

光伏发电功率预测方法的探索

卢 静¹, 翟海清², 冯双磊¹, 王 勃¹

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 上海市电力公司, 上海 200122)

摘 要:首先,分析了影响光伏电站输出功率的各类气象因素,再根据物理原理建立了气象因素与光伏电池板电气特性之间的关系,最后,通过光伏电池的二极管模型及逆变器损耗模型实现了对光伏电站输出功率的预测,并根据某光伏电站的实测数据对功率方法进行验证。预测结果表明,该方法有较高的预测精度,能够满足工程应用的要求,且不受历史数据的限制,可用于新建光伏电站的功率预测。

关键词:光伏电站;功率预测;物理方法

作者简介:卢 静(1985-),女,硕士,工程师,研究方向为新能源功率预测技术。

中图分类号:TM615 **文献标志码:**B **文章编号:**1001-9529(2013)02-0380-05

基金项目:国家科技支撑计划重大项目(2011BAA07B06)

Physical Method for Photovoltaic Power Prediction

LU Jing¹, ZHAI Hai-qing², FENG Shuang-lei¹, WANG Bo¹

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: The various meteorological factors affecting the output power of the photovoltaic (PV) power station are analyzed at first. Then the relationship between the meteorological factors and electrical characteristics of PV panel is formulated on the basis of physical theory. Finally, the output power of PV station is predicted using the PV cell diode model and the inverter loss model, and the measured data from an actual PV station are used to verify the prediction. The prediction results show that the method can improve the prediction precision and meet the requirements of practical application. Besides, the method is not restricted by the historical data, adaptable to the power prediction of newly-built PV power stations.

Key words: PV power station; power prediction; physical method

Foundation items: The National Science and Technology Plan Major Project of China(2011BAA07806)

光伏发电具有波动性和间歇性,大规模光伏电站并网运行会对电力系统的安全稳定经济运行造成影响。预测光伏电站的输出功率可以有效降低大规模光伏接入对电网的影响,提高电网接纳光伏的能力,以充分利用太阳能资源,获得更大的经济效益和社会效益。

光伏发电具有与风力发电不同的两个特性:风电场通常在偏远地区,远离城市,而光伏发电可以屋顶光伏的形式在城市开发建设,风电场的出力通常具有反调峰特性,而光伏电站通常在10:00~15:00出力较大,与城市的用电负荷有较好的一致性。如果能实现对光伏电站输出功率的有效预测,可以与城市的分散储能相结合,起到有效的调峰作用,从而降低备用容量。

光伏发电功率预测的研究起步较晚,国外的

研究工作主要集中在以太阳能资源监控系统的研究。如文献[2]建立了光伏发电功率预测的净空模型,通过对一个区域内21个观测点的太阳能资源数据监测,得出了采用数值天气预报和不采用数值天气预报的优化模型,并分析了这两种模型的适应范围。美国在光伏发电功率预测方面也开始了前期研究,除了短期预测,中长期功率预测也是主要研究内容^[3]。法国和加拿大也开展了并网光伏电站性能预测方面的研究,主要通过卫星云图预测出地面太阳辐照强度,再根据预测模型预测光伏电站的发电情况^[2,4]。以上研究目前仍处于试验阶段,尚未出现投入工程应用的光伏发电功率预测系统。

我国在光伏发电功率预测领域开展了大量研究工作,其中,由中国电力科学研究院开发的光伏

发电功率预测系统已在上海、宁夏、青海等电网调度机构投运。目前单个光伏电站的预测均方根误差为 11% ~ 13%, 平均绝对误差 5% ~ 8%, 预测出力曲线和实际出力曲线的相关系数在 0.85 以上, 达到国内领先、国际先进水平。

类似于风电功率预测, 光伏发电功率预测方法也主要分为统计方法、物理方法以及两者相结合的混合方法。其中统计方法的基本思路与风电功率预测统计方法近似, 即根据历史统计数据找出天气状况与光伏电站出力的关系, 然后, 根据实测数据和数值天气预报数据对光伏电站输出功率进行预测, 常用的预测方法有时间序列法、BP 神经网络方法^[5]、径向基函数神经网络和支持向量机^[6]等。统计方法对于历史数据比较完备的光伏电站, 预测精度相对较高, 而对于缺乏历史数据的新建光伏电站, 统计方法存在先天不足, 此时只能借助物理方法进行预测。

目前, 我国的光伏发电事业处于快速发展初期, 每年将有大量新建光伏电站建成投产, 为确保大规模光伏电站安全、可靠、高效的并网运行, 开发出满足工程应用的物理预测方法非常关键。

本文对光伏电站功率预测的物理方法进行研究和, 并针对某实际光伏电站的运行数据对物理预测方法进行了验证, 肯定了方法的有效性。

1 光伏电站输出功率影响因素分析

光伏电池工作环境的多种外部因素, 如辐照强度、环境温度、风速等都会对电池的性能指标带来影响, 且温度的影响和辐照强度的影响常常同时存在。这里重点分析光伏电池的辐照强度特性和温度特性。

图 1 为光伏电池在不同辐照强度和不同温度下的伏安特性曲线。

在温度不变的情况下, 随着光照强度的升高, 开路电压 U_{oc} 呈现对数比例增加, 短路电流 I_{sc} 和输出功率均与光照强度成正比。

在光照强度不变的情况下, 随着温度的升高, 改善了载流子的扩散长度, 以及长波的光谱响应, 使得短路电流 I_{sc} 呈现正的温度系数, 但它随温度的变化很小; 开路电压 U_{oc} 和温度之间近似线性的关系, 且 U_{oc} 呈负温度系数。总的来说, 由于 U_{oc} 的影响要远远大于 I_{sc} 的影响, 所以光电转换效率呈

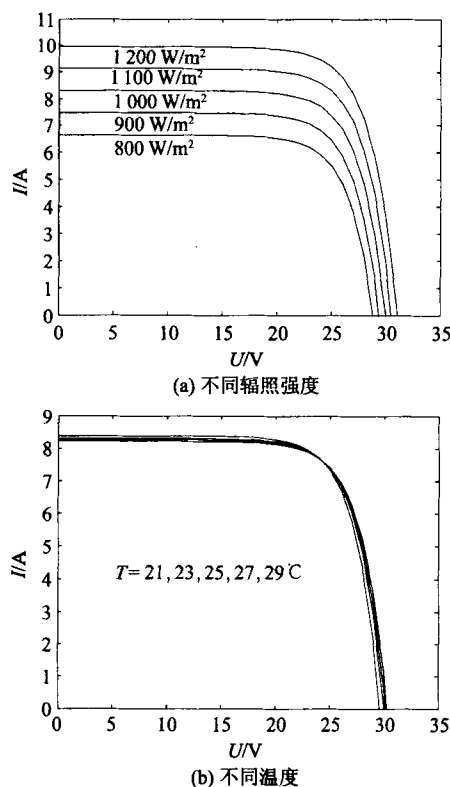


图 1 光伏电池伏安特性曲线

随温度升高而降低的趋势。

2 光伏电站功率预测的物理方法的基本原理

本文提出的光伏电站功率预测的物理方法是以数值天气预报作为输入, 通过太阳位置模型校正数值天气预报中的辐照度为有效辐照度, 然后通过光伏电池的二极管模型将有效辐照度转化为功率, 考虑逆变器的效率, 最终得到光伏电站的输出功率。

图 2 给出了光伏电站功率预测物理方法的流程图。光伏电站功率预测的物理方法中, 主要包括了太阳位置模型、光伏电池的二极管模型以及逆变器的效率模型。

2.1 太阳位置模型

由于地球的自转和公转, 太阳相对地平面位置在不断变化, 从而使得地面接收到的太阳能量也在不断变化。

在赤道坐标系中, 太阳位置由时角和赤纬角两个坐标决定^[7,8], 如图 3 所示。时角表征了地球自转对太阳位置的影响, 以正午 12 点为零, 0 ~ 12 点时角为负, 12 ~ 24 点时角为正。赤纬角表征了地球公转对太阳位置的影响, 太阳直射点在南

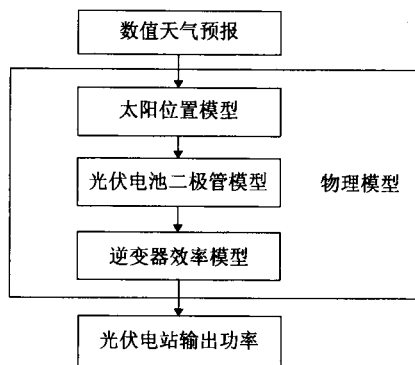


图2 光伏电站功率预测的物理方法流程图

北回归线 $\pm 23.45^\circ$ 之间移动, 当前时刻下太阳直射点的纬度称为赤纬角, 即太阳中心和地心的连线与赤道平面的夹角。

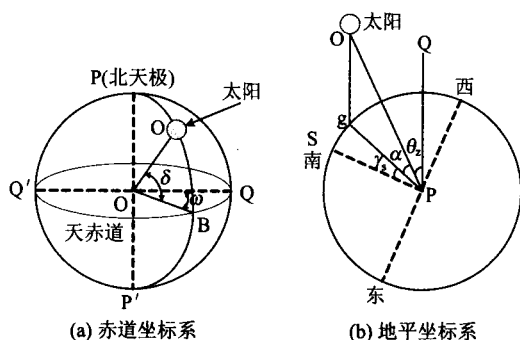


图3 太阳位置图

在地面上观察太阳相对地平面的位置时, 太阳位置用高度角 α 和方位角 γ 两个坐标决定。高度角 α 与天顶角 θ_z 为互余关系, 天顶角 θ_z 为太阳光线 OP 与地平面法线 QP 之间的夹角, 高度角 α 是太阳光线 OP 与其在地平面上投影线 Pg 之间的夹角。方位角 γ 是太阳光线在地平面上的投影与地平面正南方向的夹角。

太阳高度角由所在地理位置在当前时刻下的纬度、赤纬角和时角的确定

$$\sin \alpha = \cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (1)$$

太阳相对地平面位置的变化使得单位地面面积上接收到的太阳能不断变化。对于倾斜平面, 太阳入射线和倾斜面法线之间的夹角定义为倾斜平面的入射角 θ_i , 随着太阳位置的变化, 太阳入射角的大小也不断变化。

地面所接受的太阳辐射能量受到太阳位置变化的影响, 太阳位置模型采用入射角和方位角来表征太阳相对于地面倾斜平面的位置, 由光伏电站所在地理位置, 光伏电池的倾斜角, 季节, 时间这些因素所决定的。采用太阳位置模型能够准

确的表述这些因素对太阳辐照强度的影响。

2.2 二极管模型

光伏电池等效电路的理想形式和实际形式如图4所示。

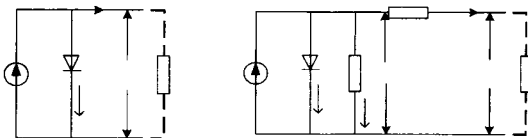


图4 等效电路

一个理想的光伏电池, 因串联电阻 R_s 很小、并联电阻 R_{sh} 很大, 进行理想电路计算时, 它们都可以忽略不计, 因此, 理想的等效电路只相当于一个电流为 I_{ph} 的恒流源与一个二极管并联, 如图4(a)所示。

图4(b)中, I_{ph} 为光生电流, 其值正比于光伏电池的表面积和入射光的光照强度; I_d 为暗电流, 指的是在光伏电池在无光照的情况下, 光伏电池 $P-N$ 结自身所能产生的总扩散电流的变化情况; I_L 为光伏电池输出的负载电流; U_{oc} 为电池的开路电压, 与入射光光照强度的对数成正比, 与环境温度成反比, 与电池的面积大小无关; R_L 为电池的外负载电阻; R_s 为串联电阻, 一般小于 1Ω , 主要由电池的体电阻、表面电阻、电极导体电阻、电极与硅表面间接触电阻和金属导体电阻等组成; R_{sh} 为旁路电阻, 一般为几 $k\Omega$, 主要由电池表面污浊和半导体晶体缺陷引起的漏电流所对应的 $P-N$ 结漏泄电阻和电池边缘的漏泄电阻等组成。

光伏电池等效电路中各变量的方程式

$$I_d = I_0 \left(\exp \frac{qU_d}{AkT} \right) - 1 \quad (2)$$

$$I_L = I_{ph} - I_d - \frac{U_d}{R_{sh}} =$$

$$I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(U_{oc} + I_L R_s)}{AkT} \right) - 1 \right] - \frac{U_d}{R_{sh}} \quad (3)$$

$$I_{sh} = I_{ph} - I_d - \frac{U_d}{R_{sh}} - \frac{U_d}{R_s} \quad (4)$$

$$U_{oc} = \frac{AkT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (5)$$

$$U_d = U_{oc} + I_L R_s \quad (6)$$

式中 I_0 ——光伏电池内部等效二极管 $P-N$ 结反向饱和电流;

I_{sc} ——光伏电池的短路电流;

U_d ——等效二极管的端电压;

q ——电子电荷, $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$;

k ——波尔兹曼常量, $0.88 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$;
 T ——绝对温度;
 A ——P-N 结的曲线常数。

2.3 逆变器效率模型

逆变器中开关管的损耗不仅影响光伏电站的可靠性,也影响到光伏电站的发电效率。开关管的损耗由 3 部分组成,开通损耗 P_{ON} ,通态损耗 P_{CON} 和关断损耗 P_{OFF} [9]。

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{ON}} &= \frac{1}{2} f_c C_r U_0^2 \\ P_{\text{CON}} &= I_{Q(\text{RMS})}^2 R_Q \\ P_{\text{OFF}} &= f_c U_0 I_L t_{\text{fr}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中 f_c ——MOSFET 开关频率;
 C_r ——寄生电容和吸收电容之和;
 $I_{Q(\text{RMS})}$ ——开关管的电流有效值;
 R_Q ——开关管在给定温度下的导通电阻;
 I_L ——电感 L 的电流,且 $I_L = I_{\text{IN}}$;
 t_{fr} ——开关开通上升时间。

3 算例分析

采用某沿海并网光伏电站作为算例,该光伏电站的装机容量为 1.05 MW,光伏板采用水平放置的固定支架。以 2008 年的历史数值天气预报数据作为输入,并采用同时段的历史功率数据对模型的预测结果进行验证。

常见的预测误差的评估方法有平均绝对误差,均方根误差,相关系数等。均方根误差放大了出现较大误差的点,更好的反映光伏电站预测模型的准确度,因此本文采用均方根误差 RMSE 对模型的误差进行评估。

$$RMSE = \frac{1}{P} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_p^i - P_a^i)^2}{N}} \quad (8)$$

式中 P_p^i ——预测值;
 P_a^i ——实际值;
 N ——测试样本数;
 P ——装机容量。

首先,为了排除数值天气预报数据的误差,采用实测的光伏电站的辐照强度和温度作为输入数据对光伏电站的物理模型进行验证。这里在春夏秋冬 4 季节中分别选取典型周的时间数据以及全年的数据对模型进行验证。接着采用数值天气预报的数据作为输入对光伏电站的物理模型进行验证。

表 1 列出了光伏电站功率预测的均方根误差(误差统计不包括夜间光伏电站不出力的时段)。图 5 展示了春夏秋冬四季节中采用物理方法对该光伏电站输出功率的预测情况。其中图 5(a)以实际测量的光伏电站的辐照强度和温度为输入;图 5(b)以数值天气预报数据输入。

表 1 光伏电站功率预测的均方根差

时间	春季 4月7 ~15日	夏季 7月7 ~15日	秋季 10月7 ~15日	冬季 1月7 ~15日	全年
以实测辐照强度和温度 为输入	0.026 3	0.025 7	0.035 2	0.041 8	0.038 9
以数值天气预报为输入	0.098 8	0.127 4	0.136 3	0.144 8	0.136 8

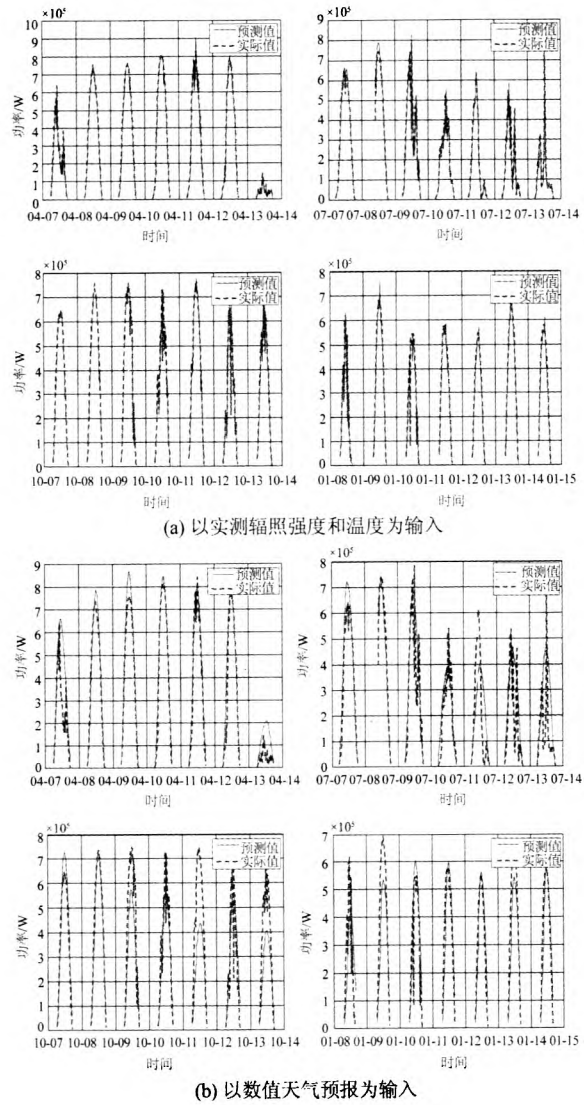


图 5 光伏电站功率预测结果展示

可见,当以实测辐照强度和温度为输入时,光伏电站的物理模型本身在不同季节的转化误差在

2%~5%之间,可见物理模型本身造成的误差非常小。

而当以数值天气预报作为输入数据时,采用本文提出的物理方法的预测误差在9%~15%之间,相对于采用实际观测量作为输入值的预测结果,可知预测误差主要来源于数值天气预报。然而,采用数值天气预报作为输入的预测结果仍具有较高的预测精度,采用物理方法对光伏电站进行功率预测完全可以满足实际工程应用的要求。

4 结语

光伏电站输出功率预测对于保持电力系统的电力电量平衡、经济运行以及增加光伏电站的并网容量有着非常重要的意义。本文对光伏功率预测的物理方法进行了研究,分析了各类气象要素、光伏电站地理位置、光伏电池板的倾斜角以及时间、季节的不同对光伏电站输出功率的影响。通过物理原理将数值天气预报中的水平辐照和环境温度转化为光伏电池板的有效辐照强度和板面温度,然后通过光伏电池的二极管模型计算光伏电池的输出功率,考虑逆变器的损耗,得到光伏电站总的输出功率。以某光伏电站实际数据为算例对物理方法进行验证,结果表明该方法具有较高的准确性,可满足实际生产应用要求,且计算简单,不需要历史数据支持,适用于任意光伏电站。

参考文献:

- [1] DREWS A, DE KEIZER A C. Monitoring and remote failure

detection of grid-connected PV systems based on satellite observations. *Solar Energy* 81 (2007): 548 - 564.

- [2] LORENZ E, et al. Benchmarking of different approaches to forecast solar irradiance, in 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Hamburg, Germany, 2009.
- [3] Solar Radiation Forecasts for the USA. Proc. of the 23rd. European PV Conference, 1.9-4.9 2008, Valencia, Spain.
- [4] YONA A, SENJYU T, FUNABASHI T. Application of recurrent neural network to short-term-ahead generating power forecasting for photovoltaic system[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007.
- [5] 卢静,翟海青,等.光伏发电功率预测统计方法研究[J]. 华东电力,2010,38(40).
LU Jing, ZHAI Hai-qing, et al. Study on statistical method for predicting photovoltaic generation power[J]. *East China Electric Power*, 2010,38(40).
- [6] 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.
LI Ran, LI Guang-min. Photovoltaic power generation output forecasting based on support vector machine regression technique[J]. *Electric Power*, 2008,41(2):74-78.
- [7] 赵争鸣,刘建政,孙晓瑛,等.太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [8] WENHAM S R, GREEN M A. Applied photovoltaics, earthscan in the UK and USA[M]. 2007.
- [9] 杨旭,等.零电压过渡PWM软开关电路的损耗计算[J]. 电力电子技术,1999(1):29-32.
YANG Xu, et al. Loss analysis of zero-voltage-transition PWM soft-switching circuit[J]. *Power Electronics*, 1999,33(1):29-32.

收稿日期:2012-11-13

本文编辑:王志胜

电力简讯

三项特高压交流工程获全部国家级支持性文件

近日,国家环境保护部、水利部和国土资源部分别批复了雅安—武汉特高压交流工程的环境影响报告书、水土保持方案报告书和用地预审意见。至此,“三交”特高压工程(淮南—南京—上海、浙北—福州、雅安—武汉特高压交流工程)已取得全部国家级支持性文件,为项目尽快核准并开工建设创造了有利条件。

自2012年8月全面启动“三交”特高压工程前期工作以来,国家电网公司交流建设部全力统筹协调,主动与相关国家主管部门沟通汇报,提前部署有关工作,明确关键控制节点。由国家电网公司交流建设部、国网北京经济技术研究院、中国电力科学研究院、各省电力公司以及评价、设计单位组成的前期工作组紧密协同,加快环评、水保等专题报告编制,全力提升报告质量;加强对审批过程中重大问题的研判,面对审批内容增加、程序严格的新形势,超前策划,有效应对,及时化解了审批过程中可能存在的不利因素。工程所在地省电力公司发挥属地优势,加强与省级主管部门的沟通协调,及时取得省级主管部门意见,为工程顺利通过技术评审打下良好基础。

在组织做好专题技术报告编审工作的同时,国家电网公司交流建设部加强关键环节管控和对重大问题的沟通,强化与国家主管部门的协调,在时间紧、任务重、审批流程多、项目集中的情况下,用不到半年时间全面完成了“三交”特高压工程前期工作,为推动项目核准奠定了坚实基础。

(本刊讯)

作者: [卢静](#), [翟海清](#), [冯双磊](#), [王勃](#), [LU Jing](#), [ZHAI Hai-qing](#), [FENG Shuang-lei](#), [WANG Bo](#)
作者单位: [卢静, 冯双磊, 王勃, LU Jing, FENG Shuang-lei, WANG Bo \(中国电力科学研究院, 北京, 100192\)](#), [翟海清, ZHAI Hai-qing \(上海市电力公司, 上海, 200122\)](#)
刊名: [华东电力](#) 
英文刊名: [East China Electric Power](#)
年, 卷(期): 2013, 41 (2)

参考文献(9条)

1. [DREWS A;DE KEIZER A C](#) [Monitoring and remote failure detection of grid-connected PV systems based on satellite observations](#) 2007
2. [LORENZ E](#) [Benchmarking of different approaches to forecast solar irradiance](#) 2009
3. [Solar Radiation Forecasts for the USA](#)
4. [YONA A;SENJYU T;FUNABASHI T](#) [Application of recurrent neural network to short-term-ahead generating power forecasting for photovoltaic system](#) 2007
5. [卢静;翟海清](#) [光伏发电功率预测统计方法研究](#) 2010(40)
6. [栗然;李广敏](#) [基于支持向量机回归的光伏发电出力预测](#) 2008(02)
7. [赵争鸣;刘建政;孙晓瑛](#) [太阳能光伏发电及其应用](#) 2005
8. [WENHAM S R;GREEN M A](#) [Applied photovoltaics, earthscan in the UK and USA](#) 2007
9. [杨旭](#) [零电压过渡PWM软开关电路的损耗计算](#) 1999(01)

引用本文格式: [卢静](#). [翟海清](#). [冯双磊](#). [王勃](#). [LU Jing](#). [ZHAI Hai-qing](#). [FENG Shuang-lei](#). [WANG Bo](#) [光伏发电功率预测方法的探索](#)[期刊论文]-[华东电力](#) 2013(2)