

DOI: 10.7667/PSPC150667

# 大型风燃协调等效电厂的自动发电控制策略研究

李中豪<sup>1</sup>, 黄屹俊<sup>1</sup>, 张沛超<sup>1</sup>, 季珉杰<sup>1</sup>, 方陈<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 国网上海电力公司电力科学研究院, 上海 200437)

**摘要:** 以崇明岛智能电网为例, 提出了风燃协调等效电厂(wind-gas coordinating equivalent power plant, WGPP)的概念。通过风力发电系统与燃气-蒸汽联合循环机组(CCPP)的互补运行, 实现提高并网功率的可控和可调性, 以及风燃联合发电作为一个等效电厂参与系统的调度运行等目标。针对 WGPP 的调度目标以及接入系统规模的不同, 提出了两种不同的 WGPP 调度模式: 跟踪调度曲线模式和 CPS 控制模式。为了充分利用 WGPP 中 CCPP 机组出力调节速度快的特点, 对基于传统比例积分原理的自动发电控制算法进行了改进。最后, 分别以现场实测数据以及四种风电功率事件为例, RTDS 仿真验证了两种 WGPP 调度模式的可行性。

**关键词:** 风力发电; 燃气-蒸汽联合循环机组; 比例积分控制; 自动发电控制; 控制性能指标

## A study about the automatic generation control strategy of large scale wind-gas coordinating equivalent power plant

LI Zhonghao<sup>1</sup>, HUANG Yijun<sup>1</sup>, ZHANG Peichao<sup>1</sup>, JI Minjie<sup>1</sup>, FANG Chen<sup>2</sup>

(1. Department of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;  
2. State Grid Electric Power Research Institute, SMEPC, Shanghai 200437, China)

**Abstract:** Taking the power system of Chongming Island as an example, a concept of wind-gas coordinating equivalent power plant (WGPP) is proposed. This concept applies the method of integrating the wind farm and gas-steam combined cycle power plant (CCPP), which makes the grid-connected power controllable, and make WGPP participate in the system schedule as an equivalent power plant. Then, according to different scheduling targets and connected systems' scales, two different scheduling modes are proposed: scheduling track mode and CPS control mode. In order to take full advantage of CCPP's performance characteristics, the automatic generation control (AGC) algorithm based on traditional PI principle is modified. Finally, the RTDS simulation results using field test data and four types of wind events validate the feasibility of the two different scheduling modes.

This work is supported by National Science and Technology Support Program of China (No. 2013BAA01B04).

**Key words:** wind farm; gas-steam combined cycle units; proportional plus integral controller; automatic generation control; control performance standard

## 0 引言

风电以其资源丰富、分布广泛、清洁环保等特点在世界范围内得到了迅猛的发展。然而, 随着电网中风电渗透率的不断提高, 风电的波动性、随机性给电网运行带来的不利影响日趋严重<sup>[1-2]</sup>。目前解决风电功率波动性的方法主要有两类: 一是控制风机的运行状态以平滑其输出<sup>[3]</sup>, 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平滑效果有限; 二是利用可控电源或储能设备与风电构成互补<sup>[1,4]</sup>, 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在现阶段仍不具有经济性。针对风电存在的间断性、反调峰等问题, 文献[5]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、减小线路功率波动、优先利用风能资源以及充分利用输电通道等目标; 文献[6]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。然而, 由于常规火电机组有功

**基金项目:** 国家科技支撑计划课题(2013BAA01B04); 国家电网公司科技项目(520940140021)

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维持联络线交换功率的稳定<sup>[7]</sup>。此时, 如能利用一种调节性能更优且清洁的可控电源与风电场互动, 则可以构成风电功率稳定送出的理想方案。

燃气-蒸汽联合循环电厂(Gas-Steam Combined Cycle Power Plant, CCPP)具有高效率、低污染、低水耗、启动快、大容量等特点。CCPP 机组由燃气轮机、蒸汽机、余热锅炉以及发电机等四部分组成, 其机组效率可以达到 60%左右<sup>[8]</sup>, 明显高于常规燃煤机组。除了具有效率高、环境污染少等优点, CCPP 机组还具有优良的负荷调节性能, 其理论变负荷速率可以达到 10%MCR/min(MCR, 最大连续出力), 在实际应用中可以达到5%MCR/min, 远优于常规燃煤机组 2%MCR/min 的调节特性, 仅次于水电机组<sup>[8]</sup>。在未来智能电网中, 这种调节能力对于平滑风能等可再生能源的波动性具有重要作用。

从国家层面上, 加强天然气的开采与应用、发展绿色低碳技术和循环技术已成为我国的重要国策。预计到 2020 年, 我国天然气工业可以为 1.6 亿 kW 的 CCPP 机组提供足够的燃料<sup>[9]</sup>。发展联合循环对于调整国家能源结构有着非常重要的意义。

在这样的背景下, 本文以上海崇明岛智能电网示范工程为例, 提出了风燃协调等效电厂(Wind-Gas Coordinating Equivalent Power Plant, WGPP)的概念; 针对不同的控制目标, 提出了两种适用于 WGPP 的自动发电控制(AGC)模式, 并分别定义了控制效果的评价指标; 为了改善 WGPP 跟踪调度曲线的能力, 本文还对 AGC 算法中的比例积分(PI)环节进行了改进。

## 1 崇明岛风燃协调等效电厂(WGPP)

本文将 WGPP 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。

由上述定义可见, WGPP 与风火打捆既有相似的技术需求, 如减少线路功率波动, 又有其特有的内涵。下面以图 1 所示的崇明岛 WGPP 为例, 说明 WGPP 的技术特征。

(1) WGPP 本身由电源和负荷构成, 其所在电网具有相对独立性, 并在整体上通过对外联络线接入大电网。以崇明岛为例, 崇明电网属于海岛电网, 地理位置相对独立。崇明岛风力资源丰富, 目前已

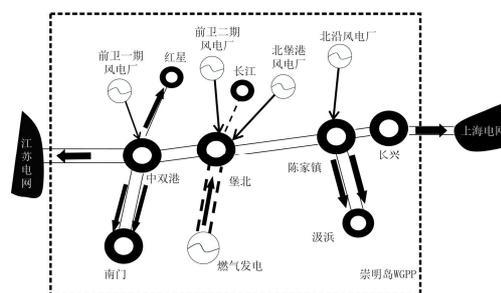


图 1 崇明岛风燃等效电厂结构示意图

Fig. 1 Structure of WGPP in the Chongming Island

有两座大型风电场投运。至 2015 年底, 大型风电场将达四座, 总装机容量为 203 MW。崇明岛电网通过 220 kV 联络线分别接入上海和江苏电网。

(2) 在 WGPP 中, 可控电源采用 CCPP 机组。较之常规燃煤机组, CCPP 机组具有更好的负荷调节能力和更为灵活的运行方式, 从而增强了平抑风电功率波动的能力。崇明岛规划为两套 CCPP 机组, 目前已建成一套。该机组额定功率为 400 MW。在冬季工况下, 其 AGC 投用上下限分别为 400 MW 和 230 MW<sup>[10]</sup>; 对于夏季工况, 根据制造厂提供的环境温度对出力的修正曲线估算, 可取上限为 365 MW, 下限为 210 MW。

(3) WGPP 的能量管理模块位于电源和电网之间, 充当代理的角色, 使 WGPP 作为一个整体参与电网的调度运行。站在电网角度, WGPP 能量管理模块的存在有效减少了控制变元的数量、降低了调度的复杂性。上述模块既可以独立存在, 也可以嵌入到上级电网的能量管理系统中。

值得说明的是, WGPP 与近年备受关注的虚拟发电厂(Virtual Power Plant, VPP)概念是存在区别的。由 VPP 概念提出的背景可知, 对 VPP 的研究主要源于大量小型分布式发电单元的集成以及需求侧响应的智能决策等需求<sup>[11]</sup>, 而本文的 WGPP 则针对高电压等级的规模化新能源接入问题。但 WGPP 与 VPP 也存在某些相似之处, 如都是将多个发电单元聚合成类似于单一电厂的整体。此外, 可以将 WGPP 与其区域内的配电网、微电网层面的 VPP 相协调, 构成分层的能量管理体系, 从而可以利用区域内的风光互补以进一步提高可再生能源调度的计划性, 以及通过需求响应优化负荷曲线, 提高 WGPP 的可调度性。

## 2 WGPP 的调度模式

### 2.1 调度模式

WGPP 对外以一个电厂的形式参与系统运行, 主要存在两个控制目标, 分别为控制对外联络线的

功率以及对系统频率给予支持。前者是将 WGPP 视为一个常规电厂，后者是将其视为一个控制区域。由此，本文提出对 WGPP 的两种调度模式。

(1) 跟踪调度曲线模式。当 WGPP 接入到大系统时，系统频率较为稳定，WGPP 可以选择跟踪调度曲线的调度模式。这时，将 WGPP 视为一个常规电厂。WGPP 应使其对外联络线的总出力跟踪调度曲线，以偏差最小为控制目标。对于风电和负荷预测的偏差部分，WGPP 利用 CCP 机组出力快速调节的能力，对 WGPP 的整体出力进行调整。

(2) CPS 控制模式。如果 WGPP 接入到一个较小系统时，WGPP 在跟踪调度曲线的同时，还应具有对系统频率的支撑作用，即当系统频率处于低位时，WGPP 应增加出力，反之则应减少出力。为此，控制方式应采用联络线功率频率偏差控制(Tie-line load and frequency Bias Control, TBC)。

在调度曲线的制定上，系统调度也将 WGPP 视为一个等效电厂。具体方法为：WGPP 根据区域内 CCP 机组检修计划、风功率预测数据以及超短期负荷预测数据等信息，形成日前的发电能力曲线并上报给系统调度，系统调度据此制定 WGPP 的 96 点发电计划曲线并下发给 WGPP 的能量管理模块。

由于崇明岛靠近江苏、上海等大电网，因此崇明岛 WGPP 采用跟踪调度曲线模式更为合适。

## 2.2 控制效果的评价指标

由上可见，本文利用了传统 AGC 的控制手段，对 WGPP 实施控制。这样，在对控制效果进行评价时，也可以参考传统 AGC 的评价指标。

### (1) 出力偏差指标

因为该指标只考虑 WGPP 出力的偏差情况而不考虑频率的波动，因此，该指标主要应用于跟踪调度曲线模式。此时，将 WGPP 视为常规电厂，其出力偏差应控制在调度曲线计划值的 2% 之内。

### (2) CPS 指标

为评估 AGC 控制的效果，NERC 在 1996 年提出了 CPS(Control Performance Standard) 准则<sup>[12]</sup>。CPS 考核标准包括 CPS1 和 CPS2。本文以此评价上述 CPS 控制模式的控制效果。

CPS1 指标可以表述为

$$CP_{it} = \left[ \frac{ACE_i}{K_{ni}} \right]_1 \times \Delta f_i \quad (1)$$

$$CF = AVG_{\text{period}}(CP_{it}) \leq \varepsilon_1^2 \quad (2)$$

$$C_{\text{CPS1}} = \left( 2 - \frac{CF}{\varepsilon_1^2} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中：ACE 为区域控制偏差(Area Control Error,

ACE)； $\varepsilon_1^2$  是距某个目标频率的频率偏差常数，通常取某年基于 1 min 的平均频率与额定频率的偏差的均方根值。仿真时对控制区域的评估考核，采用 10 min 的 CPS1 作为评估依据。

CPS2 可表述为：如果控制区域在每个 10 min 间隔内 ACE 的平均值小于某个事先确定的常数  $L_{10}$ ，则该 10 min 的 CPS2 指标合格，如式(4)所示<sup>[12]</sup>。

$$C_{\text{CPS2}} = \text{AVG}_{10\text{min}}(ACE_i) \leq L_{10} \quad (4)$$

式中： $L_{10} = 1.65\varepsilon_{10}\sqrt{K_{ni} \times K_s}$ ； $\varepsilon_{10}$  是一年中基于 10 min 的平均频率与额定频率的偏差的均方根值，各控制区域取相同的  $\varepsilon_{10}$ ； $K_s$  是整个互联系统的频率偏差系数； $K_{ni}$  是控制区域内的频率偏差系数。

本文采用如下 CPS 考核标准<sup>[12]</sup>：当  $C_{\text{CPS1}} \geq 200$  时，说明在该时间段内 ACE 对互联电网的频率质量有帮助，此时  $C_{\text{CPS2}}$  为任意值考核均合格；当  $C_{\text{CPS1}} \leq 100$  时，CPS 考核不合格；当  $100 \leq C_{\text{CPS1}} \leq 200$  时，若  $C_{\text{CPS2}}$  合格，则 CPS 考核合格。

根据上述对 CPS 指标的分析，在 CPS 控制模式下，应尽量满足  $C_{\text{CPS1}} \geq 200$  的考核要求。为此，在计算 ACE 时，应该将控制频率偏差系数  $K_n$  取得偏大，这样，在 AGC 控制的稳态效果中，ACE 的计算值会逐渐趋向于零，而 ACE 的实际值恰好与系统频率的偏差量  $\Delta f$  符号相反，从而获得较高的 CPS1 指标。

## 3 CCP 机组的 AGC 控制算法

本文假定风电功率被全额消纳，不考虑风电场的自动有功控制。这样，WGPP 中具有 AGC 功能的电源仅有 CCP 机组。WGPP 的 ACE 由交换功率偏差和系统频率偏差共同构成，如式(5)。

$$ACE = (P_t - P_s) + K_n(f_t - f_s) \quad (5)$$

式中： $P_t$ 、 $f_t$  分别为 WGPP 实际联络线功率和系统频率； $P_s$ 、 $f_s$  分别为联络线功率的计划值(调度曲线)和系统额定频率； $K_n$  为该控制区域频率偏差系数设定值，通常取区域自然频率特性系数  $K_{\text{sys}} = D_1 + 1/R_{\text{sys}}$ ，其中， $R_{\text{sys}}$  为控制区域发电机等值调差系数， $D_1$  为控制区域负荷因子项。

将 ACE 计算公式写成变化量形式：

$$ACE = \Delta P_t + K_n \Delta f_{\text{sys}} \quad (6)$$

式中， $\Delta P_t$  与  $\Delta f_{\text{sys}}$  分别为联络线交换功率与系统频率的偏差量。

### 3.1 比例积分(PD)控制

考虑 CCP 机组的装机容量以及爬坡率限制，AGC 控制框图如图 2 所示。基点功率每 15 min 更

新一次, AGC 指令每 6 s 执行一次。

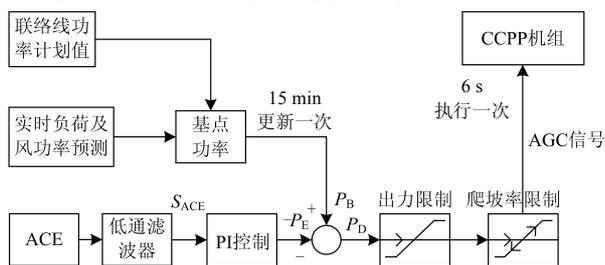


图 2 CCPP 机组 AGC 算法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of AGC algorithm applied to the CCPP

对于由负荷及风功率的高频随机变化所造成的 ACE 波动, AGC 不应也无法进行响应, 因此, 利用低通滤波器对 ACE 滤波, 滤波后得到  $S_{ACE}$  信号。

CCPP 机组的目标出力  $P_D$  共由两部分组成, 如式(7)。

$$P_D = P_B + P_E \quad (7)$$

式中:  $P_B$  是基点功率;  $P_E$  是调节功率。为了实现 ACE 的无差调节, 需要在低通滤波器后加入 PI 控制。

$$P_E = -(P_{ACE} + I_{ACE}) = -(K_p \times S_{ACE} + K_i \times \int S_{ACE} \cdot dt) \quad (8)$$

式中:  $P_{ACE}$ 、 $I_{ACE}$  分别是比例分量与积分分量;  $K_p$ 、 $K_i$  分别是 PI 控制环节的比例系数与积分系数。

$P_B$  是 CCPP 机组的基点功率, 由实时负荷预测、风电功率预测以及调度曲线决定,  $P_E = P_{Lpre} + P_s - P_{wpre}$ , 其中,  $P_{Lpre}$  是实时负荷预测值,  $P_{wpre}$  是风电功率预测值。目标出力  $P_D$  经过机组出力限制与爬坡率限制, 得到最终的 AGC 信号。

### 3.2 改进型 PI 控制

相比于常规火电机组, CCPP 机组具有出力调节快的特点, 因此 WGPP 的出力可以跟踪变化幅度更大的调度曲线。这需要对 PI 算法进行改进。

每隔 15 min, 当调度曲线发生较大突变时, 由基点功率  $P_B$  的计算式可知,  $P_B$  也会随之突变, 但是由于存在对 AGC 信号的爬坡率限制, AGC 信号并不会发生突变。此时, 由 PI 闭环控制得到的调节功率  $P_E$  的变化是没有意义的。为了避免对  $P_E$  中的积分项进行无意义的积累, 此时对 CCPP 机组的出力进行开环控制,  $P_E$  维持在每个 15 min 开始时刻的值  $P_E = I(0)_{ACE}$ , 目标出力  $P_D = P_B + I(0)_{ACE}$ , 直到以下任意一种情况出现:

(1) 基点功率的突变方向与调度曲线的突变方向相反。这时仅仅依靠开环控制调节 AGC 信号不仅不能使 ACE 置零, 相反会使其绝对值增大。

(2) CCPP 机组的出力达到开环控制目标出力  $P_D$  附近的阈值  $P_D \pm \Delta P_D$ 。这时仅仅依靠开环控制不能以最大爬坡率给出 AGC 信号。

(3) 联络交换功率已经达到调度曲线附近的阈值  $P_s \pm \Delta P_s$ 。这时, 依靠开环控制调节 AGC 信号, 可能会出现联络线交换功率的过调节。

当以上三种情况中的任意一种出现时, 应立即恢复闭环控制。

## 4 仿真结果

本文根据崇明岛电网的现状, 利用 RTDS 对 WGPP 的调度模式以及控制效果进行仿真验证。所仿真的 WGPP 中包含一套 CCPP 机组、两座风电场以及本地负荷。CCPP 机组模型参考文献[13], 其额定功率为 400 MW。两座风电场的装机分别为 60 MW 和 48 MW。仿真参数  $\varepsilon_1 = 0.028 \text{ Hz}$ ,  $\varepsilon_{10} = 0.005 \text{ Hz}$ ,  $K_n = 1630 \text{ MW/Hz}$ ,  $K_{mi} = 172 \text{ MW/Hz}$ ,  $\Delta P_D = \Delta P_s = 5 \text{ MW}$ 。

### 4.1 实测数据仿真

首先利用现场实测数据进行验证。选取了 2014 年 3 月 1 日上午 11 点 10 分~12 点 5 分的崇明岛风电功率及负荷数据, 时间分辨率为 1 min。在这段时间内, 风功率和负荷分别持续上升和持续下降, 如图 3、图 4 所示, 联络线交换功率曲线如图 5 所示。

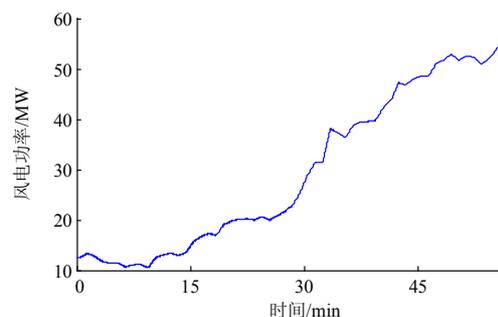


图 3 风电场功率曲线

Fig. 3 Power curve of a wind farm

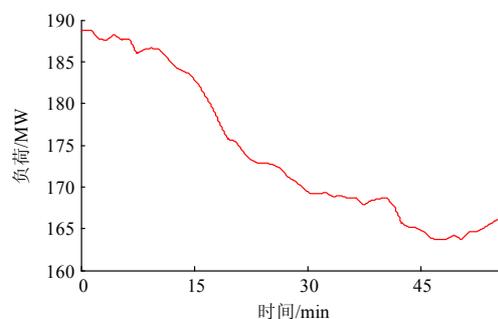


图 4 崇明岛负荷曲线

Fig. 4 Load curve of ChongMing Island

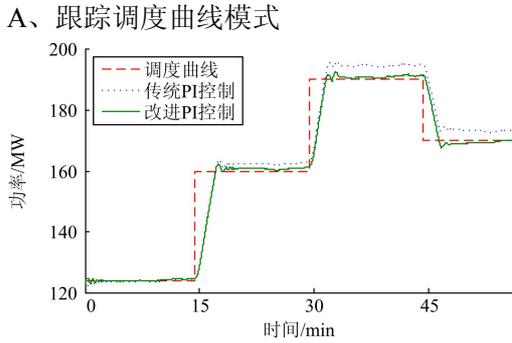


图 5 联络线交换功率曲线

Fig. 5 Exchanged power of tie-lines

由于 CCGP 机组出力调节速度快，可以有效地平抑由风功率与本地负荷造成的波动，因此，在跟踪调度曲线模式下，采用两种 PI 控制方法在稳态过程中都可以得到较好的平抑效果，但是采用传统 PI 控制方法的 WGPP 联络线功率在稳态时存在较大的控制偏差。相比之下，采用改进 PI 控制得到的联络线交换功率具有更好的跟踪效果。这一点也可以从图 6 的统计指标中得到。

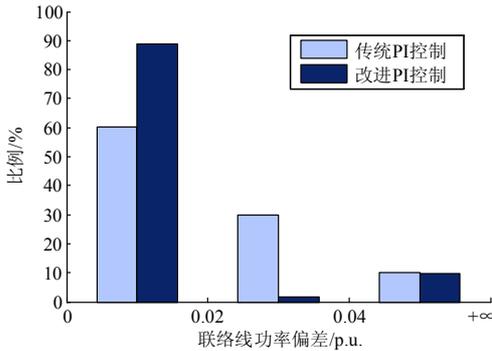


图 6 联络线功率偏差统计直方图

Fig. 6 Statistics histogram of tie-line power deviation

从概率特性可以看出，采用改进 PI 控制方法时，联络线交换功率偏差在 2% 以内的概率接近 90%，明显优于传统 PI 控制。这是因为在爬坡率限制的影响下，PI 调节的动态过程较长，调节功率的积分项  $I_{ACE}$  在这个过程中会产生一个绝对值较大的累计量，进入稳态后，这个累计量需要很长的时间才能得到消化。而改进后的 PI 控制，其调节功率在动态过程中保持不变。

### B、CPS 控制模式

下面假设 WGPP 接入一个规模较小的系统，其系统频率存在波动，波动周期是 5 min，幅值为 0.02 Hz。此时对 WGPP 采用 CPS 控制模式。采用两种不同的 PI 控制方法，其联络线交换功率的时域曲线如图 7 所示。

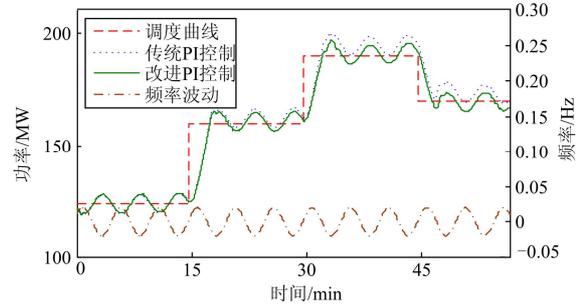


图 7 联络线交换功率及系统频率变化曲线

Fig. 7 Exchanged power of tie-lines and fluctuations of system frequency

从图 7 可以看出，在两种 PI 控制方法下，联络线交换功率都呈现出相对频率波动能够反向变化的现象，这一点体现了 WGPP 出力对系统频率的支撑作用。但利用改进型 PI 控制方法，联络线交换功率跟踪调度曲线效果明显更好。这段 WGPP 运行过程中的 CPS 指标如表 1 和图 8 所示。

表 1 两种控制方法 CPS1 指标比较

Table 1 Comparison of CPS1 between two control methods

时间段(10 min)	1	2	3	4	5
传统 PI 控制	205.45	266.01	205.54	250.99	182.32
改进 PI 控制	206.20	265.01	203.01	249.16	177.45

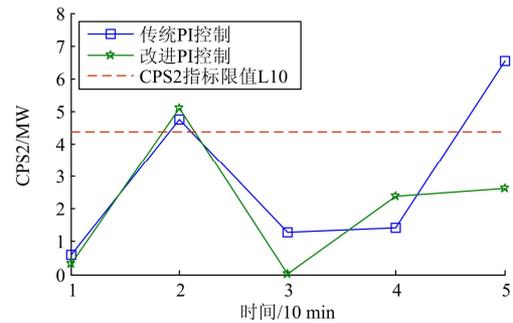


图 8 两种控制方法 CPS2 指标比较

Fig. 8 Comparison of CPS2 between two control methods

由表 1 可以看出，0~40 min 的 10 min  $C_{CPS1} > 200$ ，CPS 考核合格。40~50 min 的 10 min  $100 \leq C_{CPS1} \leq 200$ ，这时根据 CPS 考核标准，应对 CPS2 指标进行考察。采用传统 PI 控制方法  $C_{CPS2} \geq L_{10}$ ，CPS 考核不合格；采用改进 PI 控制方法  $C_{CPS2} \leq L_{10}$ ，CPS 考核合格。综上，在仿真时域内，采用传统 PI 控制方法的 CPS 考核合格率为 80%；采用改进 PI 控制方法的 CPS 考核合格率为 100%。

### 4.2 风电功率突变事件仿真

下面进一步验证当发生风功率突变事件时，WGPP 的控制效果。因为风功率突变事件持续时间

一般较短,而在短时间内进行 CPS 考核是没有意义的,因此本节仅验证跟踪调度曲线的控制模式。

在分钟级的时间尺度内,风电功率  $P_W$  可分解为三部分:移动平均值  $P_a$ ,快速波动分量  $P_{tu}$  以及突变事件  $P_r$ ,即

$$P_W = P_a + P_{tu} + P_r \quad (9)$$

式中:  $P_a$  在分钟级时间尺度内变化平缓,可近似看作恒值;  $P_{tu}$  是风电功率的高频分量,由风的湍流产生,对系统的影响很小,可忽略不计<sup>[14]</sup>;  $P_r$  由风速突变引起,可归纳为 4 种事件:突降、突升、先降后升与先升后降,如图 9 所示。

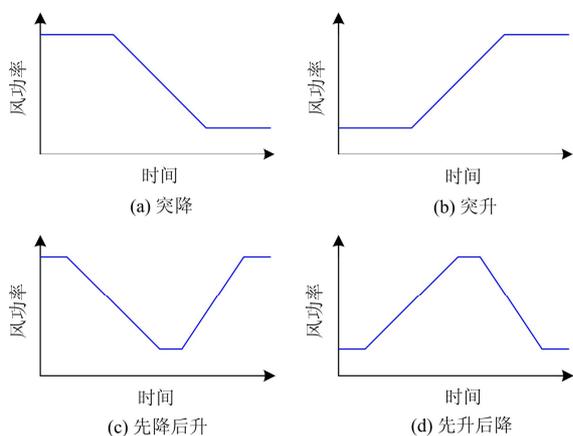


图 9 风功率突变事件示意图

Fig. 9 Schematic view of wind power events

对崇明岛 WGPP 中 48 MW 风电场进行风电功率突变事件仿真。仿真初始条件为:系统频率不波动,且联络线实际功率已完成对计划值的跟踪。仿真过程中,调度曲线计划值不变、全岛负荷不变,另一座 60 MW 风电场的功率恒定为 17.15 MW。

根据参考文献[14]设定 48 MW 风电场的突变事件参数,如表 2 所示。

表 2 48 MW 风电场的突变事件参数

Table 2 Parameters of 48 MW wind farm power events

突变事件	初值/ MW	第一斜率/ (MW/s)	间隔/ s	第二斜率/ (MW/s)	终值/ MW
突降	13.7	-0.085 625	/	/	0
突升	13.7	0.085 625	/	/	27.4
先降后升	13.7	-0.085 625	12.0	0.137	13.7
先升后降	13.7	0.085 625	12.0	-0.137	13.7

在上述 4 类风电功率突变事件下, WGPP 联络线实际功率相对于计划值的偏差、AGC 信号和 CCPP 机组出力的仿真结果如图 10 和图 11 所示。

由仿真结果可见,在 4 种风电功率突变情况下,CCPP 机组的出力能够跟踪 AGC 信号,与风电功率

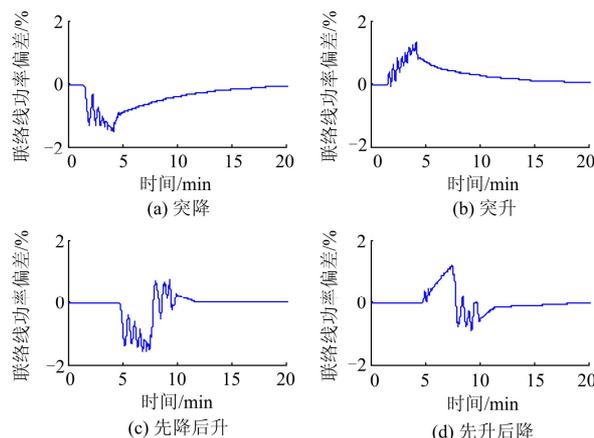


图 10 联络线功率偏差

Fig. 10 Power deviation of tie-lines

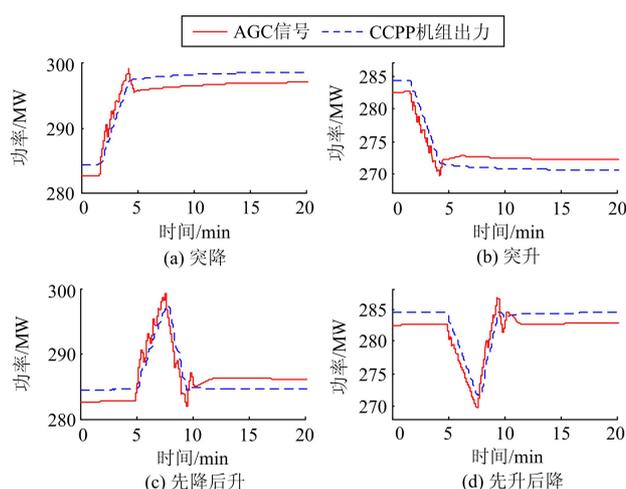


图 11 AGC 信号和 CCPP 机组出力

Fig. 11 AGC signals and output of CCPP

的突变互补。WGPP 的联络线功率能够跟踪调度曲线,出力偏差始终在 2% 以下,满足控制要求。

## 5 结语

(1) 本文以崇明岛智能电网为应用实例,提出了风燃协调等效电厂的概念。该等效电厂通过风、燃两种清洁能源的协调运行,实现可再生能源的平稳送出,并作为一个整体参与电网的调度运行。

(2) 针对 WGPP 不同的控制目标,本文提出了跟踪调度曲线以及 CPS 等两种 AGC 控制模式。以崇明岛电网为实例的仿真验证表明,上述控制模式可以实现可再生能源的拟常规电源调度。

(3) 本文对 AGC 算法中的 PI 控制进行了改进。仿真结果表明,在调度曲线存在较大幅度变化时,改进方法具有更好的跟踪性能。

(4) 本文提出的改进型 PI 控制可以针对不同的

风电功率突变场景实现 AGC 信号的快速准确响应, 从而使得 WGPP 在跟踪调度曲线模式下, 其并网功率满足调度目标。

随着风力发电和燃气发电在我国的快速发展, 本文提出的 WGPP 的调度模式可以在源端提高可再生能源的可调度性, 在网端降低控制系统的维度, 具有一定的示范推广价值。

参考文献

[1] 张川, 杨雷, 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.  
ZHANG Chuan, YANG Lei, NIU Tongyang, et al. Comparison and analysis of energy storage technology to balance fluctuation of wind power output[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 149-154.

[2] 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.

[3] 倪林, 袁荣湘, 张宗包, 等. 大型风电场接入系统的控制方式和动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 75-79, 85.  
NI Lin, YUAN Rongxiang, ZHANG Zongbao, et al. Research on control method and dynamic characteristic of large wind farm integration[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 75-79, 85.

[4] 李生福, 张爱玲, 李少华, 等. “风火打捆”交直流外送系统的暂态稳定控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 108-114.  
LI Shengfu, ZHANG Ailing, LI Shaohua, et al. Study on transient stability control for wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 108-114.

[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 wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 12-15.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 姚秀平. 燃气轮机与联合循环[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[9] 蒋洪德, 任静, 李雪英, 等. 重型燃气轮机现状与发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5096-5102.  
JIANG Hongde, REN Jing, LI Xueying, et al. Status and development trend of the heavy duty gas turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5096-5102.

[10] 临港 4 号机调速系统参数实测与建模试验报告[R]. 上海: 国网上海市电力公司电力科学研究院, 2014.  
Report of Lingang 4# speed control system parameter measurement and modelling test[R]. Shanghai: State Grid Electric Power Research Institute SMEPC, 2014.

[11] 刘吉臻, 李明扬, 房方, 等. 虚拟发电厂研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5103-5111.  
LIU Jizhen, LI Mingyang, FANG Fang, et al. Review on virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5103-5111.

[12] 唐跃中, 张王俊, 张健, 等. 基于 CPS 的 AGC 控制策略研究[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 75-79.  
TANG Yuezhong, ZHANG Wangjun, ZHANG Jian, et al. Research on control performance standard based control strategy for AGC[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 75-79.

[13] GROBLER J H. Development and adaptation of dynamic models for new power generation source[D]. Washington: North-West University, 2011.

[14] BANAKAR H, LUO Changling, OOI B T. Impacts of wind power minute-to-minute variations on power system operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(1): 150-160.

收稿日期: 2015-04-21; 修回日期: 2015-08-02

作者简介:

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

黄屹俊(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统仿真、电力系统保护与控制;

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。

(编辑 周金梅)