

基于模糊随机理论的短期太阳辐射强度预测

赵书强, 谢宇琪, 刘大正, 林 鹏, 胡永强

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 基于模糊随机理论, 提出太阳辐射值预测模型, 得到预测云层覆盖率下太阳辐射值的预测区间及期望值等。分析云层覆盖率的随机性和云遮系数的模糊性; 运用模糊随机理论处理云遮系数; 以无云天气计算太阳辐射值的 REST 模型为基础, 用云遮系数对其辐射值进行修正, 从而得到有云天气的辐射值。利用美国 BMS 光伏电站的数据对模型进行验证, 结果表明该模型具有较好的预测精度。

关键词: 太阳能; 太阳辐射; 云层覆盖率; 模糊随机变量; 云遮系数; 模型; 预测

中图分类号: TM 862

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.07.016

0 引言

近年来, 光伏并网发电发展迅速, 成为解决能源问题的重要途径。同时, 光伏发电受到地理位置、气象条件等因素的影响, 由此产生的波动性也给电网调度带来严峻的挑战^[1-2]。对光伏出力进行预测有助于电力系统调度部门合理制定调度计划, 实现光伏发电与传统电源的联合优化运行^[3]。

太阳辐射是光伏发电最主要的影响因素^[4], 按建模方法的不同, 预测太阳辐射的方法可分为物理法和统计法 2 种。物理法是将数值天气预报的数据直接代入现有物理模型, 即可得到预测值。其优点是可分析每个大气过程, 并根据分析结果优化预测模型。目前, 晴天太阳辐射的预测多采用 HOTTEL 模型^[5]、ASHRAE 模型^[6]、REST 模型^[7], 而有云天气多采用 Nielsen 模型、云遮修正系数模型^[8]等。统计法是基于学习算法, 如灰色预测、神经网络^[9]、支持向量机^[10]、专家系统等, 建立数值天气预报和出力历史数据之间的关系, 再进行预测。但是统计法需要大量不同类型历史数据的支持, 否则不能表明各种不确定性因素对预测值的影响。近年来, 考虑不确定因素的方法逐渐发展起来, 文献^[11]利用自适应神经网络模糊系统对神经网络的预测结果进行修正, 文献^[12]将小波变换与模糊神经网络结合, 但是模糊系统中模糊推理规则的建立需要大量的历史数据以及充足的专家经验。

本文提出了一种新型预测方法, 以不确定理论为基础, 根据数值天气预报的数据, 利用模糊随机理论得到云遮系数的相关计算值, 从而得到太阳辐射强度。

收稿日期: 2014-10-16; 修回日期: 2015-05-12
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(12MS106)
Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(12MS106)

1 模糊随机理论^[13]

1.1 模糊随机变量及其相关值定义

不确定理论是概率论、可信性理论、信赖性理论的统称, 同时还包括模糊随机理论、随机模糊理论、双重随机理论、双重模糊理论等。模糊随机变量是从概率空间到模糊变量构成的集合的可测函数, 换言之, 一个模糊随机变量是一个取模糊值的随机变量。

定义 1 ξ 是一个从概率空间 (Ω, A, P_r) 到模糊变量集合的函数, 并且对于 \mathbf{R} 上的任何 Borel 集 B , $P_{\infty}\{\xi(\omega) \in B\}$ 是 ω 的可测函数, 则称 ξ 是一个模糊随机变量。其中 Ω 为非空集合, A 是样本空间 Ω 的幂集的一个非空子集, P_r 为概率或者概率测度。

定义 2 ξ 为定义在概率空间 (Ω, A, P_r) 上的模糊随机变量, B 是 \mathbf{R} 中的 Borel 集, 则称从 $(0, 1]$ 到 $[0, 1]$ 的函数 $C_h(\xi \in B)(\alpha) = \sup_{P_r\{A\} \geq \alpha} \inf_{\omega \in A} C_r\{\xi(\omega) \in B\}$ 为模糊随机事件 $\xi \in B$ 的机会。其中 $\sup_{P_r\{A\} \geq \alpha}$ 表示子集 A 的概率测度大于 α 水平下的上确界, $\inf_{\omega \in A}$ 表示样本属于子集 A 的下确界, $C_r\{\cdot\}$ 表示可信性测度。

定义 3 设 ξ 是随机模糊变量, 如下式右端 2 个积分中至少有 1 个为有限的, 则称

$$E[\xi] = \int_0^{+\infty} P_r\{\omega \in \Omega | E[\xi(\omega)] \geq r\} dr - \int_{-\infty}^0 P_r\{\omega \in \Omega | E[\xi(\omega)] \leq r\} dr \quad (1)$$

为模糊随机变量 ξ 的期望值。

1.2 模糊随机模拟算法

在处理一般的模糊随机系统时, 试图设计解析的算法是不太现实的。为此, 文献^[13]提供了模糊随机模拟技术来计算机会函数值、关键值以及期望值。

(1) 假设 ξ 为 (Ω, A, P_r) 上的模糊随机变量, 并且 $f: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^m$ 为可测函数。对于任意给定的实数 $\alpha \in (0, 1]$, 设计一种模糊随机模拟来近似计算 α 机会 $C_h\{f(\xi) \leq 0\}(\alpha)$, 即寻求一个最大的 $\bar{\beta}$ 值来使得

$P_r\{\omega \in \Omega | C_r\{f(\xi(\omega)) \leq 0\} \geq \beta\} \geq \alpha$, 算法 1(机会函数值模拟)如下:

- 根据概率测度 P_r , 从样本空间 Ω 中产生样本 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N$;
- 利用模糊模拟计算可信性 $\beta_k = C_r\{f(\xi(\omega_k)) \leq 0\}$ ($k=1, 2, \dots, N$);
- 置 N' 为 αN 的整数部分;
- 返回序列 $\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N\}$ 中的第 N' 个最大的元素。

(2) 对于给定的置信水平 α 和 β , 求取最大的 \bar{f} 即关键值使得 $C_h\{f(\xi) \geq \bar{f}\}(\alpha) \geq \beta$ 成立, 算法 2(关键值模拟)如下:

- 根据概率测度 P_r , 从样本空间 Ω 中产生样本 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N$;
- 计算 $\bar{f}_k = \sup\{f_k | C_r\{f(\xi(\omega_k)) \geq f_k\} \geq \beta\}$ ($k=1, 2, \dots, N$);
- 置 N' 为 αN 的整数部分;
- 返回序列 $\{\bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_N\}$ 中的第 N' 个最大的元素。

(3) 根据定义 3 可知期望值, 其值由算法 3(期望值模拟)得到:

- 置 $e=0$;
- 根据概率测度 P_r , 从样本空间 Ω 中产生样本 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N$;
- $e = e + E[f(\xi(\omega))]$;
- 重复步骤 b、c 共 N 次;
- $E[f(\xi)] = e/N$ 。

2 光照强度的模糊随机预测模型

不同天气情况下电池板接收到的太阳辐射有较大差异, 这会直接影响发电量。太阳辐射分为直接辐射和散射辐射 2 种, 在传输过程中会受到云的反射和散射, 气溶胶颗粒的吸收、反射和散射等^[14]。

2.1 无云天气太阳辐射值的计算模型

采用 REST 模型计算晴天的直接辐射和散射辐射^[15]。数据采用了前几年同一时段(9 月份)的数据, 并选取了 2004—2012 年 9 月的太阳辐射值。图 1 为 2004—2012 年 9 月晴天的 REST 模型直射和散射计算值与实际值对比图。其中散射辐射用以下一次函数对之修正。

$$I_{\text{diff}} = 0.56 I_{\text{dir}} + 2.88 \quad (2)$$

其中, I_{dir} 为 REST 模型计算得到的散射辐射; I_{diff} 为拟合后的散射辐射; 0.56 和 2.88 都是通过历史数据得到的拟合系数。可以看出, 直射辐射计算误差在一定范围内, 可根据预测当日近况进行修正, 结果将更准确; 散射辐射值计算结果良好。

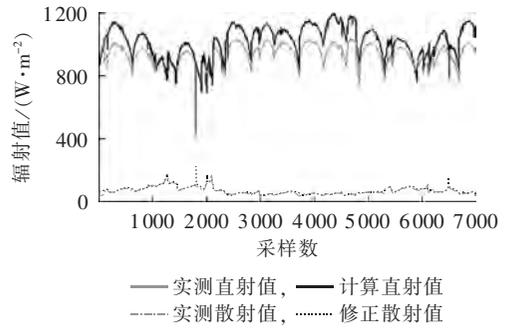


图 1 直射和散射计算值与实际值的对比

Fig.1 Comparison between calculated and actual values for direct and scattered radiations

2.2 有云天气太阳辐射值的计算模型

对云的描述有云量和云层覆盖率 2 种。云层覆盖率 $z(z \in (0, 1\%, \dots, 10\%))$ 用云占天空的百分比表示, 云量是云对天空遮蔽的比例, 用成数 $i(i \in (0, 1, \dots, 10))$ 表示。云的多变使得它对太阳辐射产生的效应也具有不确定性^[16]。目前对有云天气太阳辐射值进行预测的模型中, 大多采用一个与云量有关的函数对无云天气的太阳辐射值进行校正, 选择用云遮系数法分别对 REST 模型的直射和散射进行修正。

$$I_{\text{dir}} = I_{\text{dir}}(1 - \xi_{\text{dir}}) \quad (3)$$

$$I_{\text{diff}} = I_{\text{diff}}(1 - \xi_{\text{diff}}) \quad (4)$$

其中, I_{dir} 和 I_{diff} 分别为有云天气的直射、散射辐射值; I_{dir} 和 I_{diff} 分别为 REST 模型计算的无云天气直射、散射辐射值; ξ_{dir} 和 ξ_{diff} 分别为对应的直射、散射云遮系数。

模型基本思路为根据提前一天时间的天气预报的云层覆盖率, 采用模糊随机算法求取直射和散射云遮系数, 然后对其无云天气光照强度进行修正, 得到预测时刻的值。

2.3 云遮系数运算中的模糊随机算法

2.3.1 随机性和模糊性的体现

云层覆盖率数据来源于美国国家海洋和大气管理局 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)上的预测值, 每小时一预测值, 其值为 1~100 之间的某个整数。由于客观因素的存在, 预测云层覆盖率往往具有很大的随机性, 预报的覆盖率值可能与实际的云层覆盖率不同, 由历史数据中也可以看出这点, 因此对从 NOAA 网站上得到的数据直接使用并不可靠。因此将预测值作为随机数来处理, 效果良好。

统计分析 2004—2012 年 9 月份的直射和散射云遮系数, 其中散射云遮系数分布如图 2 所示。

由图 2 可知, 在一定的云层覆盖率下, 其对应的云遮系数取值是不定的。例如在云层覆盖率为 $[90\%, 100\%]$ 下, 散射云遮系数大致分布在 $[-8, 1]$ 之间, 且绝大多数分布于 $[-2, 1]$ 之间。因此, 一定云层覆盖率下的云遮系数作为模糊数进行处理。

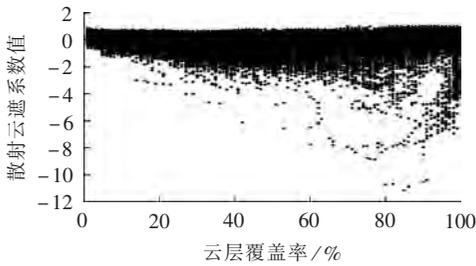


图 2 散射云遮系数值分布图

Fig.2 Distribution of scattered cloud cover index

由以上的分析可知,首先云层覆盖率是一个随机数,而在一定云层覆盖率下的云遮系数是一个模糊数。云遮系数的求取是一个模糊随机的过程,它是一个取模糊值的随机变量,符合模糊随机变量的定义,可用相关的理论知识对其分析处理。

2.3.2 随机性和模糊性的相关处理

通过以下步骤可得到预测云层覆盖率值到实际值的随机分布:

a. 选取预测数据和与之对应的实际数据,为简便处理将之分为 $p \in (0, 1, \dots, 19)$ 和 $q \in (0, 1, \dots, 19)$ 各 20 个区间,其中 0 代表云层覆盖率为 $[0, 4\%]$, 1 代表 $[5\%, 9\%]$, ..., 18 代表 $[90\%, 94\%]$, 19 代表 $[95\%, 100\%]$;

b. 统计预测覆盖率为 p 的数量 N_p ;

c. 统计预测覆盖率为 p 而实际覆盖率为 q 的数量 N_{pq} ;

d. 计算概率 $P_{pq} = N_{pq} / N_p$ 。

为求取云遮系数的相关计算值,在编程中需要用到模糊数的隶属函数。鉴于数据的庞大,采用了 MTALAB 中的相关统计数据函数,并进行分析得到各个区间下的模糊隶属函数。

3 算例分析

光照辐射强度值取自美国 BMS(Baseline Measurement System)光伏电站,预测云层覆盖率来自 NOAA 对光伏电站的预测值,将有效光照时间定为每天的 08:00—16:00。利用上述模型,提前一天预测直射 I_{dir} 和散射辐射值 I_{dif} 。以 2013 年 9 月 21 日为例,计算分析太阳辐射直射、散射强度值。

3.1 机会函数值预测

在满足一定的 α 置信水平下,根据机会测度算法,可得各个云遮系数区间的机会值。例如考虑散射云遮系数,由 2.3 节可知数值基本分布于 $[-8, 1]$ 间,以 0.25 为跨度,将之分为 $[-8, -7.75]$ 、 $[-7.75, -7.5]$ 、...、 $[0.5, 0.75]$ 、 $[0.75, 1]$ 区间,分别求取各个区间的机会值,以最大机会值对应的区间作为该时刻下的云遮系数预测值。

表 1 为在置信水平 $\alpha=0.6$ 条件下,08:00—16:00 的部分散射云遮系数区间的机会值,例如 08:00 选取最大机会值 0.5777 下的云遮系数区间 $[0, 0.25]$ 。图 3 为散射光照强度机会值预测结果图,可知此法预测效果良好。同理可对直射光照强度值进行相同处理。

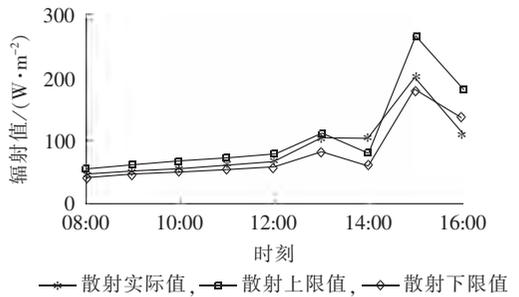


图 3 散射光照强度预测结果

Fig.3 Predicted results of scattered radiation

3.2 关键值预测

由给定的 γ 和 δ ,结合关键值模拟算法可得云遮系数 ξ 的 (γ, δ) 乐观值和 (γ, δ) 悲观值^[13]。在 $\delta > 0.5$ 下有 $C_h\{\xi \leq \xi_{inf}(\gamma, \delta)\}(\gamma) \geq \delta, C_h\{\xi \geq \xi_{sup}(\gamma, \delta)\}(\gamma) \geq \delta$, 即有:

$$\begin{cases} P_r\{\omega_j \in \Omega | C_r\{\xi(\omega_j) \geq \xi_{sup}(\gamma, \delta)\} \geq \gamma\} \geq \delta \\ P_r\{\omega_j \in \Omega | C_r\{\xi(\omega_j) \leq \xi_{inf}(\gamma, \delta)\} \geq \gamma\} \geq \delta \end{cases}$$

其中, $\xi_{sup}(\gamma, \delta)$ 、 $\xi_{inf}(\gamma, \delta)$ 分别为模糊随机变量的乐观值和悲观值。

则有:

$$\begin{cases} P_r\{\omega_j \in \Omega | C_r\{\xi(\omega_j) \leq \xi_{sup}(\gamma, \delta)\} \leq 1 - \gamma\} \geq \delta \\ P_r\{\omega_j \in \Omega | C_r\{\xi(\omega_j) \geq \xi_{inf}(\gamma, \delta)\} \leq 1 - \gamma\} \geq \delta \end{cases}$$

当 $\xi_{sup}(\gamma, \delta) \leq \xi_{inf}(\gamma, \delta)$ 时,有:

表 1 $\alpha=0.6$ 下部分散射云遮系数区间的机会值

Table 1 Optimistic value of some scattered cloud cover index intervals when $\alpha=0.6$

散射云遮系数区间	机会值								
	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
$[-1, -0.75)$	0.0124	0.0124	0.0124	0.0124	0.0125	0.0125	0.0126	0.0125	0.0125
$[-0.75, -0.5)$	0.0221	0.0221	0.0221	0.0221	0.0223	0.0224	0.0223	0.0223	0.0224
$[-0.5, -0.25)$	0.0257	0.0257	0.0257	0.0257	0.0256	0.0255	0.0257	0.0257	0.0257
$[-0.25, 0)$	0.4210	0.4210	0.4213	0.4215	0.4222	0.4225	0.4223	0.4215	0.4227
$[0, 0.25)$	0.5777	0.5777	0.5766	0.5765	0.5760	0.5761	0.5135	0.5767	0.5140
$[0.25, 0.5)$	0.1768	0.1768	0.1770	0.1762	0.1755	0.1756	0.1748	0.1762	0.1766
$[0.5, 0.75)$	0.0462	0.0462	0.0461	0.0462	0.0462	0.0463	0.0462	0.0462	0.0462
$[0.75, 1]$	0.0422	0.0422	0.0422	0.0422	0.0421	0.0431	0.0146	0.0421	0.0322

$P_r\{\omega_j \in \Omega \mid \xi_{\text{sup}}(\gamma, \delta) \leq C_r \mid \xi(\omega_j) \leq \xi_{\text{inf}}(\gamma, \delta) \} \geq 2\gamma - 1 \} \geq \delta$
即:

$$C_h \mid \xi_{\text{sup}}(\gamma, \delta) \leq f(\xi) \leq \xi_{\text{inf}}(\gamma, \delta) \mid (\delta) \geq 2\gamma - 1$$

如此就得到了满足置信水平为 δ 和 $2\gamma - 1$ 的云遮系数 ξ 取值区间, 由式(3)、(4)即可得到光照强度的预测区间。令 $\delta = 0.6, 2\gamma - 1 = 0.6$, 求取云遮系数取值区间后绘制各个时刻的辐射强度如图 4 所示。从图中可看出, 预测区间基本涵盖了实际值的变化, 具有实际应用意义。

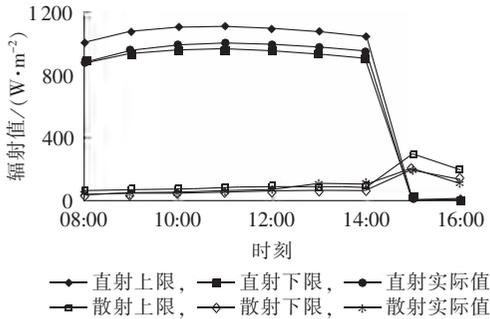


图 4 直射、散射光照强度预测区间

Fig.4 Predicted interval of direct and scattered radiations

3.3 期望值预测

由模糊随机变量的期望值模拟算法, 可计算得到各个时刻预测云层覆盖率下的云遮系数 ξ 期望值, 并求取光照强度值, 结果如图 5 所示。期望值预测效果良好。

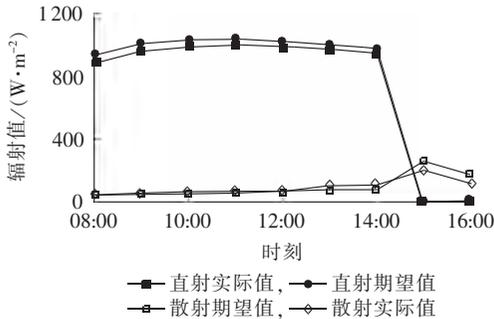


图 5 光照强度期望值的预测结果

Fig.5 Predicted results of light intensity expectation

3.4 与已有云遮系数法的比较

同样采用云遮系数法修正有云条件下的太阳辐射强度, 与文献[8]的不同之处在于处理云遮系数上面。文献[8]是利用一个与云量有关的二次曲线函数来表示云遮系数, 其值与云量、地区、季节等有关; 本文计算分析了实际情况下的云遮系数, 考虑了其从预测云量到分析计算结果所具有的随机、模糊双重特性, 结合模糊随机理论对之进行处理。

相比较之下, 有以下几个优势:

a. 二次曲线函数的确定与云量有关, 文献[8]将云量分为 0~10 各个程度, 一方面云量确定受主观

因素影响, 另一方面云量本身的表示法不够精确;

b. 文献[8]给出的太阳辐射强度只有一种结果, 本文根据模糊随机理论相关知识可得到机会函数值预测、关键值预测、期望值预测 3 种不同结果, 又可主观调节置信水平, 预测结果多样更具参考性;

c. 二次曲线函数的确定受季节、地区等因素影响, 模糊随机理论处理云遮系数法是在大数据处理下的预测结果, 具有普适性。

4 结论

光伏出力的准确预测对于大规模光伏并网发电具有重要意义, 而太阳光照强度是对光伏出力影响最大的因素, 进行光照强度预测研究是十分有必要的。基于不确定理论建立了一种新型预测方法, 分析了云层覆盖率的随机性和云遮系数的模糊性, 用模糊随机模拟算法计算云遮系数的相关值, 从而最终得到太阳辐射强度的相关值。算例验证表明, 该模型具有较高的预测精度, 可得到满足不同置信水平的预测区间, 该模型预测值包含更加丰富的参考信息, 具有较好的实用性。

参考文献:

- [1] 李宽, 李兴源, 陈实, 等. 光伏并网抑制由直流输电引起的次同步振荡的可行性分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 41-46.
LI Kuan, LI Xingyuan, CHEN Shi, et al. Analysis on feasibility of damping HVDC-induced subsynchronous oscillation by photovoltaic grid-connection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 41-46.
- [2] 张卫东, 刘祖明, 王振洲, 等. 基于全年辐照数据的多路径光伏柔性并网的经济性对比[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 123-129, 136.
ZHANG Weidong, LIU Zuming, WANG Zhenzhou, et al. Economic comparison among multiple schemes of photovoltaic flexible grid-connection based on annual irradiance data[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 123-129, 136.
- [3] GABLER H. Grid-connected photovoltaic[J]. Solar Energy, 2001, 70(6): 455-456.
- [4] 蒋亚娟. 光伏电池建模及其在光伏发电预测中的应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
JIANG Yajuan. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [5] 邱国全, 夏艳君, 杨鸿毅. 晴天太阳辐射模型的优化计算[J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 456-460.
QIU Guoquan, XIA Yanjun, YANG Hongyi. An optimized clear-day solar radiation model[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2001, 22(4): 456-460.
- [6] 后尚, 田瑞, 同素英. 呼和浩特地区太阳辐射模型分析[J]. 可再生能源, 2008, 26(2): 79-82.
HOU Shang, TIAN Rui, YAN Suying. Research and analysis on the solar radiation model of Huhehaote[J]. Renewable Energy Re-

- sources, 2008, 26(2): 79-82.
- [7] SHAH A. Prediction of direct and global solar irradiance using broadband models: validation of REST model[J]. *Renewable Energy*, 2006, 31: 1253-1263.
- [8] 李小芳, 陈青云. 用云遮系数法计算日光温室室内太阳辐射[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(3): 212-216.
- LI Xiaofang, CHEN Qingyun. Calculation of the solar radiation inside the sunlight greenhouse using the cloud cover coefficient method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(3): 212-216.
- [9] 代倩, 段善旭, 蔡涛, 等. 基于天气类型聚类识别的光伏系统短期无辐照度发电预测模型研究[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(34): 28-35.
- DAI Qian, DUAN Shanxu, CAI Tao, et al. Short-term PV generation system forecasting model without irradiation based on weather type clustering [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(34): 28-35.
- [10] 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 Guangmin. Photovoltaic power generation output forecasting based on support vector machine regression technique[J]. *Electric Power*, 2008, 41(2): 74-78.
- [11] 雷绍兰, 孙才新, 周淦, 等. 基于径向基神经网络和自适应神经模糊系统的电力短期负荷预测方法[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(22): 78-82.
- LEI Shaolan, SUN Caixin, ZHOU Quan, et al. Short-term load forecasting method based on RBF neural network and ANFIS system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(22): 78-82.
- [12] 邵能灵, 侯志俭. 小波模糊神经网络在电力系统短期负荷预测中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(1): 24-29.
- TAI Nengling, HOU Zhijian. New short-term load forecasting principle with the wavelet transform fuzzy neural network for the power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(1): 24-29.
- [13] 刘宝锭, 彭锦. 不确定理论教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 74-128, 177-200.
- [14] 林媛. 太阳辐射强度模型的建立及验证[J]. *安徽建筑工业学院学报*, 2007, 15(5): 44-46.
- LIN Yuan. The model of the solar radiation energy's establishment and verification[J]. *Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry: Natural Science*, 2007, 15(5): 44-46.
- [15] VALERIO L B, ALDO O, GIUSEPPINA C, et al. An improved five-parameter model for photovoltaic modules[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2010, 94: 1358-1370.
- [16] 申彦波, 赵宗慈, 石广玉. 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[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(9): 915-923.
- SHEN Yanbo, ZHAO Zongci, SHI Guangyu. The progress in variation of surface solar radiation, factors and probable climatic effects[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(9): 915-923.

作者简介:



赵书强

赵书强(1964—),男,河北保定人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统运行、分析与控制(E-mail: ZSQDL@163.com);

谢宇琪(1990—),男,浙江台州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行、分析与控制(E-mail: xyqnccpu@foxmail.com);

刘大正(1989—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行、分析与控制(E-mail: liudazheng2008@163.com);

林鹏(1990—),男,江苏南通人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行、分析与控制(E-mail: jamiedsg@163.com);

胡永强(1981—),男,河北保定人,讲师,博士研究生,主要研究方向为电力系统运行、分析与控制,新能源发电与智能电网(E-mail: hy_qiang@126.com)。

Short-term solar radiation intensity forecasting based on fuzzy-random theory

ZHAO Shuqiang, XIE Yuqi, LIU Dazheng, LIN Peng, HU Yongqiang

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Based on the fuzzy-random theory, a solar radiation prediction model is built to obtain the prediction interval and expectation of solar radiation under the predicted cloud cover rate. The randomness of cloud cover rate and the fuzziness of cloud cover index are analyzed. The fuzzy-random theory is adopted to deal with the cloud cover index. The cloud cover index is used to correct the solar radiation calculated with the REST model for cloudless weather to obtain the solar radiation for cloudy weather. The data of BMS photovoltaic station of USA is used to verify the proposed model, and the results show that it has higher prediction accuracy.

Key words: solar energy; solar radiation; cloud cover rate; fuzzy-random variables; cloud cover index; models; forecasting