

# 风电功率预测技术研究综述

黎静华<sup>1</sup>, 桑川川<sup>1</sup>, 甘一夫<sup>1</sup>, 潘毅<sup>2</sup>

(1. 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室(广西大学), 广西南宁 530004;

2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

## A Review of Researches on Wind Power Forecasting Technology

LI Jinghua<sup>1</sup>, SANG Chuanchuan<sup>1</sup>, GAN Yifu<sup>1</sup>, PAN Yi<sup>2</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology (Guangxi University),

Nanning 530004, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**摘要:**为了更好地开展风电功率预测的应用研究工作,以点预测、区间预测、概率预测以及场景预测为主线,对现有的风电功率预测技术进行了归纳、总结和梳理。首先,分析了风电功率预测的难点,按照不同的时空尺度、预测形式、预测对象以及预测模型对风电功率预测进行了分类;基于不同的分类,分别阐述了当前风电功率预测的模型、理论及方法;然后,分析了国内外主要的风电功率预测软件和系统,并总结了风电功率预测误差的评判标准和指标;最后,探讨未来风电功率预测的发展趋势。本文的研究工作,可为风电功率预测研究以及风电功率预测系统的开发应用,提供较为全面的参考信息。

**关键词:**风电功率预测;点预测;区间预测;概率预测;场景预测;风电功率预测软件;预测精度;预测误差指标

**Abstract:** To better develop the application and research on wind power forecasting, this paper summarizes, unscrambles, and concludes the existing technologies of wind power forecasting by tracking a mainline of point forecasting, interval forecasting, probability forecasting and scenario forecasting. Firstly, the difficulties of wind power forecasting are analyzed, and the classifications of the wind power forecasting are categorized according to different time scales, forecasting forms, forecasting objectives and forecasting models. In addition, the current model, theory and method of wind power forecasting are described based on different classification. Then, the main wind power forecasting software and systems at home and abroad are discussed, and the evaluation criteria and indexes of the prediction error for wind power forecasting are summarized. In the end, the development trends of wind power forecasting in future are

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51377027);国家电网公司科技项目(DZ71-14-001)

discussed. The research work of this paper will provide comprehensive reference information for the development of wind power forecasting and the application of wind power forecasting system.

**Keywords:** wind power forecasting; point forecasting; interval forecasting; probability forecasting; scenario forecasting; wind power forecasting software; forecasting accuracy; forecasting error indicator

## 0 引言

随着风电电量占社会总用电量比例的不不断提高,准确地预测风电功率对缓解电网调峰压力、减少电力系统备用容量配置、提高电网风电接纳能力等均具有重要意义<sup>[1-4]</sup>。

然而,与负荷相比,风电具有更强的随机性和波动性,规律性差、难以准确预测,因此风电功率预测是电力系统调度部门工作的重点和难点,也是当前研究的热点问题<sup>[5-6]</sup>。近年来,风电功率的预测技术蓬勃发展,涌现了大量的预测模型与方法。为了更好地应用风电功率预测技术已有的研究成果,提高风电功率预测系统的预测精度,在风电不同的发展时期,均有文献对风电功率预测技术进行归纳和总结。文献[7]、[8]和[9]为较早的风电功率预测技术综述文献,主要从风电功率预测的物理方法、统计方法、时间序列方法以及人工智能方法等方面,对预测技术进行了归纳和总结。文献[10]从不同时间尺度、不同的预测范围、不同的预测对象以及不同的预测模型等方面对风电功率预测进行了分类,总结了风电功率预测的物理方法、统计方法以及组合方法,并对风电功率预测的考核

指标进行了探讨。文献 [11] 主要针对基于空间相关性的风电功率方法进行划分和总结，将预测技术划分为统计预测模型、物理预测模型、空间降尺度模型以及考虑空间平滑效应与升尺度的预测模型进行阐述。文献 [12] 则从风电功率预测过程、影响风电功率预测精度的因素、风电功率预测的模型与方法、风电功率预测结果的评价等方面对短期以及超短期风电功率预测技术进行归纳和梳理。上述文献，为研究和应用风电功率预测方法、提高风电功率预测精度提供了良好的参考依据。然而，风电功率预测的种类、范围以及相应的预测技术十分广泛和丰富，近年来还出现了风电功率区间预测、概率预测、场景预测等新的技术。此外，当前出现的风电功率预测软件和系统对促进风电功率预测技术应用发展也具有重要的参考价值和意义。因此，仍有必要对现有的风电技术更进一步地归纳、梳理、总结、更新、补充和完善，以更好地跟踪风电功率预测技术的最新发展动态。

为此，本文从更广的范围内对风电预测技术进行归纳和总结。首先根据风电功率的特点，对风电功率预测进行分类。接着，对不同类别的风电功率预测技术的发展水平进行分析和总结。然后，列举和分析当前国内外主流的风电功率预测软件和系统。最后，对未来风电功率预测技术的发展方向进行探讨和总结。

## 1 风电功率预测的难点及分类

### 1.1 风电功率预测的难点

风力发电是将风的动能转化为电能。由于气流瞬息万变，风力资源受日变化、季节变化以及年际的变化影响明显，使得风能波动性大、极不稳定，从而导致风电输出功率具有较大的随机性和间歇性<sup>[13-15]</sup>。

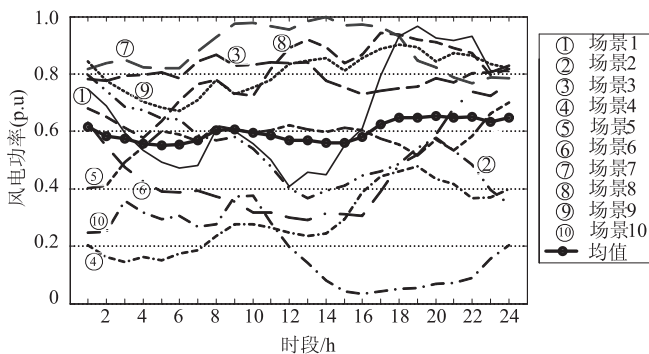


图1 风电功率日曲线示意图

图1为爱尔兰国家电网公司网站(<http://www.eirgridgroup.com>)提供的相邻10d的风电功率日曲线以及均值曲线，分别用“场景1~场景10”和“均值”表示，每一个场景表示一天24点(间隔1h采样)的风电出力。一方面，从任意一天的风电功率曲线看，相邻时段的风电功率波动较强，且忽大忽小，并未出现类似于日负荷曲线的“双驼峰”或“单驼峰”的特点。也就是具有在某个时间段处于风电功率高峰值以及在某个时间段处于风电功率低谷值的规律。另一方面，从相邻的风电功率日曲线来看，相邻日风电功率曲线的形状和变化规律也不存在相似性。由此可见，与负荷相比，风电功率具有很强的随机性和波动性，规律性差，准确预测风电功率是一项极具挑战的工作。

### 1.2 风电功率预测的分类

为了针对不同时空尺度的风电功率特点以及不同应用场合的需求，建立更为准确的风电功率预测模型，人们对风电功率预测进行了分类研究。当前，风电功率预测的分类可归纳为如图2所示。

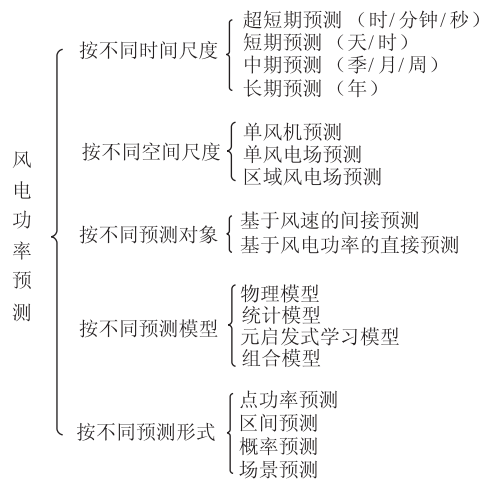


图2 风电功率预测分类

按照不同时间尺度、不同空间尺度、不同预测对象以及不同预测模型的风电功率预测分类已经有大量研究报道<sup>[16-18]</sup>，下面重点对不同预测形式的风电功率预测新技术进行介绍。

按照不同预测形式划分为：点功率预测、区间预测、概率预测和场景预测。点功率预测是对一个确定的风电功率值进行预测；区间预测是在给定置信水平下，对风电功率预测值的上下限进行预测<sup>[19-20]</sup>；概率预测是利用预测时段之前的相关样本统计信息，对未来时段该物理量的概率分布状况进

行预测的一种过程,其本质上具有主观经验的预测<sup>[21-22]</sup>;场景预测是指使用少量的风电功率序列场景来准确描绘出风电随机特征<sup>[23-24]</sup>。本文将不同形式的风电功率预测归纳如图3所示。如图3所示,预测点A的功率即为点预测,由风电功率出力上限和下限组成预测区间,场景1~场景6为风电功率的预测场景。

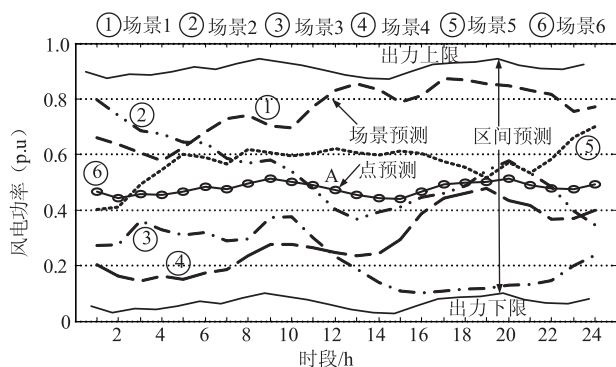


图3 不同形式的风电功率预测示意图

值得注意的是,风电预测各类别之间并不是独立的,相互之间存在着交叉。例如,点功率预测可以包括不同时间尺度的点功率预测、不同空间尺度的点功率预测等。下面以不同预测形式为主线,对风电功率预测模型、理论和方法进行归纳总结。

## 2 风电功率预测模型、理论与方法的研究综述

### 2.1 点功率预测的研究综述

#### 2.1.1 基于不同预测对象的风电功率点预测

根据预测对象的不同,风电功率预测主要有基于风速预测和基于风电功率预测两种方法。前者属于间接预测方法,后者属于直接预测方法。

间接预测方法首先对风速进行预测,然后按照风电机组或风电场的风速与风电功率关系曲线将风速转换为风电功率<sup>[25-26]</sup>。间接预测方法充分利用风机附近数值天气预报的风速、风向数据,具有信息完整、覆盖面广的优点。但是,由于风速与风电功率之间存在非线性关系,风速的微小预测偏差将可能导致较大的风电功率预测误差,大大降低预测精度<sup>[27-28]</sup>。

直接预测方法基于风电功率的历史数据,采用统计学等方法建立影响因素与风电功率之间的映射关系模型,直接对风电输出功率进行预测。直接预

测方法不需要经过风电场的功率曲线进行转换,避免了风速到风电功率之间的转换误差,输入数据和输出结果更直观明了。但是,直接预测法需要大量的风电功率历史数据进行建模。

#### 2.1.2 基于不同预测范围的点功率预测

根据预测区域的不同,风电功率预测可分为风电机组预测、单风电场预测和多风电场预测<sup>[29]</sup>。

风电机组预测是仅对一台风电机组出力进行预测,其覆盖范围小,容易受到气象条件和局部随机扰动因素的干扰或破坏,风电场功率变化的规律性较差,预测难度大。目前针对单台风电机组预测的方法主要有物理学模型、统计学模型和元启发式模型。

单风电场预测是基于气象预报数值和物理信息,对所研究的风电场的整体机组输出功率进行预测<sup>[30]</sup>。目前,针对单风场预测的方法主要有统计模型和组合预测模型<sup>[31-33]</sup>。

多风电场预测也称为区域风电场预测,是对研究区域内所有风电场的出力进行预测<sup>[34]</sup>。一般采用以下两种方法对区域风电功率进行预测:一是分别对每个风电场输出功率进行预测之后,求和得到该区域的风电功率;二是只对区域中某些风电场的输出功率进行预测,利用区域内气象环境等条件的相似性,采用类比、外推等方法得到整个区域的风电场输出功率。与单一风电场功率预测相比,区域风电场的输出功率具有更好的规律性。

#### 2.1.3 基于不同预测模型的点功率预测

根据风电预测模型的不同,主要有物理学方法、统计学方法、人工智能方法和上述几种方法的组合方法<sup>[35-36]</sup>。

##### 2.1.3.1 物理学方法

物理学方法主要考虑的是一些物理量,比如数值天气预报得到的风速、气压、空气密度等数据,风电场附近的地势、等高线、粗糙度等物理信息以及风电机组的轮毂高度、穿透系数等技术参数<sup>[37-40]</sup>,其目的是找到风电机组轮毂高度处的风速最优估计值,根据风电机组或风电场的功率曲线转换为风电场的输出功率。

物理学模型的优势在于不需要长期的风电场观测数据,比较适用于新投产风电场,对其风电输出功率进行中期预测。不足之处是建模和求解过程复杂,需要具有丰富的、精准的气象数据,物理模型在预测一些气象参数(如近地风速、风向等)容易产

生系统错误,易产生误差累积效应,从而影响预测精度<sup>[41]</sup>。

### 2.1.3.2 统计学方法

统计学方法是根据系统观测到的风速或风电功率历史数据,通过曲线拟合、参数估计等方法,建立系统输入与输出的线性或非线性映射关系,从而对未来风电功率的输出趋势做出预测,常见的方法有时间序列法、回归分析法、聚类分析法、灰色预测法等。与物理模型相比,统计学模型更容易建模,受到了广大研究学者的关注<sup>[42-51]</sup>。

统计学方法不需考虑风向、湿度等气象条件,直接由风速或风电输出功率的历史序列数据,对未来时刻的风速和风电输出功率进行预测。但由于风速和风电功率时间序列数据具有自相关和标准偏差等统计性特征,预测误差会随着预测时间的延长而增加,且对突变情况反应不够灵敏<sup>[52]</sup>。统计学方法对于短期风速预测比较有效,而不能适用于长期预测<sup>[53]</sup>。

### 2.1.3.3 元启发式学习方法

元启发式学习方法的本质是对生物的作息规律进行模拟,采用某种学习算法,通过对大量的输入数据进行训练,提取输入(预测条件)与输出(待预测的物理量)的关系。如常见的人工神经网络、支持向量机、粒子群优化算法、专家系统、遗传算法等都属于该范畴<sup>[54-62]</sup>。与统计学方法相比,智能方法也需要大量的历史观察数据,但其不需要得到输入和输出之间具体的数学表达式,而是通过训练获得风速或风电功率的预测模型。

基于智能技术建立的预测模型不需确定输入与输出的具体的数学函数关系。仅需要通过历史数据对所建模型进行训练、学习,得到适用于长期和短期的预测模型,所建立的预测模型具有学习能力<sup>[55-56]</sup>。但该类方法也存在过学习和易局部最小化的问题。

### 2.1.3.4 组合方法

组合方法<sup>[63-69]</sup>利用不同模型提供的信息并发挥各自优势,选择合适的方式进行组合,以期提高预测精度。

鉴于各种预测模型及方法有其自身的优缺点,在不同的天气状况、地势和分辨率等条件下,具有不同的预测效果。在现有已知条件下,组合预测方法充分挖掘各种单一预测方法的有用信息,能够建立适应不同环境和不同预测需求的最佳模型。与单

一模型预测相比,采用组合方法的风电功率预测一般可减少较大误差的出现,大大提高风速和风电功率的预测精度<sup>[70]</sup>。

## 2.2 区间预测的研究综述

区间预测研究满足给定置信度水平的风电功率的上下限。准确地预测风电功率所在的区间,对电力系统应对风电功率的变化,保证系统安全运行具有重要意义。

目前,区间预测的方法主要可分为2大类。第1类的主要思想是基于历史数据,采用学习的启发式算法直接预测风电功率可能发生的上限和下限。第2类从风电功率的概率分布函数入手,计算在满足给定概率水平下,风电功率可能落入的区间的上限和下限。

文献[71-74]属于第1类的方法。文献[71-73]基于历史的风电数据,采用神经网络的方法,对短期风电功率可能发生的上限和下限进行预测。文献[74]则基于模糊理论,对风电功率上、下限进行预测。文献[75-77]属于第2类的区间预测方法。文献[75-76]通过对概率分布的分位点进行预测,基于所预测的分位点,得到满足给定置信度水平的区间。文献[77]假设风电功率波动服从贝塔分布,基于该分布,计算出满足给定置信度水平的区间。

当前关于风电功率区间预测的研究仍处于发展之中,准确地预测风电功率的概率分布,是提高区间预测精度的关键。

## 2.3 概率预测的研究综述

近年来,很多学者逐渐对风电功率的概率预测展开研究。概率预测不仅可以预测未来时段风速及风电功率的期望值,还可以得到风电功率或预测误差的概率分布信息,即预测物理量的不确定性信息,为含有风电场电力系统的运行风险评估和风险决策提供重要参考<sup>[78]</sup>。目前,概率预测的方法可归纳为2类:参数估计法和非参数估计方法。基于参数估计的方法,首先假设风电功率或其预测误差服从某一种概率分布,然后基于历史数据,估计出所假设的概率分布的参数,从而得到具体的概率分布函数。例如,文献[21],[79-80]假设风电功率的预测误差服从高斯分布函数,文献[81]假设风电功率波动服从 $t$ -location分布函数,文献[24,26]假设风电功率的联合概率分布函数服从Copula函数分布。基于非参数估计的方法,不需

要事先假设概率分布函数，其直接采用历史数据获得待预测量（风电功率或预测误差）的经验分布函数<sup>[82-84]</sup>。

为提高概率预测的精度，文献 [85] 提出了一种适应不同时间变化的条件核密度估计方法，针对不同预测物理量的实际变化特征，分别选择最佳的核函数对各物理量进行概率性的描述，与单纯的样条差值分位回归模型相比，具有较好的鲁棒性和实际自适应性。文献 [86] 首先基于小波变换和模糊自适应谐振理论网络提出了一种新型混合智能算法，运用萤火虫优化算法对所建模型进行优化，实现了对风电功率的预测。然后利用支持向量机对预测误差进行分类极小化，最后根据所得预测结果提出用样条差值分位回归方法评估风电功率的概率预测效果，在一定程度上提高了预测精度。文献 [87] 基于极限学习机和粒子群优化算法，提出直接对风电功率进行概率预测的混合智能算法，不涉及预测误差的统计推断和分布假设等过程，实例结果表明该模型具有较高的求解效率和可靠性。

#### 2.4 场景预测的研究综述

场景预测是指使用较少量的风电功率序列场景来准确描绘风电随机特征，场景预测属于对风电功率概率分布的一种预测<sup>[78]</sup>，所生成的场景可以应用于电力系统经济调度、机组组合等优化调度运行问题中<sup>[88-92]</sup>。

目前风电功率序列代表场景的生成方法主要有蒙特卡洛抽样<sup>[93]</sup>、聚类法<sup>[94]</sup>、场景优化生成/消减技术等<sup>[95-97]</sup>。前向/后向削减技术是经典的场景的削减技术<sup>[96]</sup>，但其技术效率低，仅适合于中小规模的场景削减。文献 [97] 首先基于自回归滑动平均的时间序列模型生成大量场景，然后采用后向概率距离削减技术对所生成的场景进行约减，实例证明了该算法能够准确描述日前风电场景的不确定性。为了改进场景削减的效率，文献 [23] 针对现有方法难以从庞大的发生空间中选择有效的代表场景的问题，提出一种纵横双向优化的方法以生成日风电功率序列场景。文献 [88] 则以原始场景和约减场景之间的距离最小为目标，建立优化模型，生成能反映原始场景随机特性的代表性场景集合。

场景预测能够刻画未来时刻风电场输出功率的时间关联性和空间相关性，可以有效地解决含有风电电力系统的动态随机优化问题。但当考虑较多的时间段和较多的风电场等原始数据时，易造成模型

的维数灾，计算量巨大，难以求得模型参数，限制了在高维空间中的应用。

### 3 国内外风电功率预测系统

基于上述各种风电功率预测技术，目前已开发了不少风电功率预测系统，下面分别对国内外风电功率预测系统进行归纳总结。

国外对开发风电功率的预测软件研究较早，技术也较为成熟。例如，丹麦新开发的 Zephyr 系统、德国的 WPMS 系统、西班牙的 LocalPred - RegionPred 系统<sup>[98]</sup>等，日前预测精度最高可达 85%。国内关于风电功率预测系统的研究和开发如火如荼地进行<sup>[99]</sup>。由中国电力科院研究院、中国气象局等单位开发的风电功率预测系统，已成功在多个试点风电场安装使用，且系统运行稳定，预测效果较好。表 1 和表 2 分别总结了国外和国内目前几种应用较为成熟的风电功率预测软件系统。由表 1 和表 2 中可看出，目前大部分预测系统都采用组合方法进行预测，如前所述，组合方法能够综合两种及以上方法的特点，综合利用各种方法的优点，克服各自缺点，从而提高风电功率的预测精度。

### 4 风电功率预测效果的评价指标

对风电功率预测误差进行综合评价，是风电功率预测技术中重要的环节<sup>[100]</sup>。针对不同的预测方法、模型，选择合适的评价标准<sup>[101]</sup>，可全面分析预测技术的特点，充分挖掘内在原因及规律，采取补充、更正等措施，进一步提高风电功率预测精度。

目前国内外常用的风电功率预测效果的评价标准有以下几种：

- ① 平均相对误差(mean relative error, *MRE*)

$$e_i = |p_i - p'_i| \quad (1)$$

式中： $e_i$  为绝对误差； $p_i$  和  $p'_i$  分别为风电功率实际值和预测值。相对误差可用式(2)表示，

$$MRE = \sum_{i=1}^n e_i / (np_i) \quad (2)$$

式中： $n$  为预测总数。*MRE* 将误差除以对应时刻的实际值，即逐点相比，具有针对性。但当风电功率实际值为 0 时，则该时刻得出很大的 *MRE*，将失去实际的指导意义。

表1 风电功率预测系统(国外)

软件名称	特点	采用方法	开发者及应用范围
Prediktor	将统计学模型加入到高解极限区域模型中,同时采用了风谱分析应用程序,局部改善了预测效果。	物理方法	由丹麦 Risø 国家实验室开发,在西班牙、丹麦、爱尔兰、法国、德国等国家得到广泛应用。
WPPT	结合 NWP 对风速预测的混合模型;利用计算流体力学技术适应风电场周围环境等特征;用时间适应法解决风电功率输出的不稳定性。短期预测比风电功率直接预测效果好。	统计方法	由丹麦技术大学信息学院和数学院共同研发,在丹麦、澳大利亚、加拿大、爱尔兰、芬兰、瑞典等国家得到广泛应用。
Zephyr	综合 Prediktor 和 WPPT,当预测时间超过 6h 时, Prediktor 有较低的预测误差,而 WPPT 对超短期预测有较好的效果。	物理方法和统计方法组合	由丹麦国家实验室、丹麦科技大学共同开发,在丹麦和澳大利亚应用。
Previento	与 Prediktor 类似,用波尔原则模型(LokalModell)代替 NWP。区域预测和不确定性估计比持续法效果好。	物理方法和统计方法组合	由奥尔登堡大学研发,在德国、北爱尔兰应用。
eWind	采用整体 NWP 模型,将 MOS 运用到风速的预测中,结果可被作为功率曲线的输入,也可作为 ANNs 的训练数据。	物理方法、统计方法和元启发式算法组合	由美国真风公司开发,在美国应用。
LocalPred	基于自回归模型,联合微观 NWP 对风速和风电功率超短期预测,比持续预测法效果好。	物理方法、统计方法组合	由西班牙可再生能源中心研发,在西班牙和爱尔兰应用。

表2 风电功率预测系统(国内)

软件名称	特点	采用方法	开发者及应用范围
中国电科院风电功率预测系统 WPFS Ver1.0	采用 B/S 结构,可以跨平台运行;每天 15:00 前预测次日 0:00—24:00 分辨率为 15min 的风电功率,最长预测未来 144h 风电功率;且预测准确度会逐年提高。	物理方法和元启发式算法组合	由中国电力科学院研究院开发,在吉林、江苏等省得到广泛应用。
中国气象局风电功率预测预报系统	采用三维 GIS 显示技术,实现了风电场实际地形上风机、测风塔、数值天气预报、风电场功率预报、灾害性天气预警信息的实时显示,可自动接收中国气象局数值天气预报产品,具有风电场风电功率短期预报(72h 内)、超短期预报(4h 内间隔 15min 滚动预报)、预报结果后台自动上报、预报考核指标统计分析等多种服务功能。	物理方法和统计方法组合	由中国气象局公共气象服务中心研发,在河北、甘肃、宁夏等省(自治区)得到推广。
国能日新风电功率预测系统(SPWF-3000)	采用 B/S 结构,针对单风场不同类型机组进行独立分析建模;系统完全考虑后期风场扩容情况,具有强大的接口及计算能力;系统具有强大的自我学习能力,现短期预测精度已超过 85%,超短期预测精度超过 90%(均方根误差)。	物理方法和元启发式组合	由北京国能日新系统控制技术有限公司研发,在山西、广西、河北、河南等省(自治区)得到推广。
FR3000F 风电功率预测系统	采用基于中尺度数值天气预报的物理方法和统计方法相结合的预测方法,提供差分自回归移动平均模型(ARIMA)、混沌时间序列分析、人工神经网络(ANN)等多种算法,满足不同风电场关于历史数据的预测要求。	物理方法、统计方法和元启发式算法组合	由北京中科伏瑞电气技术有限公司开发,在新疆、内蒙古、宁夏等省(自治区)得到推广。
风电功率预测预报系统	基于气象部门 WRF 模式的数值天气预报数据和测风塔实时数据,采用多种预测算法进行组合预测,可全天、全自动采集各类测风数据,并预报未来 3d 短期风电功率、未来 4h 超短期风电功率,为风电场日常调度运行提供参考。	物理方法和统计方法组合	由风脉(武汉)可再生能源技术有限责任公司和湖北省气象局共同研发,在新疆等省(自治区)应用。

② 平均绝对误差 (mean absolute error, MAE)

$$MAE = \sum_{i=1}^n e_i / (np_N) \quad (3)$$

式中： $p_N$  为风机额定容量。平均绝对误差由于离差被绝对值化，不会出现正负相抵消的情况，因而，平均绝对误差能更好地反映预测值误差的实际情况<sup>[102]</sup>。

③ 均方根误差 (root mean squared error, RMSE)

$$RMSE = \frac{1}{p_N} \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i^2 / n} \quad (4)$$

均方根误差又叫标准误差，对一组测量中的特大或特小误差反映非常敏感，所以，标准误差能够很好地反映出测量的精密度。这正是标准误差在工程测量中广泛被采用的原因<sup>[103]</sup>。

④ 区间覆盖率 (prediction interval coverage probability, PICP)

$$PICP = \frac{1}{U} \sum_{u=1}^U A_u \quad (5)$$

式中： $U$  为待预测风电功率的总数， $u = 1, 2, \dots, U$ 。 $A_u$  为示性函数，有以下定义，

$$A_u = \begin{cases} 1, & V_u \in [\underline{V}_u, \bar{V}_u] \\ 0, & V_u \notin [\underline{V}_u, \bar{V}_u] \end{cases} \quad (6)$$

即当待预测时刻的风电功率实际值落到预测区间中时， $A_u$  取值 1，否则取 0。 $PICP$  在满足  $\beta$  的基础上，其值越大表明实际风电功率落入预测区间的个数越多，意味着预测效果越好。

⑤ 区间标准化平均宽度 (prediction interval normalized average width, PINAW)

$$PINAW = \frac{1}{UR} \sum_{u=1}^U (\bar{V}_u - \underline{V}_u) \quad (7)$$

式中： $\bar{V}_u$ ， $\underline{V}_u$  分别为预测区间的上下边界， $R$  为上下边界宽度基准值，这里取区间预测值上下边界的最大值  $V_{u\max}$  与最小值  $V_{u\min}$  之和的平均值，即  $R = (\bar{V}_{u\max} + \underline{V}_{u\min}) / 2$ 。 $PINAW$  表示区间上下边界的宽度，其值越小，表明预测区间越窄，意味着预测精度越高。

⑥ 覆盖宽度 (coverage width-based criterion, CWC)

由于  $PINC$  和  $PINAW$  相互制约，因此选一种二者综合性的评价标准是必要的。

$$CWC = PINAW(1 + \gamma(PICP)e^{-\eta(PICP-\mu)}) \quad (8)$$

式中： $\eta$  和  $\mu$  是两个控制参数，实际运用中  $\mu = 1 - \alpha$ ， $\eta$  通常取 50~100 之间的常数，而  $\gamma$  采用如式 (9) 定义，

$$\gamma(PICP) = \begin{cases} 0, & PICP \geq \mu \\ 1, & PICP < \mu \end{cases} \quad (9)$$

$CWC$  的应用，主要协调  $PINC$  的准确性和  $PINAW$  的测量忠诚度，以便最大限度地满足预测精度， $PINC$ 、 $PINAW$  和  $CWC$  主要应用在风电功率区间预测精度的评估。

受到风电场周围环境等多重因素的影响，风电功率预测误差会有较大的差异。应根据不同风电场的具体情况选用合适的误差评价指标，才能挖掘出有效信息，反馈于风电功率预测模型，进而制定相关措施，提高预测精度。

## 5 风电功率预测的发展趋势

风电功率的预测虽然已经得到了广泛的研究，但其仍存在许多问题需要继续深入研究，未来风电功率预测可侧重从以下几个方面展开研究：

① 对风电功率的出力特性以及出力特性的数学描述方法进行研究。

② 组合各种先进的预测模型，取长补短，提高各种时间尺度下、不同环境下的风电功率预测精度。

③ 提高复杂地形地区数值天气预报的精度和更新频率，为风电功率预测提供可靠依据。

④ 较为准确的风电功率预测技术和系统涉及学科多、模型复杂，进一步增强各学科间的融合是提高预测精度的重要方向。

⑤ 当前，对于风电功率点预测的研究较深入，研究成果也较多。相对于点预测、区间预测、概率预测、场景预测等方面仍需要开展更为深入的研究工作。

⑥ 风电功率预测对于短期和超短期预测精度尚可，但随着预测时间尺度的扩大，中长期以上的预测精度不容乐观。随着风电并网容量的增加，客观上要求系统运行方式和发电计划安排必须向更长时间尺度如月度、年度预测等方向延伸，对风电功率的预测提出了更高的要求。

## 6 结语

本文通过对现有风电功率预测文献资料进行

搜集、总结和梳理,得到以下几点结论:

① 概率预测、区间预测以及场景预测将是未来风电功率预测发展的重要研究方向,其能为电力系统运行调控风电提供更加全面的信息。

② 当前,点预测的研究成果较为丰富,概率预测、区间预测以及场景预测的研究成果相对较少。如何准确地定量描述风电功率的概率分布是概率预测的关键;区间预测的关键是尽可能缩小风电功率落入区间的范围,从而可以更准确地配置备用容量,提高运行的经济性;场景预测的关键在于如何利用最少的典型场景代表风电功率的出力随机特性。

③ 在风电功率点预测误差评价指标方面,平均绝对误差和均方根误差是较为常用的指标,而区间覆盖率、区间标准化平均宽度和覆盖宽度是描述区间预测精度的主要指标。

④ 风能本身所具有的间歇性、波动性等特征成为提高预测精度的主要困难之一,当前大部分预测系统都采用组合方法进行预测,预测精度还有待提高,应在现有方法的基础上,深度结合风电功率的出力特性,进一步提高风电功率的预测精度。

### 参 考 文 献

- [1] 王勃,冯双磊,刘纯.考虑预报风速与功率曲线因素的风电功率预测不确定性估计[J].电网技术,2014,38(2):463-468.
- [2] 常康,丁茂生,薛峰,等.超短期风电功率预测及其在安全稳定预警系统中的应用[J].电力系统保护与控制,2012,40(12):19-24,30.
- [3] 任磊.风力发电对电力系统稳定控制的影响研究[D].武汉:华中科技大学,2011.
- [4] 迟永宁,刘燕华,王伟胜,等.风电接入对电力系统的影响[J].电网技术,2007,31(3):77-81.
- [5] 中国能源网:<http://www.china5e.com/news/news-911-773-1.html>
- [6] 中国能源网:<http://www.china5e.com/news/news-911-740-1.html>
- [7] 王健,严干贵,宋薇,等.风电功率预测技术综述[J].东北电力大学学报,2011,31(3):20-24.
- [8] 王丽婕,廖晓钟,高阳,等.风电场发电功率的建模和预测研究综述[J].电力系统保护与控制,2013,37(23):118-121.
- [9] 谷兴凯,范高峰,王晓蓉,等.风电功率预测技术综述[J].电网技术,2007,31(2):335-338.
- [10] 郑婷婷,王海霞,李卫东.风电预测技术及其性能评价综述[J].南方电网技术,2013(2):104-109.
- [11] 叶林,赵永宁.基于空间相关性的风电功率预测研究综述[J].电力系统自动化,2014,38(14):126-135.
- [12] 薛禹胜,雷兴,薛峰,等.关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5029-5040.
- [13] William P. Mahoney, Keith Parks, Gerry Wiener, et al. A Wind Power Forecasting System to Optimize Grid Integration [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(4): 670-682.
- [14] 严干贵,刘嘉,崔杨,等.利用储能提高风电调度入网规模的经济性评价[J].中国电机工程学报,2013,33(22):45-52.
- [15] Muhammad Khalid, Andrey V. Savkin. A Method for Short-Term Wind Power Prediction With Multiple Observation Points [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 579-586.
- [16] Xie Le, Gu Yingzhong, Zhu Xinxin, et al. Short-Term Spatio-Temporal Wind Power Forecast in Robust Look-ahead Power System Dispatch [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 511-520.
- [17] 孟安波,陈育成.基于虚拟预测与小波包变换的风电功率组合预测[J].电力系统保护与控制,2014,42(3):71-76.
- [18] 马斌,张丽艳.一种基于径向基神经网络的短期风电功率直接预测方法[J].电力系统保护与控制,2015,43(19):78-82.
- [19] 刘兴杰,谢春雨.基于贝塔分布的风电功率波动区间估计[J].电力自动化设备,2014,34(12):26-30+57.
- [20] 李智,韩学山,杨明,等.基于分位点回归的风电功率波动区间分析[J].电力系统自动化,2011,35(3):83-87.
- [21] 朱思萌,杨明,韩学山,等.多风电场短期输出功率的联合概率密度预测方法[J].电力系统自动化,2014,38(19):8-15.
- [22] 周封,金丽斯,刘健,等.基于多状态空间混合Markov链的风电功率概率预测[J].电力系统自动化,2012,36(6):29-33,84.
- [23] 黎静华,孙海顺,文劲宇,等.生成风电功率时间序列场景的双向优化技术[J].中国电机工程学报,2014,34(16):2544-2551.
- [24] 黎静华,文劲宇,程时杰,等.考虑多风电场出力Copula相关关系的场景生成方法[J].中国电机工程学报,2013,33(16):30-37.
- [25] 丁华杰,宋永华,胡泽春,等.基于风电场功率特性的日前风电预测误差概率分布研究[J].中国电



- 机工程学报, 2013, 33(34): 136-144.
- [26] 季峰, 蔡兴国, 王俊. 基于混合 Copula 函数的风电功率相关性分析 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 1-6.
- [27] Zhang Geng, Li HanXiong, Gan Min. Design a Wind Speed Prediction Model Using Probabilistic Fuzzy System [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 8(4): 819-827.
- [28] 林鹏, 赵书强, 谢宇琪, 等. 基于实测数据的风电功率曲线建模及不确定估计 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 90-95.
- [29] 阎洁, 刘永前, 韩爽, 等. 考虑流动相关性的风电场机组分组功率预测方法 [J]. 现代电力, 2015, 32(1): 25-30.
- [30] 陈颖, 孙荣富, 吴志坚, 等. 基于统计升尺度方法的区域风电场群功率预测 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 1-5.
- [31] 张国强, 张伯明. 基于组合预测的风电场风速及风电机功率预测 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18): 92-96.
- [32] 冯双磊, 王伟胜, 刘纯, 等. 风电场功率预测物理方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(2): 1-6.
- [33] 王恺, 关少卿, 汪令祥, 等. 基于模糊信息粒化和最小二乘支持向量机的风电功率联合预测建模 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 26-32.
- [34] 李智, 韩学山, 韩力, 等. 地区电网风电场功率超短期预测方法 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 90-94.
- [35] 茆美琴, 曹雨, 周松林, 等. 基于误差叠加修正的改进短期风电功率预测方法 [J]. 电力系统自动化, 2009, 37(13): 34-38.
- [36] Aoife M Foley, Paul G Leahy, Antonino Marvuglia, et al. Current methods and advances in forecasting of wind power generation [J]. Renewable Energy, 2012, 37: 1-8.
- [37] 王勃, 冯双磊, 刘纯. 考虑预报风速与功率曲线因素的风电功率预测不确定性估计 [J]. 电网技术, 2014, 38(2): 463-468.
- [38] Shi Jie, Ding Zhaohao, Lee Wei-Jen, et al. Hybrid Forecasting Model for Very-Short Term Wind Power Forecasting Based on Grey Relational Analysis and Wind Speed Distribution Features [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 521-526.
- [39] 王丽婕, 冬雷, 高爽. 基于多位置 NWP 与主成分分析的风电功率短期预测 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(5): 79-84.
- [40] 李莉, 刘永前, 杨勇平, 等. 基于 CFD 流场预计算的短期风速预测方法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 27-33.
- [41] 韩爽. 风电场功率短期预测方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [42] 张建华, 王昕伟, 蒋程, 等. 基于蒙特卡罗方法的风电场有功出力的概率性评估 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 82-87.
- [43] 丁明, 张立军, 吴义纯, 等. 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.
- [44] Chen Hao, Wan Qiulan, Li Fangxing, et al. GARCH in Mean Type Models for Wind Power Forecasting [C]. Power and Energy Society General Meeting, 2013.
- [45] DVTTA S, OVERBYE T J. Prediction of short term power output of wind farms based on least squares method [C]. Power and Energy Society General Meeting, 2010.
- [46] 王贺, 胡志坚, 仇梦林. 基于模糊信息粒化和最小二乘支持向量机的风电功率波动范围组合预测模型 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 218-224.
- [47] Kusiak Andrew, Li Wenyan. Short-term prediction of wind power with a clustering approach [J]. Renewable Energy, 2010, 35: 2362-2369.
- [48] 王勃, 冯双磊, 刘纯. 基于天气分型的风电功率预测方法 [J]. 电网技术, 2014, 38(1): 93-98.
- [49] LOUKA P, GALANIS G, KATSAFADOS G K, et al. Improvements in wind speed forecasts for wind power prediction purposes using kalman filtering [C]. In Proc. of the 5th Conference on Mathematical Models in Science and Engineering, 2005.
- [50] 潘迪夫, 刘辉, 李燕飞. 风电场风速短期多步预测改进算法 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(26): 87-91.
- [51] 方江晓, 周晖, 黄梅, 等. 基于统计聚类分析的短期风电功率预测 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 67-64.
- [52] 江岳文, 温步瀛. 结合风电功率超短期预测值偏差的实时市场调度 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 12-17.
- [53] WU Yuankang, HONG Jingshan. A literature review of wind forecasting technology in the world [C]. Power Tech, 2007 IEEE Lausanne.
- [54] Zeng Jianwu, Qiao Wei. Short-Term Wind Power Prediction Using a Wavelet Support Vector Machine [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(2): 255-264.
- [55] Hanieh Borhan Azad, Saad Mekhilef, Vellapa Gounder Ganapathy. Long-Term Wind Speed Forecasting and General Pattern Recognition Using Neural

- Networks [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 546 - 553.
- [56] Lee Duehee, Baldick Ross. Short-Term Wind Power Ensemble Prediction Based on Gaussian Processes and Neural Networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 501 - 510.
- [57] CAMERON W P, NEGNEVITSKY P. Very short-term wind forecasting for tasmanian power generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 965 - 972.
- [58] 孔波利, 崔丽艳, 丁钊, 等. 基于风光混合模型的短期功率预测方法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 62 - 66.
- [59] Rajananda Kishore G, Prema V, Dr. K. Uma Rao. Multivariate Wind Power Forecast using Artificial Neural Network [C]. IEEE Global Humanitarian Technology Conference-SAS, 2014.
- [60] George Sideratos, Nikos D. Hatziargyriou. Probabilistic Wind Power Forecasting Using Radial Basis Function Neural Networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1788 - 1796.
- [61] DAMOUSIS I G, DOKOPOULOS. A fuzzy expert system for the forecasting of wind speed and power generation in wind farms [C]. The 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference on Power Industry Computer Applications, 2001.
- [62] 陈道君, 龚庆武, 金朝意, 等. 基于自适应扰动量子粒子群算法参数优化的支持向量回归机短期风电功率预测 [J]. 电网技术, 2013, 37(4): 974 - 980.
- [63] BATES J M, GRANGER C W J. The combination of forecasts [J]. Operational Research Quarterly, 1969, 20(4): 451 - 468.
- [64] 李玲玲, 许亚惠, 田晓越, 等. 基于组合模型的风电功率短期预测 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(S1): 475 - 480.
- [65] 叶林, 刘鹏. 基于经验模态分解和支持向量机的短期风电功率组合预测模型 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 102 - 108.
- [66] Ren Ye, Suganthan P N, Srikanth Narasimalu. A Comparative Study of Empirical Mode Decomposition-Based Short-Term Wind Speed Forecasting Methods [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(1): 236 - 244.
- [67] 张学清, 梁军, 张熙, 等. 基于样本熵和极端学习机的超短期风电功率组合预测模型 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 33 - 40.
- [68] 王焱, 汪震, 黄民翔, 等. 基于 OS-ELM 和 BOOT-STRAP 方法的超短期风电功率预测 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 14 - 20.
- [69] 刘爱国, 薛云涛, 胡江鹭, 等. 基于 GA 优化 SVM 的风电功率的超短期预测 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 90 - 95.
- [70] 杨茂, 齐玥, 穆钢, 等. 基于改进熵权法的风电功率组合预测方法 [J]. 电测与仪表, 2015, 52(15): 46 - 50.
- [71] Abbas K, Saeid N and Doug C. Prediction intervals for short-time wind farm power generation forecasts [J]. IEEE Transitions on Sustainable Energy, 2013, 4(3): 602 - 610.
- [72] Can W, Zhao X, Pierre P, et al. Optimal prediction intervals of wind power generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29 (3): 1166 - 1174.
- [73] Hao Q, Dipti S, and Abbas K. Short-time load and wind power forecasting using neural network-based prediction intervals [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2014, 25 (2): 303 - 315.
- [74] Abdollah K F, Abbas K, and Saeid N. A novel fuzzy multi-objective framework to construct optimal prediction intervals for wind power forecast [C]. 2014 International Joint Conference on Neural Network (IJCNN), July 6 - 11, 2014, Beijing, China.
- [75] Pierre P, George K. Conditional prediction intervals of wind power generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(4): 1845 - 1856.
- [76] 李智, 韩学山, 杨明, 等. 基于分位点回归的风电功率波动区间分析 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(3): 83 - 87.
- [77] 刘兴杰, 谢春雨. 基于贝塔分布的风电功率波动区间估计 [J]. 电力系统自动化, 2014, 34(12): 26 - 30, 57.
- [78] Zhang Yao, Wang Jianxue, Wang Xifan. Review on probabilistic forecasting of wind power generation [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 32: 255 - 270.
- [79] 杨明, 范澍, 韩学山, 等. 基于分量稀疏贝叶斯学习的风电场输出功率概率预测方法 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 125 - 130, 142.
- [80] He Miao, Yang Lei, Yang Junshan, et al. A Spatio-Temporal Analysis Approach for Short-Term Forecast of Wind Farm Generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29 (4): 1611 - 1622.
- [81] 林卫星, 文劲宇, 艾小猛, 等. 风电功率波动特性的概率分布研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 38 - 46.
- [82] 王彩霞, 鲁宗相, 乔颖, 等. 基于非参数回归模型

- 的短期风电功率预测 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(16): 78-82, 91.
- [83] Hu Qinghua, Su Pengyu, Yu Daren, et al. Pattern-Based Wind Speed Prediction Based on Generalized Principal Component Analysis [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5 (3): 866-874.
- [84] Li JingHua, Wen JinYu, Cheng ShiJie, et al. Minimum energy storage for power system with high wind power penetration using p-efficient point theory [J]. Science China Information Sciences, 2014, 57(12): 1-12.
- [85] Ricardo J. Bessa, Vladimiro Miranda, Audun Botterud, et al. Time Adaptive Conditional Kernel Density Estimation for Wind Power Forecasting [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3 (4): 660-669.
- [86] Ashraf Ul Haque, M. Hashem Nehrir, ParasMandal. A Hybrid Intelligent Model for Deterministic and Quantile Regression Approach for Probabilistic Wind Power Forecasting [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 29(4): 1663-1672.
- [87] Wan Can, Xu Zhao, Pinson Pierre, et al. Probabilistic Forecasting of Wind Power Generation Using Extreme Learning Machine [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 29(3): 1033-1044.
- [88] 黎静华, 韦化, 莫东. 含风电场最优潮流的 Wait-and-See 模型与最优渐近场景分析 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 15-23.
- [89] 徐秋实, 邓长虹, 赵维兴, 等. 含风电电力系统多场景鲁棒调度方法 [J]. 电网技术, 2014, 38(3): 653-661.
- [90] Li Jinghua, Fang Jiakun, Wen Jinyu, et al. Optimal trade-off between regulation and wind curtailment in the economic dispatch problem [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(4): 37-45.
- [91] 高红均, 刘俊勇, 刘继春, 等. 基于坏场景集的含风电机组组合模型 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 27-32.
- [92] 张晓辉, 闫柯柯, 卢志刚, 等. 基于场景概率的含风电系统多目标低碳经济调度 [J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1835-1841.
- [93] Pinson P, Madsen H, Nielsen H A, et al. From probabilistic forecasts to statistical scenarios of short-term wind power production [J]. Wind Energy, 2009(12): 51-62.
- [94] Sumalili J, Keko H, Miranda V, et al. Clustering-based wind power scenario reduction technique [C]. The 17th Power Systems Computation Conference 2011(PSCC 2011 Stockholm). Stockholm, Sweden: Curran Associates, 2011: 391-398.
- [95] Growe-Kuska N, Heitsch H, Romisch W. Scenario reduction and scenario tree construction for power management problems [C]. Power Tech Conference Proceedings, Bologna, Italy: IEEE Bologna, 2003: 7-13.
- [96] Pappala V S, Erlich I, Rohrig K, et al. A stochastic model for the optimal operation of a wind-thermal power system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 940-950.
- [97] Sharma K C, Jain P, Bhakar R. Wind power scenario generation and reduction in stochastic programming framework [J]. Electric Power Components and Systems, 2013, 41(3): 271-285.
- [98] MARTÍP I. Wind forecasting activities [C]. The First IEA Joint Action Symposium on Wind Forecasting Techniques, December, 2002, Norrköping, Sweden.
- [99] 袁铁江, 晁勤, 李义岩, 等. 大规模风电并网电力系统经济调度中风电场出力的短期预测模型 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 23-27.
- [100] 徐曼, 乔颖, 鲁宗相. 短期风电功率预测误差综合评价方法 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(12): 20-26.
- [101] 中国电力科学研究院. GB/T 19963—2011 风电场接入电力系统技术规定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [102] 郁琛, 薛禹胜, 文福拴, 等. 风电功率预测误差的风险评估 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 52-58.
- [103] 刘燕华, 李伟花, 刘冲, 等. 短期风电功率预测误差的混合偏态分布模型 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2375-2382.

收稿日期: 2016-04-20

作者简介:

黎静华 (1982—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统优化运行与控制, 大规模风电并网运行等, E-mail: happyjinghua@163.com;

桑川川 (1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为负荷预测, 风电功率预测, E-mail: sound1409@126.com;

甘一夫 (1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风电功率预测, E-mail: zhuaneyiliu@126.com;

潘毅 (1968—), 女, 博士, 主要从事系统运行调度等方面的研究工作, E-mail: pany@epri.sgcc.com.cn.

(责任编辑: 林海文)