

王林,陈正洪,唐俊. 2014. 太阳能光伏发电预报方法的应用效果检验与评价. 气象, 40(8):1006-1012.

太阳能光伏发电预报方法的应用效果检验与评价^{* 1}

王 林^{1,2} 陈正洪^{1,2} 唐 俊^{1,2}

1 湖北省气象服务中心, 武汉 430074

2 湖北省气象能源技术开发中心, 武汉 430074

提 要: 基于湖北省气象新能源研究中心光伏电站一年完整的发电数据与同期气象资料, 对辐射和发电功率短期预报方法进行检验分析, 结果表明: (1) 太阳辐射度预报与实况有很好的对应关系, 相关系数在 0.77 以上, 均通过 $\alpha=0.001$ 的显著性水平检验。 (2) 光伏发电功率预报的短期方法中, 以模式辐照度订正值代入光电转换模型的方法最优, 预报第一天的相对均方根误差为 0.16。 (3) 太阳辐射预报及光伏发电功率预报随太阳高度角变化而呈一定的规律性, 冬季中午误差最大, 夏季晚上误差最小; 阴雨天气误差明显高于晴天。 如何降低阴雨天气预报时的误差将是下一步工作中需要研究的重点。

关键词: 太阳辐射, 光伏发电, 预报效果, 天气类型

中图分类号: P49

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.08.011

Verification and Evaluation of Forecast Method of PV Power Generation

WANG Lin^{1,2} CHEN Zhenghong^{1,2} TANG Jun^{1,2}

1 Hubei Meteorological Service Centre, Wuhan 430074

2 Hubei Meteorological Energy Development Centre, Wuhan 430074

Abstract: Based on the power generation data provided by the PV power station of Hubei Meteorological Energy Development Centre and the meteorological data of the corresponding period, we carried out verification and evaluation on the radiation and generating power short-term forecast method and found that: (1) Good correlation exists between the solar irradiance forecasts and the actual situation, with correlation coefficient going above 0.77, passing the 0.001 significance test. (2) The optimal method of short-term forecasting methods is putting mode irradiance into photoelectric conversion model, and the relative root-mean-square error for the first day is 0.16. (3) Solar radiation forecasts and PV power generation forecast with solar elevation angle change present certain regularity. The maximum error is found at winter noons and the minimum is over summer nights. The error is significantly higher in rainy days than in sunny days. How to reduce the error in the rainy weather forecast is the study focus in the next-step work.

Key words: solar radiation, PV power generation, forecast effect, weather type

引 言

太阳能光伏发电技术作为太阳能利用中最具意义的技术, 成为世界各国竞相研究应用的热点(杨金

焕等, 2009)。据欧洲光伏产业协会(European Photovoltaic Industry Association, EPIA)统计, 截至 2011 年底, 全球光伏累计装机容量已达到 138.9 GW_p, 年发电量约为 138.9 TW · h⁻¹ (EPIA, 2014)。我国的太阳能资源丰富, 但对太阳能光伏发

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006036)和中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CAMGJ2012Z07)共同资助
2013 年 8 月 12 日收稿; 2014 年 6 月 10 日收修定稿
第一作者: 王林, 主要从事风能、太阳能等新能源的研究. Email: sealaing@126.com
通信作者: 陈正洪, 从事风能、太阳能等新能源的研究. Email: chenzh64@126.com

电预测技术的研究还处于起步阶段。光伏发电系统的效率受天文、地理、环境和气象等多种因素的影响,功率或发电量输出是一个非平稳的随机过程,具有不连续、不确定的缺点(王一波等,2008),相对于电网是一个不可控源,会对电网安全性、稳定性和经济运行造成一定影响,这正是限制光伏发电大规模应用的难点之一(唐俊等,2010)。

预报效果的检验与评价是太阳能光伏发电预报系统研究中的一个重要内容。光伏发电系统主要在每天的 08:00—18:00 输出电力,辐射预报值、光伏发电量预报值相对于实况误差值具有显著的季节变化和日变化特征(卢静等,2010)。在夏季,光伏发电系统日发电量曲线和电力负荷日变化曲线有很好的相似性,光伏发电系统能够在负荷高峰期较好地提供电力,起到调峰作用(白永清等,2011)。而不同的天气类型,此误差值也呈现差异。陈昌松等(2009)结合历史发电量数据和同期气象数据建立了基于逐日天气预报信息的光伏发电量预测模型,将天气情况划分为云天、晴天和雨天,对次日转折天气发电量

预报误差有明显改善,但对一天内天气型剧烈变化情况则无法满足逐时预报的要求。王明欢等(2012)利用中尺度模式模拟不同天气条件下地表短波辐射情况,对辐射的预报能力晴天最佳,多云次之,阴天普遍较差。

目前,国外光伏发电量预报技术研究已有一定的发展。短期辐射预报(5 h 以上至 3 d),主要使用 MM5、WRF、NDFD、ECMWF 和 GFS/WRF 等中尺度数值预报模式(EPIA,2011),并对模式的结果进行订正和解释应用,德国未来一天的太阳能总辐射预报试验显示,ECMWF 模式预报效果最好(Lorenz et al,2009)(表 1)。西班牙 Joen 大学 19.08 kWp 的光伏电站于 2003 年发电量预报值与实测数据的历史相关系数高达 0.998(Almonacid et al,2009)。日本 NTT Facilities 公司 Kudo 等(2009)根据历史天气资料校验 2005 年 3 月 25 日至 9 月 26 日日本爱知县世博园区 330 kWp 光伏系统发电量数据,日均发电量预报误差为 25.6%,时均预报误差为 30.53%。

表 1 不同模式对德国未来一天太阳辐射预报误差分析(Lorenz et al,2009)

Table 1 RMSE, MAE, and MBE for the two global solar radiation forecasting approaches, first forecast day, complete Germany data set (Lorenz et al, 2009)

中尺度模式	研究机构	时空分辨率	运行方式	均方根误差 (RMSE) / $W \cdot m^{-2}$	平均绝对误差 (MAE) / $W \cdot m^{-2}$	平均误差 (MBE) / $W \cdot m^{-2}$
ECMWF	Oldenburg 大学 (德国)	0.25°×0.25° 3 h	结合清晰度指数 统计处理	92 (40.3%)	59 (26.2%)	-7 (-2.9%)
GFS/WRF	Meteotest (瑞士)	5 km×5 km 1 h	水平面总辐射 直接输出	118 (51.8%)	74 (32.6%)	-1 (-0.3%)

注:括号内的数值为各误差的相对值。

因此,评估预报值在太阳能光伏发电功率预报系统中的适用性,检验预报准确率是否满足国家能源局要求,挑选最适宜的光伏发电功率预报方法,并通过查找不足,提出方法或参数(系数)的修正方案,提高预报准确率,有利于我国太阳能光伏发电功率预报系统的更新升级,最终有利于电网科学调度和大规模太阳能光伏电站的建设、运行。

1 光伏发电功率预报方法简介

随着大规模集中并网光伏发电系统容量的增加,为了避免发电系统输出功率固有的间歇性和不可控等缺点对电网的冲击,有效减轻太阳能并网发电对电网的影响,诸多学者、研究机构开展了太阳能

光伏发电功率预报技术的研究(孙娴等,2012)。陈昌松等(2010)利用华中科技大学屋顶光伏并网发电系统资料通过不同季节气象因素与发电量之间的相关性分析,得出光伏发电量与辐照度的相关性最大并呈正相关。王飞等(2012)通过降低输入维数、构造新预测因子等对辐照度神经网络预测模型进行改进,提高了光伏发电功率预测值预测的准确性。孙银川等(2012)基于宁夏本地化 WRF 模式产品及当地光伏电站提供的发电功率资料,通过 EOF-MOS 方法进行辐射预报订正,使辐照度平均绝对百分比误差降低了 9%左右。湖北省气象服务中心在 2010 年建立了 18 kWp 光伏示范电站,包括并网发电和离网发电,采用了单晶硅、多晶硅和非晶硅薄膜电池组件,分为固定式、单\双跟踪以及 17 种倾角阵列。同

地建立了辐射观测及常规气象要素观测的自动气象站,为小型示范电站设计和建设积累了大量经验,提供了大量可供分析的第一手发电量和气象资料。

湖北省气象服务中心自主开发的《光伏发电预测预报系统 V2.0》[《光伏发电预测预报系统 1.0》升级版(登记证号 2012SR029175)]选用的是 WRFV3 版本,采用一层网格,模式中心位于:31.0°N、112.5°E。水平格点数为 201×182,水平分辨率为 15 km;垂直方向有 35 层;时间步长为 60 s。系统主要使用两类预报方法(图 1),一是基于辐射预报和光电转换效率模型的原理预报法,即根据太阳能电池光伏发电的物理原理、光电转换效率和逆变器转换效率的定义,建立影响光电转换效率及逆变器效率的经验公式和合理的经验系数,输入辐射预报,进行光伏发电功率预报;二是利用实际发电量数据域中尺度数值预报产品输出的气象要素,采用动态统计预报方法,建立 MOS 预报方程,直接计算太阳能光伏发电功率。

本文将选取该示范光伏电站稳定运行后一年的逐 15 min 光伏发电预测预报系统的辐射预报值和

发电功率预报值进行检验分析,为及时更新模型参数,提高预报准确率提供依据(陈正洪等,2011)。

“原理预报法”及“动力统计预报法”对任意指定地点提供未来 1~3 d、分辨率为 15 min 的光伏发电功率预报。不同预报方法采用了不同的建模方案(表 2),所需资料也有所不同,因此具有很广泛的适应性。

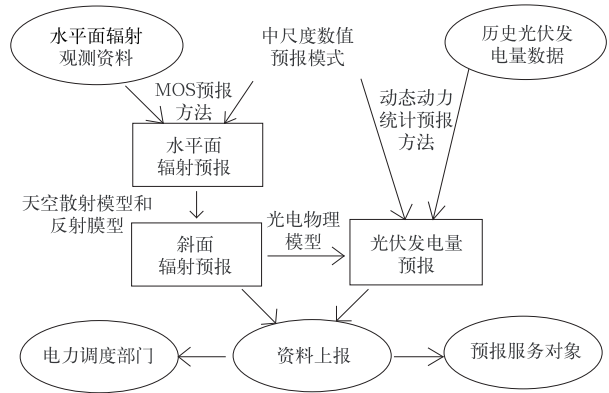


图 1 光伏发电功率预报系统原理结构框架图

Fig. 1 Schematic block circuit diagram of HMB PV system

表 2 短期预报方法分类表

Table 2 Classification of short-term forecasting methods

方法分类	预报方法	建模方案	适应条件
原理法	I	模式辐照度+光电转换模型(指数)	无辐射观测资料有历史功率数据
	II	模式辐照度滚动订正+光电转换模型(指数)	有实时辐射观测资料无历史功率数据
	III	模式辐照度固定系数订正+光电转换模型(指数)	有历史辐射观测资料有历史功率数据
动力统计法	滚动系数 I	30 d 滚动模型(多元线性回归)	有近 20 d 功率数据
	滚动系数 II	30 d 滚动模型(神经网络)	有近 20 d 功率数据
	固定系数	数值模式回算资料与历史光伏电功率资料,分月季线性回归建模	有历史 1 年功率数据
持续法	持续法	使用历史数据替代预报	以上方法都不能正常使用

2 资料与方法

湖北省气象服务中心基于 WRF 中尺度数值模式开发太阳能光伏发电预报系统选,使用原理法、动力统计法每天预报未来 3 天白天的逐 15 min 太阳辐射及发电功率。本文收集 2011 年 4 月 1 日至 2012 年 3 月 31 日太阳辐射、光伏发电功率的实况与预报值。利用气候界限检验、历史极值检验、时间一致性检验等质量检验方法对数据进行检验之前,首先要对所选数据的合理性进行检验,将超过气候学极值的不符合实际情况的数据进行剔除。按如下几条逐项检查:(1)进行内部一致性检验。同期辐射

数据需满足以下几点:(a)总辐照量 \geq 净全辐照量;(b)总辐照量 \geq 散射辐照量;(c)总辐照量 \geq 反射辐照量;(d)总辐照量 \geq 水平面直接辐照量;(e)总辐照量与(散射辐照量+日水平面直接辐照量)差的绝对值 \leq 总辐照量的 20%;(f)总辐射最大辐照度 \geq 净全辐射最大辐照度。(2)记录不能超出气候学界限值:(a)总辐射最大辐照度应 $<2000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;(b)日总辐照量 $<$ 可能的日总辐照量。辐照度资料去除奇异点数据后,有效样本数为 15200 个,占总样本数的 92.3%。

选取相关系数(CORR)、均方根误差(RMSE)及相对均方根误差(RRMSE)对水平面总辐照度(如果电站所在地含有水平面辐射量观测)和逐

15 min、逐日光伏发电功率预测值进行评价和检验。RMSE反映了预测值同实际值的偏差,相对均方根误差反映出预测值相对实际值的变化程度。具体计算方法见式(1)~式(3)。

相关系数(CORR):

$$CORR = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_f^i - \bar{P}_f)(P_o^i - \bar{P}_o)}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_f^i - \bar{P}_f)^2 \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_o^i - \bar{P}_o)^2}} \quad (1)$$

均方根误差(RMSE,单位: $W \cdot m^{-2}$ 或 kW):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_f^i - P_o^i)^2} \quad (2)$$

相对均方根误差(RRMSE):

$$RRMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_f^i - P_o^i)^2 / Cap} \quad (3)$$

式中, N 表示样本序列长度, i 表示第 i 个样本, P_f^i 是第 i 个样本的预报值(单位: $W \cdot m^{-2}$ 或 kW), P_o^i 是第 i 个样本的观测值(单位: $W \cdot m^{-2}$ 或 kW), \bar{P}_f 是 N 个预报样本的平均值(单位: $W \cdot m^{-2}$ 或 kW), \bar{P}_o 是 N 个观测样本的平均值(单位: $W \cdot m^{-2}$ 或 kW)。

在检验太阳辐照度预报相对误差时, Cap 为实况均值(单位: $W \cdot m^{-2}$);检验太阳能光伏发电预报相对误差时, Cap 为光伏电站开机容量(单位: kW)。

3 辐射预报效果检验和评价

3.1 辐射短期预报误差统计分析

根据湖北省气象局楼顶电站2011年4月1日至2012年3月31日为期一年的逐15 min太阳辐照度对未来3 d逐15 min太阳辐照度预报进行检验。模式的参数化方案和时差问题等使预报3 d的预报效果逐渐变差。太阳辐照度预报与实况的相关系数3 d的变化范围为0.77~0.93,均通过 $\alpha=0.001$ 的显著性水平检验。预报第一天的误差最小,相对均方根误差为0.21(表3)。预报效果在不同季节是否存在差异,预报准确性是否会受不同天气的影响,一日当中不同时间段的预报效果是否也有区别,带着这些问题,本文以预报第一天的水平面辐

照度、光伏发电功率为例,将其预报效果按不同季节、不同天气类型及不同时段进行检验和分析。

表3 2011年4月1日至2012年3月31日

逐15 min太阳辐照度预报评价

Table 3 Evaluation of every 15 min solar irradiance forecasts during 1 April 2011 to 31 March 2012

	CORR	RMSE / $W \cdot m^{-2}$	RRMSE
第一天	0.93	52.50	0.21
第二天	0.85	87.45	0.36
第三天	0.77	126.32	0.43

3.2 不同季节时段及天气类型下辐射预报效果评价

众所周知,地球到太阳的距离和地球轴的倾斜影响太阳能辐射量。6—8月夏季白天时间长,地球的北半球朝太阳倾斜,使得夏季太阳能辐射总量大于冬季。太阳辐照度7和8月预测值的RRMSE在0.17左右,冬季1和2月预测值的RRMSE维持在0.24左右。夏季太阳辐照度预测值与实况的RRMSE小于冬季。一日之中,太阳高度角正午大于早晚,太阳辐射强度也较大。10—16时冬季预测值的RRMSE为0.37,此时段的预测值在夏季的RRMSE为0.34,是一天中误差最大时段。07—10时与16—18时冬季预测值的RRMSE在0.16,夏季预测值的RRMSE维持在0.12(图2a和2b)。早晚时段太阳辐照度预测值与实况的RRMSE小于正午时段。太阳高度角大时,光线穿过大气的路程较短,能量衰减得就较少,夏季晴天正午可以达到 $1167 W \cdot m^{-2}$,预报值约为 $1100 W \cdot m^{-2}$,较实际值偏小。冬季晴天正午达到 $615 W \cdot m^{-2}$,预报值偏大,为 $650 W \cdot m^{-2}$ 。

太阳辐射在经过大气层到达地面的过程中,会受到云、气溶胶、水汽和各种气体成分的散射、吸收和反射等作用从而被削弱(申彦波等,2008)。晴朗的天气,云层少且薄,大气对太阳辐射的削弱作用弱,到达地面的太阳辐射较强;在晴朗夏天的正午时刻,大约有70%的太阳辐射穿过大气层直接到达地球表面(杨金焕等,2002)。阴雨天气,由于云层厚且多,水蒸气和尘埃引起的大气散射及水蒸气、 CO_2 引起的大气吸收使作用得到达地面的太阳辐射较弱。对2011年4月1日至2012年3月31日一年的天气状况进行分类,分为晴天、多云、雾、阴天、雨

天和雪。晴天的预报效果最好, $RRMSE$ 为 0.11, 多云的效果次之, 为 0.18, 这两种天气现象约占总天数的 45%。预报雾天和阴天的 $RRMSE$ 相当, 在 0.23 左右。雨、雪天气预测值的 $RRMSE$ 较大, 达到 0.37, 远远大于晴天(图 2c)。

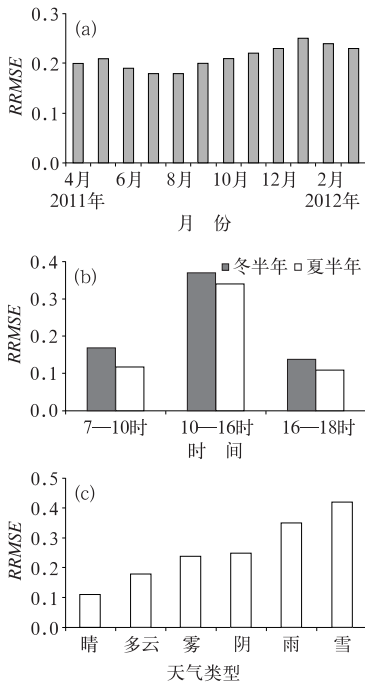


图 2 太阳辐射预报相对均方根误差效果
(a) 逐月效果, (b) 不同时段, (c) 不同天气类型
Fig. 2 Error effect of solar radiation
forecast relative root mean square
(a) monthly, (b) different periods,
(c) different weather types

4 光伏发电功率预报检验、评价

4.1 原理法效果评价

原理预报法采用 3 种建模预报方案, 基于辐射预报和光电转换效率模型, 根据太阳能电池光伏发电的物理模型、光电转换效率模型和逆变器转换模型, 建立影响光电转换效率及逆变器效率的经验公式和合理的经验系数, 输入辐射预报, 进行光伏发电量或功率预报, 以适应不同的数据条件状况。

对 2011 年 4 月 1 日至 2012 年 3 月 31 日逐 15 min 光伏发电功率的 3 种原理法预报效果进行检验(表 4)。表明原理法 3 预报效果最好, 预报 3 d 与实况相关系数分别为 0.68、0.65 和 0.64, 通过 $\alpha = 0.001$ 的显著性水平检验。原理法 3 利用过去一年以上 WRF 回算的地面辐射预报数据和太阳辐射观测数据分季节或月建立固定预报模型, 利用该模型对 WRF 预报辐射进行订正, 结果代入光电转换模型, 得到的预报功率误差明显减小。预报第一天效果最好, $RRMSE$ 为 0.16。

4.2 动力统计法效果评价

动力统计预报法基于历史气象资料[天气情况或(和)辐射资料]和同期光伏发电功率资料, 采用统计学方法(如多元回归和神经网络等相关算法)进行分析建模, 再输入数值模式预报结果的预报法。

统计法 1 预报效果最好, 预报 3 d 与实况相关

表 4 逐 15 min 发电功率预报评价

Table 4 Evaluation of every 15 min power generation forecast

方法	预报第一天			预报第二天			预报第三天		
	CORR	RMSE/kW	RRMSE	CORR	RMSE/kW	RRMSE	CORR	RMSE/kW	RRMSE
原理法 1	0.69	1.04	0.23	0.68	1.04	0.23	0.68	1.12	0.25
原理法 2	0.46	0.94	0.21	0.43	0.95	0.21	0.42	0.97	0.22
原理法 3	0.68	0.74	0.16	0.65	0.75	0.17	0.64	0.76	0.17
统计法 1	0.51	0.94	0.21	0.50	0.94	0.21	0.45	1.03	0.22
统计法 2	0.51	0.94	0.21	0.42	1.27	0.31	0.35	1.69	0.37
统计法 3	0.70	0.95	0.21	0.47	1.16	0.27	0.42	1.18	0.29

系数分别为 0.51、0.50 和 0.45, 通过 $\alpha = 0.001$ 的显著性水平检验(表 4)。统计法 1 是利用过去 20 d 的 WRF 模拟 2 m 比湿、2 m 气温、2 m 露点温度、地表气温、高云量、低云量、太阳高度角及前一日光伏发电量等预报因子与历史发电功率资料, 每日滚动

建立预报模型, 将当日 WRF 模拟结果通过多元线性回归(最小二乘法)实现发电量与预报因子之间的动态统计预报。预报第一天效果最好, $RRMSE$ 为 0.21。

4.3 两种方法预报效果对比

选取相同时段即 2011 年 4 月 1 日至 2012 年 3 月 31 日对两种方法预报的预报效果进行对比。以第一天为例,湖北省气象预警大楼楼顶的光伏电站逐 15 min 发电量预报值与实况值的相关系数均在 0.46 以上,通过 $\alpha = 0.001$ 的显著性水平检验, $RRMSE$ 在 0.16~0.23(表 4)。对两种预报方法不同时效进行对比,原理法 3 预报效果最好, $RRMSE$ 最小。

4.4 不同季节时段及天气类型下光伏发电功率预报效果评价

光伏电站逐日、逐时输出功率与日照时间、光照强度呈高度正相关,日照时间越长、光照强度越大组件输出功率越多(刘玉兰等,2011)。以原理法 3 第一天预报效果为例,将光伏发电功率预报效果按季节、日照和天气类型分类进行检验。光伏发电功率 7 和 8 月 $RRMSE$ 在 0.13 左右,冬季 1 和 2 月的 $RRMSE$ 维持在 0.24 左右。冬季的相对均方根误差明显大于夏季。由于硅电池的负温度效应,温度的升高会引起光伏电池发电效率下降(李芬等,2012)。一日之中,07—10 时发电功率的 $RRMSE$ 冬季为 0.20,夏季为 0.11。10—16 时冬季的 $RRMSE$ 为 0.26,夏季为 0.22,是一天中误差最大时段。16—18 时冬季的 $RRMSE$ 在 0.13,夏季维持在 0.09。冬季的 $RRMSE$ 明显大于夏季,中午的 $RRMSE$ 明显大于早晚,而早上的 $RRMSE$ 又大于傍晚(图 3a 和 3b)。这是因为随着逐时辐照量的增加,光伏阵列转换效率增大达到一定程度后反而呈现下降的趋势,阵列转换效率反而会降低, $RRMSE$ 也随之增大(潘进军等,2014)。

太阳辐射度的四季变化有较大的区域差异(王晓梅等,2013)。南方地区由于散射分量较大,阴雨天气较多,模式预报短波辐射准确率受天气影响较大。在晴朗无云的天气,云量很小,大气透明度高,到达地面的太阳辐射就多,光伏系统出力就大;天空中云雾或者风沙、灰尘多时,云量大且大气透明度低,到达地面的太阳辐射就少,光伏系统出力就小(申彦波等,2008)。对 2011 年 4 月至 2012 年 3 月一年的天气状况进行分类,分为晴天、多云、雾、阴天、雨天和雪。晴天的预报效果最好, $RRMSE$ 为 0.18,多云的效果次之,为 0.22,这两种天气现象约

占总天数的 45%。预报雾天和阴天的 $RRMSE$ 相当,在 0.24 左右。雨、雪天气 $RRMSE$ 较大,雨天的 $RRMSE$ 为 0.28,雪天达到 0.37,远远大于晴天(图 3c)。

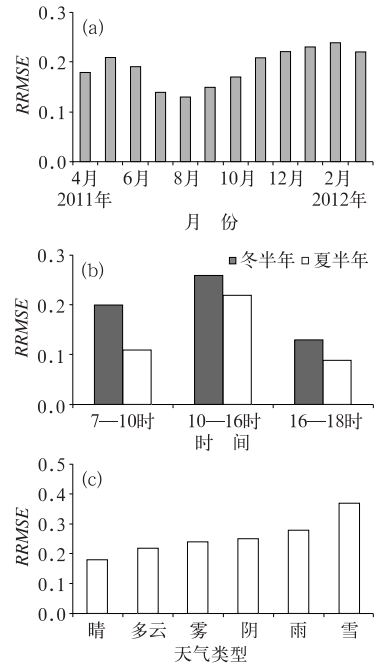


图 3 光伏发电功率原理法 3 预报效果
(a)逐月效果, (b)不同时段, (c)不同天气类型
Fig. 3 Forecast effect of photovoltaic power generation physical method 3
(a) monthly, (b) different periods, (c) different weather types

5 结 论

对 2011 年 4 月 1 日至 2012 年 3 月 31 日湖北省气象服务中心研发的光伏发电预报系统的预报效果评价和检验,结果表明:

(1) 太阳辐射度预报与实况的相关系数在 0.77~0.93,均通过 $\alpha = 0.001$ 的显著性水平检验。预报第一天效果最好, $RRMSE$ 为 0.21。

(2) 太阳能发电预报系统中进行检验的 6 种方法(原理法 1~3 和统计法 1~3),未来第一天的逐 15 min 太阳能发电功率预报与实况的相关系数均在 0.46 以上,通过 $\alpha = 0.001$ 的显著性水平检验, $RRMSE$ 在 0.16~0.23。原理法 3 预报效果好, $RRMSE$ 最小。

(3) 太阳辐射预报及光伏发电功率预报随太阳

高度角变化而呈一定的规律性,一天当中,中午误差最大,晚上误差最小;而冬季误差明显大于夏季。预报效果受天气条件制约比较明显:天气晴好、日照时数较长时,太阳能光伏发电量预报误差明显减小。阴雨天气时,预报误差明显增大。

(4) 模式的分辨率及其参数化方案、气象站辐射观测存在的时差问题及逆变器转换效率对输出的预报结果均有影响。如何通过进一步优化 WRF 中尺度数值模式,降低阴雨天气时的预报误差,提高太阳能光伏发电量预报的精度还有待进一步研究。

参考文献

- 白永清,陈正洪,王明欢,等. 2011. 基于 WRF 模式输出统计的逐时太阳总辐射预报初探. 大气科学学报, 34(3): 363-369.
- 陈昌松,段善旭,殷进军. 2009. 基于神经网络的光伏阵列发电预测模型的设计. 电工技术学报, 24(9): 153-158.
- 陈昌松,段善旭,殷进军,等. 2010. 基于发电预测的分布式发电能量管理系统. 电工技术学报, 25(3): 150-156.
- 陈正洪,李芬,成驰,等. 2011. 太阳能光伏发电预报技术原理及其业务系统. 北京:气象出版社.
- 李芬,陈正洪,成驰,等. 2012. 武汉并网光伏电站性能与气象因子关系研究. 太阳能学报, 33(8): 1386-1391.
- 刘玉兰,孙银川,桑建人,等. 2011. 影响太阳能光伏发电功率的环境气象因子诊断分析. 水电能源科学, 2(12): 200-202.
- 卢静,翟海青,刘纯,等. 2010. 光伏发电功率预测统计方法研究. 华东电力, 38(4): 563-567.
- 潘进军,申彦波,边泽强,等. 2012. 气象要素对太阳能电池板温度的影响. 应用气象学报, 25(2): 150-157.
- 申彦波,赵宗慈,石广玉. 2008. 地面太阳辐射的变化、影响因子及其可能的气候效应最新研究进展. 地球科学进展, 23(9): 915-923.
- 孙娴,姜创业,程路,等. 2012. 一个改进的理想大气太阳辐射计算模型. 气象, 38(9): 1053-1059.
- 孙银川,白永清,左河疆. 2012. 宁夏本地化 WRF 辐射预报订正及光伏发电功率预测方法初探. 中国沙漠, 3(6): 1738-1742.
- 唐俊,傅希德,张俊,等. 2010. 太阳能光伏发电预报数据库设计研究 // 中国气象学会. 2010. 第 27 届中国气象学会年会论文集. 北京:中国气象学会, 234.
- 王飞,米增强,杨奇逊,等. 2012. 基于神经网络与关联数据的光伏电站发电功率预测方法. 太阳能学报, 33(7): 1171-1177.
- 王明欢,赖安伟,陈正洪,等. 2012. WRF 模式模拟的地表短波辐射与实况对比分析. 气象, 38(5): 585-592.
- 王晓梅,张山清,普宗朝. 2013. 近 50 年乌鲁木齐市太阳能资源时空变化分析. 气象, 39(4): 443-452.
- 王一波,李晶,许洪华. 2008. 考虑电网安全稳定约束的光伏电站最大装机容量计算与分析. 太阳能学报, 29(8): 971-975.
- 杨金焕,毛家俊,陈中华. 2002. 不同方位倾斜面上太阳辐射量及最佳倾角的计算. 上海交通大学学报, 36(7): 1032-1036.
- 杨金焕,于化丛,葛亮. 2009. 太阳能光伏发电应用技术. 北京:电子工业出版社.
- Almonacid F, Rus C, Pérez P J, et al. 2009. Renewable Energy, 34(12): 2743-2750.
- European Photovoltaic Industry Association (EPIA). 2011. Global market outlook for photovoltaics until 2015. EPIA, 1-50.
- European Photovoltaic Industry Association (EPIA). 2014. Global market outlook for photovoltaics 2014-2018. EPIA, 1-57.
- Kudo M, Nozaki Y, Endo H, et al. 2009. Forecasting electric power generation in a photovoltaic power system for an energy network. Electrical Engineering in Japan, 167(4): 16-23.
- Lorenz E, Remund J, Müller S, et al. 2009. Benchmarking of different approaches to forecast solar irradiance. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1-10.