

# 基于混合储能的风力发电功率波动平抑控制研究

王颢文, 王恩荣, 张海龙

(南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 根据蓄电池与超级电容性能特点,提出了一种基于蓄电池和超级电容混合储能的协调控制策略. 采用低通滤波器将波动功率分离为低频与高频,由蓄电池平抑低频部分,超级电容平抑高频部分,进一步设计电压电流双闭环协调控制策略,实现蓄电池与超级电容的分频能量吞吐. 仿真结果表明混合储能系统达到了平抑风力发电功率波动,延长蓄电池使用寿命的目的.

[关键词] 风力发电,混合储能,功率波动,平抑控制

[中图分类号] TM614 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2020)02-0025-06

## Research on Smooth Control of Wind Power Fluctuation with Hybrid Energy Storage

Wang Haowen, Wang Enrong, Zhang Hailong

(School of NARI Electrical and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Due to the performance characteristics of battery and super capacitor, a coordinated control strategy based on hybrid energy storage of battery and super-capacitor is proposed. The fluctuating power is separated into low frequency and high frequency by low-pass filter. The low frequency part is suppressed by the battery. The high frequency part is suppressed by the super capacitor. A voltage and current double closed-loop coordination controller is further designed to realize the frequency division energy through out of the battery and the super capacitor. The simulation results show that the proposed hybrid energy storage system effectively suppresses the power fluctuation of wind power system and prolongs the service life of the battery.

**Key words:** wind power generation, hybrid energy storage, power fluctuation, smooth control

为了缓解能源危机、改善生态环境,对新能源的开发利用已在世界范围内得到广泛关注,其中风力发电技术得到了大力发展. 然而风能作为天然清洁能源,受天气影响具有较大的波动性与随机性,大规模风电并网对电力系统的安全稳定运行带来了一定的影响,目前通常采取在风力发电系统中匹配相应混合储能装置,以有效的平抑风能的功率波动<sup>[1-3]</sup>.

目前国内外对平抑功率波动的储能系统中功率的分配和直流母线电压稳定的协调控制研究取得了一定的成果. 文献[4]提出了一种蓄电池为主,超级电容为辅的混合储能控制策略,该策略虽然可以控制系统能量的流动和功率的分配,平抑了系统的输出功率,但因控制环路存在切换环节,增加了系统控制的过程及实现的难度. 文献[5]提出超级电容直接与直流母线相连,蓄电池通过双向 DC-DC 变换器接入直流母线的协调控制方案,结构简单,响应速度快,但直流母线电压存在一定的波动,对功率交换的控制效果不好. 文献[6]研究了直流微电网中,锂电池与超级电容的协调控制策略,提出超级电容优先补偿功率波动,但没有考虑蓄电池充放电次数,对储能装置使用寿命造成影响. 文献[7]采用超级电容电压低频抑制法来分配超级电容与蓄电池各自所需平抑的功率,优化了蓄电池 SOC 曲线,减小了充放电次数,缺点是超级电容需要很多单元串联才能维持直流母线电压. 文献[8]采用滑动平均滤波算法分离出蓄电池所需平抑的功率,有效减少了蓄电池组的充放电次数,但对超级电容功率的协调分配不够合理,增加了超级电容所需容量.

收稿日期:2019-08-26.

通讯作者: 张海龙, 博士, 副教授, 研究方向: 磁流变智能悬架系统及电磁馈能技术研究. E-mail: 61204@njnu.edu.cn

为了简化控制,提升控制稳定性,调节储能装置的充放电,本文提出了两种储能装置共用电压外环的新型电压电流双闭环协调控制策略,维持直流母线电压稳定和协调不同储能装置间功率的分配.该策略顺应了超级电容器与蓄电池各自特性,有效提升储能系统的调节能力与响应速度,增加了蓄电池的使用寿命,最后通过仿真验证控制策略的有效性.

## 1 风储系统的结构

### 1.1 风储系统拓扑结构

本文针对当前主流的双馈风机,采用结构如图 1 所示的集中式混合储能系统,直接接入公共交流母线上.超级电容与蓄电池分别通过双向 DC-DC 变换器并联接在储能变流器的直流母线上,可实现对两种储能装置能量流动的有差别控制<sup>[9]</sup>.储能变流器直流母线经过能量双向流动的 DC-AC 变流器与公共交流母线相连接.

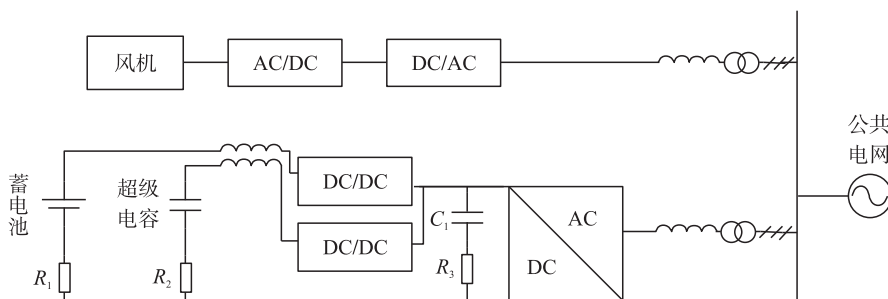


图 1 风储系统的结构

Fig. 1 Structure of wind turbine-energy storage system

### 1.2 双向 DC-DC 变换器

储能装置均是通过双向 DC-DC 变换器接入储能变流器的直流母线,其原理图如图 2 所示.双向 DC-DC 电路具有升压 Boost 和降压 Buck 两种工作状态,当风能欠缺时,能量从储能装置流向直流母线, $T_1$  管关断, $T_2$  管导通,变换器工作在 Boost 状态,储能装置放电.当风能富余时,能量从直流母线流入储能装置, $T_1$  管导通, $T_2$  管关断,变换器工作在 Buck 状态,储能装置充电.

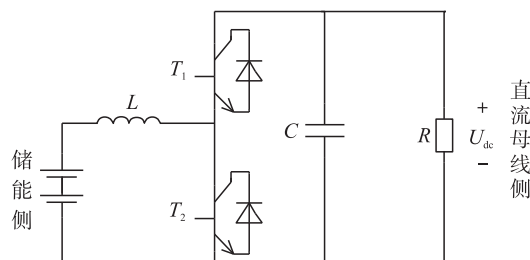


图 2 双向 DC-DC 变换器

Fig. 2 Bidirectional DC-DC convertor

### 1.3 储能变流器

储能系统并网时需要满足给定的有功功率和无功功率的要求,从而完成对波动功率的平抑,因此储能系统需要一个双向 PWM 储能变流器<sup>[10]</sup>.储能变流器连接于直流母线与公共的交流母线之间,采用 PQ 控制来得到系统需要的有功功率与无功功率,有功功率参考值给定为需要平抑的功率,无功功率参考值为 0,其电路结构图如图 3 所示.

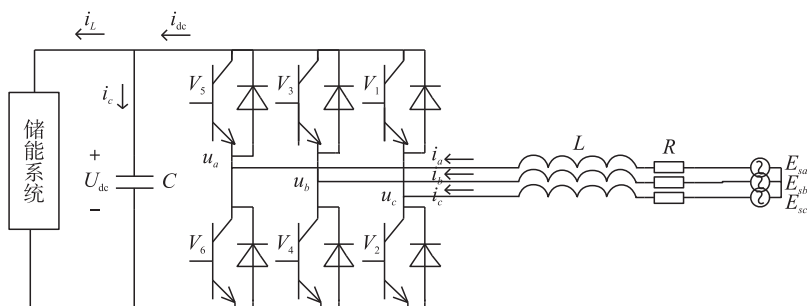


图 3 储能变流器等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit model of energy storage convertor

储能变流器有功功率与无功功率表达式如下<sup>[11]</sup>

$$\begin{aligned} P &= E_{sd} i_d \\ Q &= -E_{sd} i_q \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $i_d, i_q$  为交流侧三相电流在  $d, q$  轴的分量,  $E_{sd}$  为交流侧三相电压在  $d$  轴分量. 可以通过控制  $i_d, i_q$  来实现对有功功率和无功功率的控制, 设计了如图 4 所示的储能变流器  $PQ$  控制框图, 储能变流器并网运行时, 可以通过锁相环得到交流侧的相位与频率. 通过储能系统指定吞吐的有功功率  $P_{\text{HES}}$ , 无功功率  $Q_{\text{HES}}$ , 经过计算后可得到电流环的参考值  $i_{d\text{ref}}, i_{q\text{ref}}$ , 经电流环与  $i_d, i_q$  比较控制后得出  $u_d, u_q$ , 经 Park 反变化得出  $u_{\text{ref}}$ , 后产生 SVPWM 波来控制开关管的通断来达到控制目的.

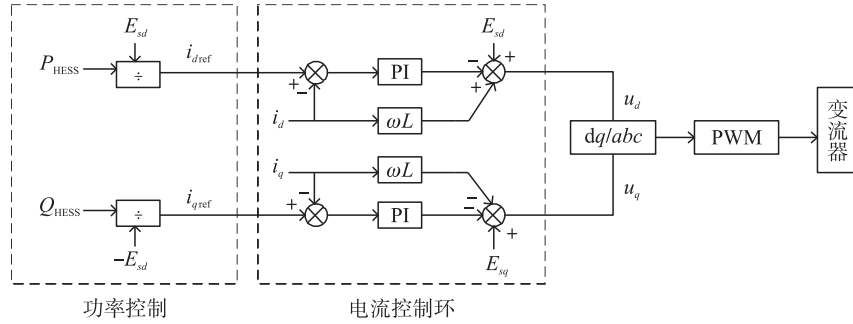


图 4 储能变流器  $PQ$  控制框图

Fig. 4  $PQ$  control diagram of energy storage converter

## 2 基于混合储能系统的功率波动平抑

由于风能的间歇性与随机性, 输出功率必然出现较大幅度的波动, 并网运行时给电网的安全稳定运行造成挑战与影响.

目前对风电功率波动的规范标准是根据中国国家电网有限公司在 2009 年 2 月颁布的《风电场接入电力系统技术规定》, 该文件明确规定了风电场并网运行时的输出功率最大变化量, 包括 1 min 变化量与 10 min 变化量, 具体数据如表 1 所示.

### 2.1 风储并网系统的能量流动

风储系统主要的输出功率来自于风机所发出的功率, 因此, 影响系统的主要因素是风速. 风储系统功率平衡关系式如下

$$\begin{aligned} P_o &= P_w - P_{\text{HES}} \\ P_{\text{HES}} &= P_b + P_c \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $P_{\text{HES}}$  为混合储能系统吞吐的功率,  $P_b$  和  $P_c$  为蓄电池和超级电容各自吞吐的功率,  $P_o$  为整个风储系统的并网功率.

当风速较高时, 储能系统需要吸收功率来平抑波动的功率, 如图 5 所示. 当风速较低时, 储能系统发出功率来稳定功率的波动, 如图 6 所示.

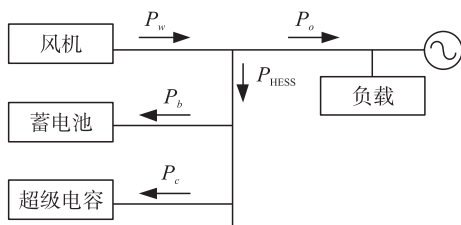


图 5 强风下能量流动

Fig. 5 Energy flow under strong wind

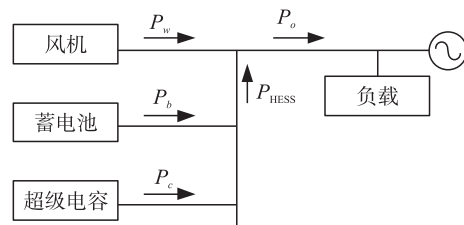


图 6 弱风下能量流动

Fig. 6 Energy flow under weak wind

## 2.2 分频用低通滤波器设计

一阶低通滤波器实现储能系统的功率分频,其电路原理图如图 7 所示,其中  $U_1$  为输入信号,  $U_2$  为输出信号,  $R$  为滤波电阻,  $C$  为滤波电容.

电路微分方程如下

$$RC \frac{dU_2}{dt} + U_2 = U_1. \quad (3)$$

传递函数为

$$H(s) = \frac{1}{1 + \tau s}. \quad (4)$$

式中,  $s$  为滤波算子,  $\tau$  为滤波时间常数,  $\tau = 1/2\pi f_c$ ,  $f_c$  为滤波截止频率.

当滤波器应用于储能系统功率分配时,输入信号  $U_1$  为储能吞吐的功率期望值  $P_{\text{HESS}}^*$ ,输出信号  $U_2$  为蓄电池吞吐的功率参考值  $P_b^*$ ,  $P_c^*$  为超级电容平抑功率的参考值,则

$$P_b^* = \frac{1}{1 + \tau s} P_{\text{HESS}}^*. \quad (5)$$

$$P_c^* = P_{\text{HESS}}^* - P_b^* = \frac{\tau s}{1 + \tau s} P_{\text{HESS}}^*. \quad (6)$$

设计了如图 8 所示的功率分配策略,滤波器参数为  $f_c = 0.1 \text{ Hz}$ ,  $\tau = 1.6 \text{ s}$  [12].

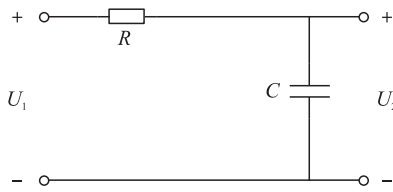


图 7 一阶低通滤波器电路原理图

Fig. 7 Circuit diagram of one-order low pass filter

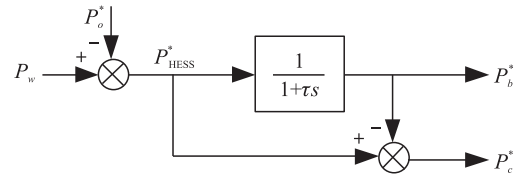


图 8 混合储能的功率分配

Fig. 8 Power optimization of hybrid energy storage

## 2.3 电压电流双闭环分频协调控制策略设计

进一步提出如图 9 所示的电压电流双闭环分频协调控制策略. 储能变流器可以实现整个储能系统与外界的能量交换,而储能装置通过双向 DC-DC 变换器连接于储能变流器的直流母线,它们之间能量流动的本质为直流电压的变化,因此超级电容与蓄电池在控制过程中共用一个电压外环,经过 PI 控制器整定后得到一个电流内环的参考值  $I_{\text{ref}}$ ,将该参考值分频为高频与低频. 低频电流作为蓄电池电流环的参考值  $I_{\text{bref}}$ ,高频电流作为超级电容电流环的参考值  $I_{\text{cref}}$ . 随后参考值  $I_{\text{bref}}$  与流入或流出蓄电池的实际值  $I_b$ ,参考值  $I_{\text{cref}}$  与流入或流出超级电容的实际值  $I_c$  相比较后经过 PI 控制器得出 PWM 波来控制 DC-DC 变换器.

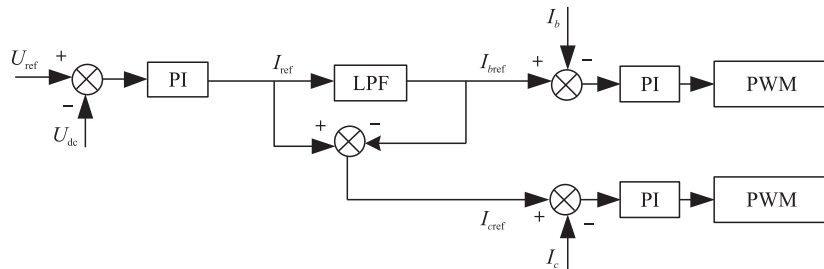


图 9 电压电流双闭环分频协调控制策略

Fig. 9 Voltage and current double closed-loop coordination control strategy

当电路处于 Boost 状态时,  $T_1$  管关断,  $T_2$  管开始工作,通过调节其占空比  $D$  来实现对直流电压的控制,其中  $D = T_{\text{on}}/T$ ,  $T_{\text{on}}$  为  $T_2$  管在一个周期内的导通时间,设直流母线电压为  $U_{\text{dc}}$ ,储能装置端电压为  $U_{\text{bar}}$ ,流入储能侧的电流为  $I$ .

当  $T_2$  管工作时,可得如下状态方程

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1(1-D)}{L} \\ \frac{1-D}{C} & \frac{-1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} U_{bar} \quad (7)$$

由此得电路在 Boost 状态下电流环控制方程

$$L \frac{dI}{dt} = U_{bar} - (1-D) U_{dc} \quad (8)$$

占空比调节方程为

$$D = \frac{(K_p + K_i/s)(I_{ref} - I) - U_{bar} + U_{dc}}{U_{dc}} \quad (9)$$

式中,  $K_p, K_i$  分别为电流环 PI 控制器的比例积分参数.

同理,当电路处于 Buck 工作状态时,可得电流环控制方程和占空比表达式如下

$$L \frac{dI}{dt} = -U_{bar} + D * U_{dc}, \quad (10)$$

$$D = \frac{(K_p + K_i/s)(I_{ref} - I) + U_{bar}}{U_{dc}} \quad (11)$$

该控制方法既维持了直流母线电压的稳定,完成了能量的流动,又实现了分频控制,达到了功率在蓄电池与超级电容之间分配的目的.

### 3 仿真验证

本文基于 Matlab/Simulink 建立风储一体化并网系统,外部系统采用单机无穷大系统,风机主要参数如下:风机容量为 100 kW,额定电压 690 V,储能系统主要参数如下:蓄电池容量为 300 Ah,电池内阻为 0.5  $\Omega$ ,超级电容容量为 70 F,直流母线参考电压为 800 V.

首先观察风速变化引起的功率波动问题.在阵风和随机风下,风机输出功率如图 10、图 11 所示.可见,随着风速随机波动越大,风机功率波动也就越大,此时无法满足电力系统并网的要求.

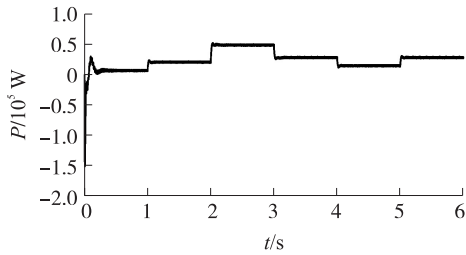


图 10 阵风下的功率波动

Fig. 10 Power fluctuation under gust

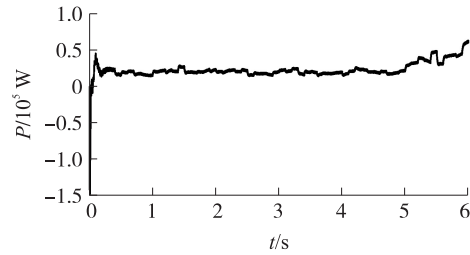


图 11 随机风下的功率波动

Fig. 11 Power fluctuation under random wind

假设系统在秒级时间尺度内输出的有功功率期望(电网调度值)为恒定值,无功功率为零,给定风机为变风速,风机输出功率与经过储能系统平抑后的并网功率如图 12 所示,经过混合储能平抑后,风储系统的并网功率基本保持不变,满足电网调度要求.图 13、图 14 为蓄电池和超级电容实际功率与分配的参考功率对比,可以看出储能装置基本可以按照功率分配的参考值进行充放电,提出的混合储能系统很好地平抑了风电功率的波动.

图 15、图 16 为蓄电池与超级电容在并网运行过程中 SOC 值的变化情况,可以看出蓄电池 SOC 曲线平滑,幅值变化范围小,没有经过反复的充放电,而超级电容 SOC 变化较快,有多次反复的充放电,充放电深度也比蓄

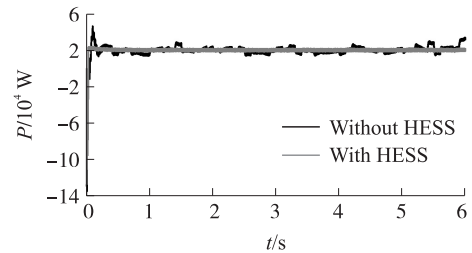


图 12 变风速下平抑效果对比

Fig. 12 Comparison of suppressing power under variable wind speed



电池大. 因此验证了混合储能控制策略的有效性,有效减小了蓄电池充放电次数,延长了其使用寿命.

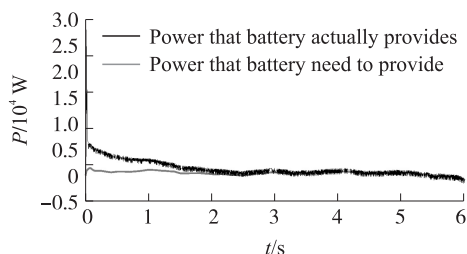


图 13 蓄电池实际功率与参考功率

Fig. 13 Actual and reference power of battery

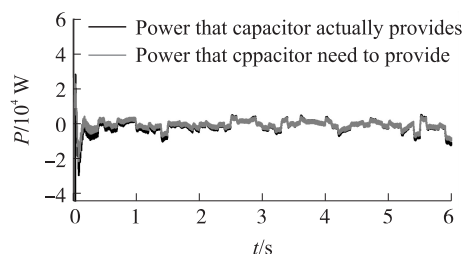


图 14 超级电容实际与参考功率

Fig. 14 Actual and reference power of capacitor

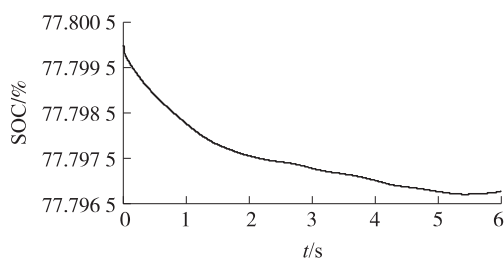


图 15 蓄电池 SOC 变化曲线

Fig. 15 SOC curve of battery

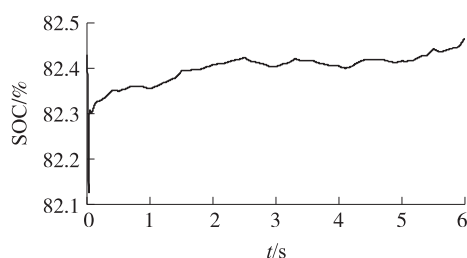


图 16 超级电容 SOC 变化曲线

Fig. 16 SOC curve of super capacitor

## 4 结论

本文基于蓄电池和超级电容混合储能的风电并网系统,提出一种基于电压电流双闭环分频协调控制的功率波动平抑策略,共用一个电压外环,维持了直流母线电压稳定,实现功率的交换,简化了控制结构,提升了响应速度,电流内环则实现了功率的协调分配. 在变风速情况下进行系统仿真,结果验证了该控制策略能够有效平抑风电输出功率的波动,同时减小蓄电池充放电次数,延长了其使用寿命.

## [参考文献] (References)

- [1] LU M S, CHANG C L, LEE W J. Combining the wind power generation system with energy storage equipment[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(6): 2109-2115.
- [2] ABEDINI A, NIKKHAJOEI H. Dynamic model and control of a wind-turbine generator with energy storage[J]. Renewable Power Generation, 2011, 5(1): 67-68.
- [3] YAO D L, CHOI S S, TSENG K J. A statistical approach to the design of a dispatchable wind power-battery energy storage system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 24(4): 916-925.
- [4] 李逢兵, 谢开贵, 张雪松. 基于锂电池充放电状态的混合储能系统控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 70-75.
- [5] 于芑, 赵瑜. 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.
- [6] LIU X, WANG P. Control of hybrid battery/ultra-capacitor energy storage for stand-alone photovoltaic system[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Atlanta, Georgia, USA, 2010: 336-341.
- [7] 赵艳蕾, 李海东, 张磊, 等. 基于快速储能的风电潮流优化控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 21-28.
- [8] 张国驹, 唐胜西, 齐智平. 平抑间歇式电源功率波动的混合储能系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 24-28.
- [9] LIU F C, LIU J J, ZHOU L Y. A novel control strategy for hybrid energy storage system to relieve battery stress[C]//IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Hefei, China, 2010: 929-934.
- [10] 张从谦. 功率预测及混合储能在风电系统中的应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [11] 王再兴. 基于混合储能的光储微电网研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [12] 王坤. 储能型风电场功率波动平抑技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.

[责任编辑: 陈 庆]