

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

董博¹, 许晓艳², 马烁², 黄越辉², 王伟³

(1. 龙源(北京)风电工程设计咨询有限公司, 北京 100034; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192;
3. 国家电网公司, 北京 100031)

摘要: 风电的快速波动特性及与系统频率解耦特性使得风电接入后系统频率稳定性受到影响, 在不同的风电穿透率下, 电网需有选择性地将风电纳入到系统的日前或日内调度计划中, 如何确定风电接入对系统频率控制的影响是个难题。基于电力系统仿真软件 DIgSILENT/PowerFactory 建立了电力系统长过程调度决策仿真平台, 平台为包含调度和电站上下两层的控制结构, 可对风电接入后系统的长时间频率响应过程进行仿真。最后以某实际电网为例, 仿真风电接入后对系统频率控制的影响, 从而确定风电调度运行方案, 验证模型的有效性。

关键词: 风电; 频率控制; 自动发电控制 (AGC); 调度决策仿真平台

Influence study of wind power on system frequency control based on long-term dynamic simulation

DONG Bo¹, XU Xiao-yan², MA Shuo², HUANG Yue-hui², WANG Wei³

(1. Longyuan (Beijing) Wind Power Engineering & Consulting Co., LTD., Beijing 100034, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

Abstract: Integration of wind power affects system frequency stability because of its rapid volatility and frequency decoupling characteristics, wind power will be incorporated in day ahead and intro-day scheduling selectively under different wind power penetrations, how to determine effects on frequency control of wind power integration is a problem. This paper establishes a long-term dispatching decision simulation platform based on power system simulation software DIgSILENT/PowerFactory. The platform is a two-layer control structure containing scheduling side and power station side, it could do simulation of long-term frequency response process after wind integration. At last, taking an actual power grid as an example, impact of wind power integration on frequency control is simulated, thus, wind power dispatching and operation scheme is determined, and the validity of model is checked.

Key words: wind power; frequency control; automatic generation control (AGC); dispatching decision simulation platform

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)12-0057-08

0 引言

电力行业低碳化是应对全球气候变暖、实现我国社会经济可持续发展的关键。在此背景下, 中国推出了一系列发展政策, 鼓励可再生能源, 特别是风电和光伏的大规模开发与利用^[1-2]。2012年, 中国风电新增装机容量 13 GW, 全国累计风电并网容量 60.8 GW, 均居世界第一位^[3]; 全国光伏新增装机容量 3.5 GW, 居世界第二位^[4]。

随着风电规模的日益壮大, 风电自身的一些特性, 如快速波动特性以及系统频率解耦特性, 将会对系统的频率稳定产生一定的影响。为了稳定电网频率, 需在调度计划层面考虑风电预测及其误差。

因此, 需要详细掌握风电对调频措施的影响, 在此基础上确定电力系统的运行方法。目前风电对调频影响仿真多集中在暂态仿真上^[5-6], 采用动长过程动态仿真研究风电对系统调频影响还未见相关论文, 文献[7]研究了不同风电接入比例下的出力变化率对系统调频速度的需求, 没有精确分析风电接入对系统调频的影响; 文献[8]介绍了电力系统功率平衡的基本原理, 分析了如何平衡风电场、负荷和传统电厂的出力, 同样没有运用仿真方法量化确定风电对系统调频措施的影响。文献[9]提出了一种针对双馈风电机组和超导储能互补系统的一次调频控制策略, 能有效改善系统的频率稳定性, 但没有对风电的二次调频策略进行研究。

本文针对风电大规模发展的省级电网和区域电网频率调节方法, 研究并建立了电力系统调度决

策仿真平台, 可进行系统的长过程动态仿真, 模拟调度决策的有效性, 基于此平台研究了风电在不同出力工况下对系统频率控制的影响, 包括区域电网频率以及所在省网的联络线功率控制影响, 从而确定风电纳入调度运行的方案, 以指导风电调度运行。

1 电力系统调度决策仿真平台

1.1 仿真平台结构

电力系统仿真软件 DIgSILENT/PowerFactory (以下简称 PF) 是大型集成化电力系统仿真软件, 几乎适用于电力系统所有方面的分析。该软件以图形化操作和数据管理技术为支撑, 不但能进行大电网的稳态和动态分析, 而且具有风力发电模型和用户自定义元件模型的功能, 因此与其他电力系统仿真软件相比, 该软件在大规模风电调度运行决策仿真分析方面具有较大优势^[10-11]。

基于 PF 建立的含风电的电力系统调度决策仿真平台, 结构如图 1 所示。平台在电网拓扑模型的基础上, 构建了含调度侧和电站/负荷侧两层模型的控制结构, 调度侧建立电网自动发电控制(AGC)系统模型, 可基于 AGC 机组调度指令, 并根据系统频率、联络线功率变化对 AGC 机组控制指令做出调整; 电站/负荷侧控制模型主要为常规发电机组模型, 该模型可接收调度计划和 AGC 控制指令, 并对机组出力进行调整, 电站/负荷侧模型还包括负荷和风电机组模型, 分别可根据输入的负荷变化数据和风速数据进行相应的运行工况模拟^[12]。

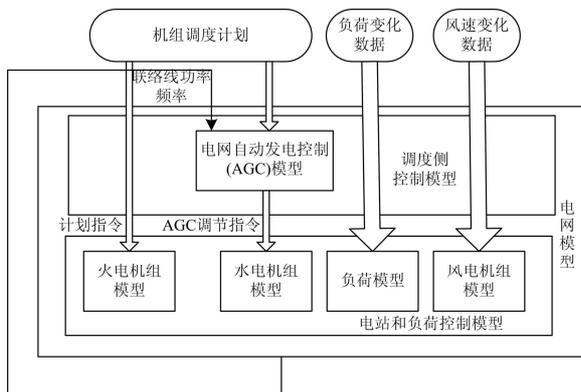


图 1 调度决策仿真平台结构

Fig. 1 Structure of dispatching decision simulation platform

1.2 调度端控制模型

调度决策仿真平台在调度端模型主要为自动发电控制模型, 如图 2 所示。模型可根据电网频率、联络线功率变化, 计算区域控制偏差 ACE, 并根据

一定的原则分配至每台 AGC 机组, 最后实现 AGC 调整指令的下发。模型包括系统总调节功率计算、机组基本功率计算、机组调节功率计算、机组目标功率计算等模块。

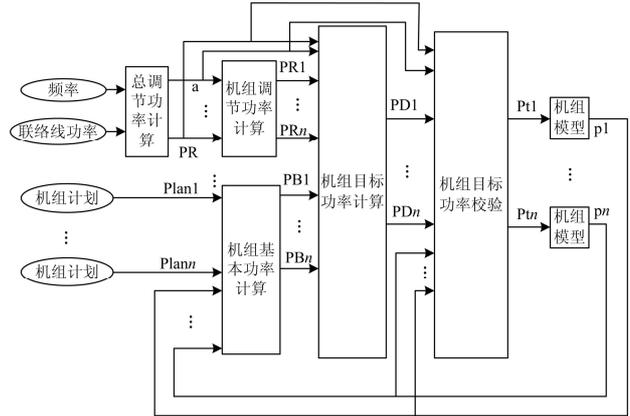


图 2 电网自动发电控制模型

Fig. 2 AGC control model

(1) 总调节功率计算模块

总调节功率计算模块根据电网 ACE 控制方式^[10]计算出为了平衡频率和联络线功率的波动, 电网所有 AGC 机组需要调节的有功总量, 即区域控制偏差 ACE, 并判断区域控制状态, 包括死区、正常控制区、次紧急区和紧急区。ACE 计算公式如式 (1) 所示。

$$ACE = \left[\sum P_{ii} - (\sum I_{0j} - \Delta I_{0j}) \right] - 10B [f - (f_0 + \Delta f)] \quad (1)$$

式中: $\sum P_{ii}$ 为控制区所有联络线交换功率的实际量测值之和; $\sum I_{0j}$ 为控制区与外区的功率交易计划之和; B 为控制区的频率响应系数, 为负值(MW/0.1 Hz); f 为系统频率实际值, 单位 Hz; f_0 为系统频率额定值 (50 Hz); ΔI_{0j} 为偿还无意交换电量而设置的交换功率偏移; Δf 为校正时差而设置的频率偏移。

(2) 机组基本功率计算模块

AGC 机组通常具备八种基本功率模式, 又分成两组: 固定基本功率和浮动基本功率。固定基本功率包括 BASE、SCHE、YCBS、LDFC、TIEC, 它们的基本功率不随系统总负荷的变化而变化; 浮动基本功率包括 AUTO、CECO、PROP, 它们的基本功率随系统总负荷的变化而变化^[13], 机组的基本功率计算模块如图 3 所示。

根据 AGC 机组的基本功率模式, 可得出机组的基本功率 P_{Bi} 。

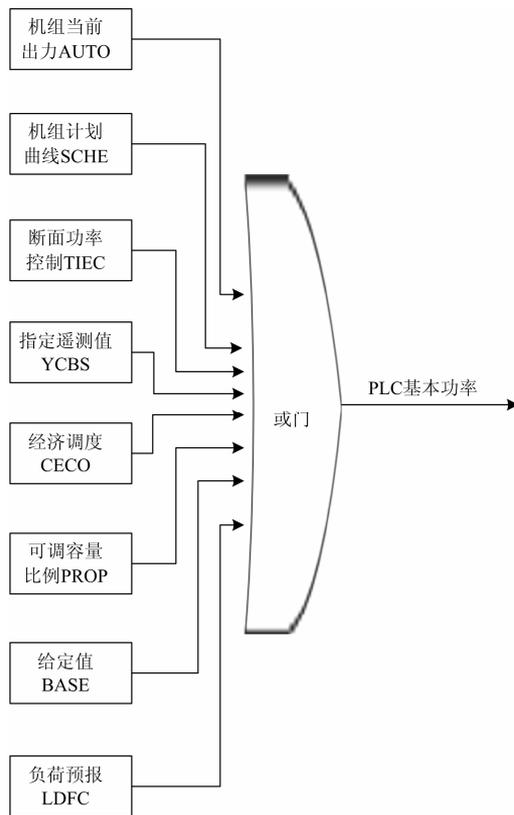


图3 机组基本功率计算模块

Fig. 3 Basic power calculation module

(3) 机组调节功率计算模块

将区域总调节功率根据一定原则计算出的分配因子分配至每台机组,即可得到机组的调节功率。机组承担调节功率模式有 O、R、A、E 四种,在不同模式下,机组承担调节功率不同。

$$PR_i = ACE \cdot K_i \quad (2)$$

式中: PR_i 为机组调节功率; K_i 为调节功率分配因子。

(4) 机组目标功率计算模块

第 i 台机组的目标出力 PD_i 是基本功率与调节功率之和:

$$PD_i = PB_i + PR_i \quad (3)$$

1.3 站端模型

1.3.1 火电机组模型

传统仿真系统中的火电机组模型包括电力系统稳定器 (PSS)、调速器 (GOV) 和调压器 (AVR), 该模型只适应于时间尺度较短的暂态计算, 当仿真时间较长时, 必须考虑火电机组固有的锅炉响应过程和机炉协调过程, 才能准确模拟系统运行过程^[13]。适应于长时间尺度的火电机组模型, 必须增加火电机组调度指令 (包括计划指令和 AGC 有功功率指令) 接口、锅炉模块和协调控制系统模块, 可有效模拟实际机组的响应过程, 模型如图 4 所示。

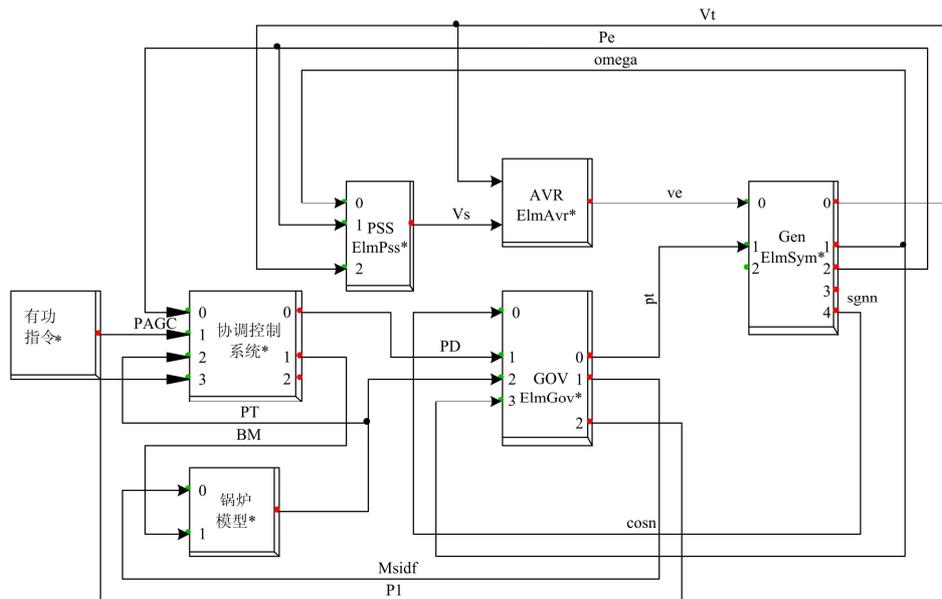


图4 火电机组模型

Fig. 4 Thermal unit model

(1) 锅炉模型

燃煤发电机组的功率变化性能主要取决于功率对汽轮机调节汽门和锅炉燃烧率的响应特性, 同

时考虑主蒸汽压力变化。主蒸汽压力和发电功率对锅炉指令和汽轮机指令的响应特性如图 5 所示。

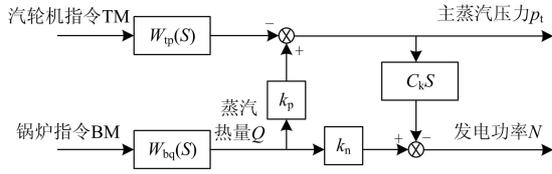


图 5 主蒸汽压力和发电功率对锅炉指令和汽轮机指令的响应特性

Fig. 5 Response characteristics of main steam pressure and output power to boilers and steam turbine instruction

图 6 是燃煤机组发电过程的燃料和能量转换特性，其中锅炉完成从燃料输入到高温高压蒸汽输出的过程。

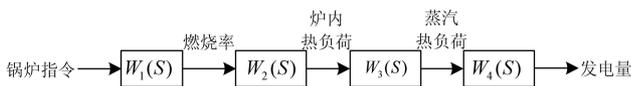


图 6 锅炉的能量转换特性

Fig. 6 Characteristics of boilers' energy conversion

图 6 中，燃煤和其配风合称为燃烧率，其对锅炉指令的响应特性为 $W_1(S)$ ；燃烧发出的热量称为炉内热负荷，其对燃烧率的响应特性为 $W_2(S)$ ；蒸汽热负荷对炉内热负荷的响应特性为 $W_3(S)$ 。

对于直吹式制粉系统

$$W_1(S) = \frac{1}{1 + T_1 S} e^{t_s} \quad (4)$$

对于中间储仓式制粉系统

$$W_1(S) = \frac{1}{1 + T_1 S} \quad (5)$$

炉内热负荷是燃料转换成的高温烟气热量，其对燃烧率的响应特性可看作是一个时间常数较小的多阶惯性环节，即

$$W_2(S) = \frac{1}{(1 + T_2 S)^{n_2}} \quad (6)$$

锅内介质对高温烟气的吸热是一个传热过程，蒸汽热负荷对炉内热负荷的响应特性可视为一个高阶的惯性环节，即

$$W_3(S) = \frac{1}{(1 + T_3 S)^{n_3}} \quad (7)$$

(2) 协调控制系统模型

图 7 为目前常用的机炉协调方式调节原理框图。其中，PD 环节为功率指令到锅炉指令的前馈和超调环节，它的作用是使燃烧率正确、快速地随

功率指令变化，并有适量的超调。 K_1/K_2 比值大说明是由汽轮机侧重调节功率，反之说明汽轮机侧重调节主蒸汽压力； K_4/K_3 比值大说明由锅炉侧重调节主蒸汽压力，反之锅炉侧重于调节功率。当 $K_1=K_4=0$ ， $K_2=K_3=1$ 时，系统成为常用的以“机跟炉”为基础的调节方式；当 $K_1=K_4=1$ ， $K_2=K_3=0$ 时，系统成为常用的以“炉跟机”为基础的协调方式。

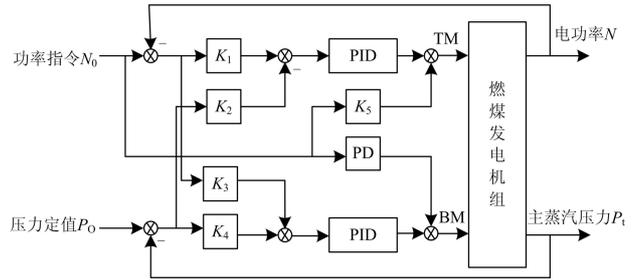


图 7 机炉协调方式调节原理图

Fig. 7 Schematic diagram of machine furnace coordinated way

1.3.2 风电机组模型

和一般风电机组模型不同^[14-16]，本文在风电机组暂态模型基础上，建立了风速输入接口、有功功率指令接口和无功功率指令接口，可实现风机根据风速的变化输出相应有功功率的功能，也可实现风机根据 AGC 或 AVC 指令按照一定调节速度调整有功和无功的功能，在系统 AGC 和 AVC 不对风电场控制时，风电机组按照正常控制功能工作，图 8 为本文建立的风电机组控制模型。

1.3.3 负荷模型

负荷的实际有功/无功功率输出和电压、频率有一定的关系，非线性负荷动态模型如图 9 所示。在暂态仿真中，模型中有有功功率输入 P_{ext} 和无功功率输入 Q_{ext} 均为一恒定值，为潮流计算中的稳态值，为了适应长过程仿真，模型中 P_{ext} 和 Q_{ext} 必须为连续变化的数值，这样即可得到随时间持续变化的负荷模型。

2 算例分析

以某区域电网为例，说明大规模风电接入对电网频率控制影响，该区域电网负荷频率控制模式为 FFC+FTC，即区域电网负责看守频率，各省网负责看守联络线功率。本算例中风电接入区域电网中的一个省网，以下称 A 网。A 网最高负荷 9 500 MW，风电装机容量 1 400 MW，风电穿透率为 14.7%。本节将研究不同风电调度模式下，风电不同出力情景对整个区域电网频率以及接入省网联络线功率控制的影响。

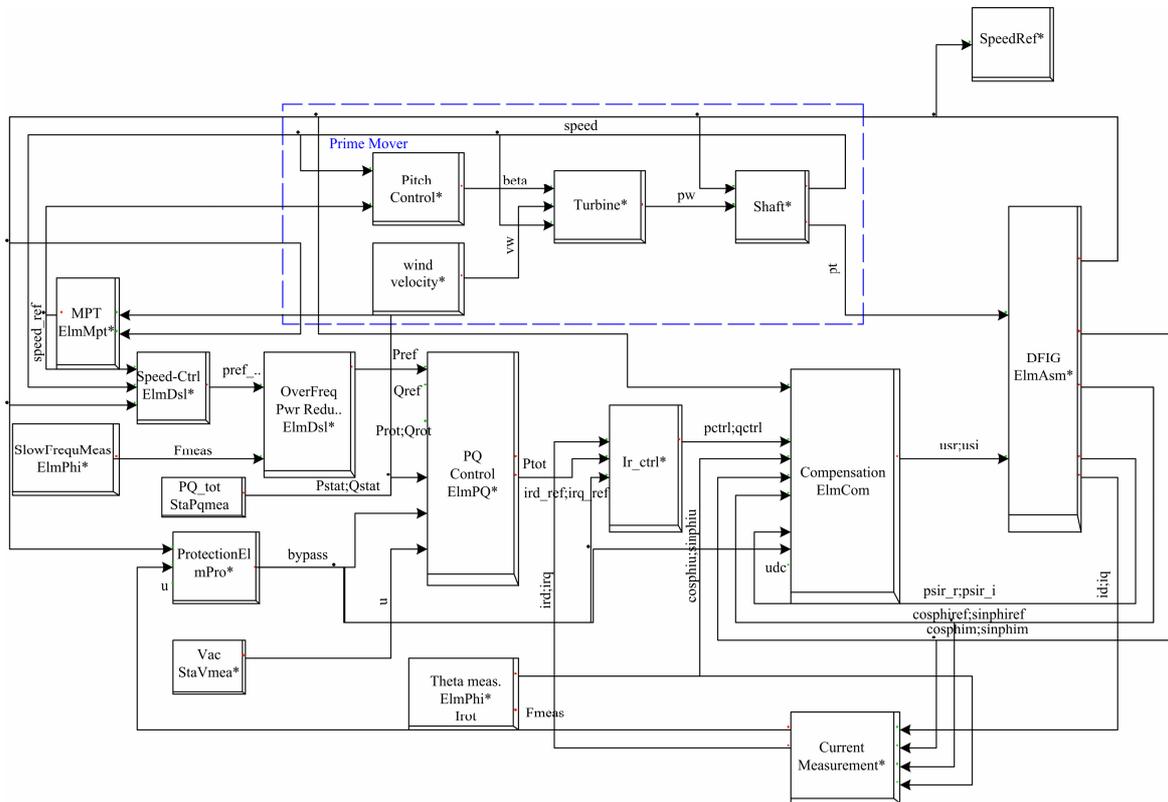


图 8 风电机组控制模型

Fig. 8 Control model of wind turbine

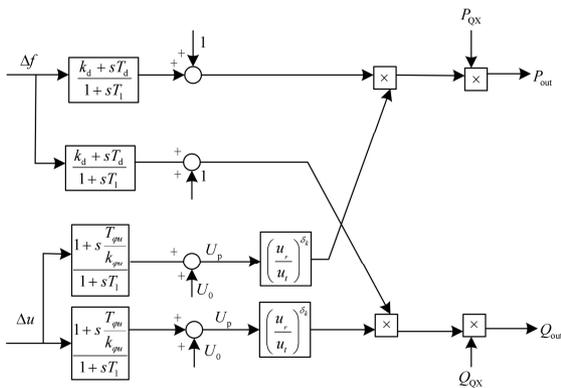


图 9 非线性负荷模型

Fig. 9 Model of nonlinear load

根据调度计划是否考虑风电预测以及风电预测误差大小, 案例研究分为三种: 模式 1, 风电不纳入调度计划; 模式 2, 风电纳入日前调度计划, 预测误差为 20%; 模式 3, 风电纳入日前调度计划, 预测误差为 10%。

某典型日风电的预测和实际曲线分别如图 10 和图 11 所示。



图 10 风电预测功率 (MW)

Fig. 10 Prediction power of wind power (MW)

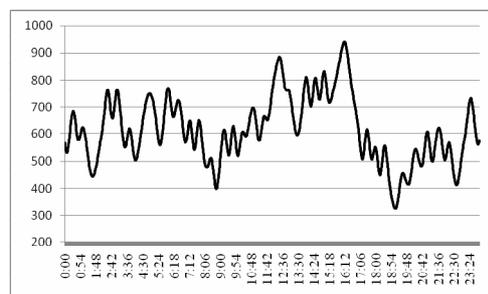


图 11 风电实际功率 (MW)

Fig. 11 Actual output of wind power (MW)

图 12~图 15 为风电接入前后且遵循不同调度计划模式时，区域电网频率、A 网联络线功率、A 网 AGC 控制指标等变化曲线。表 1 为 A 电网风电接入前及接入后三种模式下联络线的考核电量和累积偏移电量比较。

可以看出，由于算例中区域电网调频容量充足，即使风电接入后不纳入调度计划，在区域电网 AGC 系统的作用下，也不会影响系统的频率，四种情况下系统频率均稳定在 50 ± 0.05 Hz 范围之内。

对于 A 电网，AGC 系统的作用是看守 A 网对外联络线功率，风电接入之前，ACE 范围在 ± 40 MW 之内，联络线功率跟踪计划功率性能良好，仿真时段内联络线考核电量和累积偏移电量分别为 0.47 万 kWh 和 14.31 万 kWh。

风电接入后，若不纳入调度计划，且不考虑日内调度员人为调整调度计划情况，则风电出力全部由 AGC 系统平衡，很明显，A 网 AGC 调节容量和调节速度不足，需借助区域电网平衡风电波动，联络线功率偏离计划值较远，ACE 范围增大为 $-50 \sim 200$ MW，AGC 控制频繁进入紧急区，A 网联络线电量考核值增大，联络线考核电量和累积偏移电量分别为 3.5 万 kWh 和 40.7 万 kWh，较风电接入前分别增大 854% 和 243%。

风电接入且纳入调度计划后，由于调度提前安排常规机组计划，系统 AGC 调频压力大大降低，方式 2 和方式 3 两种情况下，A 网 ACE 范围分别为 $-100 \sim 50$ MW 和 $-50 \sim 50$ MW，对联络线功率影响比方式 1 减小。由方式 2 和方式 3 可知，联络线功率偏离计划值随着风电预测误差降低而降低；方式 3 情况下，联络线考核电量和累积偏移电量和风电接入前无明显变化，甚至发生个别时段考核和累积偏移电量稍低的现象。

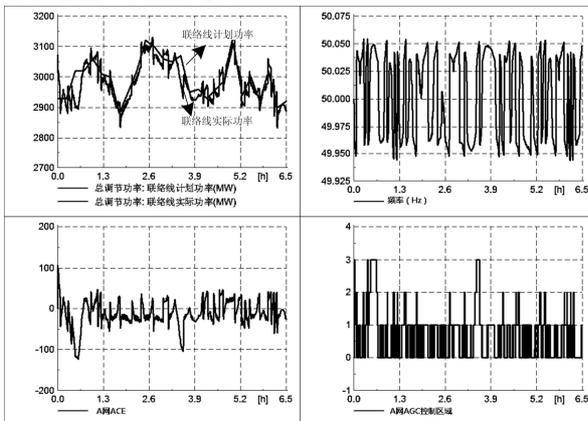


图 12 风电接入前相关参量变化曲线

Fig. 12 Parameter curves before wind power integrated

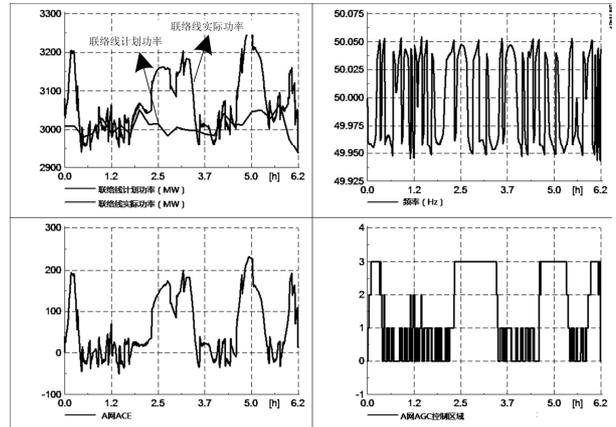


图 13 风电接入后调度模式 1 下相关参量变化曲线

Fig. 13 Parameter curves after wind power integrated under dispatch mode 1

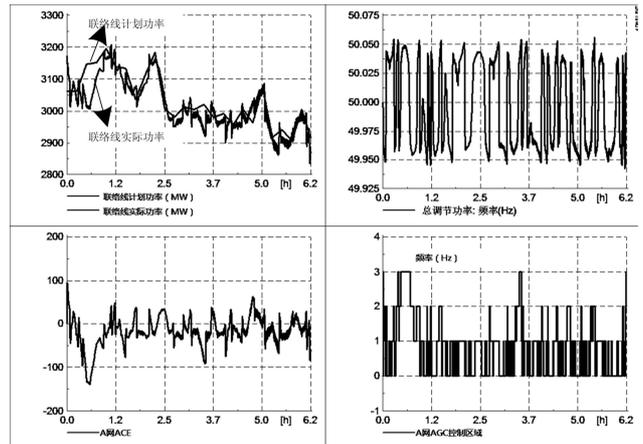


图 14 风电接入后调度模式 2 下相关参量变化曲线

Fig. 14 Parameter curves after wind power integrated under dispatch mode 2

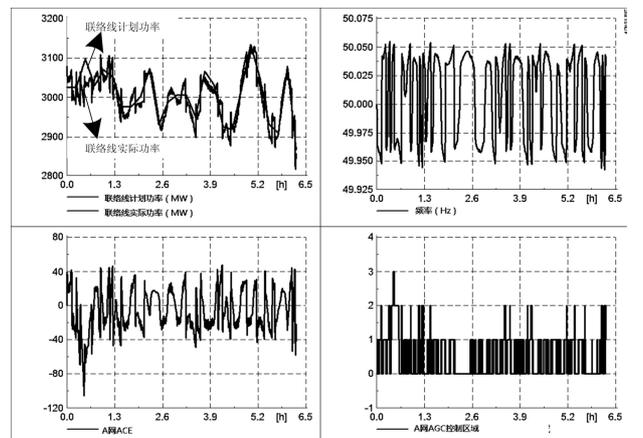


图 15 风电接入后调度模式 3 下相关参量变化曲线

Fig. 15 Parameter curves after wind power integrated under dispatch mode 3

表 1 不同调度模式下风电接入前后频率控制性能比较

Table 1 Performance comparison in different dispatching modes

调度模式	考核 电量/ 万 kWh	累积偏移 电量/ 万 kWh	ACE 范 围/MW	与无风电 的 ACE 比较
无风电	0.47	14.31	±40	-
方式 1: 风电不 纳入调度计划	3.5	40.7	-50~200	最大增加 400%
方式 2: 风电纳 入调度计划且 预测误差 20%	0.68	16.13	-100~50	最大增加 150%
方式 3: 风电纳 入调度计划且 预测误差 10%	0.3	13	-50~50	最大增加 25%

综上,大规模风电接入后,在省级电网负责平衡风电波动的前提下,将会加大省级电网 AGC 控制压力,紧急情况下,需通过临近电网支援才能保证频率稳定,这将会加大联络线功率波动,增加省网联络线电量考核^[17]。由于我国现有调度模式以日前调度为主,日内调度为辅,对于本案例电网,为了不影 A 网的联络线考核电量,在日前调度计划中需考虑风电短期预测结果及其误差的影响,编制风电及常规电源的调度计划,以保证日内运行的安全稳定性。

3 结论

本文建立了电力系统调度决策仿真平台,可模拟风电接入后电网的长时间尺度动态运行,从而确定系统的风电调度运行方案。主要结论如下:

(1) 建立了电力系统调度决策仿真平台,含调度侧和站端侧两级控制结构,调度侧控制系统可根据系统频率变化调整机组控制指令;站侧发电机组可接收调度指令调整出力;根据负荷和风电运行工况,可准确模拟电力系统实际运行。

(2) 通过对风电穿透率 14.7%的省级电网调度运行仿真分析可知,对于风电穿透率较小的省级电网,在日前 20%风电功率预测误差下,风电纳入调度计划制定后,联络线考核电量变化不大,但 ACE 范围增大,最大增加 150%;在日前 10%风电功率预测误差下,风电纳入调度计划制定后,ACE 最大增加 25%。

(3) 由于日前风电功率预测精度难以提高,日内超短期风电功率预测的精度要高于日前预测精度,大规模风电并网后应采用日前、日内和实时逐级递阶的调度模式,以减少风电预测不确定性的影

响。

参考文献

- [1] 国家电网公司. 风电优先调度工作规范[R]. 北京: 国家电网公司, 2012: 1-15.
State Grid Corporation of China. Job specification of wind power priority scheduling[R]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2012: 1-15.
- [2] 国家电网公司. 国家电网公司关于做好分布式电源并网服务工作的意见[R]. 北京: 国家电网公司, 2013: 1-2.
State Grid Corporation of China. Opinions of doing grid connected service well of SGCC[R]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2013: 1-2.
- [3] GWEC. 全球风电装机数据 2011[R]. Brussels: GWEC, 2012.
GWEC. Global wind power capacity statistic 2011[R]. Brussels: GWEC, 2012.
- [4] EPIA. Global market outlook for photovoltaic 2013-2017[R]. Brussels: EPIA, 2012.
- [5] 张晓波, 常喜强, 王占霞, 等. 基于风电模型的新疆电网频率稳定性研究[J]. 华东电力, 2009, 37(12): 1993-1997.
ZHANG Xiao-bo, CHANG Xi-qiang, WANG Zhan-xia, et al. Wind power model based study of frequency stability for Xinjiang power grids[J]. East China Electric Power, 2009, 37(12): 1993-1997.
- [6] 吴子双, 于继来, 彭喜云. 高风速段次优功率追踪方式的风电调频方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 112-119.
WU Zi-shuang, YU Ji-lai, PENG Xi-yun. DFIG's frequency regulation method only for high wind speed with suboptimal power tracking[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 112-119.
- [7] 韩小琪, 宋璇坤, 李冰寒, 等. 风电出力变化对系统调频的影响[J]. 中国电力, 2010, 43(6): 26-29.
HAN Xiao-qi, SONG Xuan-kun, LI Bing-han, et al. Study of impact of wind power variable output on frequency regulation[J]. Electric Power, 2010, 43(6): 26-29.
- [8] 吴淳. 风电对电力系统调频和备用的影响研究[J]. 华东电力, 2011, 39(6): 993-997.
WU Chun. Research on the influence of wind power on

- power balancing and reserve capacity[J]. East China Electric Power, 2011, 39(6): 993-997.
- [9] 柳伟, 顾伟, 孙蓉, 等. DFIG-SMES 互补系统一次调频控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 108-116.
LIU Wei, GU Wei, SUN Rong, et al. Primary frequency control of doubly fed induction generator-superconducting magnetic energy storage complementary system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 108-116.
- [10] 丁泽俊, 雷金勇, 周飞, 等. 基于 DIgSILENT 平台的储能建模[J]. 南方电网技术, 2012, 6(4): 40-43.
DING Ze-jun, LEI Jin-yong, ZHOU Fei, et al. Modeling of energy storage based on the DIgSILENT platform[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(4): 40-43.
- [11] 李琦芬, 张建平, 丁权飞, 等. 基于PSASP 与 DIgSILENT/PowerFactory 软件的风电机组建模与仿真研究[J]. 华东电力, 2012, 40(2): 296-300.
LI Qi-fen, ZHANG Jian-ping, DING Quan-fei, et al. Wind turbine modeling and simulation based on PSASP and DIgSILENT/PowerFactory software[J]. East China Electric Power, 2012, 40(2): 296-300.
- [12] 大规模风电并网调度运行决策仿真平台研究与开发[R]. 2012.
R & D of large scale wind power integration dispatching and operation decision simulation platform[R]. 2012.
- [13] 《电力系统调频与自动发电控制》编委会. 电力系统调频与自动发电控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [14] 李岩松, 郭世繁, 任国威, 等. 双馈式风力发电系统的机电暂态建模与运行分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 104-109.
LI Yan-song, GUO Shi-fan, REN Guo-wei, et al. Modeling and operation simulation of doubly-fed type wind power generation system electromechanically transient model[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 104-109.
- [15] 张涛, 胡立锦, 张新燕, 等. 风力发电机通用化建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 1-6.
ZHANG Tao, HU Li-jin, ZHANG Xin-yan, et al. Research on universal modeling of wind turbines[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 1-6.
- [16] 李环平, 杨金明. 基于 PSCAD_EMTDC 的大型并网风电场建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 62-66.
LI Huan-ping, YANG Jin-ming. Model and simulation of large grid connected wind farm based on PSCAD_EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 62-66.
- [17] 《互联电网联络线有功功率控制技术规范(试行)》和《电网短期预测技术规范(试行)》[S]. 北京: 国家电力调控中心, 2009.

收稿日期: 2013-09-03; 修回日期: 2013-10-16

作者简介:

董博(1982-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事风电场设计管理工作。E-mail: dongbo@clypg.com.cn