

文章编号:1008-1534(2019)06-0384-06

基于混合储能的直流微网母线电压控制策略

敦若楠, 郭英军, 孙鹤旭, 安聪慧

(河北科技大学电气工程学院, 河北石家庄 050018)

摘要:为了平抑风力发电接入直流微电网的功率波动问题,满足负荷持续高质量供电需求,对由锂电池和超级电容器组成的混合储能系统进行了研究。以超级电容电压和锂电池荷电状态为约束条件,将储能系统平衡所需的功率差分为低频与高频部分;锂电池用于吸收和释放低频部分,超级电容用于吸收和释放高频部分,使风机整流器工作在恒压状态,采用电压外环、电流内环双闭环控制,以直流母线的电压稳定为目标,维持系统功率平衡。仿真结果表明,所提混合储能系统控制策略具有较快的动态响应速度和较好的控制性能,可很好地满足负载功率需求,稳定直流母线电压。研究结果可为分析规模化新能源接入直流微网系统的稳定问题提供参考。

关键词:发电工程;直驱风机;直流母线;功率波动;混合储能

中图分类号:TM614 文献标志码:A doi: 10.7535/hbgykj.2019yx06003

DC microgrid bus voltage control strategy based on hybrid energy storage

DUN Ruonan, GUO Yingjun, SUN Hexu, AN Conghui

(School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: In order to stabilize the power fluctuation when the wind power generation is planted into DC microgrid and meet the demand for continuous high quality power supply, a hybrid energy storage system consisting of lithium battery and super capacitor is studied. Constrained by the super capacitor voltage and the state of charge of the lithium battery, the power required to balance the energy storage system is divided into a low frequency and a high frequency portion; the lithium battery is responsible for absorbing and releasing the low frequency portion, and the super capacitor is responsible for absorbing and releasing the high frequency portion. The fan rectifier is operated in a constant voltage state, and the voltage outer loop control and the current inner loop control loop are adopted. The voltage stability of the DC bus is targeted to maintain system power balance. The simulation results show that the proposed hybrid energy storage system control strategy has faster dynamic response speed and better control performance, which can meet the load power demand and stabilize the DC bus voltage. The research results provide a reference for analyzing the stability of large-scale energy access to DC microgrid systems.

Keywords: power generation project; direct drive fan; DC bus; power fluctuation; hybrid energy storage

收稿日期:2019-07-04;修回日期:2019-10-14;责任编辑:冯 民

基金项目:河北省科技计划项目(16214510D)

第一作者简介:敦若楠(1993—),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事混合储能及风机控制方面的研究。

通信作者:郭英军副教授。E-mail: 306806880@qq.com

敦若楠,郭英军,孙鹤旭,等.基于混合储能的直流微网母线电压控制策略[J].河北工业科技,2019,36(6):384-389.

DUN Ruonan, GUO Yingjun, SUN Hexu, et al. DC microgrid bus voltage control strategy based on hybrid energy storage[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2019, 36(6): 384-389.

传统能源的逐渐枯竭和日益严重的环境污染严重威胁着人类的可持续发展,风能作为可再生能源,因其储量丰富、清洁环保、便于规模化开发等优点受到广泛关注^[1]。然而,由于风能的间歇性和波动性,当风速发生变化时,风机的功率输出也随之波动,从而影响电网的电能质量。与此同时,风力发电的年有效利用小时数远远不及常规发电厂^[2]。储能系统具有响应时间快、规模大等优点,被认为是提高间歇式电源可控性以及并网能力的有效手段^[3-5]。

文献^[6]分别采用滑动平均法和分层控制技术、专家信息库等方法来区分功率波动成分,控制混合储能系统运行,提高平滑效果,延长了各单元使用寿命;文献^[7-8]以储能装置容量最小为目标函数,构建了以总体收敛速度指标和饱和系统稳定域为约束的优化模型;文献^[9]提出了一种基于风电场风速概率密度曲线的“实时储能”法的容量定制方法。以上文献都是在实际应用中研究了储能系统的优化配置和控制问题,具有较强的参考价值。目前的研究集中于如何在既定风电出力场景下实现风电功率波动平抑,而没有考虑平抑策略在不同风电出力及负载发生变化场景下的普遍适用性。

本文利用锂电池-超级电容混合储能系统的优势互补,提出了一种以满足可变负载功率需求及平抑风机功率波动,稳定直流母线电压为最终目标的混合储能系统控制策略。其能平抑负载发生变动及风速发生变化时对系统稳定造成的影响,在一定程度上平抑风力发电系统输出功率及负载变化引起的波动,通过混合储能的作用来缓解风力发电带来的功率波动,保持混合储能 SOC 工作在合理区间,保证混合储能系统长期稳定运行。

1 储能方式的分类

电能可以转换为电磁能、化学能、机械能等其他形式进行存储,按照储能方式的不同可分为相变储能、电磁储能、电化学储能和机械储能 4 种类型。其中机械储能包括抽水储能、飞轮储能和空气压缩储能等;电化学储能包括锂离子、镍隔、铅酸、钠硫、液流等电池储能;电磁储能包括超导、超级电容和高能密度电容储能等^[10-13]。

目前,电池储能是最成熟的储能方式^[14]。电池为能量型储能元件,其主要特点是能量密度大,但它的主要缺点是使用寿命短,不适合频繁充放电,功率密度小,并对工作环境要求较高,不恰当的工作环境会加快老化速度。以锂电池为例,在其工作过程中由于长期浮充、过充、过放、欠充或小电流放电等因

素,都将造成锂电池过早损坏,从而缩短其使用寿命。超级电容器是功率型储能元件,其最大的特点是循环寿命长,充放电速度快,可频繁充放电^[15]。为了更好地利用两 2 不同类型储能元件的优势,将锂电池与超级电容器组成混合储能单元使用,是一种被广泛接受的应用方式^[16]。超级电容与锂电池性能比较如表 1 所示。

表 1 超级电容与锂电池性能比较

Tab.1 Performance comparison between supercapacitor and lithium battery

参数	储能类型	
	超级电容	锂电池
充电时间	1~30 s	1~5 h
放电时间	1~30 s	0.3~3 h
功率密度/(Wh·kg ⁻¹)	1 000~2 000	50~200
能量密度/(Wh·kg ⁻¹)	1~20	20~100
循环寿命/次	>100 000	500~2 000
循环效率/%	0.90~0.95	0.70~0.85

2 系统等效模型

2.1 锂电池等效模型

考虑锂电池在运行中的荷电状态 (state of charge, SOC) 和端电压的变化,本文采用通用化等效模型。锂电池充电、放电表达式分别为

$$E_{\text{ch}} = E_0 - K \frac{Q}{it + 0.1Q} i^* - k \frac{Q}{Q - it} it + A e^{(B \cdot it)}, \quad (1)$$

$$E_{\text{disch}} = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} i^* - k \frac{Q}{Q - it} it + A e^{(-B \cdot it)}, \quad (2)$$

式中: E_{ch} 和 E_{disch} 为电池空载端电压; E_0 为恒定电压; K 为极化电阻; Q 为锂电池的最大容量; i 为电池电流; i^* 为低频动态电流; it 为实际可提取容量 (Ah); A 为指数区域电压幅值; B 为指数区域时间常数的倒数。

锂电池的 SOC 反映电池的剩余容量,电池的 SOC 为

$$\text{SOC} = \text{SOC}_0 - \frac{\int_0^t i dt}{Q}, \quad (3)$$

式中: SOC_0 为锂电池初始荷电状态^[17]。

2.2 超级电容等效模型

超级电容器的平均功率为

$$P_{\text{ave}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) i(t) dt, \quad (4)$$

式中： $U(t), i(t)$ 分别为超级电容在 t 时刻的电压、电流。

超级电容器的存储能量为

$$W(t) - W_0(t) = \frac{1}{2}CU^2(t) - \frac{1}{2}CU^2(t_0), \quad (5)$$

式中： $W(t), W_0(t)$ 分别为超级电容在 t 时刻、 t_0 时刻存储的能量； $U(t), U(t_0)$ 分别为 t 时刻、 t_0 时刻的电压。

超级电容器的 SOC 为

$$SOC = \frac{U_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt - U_{up}}{U_{up} - U_{down}}, \quad (6)$$

式中： U_{up} 为电压上限； U_{down} 为电压下限； U_0 为初始电压^[18]。

3 系统控制策略

如图 1 所示，在直流微网系统中由混合储能单元平衡节点控制直流电压并通过充放电来平衡系统功率。锂电池主要负责平衡功率，超级电容则能快速响应功率波动^[19-20]。

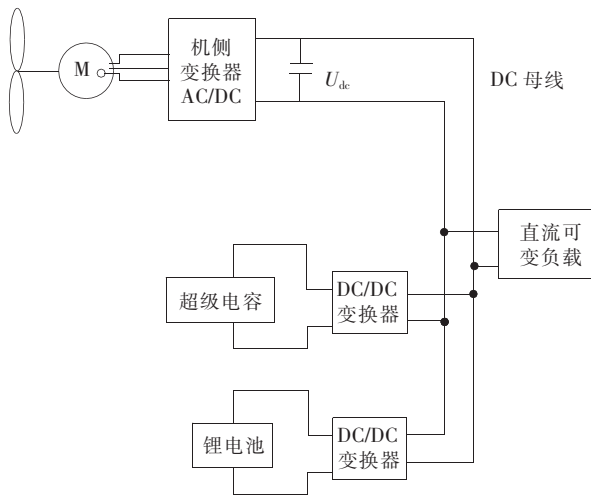


图 1 系统结构图

Fig.1 System structure diagram

平稳直流母线电压并使其达到稳定是混合储能系统工作的关键。稳定的直流母线电压可确保直流负载的平稳运行，当直流母线电压升高时，即风机输出功率大于负载吸收功率，储能系统负责吸收多余的能量，此时，储能系统处于充电状态；而当母线电压降低时，风机输出功率小于负载消耗功率，储能系

统释放能量来满足负载需求，此时，储能装置处于放电状态^[21]。

风机整流器工作在恒压状态输出时，采用电压外环、电流内环的双闭环控制来实现直流母线电压稳定的目标^[22]。从检测到的瞬时值中减去由直流母线电压设置的参考值，并且通过 PI 控制器电压外环获得该差值，以得到风机输出电流的参考值，再与风机实时输出电流作比较，其差值通过电流内环 PI 控制器调整^[23]。总体控制策略如图 2 所示。

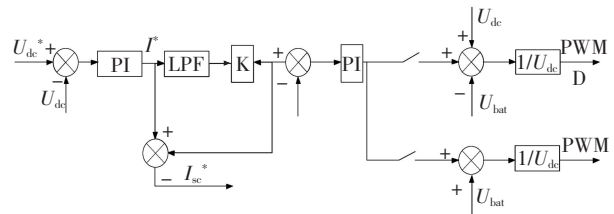


图 2 总体控制策略图

Fig.2 Overall control strategy diagram

混合储能系统采用以稳定直流母线电压为目的的控制策略。结合两种储能方式的工作特性，通过低通滤波器将储能系统平衡所需的功率差分为低频部分和高频部分；高频部分由超级电容负责吸收和释放，低频部分由锂电池负责吸收和释放，该直流母线的电压外环控制如图 3 所示^[24]。

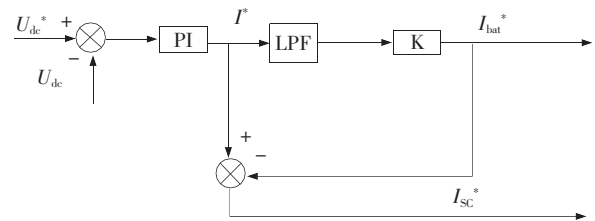


图 3 直流母线控制图

Fig.3 DC bus control diagram

此外，2 个储能单元通过双向 DC/DC 变换器控制充电和放电过程。超级电容、锂电池均采用电压外环、电流内环的双闭环控制^[25]。

如图 4 所示，以锂电池为例，当锂电池的电量 $SOC \geq 100$ 或者 ≤ 20 时，此时控制将会阻止 PWM 脉冲并停止双向变换器工作。

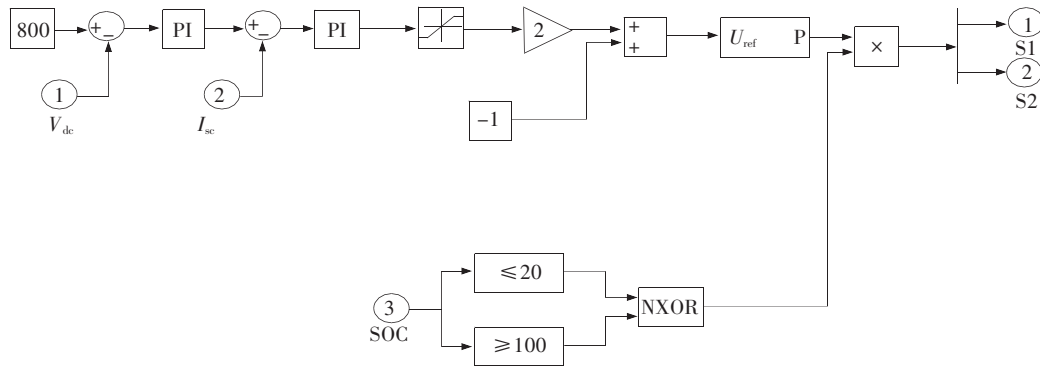


图 4 锂电池充放电示意图

Fig.4 Sketch map of the charging and discharging of lithium battery

4 仿真分析

设置直流微网额定电压为 800 V,如图 5 所示,风机在前 3.5 s 为额定风速 9 m/s,在第 3.5 s 时降低为 8 m/s,在第 4.5 s 时恢复为额定风速,在此期间,风机输出功率如图 6 所示。

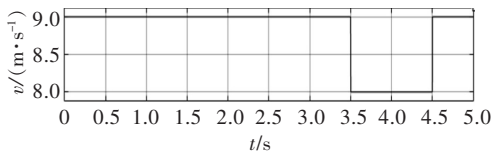


图 5 风速波形

Fig.5 Wind speed waveform

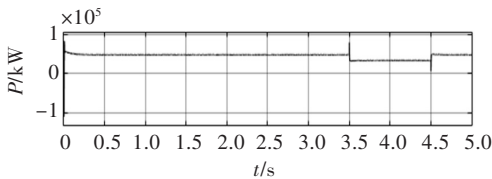


图 6 风机输出功率

Fig.6 Fan output power

在风机运行期间,为了验证混合储能工作的快速性和有效性,设置负载为可变负载,通过控制信号(如图 7 所示),分别在 0,1,2,3,4 s 时,设置负载需求功率为 40,65,15,60,40 kW。

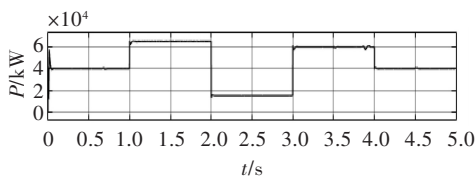


图 7 可变负载需求功率

Fig.7 Variable load demand power

平衡系统所需的目标功率为

$$\Delta P = P_{wind} + P_{bat} + P_{sc} - P_{load} \quad (7)$$

在微电网孤岛运行仿真时,微电网可以为输出稳定的电压和频率提供支持。给定负载功率为 40 kW,仿真中通过控制信号,在 1 s 时将负载需求功率切换到 65 kW,2 s 时切换至 15 kW,3 s 时切换至 60 kW。在孤岛运行仿真时,0~1 s 之间风机输出 48.65 kW 的功率,此时,维持负载功率 25 kW,多余功率由混合储能系统来吸收,其中电池吸收功率在 1.5 kW 左右,超级电容吸收 7.2 kW 左右,从而使整个微电网系统在此期间功率平衡;在 1 s 时,负载需求功率提高至 65 kW,风机仍以额定功率运行,此时,若要维持负载功率为 65 kW,混合储能系统放电;2 s 时负载需求功率突降至 15 kW,风机仍以额定功率运行,此时,混合储能系统充电;风速在 3.5 s 时降低至 8 m/s;在 4.5 s 时恢复了额定风速。在风机功率发生波动时,系统能很快做出响应,任意时刻负载功率都是由风机和混合储能共同来平衡。

由图 8、图 9 可以看出,当负载功率发生变化及风机功率波动时,超级电容器均可对波动快速响应,其功率输出波形变化呈快速的阶跃型,锂电池的输出功率对系统功率发生变化时的响应则较为缓慢,呈平缓上升或下降趋势;且从图中可以看出,系统功率发生较大变化时,超级电容都能快速反应,系统运行稳定时,锂电池用于吸收和释放功率差。仿真结果也验证了超级电容器功率密度高、能量密度低的特点,适合快速调节但不适合长期储能;锂电池具有能量密度高、功率密度较低的特点,虽响应较慢但适合长期储能。

图 10 和图 11 分别反映了锂电池内部电量 SOC 和超级电容电压的变化曲线。以锂电池为例,当锂电池输出功率为正或者 SOC 逐步减小时,锂电池处于放电过程。相反,当锂电池输出功率为负或者 SOC 逐步增加时,锂电池处于充电过程。

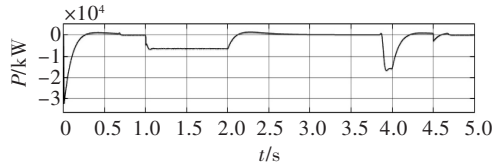


图 8 电池输出功率

Fig.8 Battery output power

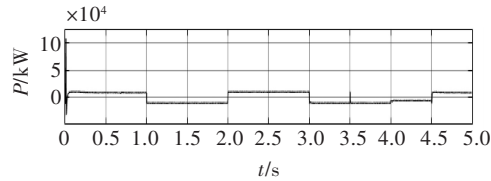


图 9 超级电容输出功率

Fig.9 Super capacitor output power

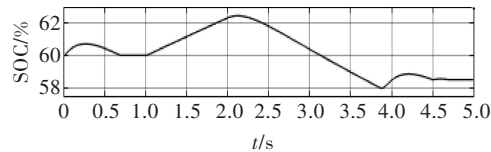


图 10 电池 SOC

Fig.10 Battery SOC

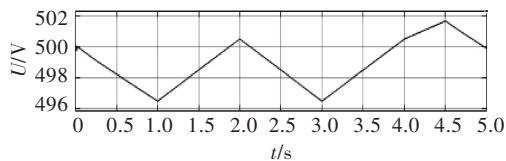


图 11 超级电容电压

Fig. 11 Super capacitor voltage

由图 12 可以看出,无论是负载发生变化还是风机输出功率发生变化,直流母线依然可以保持稳定,表明了综合控制策略的有效性和正确性。

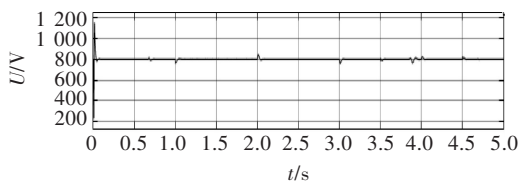


图 12 直流母线电压

Fig.12 DC bus voltage

以上仿真结果表明了系统具有较快的动态响应速度和较好的控制性能。

5 结 语

本文研究混合储能设备作为孤岛运行模式下风机直流微电网和负载运行时的状态,通过其充放电来维持系统的功率平衡,从而确保直流母线的电压质量与系统的稳定性,同时实现了直驱风机的平稳出力,保证了稳定的有功输出。本文创新之处是在风速变化的同时加入了负载变化。仿真结果验证了本文提出的以满足可变负载功率需求及平抑风机功率波动的混合储能系统、以直流电压恒定为目的的混合储能系统控制策略的正确性和有效性。

本文只讨论了单台风机并入直流微网的稳定情况,没有对多机系统进行分析。未来可对规模化新能源接入直流微网系统的稳定问题进行分析研究。

参考文献/References:

- [1] 王健,沈超,孙伟.基于发电成本与环境效益的风电最佳接入容量分析[J].河北工业科技,2017, 34(5):339-344.
WANG Jian, SHEN Chao, SUN Wei. Analysis on optimal wind power integration capacity based on power generation cost and environmental benefit[J].Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2017,34(5):339-344.
- [2] 秦梦珠,张国月,齐冬莲.风电-氢能耦合系统建模及仿真[J].电子技术,2016, 45(8):18-23.
QIN Mengzhu, ZHANG Guoyue, QI Donglian. Modeling and simulation of the integrated system of wind-hydrogen[J].Electronic Technology,2016,45(8):18-23.
- [3] LI Xiangjun, HUI Dong, LAI Xiaokang. Battery energy storage statio(bess)-based smoothing control of photovoltaic(PV) and wind power generation fluctuations[J].IEEE Transactions on Sustainable Energy,2013,4(2):464-473.
- [4] MANANDNAR U, TUMMURU N R, KUMAR S, et al. Validation of faster joint control strategy for battery and super capacitor based energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 64(4): 3286-3295.
- [5] 蔡文轩,李宗力.河北红松风电场接入电网稳定性问题浅析[J].河北工业科技,2010, 27(3):196-200.
CAI Wenxuan, LI Zongli. Discuss on input power grid stability of Hebei Hongsong Wind Power Station[J].Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2010,27(3):196-200.
- [6] 于芃,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.
- [7] 于芃,周玮,孙辉,等.用于风电功率平抑的混合储能系统及其控制系统设计[J].中国电机工程学报,2011, 31(17):127-133.
YU Peng, ZHOU Wei, SUN Hui, et al. Hybrid energy storage system and control system design for wind power balancing [J].Proceedings of the CSEE,2011,31(17):127-133.
- [8] 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 Yunliang, SUN Yuanzhang, 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.
- [9] ATWA Y M, El-SAADANY E F. Optimal allocation of ESS in distribution systems with a high penetration of wind energy [J].IEEE Trans on Power Systems,2010,25(4):1815-1822.
- [10] 陈玉和.储能技术发展概况研究[J].能源研究与信息,2012,28(3):147-152.
- CHEN Yuhe. A survey on the development of energy storage technologies[J]. Energy Research and Information, 2012, 28(3): 147-152.
- [11] 张磊.基于级联多电平变换器的混合储能系统研究[D].南京:东南大学,2018.
- ZHANG Lei. Research on Hybrid Energy Storage System Based on Cascaded Multilevel Converters[D].Nanjing: South-east University, 2018.
- [12] 王思雨.低温相变蓄热式谷电利用装置的实验研究[D].南京:东南大学,2018.
- WANG Siyu. Experimental Study on Low-Temperature Phase Change Energy Storage Device Utilized Valley Electric[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [13] 王舒.计及广义需求侧资源的配电网储能配置方法研究[D].北京:华北电力大学(北京),2018.
- WANG Shu. Distribution Network Energy Storage Configuration Method Research Considering General Demand Side Resources[D].Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2018.
- [14] 顾腾飞,张勇.电池交换式电动汽车换电站选址优化方法[J].河北工业科技,2018,35(6):392-399.
- GU Tengfei,ZHANG Yong. Optimization method of locations of recharging stations for electric vehicles with battery swapping[J].Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2018, 35(6):392-399.
- [15] 王毅,张丽荣,李和明,等.风电直流微网的电压分层协调控制[J].中国电机工程学报,2013,33(4):16-24.
- WANG Yi, ZHANG Lirong, LI Heming, et al. Hierarchical coordinated control of wind turbine-based DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013,33(4):16-24.
- [16] 王春,袁恩来,冯宾春,等.基于直流母线的独立风电系统研发[J].中国水利水电科学研究院学报,2012,10(3):236-240.
- WANG Chun, YUAN Enlai, FENG Binchun, et al. Research and development on stand-alone wind power system based on the DC bus[J].Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2012,10(3):236-240.
- [17] 杨帆,任永峰,云平平,等.双级锂电池-超级电容混合储能的协调控制及功率分配[J].可再生能源,2019,37(3):361-366.
- YANG Fan,REN Yongfeng,YUN Pingping,et al.Coordinated control and power distribution of double stage lithium battery-super capacitor hybrid energy storage system[J].Renewable Energy Resources, 2019, 37(3): 361-366.
- [18] 华东,宋新甫,李娟,等.基于超级电容-蓄电池混合储能的小型直驱风机综合控制策略及运行特性研究[J].水力发电,2017,43(11):108-112.
- HUA Dong, SONG Xinfu, LI Juan, et al. Study on operation characteristics and control strategy of small direct-drive wind turbine with super capacitor-battery hybrid energy storage[J]. Water Power, 2017, 43(11):108-112.
- [19] 刘佳,孙春顺,杨江涛,等.平抑风电出力波动的混合储能系统优化策略[J].电力科学与工程,2018,34(2):38-43.
- LIU Jia, SUN Chunshun, YANG Jiangtao, et al. Optimization strategy for smoothing wind power output fluctuation with hybrid energy storage system[J].Electric Power Science and Engineering, 2018, 34(2): 38-43.
- [20] 黄芳辰.微网能量管理及混合储能技术的研究[D].无锡:江南大学,2017.
- HUANG Fangchen. Research on Microgrid Energy Management and Hybrid Energy Storage Technology [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.
- [21] 任永峰,胡宏彬,薛宇,等.全钒液流电池-超级电容混合储能平抑直驱式风电功率波动研究[J].高电压技术,2015,41(7):2127-2134.
- REN Yongfeng, HU Hongbin, XUE Yu, et al. Vanadium redox battery-super capacitor hybrid energy storage system for smooth direct-drive wind turbine power fluctuation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2127-2134.
- [22] 李培强,段克会,董彦婷,等.含分布式混合储能系统的光伏直流微网能量管理策略[J].电力系统保护与控制,2017,45(13):42-48.
- LI Peiqiang, DUAN Kehui, DONG Yanting, et al. Energy management strategy for photovoltaic DC microgrid with distributed hybrid energy storage system [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 42-48.
- [23] 李培强,李文英,唐捷,等.基于SOC优化的混合储能平抑风电波动方法[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(3):20-27.
- LI Peiqiang, LI Wenying, TANG Jie, et al. Method of hybrid energy storage to smooth the fluctuations for wind power based on state of charge optimization[J].Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(3):20-27.
- [24] 王光红.微网逆变器控制技术研究[D].秦皇岛:燕山大学,2011.
- WANG Guanghong. Control Technical Research of Microgrid Inverter[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2011.
- [25] 吴杰,丁明.采用自适应小波包分解的混合储能平抑风电波动控制策略[J].电力系统自动化,2017,41(3):7-12.
- WU Jie, DING Ming. Wind power fluctuation smoothing strategy of hybrid energy storage system using self-adaptive wavelet packet decomposition [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3):7-12.