

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.05.015

光伏发电功率预测方法研究综述^{*}

钱 振¹, 蔡世波¹, 顾宇庆², 童建军¹, 鲍官军^{1*}

(1. 浙江工业大学, 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310032;
2. 上海汽车集团股份有限公司 技术中心, 上海 200041)

摘要:针对太阳能光伏发电输出功率不稳定的问题,分析了国内外光伏发电功率预测方法的研究现状,总结并提出了今后研究的建议方向,介绍了太阳辐射、晴空指数、日照时数、云、温度、风速和面板积尘等影响光伏发电的各种因素,着重综述了 2008 年以来光伏发电功率预测尤其是短期预测的研究概况,对光伏功率预测的时间尺度和精度这两个重要指标进行了讨论,分析了数据基础、影响因素、精度指标、时间响应和评价标准等光伏发电预测中需要重点关注的技术难点。研究表明,近年来的研究工作主要集中在短期预测,到目前为止对于各种预测方法尚没有被公认的评价标准,难以对各种预测算法进行评估比较。最后结合综述分析,提出了今后光伏发电功率预测研究工作的建议方向。

关键词:功率预测;光伏系统;评价标准

中图分类号:TM615

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)05-0651-09

Review of PV power generation prediction

QIAN Zhen¹, CAI Shi-bo¹, GU Yu-qing², TONG Jian-jun¹, BAO Guan-jun^{1*}

(1. Key Laboratory of E & M, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China; 2. Technology Center, SAIC Motor Corporation Limited, Shanghai, 200041)

Abstract: Aiming at the problems of unstable solar PV power generation, the related prediction researches were analyzed and the suggestions of researching aspects in the future were proposed. The factors that influencing the PV power generating, such as solar radiation, clearness index, sunshine duration, cloud, temperature, wind speed and dust accumulation, were introduced. Recent progress of PV power prediction from 2008, especially short-term prediction research, was emphasized and overviewed. The two important index of PV power prediction, Temporal scale and accuracy were analyzed. The technical challenges that were needed to focus on in the PV power generation prediction, like data support, factors identification, accuracy metrics, time response and evaluation standard, were explored. The results indicate that most of recent research work are dedicated to short-term prediction and there is no approved standard for all kind of prediction methodologies till now, which makes it impossible to evaluate the algorithms. Finally, the suggestions for PV power generation prediction research in the future are proposed by the summary of the review analysis.

Key words: power prediction; solar PV system; evaluation standard

0 引 言

随着世界经济的快速发展,越来越多的能源被消

耗。化石燃料是不可再生的,石油、煤和天然气储采比分别为 53.3 年、113 年和 55.1 年^[1]。据英国石油公司(BP)预测 2030 可再生资源占全球能源供应的比例

收稿日期:2014-11-19

基金项目:国家高技术研究发展计划“863”计划资助项目(SS2013AA050405);教育部博士点基金资助项目(20123317110004);国际科技合作项目(S2013ZR0609);浙江省重点科技创新团队资助项目(2011R50011-16);特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室(浙江工业大学)开放基金资助项目(2011EM001)。

作者简介:钱 振(1990-),男,浙江瑞安人,主要从事机器人控制、光伏控制等方面的研究。E-mail:zhenqian_zjut@163.com.

通信联系人:鲍官军,男,博士,副教授,硕士生导师。E-mail:gjbao@zjut.edu.cn.

将达到 30%。太阳能是最理想的可再生能源之一,在太阳能应用中,光伏发电是最重要的形式之一。

光伏系统可以应用于单个建筑的独立系统、农村的户用光伏系统、偏远地区的大规模光伏发电厂或其他能源相结合构成的微型智能电网。不管以哪一种形式应用,它都存在发电功率预测的问题。特别是在光伏发电厂和微网系统中,光伏发电输出的预测数据不仅在管理、调度、操作、公共电网和微电网的控制中发挥重要作用,也在系统的优化、能源有效利用、电网的安全和稳定运行中起着至关重要的作用^[2-3]。

本研究首先简要介绍光伏发电及其影响因素,着重讨论分析近年来光伏发电功率预测的研究工作,并针对光伏发电预测研究工作存在的问题深入讨论、提出相关建议。

1 光伏发电的影响因素

1.1 太阳辐射

光伏系统产生电能的数量几乎是和照射到光伏面板上的太阳辐射量成正比的。研究表明:太阳辐射量(单位: kW/m^2)减少 50%,光伏面板的输出功率也会降低 50%^[4]。

地球表面的太阳辐射量对于太阳能系统领域的工程应用和研究来说至关重要。一般来说,入射到光伏面板的太阳辐射由 3 个部分组成,即直接辐射、散射辐射和反射辐射。

1.2 晴空指数

地球表面的太阳辐射和地外辐射的比率称为晴空指数,晴空指数是一个随机参数,它是年、季节、气候条件和地理位置的一个函数。从定义上,晴空指数也是太阳辐射在地球表面的线性函数。所以晴空指数也是太阳辐射的一个指示器。一些研究人员尝试不同的模型来计算晴空指数以预测太阳辐射^[5]。在罗马尼亚的布拉索夫市区,月平均晴空指数被用来预测每月的太阳辐射^[6]。也有一些研究人员认为^[7]:晴空指数应该与其他因素,如规范化日照时间一起作为太阳辐射预测的输入数据。

1.3 日照时数

日照时数是指太阳每天在垂直于其光线的平面上的辐射强度超过或等于 $120 \text{ W}/\text{m}^2$ 的时间长度^[8]。在一个具体的地理位置,可应用随机模型^[9]、模糊逻辑^[10-12]和神经模糊^[13]等方法计算光伏发电系统的日照时数。

1.4 云

云是影响光伏发电输出功率的主要因素之一。由于遮挡作用,云会大幅度降低达到光伏面板的太阳辐射量;并且,云的快速移动或变化会导致光伏输出功率的大幅度波动。一片飘过的云团可以在几秒钟内使一个点上的太阳辐射的变化超过 60%。

云对光伏系统的影响和太阳位置改变对光伏系统的影响不同,太阳位置的改变对光伏系统输出的影响具有统一性和相关性,但云的大小、形状、速度和方向都在持续地变化,所以云具有高随机性和不确定性,从而导致被其遮挡的光伏系统输出功率在不断地随机性波动变化。

1.5 温度

太阳能光伏电池的效率随着温度的升高而减少,因为温度升高会使载流子的迁移率、扩散长度以及少数载流子的寿命变差。硅光伏电池具有很好的吸热性,所以它们的温度会在运行期间显著的上升,从而改变了光伏发电系统的光电转换效率^[14]。光伏面板的温度取决于光伏面板的吸收特性、封装结构与材料、散热性、光伏面板工作的地点、大气参数如辐照度水平、环境温度、风速和特定安装条件等。

1.6 风速

风速对光伏电池性能具有重要的影响,因为它影响光伏面板的温度和灰尘积累。风可以加速光伏面板上方的气流流动,而流动的空气可以加快光伏面板的热传递,使面板的温度降低。实验表明,面板的温度是以风速约 $1.45 \text{ }^\circ\text{C}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 的增加而降低的^[15]。此外,风也影响光伏电池上的灰尘覆盖层中沉积结构,从而影响覆盖层的透射率^[16]。

1.7 灰尘

在户外环境中构建的光伏系统,光伏面板暴露在空气中,天长日久自然会积累灰尘。几项研究表明,积累的灰尘会降低太阳能光伏电池的性能。光伏面板暴露在户外 10 天后,它的透光率平均降低 8%^[18],8 个月后光伏面板的性能大约降低 32%^[19]。光伏面板上的沙子堆积将造成光伏发电效率下降 17%^[20]。谷歌大学的一个对比实验则表明:灰尘会导致光伏面板输出的电流降低 2%^[21-22]。

2 光伏功率预测的研究进展

2.1 研究现状

光伏发电预测方法主要分为两类:统计法和人工

智能法^[23]。统计法包括 ARMA、ARIMA、马尔可夫链等,但实际上基于历史数据训练的人工智能功率预测方法也属于统计法。文献[24]总结了 2008 年之前采用传统模型和人工智能技术进行的光伏系统功率预测研究工作。近年来光伏发电预测研究的最新进展如表

1 所示^[25-58]。由文献列表可见,近年来有关光伏发电预测的研究依然采用马尔可夫链、神经网络、回归分析、支持向量机、最小二乘法等统计分析方法、人工智能方法、相关方法的衍生或融合技术,与文献[24]总结分析的各种方法并无实质性的差别。

表 1 基于统计学的光伏发电功率预测

方法	电站容量	考虑因素	准确率	时间尺度
多层感知神经网络	20 kWp	平均日辐射、气温	R :0.94 ~ 0.99	24 h
马尔可夫链	20 kWp	历史数据	相对偏差:19.193 97%	1 h
灰色马尔可夫链	5.6 kWp	历史数据	相对偏差:−0.9% ~ −3.48%	24 h
BP 网络及次级网络	100 kWp	日照类型,辐射,温度	相对偏差:−6.84% ~ 6.65%	1 h
BP 网络	1.08 MWp	一年的历史发电数据和气象数据	均方根误差:11.55%, 平均绝对误差:8.19%	24 h
四联组合神经网络	20 kWp	温度、湿度、蒸汽压、云覆盖、日照时间、辐射	平均绝对误差:2.786 7% ~ 7.216 1% 平均绝对偏差:0.157 2% ~ 0.455 7%	24 h
循环神经网络(RNN)	仿真	日晒温度、气压、湿度、云量、风速、降雨	平均绝对误差: < 16.86%	24 h
多元回归分析	330 kWp	天气类型(晴天、多云、雨天)	平均误差:26%	18 ~ 31 h
非线性自回归神经网络	4 kWp	晴空辐射和每日的天气条件	平均绝对误差:16.47%	24 h
天气分类与支持向量机	20 kWp	天气预报数据和实际输出功率数据	平均径向误差:8.64% .	24 h
真实输出功率数据测量智能测量网络	仿真	实际输出功率数据	误差 5%	时间间隔:1 min
地区光伏输出功率	德国的光伏电站	提前三天的中期天气预报,辐照度测量数据和输出功率	相对均方根误差:36% (部分地区),13% (整个德国)	3 d
径向基函数神经网络	100 Wp	气象和天气预报数据	云量变化:5%	24 h
适应模糊神经推理系统		测量天气数据和电信号	精度:98% .	
进化神经网络模型	40 kWp	太阳辐照度和环境温度	R :0.994 2	
Levenberg-Marquardt 人工神经网络	20 kWp	辐照度、空气温度和发电数据	R :0.98 ~ 0.99,平均偏差 错误:3.1% ~ 5.4%	2 d
最小二乘支持向量回归	10 kWp	日照类型、太阳辐射、温度和能见度	最大平均误差低于 BP 神经模型 83%	24 h
支持向量回归和数值预测天气变量	1 MWp	温度、湿度、云量、地外日射量	均方根误差:0.104 MWh ~ 0.118 MWh, 最大平均误差:0.065 MWh ~ 0.076 MWh	1 y
灰色模型和 BP 神经网络	200 kWp	光伏电站 5 天的历史数据	平均相对误差:9.35%	24 h
进化编程人工神经网络模型	42 kWp	太阳辐射和环境温度	R :0.990 6	
三层前馈多模型 ANN	42 kWp	太阳辐射、环境温度和风速	R : >0.99;均方根误差: 1.29 kW ~ 1.38 kW	
实时预测模型	2.8 kWp	光伏系统的历史数据和太阳辐射	平均绝对误差: 10.81% ~ 12.63%	24 h
中短期人工神经网络	750 Wp	环境和电池温度、散射太阳辐射	均方根误差:33 W ~ 55 W(4 月) 和 37 W ~ 63 W(八月)	时间间隔:5 h
双数值天气预报模型和 ANN 模型	36 kWp	光伏发电数据和天气类型	均方根误差:13.17%	1 h ~ 39 h

方法	电站容量	考虑因素	准确率	时间尺度
特定区域的弥漫性全球相关法	13 kWp	全球日晒、环境温度、 光伏参数	平均偏差错误:4.1% , 均方根误差:11.4%	每个月
基于 Levenberg Marquardt and Newton Raphson 方法的 BP 网络算法	6.8 kWp	太阳辐照度、电池温度、 电流和功率、气象参数	均方误差:0.006 230 1 , R:0.989 87	24 h
小波神经网络	10 MWp	连续 21 年每日 总太阳辐射	平均绝对误差 18.79%	
结合自回归模型的小波分解	100 Wp	太阳辐射、电池温度、 光伏面板的历史数据	标准误差: 9.874 8E-08	
双正交小波分解方法	仿真	风速、辐射	误差 3% ~3.5% . 均方根误差:2.39%	24 h
进化编程的 ANN 模型	1.92 kWp	太阳辐射和环境温度	R: >0.993 60	
大规模精确太阳辐射预测	德国的光 伏系统	来自欧洲中期天气预 报中心的天气数据	均方根误差:4% ~5%	2 d
核函数极限学习机	10 kWp, 40 kWp	历史数据(无需实 时数值天气预报)	平均相对误差:16% ~ 18%	24 h

2.2 时间尺度

由表 1 可知,大部分研究的时间尺度是 1 天左右,其原因在于:

(1)长期预测相对比较容易。长期预测大多是基于光伏电站发电和 NWP(数值天气预报)记录的历史数据,并通过统计回归可获得一个合理的并且可以接受的预测结果。这种类型的预测通常用于光伏电站的设计、选址和咨询服务,要求精度不高。因此,长期预测很容易实现,一些企业和非营利组织已经开发了光伏发电长期预测的软件。

(2)短期预测的重要性和必要性。对于所有类型的光伏应用,如光伏电站、光伏微网、分布式光伏发电系统等,都必须有短期预测模块来支持系统的安全与稳定运行。此外,随着光伏系统的快速发展,光伏系统短期功率预测的需求也在不断增加并越来越迫切。

(3)短期预测能够满足不同时间尺度的要求。当短期预测符合其预期的精确度时,它同样也可以得到中、长期功率预测所需要的结果。

2.3 预测精度

表 1 中的文献分别使用了下列误差标准:均方根误差 RMSE,平均绝对误差百分比 MAPE,最大平均误差 MAE,平均偏差 MBE,相对偏差,相对均方根误差 rRMSE,平均绝对偏差 MAD,平均相对误差 MRE,均方误差 MSE,平均误差,平均绝对误差,归一化误差,平均相关系数 R,等等。即使是相同的误差标准 RMSE,MAPE,研究结果也呈现出相当大的差异。不同预测方法的均方根误差值如表 2 所示,其中的均方根误差 RMSE 存在两种度量方式:功率和百分比。因为不同

文献研究对象的功率容量差异较大,用功率表示的 RMSE 差异巨大,如其中一篇文献的 RMSE 是 33 W ~ 63 W,而另一篇文献的 RMSE 却高达 0.1 MW。相对而言,百分比形式的 RMSE 更具有横向可比性,但依然差距较大,最小的仅 2.39%、最大的为 13.17%。同样,如表 3 所示的平均绝对误差百分比 MAPE 最小为 2.786 7%、最大为 16.86%。

表 2 不同预测方法的均方根误差值

序号	方法	均方根误差
1	BP 神经网络	11.55%
2	支持向量回归	0.104 MW ~ 0.118 MW
3	三层前馈复合人工 神经网络模型	1.291 0 kW ~ 1.376 8 kW
4	人工神经网络	33 W ~ 55 W(四月) 37 W ~ 63 W(八月)
5	双数值天气预报模型和 基于人工神经网络模型	13.17%
6	特定区域的弥漫性 全球相关法	11.4%
7	双正交小波分解方法	2.39%
8	大规模精确太阳 辐射预测	4 ~ 5%

3 目前研究中存在的问题分析

由上述文献及分析可知,近年来在光伏发电预测方法上没有突破性的进展及成果,对光伏发电功率预测相关问题缺乏深层次思考与研究。本研究从以下几个方面总结分析光伏发电预测中需要重点关注的问题。

3.1 数据基础

传统的物理预测方法根据太阳能辐射模型、电站模型、光伏转换模型、电路模型和逆变器模型来预测输出功率。但受辐射的不确定性、云的变化、雨水和环境、电池温度等因素的影响,会导致短期预测不够准确。在这种情况下,基于统计和人工智能技术的输出功率预测方法可以综合考虑并补偿上述各种因素的影响。不过,这些方法需要充分的历史数据支持,以供统计处理和人工神经网络的训练。通常,至少需要光伏系统输出功率一年的连续且完整的数据进行统计回归。神经网络相关的算法不仅需要光伏发电系统的输出功率的历史数据,而且与气象和数值天气预报的历史数据紧密相关。历史数据的缺少会使相关的统计数据和人工智能预测方法无效。同时,不完整的历史数据可能导致很大的预测误差。除了历史数据之外,数值天气预报,如云、风、温度、湿度和降雨等实时数据,也有助于预测的在线训练和调整内部参数以获得更高的预测精度。不同预测方法的误差如表3所示。

表3 不同预测方法的平均绝对误差百分比

序号	方法	平均绝对 误差百分比/(%)
1	BP神经网络	8.19
2	4个神经网络(多层感知器、径向基函数、复发和神经网络)	2.7867~7.2161
3	递归神经网络(RNN)	16.86
4	基于预测模型的NARX神经网络	16.47

除了历史数据的完整性,另一个值得关注的问题是数据本身。数据的采样间隔、准确性、收集、预处理、数值天气预报的选择和本地传感器指标特性等都从不同方面决定着数据本身的特性,也将很大程度上影响预测的准确性。研究表明,更准确的天气预报可以将光伏发电功率预测精度提高10%左右^[34]。

3.2 影响因素

正如表1所示,各种研究文献几乎考虑了所有影响光伏发电功率预测性能的可能因素,但主要的因素是太阳辐射和环境温度、电池温度。实际上,清洁度指数和日照时间是通过改变达到光伏面板的太阳辐射量来影响光伏系统输出功率。虽然在部分文献中没有明确指出,但在光伏发电功率预测中,晴空指数和日照时间也常常作为影响因素之一。灰尘覆盖光伏面板,将减少光伏面板吸收太阳辐射的比例,最终降低光伏面

板的输出功率。不同于辐射、云、温度、风速等因素,灰尘对光伏功率输出的影响是一个长期且平稳的过程,因为灰尘的沉降、积累和自然清除是一个持续且稳定的过程。灰尘对光伏面板性能的影响具有缓慢性 and 渐进性,不能反映在超短期或短期预测当中,但可以根据其影响特性进行补偿。

风速和云也明显地影响光伏系统的功率输出,但是很少被考虑到,因为它们的属性变化很大且很快,在几分钟内甚至几秒钟内使光伏发电输出具有很陡的斜坡,这超出了大多数人工智能方法处理庞大数据量的响应时间。而在数小时、数天或数周时间水平的短期或中期预测中,这种急剧的变化可以被视为异常而忽视。但是在超短期预测中,影响预测精度的最重要因素是云。云只有很小甚至没有惯性,所以云变幻莫测,它的形状、大小、速度和方向都在改变。云的变化会立即改变光伏面板接收到的太阳辐射量,并迅速引起光伏系统输出功率的变化。有研究人员采用天空成像仪^[59-60]和太阳跟踪摄像头^[61]探测和跟踪影响光伏发电输出功率的云朵变化,但其算法的时间分辨率还不能达到预期的精度。

3.3 精度指标

尽管光伏电站已经在世界范围内得到推广应用,但是从文献分析可以看出:到目前为止还没有关于光伏发电功率预测的相关标准。作为最大的风电部署国,西班牙拥有严格的风电并网标准,其中包括48 h时间尺度的风电场输出功率预测技术指标,即:平均误差为20%,最大误差为30%;24 h时间尺度的风电场输出功率预测的平均误差为10%,最大误差为15%^[62-63]。但光伏发电系统还没有类似的具体标准和要求。

其次,在各种文献中有太多的光伏功率预测的性能指标参数,如均方根误差、相对均方根误差、平均绝对误差百分比、平均绝对偏差、平均相对误差、平均偏差错误、均方误差、相对偏差、平均误差、平均绝对误差、平均相对误差、归一化误差、最大平均误差、平均相关系数,等等。这些预测精度指标使用不同的数学模型和判据,因而很难将它们进行统一比较分析,难以形成标准。

3.4 时间响应

时间响应是控制系统中的一个技术术语。虽然很少有文献提到光伏发电功率预测的响应时间参数,但是毫无疑问它在逆变控制、并网控制、电力监视和实时调度控制中具有非常重要的作用。在短期和超短期预

测中,响应时间可以在相当短的时间内为控制系统提供准确的决策数据支持,保证系统的性能,并保持高动态品质。光伏发电功率预测的响应时间主要取决于算法。不同的算法及其软件实现决定了执行算法的时间长度,从而决定了预测的响应时间。显然,回归方法的响应时间较短,而基于人工智能技术的方法需要更多的时间进行训练以满足所需要的预测精度和性能。所以在短期/超短期预测中,需要平衡精度和时间响应这两个指标,以满足实际应用的需求。

3.5 评价标准

如果没有长时间的应用测试数据或在相同条件下对比实验、应用验证,仅仅通过算法、仿真结果或孤立的实验结果来评价光伏发电功率预测方法是不严谨的。虽然已有大量有关光伏发电功率预测的研究工作,但在这个领域至今没有统一的预测方法评价标准。随着光伏系统的大面积推广,光伏发电系统的部署、设计和应用需要光伏发电功率预测标准。此外,功率预测标准将为电网接纳光伏系统提供决策依据。光伏领域的工程师和研究人员也需要在报告和论文中用一个通用评估方法为读者提供全面、可信的数据和研究结论。

综合考虑各方面的因素,应在光伏发电功率预测的评价标准中明确以下信息:

(1)光伏电站相关数据。包括:①电站信息:经度、纬度、海拔高度、气候类型等;②电力系统信息和模型:光伏面板、逆变器、存储系统、传感器等。

(2)历史数据。包括数据源、数据类型、数据采样间隔、数据精度、数据的完整性及合理性。

(3)误差指标。包括几种常用的误差计算方法,如:均方根误差、平均绝对误差百分比、平均相对误差、最大平均误差和相关系数等。

(4)时间尺度和时间分辨率。预测时间尺度可以是小时、天、周或月,时间分辨率可以是秒、分钟或小时。

(5)算法复杂度。即,在预测方法中所使用的计算方法和计算资源的成本。

(6)时间复杂度。预测方法的时间成本。

(7)经济性。预测方法及其实施的经济性分析。

4 结束语

全球性的能源形式日趋严峻,太阳能光伏发电将成为最有前景的可再生能源之一。在过去几十年里,光伏发电系统已经在世界各地得以推广应用。在光伏

发电系统应用中,输出功率预测是关键技术之一。本研究对 2008 年以来有关光伏发电输出功率预测的研究工作进行综述分析,总结如下:

(1)大多数的研究工作都针对短期功率预测(时间尺度 24 h),研究对象、预测方法及结果差异较大;

(2)太阳辐射、环境温度和电池温度是光伏发电短期预测中最重要的因素,而云特别是高层云是超短期预测必须考虑的首要因素;

(3)数据是光伏发电预测的必备基础;

(4)响应时间是光伏发电短期/超短期功率预测的一个重要指标;

(5)到目前为止,还没有被普遍认可的标准用于评估各种预测方法。

从信息流的角度来看,光伏发电功率预测就是采用某种学习计算方法对历史数据信息和实时数据信息进行加工处理,然后给出新的信息:预测结果数据。即光伏发电功率预测主要分为 3 个部分:输入信息、输出信息和信息处理方法。由以上分析可知,目前绝大多数的研究工作都集中在信息处理方法上,即尝试采用各种算法或综合算法进行功率预测;而对于输入信息本身的研究、对输出结果的可用性和多方位综合评价与分析,缺少系统性的研究与探讨。

结合综述分析,笔者对今后光伏发电功率预测研究提出如下建议:

(1)应加强数据的完整性和有效性设计。注重数据采集、处理和存储积累各环节的设计,从数据来源、数据类型、数据精度、数据密度、时间分布、数据关联性等方面保证数据的完整性和有效性,保证预测的准确性和可重复性;

(2)应研究制定一种统一的光伏发电功率预测评估评价标准。针对光伏发电功率预测的实际需求,以常用的预测目标参数为考察指标,制定综合的评估评价标准体系;

(3)应研究开发适用于具体实际光伏系统的功率预测方法。由于实际光伏系统及其所处地理环境千差万别,普遍适用的功率预测方法是不存在的。以工程应用为出发点和最终目标,以具体系统的特点、历史数据和环境特征为基础,研究适用于具体系统的功率预测方法,使之具有同时具有研究的意义和工程应用价值。

参考文献(References):

- [1] BOB D. BP statistical review of world energy 2014. [EB/OL]. [2014-6-18]. [http://www. bp. com/en/global/co](http://www.bp.com/en/global/co)

- porate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy. html.
- [2] 吴红斌,蔡 亮. 可再生能源分布式发电系统的经济调度[J]. 农业工程学报,2010,26(12):287-292.
- [3] CHINE W, MELLIT A, PAVAN A M, et al. Fault detection method for grid-connected photovoltaic plants[J]. **Renewable Energy**,2014,66(10):99-110.
- [4] KHATIB T, MOHAMED A, MAHMOUD M, et al. A new approach for meteorological variables prediction at Kuala Lumpur, Malaysia, using artificial neural networks-application for sizing and maintaining photovoltaic systems[J]. **Journal of Solar Energy Engineering**, 2012, 134(5):21001-21005.
- [5] GUEYMARD C A. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: detailed theoretical performance assessment[J]. **Solar Energy**, 2003, 74(5):355-379.
- [6] CRISTINA S. Estimating Clear Sky Solar Global Radiation using Clearness Index for Brasov Urban Area [C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Maritimes and Maval Science and Engineering 2010. Greece: World Scientific and Engineering ACAD and SOC,2010:150-153.
- [7] WAEWSAK J, CHANCHAM C. The clearness index model for estimation of global solar radiat[J]. **Thammasat Int. J. Sc**,2010,15(1):54-61.
- [8] ANGSTRÖM A. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation[J]. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**,1924,210(50):121-126.
- [9] JAIN P K, LUNGU E M. Stochastic models for sunshine duration and solar irradiation[J]. **Renewable Energy**,2002(27):197-209.
- [10] SEN Z. Fuzzy algorithm for estimation of solar irradiation from sunshine duration[J]. **Solar Energy**,1998,63(1):39-49.
- [11] GOMEZ V, CASANOVAS A. Fuzzy modeling of solar irradiance on inclined surfaces [J]. **Solar Energy**, 2003(75):307-315.
- [12] IQDOUR R, ZEROUAL A. Prediction of daily global solar radiation using fuzzy systems[J]. **International Journal of Sustainable Energy**,2007(26):19-29.
- [13] MELLIT A, ARAB A H, KHORISSI N, et al. An ANFIS-based forecasting for solar radiation data from sunshine duration and ambient temperature[C]// Proceedings of 2007 Power Engineering Society General Meeting. NJ, USA, 2007:1-6.
- [14] NISHIOKA K, HATAYAMA T, URAOKA Y, et al. Field test analysis of PV system output characteristics focusing on module temperature[J]. **Solar Energy Materials and Solar Cells**,2003(75):665-671.
- [15] TAMIZHMANI G, JI L, TANG Y, et al. Photovoltaic module thermal/wind performance: long-term monitoring and model development for energy rating [C]// Proceedings of 2003 NCPV and Solar Program Review Meeting Proceedings. USA: [s. n.],2003:936-939.
- [16] GOOSSENS D, KERSCHAEVER E V. Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells: the effects of wind velocity and airborne dust concentration on cell performance[J]. **Solar Energy**,1999(66):277-289.
- [17] MANI M, PILLAI R. Impact of dust on solar photovoltaic performance: research status, challenges and recommendations[J]. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2010(14):3124-3131.
- [18] GARG H P. Effect of dirt on transparent covers in flatplate solar energy collectors[J]. **Solar Energy**,1974(15):299-302.
- [19] SALIM A, HURAIB F, EUGENIO N. PV power-study of system options and optimization [C]// Proceedings of the 8th European PV Solar Energy Conference. Dordrecht, Netherlands: Kluwer,1988:688-692.
- [20] WAKIM F. Introduction of PV power generation to Kuwait [M]. Kuwait Institute for Scientific Researchers, Kuwait City,1981.
- [21] KATZ G B. Effect of dust on solar panels. [EB/OL]. [2011-4-27]. www.gregorybkatz.com/Home/effect-of-dust-on-solar-panels.
- [22] SULAIMAN S A, HUSSAIN H H, LEH N, et al. Effects of dust on the performance of PV panels[J]. **World Academy of Science, Engineering and Technology**,2011(58):588-593.
- [23] ZHENG Z W, CHEN Y Y, HUO M M, et al. An overview: the development of prediction technology of wind and photovoltaic power generation[J]. **Energy Procedia**,2011(12):601-608.
- [24] MELLIT A, KALOGIROU S A. Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review[J]. **Progress in Energy and Combustion Science**,2008(34):574-632.
- [25] MELLIT A, PAVAN A M. A 24-h forecast of solar irradiation

- ance using artificial neural network; Application for performance prediction of a grid-connected PV plant at Trieste, Italy[J]. **Solar Energy**,2010(84):807-821.
- [26] 丁 明,徐宁舟. 基于马尔可夫链的光伏发电系统输出功率短期预测方法[J]. 电网技术,2011(35):152-157.
- [27] LI Y Z, HE L, NIE R Q. Short-term forecast of power generation for grid-connected photovoltaic system based on advanced grey-markov chain[J]. **Energy and Environment Technology**,2009(2):275-278.
- [28] 张 勃. 北京地区光伏系统发电功率预测的研究[D]. 秦皇岛:燕山大学电气工程学院,2013.
- [29] 陈国良,孙丽兵,王金玉. 大型光伏并网电站功率预测系统设计[J]. 电力与能源,2014(1):93-95.
- [30] 卢 静,瞿海青,刘 纯,等. 光伏发电功率预测统计方法研究[J]. 华东电力,2010,38(2):563-567.
- [31] CHAOUACHI A, KAMEL R M, ICHIKAWA R, et al. Neural network ensemble-based solar power generation short-term forecasting[J]. **World Academy of Science, Engineering and Technology**,2009(54):54-59.
- [32] YONA A, SENJYU T, SABER A Y, et al. Application of neural network to one-day-ahead 24 hours generating power forecasting for photovoltaic system[C]// Proceedings of 2007 Intelligent System Applications to Power Systems. NY, USA: IEEE,2007:1-6.
- [33] 赵 杰,张艳霞. 基于 CAPSO-RNN 的光伏系统短期发电量预测[J]. 中国电力,2012(4):87-91.
- [34] KUDO M, TAKEUCHI A, NOZAKI Y, et al. Forecasting electric power generation in a photovoltaic power system for an energy network[J]. **Electrical Engineering in Japan**, 2009(167):16-23.
- [35] CAI T, DUAN S, CHEN C. Forecasting Power Output for Grid-Connected Photovoltaic Power System Without Using Solar Radiation Measurement[C]// Proceedings of 2010 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. NJ, USA: IEEE, 2010:773-777.
- [36] SHI J, LEE W, LIU Y, et al. Forecasting Power Output of Photovoltaic System Based on Weather Classification and Support Vector Machine[C]// Proceedings of Annual Meeting of the IEEE Industry-Applications-Society. NY, USA: IEEE,2011:1-6.
- [37] MATSUMOTO J, ISHII D, OKAMOTO S, et al. Highly-Accurate Short-Term Forecasting Photovoltaic Output Power Architecture Without Meteorological Observations in Smart grid[C]// Proceedings of the 2011 1st International Symposium on Access Spaces. NJ, USA: IEEE,2011:186-190.
- [38] LORENZ E, HURKA J, HEINEMANN D, et al. Irradiance forecasting for the power prediction of grid-connected photovoltaic systems[J]. **Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**,2009(2):2-10.
- [39] VASAK M, GULIN M, VIC J C, et al. Meteorological and Weather Forecast Data-Based Prediction of Electrical Power Delivery of a Photovoltaic Panel in a Stochastic Framework[C]// Proceedings of 34th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics. NJ, USA: IEEE,2011:733-738.
- [40] MELLIT A, KALOGIROU S A. Neuro-Fuzzy Based Modeling for Photovoltaic Power Supply System[C]// Proceedings of 2006 First IEEE International Power and Energy Conference. USA: IEEE,2006:88-93.
- [41] SULAIMAN SI, RAHMAN T K A, MUSIRIN I, et al. Optimizing Three-Layer Neural Network Model for Grid-Connected Photovoltaic System Output Prediction[C]// Proceedings of 2009 Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications. USA: IEEE,2009:338-343.
- [42] MELLIT A, PAVAN A M. Performance prediction of 20kWp grid-connected photovoltaic plant at Trieste Italy using artificial neural network[J]. **Energy Conversion and Management**,2010(51):2431-2441.
- [43] TIAN J, ZHU Y, TANG J. Photovoltaic Array Power Forecasting Model Based on Energy Storage[C]// Proceedings of 2010 Critical Infrastructure. NJ, USA: IEEE,2010:1-4.
- [44] FONSECA J, OOEZKI T, TAKASHIMA T, et al. Use of support vector regression and numerically predicted cloudiness to forecast power output of a photovoltaic power plant in Kitakyushu, Japan[J]. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**,2012,20(7):874-882.
- [45] WANG SX, ZHANG N, ZHAO Y S, et al. Photovoltaic System Power Forecasting Based on Combined Grey Model and BP Neural Network[C]// Proceedings of 2011 Electrical and control Engineering. USA: IEEE, 2011:4623-4626.
- [46] SULAIMAN S I, MUHAMMAD K S, MUSIRIN I, et al. Hybridization of Meta-Evolutionary Programming and Artificial Neural Network for Predicting Grid-connected Photovoltaic System Output[C]// Proceedings of 2013 TENCON

- Spring Conference. NJ, USA: IEEE,2013:445-449.
- [47] SULAIMAN S I, MUSIRIN I, RAHMAN T. Prediction of total AC Power Output from a Grid-Photovoltaic System Using Multi-Model ANN[C]// Proceedings of 2008 World Scientific and Engineering Academy and Society. Greece: World Scientific and Engineering ACAD and SOC,2008: 118-123.
- [48] SU Y, CHAN L, SHU L, et al. Real-time prediction models for output power and efficiency of grid-connected solar photovoltaic systems[J]. **Applied Energy**,2012(93): 319-326.
- [49] IZGI E, OZTOPAL A, YERLI B, et al. Short-mid-term solar power prediction by using artificial neural networks[J]. **Solar Energy**,2012(86):725-733.
- [50] FERNANDEZ-JIMENEZ L A, MUÑOZ- JIMENEZ A, FALCES A, et al. Short-term power forecasting system for photovoltaic plants[J]. **Renewable Energy**,2012(44): 311-317.
- [51] LACOUR AYOMPE, AIDAN DUFFY, SARAH MCCORMACK, et al. Measured performance of a 1.72 kW rooftop grid connected photovoltaic system in Ireland[J]. **Energy Conversion and Management**,2011,52(2):816-825.
- [52] YU T, CHANG H. The Forecast of the Electrical Energy Generated by Photovoltaic Systems Using Neural Network Method[C]// Proceedings of 2011 Electric Information and control Engineering. USA: IEEE,2011:2758-2761.
- [53] ZHOU H, SUN W, LIU D C, et al. The Research of Daily total Solar-Radiation and Prediction Method of Photovoltaic Generation based on Wavelet-Neural network[C]// Proceedings of 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering. NJ, USA: IEEE,2011:1-5.
- [54] SALAH C B, MABROUK A B, OUALI M. Wavelet Autoregressive Forecasting of Climatic Parameters for Photovoltaic Systems[C]// Proceedings of 2011 8th International Multi-Conference on System, Signals and Devices. USA: IEEE,2011:1-6.
- [55] BONANNO F, CAPIZZI G, SCIUTO G L. A Neuro Wavelet-Based Approach for Short-Term Load Forecasting in Integrated Generation Systems[C]// Proceedings of 2013 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP). USA: IEEE,2013:772-776.
- [56] HUSSAIN T N, SULAIMAN S I, MUSIRIN I, et al. A Hybrid Artificial Neural Network for Grid-Connected Photovoltaic System Output Prediction[C]// Proceedings of 2013 IEEE Symposium on Computers & Informatics (ISCI). USA:IEEE,2013:108-111.
- [57] LORENZ E, SCHEIDSTEGE T, HURKA J, et al. Regional PV power prediction for improved grid integration[J]. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**,2011(19):757-771.
- [58] 刘 念,张清鑫,李小芳. 基于核函数极限学习机的分布式光伏短期功率预测[J]. 农业工程学报,2014,30(4): 152-159.
- [59] GHONIMA M S, URQUHART B, CHOW C W, et al. A method for cloud detection and opacity classification based on ground based sky imagery, Atmos[J]. **Meas. Tech.**, 2012(5):2881-2892,.
- [60] 陈志宝,李秋水,程 序,等. 基于地基云图的光伏功率超短期预测模型[J]. 电力系统自动化,2013(19):20-25.
- [61] JAYADEVAN V T, CRONIN A, LONI V, et al. Looking to the sky to predict solar power intermittency[M]. USA: Bulletin of the American Physical Society,2011.
- [62] ZHOU Y, WANG Q, FANG T, et al. Spain's wind power development: Experience and message[J]. **Energy Technology and Economics**,2010,22(1):9-14.
- [63] STEWART J. Windmills of the green mind[J]. **Geographical**,2006,78(1):56-58.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

钱 振,蔡世波,顾宇庆,等. 光伏发电功率预测方法研究综述[J]. 机电工程,2015,32(5):651-659.

QIAN Zhen, CAI Shi-bo, GU Yu-qing, et al. Review of PV power generation prediction[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(5):651-659.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>