量,同时引入储能系统 SOC 的反馈,根据储能系统 SOC 实时状态对混合储能进行调度,协调控制超级电容和蓄电池需承担的功率。控制策略结构如图 7 所示。

4 算例分析

4.1 算例数据

算例分析采用 1.1 节微电网平台实际运行产生的数据。该平台建设在高校实验楼,在正常教学时间内负载

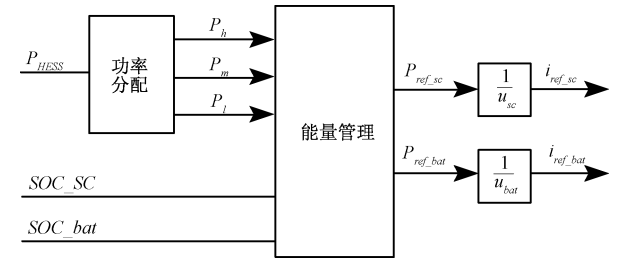


图 7 混合储能系统整体控制结构

功率波动相对平缓,光伏发电系统额定容量为 110 kW。微电网平台主要参数如表 2 所示,混合储能系统容量配置本文参照文献[17]的储能容量配置策略,储能容量配置方案如表 3 所示。

表 2 微电网平台主要参数

Table 2 Main parameters of the microgrid platform

参数	取值	参数	取值
光伏阵列电压/V	683.2	超级电容电压/V	500
滤波电感/mH	1	滤波电容/ μ F	10
蓄电池电压/V	500	逆变器转换效率/%	96
直流母线电压/V	800	系统频率/Hz	50
低频截止频率 f_L /Hz	0.01	并网口功率/kW	60
高频截止频率 f_H /Hz	20	负载额定功率/kW	100

表 3 储能容量配置方案

Table 3 Energy storage capacity configuration plan

类别	参数	取值
蓄电池	额定功率/kW	118.6
	容量/(kW·h)	413.2
	初始 SOC/%	60
超级电容	额定功率/kW	62.8
	容量/(kW·h)	5.2

该平台某一典型日(24 h)的光伏输出功率曲线和负载功率曲线如图 8 所示,全天总发电量为 639 kW·h。采用该日数据分别对改进型控制策略和传统策略进行算例分析,通过对比两者的控制效果,验证改进型控制策略的有效性。

4.2 算例结果分析

如图 9~12 所示,在 6:00~18:00,由于光伏本身具有的不稳定性,光伏输出功率出现波动,使用传统功率分配方法平抑系统内功率扰动时,蓄电池吸收/释放功率变化曲线波动剧烈,蓄电池 SOC 变化曲线有较大波动,蓄电池充放电频繁。而使用改进型控制策略平抑系统功率波动时,由于中频段功率分量由状态良好的超级电容所吸收,蓄电池仅承担低频段功率分量,蓄电池吸收/释放

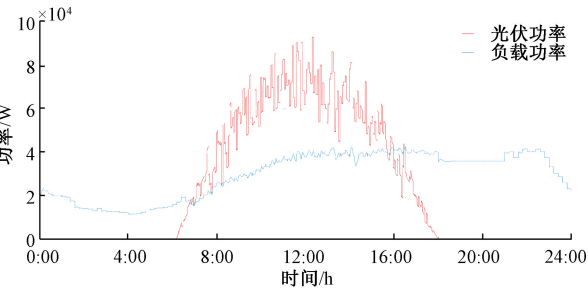


图 8 光伏功率和负载功率
Fig. 8 PV power and load power

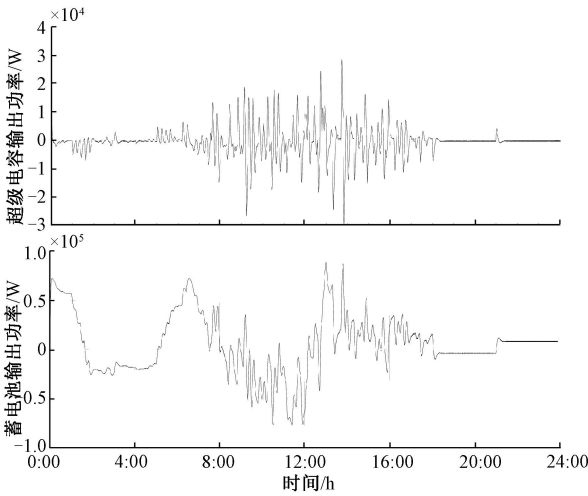


图 9 传统策略混合储能功率曲线
Fig. 9 Traditional strategy hybrid energy storage power curve

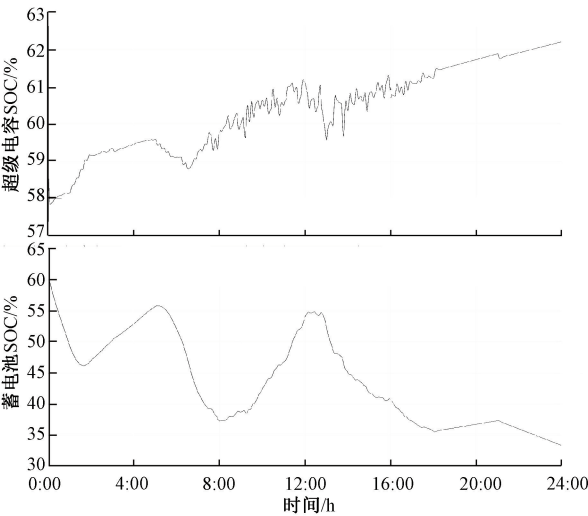


图 10 传统策略混合储能 SOC 曲线
Fig. 10 Traditional strategy hybrid energy storage SOC curve

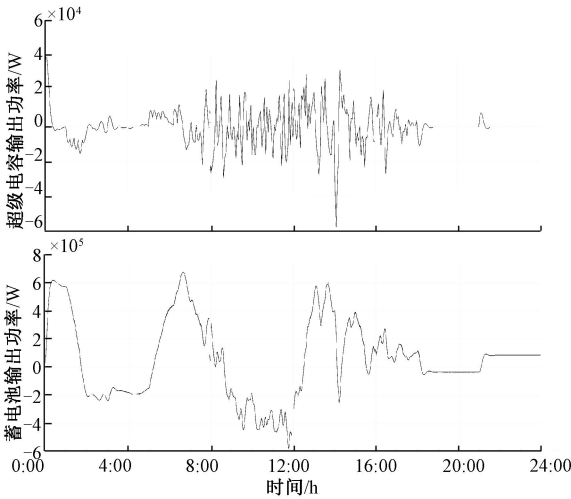


图 11 改进型策略混合储能功率曲线 1
Fig. 11 Improved strategy hybrid energy storage power curve 1

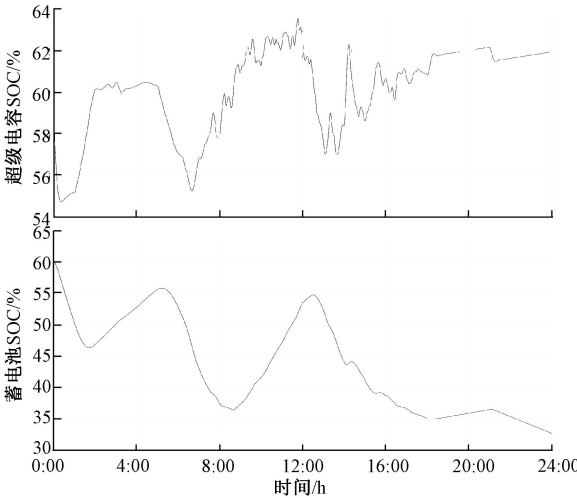


图 12 改进型策略混合储能 SOC 曲线 1
Fig. 12 Improved strategy hybrid energy storage SOC curve 1

当其他参数不变,超级电容 SOC 在 15% 上下波动时,储能单元的功率变化和 SOC 变化结果分别如图 13、14 所示。

由图 13、14 可知,使用改进型控制策略时,当超级电容 SOC<15% 时,由超级电容承担高频段功率分量,蓄电池处理中低频段功率分量。蓄电池吸收/释放功率曲线变化剧烈,SOC 变化曲线也随之波动明显,充放电次数较多。当超级电容 SOC>15% 时,超级电容承担系统内高中频段功率分量,蓄电池承担低频段功率分量。蓄电池吸收/释放功率曲线明显平缓,SOC 变化曲线平滑,充放电次数明显减少。证明考虑储能系统 SOC 的控制策略能够有效防止储能系统过度放电,使储能系统 SOC 始终处于适当范围,维持系统稳定运行。

功率时变化更加平缓,SOC 变化曲线平滑,充放电次数大大减小。

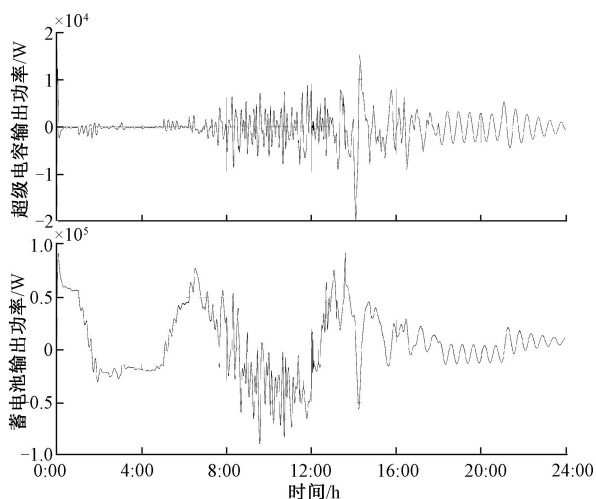


图 13 改进型策略混合储能功率曲线 2

Fig. 13 Improved strategy hybrid energy storage power curve 2

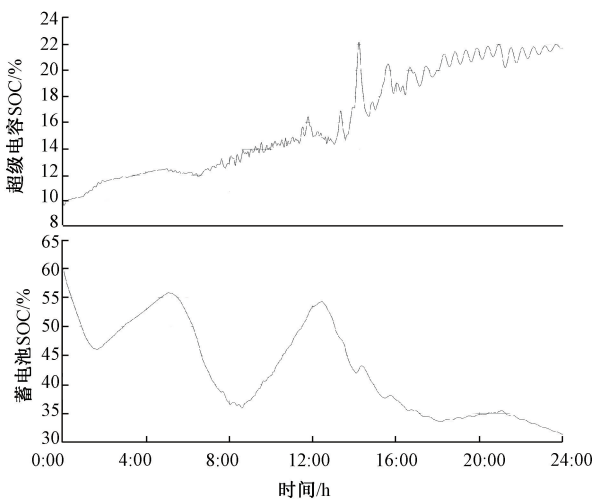


图 14 改进型策略混合储能 SOC 曲线 2

Fig. 14 Improved strategy hybrid energy storage SOC curve 2

5 结 论

本文提出的改进型混合储能控制策略通过将待平抑功率分解为 3 种频段功率分量,根据储能系统 SOC 状态设计 5 种混合储能系统运行模式,对混合储能各自承担功率分量进行实时调整,能够有效缓解蓄电池出力,减少其充放电次数,延长其使用寿命,同时防止储能单元出现过充/过放现象。采用微电网平台实际运行数据进行算例分析,结果表明:所提控制策略相较于传统控制策略,能够使蓄电池功率变化更加平缓,大大减少其充放电次数,且可以防止储能单元出现过充过放现象,提高微电网运行的稳定性和经济性。

参考文献

- [1] LENG D, POLMAI S. Virtual synchronous generator based on hybrid energy storage system for PV power fluctuation mitigation [J]. Applied Sciences, 2019, 9(23):5099.
- [2] 张继红,赵锐,高雷,等. 直流微网母线电压稳定控制策略[J/OL]. 电网技术:1-9[2021-05-10].
ZHANG J H, ZHAO R, GAO L, et al. DC bus voltage stability control strategy for DC microgrid [J/OL]. Power System Technology:1-9[2021-05-10].
- [3] 邱彬,胡善华,苏小平,等. 基于 SOC 特性边界条件下 VSG 在光伏发电中最优控制策略研究[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(9):33-40.
QIU B, HU SH H, SU X P, et al. Research on optimal control strategy of VSG in photovoltaic generation based on SOC characteristic boundary condition[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(9):33-40.
- [4] 于会群,钟永,张浩,等. 微电网混合储能系统控制策略研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 730-738.
YU H Q, ZHONG Y, ZHANG, H, et al. Research on control strategy of hybrid energy storage system in micro grid [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(5): 730-738.
- [5] SINHA S, BAJPAI P. Power management of hybrid energy storage system in a standalone DC microgrid[J]. The Journal of Energy Storage, 2020, 30:101523.
- [6] ZHANG Z, XIAO X, GUO X, et al. Restraining strategy of photovoltaic power fluctuation based on energy storage battery[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(8): 90-95.
- [7] XU D, CEN H L. A hybrid energy storage strategy based fuzzy control to suppress power fluctuation of grid-connected photovoltaic power system [C]. 2020 Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), 2020.
- [8] 刘家赢,韩肖清,王磊,等. 直流微电网运行控制策略[J]. 电网技术,2014,38(9):2356-2362.
LIU J Y, HAN X Q, WANG L, et al. Operation control strategy of DC microgrid[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2356-2362.
- [9] 卢锦玲,张伟,张祥国,等. 含混合储能的光伏微电网系统协调控制策略[J/OL]. 电力系统及其自动化学报:1-7[2021-05-10].
LU J L, ZHANG W, ZHANG X G, et al. Coordinated control strategy of photovoltaic microgrid system with hybrid energy storage [J/OL]. Proceedings of the CSU-

- EPSA:1-7[2021-05-10].
- [10] 高晓芝,高帆,姜枫. 光伏直流微网系统的蓄电池新型充放电控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(11):75-80.
- GAO X ZH, GAO F, JIANG F. Novel charge-discharge control strategy for battery in photovoltaic DC microgrid system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(11):75-80.
- [11] 程志江,李永东,谢永流,等. 带超级电容的光伏发电微网系统混合储能控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(10):2739-2745.
- CHENG ZH J, LI Y D, XIE Y L, et al. Control strategy for hybrid energy storage of photovoltaic generation microgrid system with super capacitor[J]. Power System Technology, 2015, 39(10):2739-2745.
- [12] 范其丽,郑晓茜,王璞,等. 基于混合储能动态调节的独立混合微电网分布式协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7):105-114.
- FAN Q L, ZHENG X X, WANG P, et al. Decentralized control for autonomous hybrid microgrid with hybrid storage system dynamical regulating[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7):105-114.
- [13] 周建萍,薛亚林,徐征. 基于功率交互和充放速率优化的交直流混合微网控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(12):3558-3567.
- ZHOU J P, XUE Y L, XU ZH. Research on control strategy of AC/DC hybrid microgrid based on power interaction and optimization of charge and discharge rate[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2018, 39(12):3558-3567.
- [14] THOMAS T, MISHRA M K. Control strategy for a PV-wind based standalone DC microgrid with hybrid energy storage system [C]. 2019 IEEE 1st International Conference on Energy, Systems and Information Processing (ICESIP), 2019.
- [15] 刘青,樊世通,付超,等. 基于SOC反馈调节的储能平抑光伏功率应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(9):63-67+81.
- LIU Q, FAN SH T, FU CH, et al. Application of energy storage to restraining photovoltaic power fluctuation based on SOC feedback[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(9):63-67, 81.
- [16] 朱洋艳,王致杰,王鸿,等. 基于分层控制的微电网混合储能协调优化策略研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3):235-242.
- ZHU Y Y, WANG ZH J, WANG H, et al. Research on coordination and optimization strategy of hybrid energy storage in microgrid based on hierarchical control [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2021, 42(3):235-242.
- [17] 肖峻,张泽群,张磐,等. 用于优化微网联络线功率的混合储能容量优化方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12):19-26.
- XIAO J, ZHANG Z Q, ZHANG P, et al. Hybrid energy storage capacity optimization method for optimizing microgrid tie line power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12):19-26.

作者简介



於跃, 2018年于安徽工程大学学院获得学士学位, 现安徽工程大学硕士研究生, 主要研究方向为新能源技术与系统集成。

E-mail: 18895316602@163.com

Yu Yue received his B. Sc. degree from Anhui University of Technology College in 2018. He is currently a M. Sc. candidate at Anhui University of Technology. His main research interests include new energy technology and system integration.



高文根, 2008年于安徽工程大学获得硕士学位, 现为安徽工程大学副教授, 检测技术与节能装置安徽省重点实验室副主任, 主要研究方向为智能化测控技术、新能源系统控制与优化。

E-mail: ahpuchina@ahpu.edu.cn

Gao Wengen received M. Sc. from Anhui Polytechnic University in 2008. Now he is an associate professor at Anhui Polytechnic University and deputy director of Anhui Key Laboratory of Testing Technology and Energy Saving Devices. His main research interests include intelligent measurement and control technology and new energy control technology.