

平抑风电场功率波动的复合储能 系统控制策略*

赵兴勇¹, 王 帅¹, 杨 涛², 吴新华¹, 刘 豹¹, 陈浩宇¹

(1. 山西大学 电力工程系, 山西 太原 030013; 2. 国网太原市电力公司, 山西 太原 030000)

摘 要: 随着风力发电所占发电比例的上升, 其随机性、波动性及间歇性对电网的影响不可忽视。基于超级电容和蓄电池组成的复合储能系统, 提出了一种用于抑制风电功率波动的自适应复合储能控制策略, 通过引入超级电容荷电状态反馈来实施对低通/高通滤波器时间常数的控制, 在完成对风电波动功率平抑的同时, 合理分配平抑功率, 避免超级电容过充过放。最后通过仿真, 针对春夏秋冬不同时间窗口下的功率波动进行平抑, 验证了所提自适应控制策略的有效性。

关键词: 风电场; 复合储能; 超级电容; 蓄电池; 自适应控制

中图分类号: TM 315 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)07-0108-07

Contol Strategy of Hybrid Energy Storage System for Balancing Fluctuant Wind Power*

ZHAO Xingyong¹, WANG Shuai¹, YANG Tao², WU Xinhua¹, LIU Bao¹, CHEN Haoyu¹

(1. Department of Electric power Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030013, China;

2. State Grid Taiyuan Electric Power Company, Taiyuan 030000, China)

Abstract: With the rising proportion of wind power generation, the effects on grid made by its randomness, volatility and intermittency can not be ignored. Based on hybrid energy storage system composed of super capacitor and battery, a adaptive composite energy storage control strategy to dampen the power fluctuations of wind farm was proposed. The feedback of super capacitor's state to implement the control of low-pass filter and high-pass filter's time constant was introduced. It finished suppressing the power fluctuations and distribute the power reasonably to avoid over-charging/over-discharging of super capacitor at the same time. Finally, through the simulation of suppressing the power fluctuations under different time window for spring, summer, autumn and winter the effectiveness of the proposed adaptive control strategy was verified.

Key words: wind farm; hybrid energy storage system; super capacitor; battery; adaptive control strategy

0 引 言

随着风能的大规模开发利用, 风力发电所占发电比例越来越高。但是风力发电具有随机性、波动性和间歇性等特征, 会对电网的电能质量和稳定性造成严重的后果。如何使风力发电灵活地

并入电网, 减少对电网稳定性的冲击, 更加有效地利用风能, 是目前研究的重要课题。

为了解决这一问题, 目前大多采用两种途径: 一种是通过风机自身调节如改变桨距角、加装卸荷装置等, 这种方法会使得功率波动得到改善, 但降低了风能利用率; 另一种是配备储能系统, 储能

* 基金项目: 山西省“十二五”科技重大专项(2060901); 国网山西省电力公司科技项目(05161A)

作者简介: 王 帅(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能微电网运行与控制。

赵兴勇(1965—), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为微电网、分布式发电及电动汽车控制等。

压内环的双环控制方式对超级电容和蓄电池进行控制。电流参考信号可通过平抑功率除以 U_{dc} 得到,通过调节电流来实现功率调节;内环主要维持输出电压的稳定,避免 U_{dc} 电压波动。图 5 中 P_{sc} 、 P_b 为超级电容和蓄电池所需平抑功率, U_{sc} 、 U_b 为超级电容和蓄电池的电压, U_{dc} 为直流母线电压, d_{sc} 、 d_b 分别为各自的占空比。

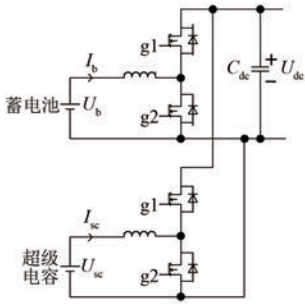


图 4 复合储能结构模型

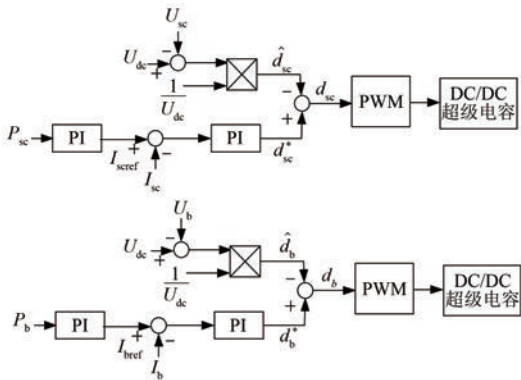


图 5 超级电容和蓄电池控制框图

2 复合储能控制策略

2.1 控制目标

复合储能控制目标是使风电输出功率平滑,尽量减少波动对电网的影响^[11-14]。国家电网公司对于风电场并网功率作出了具体规定:根据国家电网公司风电场接入电网技术规定可知,风电场 10 min 最大功率变化一般不超过其装机容量的 33%,1 min 最大功率变化一般不超过其装机容量的 10%。经过复合储能对风机输出波动功率进行平抑后得到的功率即为目标功率。目标功率可以通过一阶低通滤波器得到。风电功率和目标功率相减即为所需平抑功率,将平抑功率通过高通滤波器进行分解,分解出的即为超级电容的平抑

功率,剩下由蓄电池来承担。控制策略如图 6 所示。图 6 中, T_1 和 T_2 分别为低通滤波器和高通滤波器的时间常数。

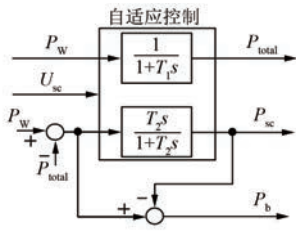


图 6 复合储能控制策略

2.2 自适应控制

对于时间常数 T_1 、 T_2 的控制,本文提出一种自适应控制策略。由于在配置过程中超级电容价格相比蓄电池来说较贵,一般配置的容量有限,所以在运行过程中难免会出现过充过放,不利于电池寿命。针对此,为了避免过分追求较高控制目标而导致系统所需配置储能容量和功率的增加,可以通过引入超级电容荷电状态反馈来实施对低通滤波器和高通滤波器的时间常数的控制。在保证超级电容不越线的同时,充分利用蓄电池,提高系统的经济性。本文针对超级电容设定充放电上下线、缓冲区及正常工作区,对其荷电状态进行实时监测。上下线及缓冲区的设置如图 7 所示。设定的超级电容荷电状态上下限为 0.9、0.1,缓冲区分别为 0.9~0.8、0.1~0.2。

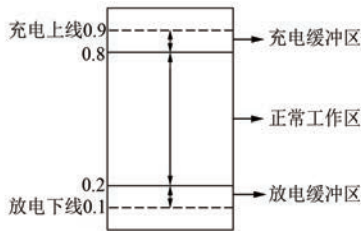


图 7 荷电状态分区图

低通滤波器和高通滤波器时间常数控制框图如图 8 所示。它根据荷电状态来选择相应的控制。不同分区内,对于电池的不同工作状态(充电/放电),滤波时间常数具体的变化如表 1 所示。

从表 1 可以看出充电过程中,当荷电状态为下限时,可充余量较大,可以适当增大低通/高通滤波时间常数,增加超级电容的平抑任务,使之快速进入正常工作区间;随着荷电状态的不断增大,

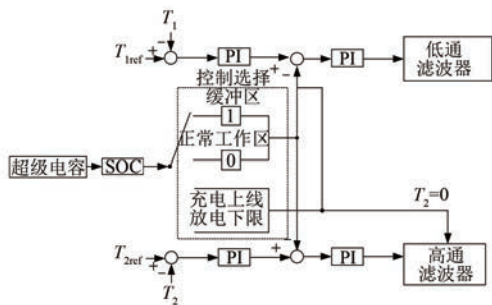


图 8 时间常数控制框图

当进入充电缓冲区时,应当通过减少高通滤波器的时间常数来减少超级电容的充电功率;当达到充电上限时,应该切除超级电容, $T_2=0$,此时功率平抑由蓄电池独自承担,同时应当适当减少低通滤波时间常数来确保蓄电池的寿命。同理,放电过程正好相反,不再赘述。

表 1 滤波时间常数设置

工作状态	荷电状态	滤波时间常数设置
充电	0.9	$T_1 \downarrow T_2=0$
	0.8~0.9	T_1 不变 $T_2 \downarrow$
	0.2~0.8	$T_1、T_2$ 不变
	0.1~0.2	T_1 不变 $T_2 \uparrow$
	0.1	$T_1 \uparrow T_2 \uparrow$
放电	0.9	$T_1 \uparrow T_2 \uparrow$
	0.8~0.9	T_1 不变 $T_2 \uparrow$
	0.2~0.8	$T_1、T_2$ 不变
	0.1~0.2	T_1 不变 $T_2 \downarrow$
	0.1	$T_1 \downarrow T_2=0$

3 仿真分析

为了验证本文所提策略的有效性,针对春夏秋冬不同时间窗口下的情况进行验证。春夏秋冬四个季节典型日的风速变化如图 9 所示。

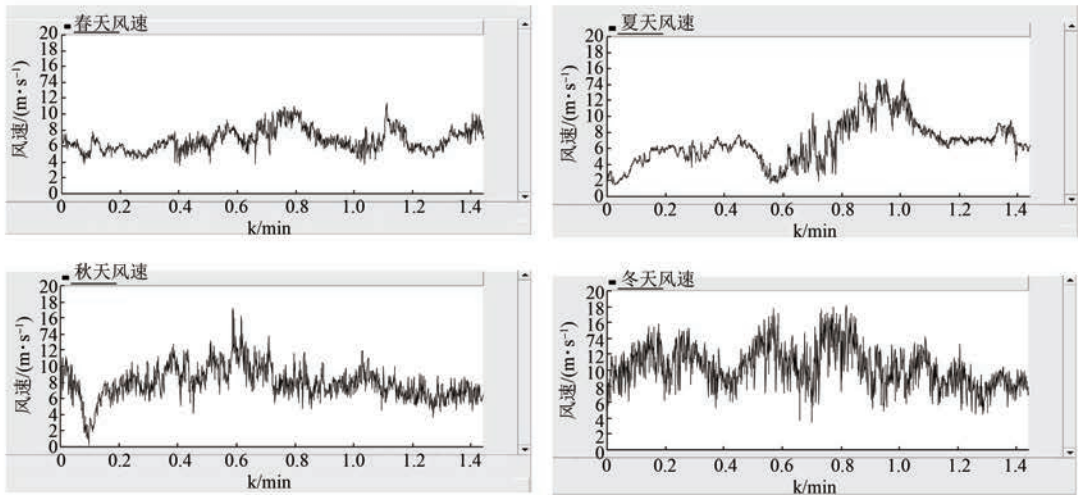


图 9 四季典型日风速

针对某风场中的单台风机进行仿真。其风机容量为 1.5 MW,切入风速为 3 m/s,额定风速为 12 m/s,切出风速为 25 m/s。为了平抑功率变化所配置的复合储能如表 2 所示。设正常工作区间内低通滤波器时间常数 $T_1=10$,高通滤波器时间常数 $T_2=80$ 。采用上述自适应控制策略时春夏秋冬典型日对应的风机输出功率及对应的并网功率

如图 10 所示。可以看出并网功率变化更加平缓,符合风电并网标准。

图 11 给出了四种场合下所需平抑功率。可以看出秋季和冬季的波动相比春季和夏季更加频繁,平抑任务相对来说较重,但春季和夏季会在某一时段会出现功率突变,这一部分就需要由超级电容来承担。

超级电容和蓄电池所需承担的功率如图 12 和图 13 所示。可以看出超级电容承担了波动中的高频分量,蓄电池承担了波动中的低频分量,充分利用了各自自身的特性,很好地成了平抑任务。

表 2 复合储能配置

参数	超级电池	蓄电池
功率/MW	1.09	0.15
容量/MWh	0.31	0.69

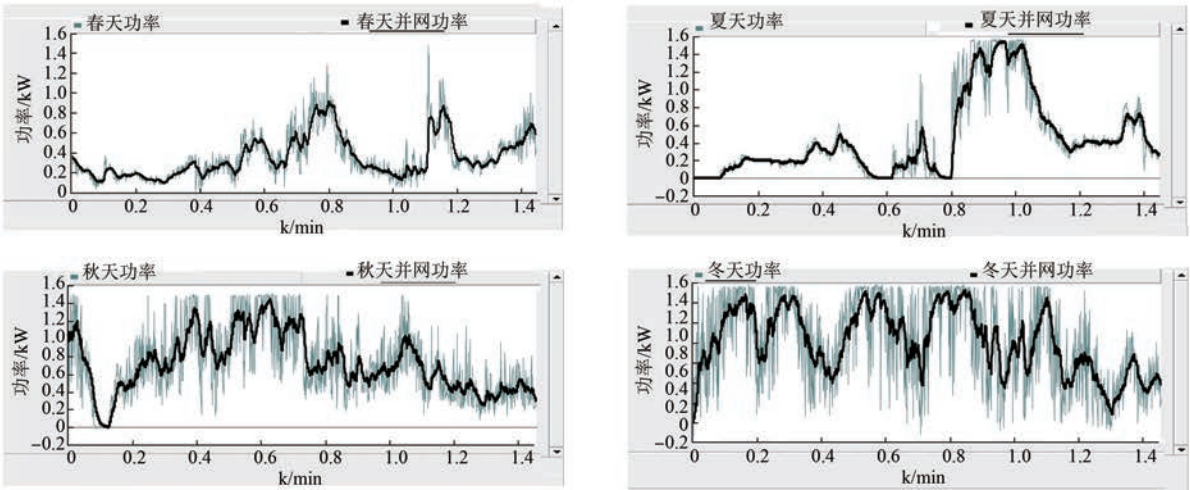


图 10 风机输出功率和并网功率

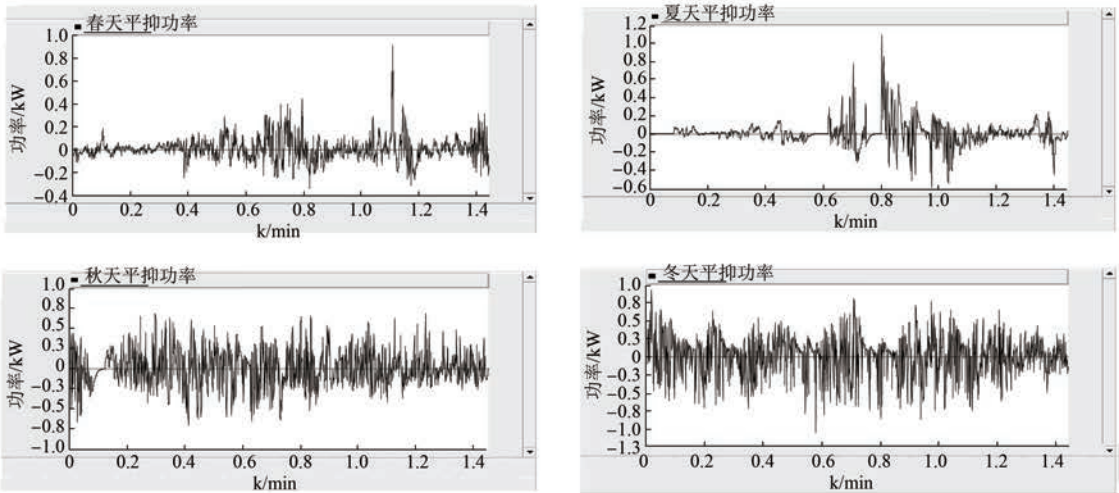


图 11 平抑功率图

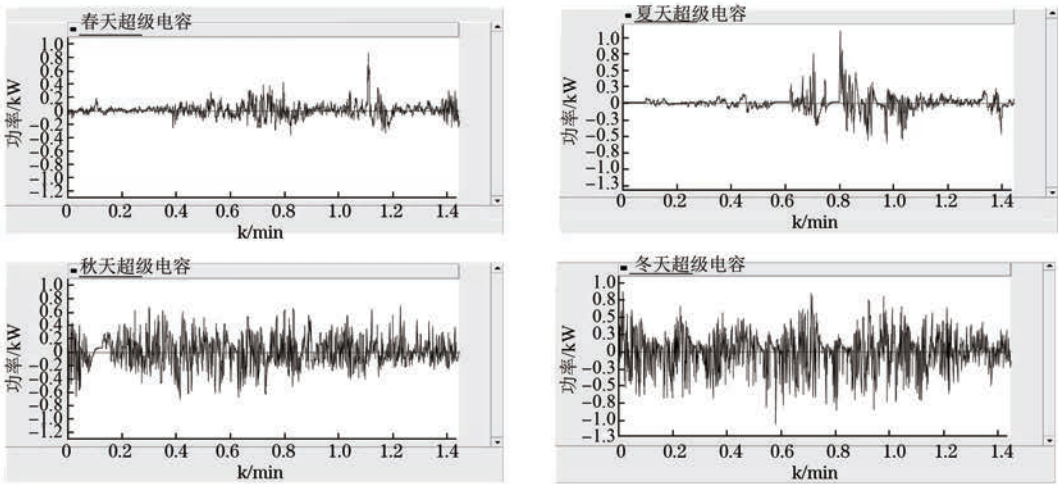


图 12 超级电容平抑功率

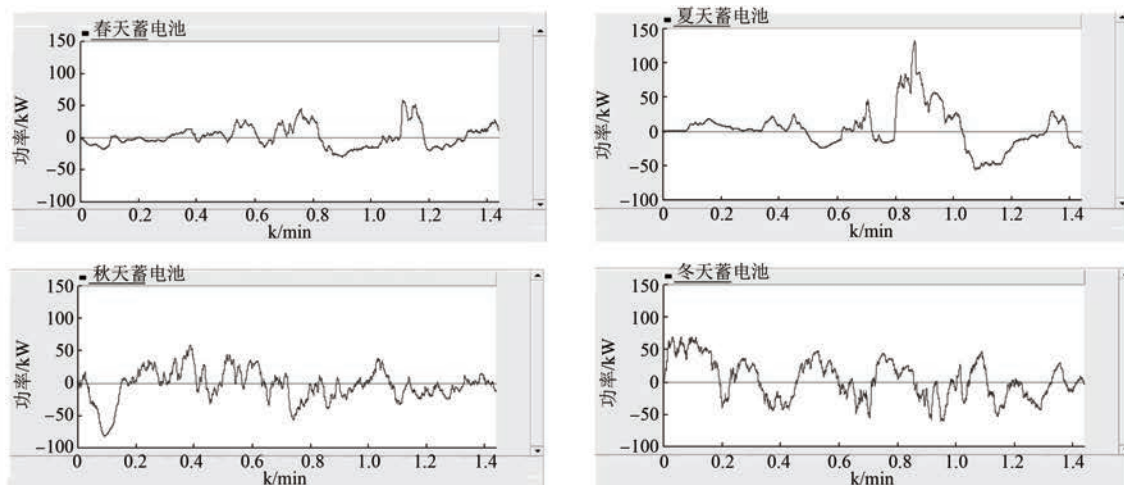


图 13 蓄电池平抑功率

设定超级电容和蓄电池荷电状态初始值为 0.5,则在平抑过程中超级电容的荷电状态变化如图 14 所示,蓄电池的荷电状态变化如图 15 所示。从图 14、图 15 中可以看出蓄电池的荷电状态变化范围为 0.3~0.81,超级电容的荷电状态变化范围为 0.15~0.88,都在设定的区间内,并且蓄电池的荷电状态变化相比超级电容更平滑。

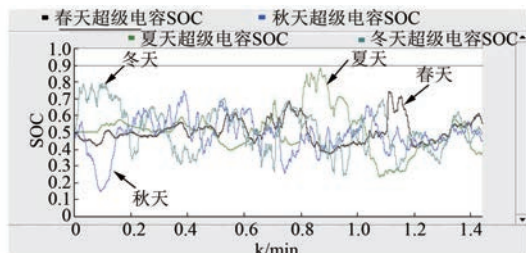


图 14 超级电容荷电状态图(1)

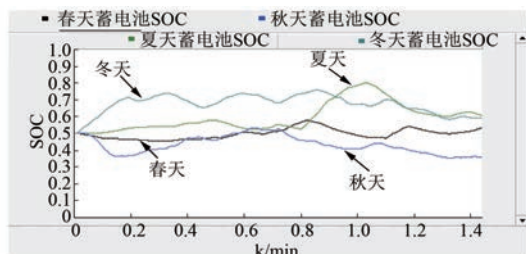


图 15 蓄电池荷电状态(1)

从图 14 可以看出,在 815~890 min 时间段内,超级电容荷电状态在夏天典型日进入到了充电缓冲区。此时对高通滤波器进行自适应控制,时间常数通过控制,由原先的 80 逐渐调整为 40,之后超级电容开始放电,时间常数又逐渐增加,进

入正常工作区间后变为初始值 80。从图 13 可以看出蓄电池在这个时间段开始时相比之前承担了更多的平抑任务,功率较之前变化剧烈,并且在 867 min 时刻达到了四个场合下蓄电池的最大功率 125 kW,但这也并没有超出蓄电池的能力范围。同样也可以从图 12 看出超级电容在夏天典型日此时间段内承担的功率明显下降,也正是因为进行自适应控制,超级电容荷电状态一直维持在 0.9 之下。同样,在秋天典型日时 85~115 min 内超级电容荷电状态进入了放电缓冲区,在这个时间段超级电容放电功率随高通滤波器的时间常数减小而减少,进行短暂调整后,超级电容开始放电,时间常数逐渐回到初始值。由此可以看到,该策略避免了超级电容过充过放,提高了不同场合下的自适应能力。如果不对时间常数进行控制,就需要增加超级电容容量的配置,这样反而没有充分利用储能,降低了系统的经济性。

图 16 和图 17 给出了采用传统的复合储能控制策略时超级电容和蓄电池的荷电状态,配置的超级电容和蓄电池容量与自适应控制下相同,但传统的复合储能控制策略滤波器时间常数 T_1 、 T_2 恒定。比较两种策略下的仿真结果不难看出,当采用传统策略时超级电容在夏天 865~890 min 期间荷电状态近似接近于 1,当达到 1 时就要进行强制切除。为了避免该情况的发生,只能对超级电容进行扩容,但这样又不利于系统的经济性。比较蓄电池的荷电状态可以看出采用传统策略时,蓄电池的荷电状态相对来说比较平滑,这是因

为在采用自适应控制策略时, T_1 、 T_2 随超级电容的荷电状态进行了自适应调节, 在这一过程中, 为了维持超级电容工作于正常工作区, 蓄电池承担了相对传统策略较多的平抑任务, 所以曲线相对来说波动程度明显, 但是波动次数仍然比较少, 对电池寿命的影响并不大。从两种策略的比较情况来看, 本文所提的自适应控制处理具有更好的工作特性, 而且适应性与经济性较好。

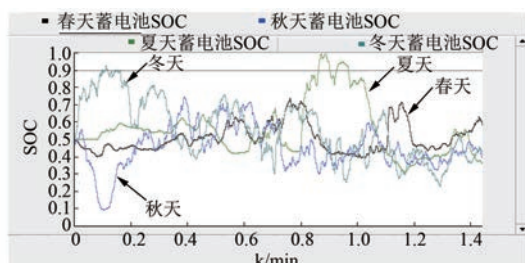


图 16 超级电容荷电状态图(2)

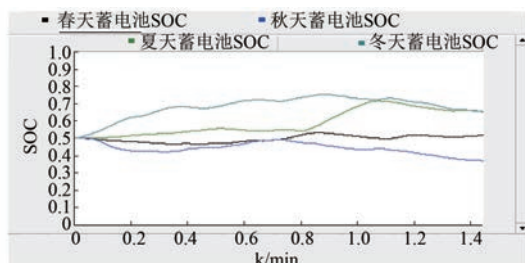


图 17 蓄电池荷电状态(2)

4 结 语

本文构建了基于复合储能的并网风电系统结构模型, 提出了机侧整流器、网侧逆变器及复合储能的控制器模型, 并针对复合储能提出了一种自适应控制策略。在春夏秋冬四种场合下进行仿真, 验证了该策略的有效性, 得出以下结论:

(1) 该策略适应能力较强, 针对不同场合均能在保证完成平抑任务的同时, 蓄电池和超级电容能在规定的区间内进行充放电, 避免了过充过放。

(2) 当超级电容进入缓冲区时, 承担的功率会随着高通滤波器时间常数的变化而变化。蓄电池在没有超出能力范围的同时很好地分担了超级电容的部分功率, 此时的并网功率也符合风电并网标准。

(3) 该策略有效避免了过分追求较高控制目标而导致系统所需配置储能容量与功率的增加, 在满足需要的同时, 提高了系统的经济性。

【参 考 文 献】

- [1] 汪海蛟, 江全元. 应用于平抑风电功率波动的储能系统控制与配置综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 126-134.
- [2] 张川, 杨蕾, 牛童阳, 等. 平抑风电出力波动储能技术比较及分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 149-154.
- [3] 张坤, 毛承雄, 谢俊文, 等. 风电场复合储能系统容量配置的优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 79-87.
- [4] 赵兴勇, 杨涛, 王灵梅. 基于复合储能的微电网运行方式切换控制策略[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2142-2147.
- [5] 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.
- [6] 丁明, 林根德, 陈自年, 等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 1-6.
- [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.
- [8] 施啸寒, 王少荣. 蓄电池超导磁体储能系统平抑间歇性电源出力波动的研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 53-58.
- [9] 张蕴昕, 孙运全. 混合储能在风光互补微网中的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 93-98.
- [10] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.
- [11] 卢芸, 徐俊. 基于小波分解的风电混合储能容量配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 149-154.
- [12] 桑丙玉, 陶以彬, 郑高, 等. 超级电容-蓄电池混合储能拓补结构和控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 1-6.
- [13] 赵兴勇, 晋鹏娟, 王灵梅. 基于储能的风力发电逆变器加权控制算法[J]. 电力科学与工程, 2014, 30(2): 7-11.
- [14] 田明杰, 吴俊勇, 熊飞, 等. 应用于混合储能的组合级联式多端口变流器拓扑结构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 81-89.
- [15] 赵兴勇. 分布式发电并网与电压稳定性[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.

收稿日期: 2016-12-12