



## Application of Lead Differential Control in Coordinated Hydro and Wind Power Generation

Yang, X., Chen, Y., Chen, Q., Littler, T., & Li, K. (2015). Application of Lead Differential Control in Coordinated Hydro and Wind Power Generation. Proceedings of the CSEE, 35(18), 4591. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2015.18.004

**Published in:**  
Proceedings of the CSEE

**Document Version:**  
Version created as part of publication process; publisher's layout; not normally made publicly available

**Queen's University Belfast - Research Portal:**  
[Link to publication record in Queen's University Belfast Research Portal](#)

### General rights

Copyright for the publications made accessible via the Queen's University Belfast Research Portal is retained by the author(s) and / or other copyright owners and it is a condition of accessing these publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

### Take down policy

The Research Portal is Queen's institutional repository that provides access to Queen's research output. Every effort has been made to ensure that content in the Research Portal does not infringe any person's rights, or applicable UK laws. If you discover content in the Research Portal that you believe breaches copyright or violates any law, please contact [openaccess@qub.ac.uk](mailto:openaccess@qub.ac.uk).

# 导前微分控制在风电水电协同运行中的应用

杨秀媛<sup>1</sup>, 陈瑶<sup>1</sup>, 陈麒宇<sup>2</sup>, Tim Littler<sup>2</sup>, 李慷<sup>2</sup>

(1. 北京信息科技大学自动化学院, 北京市 海淀区 100192;

2. 贝尔法斯特女王大学电子电气与计算机科学学院, 英国 贝尔法斯特 BT9 5AH)

## Application of Lead Differential Control in Coordinated Hydro and Wind Power Generation

YANG Xiuyuan<sup>1</sup>, CHEN Yao<sup>1</sup>, CHEN Qiyu<sup>2</sup>, Tim Littler<sup>2</sup>, Kang Li<sup>2</sup>

(1. School of Automation, Beijing Information Science & Technology University, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. School of Electronics, Electrical Engineering and Computer Science, Queen's University Belfast, Belfast BT9 5AH, UK)

**ABSTRACT:** The acceptance of large wind power is a problem because of the randomness of wind power. Taking into account the complementary between wind power and hydropower, a solution was proposed by using hydropower plants to stabilize the unstable wind power output caused by the volatility and intermittent wind speed. The control of wind farm and hydropower plant coordinating operation was realized by control the hydropower plant. It was guaranteed that the hydropower plant and wind farm together could provide active power as schedule. Considering to the characteristics of hydro-generator set, lead differential control scheme was put forward, adding a lead differential control on conventional PID control (LDPID). The simulation results show that this method has better control performance than the conventional control scheme. The complementary system could provide a smooth power output, which reduces the impact on the grid.

**KEY WORDS:** wind power; hydro power; wind and hydro power coordinating operation; lead differential control

**摘要:** 风电的随机性导致大规模风电的接纳成为当前电力系统面临的重要问题。考虑到风电和水电的互补性, 提出用水电厂来平抑由于风速的波动性和间歇性导致的风电场输出功率波动, 通过控制水轮机实现风水协同运行的控制, 使水电厂和风电场向电力系统提供的有功功率按调度计划输出。针对水轮机的特点, 提出导前微分控制方案。仿真结果表明, 在PID控制基础上并联导前微分控制比常规PID控制方案具有更好的控制效果。风电与水电的协同运行可平抑风电输出功率的波动性, 减少对电网的冲击, 有利于电网的长期稳定运行。

**关键词:** 风电; 水电; 风水协同; 导前微分控制

## 0 引言

随着风电接入比例的增高, 风电给电力系统的运行带来困难, 迫切需要研究新的对策来平滑风电的功率波动。综合考虑各能源的功率输出特性, 可知水电是与风电互补运行的良好选择<sup>[1-3]</sup>, 利用水电与风电互补运行是未来最可行的发展方向。目前国内类似的研究主要集中在电力系统优化调度问题上: 1) 以减少风电的波动性对电网的影响为目标<sup>[4-5]</sup>; 2) 以提高风电场的经济效益为目标<sup>[6]</sup>; 3) 以节能减排为目标<sup>[7-8]</sup>; 4) 以优先消耗风电等可再生能源为目标<sup>[9]</sup>。基本的解决方法都是根据优化目标, 构建目标函数和约束条件, 通过已有的商业化软件或者某种新算法求解全局优化调度模型。

利用水电的调节能力, 使水电厂和风电场向电力系统提供的有功功率按计划输出, 这种方式称之为风电场和水电厂的协同运行(coordinated hydro and wind power generation, CHWG); 它可以将随机的风电转化成可以参与电力系统运行计划的电源<sup>[10-11]</sup>。为了提高水电机组的响应速度、增强CHWG的平滑能力, 本文提出CHWG的导前微分控制方法。文献[12-15]已经介绍了风水协同运行在高频切机和低频减载以及海上风电调峰中的应用。所以, 本文假设电网具备风电水电协同运行条件, 主要研究如何提高水电机组的响应速度。借鉴文献[16-20]经验, 提出将导前微分应用到CHWG。本文研究的是日运行计划的实现问题, 考虑的是整个风电场的输出功率变化, 并非单个风电机组; 不同

基金项目: 国家自然科学基金项目(51377011)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (51377011).

日期运行计划也不同。

### 1 导前微分控制系统

导前微分控制系统原理如图 1 所示。其中， $W_a(s)$ 为调节器； $W_z(s)$ 为执行器； $W_f(s)$ 为调节阀； $W_1(s)$ 、 $W_2(s)$ 分别为惰性区和导前区； $W_{m1}(s)$ 、 $W_{m2}(s)$ 分别为主回路和副回路的测量变送器； $W_D(s)$ 为微分器； $I_1$ 、 $I_2$ 分别为主信号和导前信号； $z$ 为外部扰动。

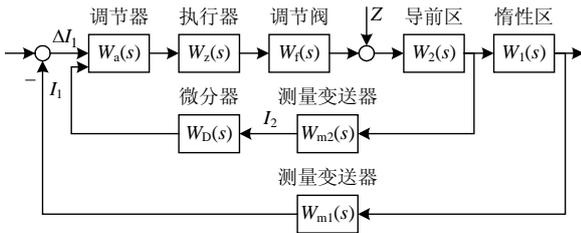


图 1 导前微分控制系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of lead differential control

导前微分控制系统中只有一个调节器，被控对象由导前区和惰性区组成，其中，导前区的延迟和惯性时间小，而惰性区的延迟和惯性时间大；内回路的反馈通道由微分器和测量变送器组成，通过调节微分环节的微分增益和惯性时间，可以减小惰性区被控对象的惯性，从而优化控制效果<sup>[21-23]</sup>。

导前微分回路根据导前信号随时间的变化率进行调节。在扰动作用下导前信号发生微小的变化量但变化率较大时，导前微分控制系统能够立即改变调节器输出的控制信号，实现对被控参数的调节。

### 2 导前微分控制在风水协同运行中的应用

风电场与水电厂协同运行是风电与水电的有机结合与调度，水电的快速调节能力可以跟踪调节、补偿风电输出功率的波动。控制水轮发电机的输出功率与风电功率进行互补的原理如图 2 所示。其中， $P_c$ 为并网期望功率； $P_w$ 为风电场输出功率； $P_h$ 为水轮机理想输出功率，其值为并网期望功率  $P_c$  与风电输出功率  $P_w$  之差； $P_g$ 为水轮机实际输出功率。

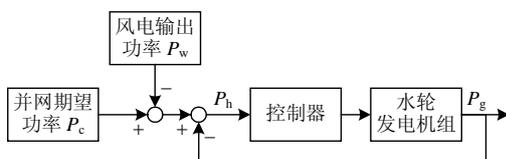


图 2 风水协同运行原理图

Fig. 2 Principle diagram of CHWG

含导前微分控制环节的风水协同运行系统原理图如图 3 所示。微分器的传递函数为  $W_D(s) = K_D T_D s / (1 + T_D s)$ ，其中  $K_D$  和  $T_D$  分别是微分增益和微分时间常数。

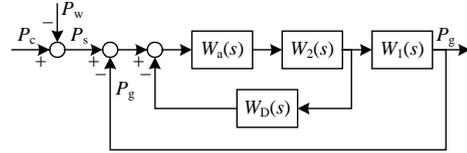


图 3 含导前微分控制环节的风水协同运行原理图

Fig. 3 Principle diagram of CHWG with lead differential control system

由图 3 可以看出，导前微分环节的引入使原系统新增了一个具有负实部的零点，不影响系统的稳定性。当原系统为稳定系统时，引入导前微分后的系统仍为稳定系统。

$W_a(s)$  为水轮机调速器的比例积分微分 (proportional-integral-derivative, PID) 调节模块，其动态特性为

$$\begin{cases} \frac{y_{PID}}{y_{in}} = K_P + \frac{K_D s}{T_I s + 1} + \frac{K_I}{s} \\ y_{in} = \Delta f' + e_p(p_c - p) \\ \Delta f = f_c - f \\ \Delta f' = \begin{cases} 0, & |\Delta f| < e_f \\ \Delta f - e_f, & \Delta f \geq e_f \\ \Delta f + e_f, & \Delta f \leq -e_f \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} K_P = \frac{T_d + T_n}{b_t T_d} \\ K_I = \frac{1}{b_t T_d} \\ K_D = \frac{T_n}{b_t} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$ 分别为比例增益、积分增益、微分增益； $y_{in}$ 为导叶接力器开度给定(标么值)； $y_{PID}$ 为 PID 调节输出的导叶接力器开度(标么值)； $p_c$ 和  $p$ 分别为功率给定和输出功率； $f_c$ 和  $f$ 分别为频率给定和输出频率； $\Delta f$ 为频差； $\Delta f'$ 为经过频率死区  $e_f$  后的频率偏差； $b_t$ 为暂态转差系数； $T_d$ 为缓冲时间常数； $T_n$ 为加速度时间常数。

$W_2(s)$ 为水轮机机械液压系统模块，特性为

$$\frac{y}{y_{PID}} = \frac{1}{T_y s + 1} \quad (3)$$

式中： $y$  为机械液压系统输出变量； $T_y$  为接力器响应时间常数，取值范围为 0.05~0.25 s。

$W_1(s)$  为水轮机及引水系统模块，其动态特性为

$$\frac{p}{y_{PID}} = \frac{1 - yT_w s}{1 + 0.5yT_w s} \quad (4)$$

式中： $T_w$  为水流惯性时间常数，取值范围为 0.5~4 s； $y$  为接力器导叶开度。

微分器  $W_D(s)$  整定方法有 2 种：其一称作补偿法，又称等效对象法，即将被控对象以及微分器部分化作等效对象，变成单回路进行整定；另一种方法是将导前微分控制系统化为串级控制系统，采用串级系统的整定方法进行整定。等效结构图如图 4、5 所示。

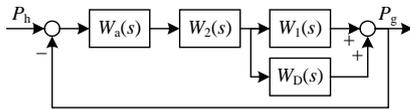


图 4 补偿法等效结构图

Fig. 4 Equivalent diagram using compensation method

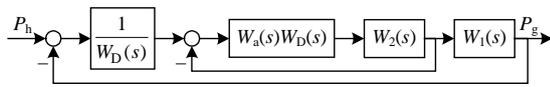


图 5 等效为串级系统结构图

Fig. 5 Equivalent diagram for the cascade system structure

### 3 算例分析

某风水协同系统水电厂装机容量为 220、180 MW，采用的仿真模型根据二滩电站水轮发电机组的模型参数搭建；风电场装机容量为 200、

200 MW，发电机为 1.5 MW 双馈感应风力发电机 (WPG-DFIG)，选定时段为日/24 h。建立如图 6 所示的采用导前微分控制的风水协同运行发电系统的功率闭环控制仿真模型，参数见表 1。

表 1 水电机组参数对照表

Tab. 1 Hydro turbine parameters

参数名称	参数取值范围	参数值
永态差值系数 $b_p$	0.03~0.06	0.05
$K_P$	0.5~20	2.4
$K_I$	0.05~10	0.5
$K_D$	0~5	0
接力器响应时间常数 $T_y$	0.05~0.25 s	0.25
水流惯性时间常数 $T_w$	0.5~4.0 s	1.2
机组惯性时间常数 $T_a$	3~12 s	8
机组综合自调节系数 $e_n$	0~2.0	1.3
导前微分增益 $K_D$	—	1.2
导前微分时间常数 $T_D$	—	0.6

#### 1) 阶跃信号仿真。

当风电机组输出功率在 50 s 时由 0.6 pu 降到 0.3 pu，在 100 s 时由 0.3 pu 升至 0.6 pu 时；对应的水电机组期望功率在 50 s 时由 0.4 pu 上升至 0.7 pu，在 100 s 时由 0.7 pu 下降到 0.4 pu。风电输出功率和水轮机组响应曲线分别如图 7、8 所示。

图 8 反映了使用常规 PID 控制和导前微分控制对水轮发电机组仿真后输出功率和导水叶开度的变化情况，水电能够在短时间内响应风电功率的变化，风电功率减小时，水轮机导水叶开度增加，其输出功率相应增加，与风电功率形成较好的互补效果。采用导前微分功率闭环控制系统运行，系统能在 20 s 内达到稳定并且超调小、响应快。

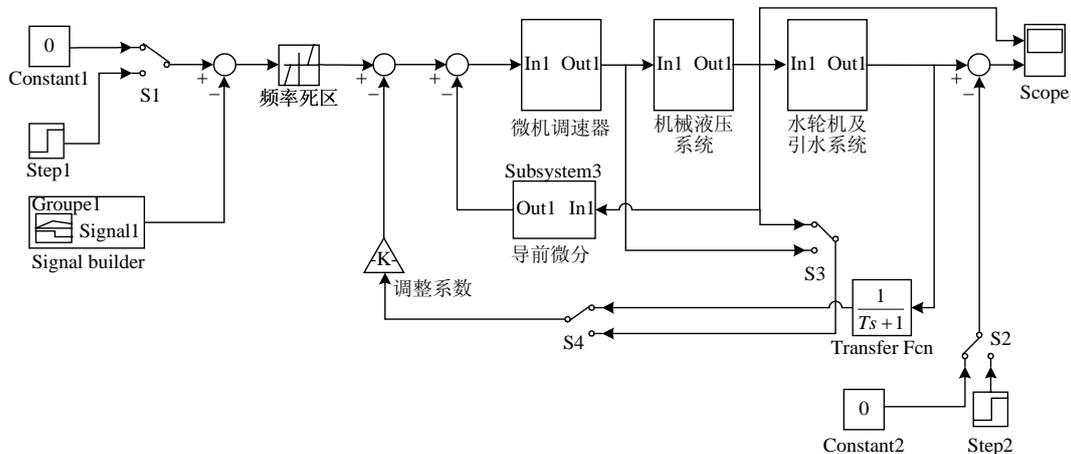


图 6 导前微分功率闭环控制系统结构模型

Fig. 6 Structure model of power closed loop lead differential control system

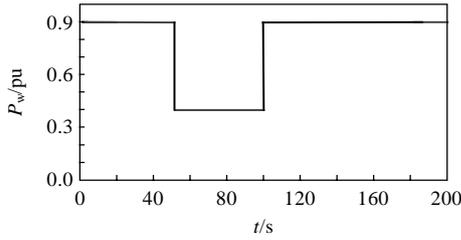


图7 风电功率曲线

Fig. 7 Wind power curve

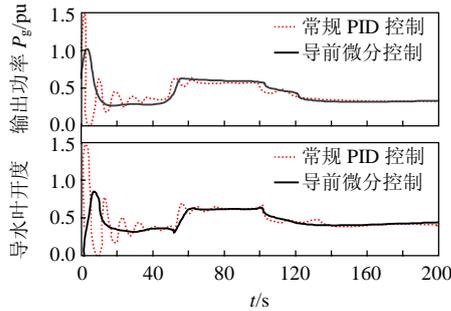


图8 水轮发电机组的阶跃响应曲线

Fig. 8 Step response curve of hydro-generator units

2) 斜坡信号仿真。

水轮机组输出功率对斜坡信号的追踪效果，对研究水电对风电波动性的补偿作用具有重要意义。考虑风电功率下降  $0.5 \text{ pu}$  (斜率为  $-0.0125^{-1} \text{ s}$ ) 和上升  $0.5 \text{ pu}$  (斜率为  $+0.0167^{-1} \text{ s}$ ) 两种情况，假设风电功率变化如图 9 所示；此时，水电机组响应曲线如图 10。可见，水电机组对风电功率的斜坡变化追踪

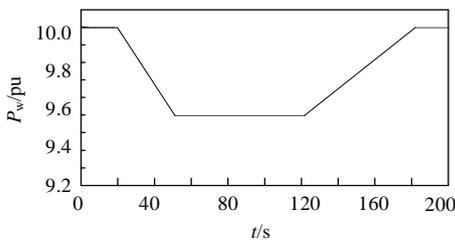


图9 风电功率曲线

Fig. 9 Wind power curve

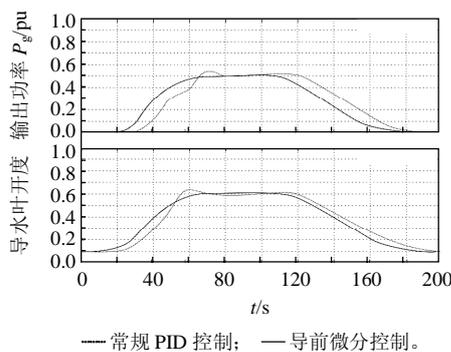


图10 水轮发电机组的斜坡响应曲线

Fig. 10 Ramp response curve of hydro-generator units

效果良好，导前微分控制比常规 PID 控制超调小，响应时间短。

3) 实际数据仿真。

研究时段选定为日，每日分为 96 个时段，每个时段 15 分钟。水电和风电的各时段功率如图 11 所示，其中变化较剧烈的 15:00—19:00 四小时的水电输出功率仿真曲线如图 12 所示。

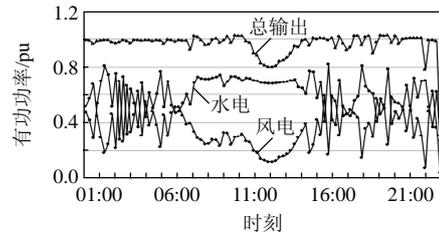


图11 某系统全天风电水电输出功率曲线

Fig. 11 One day wind power and hydroelectric power output of a CHWG system

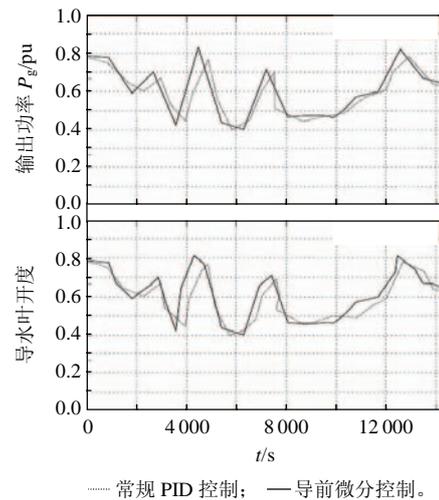


图12 四小时水轮发电机组仿真响应曲线

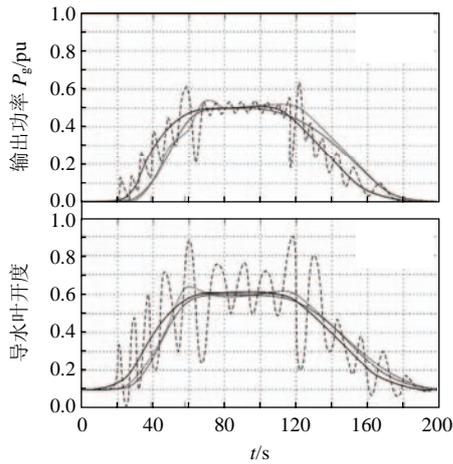
Fig. 12 Four hours hydro-generator units simulation response curve

水电机组很好地补偿了风电功率的变化；导前微分比常规 PID 的控制效果更好，超调小、响应时间短、跟踪快。

4) 微分器参数对控制系统的影响。

微分增益  $K_D$ 、微分时间常数  $T_D$  为导前微分回路的主要参数，以斜坡信号为例，说明微分器参数的变化对控制系统的影响。

图 13 为使用常规 PID 控制和导前微分控制，以及增大微分增益  $K_D$  和减小微分增益  $K_D$  后水轮机组的响应曲线。可见，按串级控制系统的分析方法，适当增加  $K_D$  可使主回路的稳定性提高，但主信号的动态偏差增大，同时副回路的稳定性下降；但



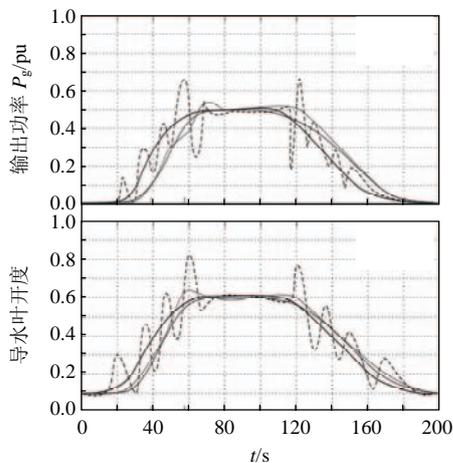
— 常规 PID 控制；— 导前微分控制；--- 增大  $K_D$ ；..... 减小  $K_D$ 。

图 13 微分增益  $K_D$  对系统的影响

Fig. 13 Influence of differential gain  $K_D$

$K_D$  过大则由于变化太快而由其自身引起振荡，使输出中产生明显的振荡或尖峰。

图 14 为使用常规 PID 控制和导前微分控制，以及增大微分常数  $T_D$  和减小微分常数  $T_D$  后水轮机组的响应曲线。可见， $T_D$  过小控制效果不明显，增大  $T_D$  可提高主回路的稳定性，减小超调，加快响应速度； $T_D$  过大则导致系统出现振荡。



— 常规 PID 控制；— 导前微分控制；--- 增大  $T_D$ ；..... 减小  $T_D$ 。

图 14 微分时间常数  $T_D$  对系统的影响

Fig. 14 Influence of differential time constant  $T_D$

## 4 结论

本文在分析风水协同运行产生的背景及研究意义的基础上，针对由于风速的波动性和间歇性导致的风电功率随机变化的情况，将风电并网的差额功率作为水轮发电机组的期望输出功率，通过在水轮发电机组的 PID 微机调速器基础上构建导前微分环节，实现对水轮发电机组的功率闭环控制，进而

达到当风电功率发生变化时，水电能快速跟踪补偿风电的波动。对阶跃信号、斜坡信号和实际数据下，水轮发电机组对风电波动的跟踪效果进行了仿真，并对比了传统 PID 控制与导前微分控制的效果，研究了微分器参数变化对控制系统的影响。得出以下结论：

1) 将风电并网差额功率作为水轮发电机组的期望输出功率，采用导前微分控制并联传统 PID 控制器，能够使水轮发电机组的输出功率跟踪风电功率的变化，实现利用水电功率平抑风电功率变化的功能。

2) 在风水协同运行系统的仿真对比图中，导前微分控制系统具有超调小、响应时间短、跟踪快速的特点，提高了水电机组的响应特性，有利于充分发挥风水协同运行的作用。

3) 增大导前微分环节的微分增益和微分时间，加快了系统的跟踪速度，有助于减小超调量，克服振荡，使系统趋于稳定；但如果微分作用过强，则由于变化太快而由其自身引起振荡，使调节器输出中产生明显的振荡或尖峰，改变  $K_D$  比改变  $T_D$  的影响更显著。因此，合理选取微分器参数可有效改善系统控制品质。

4) 本文的风水协同控制模型建立在风速可准确预测，且系统中只含有风电和水电的前提下。实际风速、风电功率的预测误差是客观存在的，后续研究应考虑风功率预测置信区间的选择对控制效果的影响，以及电力系统中其它电源的控制问题。本文采用了简化的水轮机线性模型，工程应用中水轮机的非线性和时滞特性对水轮机的控制品质影响较大，导前微分环节的参数会随运行方式的改变而变化，参数设置不当可能引起系统振荡，后续需对控制器参数进行鲁棒性优化设计。

## 参考文献

- [1] 王开艳, 罗先觉, 吴玲, 等. 清洁能源优先的风-水-火电力系统联合优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 27-35.  
Wang Kaiyan, Luo Xianjue, Wu Ling, et al. Optimal dispatch of wind-hydro-thermal power system with priority given to clean energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 27-35(in Chinese).
- [2] 于佳, 任建文, 周明. 基于机会约束规划的风-蓄联合动态经济调度[J]. 电网技术, 2013, 37(008): 2116-2122.  
Yu Jia, Ren Jianwen, Zhou Ming. A chance-constrained

- programming based dynamic economic dispatch of wind farm and pumped-storage power station[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(8): 2116-2122(in Chinese).
- [3] 李强, 袁越, 李振杰, 等. 考虑峰谷电价的风电-抽水蓄能联合系统能量转化效益研究[J]. *电网技术*, 2009, 33(6): 13-18.  
Li Qiang, Yuan Yue, Li Zhenjie, et al. Research on energy shifting benefits of hybrid wind power and pumped hydro storage system considering peak-valley electricity price[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(6): 13-18(in Chinese).
- [4] Miranda V, Hang P S. Economic dispatch model with fuzzy wind constraints and attitudes of dispatchers[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, 20(4): 2143-2145.
- [5] 周任军, 姚龙华, 童小娇, 等. 采用条件风险方法的含风电系统安全经济调度[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(1): 56-63.  
Zhou Renjun, Yao Longhua, Tong Xiaojiao, et al. Security economic dispatch in wind power integrated systems using a conditional risk method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(1): 56-63(in Chinese).
- [6] 张晓辉, 董兴华. 含风电场多目标低碳电力系统动态经济调度研究[J]. *电网技术*, 2013, 37(1): 24-31.  
Zhang Xiaohui, Dong Xinghua. Research on multi-objective scheduling for low-carbon power system with wind farms[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(1): 24-31(in Chinese).
- [7] 陈道君, 龚庆武, 张茂林, 等. 考虑能源环境效益的含风电场多目标优化调度[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(13): 10-17.  
Chen Daojun, Gong Qingwu, Zhang Maolin, et al. Multi-objective optimal dispatch in wind power integrated system incorporating energy-environmental efficiency[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(13): 10-17(in Chinese).
- [8] 刘静, 罗先觉. 处理梯级水电站复杂约束的短期水火电系统环境经济优化调度[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(14): 27-35.  
Liu Jing, Luo Xianjue. Short-term optimal environmental economic hydrothermal scheduling based on handling complicated constraints of multi-chain cascaded hydropower station[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(14): 27-35(in Chinese).
- [9] 李茜, 刘天琪, 李兴源. 大规模风电接入的电力系统优化调度新方法[J]. *电网技术*, 2013, 37(3): 733-739.  
Li Qian, Liu Tianqi, Li Xingyuan. A new optimized dispatch method for power grid connected with large-scale wind farms[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(3): 733-739(in Chinese).
- [10] Chen Q, Littler T, Wang H. Application of PMUs to coordinate hydroelectric and wind power plant operation[C]//*International Conference on Sustainable Power Generation and Supply(SUPERGEN 2012)*. 2012: 1-6.
- [11] 陈麒宇, Tim Littler, 王海风, 等. 风电水电协同运行计划的优化[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(34): 6074-6082.  
Chen Qiyu, Tim Littler, Wang Haifeng, et al. Optimal scheduling for coordinated wind and hydro power generation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(34): 6074-6082(in Chinese).
- [12] Chen Q, Tim Littler. Large-scale wind generator cascaded tripping[C]//*IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering*. 919-923.
- [13] Chen Q, Tim Littler, Wang H. Tripping control for transient stability in coordinated hydro and wind generation[C]//*IET International Conference on Renewable Power Generation Conference(RPG 2013)*. 2013: 1-4.
- [14] Chen Q, Tim Littler, Jiang W, et al. Offshore wind power impacts on the peak load regulation of power systems[C]//*IEEE General Meeting PES 2014*.
- [15] Liu X, Li Kang, Morrow D J, McLoone S. Principal component analysis of wide area phasor measurements for islanding detection: a geometric view[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, in press.
- [16] 方红庆, 陈龙, 李训铭. 基于线性与非线性模型的水轮机调速器 PID 参数优化比较[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(5): 100-106.  
Fang Hongqing, Chen Long, Li Xunming. Comparisons of optimal tuning hydro turbine governor PID gains based on linear and nonlinear mathematical models[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(5): 100-106(in Chinese).
- [17] 桂小阳, 梅生伟, 刘锋, 等. 水轮机调速系统的非线性自适应控制[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(8): 66-71.  
Gui Xiaoyang, Mei Shengwei, Liu Feng, et al. Adaptive nonlinear control for hydraulic turbine governor[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(8): 66-71(in Chinese).
- [18] 姜胜, 陈启卷, 蔡维由. 水轮机调速器参数仿真寻优策略[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(3): 102-106.  
Jiang Sheng, Chen Qijuan, Cai Weiyu. Simulation optimizing strategy for parameters of hdro-governor[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(3): 102-106(in Chinese).
- [19] Li K, Peng J, Irwin G. A fast nonlinear model identification method[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(8): 1211-1216.
- [20] 常乃超, 刘锋, 梅生伟, 等. 水轮机导叶开度的自适应

非线性输出反馈控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(17): 87-91.

Chang Naichao, Liu Feng, Mei Shengwei, et al. Adaptive nonlinear governor control of hydro-turbine generator sets[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(17): 87-91(in Chinese).

- [21] 田亮, 邓拓宇, 刘吉臻. 基于风量氧量热量信号导前微分协调控制系统[J]. 动力工程学报, 2011(10): 739-744. Tian Liang, Deng Tuoyu, Liu Jizhen. A guidance differential coordinated control system based on air-oxygen heat release signals[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011(10): 739-744(in Chinese).
- [22] 王琪, 刘鑫屏, 刘吉臻. 再热器减温水开环自适应高阶导前微分控制[J]. 华东电力, 2011(11): 1901-1905. Wang Qi, Liu Xinping, Liu Jizhen. Open loop self-adaptive high-order guidance differential control for reheater desuperheater water system[J]. East China Electric Power, 2011(11): 1901-1905(in Chinese).
- [23] Brooks, Key D, Felton T. Increasing the value of wind generation through integration with hydroelectric generation[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005: 1923-1925.



杨秀媛

收稿日期: 2015-03-29。

作者简介:

杨秀媛(1962), 女, 硕士, 副教授, 主要从事含新能源的电力系统分析与规划方面的研究, yangxy0912@163.com;

陈瑶(1991), 女, 硕士研究生, 主要从事新能源并网及自动化控制方面的研究, yao\_chen118@sina.com;

陈麒宇(1986), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源接入下的电力系统运行与控制, Qchen05@qub.ac.uk;

Tim Littler(1968), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统、风机及新能源接入、智能电网、电力系统分析、保护及稳定、数据可靠性及优化方法研究等;

李慷(1966), 男, 智能及控制系统首席教授, 博士生导师, 研究方向智能控制及其在电力系统中应用。

(责任编辑 张玉荣)