

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.05.032

风水储微电网优化调度策略研究

王 源, 南海鹏, 关 欣

(西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

摘要: 为了缓解风电因随机波动性对电网造成的冲击,增强风电的可控性,提出一种基于分频段补偿法的风水储微电网优化调度策略。该策略根据水电机组输出带宽,通过小波分解法对风电功率信号进行多尺度分解,得到水电机组和储能系统初级功率指令,再根据水机爬坡能力,对初级功率指令进行修正得到最终功率指令。基于MATLAB/Simulink平台建立了风水储微电网仿真模型,分析了所提调度策略与现有策略的控制效果,结果表明,所提调度策略能减小储能所需容量,降低储能配置成本;改善了微网内水机过渡过程,有利于微网稳定运行;提高了风电的可控性,使微网有功输出更平滑。

关键词: 风水储微电网; 调度策略; 分频段补偿法; 小波分解; 水机爬坡限制

Optimal Scheduling Strategy of Wind-hydro-storage Micro-grid

WANG Yuan, NAN Haipeng, GUAN Xin

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To mitigate the impact of random fluctuation of wind power on micro-grid and enhance the controllability of wind power, an optimal scheduling strategy of the wind-hydro-storage micro-grid (WHSM) based on frequency division compensation is proposed. According to the output bandwidth of a hydropower unit, multi-scale decomposition of the wind power signal is performed by the wavelet decomposition method to obtain the primary power command of the hydropower unit and energy storage system. Then, according to the climbing ability limit of the hydropower unit, the primary power command is modified to get the final power command. A WHSM simulation model based on MATLAB/Simulink is established, and the control effects of the proposed scheduling strategy and the existing strategy are compared. The result shows that the proposed scheduling strategy can reduce the required capacity and the configuration cost of the energy storage system, improve the transition of the hydropower unit in the WHSM, which is conducive to stable operation of the WHSM, and increase controllability of wind power to make the active power output of the WHSM smoother.

Key words: wind-hydro-storage micro-grid; scheduling strategy; frequency division compensation; wavelet decomposition; hydropower unit climbing ability limit

0 引言

风电等新能源的快速发展带来电源结构的深刻变化,截至2016年底,全国全口径发电装机容量165 051万kW,其中并网风电14 747万kW,风电已成为中国电网中的重要组成部分^[1]。但是由于风电具有随机性、波动性和不稳定性等特点,风电直接并网对电力系统稳定性、电网频率、电能质量、发电

计划和调度等方面产生较大的影响,从而严重制约了风能的利用及风电的大规模发展^[2-5]。

风电输出功率波动按其频率可以分为高中低3个频区^[6],其波动可以选用功率输出带宽不同的电源分频段进行平抑。水电启停迅速,出力调节方便,具有较宽的调节范围,一般用来平抑风电功率的中低频段;蓄电池储能系统功率响应速度快,响应时间在秒级,一般用来平抑风电功率的高频段^[7-8]。

收稿日期:2019-10-06; 修回日期:2019-12-12

基金项目:国家自然科学基金(51379174)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51379174).

目前学术界对于水电和蓄电池储能系统平抑风电功率波动已展开较多研究。在风电功率的频段划分及水电和蓄电池储能系统功率指令求取中一阶低通滤波算法、滑动平均算法^[9]以及小波分解法等^[10-12]得到了广泛应用;在风电功率补偿中,水电和蓄电池储能系统的容量配置主要有两种方法,一是引入电量平衡约束,来水量等约束,以最优经济性为目标函数等进行优化计算,从而确定水电和蓄电池储能系统的容量^[13-14];二是考虑网络约束,以不过载为目标,确定风电的最大占比^[15],在既定占比的条件下以蓄电池储能系统实际所需平抑功率计算蓄电池储能系统容量。

然而目前关于以水电和蓄电池储能系统补偿平抑风电的研究中,没有考虑水机的爬坡能力限制问题,默认水电机组的调节能力能够满足风电功率的平抑要求或是采用容量较大的水电厂去平抑容量较小的风电场,从而规避了水机的爬坡能力限制问题;且在水电机组容量配置中并未考虑水电机组的稳定运行区间,往往水电承担的补偿任务已经超出了水电机组的稳定运行区间,不利于水电机组及微电网的安全运行。

故文中针对上述问题,根据风电功率的幅频特性,基于分频段补偿法设计了风水储微电网优化调度策略,在容量配置中考虑水电机组的稳定运行区间,并根据水机爬坡能力限制对水电机组和蓄电池储能系统的功率指令进行修正,以达到对风电功率的有效平抑。最后,对比分析了传统的基于一阶低通滤波的调度策略与文中所提策略的控制效果,验证了文中所提策略的优越性。

1 风电功率频段划分以及各电源补偿功率分配

1.1 基于小波分解法的各电源补偿功率初级分配

蓄电池储能系统和水电机组因出力覆盖频段不同,可针对风电功率的不同频段进行补偿调节。考虑到蓄电池储能系统容量有限且成本较高,通常采用水电机组来补偿风电功率的中低频分量,蓄电池储能系统来补偿风电功率的高频分量,分频段补偿法原理见图1。

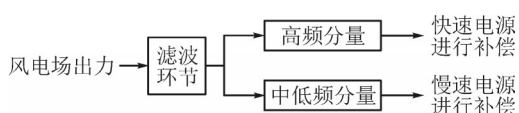


图1 分频段补偿原理图

Fig. 1 The schematic of frequency division compensation

小波分解法对信号的频谱分析具有良好的时

频域定位特性,对低频信号具有较好的分辨率^[16]。文中利用小波分解将实时风电功率分解成中低频分量和高频分量,针对不同频段选择相应的电源进行平抑补偿,从而获得较好的平抑效果。典型的小波分解的示意图(以3层分解为例)见图2。

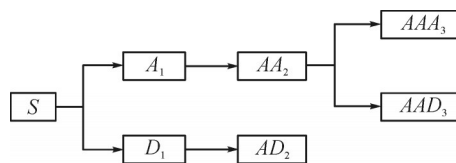


图2 小波分解示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wavelet decomposition

图2中从左到右分别代表原始信号进行1、2、3层分解所得信号分量; S 代表原始信号,对其进行 n 层($n \geq 1$,示意图中 $n=3$)分解; A 表示中低频分量; D 表示高频分量。每个信号频段带宽 f_0 为

$$f_0 = \frac{f_s}{2^{n+1}} \quad (1)$$

式(1)中: f_s 为信号采样频率; n 为小波分解层数。经小波分解后,风电功率可表示为

$$P_{\text{wind}} = P_{L_n} + P_{H_n} \quad (2)$$

式(2)中: P_{wind} 为实时风电功率; P_{L_n} 为经过 n 层小波分解后的中低频分量; P_{H_n} 为经过 n 层小波分解后的高频分量。

进行 n 层分解后,第 n 层中低频分量 P_{L_n} 和第1层至第 n 层高频分量的频率范围分别为 $[0, f_s/2^{n+1}]$ 和 $[f_s/2^{n+1}, f/2]$ 。

水电机组输出响应带宽可以覆盖风电的中低频段,用 $F_{H_{\min}}$ 和 $F_{H_{\max}}$ 分别表示其输出响应带宽的上下限,那么对风电功率数据进行频段划分时应满足

$$F_{H_{\min}} \leq f_s/2^{n+1} \leq F_{H_{\max}} \quad (3)$$

将式(2)重新表示为

$$P_{\text{wind}} = P_{\text{fHL}} + P_{\text{fHH}} \quad (4)$$

式(4)中: P_{fHL} 为风电功率分频后的中低频部分; P_{fHH} 为风电功率分频后的高频部分。

根据图1所示补偿原理,则水电机组承担的功率为

$$P_{\text{hydro}} = P_{\text{plan}} - P_{\text{fHL}} \quad (5)$$

式(5)中: P_{hydro} 为水电机组承担的功率; P_{plan} 为调度计划值; P_{fHL} 为风电功率分频后的中低频部分。

蓄电池承担的功率为

$$P_{\text{bat}} = -P_{\text{fHH}} \quad (6)$$

式(6)中: P_{bat} 蓄电池承担的功率; P_{fHH} 为风电功率分频后的高频部分。

1.2 风电功率分频频率确定

风电功率按频域划分示意图见图3。

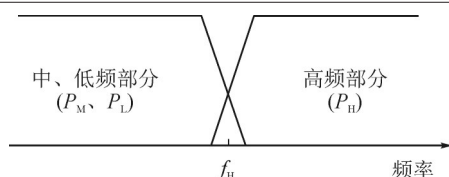


图3 风电功率频域划分示意图

Fig. 3 Wind power frequency region division diagram

f_H 为高频部分和中低频部分的分频频率。由文[17]可知,蓄电池储能系统的充放电响应时间可达到毫秒级,按照1 s计算,其覆盖频段可到达1 Hz,能够补偿水电机组所不能覆盖的频段。故分频频率值的界定由水电机组确定,水电机组以混流式为例进行分析,文[18]中给出了水轮机及其有压引水系统的传递函数

$$G_t(s) = \frac{1 - T_w s}{1 + 0.5 T_w s} \quad (7)$$

式(7)中, T_w 为水流惯性时间常数。

考虑到水电机组平抑风电功率波动是一个长时间的过程,为简化分析,且保证一般性,忽略发电机电磁暂态过程,该节分析中采用发电机模型为

$$P = 9.81 q h \eta = m_t \omega \eta \quad (8)$$

式(8)中: $\eta = \eta_t \eta_g$ 为发电机综合效率; ω 为机组转速; P 为发电机功率; q 为水轮机流量; h 为水轮机净水头; m_t 为水轮机转矩。

当机组并网运行时, $\omega = \omega_r = \text{const}$ (const 为常数), ω_r 为额定转速。则式(8)可表示为

$$P = m_t \omega_r \eta \quad (9)$$

式(9)中: m_t 为水轮机转矩; η 为发电机综合效率。

对典型混流式水电站水流惯性时间常数 T_w 进行统计,结果见图4。

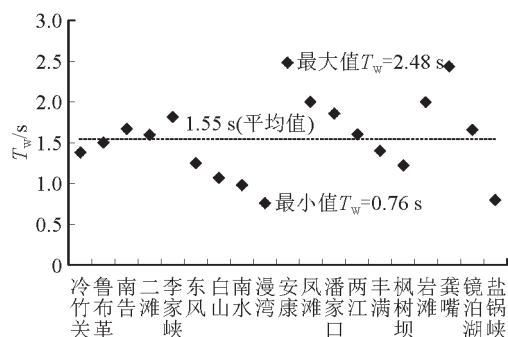
图4 典型混流式水电站 T_w 统计Fig. 4 T_w statistic of typical francis hydropower station

图4中包含了19组混流式机组的统计数据,由图4可知,水流惯性时间常数最小值为0.76 s,最大值为2.48 s,平均值为1.55 s。根据所述水电机组模型可获得机组的频域响应,水电机组的相频特性见图5。

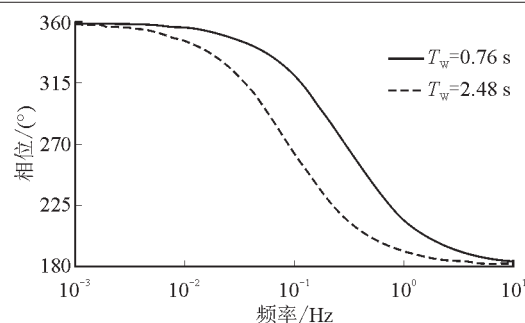


图5 水电机组相频特性

Fig. 5 Hydropower unit phase-frequency characteristics

从图5中可以看出,当 $T_w=0.76$ s时,频率大于 9×10^{-2} Hz时,水电机组的响应延迟相角明显增大。当 $T_w=2.48$ s时,频率大于 2×10^{-2} Hz时,水电机组的响应延迟相角明显增大。依据文[19],当延迟相角为 30° 时,水电机组对风电的平抑效果会减小一半,因此可选此时对应的频率为分频频率,即水电机组的出力覆盖频段为0.02~0.09 Hz。

经分析,当 T_w 较小时,水锤效应对水电机组调节产生的影响相对较小,此时水电机组调节速度相对较快,输出覆盖频段较高;当 T_w 较大时,水锤效应对水电机组调节产生的影响相对较大,此时水电机组调节速度相对较慢,输出覆盖频段较低。仿真分析中,分频频率的界定依据具体仿真参数由上述方法确定。

1.3 蓄电池储能系统容量确定

为保证储能系统的补偿能力,储能容量根据实际充放情况进行计算,计算方法为

$$E = \int_0^T P_{\text{bat}}(t) dt \quad (10)$$

式(10)中: E 为蓄电池储能系统的容量; $P_{\text{bat}}(t)$ 为蓄电池储能系统的期望功率值; T 为蓄电池动作总时间。

令 R_{bat}^t 表示在 t 时刻蓄电池的剩余容量,则有

$$R_{\text{bat}}^t = R_{\text{bat}}^{t_0} - \sum_{i=0}^{N\Delta t} P_{\text{bat}}^{t_0+i} \Delta t \quad (11)$$

式(11)中: $R_{\text{bat}}^{t_0}$ 为蓄电池的初始容量;上标 t 对应时间, $t=t_0+N\Delta t$; t_0 为初始时间; Δt 为采样时间步长; N 为采样点个数。

则蓄电池动作期间所需实际容量为

$$E = \max R_{\text{bat}}^t - \min R_{\text{bat}}^t \quad (12)$$

考虑到蓄电池安全使用及一定容量裕度,在容量计算时需设置容量配置系数,即

$$\hat{E} = \alpha E \quad (13)$$

文中容量配置系数取 $\alpha = 1.2$ 。

2 微电网优化调度策略设计

2.1 考虑水电机组稳定运行区域及爬坡能力约束

在风电功率波动的平抑中,水电机组承担主要平抑任务,为保证平抑效果,水电机组需考虑稳定运行区域。标准 GB/T 15468—2006 中规定,装机容量在 10 MW 以上的混流式水轮机机组保证功率范围为 45%~100%额定功率^[20],故在容量配置时可参考此范围,使水电机组在承担平抑任务时应尽量在稳定区域内运行。

爬坡率也称变负荷速率,是指发电机组每分钟可变化输出功率与机组额定容量之比^[6]。根据水电机组的爬坡能力限制,在风电功率分频段补偿中对所得水电机组和储能系统的初级功率指令进行修正,修正示意图见图 6。

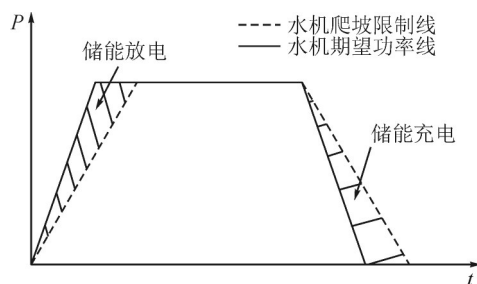


图 6 水机爬坡能力限制对功率指令修正示意图

Fig. 6 Schematic of power correction based on water machine climbing ability limit

由图 6 可知,当水电机组的初级功率指令超出水机爬坡能力限制时,水机的实际出力不能满足功率指令的要求,将出现多发或少发情况,此时需要储能系统进行调节。

2.2 优化调度策略设计

文中所提优化调度策略原理见图 7。

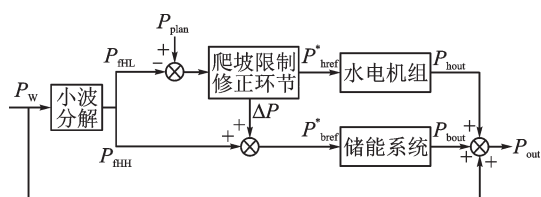


图 7 调度策略原理图

Fig. 7 Scheduling strategy schematic

图 7 中: P_{plan} 为调度计划值; P_w 为风机实时功率值; P_{HL} 为风电功率分频后的中低频部分, P_{HH} 为风电功率分频后的高频部分; ΔP 为根据爬坡限制修正功率值; P_{bref}^* 为修正后的水机功率指令值; P_{bref}^* 为蓄电池储能系统的最终功率指令; P_{hout} 为水电机组输出有功; P_{bout} 为储能系统输出有功; P_{out} 微电网有功输出值。 ΔP 计算方法为

$$\Delta P = P_{hydro} - P_{lim} \quad (14)$$

式(14)中: P_{lim} 为水机爬坡限制下的最大出力值; P_{hydro} 如前所述,为水机初始功率指令值。

3 仿真分析

为验证文中所提风水储微电网优化调度策略的有效性,采用 MATLAB/Simulink 仿真软件建立了图 8 所示仿真模型。

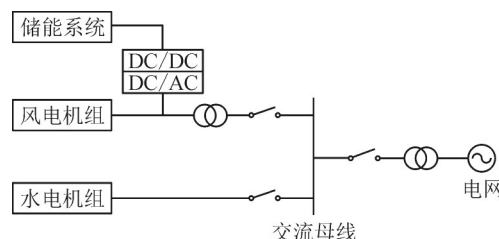


图 8 风水储微电网系统拓扑结构

Fig. 8 System topology configuration of wind-hydro-storage micro-grid

水轮机同步发电机模型采用 MATLAB 模块库提供的 6 阶模型;风电机组采用变桨距鼠笼异步风电机模型;蓄电池储能系统采用三阶动态模型^[21],通过 DC/DC, DC/AC 结构并联在风电机组的输出端。

水电厂装机容量为 12 MW,风电场装机容量为 9 MW,含 6 台 1.5 MW 机组,负荷为 13 MW。蓄电池初始荷电状态值为 70%,储能设备的容量配置系数取 1.2。系统采样时间为 1 s。仿真中水电机组水流惯性时间常数 $T_w=1.55$,PID 控制器参数经 MATLAB 非线性寻优器寻优后确定为 $K_p=5, K_i=8, K_d=0$ 。

选取某风电场典型功率数据进行仿真分析,根据 1.2 节分频频率界定方法,可确定分频频率 $f_H=0.039$ Hz。采用 db6 小波对风电输出功率进行 7 层分解,可得到风电功率中低频部分和高频部分的功率曲线,见图 9。

调用 MATLAB 工具箱中的 FFT 函数对风电功率数据进行快速傅里叶变换得到风电功率频谱图,见图 10。由图 10 可知,风电功率的能量主要集中在 0~0.04 Hz 部分,所选取的分频频率 f_H 值合理。

根据式(10)~(13)计算,可确定储能电池的容量 $\hat{E}$ 的值为 0.005 7 MW·h。对比了不同调度策略下所需配置的蓄电池额定容量见表 1。

由表 1 可知,当传统的基于一阶低通法的调度策略中考虑水电机组爬坡能力限制时,对所需储能系统容量提出了更高的要求;与传统方法相比,采用文中所提方法时,所配置的储能容量大大减小,具有更好的经济性。

不同调度策略下水电机组的过渡过程响应曲线见图 11。

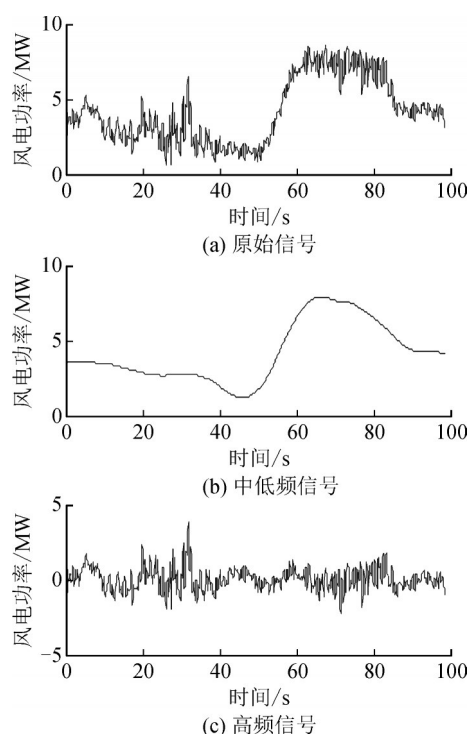


图9 小波分解的风电功率曲线

Fig. 9 Curves of wind power based on wavelet decomposition

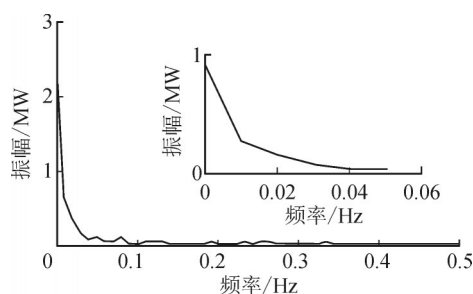


图10 风电功率幅频特性曲线

Fig 10 Curve of amplitude frequency characteristics of wind power

表1 不同调度策略下储能容量配置对比

Table 1 Capacity comparison of different scheduling strategies

调度策略	容量/(MW·h)
传统(考虑爬坡)	0.009 6
传统	0.006 7
文中	0.005 7

由图11可知,当传统调度策略中考虑水电机组爬坡能力限制时,水电机组的水头和转速振荡峰值减小;与传统调度策略相比,采用文中提出的调度策略时,水电机组的水头和转速振荡情况大幅改善,调节品质更好,更有利于水电机组的稳定运行。

不同调度策略下微电网有功功率输出情况见图12。由图12(a)、(b)可知,采用传统的调度策略时,微电网有功功率输出震荡较为剧烈,当传统调度策

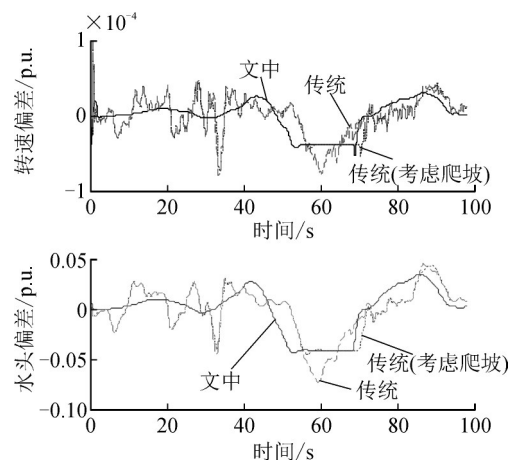


图11 水电机组动态响应曲线

Fig. 11 Dynamic response curve of hydraulic turbine

略中考虑水电机组爬坡能力限制时,水电机组负荷调节能力的利用情况得到改善,有效降低了有功功率震荡峰值。由图12(c)可知,因小波分解对风电功率波动敏感性较高、分频效果较好,且根据水机爬坡能力限制对功率指令进行修正后,改善了水机过渡过程的调节品质,充分利用了水电和储能系统的负荷调节能力,所以微电网有功功率的输出能够维持在 $\pm 6\%$ 区间内,平滑性更好。

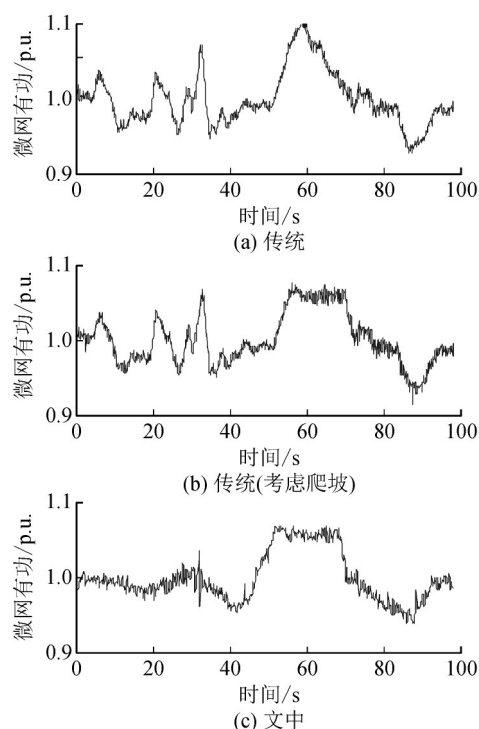


图12 微电网有功输出

Fig. 12 Micro-grid active output

4 结论

文中基于分频段补偿法,设计了风水储微电网的优化调度策略。根据水电机组的输出响应覆盖

频段确定频段界定值,考虑水电机组爬坡能力限制对各电源补偿功率指令进行修正以充分利用各电源的负荷调节能力,并与传统的基于一阶低通法的调度策略进行了对比,得到如下结论:

1)考虑水电机组爬坡能力限制时,水电机组的水头和转速响应更为平稳,震荡情况大幅改善,有利于水电机组和微电网的稳定运行。

2)所提策略与传统的策略相比,对储能系统的容量需求更少,具有更好的经济性。

3)所提策略能充分利用各电源的负荷调节能力,微电网有功响应更为平滑。

参考文献:

- [1] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告(2017)综述部分[EB/OL]. <http://www.cec.org.cn/guihuayutongji/gongzuodongtai/2017-09-11/172982.html>.
China Electricity Council. Annual development report of China's power industry(2017)overview section[EB/OL]. <http://www.cec.org.cn/guihuayutongji/gongzuodongtai/2017-09-11/172982.html>.
- [2] 张文韬,王秀丽,李言,等. 大规模风电并网下多区域互联系统热电综合调度模型[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 154-161.
ZHANG Wentao, WANG Xiuli, LI Yan, et al. An analysis model of multi-area interconnected power systems with large-scale wind power involved in comprehensive heating and power system scheduling[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 154-161.
- [3] 黎静华,左俊军,汪赛. 大规模风电并网电力系统运行风险评估与分析[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3503-3513.
LI Jinghua, ZUO Junjun, WANG Sai. Analysis and assessment of operation risk for power system with large-scale wind power integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3503-3513.
- [4] 李军徽,冯喜超,严干贵,等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.
LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.
- [5] 赵文猛,刘明波,周保荣,等. 含风电接入多区域电力系统的分散式随机动态经济调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7087-7098.
ZHAO Wenmeng, LIU Mingbo, ZHOU Baorong, et al. Decentralized stochastic dynamic economic dispatch for multi-area power systems with wind power integrated[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7087-7098.
- [6] 刘吉臻. 新能源电力系统建模与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 252-265.
LIU Jizhen. Modeling and control of new energy power system[M]. Beijing: Science Press, 2015: 252-265.
- [7] 徐国栋,程浩忠,马紫峰,等. 用于平滑风电出力的储能系统运行与配置综述[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3470-3479.
XU Guodong, CHENG Haozhong, MA Zifeng, et al. An overview of operation and configuration of energy storage systems for smoothing wind power outputs[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3470-3479.
- [8] 邢鹏翔,张世泽,曾梦迪,等. 多能源混合微网容量优化配置研究综述[J]. 武汉大学学报, 2017, 50(3): 375-383.
XING Pengxiang, ZHANG Shize, ZENG Mengdi, et al. Review of configuration optimization for hybrid microgrid with multiple energy resources[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(3): 375-383.
- [9] 靳雯皓,刘继春. 平滑风电功率波动的混合储能系统容量优化配置[J]. 分布式能源, 2017, 2(2): 32-38.
JIN Wenhao, LIU Jichun. Capacity optimization configuration of hybrid energy storage system for smoothing wind power fluctuation[J]. Distributed Energy, 2017, 2(2): 32-38.
- [10] 吕超贤,李欣然,卢龙辉,等. 基于小波分频与双层模糊控制的多类型储能系统平滑策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 21-29.
LYU Chaoxian, LI Xinran, LU Longhui, et al. A smoothing strategy for hybrid energy storage system based on wavelet frequency allocation and two-level fuzzy control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 21-29.
- [11] 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.
- [12] 陈科彬,邱晓燕,刘波. 风电场混合储能的小波包-SOC分区功率控制[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 2078-2085.
CHEN Kebin, QIU Xiaoyan, LIU Bo. Wavelet packet-SOC partitioned power control of hybrid energy storage for wind farm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 2078-2085.
- [13] 畅建霞,王义民,黄强,等. 水电与风电联合补偿调度机理研究与应用[J]. 水力发电学报, 2014, 33(3): 68-73.
CHANG Jianxia, WANG Yimin, HUANG Qiang, et al. Compensation operation mechanism of hydropower plant and wind power plant[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(3): 68-73.
- [14] 尚志娟,周晖,王天华. 带有储能装置的风电与水电互补系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 99-105.

- SHANG Zhijuan, ZHOU Hui, WANG Tianhua. Research of complementary system for wind power with energy storage devices and hydro power[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 99-105.
- [15] 杨秀媛, 陈麒宇, 王 蒙, 等. 考虑网络约束的风电水电协同果蝇优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5286-5293.
- YANG Xiuyuan, CHEN Qiyu, WANG Meng, et al. Cooperating control for wind farm and hydro power plant based on the fruit fly[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5286-5293.
- [16] 吴振威, 蒋小平, 马会萌, 等. 用于混合储能平抑光伏波动的小波包-模糊控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 317-324.
- WU Zhenwei, JIANG Xiaoping, MA Huimeng, et al. Wavelet packet-fuzzy control of hybrid energy storage systems for PV power smoothing[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 317-324.
- [17] 靳文涛, 徐少华, 张德隆, 等. 并网光伏电站 MW 级电池储能系统应用及响应时间测试[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2425-2432.
- JIN Wentao, XU Shaohua, ZHANG Delong, et al. Application and response time test of MW-level battery energy storage system used in PV power station[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2425-2432.
- [18] 程远楚, 张江滨. 水轮机自动调节[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 205-206.
- CHENG Yuanchu, ZHANG Jiangbin. Automatic adjustment of the turbine[M]. Beijing: China Water Power Press, 2010: 205-206.
- [19] HARA M, YAMAMURA N, ISHIDA M, et al. Method of electric power compensation for wind power generation using biomass gas turbine generator and flywheel[C]//Power Conversion Conference-Nagoya. [S.l.]: [s.n.], 2007: 243-248.
- [20] 全国水轮机标准化技术委员会. 水轮机控制系统技术条件: GB/T 15468—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- National Technical Committee for Standardization of Hydraulic Turbines. Fundamental technical requirements for hydraulic turbines: GB/T 15468—2006[S]. Beijing: China Standard Press, 2006.
- [21] TREMBLAY O, DESSAINT L A. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications[J]. World Electric Vehicle Journal, 2009(3): 13-16.
- 王 源(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网运行及控制。
- 南海鹏(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为水力机组控制、电网运行控制。
- 关 欣(1988—), 女, 博士, 研究方向为水力机组控制、电网运行控制。