

太阳能光伏发电量预测方法综述

万 贝^{1,2}, 姚彦鑫^{1,2*}, 黄雅琦^{1,2}

¹北京信息科技大学光电测试技术及仪器教育部重点实验室位, 北京

²北京信息科技大学高端装备智能感知与控制北京市国际科技合作基地位, 北京

Email: *yanxin_buaa@126.com

收稿日期: 2020年10月16日; 录用日期: 2021年1月7日; 发布日期: 2021年1月15日

摘 要

本文主要讲述当前能源储备状况及未来预期的情况, 分析太阳能的特性及使用太阳能光伏发电的意义和价值, 并对此前相关研究进行总结。对当前国内外的主流的太阳能光伏预测方法进行了详尽的分类, 分析了各类方法的特点、可以达到的预测精度、优缺点和未来太阳能光伏预测方法的发展趋势。本文对太阳能光伏预测的研究具有一定的研究意义。

关键词

太阳能, 光伏预测, 神经网络, 点预测法, 概率预测法

Review of Solar Photovoltaic Power Generation Forecasting

Bei Wan^{1,2}, Yanxin Yao^{1,2*}, Yaqi Huang^{1,2}

¹Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing

²Advanced Equipment Intelligent Perception and Control, Beijing International Cooperation Base for Science and Technology, Beijing Information Science & Technology University, Beijing

Email: *yanxin_buaa@126.com

Received: Oct. 16th, 2020; accepted: Jan. 7th, 2021; published: Jan. 15th, 2021

Abstract

This paper mainly describes the current energy reserve status and future expectations, analyzes the characteristics of solar energy and the significance and value of using solar photovoltaic power

*通讯作者。

generation, and summarizes the previous related research. The current domestic and foreign mainstream solar photovoltaic forecasting methods are classified in detail, and the characteristics of various methods, the prediction accuracy, advantages and disadvantages, and the development trend of solar photovoltaic prediction methods in the future are analyzed. This paper has certain research significance on the prediction of solar photovoltaic.

Keywords

Solar Energy, Photovoltaic Prediction, Neural Network, Point Prediction Method, Probability Prediction Method

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 太阳能预测研究的意义

进入 21 世纪以来, 世界各国经济、科技、社会发展迅速, 发展带来的能源问题也随之而来。2018 年中旬发布的《BP 世界能源统计年鉴》[1]提到, 在过去的一年中全球一次能源消费增长 2.2%, 相比于上一年上涨了 1 个百分点, 也高于近十年平均增速 1.7%的水平, 是 2013 年以来的最快增速。2017 年底, 全球范围内探测到的石油储量为 16,970 亿桶, 同比下降了 5 亿桶(0.03%), 按照 2017 年产量水平可满足世界未来 52.6 年的产量。全世界探明煤炭储量目前满足 134 年的全球产量。对于石油、天然气这种化石能源来讲, 过度消耗会产生不可逆的后果, 为了实现当今世界能源的可持续发展, 各个领域逐步采用可再生能源代替原有的化石能源实现其功能。

太阳能相对于人类来说是最直接的、最方便的清洁能源, 光伏发电(Photovoltaic power generation)是目前太阳能利用的一种主要形式[2]。光伏发电分为离网和并网两种形式, 随着光伏并网技术的成熟, 并网形式已成为主流趋势。太阳能光伏发电系统的发电量会受到光照强度、季节类型、天气类型、温度、湿度等影响, 因此采集到的太阳能数据会具有很大的随机性。为确保用电安全、能源调度合理性及能源利用率, 对太阳能光伏发电量进行相关预测具有重要意义。

1.2. 太阳能预测研究概述

从 20 世纪 80 年代开始, 由于世界能源消耗加速, 德国、西班牙、美国和日本等国率先进入了太阳能光伏发电领域。为了保障本国电网运行的稳定性、可靠性, 他们均开展了太阳能光伏发电量预测理论和应用技术研究, 并取得了较为丰硕的研究成果[3]。

根据预测时间的不同, 光伏发电系统的预测可以分为长期、中期和短期预测。中长期预测时长为 30 天至 365 天, 短期预测时长为几分钟到几天[4]。光伏发电功率短期预测效果将直接影响电力系统的用电安排和调度, 因此, 光伏发电功率的短期预测得到了国内外相关研究者重点关注[5]。

光伏发电系统短期预测的预测方法又可分为间接法和直接法[3]: 间接法, 先预测太阳的辐射强度, 再依据光电转换效率计算预测短期预测的输出功率。直接预测法, 根据数学统计预测方法, 将气象数据和光伏发电站历史发电功率数据输入到建立好的预测模型中, 由模型的输出得到短期预测的输出功率。

间接法模型不需要大量的数据支撑[6]，但其建模过程十分复杂、运算量大、预测精度不高。直接法预测精度高，建模过程简单、计算量比较小，但需要利用大量的历史数据。直接法在光伏发电功率短期预测中得到广泛的应用。

2. 光伏发电功率预测的物理方法

2.1. 电子元件模型预测法

电子元件模型法是国外学者研究得到的一种基于光伏电池的硬件预测方法。在上世纪 80 年代时间序列法问世的同一时期，美国学者最先提出了基于光伏半导体设备进行光伏发电预测的原理，它以温度、太阳辐射和太阳辐射分布为预测模型的输入[7]；二极管是物理学中常用的一种元器件，诺贝尔奖获得者 Green 由此获得启发提出了二极管模型(Diode Model)预测法[8]；该预测方法只是对于光学器件的初步尝试，随后西班牙学者在此基础上进一步提出了 Araujo-Green [9]预测方法。

2.2. 简单物理模型预测法

简单物理模型法是光伏发电产业在欧洲发展至上世纪 90 年代得到的产物，这是物理类预测方法中非常重要的一项研究成果。德国 Oldenburg 大学是这个研究的先驱者，卫星探测数据、气象观测数据和电力参数首次被专辑的学者全部应用在光伏发电功率的预测过程中[10]；在此基础上，有学者将太阳能辐射强度、观测和卫星遥感反演辐射资料等也加入进行光伏发电功率预测的物理模型中[11]。湖北省气象局带头开展了国内的相关工作，其研制出的“太阳能光伏发电预报系统(1.0 版)”，已被国内多家光伏电站使用[12]。由于简单物理模型方法的平均预测误差范围是 5.0%~20.0%，所以简单物理模型方法在国内外中小型并网光伏电站中得到广泛应用。

2.3. 复杂物理模型预测法

当今社会，人们对于能源的需求量日益增加，煤炭等不可再生能源储量已濒临匮乏，同时风力发电、太阳能发电并入电网也伴随着巨大的风险，因此为了降低电网运行中存在的风险，就要求低于发电量预测准确度需要达到高准确度的要求。由此，德国一大学率先提出的复杂物理模型预测法[13]；经实际测试后得到的结果显示，该预测方法的预测误差基本处于 5.0%以下，得到了很好的预测效果。为了能够进一步提高预测光伏发电功率的准确度，日本的学者在预测时增加了阴影、太阳能采集板、气象条件这三种参数，来提高预测模型的预测精确度[14]。

复杂物理模型类预测方法结合了光伏发电原理和数值天气预测模式，同时又考虑了多种天气因素，包含了较为复杂的数据结构，可以预想，复杂物理模型预测方法是未来大型并网光伏电站主要应用的预测方法。

3. 光伏发电功率预测的统计方法

3.1. 时间序列法

时间序列法是国内外专家学者最开始进行光伏发电功率的出发点，国外的相关研究起步时间要略早于国内。上世纪 80 年代开始，国外关于光伏发电功率步入正轨。最先开始此项研究的学者是来自西班牙马拉加大学的 Sidrach-de-Cardona [3]，他提出将多元线性回归模型光伏发电量的预测相结合，这一结合是光伏发电领域中的一次重要尝试；随后日本在此和项研究上进一步改进，他们建立了一种多元回归预报方程[15]，并将它用于世博园的逐小时光伏发电量预测，得到了较好的结果。Chowdhury 是最早将两种自回归滑动模型(ARMA 和 ARIMA)应用于的光伏发电量预测的科研人员[16]。随后一所大学的教授改进

了 ARMA 模型,然后将新的模型进行了晴天条件下逐小时光伏发电量预测,但整体预测误差均在 25%以上,因此效果是有所欠缺的;同时也有专家学者对 ARIMA 模型进行了改进,进行了小型光伏发电系统进行了预测实验[17]。云南师范大学的李光明引领了国内光伏发电功率的预测研究,他采用的研究方法是多元线性回归模型[18];东北电力大学的兰华也对吉林地区进行了晴天条件下的相关测试工作[19]。

在光伏电站发电量预测技术发展的早期,时间序列法是研究的重点,模型预测误差一般在 9.0%~45.0%之间。但由于时间序列法在实际应用中预测能力较差,没有得到广泛的应用。

3.2. 时间趋势外推法

灰色理论和马尔可夫链是光伏发电功率的预测过程中的两种重要的方法。进入 90 年代以后,美国宇航局的科学家 Safie 就提出了将马尔可夫链应用在光伏发电系统的思想[20];而随着马尔可夫链在光伏发电功率的研究过程中的不断深入,法国研究员 Muselli 发现马尔可夫链具有自身局限性,即建立的模型对天气条件极为敏感[21]。而国内学者同样对此进行了相关研究,合肥工业大学的丁明等采用马尔可夫模型对某一特定地点进行晴天条件下的光伏发电量预测,但预测误差在 9.0%~56.0%之间,即预测结果的波动性较强[22];随后另一所大学的教授提出了一种将灰色理论和马尔可夫相结合的预测模型[23],并在学校进行了相关发电量预测的测试工作。以上的一些研究成果是光伏发电功率预测领域早期获得的一些典型成果。但此类方法的都有一个缺点,就是建立模型的预测精度对天气敏感度极高,因此后续的一些研究过程已不再进行相关的后续研究。

3.3. 点预测法

贝叶斯法、SVM 支持向量机法、广义可加模型法、随机森林法是目前国内外短期预测中主要的预测方法。法国一家太阳能协会在对光伏发电量进行预测时应用了 SVM 和广义可加模型法,同时对叠加模型进行了相应的预测实验[24]。意大利一所大学的 Bracale 教授等在光伏发电功率的预测过程中应用了贝叶斯统计理论[25]。而国内对于点预测法的研究,栗然等人将 SVM 支持向量机法应用于光伏发电预测系统,并同时结合了气象资料和美国航天局提供的地区太阳辐射数据,进行了更加权威的预测分析[26];随后又有其他人员在此基础上进行了相关改进。点预测类方法误差大致处于在 8.0%~13.0%之间,从总体看预测精度比较接近。

3.4. 概率预测法

近十年,由于新型统计预测理论不断发展,研究者在光伏电站发电量的预测中增加了支持向量机分位数回归(QSVM)和分位数回归森林两种方法。国外对此项研究已经取得了进展,而国内还未开展此项研究工作。目前概率预测方法还不成熟,仍处于试验阶段。

3.5. 智能预测法

智能预测法最早出现于 90 年代的日本,研究者们分析了温度、日照强度、辐射强度、湿度、风速等数据,并将这些数据作为预测时的辅助条件,同时将前向反馈神经网络(FFNN)作为中心方法[27];随后又出现了多种其他的神经网络模型[28]。近几年关于神经网络的研究不断深入,美国学者将模糊 ARTMAP 神经网络应用于光伏系统发电量预测[29];意大利的一个市将 Mellit 自适应小波网络[30]方法应用于光伏电站发电量预测,根据数据统计,预测误差在 3.9%~6.6%之间。

近些年来,又有国内外研究学者提出了一些神经网络与其他技术结合的预测方法,并取得了一定成果。文献[31]基于两层前馈神经网络模型,采用最小均方误差(Least Mean Square, LMS)学习算法,能够预测大规模的光伏发电系统的输出功率。文献[26]使用布谷鸟算法优化了 BP 神经网络,对于预测精度的提

高有很明显的作用。文献[32]将 Elman 神经网络与果蝇优化算法(FOA)结合建立预测模型,利用 FOA 的全局寻优性能克服了神经网络收敛速度慢的缺点。文献[33]将自组织特征映射模型与小波神经网络相结合,对不同天气进行聚类 and 建模,该预测方法显著提高了预测精度,但是容易陷入局部最小问题。

而国内华中科技大学开展了采用 RBFNN 方法预测本校 18 kW 光伏系统逐小时发电量的技术试验,并在此基础上将其建立成模型[34]。

由于智能预测方法精度较高,预测误差在 3.0%~11.0%中间,目前已经成为国内外统计类预测技术研究的重点,也是近些年中小型并网光伏电站的主要预测方法之一。

4. 结论

本文主要对当前国内外的太阳能光伏发电的预测方法研究趋势进行了分析,对每种主流方法的代表性算法、各种算法的优缺点和目前研究达到的精度水平做了梳理和分析,总结了太阳能光伏发电的预测方法目前的发展状况以及未来的发展趋势。本文对于研究太阳能光伏发电量的预测方法具有一定的研究意义。

参考文献

- [1] 钱伯章,李敏. 能源结构随能源需求增长而持续多样化——2018 年世界能源统计年鉴解读[J]. 中国石油和化工经济分析, 2018(8): 51-54.
- [2] 周圣尧. 铋和钨酸铋复合光催化固氮体系的构筑及改性研究[D]: [硕士学位论文], 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [3] 崔洋,孙银川,常倬林. 短期太阳能光伏发电预测方法研究进展[J]. 资源科学, 2013, 35(7): 1474-1481.
- [4] Tao, C., Duan, S. and Chen, C. (2010) Forecasting Power Output for Grid-Connected Photovoltaic Power System without Using Solar Radiation Measurement. *IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, Hefei, 16-18 June 2010, 773-777. <https://doi.org/10.1109/PEDG.2010.5545754>
- [5] 李芬,陈正洪,成驰,等. 太阳能光伏发电量预报方法的发展[J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(2): 136-142. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1673-1719.2011.02.010>
- [6] 段培永,张洁珏,崔冲,等. 太阳能光伏发电功率短期智能预测方法[J]. 山东建筑大学学报, 2016, 31(3): 205-211. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1673-7644.2016.03.001>
- [7] Charkraborty, S., Weiss, M.D. and Simoes, M.G. (2007) Distributed Intelligent Energy Management System for a Single-Phase High-Frequency AC Micro-Grid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **54**, 97-109. <https://doi.org/10.1109/TIE.2006.888766>
- [8] Mellit, A., Benganem, M. and Kalogirou, S.A. (2006) An Adaptive Wavelet-Network Model for Forecasting Daily Total Solar-Radiation. *Applied Energy*, **83**, 705-722. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2005.06.003>
- [9] Mellit, A. and Pavan, A.M. (2010) A 24-H Forecast of Solar Irradiance Using Artificial Neural Network: Application for Performance Prediction of a Grid-Connected PV Plant at Trieste, Italy. *Solar Energy*, **84**, 807-821. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.02.006>
- [10] Green, M.A. (1982) *Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Application*. Prentice-Hall, New Jersey.
- [11] Araujo, G.L.E. and Marti, M. (1982) Determination of the Two-Exponential Solar Cell Equation Parameters from Empirical Data. *Solar Cells*, **5**, 199-204. [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(82\)90027-8](https://doi.org/10.1016/0379-6787(82)90027-8)
- [12] Hammer, A.,Heinemann, D.,Lorenz, E. and Lückehe, B. (1999) Short-Term Forecasting of Solar Radiation: A Statistical Approach Using Satellite Data. *Solar Energy*, **67**, 139-150. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00038-4](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00038-4)
- [13] Lorenz, E., Hurka, J., Heinemann, D. and Georg Beyer, H. (2009) Irradiance Forecasting for the Power Prediction of Grid-Connected Photovoltaic Systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **2**, 2-10. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2009.2020300>
- [14] 杨超, 樽绍弘贵. 太阳能光伏发电系统发电量的预测方法[J]. 智能建筑电气技术, 2011, 5(2): 29-34. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1729-1275.2011.02.008>
- [15] Sidrach-de-Cardona, M. and Lopez, L.M. (1998) A Simple Model for Sizing Stand alone Photovoltaic Systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **55**, 199-214. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(98\)00093-2](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(98)00093-2)

- [16] Kudo, M., Takeuchi, A., Nozaki, Y., Endo, H. and Sumita, J. (2009) Forecasting Electric Power Generation in a Photovoltaic Power System for an Energy Network. *Electrical Engineering in Japan*, **167**, 16-23. <https://doi.org/10.1002/ej.20755>
- [17] Chowdhury, B.H. and Rahman, S. (1987) Forecasting Sub-Hourly Solar Irradiance for Prediction of Photovoltaic Output. *19th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, New Orleans, 4-8 May 1987, 171-176.
- [18] 李光明, 刘祖明, 何京鸿, 等. 基于多元线性回归模型的并网光伏发电系统发电量预测研究[J]. 现代电力, 2011, 28(2): 43-48. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1007-2322.2011.02.009>
- [19] 兰华, 廖志民, 赵阳. 基于 ARMA 模型的光伏电站出力预测[J]. 电测与仪表, 2011, 48(2): 31-35. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1001-1390.2011.02.007>
- [20] Safie, F.M. (1989) Probabilistic Modeling of Solar Power Systems. *Reliability and Maintainability Symposium*, Atlanta, 24-26 January 1989, 425-430. <https://doi.org/10.1109/ARMS.1989.49639>
- [21] Muselli, M., Poggi, P., Notton, G. and Louche, A. (2001) First Order Markov Chain Model for Generating Synthetic "Typical Days" Series of Global Irradiation in Order to Design Photovoltaic Stand alone Systems. *Energy Conversion and Management*, **42**, 675-687. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00090-X](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00090-X)
- [22] 丁明, 徐宁舟. 基于马尔科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(1): 152-157.
- [23] Li, Y.Z., Luan, R. and Niu, J.C. (2008) Forecast of Power Generation for Grid-Connected Photovoltaic System Based on Grey Model and Markov Chain. *2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Singapore, 3-5 June 2008, 1729-1733. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2008.4582816>
- [24] Aznarte, J.L., Girard, R., Kariniotakis, G., et al. (2008) Short Term Forecasting of Photovoltaic Power Production. DB2: Forecasting Functions with Focus to PV Prediction for Microgrids.
- [25] Bracale, A., Caramia, P., Martinis, U.D., et al. (2012) An Improved Bayesian Based Approach for Short Term Photovoltaic Power Forecasting in Smart Grids. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Santiago de Compostela, 28-30 March 2012, 1451-1456.
- [26] 栗然, 李广敏. 基于支持向量机回归的光伏发电出力预测[J]. 中国电力, 2008, 41(2): 74-78. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1004-9649.2008.02.019>
- [27] Hiyama, T. (1997) Neural Network Based Estimation of Maximum Power Generation from PV Module Using Environmental Information. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **12**, 241-247. <https://doi.org/10.1109/60.629709>
- [28] Yona, A., Senjyu, T., Saber, A.Y., et al. (2008) Application of Neural Network to 24-Hour-Ahead Generating Power Forecasting for PV System. *IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, Pittsburgh, 20-24 July 2008, 1-6.
- [29] Chaouachi, A., Kamel, R.M., Ichikawa, R., et al. (2009) Neural Network Ensemble-Based Solar Power Generation Short-Term Forecasting. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, **54**, 54-59.
- [30] Charkraborty, S., Weiss, M.D. and Simoes, M.G. (2007) Distributed Intelligent Energy Management System for a Single-Phase High-Frequency AC Micro-Grid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **54**, 97-109. <https://doi.org/10.1109/TIE.2006.888766>
- [31] Ehsan, R.M., Simon, S.P. and Venkateswaran, P.R. (2015) Artificial Neural Network Predictor for Grid-Connected Solar Photovoltaic Installations at Atmospheric Temperature. *International Conference on Advances in Green Energy*, Thiruvananthapuram, 17-18 December 2014, 44-49. <https://doi.org/10.1109/ICAGE.2014.7050142>
- [32] 韩艳赞, 周伟. 改进 BP 神经网络的光伏系统发电功率预测[J]. 计算机系统应用, 2016, 25(11):227-231. <http://dx.chinadoi.cn/10.15888/j.cnki.csa.005582>
- [33] 韩伟, 王宏华, 杜炜. 基于 FOA-Elman 神经网络的光伏电站短期出力预测模型[J]. 电测与仪表, 2014, 51(12): 120-124. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1001-1390.2014.12.023>
- [34] 陈昌松, 段善旭, 殷进军. 基于神经网络的光伏阵列发电预测模型的设计[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 153-158. <http://dx.chinadoi.cn/10.3321/j.issn:1000-6753.2009.09.023>