

国外风电功率预测发展现状

■ 文 | 中国电力科学院

1. 国外风电功率预测的技术现状

风电功率预测系统在丹麦、德国、西班牙、美国等风电发达国家得到了广泛应用，并成为了风电优化调度的重要支持系统。目前风电功率预测系统在预测时间尺度上主要分为 0 ~ 4 小时的超短期功率预测和 0 ~ 48 小时的短期(日前)功率预测。随着研究和应用的不断深入，多模型组合预测、多数值天气预报组合预测等不断出现，预测精度不断提高。

1.1 丹麦

丹麦是世界上风电装机和风电发电量占总电力装机和发电量比例最高的国家，也是最早进行风电功率预测研究和系统开发的国家之一。早在 1990 年，丹麦 Risø 可持续国家能源实验室的学者 Las Landberg 采用类似欧洲风图集的方法开发了一套预测系统，其主要思想是把数值天气预报提供的风速、风向通过一定的方法转换到风电机组轮毂高度的风速、风向，然后根据功率曲线得到风电场的出力，并根据风电场的尾流效应对其进行修正。该系统采用丹麦气象研究所所提供的高精度有限区域模型

(HIRLAM) 作为预测系统的数值天气预报输入。从 1992 到 1999 年，这个模型在丹麦东部、爱尔兰电力供应委员会 (ESB) 以及爱荷华州进行了测试。Risø 实验室在此基础上开发了风电场功率预测系统 Prediktor，它主要使用物理模型，其大范围的空气流动数据是由 HIRLAM 提供。Prediktor 系统同时使用 Risø 实验室研发的 PARK 模型模拟风电场的尾流影响。另外，Prediktor 系统增加了两个模式输出统计 (MOS) 模块来表示未能在物理模型中表示出来的其它因素。该系统在丹麦、德国、法

国、西班牙、爱尔兰、美国等地的风电场得到广泛应用。

1992 年丹麦技术大学信息和数学建模学院 (IMM) 开发了基于统计方法的风电功率预测工具 WPPT，用于单个风电场、多个风电场或某一区域的风电功率预测。WPPT 系统能够给出未来 0~39 小时的预测结果以及预测的不确定性估计。1994 年该系统在丹麦西部电力公司投入运行，1999 年开始在丹麦东部电力公司运行。系统最初用适应回归最小平方根估计结合指数遗忘算法，后来加入 HIRLAM 模型，目前系统运行在





丹麦西部电力系统运营商、丹麦东部电力系统运营商、丹麦西部热电联产电厂和风电场运营商以及丹麦东部热电联产电厂和风电场运营商中使用。

Zephyr 系统是 Risø 实验室和 IMM 联合开发的新一代短期风功率预测系统。Zephyr 融合了 Prediktor 和 WPPT 的优点,可进行超短期预测(0 ~ 4 小时)和日前预测(未来 36 ~ 48 小时),时间分辨率为 15 分钟。Zephyr 系统中使用了在线实测数据和先进统计方法,使得它能够给出很好的短期预测。另外,Zephyr 系统中还加入了 HIRLAM 等气象模型,使得系统的长期预测精度有了较大提高。目前丹麦所有系统运营商都在使用该系统。

1.2 德国

目前,德国的风电装机容量居世界第三,其 2009 年最新修订的《可再生能源法》规定:包括风电在内的可再生能源可以无条件就近上网,电网运行商有义务提供技术上的保证。因此,输电网运营商和配电网运营商负责其各自系统的平衡,并且有义务接纳任何风电场的

上网电力,购买所有的风电上网电量。德国电网分为四个控制区,分别由四个输电系统运行商负责风电功率的平衡。为了使平衡风电的成本最小,同时保证四个输电系统运营商之间责任平等,德国法律要求风电在不同区域之间实时交换。为了确保风电

上网,日前和超短期风

电功率预测成为了电网调度部门必不可少的支持系统。德国四个输电系统运营商与德国太阳能研究所(ISET)联合开发了一套风电管理系统 WPMS。该系统包括在线监测、日前风电功率预测和超短期预测(15 分钟 ~ 8 小时)三部分,系统使用德国气象服务机构(DWD)的 Lokalmodell 模式作为数值天气预报数据源,采用人工神经网络计算典型风电场的功率输出,然后利用在线外推模型计算某区域注入到电网的总风电功率。其中,日前预测的时间分辨率为 15 分钟或 1 小时,预测未来 0 ~ 48 小时的输出功率,每天更新 2 次。超短期预测的时间分辨率为 15

分钟,预测未来 0 ~ 8 小时的输出功率,每小时更新 1 次。德国的四个输电系统运营商以及澳大利亚和意大利的系统运营商都在使用该系统。

Previento 是德国 Oldenburg 大学开发的一个预测系统,目前由能源和气象系统公司(EMSYS)负责营销。预测方法与 Risø 实验室开发的 Prediktor 系统类似,但它主要对一个较大的区域的风电输出功率进行预测,并估计预测的不确定性。系统同样使用德国气象服务机构(DWD)的 Lokalmmodell 作为数值天气预报数据源,预测的时间尺度为 48 小时。

1.3 西班牙

西班牙风电的发展得益于《电力法》和《皇家法案》。西班牙拥有一个成熟稳定的电力市场,鼓励风电积极参与市场竞争,并为风电提供政府补贴。LocalPred-RegioPred 是西班牙可再生能源中心(CENER)与西班牙能源、环境和技术研究中心(CIEMAT)联合开发的风电功率预测系统,该系统将高分辨率的中尺度气象模式与统计学模型相结合,预测未来 0-48 小时的功率输出。LocalPred 模型主要用于复杂地形风电场的预测,采用 CFD 算法,使用 MM5 中尺度气象模式作为数值天气预报生产模式。MM5 可以预测未来 72 小时所有相关气象要素,空间分辨率为 1km^2 。RegioPred 在 LocalPred 模型单个风电场预测的基础上,预测区域的功率输出。系统还包含超短期预测,通过线形 ARMA 模型实现。

西班牙 Casandra 系统是通过 CASNDRA 项目资助开发的风电功

率预测系统,该项目由 Castilla-La 大学的 MOMAC 项目组与 Gamesa 公司联合承担。MOMAC 成员开发了一个中尺度气象模型,然后利用基于模式输出统计技术的统计降尺度方法(SDM)对中尺度模型预测结果的系统误差进行修正。2002 年 9 月至 2003 年 3 月,Casandra 风电功率预测系统在西班牙的 2 个风电场进行了测试,预测的均方根误差均小于 10%。

西班牙电力公司(REE)为应对风电的大规模发展,委托马德里卡洛斯三世大学开发了 Sipreólico 系统。该系统使用西班牙 HIRLAM 的数值天气预报数据,以及西班牙全国 80% 风电机组的 SCADA 系统数据,采用统计模型对风电输出功率进行预测。预测的时间尺度是 48 小时,时间分辨率是 1 小时。该系统目前在西班牙电力公司控制中心运行。

1.4 美国

美国风电总装机容量位居世界第

二,某些风能资源比较丰富的州对风电采取相对完全的电力市场上网定价机制,要求风电场自己进行风能预测以参加日前和小时前市场,或由系统运营商负责整个系统的风电预测,风电场向他支付预测费用。在这一政策驱动下,美国的风电开发企业和研究机构纷纷开展风电功率预测研究。

eWind 系统是美 国 AWS Truewind 公司开发的风功率预测系统,它将高分辨率的中尺度模型与统计学模型相结合,主要包括一组高精度的三维大气物理数学模型、适应性统计模型、风电场输出模型和预测分发系统四个部分。eWind 使用 ForeWind 数值天气预报数据作为中尺度模型。为了得到高分辨率的数值天气预报数据,该系统使用多个模型进行初始化,然后利用统计方法预测测风塔处的气象数据,最后使用“统计风电场输出模型”得到风电功率。预测时间尺度是 48 小时,时间分辨率为 1 小时。目前该系统为加州的两个大型风电场提供预测服务。





1.5 其他国家

英国、法国、爱尔兰等风电发展较快的欧美国家纷纷开始开发和应用风电功率预测系统，其中较为成熟的产品有英国 Garrard Hassan 公司开发的 GH Forecaster 系统、法国 Ecole des Mines de Paris 公司开发的 AWPPS 系统、爱尔兰国立科克大学与丹麦气象研究所联合开发的 HIRPOM 系统等。

2. 国外风电功率预测的管理模式现状

PowerSight 系统是 3TIER 环境预测集团与华盛顿大学联合开发的风电功率预测系统。该预测系统包含 2 个模块：日前和周前预测系统及小时前预测系统。第一个模块提供时间尺度为 168 小时（7 天）和 84 小时的预测，时间分辨率为 1 小时。系统首先使用数值天气预报模式 WRF 或 MM5 的 6 种最优结构进行气象预测，每天预测 4 次，空间分辨率为 5km；然后通过模式输出统计修正数值天气预报预测误差；最后根据功率曲线预测输出功率，同时估计预测的不确定性。第二个模块提供时间尺度为 8 小时、时间分辨率为 1 小时、更新频率为 5 分钟 /10 分钟 /15 分钟的超短期预测。除了使用风电场的 SCADA 数据外，还使用日前预测数据和其它场址的气象数据。目前，该系统在美国覆盖的风电装机容量超过 6000MW。未来主要研究的领域包括：日前爬坡预测、小时内预测和小时前爬坡预测。

Precise Stream 系统是 Precise Wind 公司开发的风电功率预测系统，该系统采用物理方法，提供单台风机、单个风电场和风电场群的功率预测。系统的预测方法基于中 - 小尺度大气模型。这一方法的主要特点是能捕捉垂直方向 17km、水平方向数百公里的气象信息。模型使用不同水平分辨率的三重网格定义场址周边的较大区域，内部的分辨率为 1 公里。以上特点使该系统对于复杂地形风电场的预测具有非常明显的优势。但该方法计算量巨大，需要使用大规模刀片集群计算机系统。Precise Stream 预测系统根据风速的测量值或风电场实测功率进行后处理以修正系统误差。不过与一些统计模型需要至少 1 年的测量数据不同，该系统只需要 3 个月的数据。Precise Stream 系统可提供多个时间尺度的预测：日前预测（48 ~ 72 小时）、次日预测（24 小时）、时前预测（4 ~ 6 小时）、提前 1 小时预测和时内预测。

随着各国风电的快速发展，对风电功率预测的依赖性和需求度越来越大。各国政策的差异决定了投资并开展功率预测的主体的不同，总体而言，风电功率预测的用户主要是风电场运营商和电网（配电系统和输电系统）运营商。

在丹麦和德国，早期分散接入电网的陆上小型风电场，主要由电力系统运营商负责风电预测，集中接入电网的大型海上风电场由风电场运营商负责预测。在美国加州等地区，风电通过双边合同出售给供电商，风电场可以自己进行功率预测，参加日前和小时前市场，也可由系统运营商负责整个系统的风电功率预测，风电场向其支付预测服务费用。新墨西哥州的风电场并网协议中要求风电场必须进行功率预测。除此之外，英国、爱尔兰等国的风电场都需各自进行预测以参与电力市场竞争。下面分别介绍风电发达国家风电功率预测系统的管理模式情况。

2.1 丹麦

丹麦的早期陆上风电场多是小型风电场、通过配电网分散接入电网，其功率预测主要由电网运营商负责。而后期大型海上风电场集中接入输电网，风电功率预测由风电场负责。

风力的预测可以实时更新，从而将风电场输出功率的波动控制在允许的范围内，控制中心要时刻保持对未来 24 小时内风电出力预测的更新，预测的准确性会影响电力市场上实时交易的价格，也会影响当天调峰成本。从 2009 年 11 月 30 日开始，北欧电力市场正式推出了负电价交易制度，即当电力系统供大于求，电力市场处于负电价时段时，风电场一般会主动降出力甚至停机。

2.2 德国

与丹麦类似，德国风电场大多数规模较小，通过配电网分散接入电网，风电功率预测主要由电网运营商承担。同时，德国的电网运营商在一定的情况下可以限制风电出力，德国《可再生能源法 2004》和《可再生能源法 2008》都规定，如果发电设施在电网过载时不能减少其发电量，则电网运营商可以不履行可再生能源电力优先上网的义务。《可再生能源法 2008》还规定，电网在过载等紧急情况下可以限制 100kW 以上可再生能源发电机组的出力。

2.3 西班牙

西班牙风电企业有义务提前将风电出力通报电网运营商。2004 年 3 月，西班牙出台《皇家法案》（R D 436/2004），对风电的价格体系、辅

助服务等方面做了明确规定。在电价方面规定风电电价实行“双轨制”，即固定电价和溢价机制相结合的方式；同时《皇家法案》对风电场的义务也提出了明确的要求，即装机容量超过 10MW 的风电场必须向电网运营企业上报风电功率预测上网电力。对于选择溢价方式的风电场，在签订购售电合同时预先考虑预测偏差，风电场必须每日上报次日的风电功率预测上网电力，对于预测电力过大或过小的时刻，风电场应通过在电力市场出售或购买差额电力的方式来保持系统平衡。

西班牙电网的调峰主要靠水电和联合循环等快速调节机组承担，在电网调峰困难时，风电场也要根据调度指令参与系统调峰，在系统紧急情况下（系统过频，线路过载和潜在的系统稳定危险等）可限制风电出力，并且这部分电量不给补偿。

2.4 美国

美国某些风能资源比较丰富的州对风电采取相对完全的电力市场上网定价机制。加利福尼亚州电网中，风电通过双边合同出售给供电商，风电场可以自己进行风电功率预测，以参加日前和小时前市场，也可根据间歇性能源参与计划（PIRP），由系统运营商负责整个系统的风电功率预测，由风电场支付相应的预测费用。前者对风电功率预测误差的罚金远大于后者。另外三个比较有影响力的区域电网，中西部电网、西南电网和德州电网则对风电采取比较一致的上网政策：风电交易通过双边市场进行，需要预测风电，并像其他电源一样制定发电计划，如果不参与日前市场则

不对风电的预测误差收取罚金。在特定情况下风电场必须直接降低出力，若超出调度指令的规定值则罚款。

3. 小结

本文介绍了国外风电功率预测的研究及现状。从技术研究、应用情况、以及管理模式等多方面详细介绍了风电功率预测技术在风电发达国家的发展状况。从风电并网管理方面介绍了国外风电调度应用情况。主要结论如下：

（1）风电功率预测系统在风电发达国家得到了广泛应用，并成为了风电优化调度的重要支持系统和提高电网接纳风电能力的重要技术手段；

（2）多模型组合预测、多数值天气预报组合预测等方法不断出现，预测精度不断提高；

（3）各国政策的差异决定了投资并开展功率预测的主体的不同，总体而言，风电功率预测的用户主要是风电场运营商和电网调度。为了适应市场需求，无论电网调度还是发电企业都需要开展风电功率预测工作；

（4）国外的优秀研究经验可为我国开展风电功率预测体系及运行机制的研究提供很好的借鉴作用。 WIND

※ 本文节选自中国电力科学院《风电功率预测体系及运行机制研究报告》一书。