# 适用于电网规划的光伏发电概率模型及其应用

霖1,陈 旭1,2,吕耀棠1,唐宗顺3,赵 管 琦1

(1. 华南理工大学 电力学院,广东 广州 510640:2. 南方电网公司计划部,广东 广州 510623:

3. 广州供电局计划部, 广东 广州 510620)

摘要:提出了一种兼顾短时波动性和中长时间尺度变化规律的光伏电源出力概率模型。采用气象模型基于少 量参数即可建立太阳辐照度小时均值在一年内变化的离散概率时间序列模型。采用 Beta 连续概率分布描述 每小时内太阳辐照度相对于均值的随机波动性。所提模型所需统计参数少,能有效反映光伏电源出力时间特 性的规律性和随机波动性。将算例结果与实际光伏电站辐照度检测数据进行对比、验证了所提模型的有效 性。结合分布式光伏电源接入配电馈线的选址定容规划实例说明了所提模型的应用场景。

关键词:光伏电源:离散概率时间序列:连续概率模型:电网规划:可靠性分析

中图分类号: TM 615 文献标识码:A

### DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.11.001

#### 引言 0

随着我国鼓励分布式光伏 PV (PhotoVoltaic)电 源发展的政策相继出台,在配电网侧将涌现越来越多 以光伏发电为主的分布式电源 DG (Distributed Generator)。无论是配电网规划、可靠性分析,还是运 行能量管理、需求侧管理等方向的配电系统分析中 均需要考虑对光伏电源的建模问题。

光伏电源的出力既具有随机性、波动性和弱可 控性,同时在较长的时间尺度上也表现出明显的规 律性。其规律性来自地球的自转和绕日的公转。这 种规律性决定了地理位置相近的光伏电源的平均出 力在小时或者更大的时间尺度上表现出明显的相似 性,在随机模型中称之为光伏出力概率模型的相关 性。光伏电源出力的波动性和随机性则源自地球大 气层(云层)的运动,它使得运行调度中很难准确预 测光伏电源在数分钟或更短时段内的瞬时功率。提 前数天或者更长时间的光伏功率预测也因同样的原 因而显得困难。因此,在电网分析中应采用概率模 型代替确定性模型来描述光伏功率的不确定性已经 被广泛认同。

近年来已有不少关于光伏建模的研究成果。这 些模型大致可分为2类:一类是针对光伏电池阵列、 变流器、最大功率点跟踪(MPPT)控制、光伏孤岛保 护等光伏电源各模块的详细数学模型[1-3],适用于光 伏系统自身的运行分析和控制设计,也可用于包含 大型并网光伏电站的电网暂态过程分析:另一类则 是从电网稳态运行分析的需求出发,面向光伏功率

收稿日期:2017-02-09:修回日期:2017-09-07

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(综合能源网规划 与运行相关基础问题研究)(51437006)

外特性的概率模型。其中影响最大、应用最多的是基 于 Beta 分布的连续概率密度函数模型,其依据来自 Z. M. Salameh 等在 1995 年发表的研究成果<sup>[4]</sup>。其后 国内外许多有关电网规划、可靠性分析、随机潮流等 领域的研究均采用该模型作为光伏电源模型[5-6]。然 而,该模型反映的只是一个时间点(某月某日的某个 小时)的光伏出力概率分布特性,不能反映中长期运 行中光伏出力时间序列的分布特性,而后者恰好是 电力系统规划、可靠性分析等涉及中长期尺度运行 分析领域最关注的因素。文献[7]通过对光伏发电出 力的确定性因素与不确定因素分离建模,重点分析 了光伏发电的中长期随机特性,但未给出参数明确 的光伏出力特性模型。

本文首先讨论了电力系统中长时间尺度的运行 分析对光伏电源建模的要求和现有模型的不足:然 后结合气象领域对太阳辐射量的理论研究成果[8-11], 提出了一种所需统计参数少且易于获取的光伏电源 中长期出力时间序列模型,在模型中综合考虑了光伏 出力的随机性和规律性;通过与实际光伏电站数据 对比和光伏并网规划实例说明了所提模型的应用场 景和效果。

#### 电力系统中长期运行分析对光伏电源概 1 率模型的需求和现有模型的不足

随着分布式光伏电源大量接入配电系统,从潮流 分析到需求侧管理、从可靠性评估到电网规划等一 系列电网分析和计算中均需要考虑光伏电源的建模 问题。这些问题有一个共同特点,即关注的是含有光 伏电源的电网在数日、数月至数年内运行的整体经 济性和可靠性水平,需要计算长时间内电能质量、电 网损耗、电压合格率等累积量指标的变化。

对于这些应用而言.光伏电源出力在数分钟内的

Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (Research on the Basic Problems of Integrated Energy Network Planning and Operation) (51437006)

波动性和随机性固然不可忽视,但是光伏发电功率的 小时平均值在日内、月内、年内随时间变化的规律, 及其与负荷时间序列的相关性往往是影响分析结论 的更加关键的因素。此外,电网规划等问题的研究常 常包含尚未建成的光伏电源,无法获得电源的历史 运行数据,甚至难以获得其他参照电源的运行数据。

面对上述场景和需求,对于涉及电力系统中长期 运行分析的研究领域,常常需要满足以下要求的光伏 电源模型:

a. 模型应能给出光伏电源功率的时间序列,应 能反映光伏功率随时间变化的规律,以便与负荷曲线 等联合进行分析;

**b.** 模型只需要少量气象统计参数,输入参数少 且容易从开放数据源获得;

c. 模型关注的时间尺度不宜过小,最好能覆盖 一年内光伏功率的变化规律,时间序列的时间步长 可以为数分钟至数十分钟,即模型可以忽略分钟级 及以下的光伏功率的波动性和随机性:

**d.**模型应能反映光伏发电功率在所研究的时间 尺度上的不确定性和随机性。

目前在含光伏发电的配电网相关研究中尚缺乏满足上述完整要求的光伏发电模型。许多研究仍继续采用 PQ 恒定的确定性模型描述光伏电源,更多的研究虽然考虑了光伏概率模型,但大多直接采用文献 [12]提出的 Beta 分布模型进行分析。而该模型不满 足上述要求 a 与 c,对其不足简要分析如下。

该模型源自对美国国家太阳辐射数据库 NSRDB(the National Solar Radiation Data Base)中 南加州 30 a 太阳辐照度记录的统计分析。其思路是 每个月采用相同的日太阳辐照度时间序列,每个日 时间序列包含 24 点(每小时一个点)。对其中任意一 个点(第 *i* 月第 *j* 个点)均可从 30 a 的太阳辐照度记 录中得到 30×30=900 个日辐照度统计样本。文献 [12]对该太阳辐照度样本采用连续概率密度函数建 模,得出了 2 个结论:样本的随机分布概率密度均呈 现双峰特性,这种双峰特性反映了阴雨天和晴天的 辐照度差异;将每个双峰分解为 2 个单峰分布后,每 个单峰分布都具有缓慢上升到峰值、然后快速下降 的特征,对每个单峰分布采用 Beta 分布函数建模的 拟合精度普遍高于 Weibull 分布和对数正态分布。

图 1 给出了某月 12:00 的太阳辐照度分布直 方图。

文献[12]建议对每小时的太阳辐照度采用 Beta 分布随机模型描述,并得到了广泛应用。然而,该文 献并未给出每个时刻辐照度取值范围的获得方法。 由于 Beta 分布是[0,1]区间的随机分布,其输出必 须经标度变换才能得到实际辐照度值。这就意味着



图 1 太阳辐照度分布直方图 Fig.1 Distribution histogram of solar irradiance

必须依靠其他模型先获得一年 8760 h 中每小时的 辐照度均值或范围。本文针对该问题,提出了一种 适用于规划的完整的光伏时序样本建模方法,其思 路是基于少量气象统计数据建立气象模型生成辐照 度均值的逐时特性,在此基础上对每个时刻基于 Beta 分布产生满足已知均值的随机分布样本。

需要特别指出的是,本文提出的概率模型重点 针对配电网规划阶段的分析需求。在规划阶段的配 电网中大量分布式光伏尚未建成,没有历史功率记 录。由于已有光伏多为用户投资的小电站,往往也缺 乏光伏的详细安装信息和安装点的辐照度历史监测 资料。此外,规划阶段的建模对功率精度的要求远低 于运行阶段的短期功率预测。规划更关注电网长期 运行的能量平衡、损耗和供电的统计结果,因此强调 的是功率在长时间尺度上的变化特征及其与负荷曲 线的形态差异,要求用尽可能少且易于获得的统计 参数得到相对准确的功率曲线。本文结合气象学和 随机统计分析两方面的成果,提出了一种满足上述 要求的光伏模型,并对其有效性和应用场景进行了 探讨。

#### 2 中长期光伏出力概率模型

#### 2.1 建模流程

电力系统分析中光伏电源的模型可以分为 2 类:一类直接统计并建立光伏电源输出功率的概率 分布,可称之为直接模型;另一类则是先建立太阳辐 照度等反映太阳辐射能特征的概率分布,然后根据 太阳辐射能进一步计算光伏发电功率,称之为间接 模型。

直接模型比较适用于运行调度领域对已投运的 光伏电站建模,因为可以方便地获取和分析历史功 率记录。对于规划等研究而言,区域日照历史记录较 易从气象信息获得,且适用范围不局限于具体光伏电 站,因此采用间接模型会更为适宜。此外,基于太阳 辐射能计算光伏电站出力模型的精度也可以满足多 数中长期分析的要求。本文采用间接模型,建模流程 如下:

a. 生成太阳辐照度小时均值的时间序列-离散 概率模型, 如图 2(a)所示;

b. 生成任意时间点的太阳辐照度 Beta 分布模



3

型,如图 2(b)所示;

**c.** 合成 8760 h 的光伏年功率曲线样本,如图 2 (c)所示。



两层模型的具体函数和参数说明如下。

2.2 辐照度小时均值的离散概率时间序列模型

记待建模地区的纬度为  $\varphi$ ,则从电力系统中长期 运行分析的精度要求出发,该地区一年中第 m 月第 d 日 h 时的地表太阳辐照度  $R(\varphi, m, d, h, C(m))$ 可 以采用如下关于纬度、时间和随机参数 C(m)的函数 关系近似描述:

 $R(\varphi, m, d, h, C(m)) =$ 

 $I_0$ 

 $\begin{bmatrix} R_{s}(\varphi,m,d,h) & C(m) 表示晴天 \\ \alpha(m)R_{s}(\varphi,m,d,h) & C(m) 表示阴雨天 \end{bmatrix}$ (1)

其中, $R_s(\varphi,m,d,h)$ 为晴天某时刻的地表太阳辐照度小时均值, $\alpha(m)$ 为阴雨天的辐照度衰减系数, $0 \le \alpha(m) < 1$ ,两者均为确定型的函数和变量;离散随机变量 C(m)表示该地区每年第 $m(m=1,2,\dots,12)$ 月的晴雨状况,第m月晴天的概率为 $p_s(m)$ ,阴雨天的概率 为 $p_r(m)=1-p_s(m), p_s(m)又称为晴天系数,可以方$ 便地从当地气象统计数据中获得。

 $R_{s}(\varphi, m, d, h)$ 可采用如下经验公式计算:

 $R_{s}(\varphi,m,d,h) = H_{0}(\varphi,m,d)K_{t}(m,d,h)$  (2) 其中, $H_{0}$ 为地外日太阳辐照总量,反映地球公转的影响,其值随着地球环日运转而呈现确定性的时变规 律。根据气象领域研究成果<sup>[9-10]</sup>,记第 *m* 月第 *d* 日属 于一年中顺数下来的第 *N* 日(*m*=1,*d*=1 对应 *N*=1; *m*=12,*d*=31 对应 *N*=365),有:

$$H_0(\varphi, m, d) = \frac{24I_0}{\pi} (\cos\varphi\cos\delta\sin\omega_{\rm sr} + \omega_{\rm sr}\sin\varphi\sin\delta)$$
(3)

$$= 1367[1+0.033\cos(360N/365)]$$
(4)

$$\sin \delta = \sin \left[ \frac{2 \pi (N-81)}{365} \right] \sin 23.45^{\circ} \tag{5}$$

$$\cos \omega_{\rm sr} = -\tan \varphi \tan \delta \tag{6}$$

其中, $\delta$ 为日偏角,单位为 rad; $\omega_{sr}$ 为日升时的小时角, 单位为 rad; $I_0$ 为地外辐照度基值,单位为 W/m<sup>2</sup>。

式(2)中采用经验函数 K<sub>1</sub> 描述日内 24 h 的地表 太阳辐照度标准化时间序列。大量数据表明地表太 阳辐照度的日分布接近正弦分布,其中日出时间、日 落时间和晴空系数均值决定了正弦分布的形态。据 此选择地表辐照度日曲线拟合函数如下:

$$K_{t} = \begin{cases} 0 & h < h_{sr} \\ \frac{C_{s}}{2} & \frac{\pi}{h_{ss} - h_{sr}} \sin\left(\frac{\pi h - h_{sr}}{h_{ss} - h_{sr}}\right) & h_{sr} \leq h \leq h_{ss} \\ 0 & h > h_{ss} \end{cases}$$
(7)

其中, h<sub>s</sub>, h<sub>s</sub> 分别为日出时间、日落时间, 均为当地 经纬度的函数, 可以根据时区和地球绕日运动规律 计算获得。考虑到中长时间尺度的电网分析对日出、 日落时间的精度要求不高, 可以忽略同一时区内经 度差异对日出时间的影响, 采用以下公式计算纬度 为 φ 的地区一年中第 N 日的日出时间和日落时间:

$$h_{\rm sr} = 12 \frac{\arccos(\tan \alpha \tan \varphi)}{180^{\circ}} + \Delta t_{\rm m} \tag{8}$$

$$\alpha = -23.26^{\circ} \times \cos\left(360^{\circ} \times \frac{N+9}{365}\right) \tag{9}$$

$$h_{\rm ss} = 24 - h_{\rm sr} + 2\,\Delta t_{\rm m} \tag{10}$$

其中, $\varphi$  为一年中第 N 日太阳直射的纬度; $\Delta t_m$  为时间修正系数,是当地时间采用的时区序号减去当地 所在经度对应的时区序号。例如,中国国境横跨 5 个 区,却都采用北京时间(时区为东 8 区),若研究地区 为新疆乌鲁木齐,则  $\Delta t_m = 2h_o$ 

式(7)中 C<sub>s</sub>为晴天的日照晴空指数 CSICI(Clear Sky Insolation Clearness Index),是描述晴天时大气 对太阳短波辐射影响的一个综合参数,反映入射到 地表水平面的太阳辐照度与地外辐照度之比。C<sub>s</sub>本 质上是随机参数,体现了大气条件对太阳辐射的影 响,并与云、大气成分、臭氧含量、含水量及气象条件 等相关。但用于中长期运行分析的日曲线建模时,式 (7)中的 C<sub>s</sub>可采用长期的月统计平均值。通过美国 太空总署(NASA)气象数据库<sup>[13]</sup>可以方便查得多年 统计数据获得的各经纬度下 C<sub>s</sub>的月平均指数。

#### 2.3 小时内辐照度的连续概率密度模型

图 1 的相关研究已经表明,确定晴雨天之后,每 小时的太阳辐照度经标度变换到[0,1]区间后,呈 Beta 分布。即 Beta 分布给出的是实际太阳辐照度 *r* 按式(11)进行标度变换后的新变量的分布。

$$r' = \frac{r - r_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}} \tag{11}$$

其中,r<sub>min</sub>、r<sub>max</sub>分别为太阳辐照度的最小值、最大值。

Beta 分布的概率密度函数是关于  $\alpha$  和  $\beta$  双参数 的连续函数( $\alpha \ge 0, \beta \ge 0$ ):

$$f_{\rm b}(r') = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} r'^{(\alpha - 1)} (1 - r')^{\beta - 1} & 0 \leq r' \leq 1\\ 0 & \pm \ell \ell \end{cases}$$
(12)

其中, $f_{\rm b}(r')$ 为 Beta 分布函数; $\Gamma(z)$ 为 Gamma 函数;  $\alpha$ , $\beta$ 为 Beta 分布函数的参数。根据小时太阳辐照度 的分布特点(见图 1),应有  $\alpha > \beta$ 。典型参数值为  $\alpha =$ 4, $\beta = 2$ 。

显然,式(11)中不同时刻对应的参数 r<sub>min</sub> 和 r<sub>max</sub> 是不同的。将 Beta 分布的抽样结果还原为实际太阳 辐照度时需要正确的给定参数 r<sub>min</sub>、r<sub>max</sub>。

在 2.1 节的模型中,已经确定了任一天的晴雨 概率以及晴雨对应的各小时的太阳辐照度值(若记 某小时的太阳辐照度值为µ),则根据 Beta 分布的特 点可得出µ与参数 r<sub>m</sub>和 r<sub>mx</sub> 的关系如下:

$$\frac{\mu - r_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}} = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$$
(13)

显然,式(13)还需给定一个参数才能计算出结果。一般而言,如果 $\mu \leq 300 \text{ W/m}^2$ ,可取 $r_{\min}=0$ ;否则应根据实际太阳辐照度分布样本先确定辐照度的分布范围,即 $r_{\max}-r_{\min}$ 的值。经验表明,该范围相对稳定,典型值在 $450 \sim 650 \text{ W/m}^2$ 之间。

2.4 光伏功率模型

基于 2.1 和 2.2 节的模型得出任意时刻光伏安 装地点的太阳辐照度样本后,可以采用式(14)近似 估计光伏电源的输出功率<sup>[14]</sup>。

$$P = P_{\rm s} \frac{R}{1000} [1 + \alpha_{\rm T} (T - 25)]$$
(14)

其中, P<sub>s</sub>为光伏电源在标准太阳辐照度 1000 W/m<sup>2</sup> 和 25℃下的实际功率,与光伏板的布置和安装方式 有关;α<sub>T</sub>为光伏电池的功率温度系数; T 为运行时的 温度。

#### 3 模型有效性测试

第2节提出的光伏出力模型采用尽可能少的参数给出了既考虑地理和气象信息又考虑随机特性的 光伏电池中长期出力时间特性。需要指出的是,本文 所提模型并不适用于对拥有很多历史运行数据的某 个或某群光伏电源进行高精度的短期出力预测,模 型面向的是对光伏实际运行数据缺乏的电网进行长 期运行模拟、可靠性评估或规划分析等关注中长期 整体运行效益的研究。

整个模型需要的参数仅仅包括:光伏所在地的 纬度、当地各月的晴天系数、晴天日照晴空指数均值 (可从 NASA 网站开放数据库获取)、光伏典型安装 方式下的标准条件输出功率 4 个参数。

将模型应用于蒙特卡洛(Monte Carlo)仿真或其

他基于随机抽样的电力系统中长期概率分析时,具体步骤如下:

**a.** 按  $p_s(m)$ 、 $p_r(m)$ 进行晴天、阴雨天抽样;

**b.** 按式(2) — (10) 计算该日 24 h 的日辐照度小时均值曲线:

**c.** 按式(12)进行 Beta 分布抽样后,按式(13)计 算参数 α 或 β,按式(11)得出某个时刻的太阳辐照 度随机抽样值;

d. 按式(14)计算光伏电源输出功率。

当采用传统的确定型电网分析方法进行含光伏 发电系统的中长期运行分析时,也可忽略 2.2 节的小时内随机波动模型,仅采用式(2)—(10)得出晴天和 阴雨天太阳辐照度的小时值时间序列及其概率,由 式(14)计算出对应的光伏功率模型后,即可与负荷 曲线联合进行分析。对中长期可靠性和经济性的研 究而言,其结果仍具有相当的可信度。

以广东中山某分布式光伏电站为例说明模型 的有效性。该电站所处经纬度为东经 113.4°、北纬 22.7°,查询 NASA 气象数据库可得光伏电站位置的 月平均晴天日照晴空指数,见表 1。根据式(3)—(6) 计算其全年地外日辐照度如图 3 所示。可以看出地 外日辐照度在一年中表现为比较平稳的单峰特性, 峰值出现在夏季。

表 1 月平均晴天日照晴空指数 Table 1 Monthly averaged clearness index of clear sky insolation



图 3 全年地外日辐照度

Fig.3 Daily extraterrestrial solar irradiance in a year

图 4 和图 5 分别为模型得出的 2016 年 5 月 11 日和 2015 年 12 月 16 日晴天日辐照度小时均值曲 线,并与相应的 2 个晴天光伏电站实测的辐照度样 本进行了对比。

由图 4、图 5 可以看出,模型所得日辐照度曲线 与实际电站太阳辐照度分布吻合较好,单点最大相 对误差小于 10%,且模型只需使用能简易获取的少 数气象参数,有效避免了传统光伏建模过分依赖历史 气象数据的特点,可以满足中长期电网运行分析和规 划的要求。

4



图 5 2015 年 12 月 16 日太阳辐照度 Fig.5 Solar irradiance in December 16,2015

# 4 分布式光伏模型在配电网规划中的应用

#### 4.1 光伏接入规划问题描述

为了说明所提光伏模型的应用场景和检验使用效果,利用该模型对广州某实际光伏电站接入 10 kV 配电线路的选址进行了规划方案研究。所在地点为 北纬 24°。该地各月晴雨天概率、日照晴空指数、阴雨 天衰减系数根据当地气象统计数据获得,见表 2。

Table 2	Model	parameters	of solar	irradiance
月份	晴天 概率	阴雨天 E 概率	1照晴空 指数	阴雨天 衰减系数
1月	0.83	0.17	0.63	0.375
2 月	0.83	0.17	0.60	0.350
3月	0.80	0.20	0.57	0.360
4月	0.80	0.20	0.62	0.400
5月	0.80	0.20	0.61	0.390
6月	0.73	0.27	0.65	0.360
7月	0.73	0.27	0.62	0.460
8月	0.73	0.27	0.58	0.385
9月	0.87	0.13	0.58	0.405
10 月	0.87	0.13	0.60	0.425
11 月	0.87	0.13	0.65	0.415
12 月	0.83	0.17	0.64	0.500

表 2 太阳辐照度模型参数 able 2 Model parameters of solar irradiance

待规划的光伏电站有 2 个可选建设容量,分别 为 3.5 MW 和 6.5 MW。候选接入位置为图 6 所示馈 线中线路中段的节点 3、线路末端的节点 6。此外,接 入方向比较长还需考虑馈线用户构成不同的影响。

本算例采用年运行网损和年电压合格率 2 个评价指标对接入位置进行评价。此外,还针对 2 种不同的负荷构成进行指标测算:Case 1 假设沿线均为居民负荷;Case 2 假设沿线均为行政办公负荷。2 类负荷的典型日负荷曲线根据电网实际负荷监测数据统计得出,其归一化典型日负荷曲线见图 7。可以看出,2 类负荷曲线峰谷差异明显;行政办公负荷曲线与光伏电站出力曲线相似度较高,而居民负荷曲线



5

图 7 典型日负荷曲线

Fig.7 Typical daily load curves

与光伏出力特性变化趋势刚好相反。

本文采用运行模拟方法。首先,在光伏电源接入前,根据实际居民和行政办公负荷的典型日负荷曲 线进行逐小时潮流计算,得出其年网损量和年电压 合格率分别为:Case 1 的年网损量为 1438.75 MW·h, 年电压合格率为 85.63 %;Case 2 的年网损量为 1479.23 MW·h,年电压合格率为 94.02 %。

然后,利用本文模型得出各月光伏电站晴天和阴 雨天的小时平均出力时间特性。本节仅采用 2.2 节 的离散概率模型与确定性负荷特性进行指标计算。

对全年每个小时分别计算晴天和阴雨天对应的 网损  $P_{\rm lc}(m,d,h)$ 、 $P_{\rm lr}(m,d,h)$ 和电压不合格的节点数  $N_{\rm uc}(m,d,h)$ 、 $N_{\rm ur}(m,d,h)$ 。则年总网损和电压合格率 指标的计算公式分别为:

$$W_{\text{loss}} = \sum_{m=1}^{12} \left[ p_s(m) \sum_d \sum_h P_{\text{lc}}(m, d, h) + (1 - p_s(m)) \sum_d \sum_h P_{\text{lr}}(m, d, h) \right]$$
(15)  
$$N_p = \frac{1}{8760 N_n} \sum_{m=1}^{12} \left[ p_s(m) \sum_d \sum_h N_{\text{uc}}(m, d, h) + (15) \right]$$
(15)

$$(1-p_{s}(m))\sum_{d}\sum_{h}N_{u}N_{ur}(m,d,h) ] \qquad (16)$$

其中, $W_{\text{loss}}$ 为年功率损耗,单位为 MW·h; $N_{\text{p}}$ 为年电压 合格率; $N_{\text{n}}$ 为网络的用户节点总数,本算例中 $N_{\text{n}}$ =6。 4.2 计算结果及分析

表 3 列出了分别对居民负荷和行政办公负荷模型计算得出的 3.5 MW 和 6.5 MW 2 种光伏容量分别接入节点 3 和 6 时馈线年网损和电压合格率的变化情况。表中第 3 列括号中的数据为加入光伏后年网损相对无光伏时年网损降低的百分比,第 4 列括号中的数据为加入光伏后电压合格率相对无光伏时电

表 3 不同场景下网损和电压合格率的变化

Table 3 Changes of network loss and voltage eligibility rate under different situations

负荷	光伏位置(容量)	年网损/(MW·h)	电压合格率/%
居民 负荷	无光伏	1 4 3 8.8	85.63
	节点 3(3.5 MW)	1145.7(20.37%)	86.15(0.52%)
	节点 3(6.5 MW)	1217.3(15.39%)	86.26(0.63%)
	节点 6(3.5 MW)	1164.6(19.06%)	84.85(-0.77%)
	节点 6(6.5 MW)	1517.0(-5.44%)	84.88(-0.74%)
行政 办公 负荷	无光伏	1479.23	94.02
	节点 3(3.5 MW)	911.44(38.38%)	98.03(4.02%)
	节点 3(6.5 MW)	771.40(47.85%)	98.56(4.54%)
	节点 6(3.5 MW)	845.71(42.83%)	98.53(4.51%)
	节点 6(6.5 MW)	941.94(36.32%)	98.64(4.62%)

压合格率提高的百分比。

居民负荷条件下该馈线年网损和电压合格率的 时变情况见图 8。





Fig.8 Yearly network loss and voltage eligibility rate of feeders with resident loads

综上可得结论如下。

a. 由于光伏出力日特性与行政办公负荷的日特 性在升降和变化上基本同调,因此光伏电源无论接 入馈线中段还是末端都能有效地改善馈线的年电压 合格率,接于馈线末端时改善幅度更好。

**b.** 从降低网损的角度看,3.5 MW 光伏电源宜接入馈线末端的节点6,而6.5 MW 的光伏电源宜接入馈线中段的节点3。

c. 光伏出力日特性与居民负荷特性在升降和变 化上基本反向,因此从电压合格率看,若光伏电源接 入居民负荷为主的馈线,则宜接入馈线中段,不应接 入馈线末端,且接入容量也不宜太大。2种容量的光 伏电源接入馈线末端的节点6均会导致沿线电压合 格率更加恶化;接入馈线中段的节点3时,对电压合 格率略有改善。

## 5 结论

在研究分布式电源大量接入后的配电网问题 时,应根据问题关注的时间尺度和关键影响因素合 理选择光伏、风电等随机波动性电源的概率模型。本 文提出了一种适用于中长期稳态运行情况分析和配 电网规划的光伏概率模型,摆脱了传统光伏建模高 度依赖大量历史运行数据和气象数据的缺陷,模型 能有效反映光伏电源的波动性、随机性及功率随时 间变化的规律,经实例验证具有良好的使用精度和 效果,在电力系统中长期运行分析和规划工程中有 较好的应用价值。

#### 参考文献:

- 张厚升,赵艳雷. 多项式拟合的光伏电池阵列模拟器研究与设计
   [J]. 电力自动化设备,2012,32(2):109-113.
   ZHANG Housheng,ZHAO Yanlei. Research and design of photovoltaic cells simulator by polynomial fitting[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(2):109-113.
- [2] 钱霞,袁建华,高厚磊,等. 直流微电网光伏发电最大功率点追踪 方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(6):90-93.
   QIAN Xia,YUAN Jianhua,GAO Houlei, et al. MPPT of photovoltaic generation for DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(6):90-93.
- [3]李晶,许洪华,赵海翔,等.并网光伏电站动态建模及仿真分析
  [J].电力系统自动化,2008,32(24):83-87.
  LI Jing,XU Honghua,ZHAO Haixiang,et al. Dynamic modeling and simulation of the grid-connected PV power station[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(24):83-87.
- [4] SALAMEH Z M,BOROWY B S,AMIN A R A. Photovoltaic modulesite matching based on the capacity factors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1995, 10(2):326-332.
- [5] 林君豪,张焰,陈思,等. 考虑可控负荷影响的主动配电系统分布 式电源优化配置[J]. 电力自动化设备,2016,36(9):46-53. LIN Junhao,ZHANG Yan,CHEN Si,et al. Optimal DG allocation considering effect of controllable load for active distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(9): 46-53.
- [6] 张建华,曾博,张玉莹,等. 主动配电网规划关键问题与研究展望
  [J]. 电工技术学报,2014,29(2):13-23.
  ZHANG Jianhua,ZENG Bo,ZHANG Yuying, et al. Key issues and research prospects of active distribution network planning
  [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(2): 13-23.
- [7]张曦,康重庆,张宁,等. 太阳能光伏发电的中长期随机特性分析
  [J]. 电力系统自动化,2014,38(6):6-13.
  ZHANG Xi,KANG Chongqing,ZHANG Ning, et al. Analysis of mid/long term ramdom characteristics of photovoltaic power generation[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(6): 6-13.
- [8] FEUILLARD T, ABILLON J M. Relationship between global solar irradiation and sunshine duration in guadeloupe[J]. Solar Energy, 1989,43(6):359-361.
- [9] KUMAR R, UMANAND L. Estimation of global radiation using

clearness index model for sizing photovoltaic system[J]. Renewable Energy, 2005, 30(15):2221-2233.

- [10] MEYER E L,DYK E E V. Development of energy model based on total daily irradiation and maximum ambient temperature[J]. Renewable Energy, 2000, 21(1):37-47.
- [11] 国家能源局. 国家能源局关于印发分布式光伏发电项目管理暂 行办法的通知[EB/OL]. (2013-11-18)[2016-08-10]. http:// zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201312/t20131211\_1735.htm.
- [12] HOLLANDS K T, HUGET R G. A probability density function for the clearness index, with applications [J]. Solar Energy, 1983,30(3):195-209.
- [13] Atmospheric Science Data Center. NASA surface meteorology and solar energy [EB/OL]. [2016-08-10]. https://eosweb.larc. nasa.gov/.
- [14] GEORGILAKIS P S,HATZIARGYRIOU N D. Optimal distributed generation placement in power distribution networks: models,methods,and future research[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(3):3420-3428.

#### 作者简介:



管 霖(1970—),女,湖北孝感人,教 授,博士,主要研究方向为电力系统规划 与可靠性、电力系统稳定与控制(E-mail: lguan@scut.edu.cn);

陈 旭(1976—),男,广东普宁人,博士 研究生,主要研究方向为智能配电网的规划 与运行(**E-mail**:chenxu@csg.cn);

B 和 吕耀棠(1992—),男,广东肇庆人,硕士 研究生,主要研究方向为电力系统分析与规划、可再生能源 应用分析(E-mail:traccce tam@163.com):

唐宗顺(1981—),男,江苏扬州人,博士研究生,主要研 究方向为电力系统规划、综合能源系统(E-mail:10970089@ qq.com);

赵 琦(1992—),女,山西太原人,硕士研究生,主要研 究方向为电力系统分析与规划(E-mail:1245406362@qq. com)。

# **Probability model of PV generation for power system planning and its application** GUAN Lin<sup>1</sup>, CHEN Xu<sup>1,2</sup>, LÜ Yaotang<sup>1</sup>, TANG Zongshun<sup>3</sup>, ZHAO Qi<sup>1</sup>

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Planning Discipline of China Southern Power Grid, Guangzhou 510623, China;

3. Planning Discipline of Guangzhou Power Supply, Guangzhou 510620, China)

Abstract: A probability model of the PV(PhotoVoltaic) power output considering both short-term vibration and middle/long time scale variation features is proposed. The distributed probability time series model of hourly mean solar irradiance in a year is established according to meteorological models based on a few parameters. The stochastic fluctuations of hourly solar irradiance with respect to the mean are described by Beta continuous probability distribution. The proposed model needs few statistical parameters and can reflect the regularity and stochastic fluctuations of output time characteristics of PV generation effectively. The effectiveness of the proposed model is verified by comparing the example results with the real measured solar irradiance data of PV plants. The application scenarios are presented by sitting and sizing planning example of distribution feeders with distributed PV sources.

Key words: photovoltaic source; distributed probability time series; continuous probability model; power system planning; reliability analysis