

风电功率预报方法研究进展

王 勇,李照荣,李晓霞,张铁军

(兰州中心气象台,甘肃 兰州 730020)

摘 要:风电是可再生、无污染、能量大、前景广的能源,是世界各国的战略选择,中国蕴含着丰富的风电资源,但目前我国在风电预报方面的研究还很薄弱。鉴于国外风电预报已积累了一定的研究成果,通过简要介绍一些国内外风电预报方法,希望能对风电预报行业的发展起到一定的借鉴和促进作用。

关键词:风电预报;预报方法;风电模式

中图分类号:P425.6⁺3

文献标识码:A

引 言

风能是一种重要的自然资源,在世界能源日趋紧张的今天,风能作为一种清洁无污染的可再生能源已引起世界各国的高度重视,将成为未来能源的重要补充。风力发电已成为目前世界上最引人注目的新型能源^[1-3]。据估计,世界风能资源每年高达53万亿kWh,是2020年世界预期电力需求的2倍。中国是风能资源丰富的国家,仅次于俄罗斯和美国。我国陆上离地面10m高度层的风能资源总储量为32.26亿kW,其中实际可开发利用的风能资源储量为2.53亿kW^[4-5]。根据国家发展和改革委员会的规划,至2020年,我国国内总装机容量将达到2000~3000万kW,年发电量约为400~600亿kWh,这些都预示着我国将进入一个风能快速发展时期,为大规模的开发和利用带来了良好的条件^[6]。但也面临诸多问题,如有效能量密度低、时空差异大,单位体积内和单位时间内释放出来的能量小,具有季节的周期和日变化的波动性以及风向风速多变而导致输出电能功率不稳定,对电能质量、电网稳定性以及对保护装置影响极大,且一般风电项目往往处于电网潮流末端,风电功率的注入改变了局部电网的潮流分布,对电网调度也提出了很高要求,因此准确的风电功率预报便成了风电合理调配利用、风电市场管理及商业运营、保障电网稳定运行等的重要业务之一^[7-8]。

1 国外风电预报方法研究背景及现状

20世纪90年代初期,欧洲一些国家就已经开始研制开发风能预报系统并用于预报服务。预报技术多采用中期天气预报模式嵌套高分辨率有限区域模式和发电量模式对风电场发电量进行预报。如丹麦Risoe国家实验室的Prediktor预报系统和丹麦科学技术大学的WPPT(Wind Power Prediction Tool)^[9]风能预报。Prediktor由高分辨率有限区域模式HIRLAM(High Resolution Limited Area Model)、WASP(Wind Atlas Analysis and Application Program)和发电量计算模式Risoe Park组成,HIRLAM在大尺度天气预报数值模式分析场的驱动下预报局地风速,WASP根据局地风速预报风电场范围内的风速,Risoe Park则在预报风速基础上的风电场发电量。该预报系统目前已用于丹麦、西班牙、爱尔兰和德国的短期风能预报业务。1990年代中期以后,美国True Wind Solutions公司也开始商业化的风能预报服务。他们开发的风能预报软件EWind^[10-11]。是由高分辨率的中尺度气象数值模式和统计学模式构成的,使用的中尺度天气预报模式有MM5(Mesoscale Model)、MASS(Mesoscale Atmospheric Simulation System)、WRF(The Weather Research and Forecasting Model)或OMEGA(The Operational Multi-scale Environment model with Grid Adaptivity)。统计模式多为多元线性回归和神经网络。EWind预报

收稿日期:2010-11-15;改回日期:2011-04-08

基金项目:甘肃省科技支撑计划“甘肃省风电功率预报技术与开发”(1011GKCA028)资助

作者简介:王勇(1980-),男,甘肃白银人,工程师,从事天气预报业务研究。E-mail:feihu163@163.com

风电场的风向风速,并转换成发电量。EWind 和 Prediktor 目前在美国加利福尼亚同时为 2 个大型风电场发布预报服务^[12]。

2002 年 10 月,欧盟委员会资助启动了“为陆地和离岸大规模风电场建设发展下一代风资源预报系统”(ANEMOS)计划,目标是发展优于现有方法的、先进的预报模式,重点强调复杂地形和极端气象条件下的预报,同时也发展近海风能预报^[13-14],数值模式针对复杂地形发展基于 CFD(Computation Fluid Dynamics)、MOS(Model Output Statistics)或高分辨率气象模式的预报技术,最后将数值预报、统计预报和纯粹的天气预报相结合进行预报试验。加拿大的风能资源数值评估预报软件 WEST 是将中尺度气象模式 MC2 与 WAsP 相结合制作分辨率为 100~200 m 的风能图谱并进行预报^[15-16]。目前用于风能业务预报的系统还有德国的 Previento^[17]、西班牙的 LocalPred 和 RegioPred^[18]、爱尔兰与丹麦的 HIRP-OM^[19-20]等。

2 国内及甘肃风电预报方法研究背景及现状

我国拥有丰富的风能资源储量^[21-22],风电场风能预报工作虽然开展较晚,但发展较快。国家气候中心于 2006 年就开展了风电场风电功率短期预报技术的研究开发工作,并于 2007 年得到国家“863”计划资助。目前,中国气象局主要部署了 4 套方案:一是以公共气象服务中心研制的、以甘肃北大桥风电场风电功率预报示范系统为例,在全国 10 省开展风电功率预报系统建设;二是由中国气象局公共气象服务中心、部分省气象局、电网公司、中国电科院和国网电科院、科研院校等 12 家单位通过产、学、研相结合的方式开展的复杂地形风电功率预报系统的研制;三是在我国北方 4 个区域推广应用的基于 BJ-RUC 与小尺度动力模式相结合的风电预报系统;四是尝试与美国 NCAR 中心联合开发基于 WRF-RTFDDA-LES 的风电功率预报系统,该项工作正在洽谈推进之中。

甘肃风能资源丰富,利用前景广阔。甘肃省气象局高度重视酒泉风电基地风电预报研究工作,已开展多个项目研究,并以实现业务服务化,和甘肃省电力公司风电技术中心合作交流,开展酒泉风电基地风电预报研究工作。主要有以下方法:统计方法。通过研究风场上下游站点间的相关特性,寻求通过

上下游风要素的相关关系,达到得到上游风情变化信息时,提前、实时预报下游区域风情的目的;模式方法。通过基于 T639 全球谱模式同化资料,应用改进和优化的 WRF 中尺度数值预报模式,开展酒泉风电基地风电场 101~20 m 间隔 10 m 各高度层风速预报。预报时效 48 h,间隔 1 h,水平分辨率为 3 km。利用 CALMET 风场诊断模型,对 WRF 中尺度模式降尺度,提高预报能力和精度;利用 WRF-RUC 系统,应用 WRF3DVAR 变分同化技术,通过分析和循环,每天共计 8 次循环运行,实现超短时预报,研究风速的上下游效应和高低空效应,建立未来 0~3 h 风电基地风速预报方程;上下游关系。利用统计学方法,对酒泉风电基地风塔资料及气象测站、自动站资料进行分析,研究风塔风速时空变化规律及风速随高度变化特征,分析风塔风速与周围测站风速的上下游关系,找出上游指标站。从模拟情况来看,逐时风速预报模拟效果较好,可以反应出风速的变化、大小及趋势。模拟与实况一致性和相关性较好。模拟结果对风速变化的敏感性很难把握,就是说对风速的突然变化很难描述。模式模拟的结果整体上偏小,但也有偏大的情况发生。

3 风电预报方法介绍

目前风电场发电量短期预报的技术方法主要有统计预报和动力与统计结合的预报以及模式集合预报等。

3.1 统计预报

统计预报是最简单的一种风能预报方法,常用的有多元线性回归、理想的模糊逻辑和神经网络等方法。统计预报通过建立风电场大气资料和风电量输出资料之间的经验关系以及合理的经验系数,进行外推直接得到风电量预报值。Milligan^[23]等用自回归滑动平均(ARMA)方法进行预报,发现该方法可以有效地降低预报的均方根误差,效果较持续性预报要好,并将 1 h 预报提高至 6 h(接近纯统计预报方法的极限)。另外,应用上风向测站观测资料进行风电场预报,也可以降低风速或风能预报的均方根误差。例如,Kristin 等^[24]利用沿着哥伦比亚河谷的 4 座气象观测塔资料,对 Vansycle 测站(处于最下游)的风速和风能进行了预报研究,发现结合上风向的观测资料能降低风能预报的均方根误差,极大地改善预报效果。

但是,统计预报也有局限性,主要在于过分地依

赖于观测资料,观测资料的质量和长度是决定统计预报质量的重要前提条件^[25-27]。

3.2 动力预报

基于大气质量、动量、能量守恒以及大气状态方程等基本物理原理,模拟大气运动的计算流体力学模式(CFD),也称为物理大气模式(即动力学模式)。物理大气模式一般分为2种:预报模式和诊断模式。预报模式是用代表其物理原理的数学公式从某一初始状态向前预报的过程;诊断模式一般是用简化的物理方程,用已有资料的区域预报无资料区域的变量值,这种方法可以有效降低计算成本。数值天气预报(NWP)在风场预报中占很重要的地位,它可以提供风电场风场的变化背景,也可以为中尺度模式提供初始边界条件。在风能预报中多选择能够描述复杂地形或海陆边界的中尺度模式,如美国 NASA 的 MASS、美国 PSU/NCAR 的 MM5、美国 NCARWRF、美国的 OMEGA、加拿大大气环境局的 MC2、丹麦的 KAMM、美国 NOAA 的,美国的 CFD 以及丹麦 Risø 的描述线性流场变化的 WAsP 模式。

3.2.1 动力降尺度

在地形相对平坦或起伏不太大的下垫面条件下,NWP 模式的预报效果相对较好,但是,因分辨率较低,并不适用于复杂地形和沿海地区。在复杂地形或沿海地区,高分辨率物理模式对地形的描述比 NWP 更完善,如 5~10 km 分辨率的 NWP 模式在中尺度模式中可以提高到 500 m。所以,在 NWP 模式的驱动下,引入中尺度模式进行风电场区域预报,可以有效地改进只用 NWP 模式预报的不足,这种方法即所谓的动力降尺度方法。在诸多中尺度模式中,MM5、KAMM 及 RAMS 等较为常用。

3.2.2 统计降尺度

对大部分风电场而言,动力模式的分辨率仍然不能够精确到能具体描述风机风场的变化情况,采用统计降尺度方法能很好地弥补这一缺陷。一般情况下,可以直接用 NWP 模式或中尺度模式的输出结果,选取风机临近格点资料,用 MOS(Model Output Statistics)方法进行降尺度分析,得出风机位置风场的预报,进而得到风能的输出预报。与动力降尺度方法相比,统计降尺度的预报效果更好,例如,Giebel 等^[28-30]利用试验比较研究了 GFS Global Forecasting (System) + MOS 与 MM5 (3 km) + CFD + MOS 的风能预报误差,发现后者更能有效地提高风能预报的准确率。

3.2.3 集合预报

集合预报也是常用的一种有效的预报手段。所谓集合预报就是可以用同一模式不同的初始场产生预报结果,或用同一种初始场不同的模式产生预报结果,或用同一模式不同的物理过程产生预报结果,然后再通过不同的技术从不同的预报结果中产生最佳预报的统计模型。这种用不同的方法产生预报的集合模型,可以使不同方法之间的随机误差得以相互抵消,从而提高预报准确率。所以,集合预报的效果优于任何一种独立预报的效果,这是未来风能预报发展的必然趋势,但是目前用于风场的集合预报方法并不成熟。

3.3 风电场风能输出模式

Zack^[31]对风电场风能的输出做了比较详细的介绍:风电场输出模式能用来确定风电场气象变量和电场能量输出之间的关系,它可以由物理模式、统计模式或两者的混合模式来实现。统计模式中,最简单风电场输出是建立风电场气象塔观测的风速和总的电量输出之间的关系,形成相当于电场尺度的一个独立风机的功率曲线,这个简单的模型可以根据不同的风向进行扩展。在物理模式中,风电场内的风场变化、风与风机之间的相互作用以及相对于其他风机的尾流效应等都会在模式中进行模拟。当然,模式也需要风电场内风机的布局、地面特征(如地形、地表粗糙度等)以及风机的规格等比较详细的信息。

但是,由于模式中物理过程的简化假设、分辨率的限制或输入资料的不准确等,几乎所有的物理模式都可能会产生系统误差,所以,有必要用统计模型调整以去除由于物理模型中对电场输出所产生的系统误差。典型的风电场电量输出模型的应用是转化风电场中一个或多个气象测风塔的风速预报以至风电场的风功率预报,有时候也可以直接通过气象统计模型输出预报量。

3.4 预报检验

风能预报误差的检验分为绝对检验和相对检验。绝对检验提供的是独立于其他方法的预报系统的估量,如均方根误差(RSME)、平均绝对值误差(MAE)和中值误差(MDE)。相对检验是一个预报方法相对于其他方法性能的评估,比较典型的是参考持续性预报方法或气候预报方法,最常用的相对检验方法是对持续性预报方法的技巧评分。

另外,风能预报误差检验随着环境的不同其误

差频率分布也不同。有时 MDE 对外部环境不敏感时 RMSE 反而非常敏感,而 MAE 的敏感程度则介于二者之间。如果对预报的评估关系到用户利益问题时,可以通过统计方法将成本降低至最小的最优化的方法来评估。据美国纽约能源研究和发展权威部门研究,超短期预报的平均绝对误差为 5%~15%,且会随着预报时间的向前推移而迅速增加(增长速度为每小时装机容量的 1.5%),而短期预报的误差增长率就会降低到以 0.1% 的装机容量增长,这意味着提前 1~2 d 的预报误差为 13%~21%,而提前 3 d 以上的预报误差会上升到 20%~25%^[32]。

3.5 预报技术平台

Igo 等^[33]在 ANEMOS 计划的预报平台建设中指出,可用于业务运行的专业风能预报模型,主要依赖尖端的 IT 技术和安全的 inter 网络平台有效地运行。对这个预报平台的要求包括高效、高质量和高安全标准、明确定义和界面、独立性及在线的不确定性评估和其他的服务信息。

风能预报平台的结构需要几个部分:首先是隐藏于用户界面之下的资料库,包括稳定的资料、参数(如风场描述、风能曲线、地形及其时间序列),而且要通过 I/O 过滤,资料通过 email、sftp 或 SOAP/https 界面传输。其次是预报模型和其他服务类模型,风能预报模式包括物理模型、统计模型及物理统计模型;其他的模型包括具有在线的不确定性评估、预报风险、升尺度、自动组合、效益监测、安全检查、运行监控及运行系统的维护等功能的模型。最后是终端用户,针对不同的用户设计特殊的用户界面,如,环境设置(风能曲线、风场描述、预报模型参数及运行配置)、提供给用户预报结果(包括预报资料的时间序列曲线、图表或分布图)、结果分析(包括系统的运行轨迹、用于商业预报结果的收益等)。目前应用较为广泛的是可预报 12 h 的丹麦的 WPPT,后来增加了 HIRLAM 预报,它的预报时段向前增加到了 39 h。

4 小 结

目前国际上风电场发电量短期预报的技术方法主要有:统计预报和动力与统计结合的预报以及集合预报等方法。统计预报方法的预报实效只有几个小时,适用位于海岛或偏远地区的孤立的发电系统。动力与统计结合的预报系统是目前普遍采用的技术方法,适用于电网调度和电力市场管理,预报时段通

常为 0~48 h。实践证明,风电场风能预报的预报准确率 80%~90% 取决于数值天气预报,目前风电场短期风能预报系统都是采用中尺度数值预报模式进行降尺度,得到风电场范围 48 h 内每 10 min 到 1 h 间隔不等的数值天气预报。集合预报的效果优于任何一种独立预报的效果,这是未来风能预报发展的必然趋势,但是目前用于风场的集合预报方法并不成熟。我国风电预报工作开展较晚,但是近几年发展较快。随着百万千瓦级风电基地、千万千瓦级风电基地的规划及建设,急需一套行之有效的风电预报系统来满足风电上网调度的实际需求,为国家大力发展清洁能源的政策提供技术保障,这有待于更进一步的研究和开发。

参考文献:

- [1] 郭新生,赵知辛,唐桂华. 风能-流体升压节流致热效应的实验研究[J]. 太阳能学报,2004,25(12):157-161.
- [2] 齐瑞贵,李景春,李蕾. 风能致热系统研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2001,20(2):228-230.
- [3] 国家经贸委可再生能源发电及热利用研究项目组. 中国可再生能源技术评价[M]. 北京:中国环境科学出版社,1999. 15-16.
- [4] 朱飙,李春华,陆登荣. 甘肃酒泉区域风能资源评估[J]. 干旱气象,2009,27(2):152-156.
- [5] 刘全根. 国家能源结构调整的战略选择加强可再生能源开发利用[J]. 地球科学进展,2000,15(2):154-164.
- [6] 杨振斌,薛彬,袁春红,等. 用于风电场选址的风能资源评估软件[J]. 气象科技,2001(3):54-57.
- [7] 李登伟,张烈辉,郭了萍,等. 中国 21 世纪可替代能源和可再生能源[J]. 天然气工业,2006,26(5):1-5.
- [8] 陈达,张伟. 风能利用和研究综述[J]. 节能技术,2007,25(144):
- [9] Lars L, Watson S J. Short-term prediction of local indconditions [J]. Boundary-Layer Meteorology, 1994(70):171.
- [10] Lars L. Short-term prediction of the power production from wind farms[J]. J Wind Eng Ind Aerodyn, 1999(90):207-220.
- [11] Bailey B, Brower M C, Zack J. Short-term wind forecasting (IS-BN1 902916 X) [A]. Proceedings of the European Wind Energy Conference[C]. Nice, France, March 1-5, 1999: 1062-1065.
- [12] EPRI. California Wind Energy Forecasting System Development and Testing, Phase1: Initial Testing [R]. EPRI Final Report 1007338, Jan 2003.
- [13] Focken U, Lange M, Waldl H P. Previento—a wind power prediction system with an innovative upscaling algorithm [A]. Proceedings of the European Wind Energy Conference [C]. Copenhagen, Denmark, June 2-6, 2001:826-829.
- [14] Kariniotakis G, Moussafir J, Usaola J, et al. ANEMOS: Development of a Next Generation Wind Resource Forecasting System for the Large-Scale Integration of Onshore & Offshore Wind Farms [R]. European Wind Energy Conference & Exhibition EWEC 2003, Ma-

- drid, Spain*, 2003
- [15] Nielsen T S, Madsen H, Nielsen H A, et al. Short-term Wind Power Forecasting Using Advanced Statistical Models[R]. European Wind Energy Conference, 2006.
- [16] Pinard J P, Benoit R, Yu W A. West wind climate simulation of the mountainous Yukon[J]. *Atmosphere – Ocean*, 2005, 43 (3): 259 – 282.
- [17] Yu W, Benoit R, Girard C, et al. WindEnergySimulationToolkit (WEST): a wind mapping system for use by the wind-energy industry[J]. *Wind Engineering*, 2006, 30 (1): 15 – 33.
- [18] Marti P I. Windforecast ingactivities[A]. Proceedings of the First IEA Joint Symposium on Wind Forecasting Techniques [C]. Norrköping, Sweden: FOI – Swedish Defence Research Agency, 2002.
- [19] Jorgensen J, Moehrlén C, Gallagher B O, et al. HIRPOM: Description of an operational numerical wind power prediction model for large scale integration of on- and off-shore wind power in Denmark [A]. Poster on the Global Windpower Conference and Exhibition, Paris, France, April 2 – 5, 2002.
- [20] 中国气象局. 中国风能资源[M]. 北京: 气象出版社, 1981.
- [21] 薛桁, 朱瑞兆. 中国风能资源贮量估算[J]. *太阳能学报*, 2001, 22 (2): 167 – 170.
- [22] 中国气象局. 中国风能资源评估报告[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [23] Milligan M, Schwartz M, Wan Y. Statistical Wind Power Forecasting for U. S. Wind Farms[R]. Preprint of the conference "WIND-POWER2003", Austin, May 18 – 21, 2003.
- [24] Kristin A L, Tilmann G. Advanced Short-range Wind Energy Forecasting Technologies – Challenges, Solutions and Validation [R]. Preprint of the conference "Global Wind power", Chicago, March 28 – 31, 2004.
- [25] Pryor S C, Barthelmie R J. Comparison of potential power production at on- and off-shore sites[J]. *Wind Energy*, 2001, 4: 173 – 181.
- [26] 刘艳香, 陶树旺, 张秀芝. 风能预报方法研究进展[J]. *气候变化研究进展*, 2008, 14 (4): 209 – 214.
- [27] Kalnay E, Lord S J, McPherson R D. Maturity of operational numerical weather prediction: medium range[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79: 2753 – 2769.
- [28] Adrian G, Fiedler F. Simulation of unstationary wind and temperature fields over complex terrain and comparison with observations [J]. *Beitr Phys Atmosph*, 1991, 64: 27 – 48.
- [29] Giebel G, Badger J, Marti P I, et al. Short-term forecasting using advanced physical modeling – the results of the ANEMOS project [C]. European Wind Energy Conference, 2006: 1 – 29.
- [30] Frey-Buess F, Heimann D, Sausen R. A statistical-dynamical downscaling procedure for global climate simulations [J]. *Theor Appl Climatol*, 1995, 50: 117 – 131.
- [31] Zack J. Overview of Wind energy Generation Forecasting [R]. Albany, NY: True Wind Solutions / AWS Scientific, 2003: 1 – 23.
- [32] Tambke J, Lange M, Focken U, et al. Forecasting offshore wind speeds above the North Sea [J]. *Wind Energy*, 2005, 8: 3 – 16.
- [33] Igor W, Felix D, Georges K, et al. The Anemos Wind Power Forecasting Platform Technology – Techniques and Experiences [R]. European Wind Energy Conference, 2006.

Forecast Method Advances on Wind Electricity

WANG Yong, LI Zhaorong, LI Xiaoxia, ZHANG Tiejun

(Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Wind power is renewable, non-polluting and broad prospects, it is the strategic choice of countries in the world. Wind power resources are rich in China, but the forecasting of wind power is weak. In this paper the brief introduction of the wind power forecasting methods at home and abroad was made.

Key words: wind power; forecast; forecast model