

## 基于运行数据的风电机组建模方法

苏勋文<sup>1,2</sup>, 米增强<sup>1</sup>, 陈盈今<sup>1</sup>, 刘力卿<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003;  
2. 黑龙江科技学院电气与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150027)

**摘要:** 为了准确分析风电机组的动态特性, 针对定速风电机组, 给出一种基于运行数据的风电机组建模方法。利用数理统计方法分析了风电场中风电机组的运行数据, 得出风电机组的实测功率曲线, 并给出利用实测功率曲线搭建定速风电机组的建模方法。利用该方法对额定容量为 750 kW 的风电机组进行建模, 并与风电场的实测数据和利用厂家提供的标准功率曲线搭建的风电机组模型以及常用风电机组建模方法进行了比较分析。仿真结果表明, 基于实测运行数据的风电机组建模方法是有效和实用的, 该模型能准确反映风电机组的实际运行特性, 从而提高仿真模型的精确性。

**关键词:** 定速风电机组; 建模; 运行数据; 功率曲线; 概率

### Method for modeling wind turbines based on operating data

SU Xun-wen<sup>1,2</sup>, MI Zeng-qiang<sup>1</sup>, CHEN Ying-jin<sup>1</sup>, LIU Li-qing<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;  
2. College of Electric and Information Engineering, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China)

**Abstract:** For accurately analyzing the dynamic characteristics of wind turbine, a wind turbine modeling method based on operating data is proposed for fixed-speed wind turbines. By means of mathematical statistics method, the operational data of wind turbine of wind farm is analyzed. Then the measured power curve of wind turbine is obtained. The method for modeling fixed-speed wind turbines is provided by the use of the measured power curve of wind turbine. Wind turbine with rated power 750 kW is modeled by this method. Through simulation analysis and comparison with the wind farm measured data, the model of using normal power curve from manufacturer and the general method for modeling wind turbine, results show that the modeling method for fixed-speed wind turbine based on the measured operational data is valid and practical. It can response accurately actual operation characteristics of wind turbine, and improve the accuracy of simulation model.

**Key words:** fixed-speed wind turbines; modeling; operating data; power curve; probability

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)09-0050-05

## 0 引言

随着风电技术的快速发展, 风力发电在电力系统中比重的持续增加, 其对电网的影响不容忽视。为分析风电机组接入电网引起的电能质量、功率平衡以及系统稳定等问题<sup>[1-3]</sup>, 风电机组的准确建模研究是关键的基础性研究课题。模型和参数的准确度将直接关系到风电系统优化运行和电网的安全稳定, 需要能准确反映风电机组实际运行特性的仿真模型<sup>[4-5]</sup>。本文主要研究定速风电机组仿真模型的建模方法。

由于风电机组的生产厂家、安装位置不同等原因, 风电机组的输出特性也各不相同。国外一般要

求厂家在专门软件包中提供自己的风电机组模型<sup>[5]</sup>, 但国内的生产厂家只提供少量参数, 很少在专门软件包中提供风力机的详细参数和风电机组模型。目前一般利用仿真软件中已有的模型来近似仿真风电机组特性<sup>[6-7]</sup>, 这将对仿真分析风电场的实际运行特性造成一定的误差。为此, 本文给出一种利用实际运行数据进行风电机组建模的实用方法。图 1 给出了 750 kW 定速风电机组的标准功率曲线。该曲线是在标准工况下, 按照国际电工委员会的 IEC61400-12-1 标准得出的风速与功率的一一对应关系<sup>[8]</sup>。

实际上, 由于实际风电场的地形地貌以及联网运行的风电机组经常处于风速和风向以及运行工况的不断变化中, 其实际运行状况并不一定完全遵循厂家给定的标准功率曲线<sup>[9]</sup>, 而是以一定的概率分

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20090036110006)

布在标准功率曲线的附近。为了准确分析风电机组的动态特性, 本文利用风电机组的运行数据和数理统计方法求出风电机组的实测功率曲线, 并给出利用该功率曲线搭建定速风电机组的建模方法。通过仿真分析, 并结合风电场实测数据验证了建模方法的有效性。

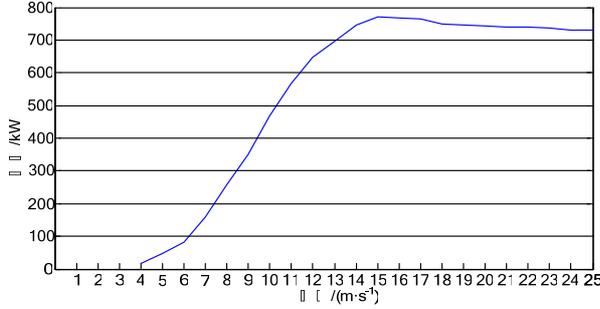


图1 厂家提供的风电机组标准功率曲线  
Fig.1 Normal power curve of wind turbine from manufacturer

## 1 定速风电机组数学模型

### 1.1 风力机特性的数学模型

风力发电机组空气动力学模型为:

$$T_t = 0.5\rho\pi R^2 v_w^3 C_p(\lambda, \beta) / \omega_t \quad (1)$$

$$\lambda = \omega_t R / v_w \quad (2)$$

式中:  $T_t$  为风电机组的机械转矩;  $\rho$  为空气密度;  $R$  为风机叶轮半径;  $v_w$  为风速;  $\omega_t$  为风力机的转速;  $\lambda$  为叶尖速比;  $\beta$  为桨距角;  $C_p$  为叶片的风能利用系数,  $C_p$  是  $\lambda$  与  $\beta$  的函数。

### 1.2 轴系模型

在电力系统仿真中, 风电机组的轴系模型通常由两质量块模型来表示<sup>[10-11]</sup>。其数学模型方程的标么值形式可表示为:

$$\begin{cases} 2H_t \dot{\omega}_t = T_t - K_s(\theta_r - \theta_t) - D_m(\omega_r - \omega_t) \\ 2H_g \dot{\omega}_r = -T_e + K_s(\theta_r - \theta_t) + D_m(\omega_r - \omega_t) \\ \dot{\theta}_t = \omega_t \\ \dot{\theta}_r = \omega_r \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $H_t$ 、 $H_g$  分别为风力机和发电机转子的惯性时间常数;  $T_e$  为发电机的电磁转矩;  $K_s$ 、 $D_m$  分别为轴系刚度系数和阻尼系数;  $\omega_r$  为发电机转子的转速;  $\theta_t$ 、 $\theta_r$  分别为风力机和发电机的角位移。

### 1.3 鼠笼感应电机模型

设模型中电压、电流正方向按发电机惯例, 定子电压相量与d轴重合, 即  $u_{qs}=0$ 。鼠笼感应电机在

d-q同步坐标轴系下的暂态电压电流方程标么值形式为(q轴超前d轴):

$$\begin{cases} u_{ds} = -R_s i_{ds} - \psi_{qs} + \dot{\psi}_{ds} / \omega_r \\ 0 = -R_s i_{qs} + \psi_{ds} + \dot{\psi}_{qs} / \omega_r \\ 0 = -R_r i_{dr} - s\psi_{qr} + \dot{\psi}_{dr} / \omega_r \\ 0 = -R_r i_{qr} + s\psi_{dr} + \dot{\psi}_{qr} / \omega_r \end{cases} \quad (4)$$

其中磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = -L_{ss} I_{ds} - L_m I_{dr} \\ \psi_{qs} = -L_{ss} I_{qs} - L_m I_{qr} \\ \psi_{dr} = -L_m I_{ds} - L_{rr} I_{dr} \\ \psi_{qr} = -L_m I_{qs} - L_{rr} I_{qr} \end{cases} \quad (5)$$

式中: 下标 s、r 分别代表定子和转子; s 为滑差; 定子  $R_s$ 、 $R_r$  分别为定子和转子电阻;  $L_{ss}$ 、 $L_{rr}$  分别为定子和转子自感;  $L_m$  为定子和转子互感。

## 2 基于运行数据求取实测功率曲线

随机抽取华北地区某风电场 A 区所有 750 kW 定速风电机组 2007 年 2 月 14 日到 2007 年 11 月 30 日的实际运行数据, 从中提取出风电机组的实测风速和输出功率 (其测风点在风机处, 数据取自每台机组的历史记录), 测量数据的平均采样间隔约为 30 s。按照采样时刻形成风速  $V_w$  与有功功率  $P_e$  的数据对, 并绘制成所有数据对的散点图。图 3 给出所有风电机组的风速-有功功率关系散点图, 为了便于比较, 将厂家给出标准风速-功率曲线也绘于图 2 中。

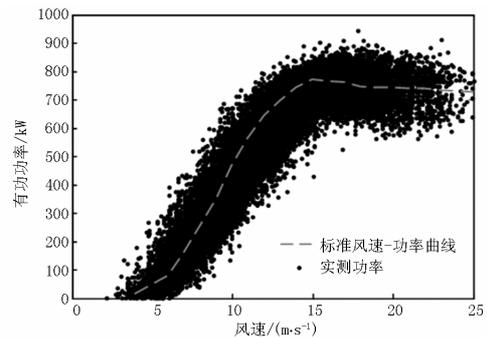


图2 标准风速-功率曲线与实测风速-有功功率散点图  
Fig.2 Normal  $V_w$ - $P_e$  curve and  $V_w$ - $P_e$  scatter diagram from operating data

从图2可以看出, 由于联网运行的定速风电机组处于不断变化的运行工况中, 风电机组并不是完全按照厂家给定的标准风速-功率曲线运行, 而是运行在一个以标准曲线为中心的较宽区域内, 因此厂家给出的标准功率曲线并不能很好地描述风电机组

的实际输入输出关系。实测的风速-功率数据对是以一定的概率分布在标准功率曲线的附近，可运用数理统计方法找出每一个风速下概率最大的功率值。将这些点连起来可得到概率最大的风速-功率曲线，并把其作为风电机组的实测风速-功率曲线。

求取实测风速-功率曲线的具体步骤为：

1) 利用风电机组历史记录得到所有同类型风电机组的风速-功率的数据对；

2) 采用基于数学形态学的滤波方法对原始数据进行预处理以减少测量误差，包括去除风速在 4 m/s 以下和 25 m/s 以上的数据对。

3) 该机型风电机组的切入风速为 4 m/s，切出风速为 25 m/s，风速的采样精度是 0.1 m/s，为此按照风速对所有风速-功率数据对进行分层处理，共分成 211 层；

4) 每一层的风速-功率数据对具有相同的风速，对于第  $i$  层( $i=1,2,\dots,211$ )数据对，将有功功率数据沿纵轴方向分为  $N$  个大小相等的分区，统计每个分区功率数据的出现概率，并找出出现概率最大的分区。假定出现概率最大的分区为 $(P_{i,\min}, P_{i,\max})$ ，取  $P_i = (P_{i,\min} + P_{i,\max})/2$ ，从而得到一对 $(V_{wi}, P_i)$ 。 $V_{wi}$  为第  $i$  层风速， $P_i$  为统计后第  $i$  层有功功率。对每一层中的数据对使用同样的方法，就可以得到 211 个风速-功率数据对，如图 3 所示。

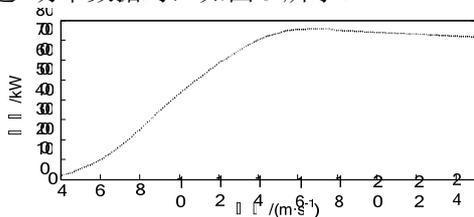


图 3 数理统计后实测风速-有功功率关系散点图  
Fig. 3  $V_w-P_e$  scatter diagram from operating data after mathematical statistics

5) 采用五次高斯拟合法对图 3 中的数据对进行处理，得到一条光滑的实测风速-功率曲线。图 4 对比了风电机组的实测风速-功率曲线和厂家给出的标准功率曲线。

从图4可以看出，当风电机组的风速小于10 m/s 时，两条功率曲线基本相同，实测的功率曲线略高于厂家给定的标准功率曲线；当风速在10~16 m/s 之间时，实测功率曲线明显低于标准功率曲线（误差约9%）；当风速高于16 m/s 时，实测的功率曲线略低于标准功率曲线。其潜在原因是，厂家给出的功率曲线是在标准工况下测得的，没有计及风电场

接入具体电网的运行状况、风电场地形地貌等因素的影响，因而与实测的功率曲线相比会产生一定误差。

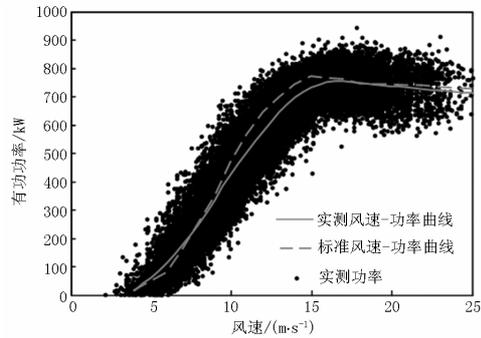


图 4 标准风速-功率曲线与实测风速-功率曲线  
Fig.4 Normal  $V_w-P_e$  curve and  $V_w-P_e$  curve from operating data

### 3 利用实测功率曲线建立风电机组模型

按不同的控制方式，可以把定速风电机组分为失速控制、主动失速控制和桨距角控制三种。由于我国以失速型定速风电机组为主，本文主要研究该机型的建模方法。利用第 2 节得出的实测功率曲线，可以求取风力机模型的实际风能利用系数，从而建立新的定速风电机组模型。

风电机组的机械力矩与机械功率的关系为

$$T_m = \frac{P_m}{\omega} \tag{6}$$

对于失速型风电机组，不考虑公式中的桨距角，利用式 (1) 和式 (6) 以及实测功率曲线，可得出尖速比和风能利用效率系数的对应关系为

$$C_p(\lambda) = 2P_t \omega_t / (\rho \pi R^2 v_w^3) \tag{7}$$

式中： $P_t$  为风速为  $v_w$  下的风电机组输出功率，该值可利用图 4 的拟合函数得到； $\omega_t$  为风力机转速。

利用式 (2) 和风电机组的出厂参数，可得尖速比和风速的对应关系为

$$\lambda = 2\pi n \omega_t R / (60v_w) \tag{8}$$

式中： $n$  为叶轮转速； $\omega_t$  为风力机转速。当近似计算时，式 (7) 和式 (8) 中的  $\omega_t$  可取 1；当精确计算时，可先根据风电场接入的实际电网，搭建仿真模型，通过仿真得到每个风速下对应的转速，再将其代入求取对应的尖速比和风能利用系数。

利用求取的风能利用系数和查表法建立风力机模型，并结合轴系模型和控制模型，完成定速机组模型的建立。图 5 给出了基于运行数据的建模方法搭建的失速型风电机组仿真模型结构图。

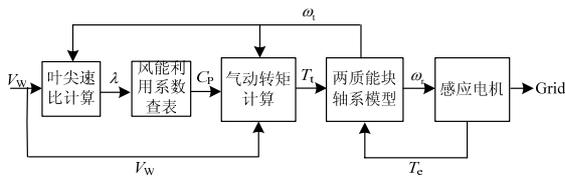


图5 失速型风电机组仿真模型结构图

Fig.5 Structure of simulation model of a stall-controlled wind turbine

## 4 仿真验证

### 4.1 风电场及系统参数

利用PSCAD仿真工具建立了基于运行数据的风电机组模型, 结合风电场实测运行数据对华北地区某风电场A区的6台额定容量为750 kW定速风电机组进行仿真验证。仿真模型的结构如图6所示, A区6台750 kW失速型风电机组经并联电容器组、机端变压器(10.5 kV/690 V)和电缆连接于PCC, 并通过风电场出口变压器(110 kV/10.5 kV)和架空线路连接到外部电网。风电场其它分区的风电机组等效成一台等值风电机组连接到PCC(等值机容量为其他分区的风电机组容量之和), 并利用仿真验证期间内所有机组实测有功功率的合成和功率曲线反推出等值风机的等效风速。图中风力机、发电机和变压器等参数见表1。

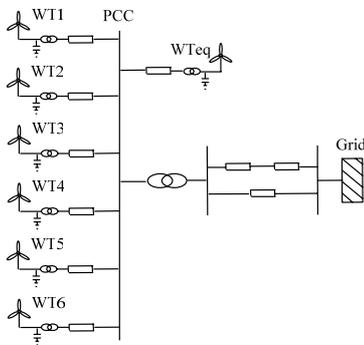


图6 算例单线示意图

Fig.6 Single line diagram of example

表1 风电机组的电气参数

Tab.1 Electric parameters of wind turbine

发电机参数	额定功率/kW	750	额定电压/V	690
	额定频率/Hz	50	$R_s$ /pu	0.010 3
	$X_s$ /pu	0.017 18	$X_m$ /pu	7.8
	$R_r$ /pu	0.11	$X_r$ /pu	0.124
风力机参数	$H_f$ /s	2.5	$H_g$ /s	0.5
	$K$ /pu	113	$D$ /pu	0
机端变压器	$S$ /MVA	0.85	$X_l$ /pu	0.045
出口变压器	$S$ /MVA	50	$X_l$ /pu	0.1
风电机组补偿电容容量/ $\mu$ F			1 230	

### 4.2 两种功率曲线搭建的仿真模型比较

分别搭建了基于运行数据的定速风电机组模型和利用标准功率曲线建立的风电机组模型。由于风速的平均采样时间约为30 s, 不便于进行模型的仿真验证, 为此, 从历史记录中连续取出30个采样点的风速-功率数据对, 并把采样时间间隔缩短为1 s, 即仿真验证30个采样数据对, 其模型仿真时间为30 s。图7给出了1号风电机组的风速曲线、基于实际运行数据模型的输出特性曲线以及基于厂家功率曲线模型的输出特性曲线。

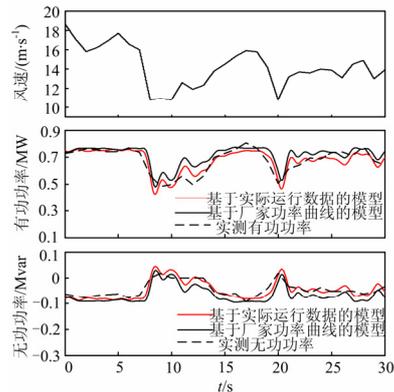


图7 1号风电机组的输出特性比较

Fig.7 Output characteristics comparison of wind turbine No.1

从图7可以看出, 当风速较大时, 两种仿真模型的输出特性基本一致; 当风速在10~15 m/s时, 基于运行数据的风电机组模型的结果与实测功率更加接近, 该模型优于基于厂家功率曲线的模型。

但注意到, 基于运行数据的风电机组模型仿真结果与实测功率也存在一定的误差。误差产生的原因有三个: 1) 实测功率按一定的概率分布在功率曲线附近, 因此很难得到与实测功率完全一致的仿真曲线; 2) 由于仿真中改变采样时间30 s为1 s, 风电机组的惯性时间常数会造成一定的误差; 3) 由于并联电容器组的投切而造成的无功功率误差。电容器的投切控制与输出有功功率的变化方向有关, 由于平均采样时间为30 s, 难以捕获有功功率的变化方向, 因此仿真时采用固定电容器补偿。从图8的无功功率曲线可以看出, 当风电机组的输出有功功率降低时(如8 s和20 s), 由于一组电容器的退出运行而造成的模型仿真结果与实测无功功率的误差。

图8给出了基于实际运行数据模型的6台风电机组合成输出特性曲线和基于厂家功率曲线模型的6台风电机组合成输出特性曲线。

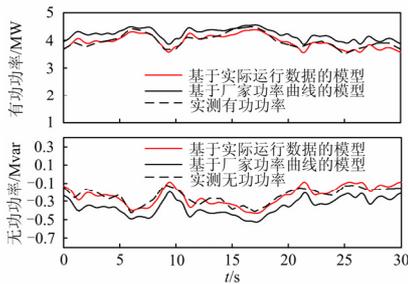


图 8 6 台风电机组的输出特性比较

Fig.8 Output characteristics comparison of six wind turbines

从图7和图8的对比可以看出，当仿真的风电机组台数增多时，由于统计特性，使得仿真误差减少，基于实际运行数据的风电机组模型仿真结果更加接近于实测数据，并且明显优于基于厂家功率曲线的模型仿真结果。

### 4.3 与常用风电机组建模方法的比较

在常用电力系统分析软件中，定速风电机组的常用建模方法是利用解析法近似建立风力机模型，并结合轴系模型、控制模型和发电机模型搭建风电机组模型。与前一算例的仿真条件相同，图 9 给出了 1 号风电机组的基于实际运行数据搭建模型和基于常用方法建立的风电机组模型的输出特性曲线，图 10 给出了 6 台风电机组合成的基于实际运行数据搭建模型和基于常用方法建立风电机组模型的输出特性曲线。

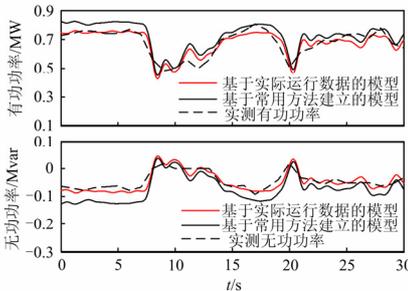


图 9 1 号风电机组的输出特性比较

Fig.9 Output characteristics comparison of wind turbine No.1

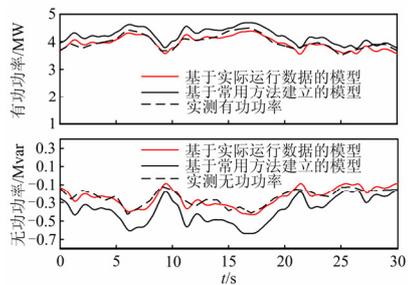


图 10 6 台风电机组的输出特性比较

Fig.10 Output characteristics comparison of six wind turbines

从图9和图10的对比可以看出，相比常用风电机组建模方法，基于运行数据的风电机组模型仿真结果更接近于风电机组的实际运行特性。

## 5 结论

本文提出一种基于运行数据的定速风电机组建模方法。该方法利用统计学方法，通过分析风电场中风电机组的运行数据，得出风电机组的实测功率曲线，并利用该功率曲线建立定速风电机组模型。仿真结果表明，基于运行数据的定速风电机组模型能准确反映风电机组的实际运行特性，且明显优于基于标准风速-功率曲线的方法和常用风电机组建模方法，提出的建模方法能够显著提高仿真模型的精确性。

## 参考文献

- [1] Chen Z. Issues of Connecting Wind Farms into Power Systems[A].in: IEEE/PES Transmission and Distribution Conference& Exhibition: Asia and Pacific[C]. Dalian(China): 2005.
- [2] 洪敏, 李兴源. 双馈风力发电机的小信号稳定分析及其控制研究[J]. 继电器, 2007, 35(14):1-6.  
HONG Min, LI Xing-yuan. Analysis of Small-signal Stability and Control Strategy of the Grid Integrated Wind Plant based on DFIG[J]. Relay, 2007, 35(14):1-6.
- [3] 迟永宁, 关宏亮, 王伟胜, 等. SVC 与桨距角控制改善异步机风电场暂态电压稳定性[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(3): 95-100.  
CHI Yong-ning, GUAN Hong-liang, WANG Wei-sheng, et al. Enhancement of Transient Voltage Stability of Induction Generator Based Wind Farm by SVC and Pitch Control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3):95-100.
- [4] 包能胜, 徐军平, 倪维斗, 等. 大型风电场失速型机组等值建模的研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(11):1284-1289.  
BAO Neng-sheng, XU Jun-ping, NI Wei-dou, et al. Investigation of Equivalent Modeling of Multiple Stall Wind Turbine System on Larges Scale Wind Farm[J]. Acta Energaie Solaris Sinic, 2007, 28(11): 1284-1289.
- [5] 雷亚洲, Gordon Lightbody. 国外风力发电导则及动态模型简介[J]. 电网技术, 2005, 25(12): 28-32.  
LEI Ya-zhou, Gordon Lightbody. An Introduction on Wind Power Grid Code and Dynamic Simulation[J]. Power System Technology, 2005, 25(12): 28-32.
- [6] 李东东, 陈陈. 风力发电机组动态模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3):115-119.

(下转第 71 页 continued on page 71)

系统真实出现过的问题往往比事故设想更能暴露出薄弱点所在。应对这些已有经验和案例进行总结、分析、归纳, 形成预案安全知识库, 对于高效而科学地进行应急处理具有重要作用。

## 6 结语

根据本文的研究成果共建立了 19 个应急预案, 涉及 EMS、DMIS、TMR 系统。实践表明: 科学化和本地化是应急预案实用化的有效手段。调度自动化系统应急预案的实用化涉及到多方面的因素, 除了预案本身要实用, 还必须在配套管理措施诸如预案演练上给予配套支撑。本文的研究成果可望有助于类似系统应急预案的实用化。

## 参考文献

- [1] 蔡春元. 电网调度自动化系统的安全运行问题探讨[J]. 继电器, 2005, 33(7): 66-69.  
CAI Chun-yuan. Discussion on the Safety Operating of Electric Power Network Dispatching Automation System[J]. Relay, 2005, 33(7): 66-69.
- [2] 熊文. 广州电网调度自动化系统容灾备份研究[J]. 继电器, 2004, 32(20): 60-62.  
XIONG Wen. Research of Disaster Recovery and Backup of Guangzhou Power Network SCADA System[J]. Relay, 2004, 32(20): 60-62.
- [3] Sinclair K C C S M. A Case Study Example of the Role Matrix Technique[J]. Project Management, 2006, 24: 506-515.
- [4] 刘吉夫, 张盼娟, 陈志芬, 等. 我国自然灾害类应急预案评价方法研究(II): 责任矩阵评价[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(4): 5-11.

案评价方法研究(II): 责任矩阵评价[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(4): 5-11.

- LIU Ji-fu, ZHANG Pan-juan, CHEN Zhi-fen, et al. Study on Evaluation Method of Natural Disaster Emergency Plan in China(Part II): Responsibility Matrix Evaluation[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(4): 5-11.
- [6] 吴宗之, 刘茂. 重大事故应急预案分级、分类体系及其基本内容[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(1): 15-18.  
WU Zong-zhi, LIU Mao. Gradation and Categorization System of Emergency Plan for Major Accidents and Their Main Contents[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(1): 15-18.
- [7] 刘吉夫, 张盼娟, 陈志芬, 等. 我国自然灾害类应急预案评价方法研究(I): 完备性评价[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(2): 5-11.  
LIU Ji-fu, ZHANG Pan-juan, CHEN Zhi-fen, et al. Study on Evaluation Method of Natural Disaster Emergency Plan in China(Part I): Completeness Evaluation[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(2): 5-11.

收稿日期: 2009-06-08

作者简介:

高明(1978-), 男, 硕士, 从事 EMS 运行工作及电力系统分布式计算研究; E-mail: gaoyugui0508@163.com

李文云(1965-), 男, 教授级高级工程师, 从事电网运行管理及电力系统稳定分析研究工作;

袁德君(1966-), 男, 高级工程师, 从事 EMS 运行管理工作。

(上接第 54 页 continued from page 54)

- LI Dong-dong, CHEN Chen. A Study on Dynamic Model of Wind Turbine Generator Sets[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3):115-119.
- [7] 钱少锋, 林俐, 沈辉, 等. 基于 PSS/E Wind 大型风电场并入输电网的动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(6):11-16.  
QIAN Shao-feng, LIN Li, SHEN Hui, et al. Dynamic Characteristic Analysis of Transmission Grid Including Large Wind Farm by PSS/E Wind Package[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(6):11-16.
- [8] International Electrotechnical Commission. IEC61400-12-1 International Standard: Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines[S]. IEC, 2005.
- [9] 郎斌斌, 穆钢, 严干贵, 等. 联网风电机组风速-功率特性曲线的研究[J]. 电网技术, 2008, 32(12):70-74.  
LANG Bin-bin, MU Gang, YAN Gan-gui, et al. Research on Wind Speed vs Output Power Characteristic Curve of Wind Power Generator Interconnected with Power

Grid[J]. Power System Technology, 2008, 32(12):70-74.

- [10] Slooetweg J G, Polinder H, Kling W L. Representing Wind Turbine Electrical Generating Systems in Fundamental Frequency Simulation[J]. IEEE Trans Energy Converters, 2003, 18(4):516-524.
- [11] Ledesma P, Usaola J, Rodriguez J L. Transient Stability of a Fixed Speed Wind Farm[J]. Renewable Energy, 2003, 28(9): 1341-1355.

收稿日期: 2010-01-06; 修回日期: 2010-03-24

作者简介:

苏勋文(1976-), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为风电机组、风电场的建模与验证, 风力发电对电力系统的影响; E-mail: suxunwen@163.com

米增强(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为风电场建模与接入系统分析、风电场监控系统、风电场发电功率预测等;

陈盈今(1986-), 女, 硕士研究生, 研究方向为风电场建模, 风力发电对电力系统的影响。