

内蒙古电网区域风电功率预测系统

白永祥¹, 房大中¹, 侯佑华¹, 朱长胜²

(1. 天津大学 电气与自动化工程学院, 天津市 南开区 300072;

2. 内蒙古电力调度通信中心, 内蒙古自治区 呼和浩特市 010020)

Regional Wind Power Forecasting System for Inner Mongolia Power Grid

BAI Yongxiang¹, FANG Dazhong¹, HOU Youhua¹, ZHU Changsheng²

(1. School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Nankai District, Tianjin 300072, China;

2. Inner Mongolia Power Dispatching and Communication Center, Hohhot 010020, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

ABSTRACT: Distributed architecture is adopted in regional wind power prediction system for Inner Mongolia Power Grid, which consists of numerical weather prediction system and wind power forecasting system. The wind power forecasting is based on numerical prediction mode and statistical forecasting model of wind power. Using MM5 mesoscale numerical weather prediction mode, the rolling forecasting of wind speeds, wind directions, temperatures, humidity and air pressure at different altitudes in future 48 hours as well as precipitation in the regions where wind farms locate is performed, and the horizontal resolution of computational grid is 9 km. According to the theory of analogy model and adopting artificial neural network, a regional wind power forecasting model is built, thus the short-term and ultra-short-term wind power forecasting for single wind farm and wind farm groups within a particular region as well as for whole power grid are implemented.

KEY WORDS: wind farm; wind power; regional power forecasting; mesoscale model; numerical weather prediction; neural network

摘要: 内蒙古电网区域风电功率预测系统采用分布式结构, 由数值气象预报系统和风电功率预测系统组成: 风电功率预测以数值预报模式和风电功率统计预报模型为基础; 数值气象预报采用 MM5 中尺度数值气象预报模式对风电场所在区域未来 48 h 不同高度的风速、风向、温度、湿度、气压和降水进行滚动预测, 计算网格水平分辨率为 9 km。基于相似模型理论, 采用人工神经网络方法, 建立了区域风电功率预测模型, 实现了对单个风电场、特定区域内风电场群和全网风电功率的短期和超短期预测。

关键词: 风电场; 风电功率; 区域功率预测; 中尺度模型; 数值气象预报; 神经网络

0 引言

内蒙古自治区风能资源极其丰富, 全区风能技

术可开发容量超过 150 GW, 占全国陆地风能资源储量的 50%以上, 居全国首位, 被国家确定为“风电三峡”基地。《可再生能源法》^[1]颁布后, 在国家鼓励风电发展政策的指导下, 内蒙古电网风力发电迅猛发展。截至 2010 年 5 月底, 内蒙古电网统调发电装机容量为 33.32 GW, 其中火电装机容量为 28.78 GW, 风电装机容量为 3.98 GW, 水电及生物质发电装机容量为 560 MW, 最大风力发电负荷达 3 117 MW。

内蒙古自治区幅员辽阔, 风能资源主要分布在典型草原、荒漠草原及荒漠区域, 风电场主要位于巴彦淖尔、乌兰察布、锡林郭勒和包头等地区, 分散分布在各地的风电场以集中方式接入电网, 调度中心通过控制风电场注入电网的总功率和升压站高压侧母线电压实现对风电场的调度, 风电场每台风机的出力由风电场自身监控系统调节控制。

随着风电渗透率的提高, 风电场运行对电网的影响越来越大, 这使电网实时运行调度和联络线交换功率控制难度越来越大。为了保证电网经济安全稳定运行, 提高电网接纳风电的能力, 充分发挥内蒙古绿色风能资源优势, 实现电网调度对大规模风电场的监视和控制, 内蒙古电力(集团)有限责任公司调度通信中心于 2008 年开始开发建设区域风电功率预测系统。2010 年 1 月投入试运行的内蒙古电网风电功率预测系统采用区域风电预测模式预测特定区域的风电功率, 即对特定地理区域内所有风电场总的风电输出功率进行预测。预测最小单位是一个风电场总的风电输出功率, 而不是单台风力发电机组的输出功率。该系统采用物理模型与统计模型相结合的方式, 以内蒙古气象局中尺度数值天气

预报(numeric weather prediction, NWP)数据和风电场数据采集与监视控制(supervisory control and data acquisition, SCADA)系统实测数据为输入,采用BP(back propagation)神经网络进行区域风电功率预测,其中实测数据用来建模和误差校验分析,NWP数据用来进行功率预测。

1 区域风电功率预测方法

国外在发展短期风电功率预报技术方面已有10余年的历史,有多套预测软件包应用于发电计划与电力市场交易,如丹麦 Risoe 国家实验室的 Prediktor 和丹麦科学技术大学的 Zephyr 和 WPPT、美国 eWind、德国 WPMS 和 Previento、西班牙 LocalPred-RegioPred 和 Sipreólico 等。早期的风电功率预报系统采用单一的物理模型法或统计法,预测输入来自 NWP 数据。随着风电场通信设施的完善,NWP 气象服务的成熟,现在的预报系统兼用多家 NWP 数据与实测数据为输入,并采用综合法进行预测。

根据所采用的数学模型不同,风电功率预测法可分为持续预测法、ARMA 模型^[2-4]、卡尔曼滤波法和智能方法等。持续预测方法^[5]是最简单的预测模型,通常认为最近一点的风速值为下一点的风速预测值^[6],其预测误差较大,预测结果不稳定。ARMA 模型、向量自回归模型^[7]、卡尔曼滤波算法^[8-9]、时间序列法和卡尔曼滤波算法结合后的算法^[10]为改进算法。另外还有人工神经网络方法^[6,11-12]等智能方法。文献[13]对持续法、AR、ARIMA、线性神经网络、BP 神经网络、LM 神经网络、RBF 神经网络、ELM 神经网络、ANFIS 神经网络、NLN 神经网络等多种方法在风速预测中的应用进行了比较,结果表明,神经网络方法优于线性方法。文献[14-15]提出了通过混沌预测方法和组合预测模型提高预测精度的方法。文献[16]介绍了在吉林电网调度中心投入运行的风功率预测系统。文献[17]探讨了甘肃酒泉风电基地风电预测预报系统的实现方案。

2 中尺度数值预报

内蒙古气象局数值气象预报系统采用特别适合精细化数值预报的第5代 NCAR/Penn State(MM5)中尺度模式进行数值气象预报。

计算网格参数配置如下:中心经纬度为(110, 38);

粗网格格点为 142×163;细网格格点为 211×211;粗网格格距为 27 km;细网格格距为 9 km;积分步长为 90 s;积分时间为 48 h;有效时长为 36 h;垂直分层为 33 层;主模式计算时间小于 20 min。

用于功率预测的模式采用了细网格,水平分辨率为 9 km。中尺度模式的运行需要预报区域大的模式作为初始场。MM5 模式以中国气象局 T213 模式的结果为预报初始场和侧边界条件。为了提高预测精度,下一步计划采用 MM5 模式与 WRF(weather research forecast)模式相结合的方式预测,使区域网格格点场分辨率达到 3 km。

数值预报系统提供给功率预测系统的数据内容为指定区域(1 个或多个风电场覆盖区域)方形网格 4 个顶点对应坐标点在 10、30、50、70、100、120、150、170、200、220、250、300、350 m 不同高度的风向、风速、气压、温度、相对湿度的未来 48 h 预测值,每 h 预测 1 个点。为了便于文件通过物理隔离设备传输,数值预报结果文件格式为 E 格式^[18]数据。

3 区域风电功率预测原理

3.1 神经网络结构

风电场功率模型是风电场局部天气要素(风速、风向、气温、气压、湿度等)与风电场输出有功功率之间的关系。本文的系统基于相似模型理论,通过选择最佳建模粒度,采用 BP 神经网络法描述局部天气要素与风电场输出功率的关系。图 1 为用于风电功率预测的 BP 神经网络结构。

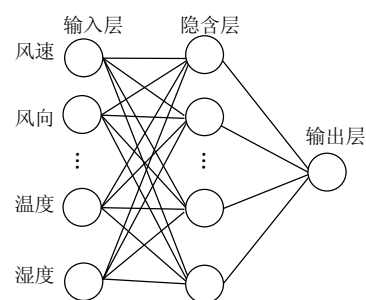


图 1 神经网络的结构

Fig. 1 Structure of the neural network

3.2 最佳建模粒度

对某区域的 m 台风机进行整体建模,输入风速 \bar{v} 为各风机风速 v_i 的加权平均值,即

$$\bar{v} = a_1 v_1 + a_2 v_2 + \dots + a_m v_m \quad (1)$$

式中 $a_1 + a_2 + \dots + a_m = 1$ 。输出功率 \bar{p} 为各风机输出功率 p_i 的加权平均,即

$$\bar{p} = b_1 p_1 + b_2 p_2 + \dots + b_m p_m \quad (2)$$

式中 $b_1 + b_2 + \dots + b_m = 1$ 。为简化计算，一般直接取算术平均，即 $a_i = a_j$ ， $b_i = b_j$ 。

对于一批采样数据 $\{[\bar{v}(1), \bar{p}(1)], [\bar{v}(2), \bar{p}(2)], \dots, [\bar{v}(k), \bar{p}(k)]\}$ ，将全风速段 $[v_{\min}, v_{\max}]$ 划分为 s 个子区间，确定使这组风机的输出功率均值在全风速段方差之和最小的最佳建模粒度 m ，即

$$\min \sum_{i=1 \sim s} \sigma_i \quad (3)$$

式中 σ_i 表示这组风机在风速段 i 上功率输出均值的方差。

3.3 建模步骤与结果

系统功率预测建模的基本步骤如下：

1) 数据预处理。利用 3sigma 法剔除错误数据点，将所有已知样本分为训练样本与测试样本。

2) 天气类型归类。按历史气象信息，将历史数据按正常日与极端天气日进行分类，分别建模。

3) 对训练样本，按式(1)–(3)选定最佳建模粒度，检验风机瞬时风速序列的相关度。若相关度高于 0.95，则以这组风机的风速、风向、气温、气压、湿度的均值作为样本预期输入，以输出功率作为样本预期输出；否则将相关度较低的风机另外分组，计算样本数据，直至所有风机分组完毕。

4) 选择隐含层神经元个数、学习次数等神经网络参数进行建模。神经元函数为

$$f(x) = 1 / (1 + e^{-x}) \quad (4)$$

5) 对测试样本进行预测，并计算系统误差。如果误差满足需求，则建模完毕；否则，则转至步骤 4)。

采用上述方法，根据京能辉腾锡勒风电场 2009 年 8 月份 SCADA 实测数据进行建模，以 2009 年 9 月的实测风速作为输入进行预测，结果如图 2 所示。

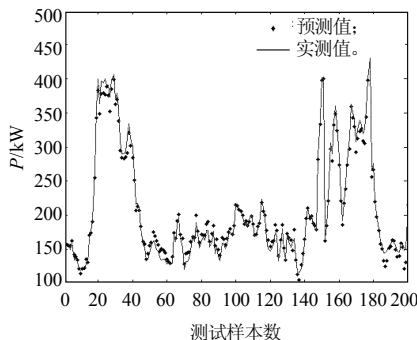


图 2 京能辉腾锡勒风电场预测结果
Fig. 2 Forecasting results of Jingneng Huitengxile wind farm

从图 2 可以看出，采用 BP 神经网络法建模的效果非常好，模型均值误差为 0.4%，方均根误差(折算至额定容量)为 3.2%。

神经网络参数对建模结果的影响见图 3。图中： r 为学习次数； N 为隐含层神经元个数。由图 3 可知：隐含层神经元个数对最终模型精度的影响不大， $N=5$ 或 $N=7$ 最佳；随着学习次数的增加，模型残差迅速减小， $r > 50$ 后，残差减小速度变缓。在保证模型精度的情况下，为节省学习时间，选择最佳学习次数为 100 进行功率预测。

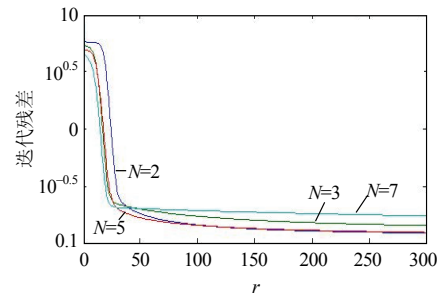


图 3 神经网络参数对建模结果的影响
Fig. 3 The influence of neural network parameters on the modeling results

4 风电功率预测系统结构与功能

4.1 区域风电功率预测系统硬件平台

内蒙古电网区域风电功率预测系统采用分布式结构，由数值气象预报系统和风电功率预测系统组成。系统硬件平台结构及与其他应用系统网络的连接情况如图 4 所示。

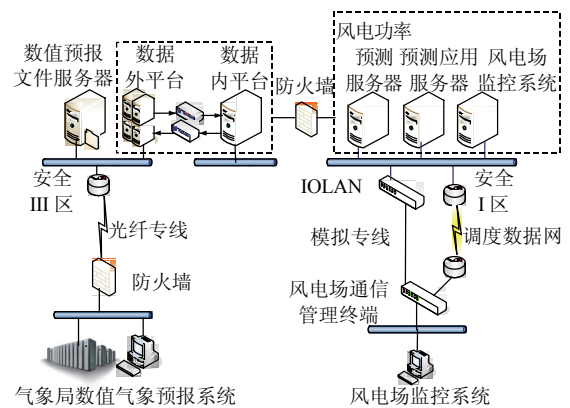


图 4 风电功率预测系统硬件平台
Fig. 4 Hardware platform of wind power forecasting system

4.2 数值气象预报系统

数值气象预报系统位于内蒙古气象局，预测平台采用曙光 TC4000L 计算机集群系统，使用 Linux 操作系统，是我国自己生产的具有自主知识产权、高性能、高稳定性、高可扩展性以及高可管理性等

特点的并行计算机集群系统。

系统配备 10 台双路 AMD4 核 Opteron 2376 与 14 台双路 AMD4 核 Opteron 2378 机架式节点，共计 192 个处理单元，每个处理单元配置 1G 内存，单处理器主频为 2.3GHz，系统理论峰值达 1.7664×10^{12} 次，实测 Linpack(线形测试标准)效率可达 83%，系统配置了单向 20GB 高速 Infiniband 计算网络和 GB 存储网络。

系统经防火墙与路由器等网络设备通过百兆光纤专线与内蒙古电网调度自动化系统电力安全分区 III 区网络相联。

4.3 风电功率预测系统

风电功率预测系统位于内蒙古电力公司调度通信中心自动化机房，主要由位于电力安全分区 III 区的 1 台 NWP 文件服务器、位于 I 区的 1 台风电功率预测服务器和 1 台预测应用服务器组成。

NWP 文件服务器和预测应用服务器使用高档企业级 PC 服务器，操作系统为 Windows Server 2003 企业版。风功率预测服务器采用 HP Alpha DS25，操作系统为 Tru64 Unix5.0b，数据库系统为商用关系数据库 Oracle 9.0。

4.4 系统间接口

与风电功率预测相关的各应用系统间数据传输流如图 5 所示。

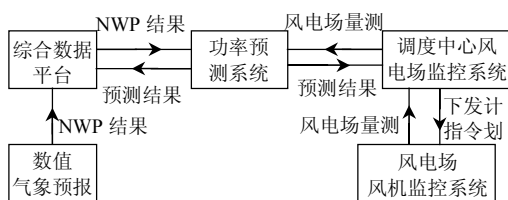


图 5 系统间数据传输流

Fig. 5 Data flow of wind power forecasting system

数值气象预报系统以国家气象局 T213 高度场、温度场和地面气压场的 48 h 格点资料为样本，定时对指定风电场所在区域进行数值气象预报，每天预测 2 次，上午 07:30 和下午 16:30 将预测结果形成 E 格式文本数据，通过本地服务器以 FTP 方式上传到调度通信中心 NWP 文件服务器指定目录下。

调度自动化综合数据平台经反向隔离设备每天定时将 III 区 NWP 文件服务器上的 E 格式文本数据传送到 I 区风电功率预测应用服务器，用于风电场功率预测。风电功率预测服务器定时从风电监控系统 SCADA 数据库读取风电场风机风速、风向、功率及风电场升压站主变高压侧有功功率实时量

测信息，从风电功率预测应用服务器读取 NWP 结果，进行风电场区域功率预测。

5 应用软件

5.1 MICAPS3.0 客户端程序

NWP 文件服务器上安装了我国气象预报业务系统 MICAPS3.0 客户端程序。MICAPS3.0 客户端程序^[9]可显示和处理基本气象观测数据、图形图像产品、数值预报格点资料，为绘制天气图和制作预报产品进行交互操作，并具有常用的资料处理工具。

通过调用 MICAPS 的 MM5 模式产品，调度员可以在图形化界面上在线查看内蒙古电网各风电场所在区域实时风速、风向、气压、降水、温度等数值预报结果。

5.2 风电功率预测应用软件

风电功率预测系统应用软件包括功率预测功能模块和人机界面功能模块。功率预测功能模块位于风电功率预测数据库与应用服务器，是系统的核心模块，人机界面功能模块运行于风电功率预测工作站，是预测系统人机界面接口。功率预测功能模块由人机界面功能模块定时调用启动运行。

风电预测软件可对单个风电场整场功率、指定区域风电功率总和及全网风电功率总和进行短期和超短期预测，也可对日前发电曲线日前总发电量进行预测。

人机界面管理系统为调度员、预报员、系统维护人员等提供了内容丰富、操作灵活方便的人机接口。通过人机界面系统，调度员可查看到全网日前预报结果、超短期预报结果、全网实时风电运行状况、全网实时风资源分布状况，还可通过导航界面查看到各区域、各风场、甚至各风机当前的运行状态和预测结果。

预报员可利用基础数据服务查询历史数据、NWP 数据，通过建模向导界面选择算法，训练模型，设置默认预测方案；也可以查看已有的预测结果，并对其误差分析，生成报表。

系统维护人员可以查看预测系统子模块是否正常运行、运行日志和升级系统等。

系统可以将预测结果通过综合数据平台，经物理隔离设备传送到 III 区，用于编制发电计划、市场交易和 Web 发布。

6 功率预测结果及误差分析

考虑到功率预测所需风电场实测数据与数值

气象预报数据的完整性,采用本文的系统对投运的华电辉腾锡勒、京能辉腾锡勒和包头龙源巴音3个风电场进行了单个风电场在线短期和超短期风电功率预测。3个风电场风机台数分别为120、134、134台,装机容量分别为121.5、100.5和201 MW。风电场功率输出模型误差约为3%,系统预测相对方均根误差约为22%。研究表明:风电场功率预测的误差主要来自NWP,来自NWP的误差会严重影响预测系统的预报精度,是整个风功率预测系统最大的误差环节。

针对京能辉腾锡勒风电场,本文对功率输出模型进行了整场建模和单机建模,误差比较结果如图6所示。由图6可知,对于风机类型单一、风速相关度很强的风电场,整场建模精度明显优于单机建模精度。

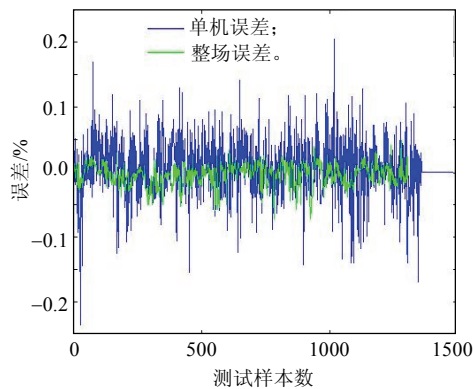


图6 整场和单机建模的误差比较

Fig. 6 Modeling error comparison between the whole wind farm and the single wind turbine

4种条件下功率预测模型的误差见表1。表中:条件1为单机建模;条件2为整场建模,仅考虑风速,未经系统误差校正;条件3为整场建模,考虑风速、风向、气温,未经系统误差校正;条件4为整场建模、考虑风速、风向、气温,经过系统误差校正。由表1可知,考虑风速、风向、气温等因素,对预测误差进行修正,风电场功率预测模型精度可进一步提高。

表1 4种条件下功率预测模型的误差

Tab.1 Errors of power forecasting model under four cases

建模条件	相对误差均值/%	相对均方根误差/%
1	-0.9	3.0
2	-0.6	1.5
3	0.7	1.3
4	0.7	0.9

7 结语

内蒙古西部电网区域功率预测系统自投运以

来运行稳定,基本达到设计预期目标,但由于气象局提供的NWP预报业务时间短,历史数据积累不多,数据误差较大,且未进行人工修正,功率预测系统预测误差偏大。目前正在进一步开展降低NWP预报误差的研究工作,通过修正数值气象预报误差,减小预测误差,提高预测精度,使功率预测系统达到实用标准,以期为内蒙古地区和全网的风电功率预测工作打下基础,为内蒙古电网大规模风电场调度运行管理提供技术支持。

参考文献

- [1] 国务院. 中化人民共和国可再生能源法[R]. 北京: 国务院, 2006.
- [2] Andrew B. Simulation of short-term wind speed forecast errors using a multi-variate ARMA(1,1) time-series model[D]. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, 2005.
- [3] 吴国扬, 肖洋, 翁莎莎. 风电场短期风速预测探讨[J]. 吉林电力, 2005(6): 21-24.
Wu Guoshang, Xiao Yang, Weng Shasha. Discussion about short-term forecast of wind speed on wind farm[J]. Jilin Electric Power, 2005(6): 21-24(in Chinese).
- [4] 丁明, 张立军, 吴义纯. 基于时间序列分析的风电场风速预测模型[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(8): 32-34.
Ding Ming, Zhang Lijun, Wu Yichun. Wind speed forecast model for wind farms based on time series analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(8): 32-34(in Chinese).
- [5] Barbara G B, Richard W K, Allan H M. Time series models to simulate and forecast wind speed and wind power[J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1984(23): 1184-1195.
- [6] Lexiadis M A, Dokopoulos P, Sahsanoglou H, et al. Short term forecasting of wind speed and related electrical power[J]. Solar Energy, 1998, 63(1): 61-68.
- [7] 孙春顺, 王耀南, 李欣然. 小时风速的向量自回归模型及应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(14): 112-117.
Sun Chunshun, Wang Yaonan, Li Xinran. A vector autoregression model of hourly wind speed and its application in hourly wind speed forecasting[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(14): 112-117(in Chinese).
- [8] Bossanyi E A. Short-term wind prediction using kalman filters[J]. Wind Engineering, 1985, 9(1): 1-8.
- [9] 王耀南, 孙春顺, 李欣然. 用实测风速校正的短期风速仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(11): 94-100.
Wang Yaonan, Sun Chunshun, Li Xinran. Short-term wind speed simulation corrected with field measured wind speed[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(11): 94-100(in Chinese).
- [10] 潘迪夫, 刘辉, 李燕飞. 基于时间序列分析和卡尔曼滤波算法的风电场风速预测优化模型[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 82-86.
Pan Difu, Liu Hui, Li Yanfei. A wind speed forecasting optimization model for wind farms based on time series analysis and kalman filter algorithm[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 82-86(in Chinese).
- [11] 杨秀媛, 肖洋, 陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中

- 国电机工程学报, 2005, 25(11): 1-5.
- Yang Xiuyuan, Xiao Yang, Chen Shuyong. Wind speed and generated power forecasting in wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 1-5(in Chinese).
- [12] Kariniotakis G N, Stavrakakis G S, Nogaret E F. Wind power forecasting using advanced neural networks models[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1996, 11(4): 762-767.
- [13] Sfetsos A. A comparison of various forecasting techniques applied to mean hourly wind speed time series[J]. Renewable Energy, 2000(21): 23-35.
- [14] 罗海洋, 刘天琪, 李兴源, 等. 风电场短期风速的混沌预测方法[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 67-71.
- Luo Haiyang, Liu Tianqi, Li Xingyuan, et al. Chaotic forecasting method of short-term wind speed in wind farm[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 67-71(in Chinese).
- [15] 刘纯, 范高锋, 王伟胜, 等. 风电场输出功率的组合预测模型[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 74-79.
- Liu Chun, Fan Gaofeng, Wang Weisheng, et al. A combination forecasting model for wind farm output power[J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 74-79(in Chinese).
- [16] 范高锋, 王伟胜, 刘纯. 基于神经网络的风电功率短期预测系统[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 82-86.
- Fan Gaofeng, Wang Weisheng, Liu Chun. Artificial neural network based wind power short term prediction system[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 82-86(in Chinese).
- [17] 马彦宏, 汪宁渤, 刘福潮, 等. 甘肃酒泉风电基地风电预测预报系统[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(16): 88-90.
- Ma Yanhong, Wang Ningbo, Liu Fuchao, et al. A wind power forecast system for jiuquan wind power base in Gansu province[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(16): 88-90(in Chinese).
- [18] 国家电力调度中心. 电力系统数据标记语言: E 语言规范[R]. 北京: 国家电力调度通信中心, 2008.
- [19] 中国气象局. MICAPS 3.0 用户手册[R]. 北京: 中国气象局, 2008.



收稿日期: 2010-08-21。

作者简介:

白永祥(1964), 男, 高级工程师, 主要从事 EMS 能量管理系统运行管理、大规模风电场功率预测和在线监控方面的研究工作, E-mail: nmbyx@126.com;

白永祥

房大中(1947), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析与控制方面的研究工作;

侯佑华(1969), 男, 高级工程师, 主要从事电网调度管理与大规模风电场并网技术等方面的研究工作;

朱长胜(1963), 男, 高级工程师, 主要从事 EMS 能量管理系统运行管理、大规模风电场功率预测和在线监控等方面的研究工作。

(责任编辑 杜宁)