

基于 MPC 的风燃协调滚动调度运行策略

张建新¹, 李中豪², 张沛超²

(1. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437; 2. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 提出了一种基于模型预测控制(MPC)原理的大型风电场与燃气-蒸汽联合循环机组的滚动调度策略。该方法在考虑联合循环机组运行约束条件下,以等效电厂的经济最优为目标。首先介绍了燃气-蒸汽联合循环机组的结构和工作原理,以及风燃协调等效电厂的概念。然后根据联合循环机组的运行状态及起停过程建立了数学模型,并在该数学模型的基础上,同时考虑风电场弃风,以风燃协调等效电厂的整体经济性最佳为目标,提出一种基于模型预测控制的新型风燃协调滚动调度运行策略。仿真结果表明新方法使得等效电厂在跟踪调度曲线的基础上,实现风燃协调等效电厂的经济最优控制。

关键词: 风力发电; 燃气-蒸汽联合循环机组; 模型预测控制

A MPC-based rolling dispatch strategy of the wind-gas coordinated system

ZHANG Jianxin¹, LI Zhonghao², ZHANG Peichao²

(1. Electric Power Research Institute, SMEPC, Shanghai 200437, China; 2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education (Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University), Shanghai 200240, China)

Abstract: A rolling dispatch strategy of the wind farm and gas-steam combined cycle power plant (CCPP) coordinated system based on model predictive control (MPC) method is proposed. Considering the constraints of CCPP, this strategy aims to optimize the power generation in the coordinated system. Firstly, the structure and working principle of CCPP and the concept of wind-gas coordinated equivalent power plant (WGPP) are introduced. Secondly, considering the working state, start-up and shut-down process of CCPP, a mathematical model of CCPP is established. Based on this model and considering the wind power curtailment, a MPC-based rolling dispatch strategy of wind-gas coordinated system is proposed in order to maximize the benefit of WGPP. Finally, the simulation results demonstrate that the new strategy can not only make WGPP track the dispatch targets, but also optimize the power generation in WGPP.

Key words: wind power generation; gas-steam combined cycle power plant; model predictive control

0 引言

为了应对传统能源的快速消耗以及日益严峻的环境问题,以风能为代表的绿色可再生能源在世界范围内得到了迅猛的发展^[1]。然而,相比于常规能源发电,风能的波动性特征使其难以调度。为了应对风电的间歇性,电网调度不得不保留较大的旋转备用和自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)调节备用,从而增大了发电成本。所以,在风

电大规模接入的背景下,使风电场具备“拟常规电源”调度能力是一项具有重要意义的研究课题。

目前调节风电场并网有功功率的方法主要有两类:一是控制风机的运行状态以调节其输出^[2],但是这种方法需要损失一部分风能,且在风功率波动较大时的调节效果有限;二是利用可控电源或储能设备与风电构成互补^[3-4]。其中,由于储能的安装成本依旧很高,这使得大型的“风储协调”调度在现阶段仍不具有经济性。针对风电存在的可调度能力差的问题,文献[5-6]采用风火电“打捆”外送的有功协调控制策略,实现风电外送断面不越稳定限额的目标;文献[7]提出了包含“风火协调层”在内

的多时空尺度分层协调优化运行体系, 使联络线交换功率特性满足外部调度运行需求。文献[8]研究了风火打捆直流外送系统的安全稳定和控制问题, 制定了改善系统稳定性的交直流协调控制策略。文献[9]提出了以对电网贡献度为标准的利润分配模型, 引导风电与火电参与联合外送。然而, 由于常规火电机组有功功率调节速度有限, 当风电功率波动较大时, 仅利用风火打捆难以满足电网调度需求^[10]。

燃气-蒸汽联合循环电厂(Gas-steam Combined Cycle Power Plant, CCPP)较之常规火电厂, 不但具备优良的起停性能和快速的出力调节能力, 而且效率高、污染少。据此, 文献[11]提出了将区域内的风力和燃气两种清洁能源打捆输出的“风燃协调等效电厂”(Wind-gas coordinating equivalent power plant, WGPP)概念, 并对其 AGC 控制策略进行了研究。

本文在文献[11]的基础上, 研究了 WGPP 的经济调度问题。论文首先建立了 CCPP 机组的运行状态方程, 然后在模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)的框架下, 建立了等效电厂经济调度目标函数, 并利用混合整数规划(Mixed-Integer Linear Programming, MILP)方法完成问题求解。

1 风燃协调等效电厂的滚动调度

文献[11]提出了“风燃协调等效电厂”(Wind-Gas Coordinating Equivalent Power Plant, WGPP)的概念, 并将其定义为: 将某区域内的所有风电场、燃气电厂以及本地负荷聚合为一个等效电厂, 通过风、燃两种清洁能源的协调运行, 达到减少风电功率波动、提高能源利用效率的目的, 并使之作为一个整体参与电网的调度与运行, 实现可再生能源的拟常规电源调度^[11]。从电网的角度, WGPP 作为一个整体有效减少了控制变元的数量、降低了调度的复杂性。

根据日前计划给出的调度曲线, 文献[11]提出了 WGPP 的两种 AGC 控制策略, 验证了通过风燃协调实现 WGPP 功率偏差控制的可行性。在此基础上, 本文进一步研究了 WGPP 的经济调度策略。为了制定 CCPP 机组的起停机计划以及应对风功率预测误差等问题, 本文采用了滚动调度策略^[12], 以优化 WGPP 内风、燃出力, 对 AGC 机组的基点功率进行修正, 并提高 WGPP 对日前计划的跟踪效果。滚动调度属于超前调度(look-ahead dispatch)^[13], 与日前计划、AGC 等构成了彼此协调的多个时间尺度的有功调度手段, 其相互关系如表 1 所示。

表 1 不同时间尺度的有功调度^[13]

Table 1 Power control systems with multiple time scales^[13]

调度类型	计算周期	调度时段	分辨率	调度目标
日前计划	1 d	1 d	15 min	考虑安全约束的机组组合
滚动调度	1 h	4 h	15 min	基于滚动优化的经济调度
AGC	10 s	10 s	10 s	系统频率和联络线交换功率偏差控制

2 CCPP 建模

2.1 CCPP 运行状态

CCPP 机组在联合循环方式下有 4 种运行状态: 停运状态、起机过程、联合运行和停机过程。这 4 种状态只能按照上述顺序进行状态转移。例如, 处于停运状态的机组不能直接满发功率, 必须经过起机过程逐步将输出功率抬升。同样的, 处于运行状态的机组也需要经过停机过程, 逐步降低输出功率直至零输出, 才能到达停运状态。

在进行风燃协调优化调度中, 如果对 CCPP 机组的上述起停和运行过程进行详细建模, 会给在线优化带来很大的计算量。已有研究多采用 MILP 的思想^[14-15]对 CCPP 机组进行建模, 在满足工程应用的前提下, 极大地简化了建模过程、减小了计算量。借鉴文献[15]的建模方法, 本文设置了 3 个 0/1 状态变量, 以表示 CCPP 机组的 4 个运行状态, 如表 2 所示。

表 2 CCPP 机组 0/1 状态变量声明

Table 2 Declarations of 0/1 state variables of CCPP unit

状态变量名称	含义
X	开始起机状态变量
Y	起机及运行状态变量
Z	开始停机状态变量

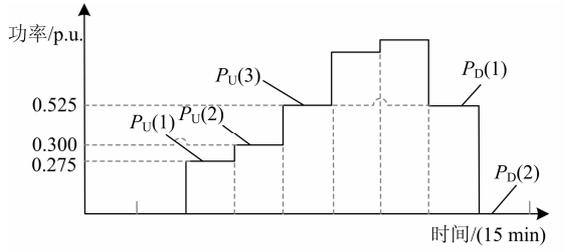
在图 1 中, 时段 1-2, 3-5, 6-7 和 8-9 分别为 CCPP 机组的停运、起机、运行和停机过程。在本文中, CCPP 的起、停机输出功率被近似为呈阶梯型上升和下降形状的固定轨迹, 起、停机轨迹中每一个功率点都维持 15 min。

由图 1 可以导出

$$S(k) = Y(k) - X(k) - X(k-1) - X(k-2) \quad (1)$$

$$W(k) = 1 - Y(k) - Z(k) \quad (2)$$

式中: k 为控制时域内的时间序列, 间隔为 15 min; S 和 W 分别为 CCPP 运行和停运的状态变量。当 CCPP 处于运行状态时, $S=1$, 否则 $S=0$; 当其处于停运状态时, $W=1$, 否则 $W=0$ 。



时段	1	2	3	4	5	6	7	8	9
X	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Y	0	0	1	1	1	1	1	0	0
Z	0	0	0	0	0	0	0	1	0
运行状态	停运		起机			运行		停机	

图1 CCPP 运行状态变量对应图

Fig. 1 State variable diagram of CCPP unit

2.2 CCPP 运行约束

(1) CCPP 的输出功率约束

CCPP 机组的起、停过程应遵循图 1 所示的功率变化轨迹, 运行时输出功率应满足上下限约束。

$$P_g(k) \geq P_{su}(k) + P_{sd}(k) + S(k)P_{min} \quad (3)$$

$$P_g(k) \leq P_{su}(k) + P_{sd}(k) + S(k)P_{max} \quad (4)$$

式中: P_g 为 CCPP 机组出力; P_{max} , P_{min} 分别为 CCPP 机组处于运行状态时的输出功率上下限值; P_{su} , P_{sd} 分别为 CCPP 机组的起、停机功率。

$$P_{su}(k) = X(k)P_U(1) + X(k-1)P_U(2) + X(k-2)P_U(3) \quad (5)$$

$$P_{sd}(k) = Z(k)P_D(1) + Z(k-1)P_D(2) \quad (6)$$

式中, P_U , P_D 分别为遵循起停机轨迹的 CCPP 输出功率, 具体数值如图 1 所示。

(2) CCPP 机组运行状态约束

$$X(k) - Z(k) = Y(k) - Y(k-1) \quad (7)$$

$$Y(k) \geq X(k) + X(k-1) + X(k-2) \quad (8)$$

$$Y(k) \geq Z(k+1) + Z(k+2) \quad (9)$$

$$Y(k) + Z(k) \leq 1 \quad (10)$$

上述运行状态约束使得 X, Y, Z 的参数组合只能出现图 2 中所示的 4 种状态, 并且这些状态只能按照 2.1 节所确定的循环顺序进行状态转移。

(3) 运行过程中的机组爬坡率约束

$$R_D \leq P_g(k) - P_g(k-1) \leq R_U \quad (11)$$

其中, R_U , R_D 分别为 CCPP 机组爬坡率上下限。

(4) 最小运行时间和最小停运时间约束

$$\sum_{i=k}^{k+1} S(i) \geq 12[S(k) - S(k-1)] \quad (12)$$

$$\sum_{i=k}^{k+1} W(i) \geq 12[W(k) - W(k-1)] \quad (13)$$

本文设置最小运行和最小停运时间均为 3 h^[15]。

3 基于 MPC 的风燃协调滚动调度策略

本文基于 MPC^[16] 原理, 利用风电及负荷的预测结果, 通过在每一个采样周期在线求解一个有限时域的开环最优控制问题^[17], 获得各电源的优化出力。本文将 MPC 方法引入风燃协调经济调度中, 是基于如下 3 个方面的考虑。首先, 本文在优化过程中需考虑式(1)一式(13)所示的多约束条件, 而 MPC 的突出优点是能够在整个预测时域内显式地处理上述约束条件; 其次, 由于风电预测误差具有随着时间增长而增大的特性, 而 MPC 具备滚动优化的特征, 可以不断地校正风功率预测误差; 最后, 将整个优化过程放到预测时域内进行, 有利于等效电厂建立基于较长时间区间的整体利益的最优决策, 并更好地考虑诸如机组起停机等跨多个控制周期的过程。

3.1 MPC 参数配置

本文采用分辨率为 15 min 的超短期风电功率及负荷预测。相应的, 设置 MPC 的基本参数如下:

(1) 采样周期 $T_s = 15$ min。WGPP 每隔 15 min 接收一次未来 4 h 分辨率为 15 min 的风电功率以及负荷预测数据。WGPP 控制周期 $\Delta T = T_s$ 。

(2) 预测时域 M 。预测时域 M 越大, MPC 考虑的经济性所涵盖的时间范围就越广, 也就越能体现 MPC 前瞻性的优势, 但是 M 的增大会增加 MPC 目标函数的复杂性, 这需要更长的最优化求解时间, 本文选取优化时域 $M = 4 \text{ h} / 15 \text{ min} = 16$ 。

3.2 MPC 目标函数

在风电利用中既要考虑环境效益, 还要考虑风电的随机性给电网的安全与经济运行所带来的负面影响^[18-20]。因此, 本文在建立经济调度模型时允许风电场合理弃风。整个 WGPP 的优化目标函数为

$$\max J = J_r - J_o - J_{su} - J_{sd} - J_p - J_{cu} \quad (14)$$

式中: J_r 为 CCPP 售电收入; J_o 为 CCPP 运行费用; J_{su} 为 CCPP 起机费用; J_{sd} 为 CCPP 停机费用; J_p 为 WGPP 出力偏差惩罚费用; J_{cu} 为风电场弃风费用。

$$J_r = \lambda_r \times \sum_{k=k_0}^{k_0+M} P_g(k) \times \Delta T \quad (15)$$

$$J_o = \sum_{k=k_0}^{k_0+M} \lambda_A \times (Y(k) + Z(k)) \times \Delta T + \lambda_B \times P_g(k) \times \Delta T \quad (16)$$

$$J_{su} = \lambda_{su} \times X(k) \quad (17)$$

$$J_{sd} = \lambda_{sd} \times Z(k) \quad (18)$$

$$J_p = \lambda_p \sum_{k=k_0}^{k_0+M} |P_g(k) + P_w(k) - P_{cu}(k) - P_{load}(k) - P_{dispatch}(k)| \quad (19)$$

$$J_{cu} = \lambda_w P_{cu} \quad (20)$$

式中: λ_r 为 CCPP 售电价格; λ_s 为旋转备用售价; λ_A 为 CCPP 固定运行费用; λ_B 为燃料费用; $\lambda_{su}, \lambda_{sd}$ 为 CCPP 起停机费用系数; λ_p 是出力偏差惩罚电价; λ_w 是风电价格; k_0 为当前 MPC 优化时刻; P_{rate} 为 CCPP 额定功率; P_w 为原始风功率; P_{cu} 为弃风功率; P_{load} 为负荷; $P_{dispatch}$ 为调度曲线功率。

由式(14)可见, 本文的优化目标为: 在给定的 WGPP 调度计划曲线条件下, 通过合理安排 CCPP 机组的起停机计划, 以及协调 CCPP 机组与风电场的出力, 实现 WGPP 收益的最大化。WGPP 的收益兼顾了多个方面的利益。其中, $J_r - J_o - J_{su} - J_{sd}$ 为 CCPP 机组的收益, 与 J_{cu} 共同保障了 WGPP 自身的利益; J_p 用于提高 WGPP 整体出力的可调度性, 从而保障电网的经济性与安全性; J_{cu} 旨在保障全社会的环境效益。通过改变出力偏差惩罚电价 λ_p , 可以调节上述各方的利益。

4 仿真验证

以上海市崇明岛电网为例对本文提出的风燃协调滚动调度策略进行验证。仿真模型中包含一座额定功率为 400 MW 的 CCPP 电厂、两座额定功率分别为 60 MW 和 48 MW 的风电场, 上述电源通过联络线和外部电网相连。系统结构如图 2 所示。

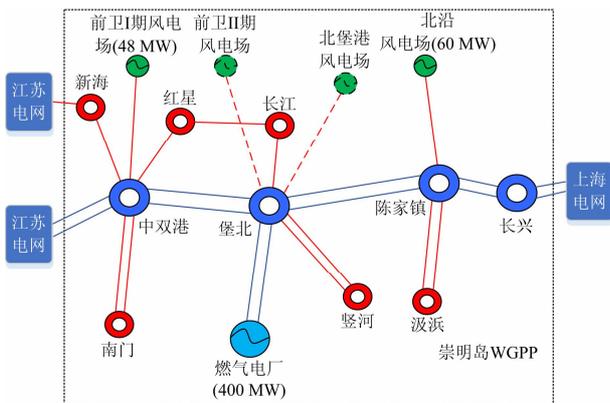


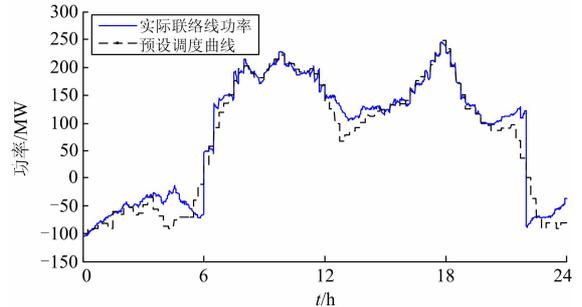
图 2 崇明岛电网系统

Fig. 2 Power system of Chongming Island

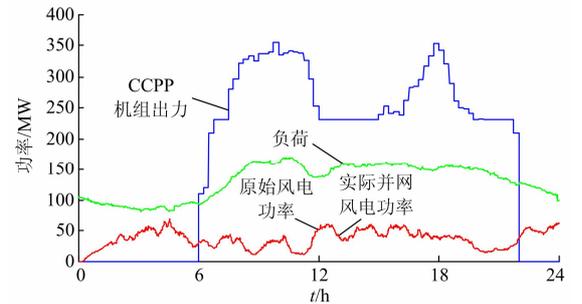
根据预测误差随预测时长增大的特点, 在 MPC 预测时域内设置了 5%~15% 的随机风电和负荷预测误差。燃气电厂售电价格为 0.6 元/kWh^[21], CCPP 机组起停费用参考文献[15]; 考虑 CCPP 的运行费用, 其发电收益为 0.0875 元/kWh^[15]。风电售价为 0.56 元/kWh^[22]。因 WGPP 出力偏差惩罚电价会影

响优化结果, 故本文选取 2 个场景来分析优化控制效果。

场景 1: 将 WGPP 出力偏差惩罚电价设定为 0.45 元/kWh, 低于风电场售电价格。联络线功率的追踪情况以及各电源的输出功率情况见图 3。



(a) 联络线功率跟踪情况



(b) 各电源和负荷情况

图 3 场景一控制方法的效果

Fig. 3 Effect of control method in situation 1

由图 3(a)可见, WGPP 对外交换功率整体上可以跟踪调度曲线, 但某些时段的跟踪效果并不理想。例如, 在 0:15—6:45 和 9:45—24:00 时段, CCPP 分别处于停运-起机和停机-停运的状态, 具有固定的输出功率轨迹; 在 12:30—13:15 时段, CCPP 已经处于其输出功率下限, 但由于风电售价高于 WGPP 出力偏差惩罚电价, 风电场始终处于满发状态, 这导致在这些时段联络线功率不能完全跟踪调度曲线。

由图 3(b)可见, MPC 算法综合 WGPP 未来调度曲线的走势以及风电、负荷的预测结果, 给出了最优的 CCPP 机组起停机时刻。例如, 从 6:00 开始, WGPP 的调度曲线开始上升, 并在此后一段时间处于较高的值。因此, CCPP 机组起机参与等效电厂调度。同样, 在 22:00, WGPP 的调度曲线开始下降, 并长时间处于低值, 因此 CCPP 机组开始停机。

场景二: 将 WGPP 出力偏差惩罚电价设定为 0.6 元/kWh, 高于风电场售电价格。联络线功率的追踪情况以及各电源的输出功率情况如图 4 所示。

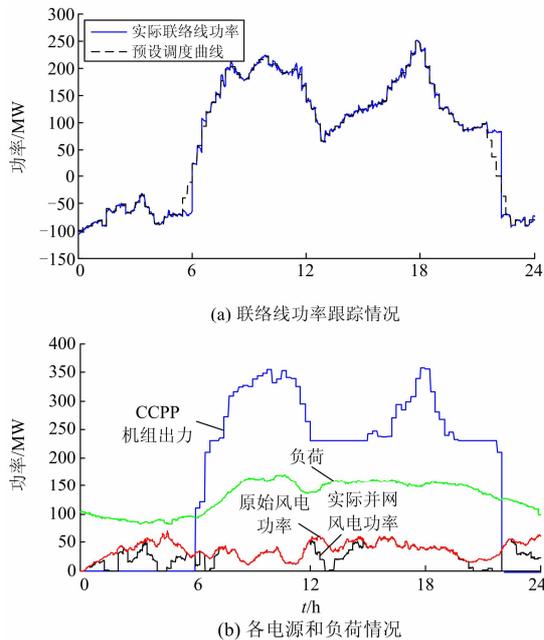


图 4 场景二控制方法的效果

Fig. 4 Effect of control method in situation 2

对比图 3(a)与图 4(a)可见,图 4(a)中联络线功率的跟踪情况有了明显改善。从图 4(b)可见,由于 WGPP 出力偏差惩罚电价高于风电售价,因此在多个时段,风电场采用合理弃风手段参与 WGPP 的调度过程,从而提高了联络线功率的跟踪效果。

本文旨在验证 WGPP 的可调度性与可计划性,故调度曲线是依据日前计划给出的。风电和负荷预测误差的存在,使得 WGPP 对外联络线交换功率依然存在控制偏差。但根据 MPC 原理,在每一个调度周期内,只有优化序列中的第一个结果被执行,从而滚动修正预测误差。在此过程中,AGC 机组的基点功率被不断更新。

基于上述仿真结果,可以根据 WGPP 接入系统的不同,采取不同的定价方法。当 WGPP 接入到小系统时,应将出力偏差惩罚电价定得高于风电售价,通过合理弃风,以达到较好的联络线交换功率的跟踪效果,提高整个互联系统的稳定性;而当 WGPP 接入到大系统时,应将出力偏差惩罚电价定得低于风电售价,从而提高风电消纳率。

5 结论

(1) 本文在“风燃协调等效电厂”概念的基础上,进一步研究了等效电厂的经济调度运行策略。通过等效电厂内风、燃两种清洁能源的协调运行,实现对外作为拟常规电源参与电网调度、对内优化各电源出力分配的目标。

(2) 本文综合考虑了 CCPP 机组起停、出力调节以及风电场合理弃风等多种调控手段,并利用基于 MPC 的滚动调度方法进行经济调度。优化目标中兼顾了等效电厂、电网等多方面的利益。

(3) 优化结果与出力偏差惩罚电价有关。可以根据接入系统对风电的不同消纳能力设置惩罚电价,从而达到不同的调控目的。

参考文献

- [1] 郭晓蕊, 王珂, 杨胜春, 等. 计及风电时空互补特性的互联电网有功调度与控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 139-144.
GUO Xiaorui, WANG Ke, YANG Shengchun, et al. Active power scheduling and control scheme for interconnected power grids considering time-space complementary characteristics of wind energy[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 139-144.
- [2] 韩兵, 周腊吾, 陈浩, 等. 大型风机的独立变桨控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 1-8.
HAN Bing, ZHOU Lawu, CHEN Hao, et al. Methods of individual pitch control for large wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 1-8.
- [3] 卢芸, 赵永来. 基于模糊神经网络风电混合储能系统优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 113-118.
LU Yun, ZHAO Yonglai. Optimal control in a wind power hybrid energy storage system based on fuzzy neural network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 113-118.
- [4] 贺建波, 胡志坚, 刘宇凯. 大规模多目标水-火-风协调优化调度模型的建立及求解[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 1-7.
HE Jianbo, HU Zhijian, LIU Yukai. Establishment and solution of the large-scale multi-objective hydro-thermal-wind power coordination optimization dispatching model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 1-7.
- [5] 陈振寰, 陈永华, 行舟, 等. 大型集群风电有功智能控制系统控制策略(二) 风火电“打捆”外送协调控制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 12-15.
CHEN Zhenhuan, CHEN Yonghua, XING Zhou, et al. A control strategy of active power intelligent control system for large cluster of wind farms part two coordination control for shared transmission of wind power and thermal power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 12-15.
- [6] 徐帆, 王颖, 杨建平, 等. 考虑电网安全的风电火电协调优化调度模型及其求解[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 114-120.
XU Fan, WANG Ying, YANG Jianping, et al. Generation scheduling model and application for wind-thermal power system considering security constraints[J]. Automation of

- Electric Power Systems, 2014, 38(21): 114-120.
- [7] 叶希, 鲁宗相, 乔颖, 等. 风火联运源端系统有功优化运行分层协调思路[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 1-8.
YE Xi, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. Hierarchical coordinated idea of wind and thermal power bundled transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 1-8.
- [8] 郭小江, 马世英, 申洪, 等. 大规模风电直流外送方案与系统稳定控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 107-115.
GUO Xiaojiang, MA Shiying, SHEN Hong, et al. HVDC grid connection schemes and system stability control strategies for large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 107-115.
- [9] 谭忠富, 宋艺航, 张会娟, 等. 大规模风电与火电联合外送体系及其利润分配模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(23): 63-70.
TAN Zhongfu, SONG Yihang, ZHANG Huijuan, et al. Joint delivery system of large-scale wind power and thermal power generation and its profit distribution model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(23): 63-70.
- [10] 董博, 许晓艳, 马烁, 等. 基于长过程动态仿真的风电接入对系统频率控制影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 57-64.
DONG Bo, XU Xiaoyan, MA Shuo, et al. Influence study of wind power on system frequency control based on long-term dynamic simulation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 57-64.
- [11] 李中豪, 黄屹俊, 张沛超, 等. 大型风燃协调等效电厂的自动发电控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 44-50.
LI Zhonghao, HUANG Yijun, ZHANG Peichao, et al. A study about the automatic generation control strategy of large scale wind-gas coordinating equivalent power plant[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 44-50.
- [12] 沈伟, 吴文传, 张伯明, 等. 消纳大规模风电的在线滚动调度策略与模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 136-140.
SHEN Wei, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. An on-line rolling generation dispatch method and model for accommodating large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 136-140.
- [13] LI Zhigang, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Adjustable robust real-time power dispatch with large-scale wind power integration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(2): 357-368.
- [14] FERRARI-TRECCATE G, GALLESTEY E, LETIZIA P, et al. Modeling and control of co-generation power plants: a hybrid system approach[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004, 12(5): 694-705.
- [15] ARROYO J M, CONEJO A J. Modeling of start-up and shut-down power trajectories of thermal units[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1562-1568.
- [16] 席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制——现状与挑战[J]. 自动化学报, 2013, 39(3): 222-236.
XI Yugeng, LI Dewei, LIN Shu. Model predictive control—status and challenges[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(3): 222-236.
- [17] 陈建华, 吴文传, 张伯明, 等. 消纳大规模风电的热电联产机组滚动调度策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(24): 21-27, 48.
CHEN Jianhua, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A rolling generation dispatch strategy for co-generation units accommodating large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(24): 21-27, 48.
- [18] 翁振星, 石立宝, 徐政, 等. 计及风电成本的电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 514-523.
WENG Zhenxing, SHI Libao, XU Zheng, et al. Power system dynamic economic dispatch incorporating wind power cost[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 514-523.
- [19] 董晓天, 严正, 冯冬涵, 等. 计及风电出力惩罚成本的电力系统经济调度[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 76-80.
DONG Xiaotian, YAN Zheng, FENG Donghan, et al. Power system economic dispatch considering penalty cost of wind farm output[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 76-80.
- [20] 刘新东, 方科, 陈焕远, 等. 利用合理弃风提高大规模风电消纳能力的理论研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 35-39.
LIU Xindong, FANG Ke, CHEN Huanyuan, et al. Research on rational wind power casting theory for large-scale wind power integration improvement[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 35-39.
- [21] 国家发展改革委. 关于规范天然气发电上网电价管理有关问题的通知[Z]. 2014.
- [22] 国家发展改革委. 关于适当调整陆上风电标杆上网电价的通知[Z]. 2014.

收稿日期: 2015-11-10; 修回日期: 2016-05-03

作者简介:

张建新(1985-), 男, 硕士, 主要研究方向为新能源接入和网源协调; E-mail: zhangjx2003@163.com

李中豪(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统仿真、分布式发电; E-mail: zhonghao0303@163.com

张沛超(1970-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统保护与控制、智能变电站、电力系统仿真。E-mail: pczhang@sjtu.edu.cn

(编辑 周金梅)