

· 电网运行与控制 ·

## 基于晴空指数与波动特性的光伏电站可靠性分析

宗炫君<sup>1,2</sup>, 袁越<sup>2</sup>, 蒋科<sup>2,3</sup>, 邹盛<sup>1</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院, 江苏 南京 210008;

2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098;

3. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:**为分析光伏电站并网对发电系统可靠性的影响,建立基于晴空指数和波动特性的光伏电站多状态可靠性模型,提出了等间隔与等频的状态划分原则,并根据不同坐标顺序给出2种状态划分方式。采用序贯蒙特卡洛模拟技术评估含光伏电站发电系统的可靠性,基于Roy Billinton测试系统(RBTS)的仿真结果表明:仿真结果与实测数据相吻合,证实模型的合理性;光伏电站等频原则 $k_{DCI}/k_{VI}$ 划分方式下的可靠性模型能够有效提高分析精度。

**关键词:**光伏电站;可靠性模型;晴空指数;波动特性;状态划分;序贯蒙特卡洛模拟

中图分类号:TM615

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)01-0036-06

### 0 引言

以风能、太阳能为代表的绿色可再生能源发电具有美好的发展前景,但光伏发电出力具有不确定性、波动性<sup>[1]</sup>及逐日性,夜间无出力,并网后对电力系统可靠性造成了一系列的消极影响。因此,为评估含光伏电站的发电系统可靠性,建立合理、精确的光伏电站可靠性模型十分必要。

目前对含可再生能源接入的发电系统可靠性分析方法主要有解析法<sup>[2-3]</sup>和模拟法<sup>[4-6]</sup>。解析法适用于系统的规划与研究,模拟法对分析复杂电力系统更具优势,并且仿真结果准确性高<sup>[7]</sup>。

光照的概率模型应考虑地理条件、天气情况、光伏面板倾斜角等因素。太阳辐照度一天内的变化曲线近似为正态分布曲线,文献[8]根据经验,将一定时间段内的太阳辐照度近似看成Beta分布。可采用 $(n, n-1)$ 阶自回归滑动平均模型(autoregressive moving average model, ARMA)近似表示平稳随机过程<sup>[9]</sup>,文献[10]根据我国某地实测数据,对逐日气温极值进行处理后建立ARMA模型。

光伏电站的可靠性模型分为基于元件故障和基于资源限制的可靠性模型。文献[1]建立光伏发电系统的六状态可靠性模型;文献[11]建立的可靠性模型同时考虑了太阳辐照强度对光伏发电输出效率的影响和不同天气状况下元件的故障率;文献[12]建立基于马尔科夫回报模型的光伏发电系统可靠性和性能评估框架;文献[13]基于四状态马尔科夫链模型建立光伏电站输出功率模型。

收稿日期:2018-08-22;修回日期:2018-09-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477041)

文中针对太阳能辐照度不确定性进行可靠性模型研究。首先基于晴空指数和波动特性建立太阳辐照度模拟模型。同时考虑太阳辐射强度波动特点,依据日晴空指数(daily clearness index, DCI)与波动指数(variability index, VI)二维分布图,采用正确并更优的方式对光伏电站的运行状态进行划分,建立考虑状态转移抽样的光伏电站多状态可靠性模型。最后根据美国国家可再生能源实验室(national renewable energy laboratory, NREL)实测数据,基于IEEE-Roy Billinton测试系统(RBTS)采用序贯蒙特卡洛模拟仿真技术分析光伏电站可靠性模型对发电系统可靠性的影响。

### 1 太阳辐射模型

#### 1.1 晴空指数

每天平均晴空指数 $k_{DCI}$ 能够反映一天中整体的天气情况,体现一天中地表水平面上接收到的太阳辐射总量与天文辐射总量的比值。

$$k_{DCI} = H_T / H_c \quad (1)$$

式中: $H_T, H_c$ 分别为一天中地表水平面上所接收到的太阳辐射总量和天文辐射总量。

#### 1.2 波动特性

波动特性描述的是指定时间段内,太阳辐射强度的波动情况,文中以1d为研究尺度。波动特性 $k_{VI}$ 的计算公式<sup>[14]</sup>为:

$$k_{VI} = \frac{\sum_{k=2}^{n_d} \sqrt{(I_{T,k} - I_{T,k-1}) + \Delta t^2}}{\sum_{k=2}^{n_d} \sqrt{(I_{s,k} - I_{s,k-1}) + \Delta t^2}} \quad (2)$$

$$I_s = I_c k_{DCI} \quad (3)$$

式中: $I_{T,k}$ ,  $I_{T,k-1}$  分别为给定日期中第  $k$  段和第  $k-1$  段时间内, 地表水平面的平均太阳辐照强度;  $I_{s,k}$ ,  $I_{s,k-1}$  分别为给定日期一天内地表水平面的太阳辐照均值曲线上, 第  $k$  个和第  $k-1$  个时间点的辐照强度;  $\Delta t$  为辐照度研究的时间间隔;  $n_d$  为研究时间尺度内的间隔数;  $I_s$  为地表水平面的太阳辐照均值, 作为衡量天气波动特性的基准;  $I_c$  为天文辐照强度。

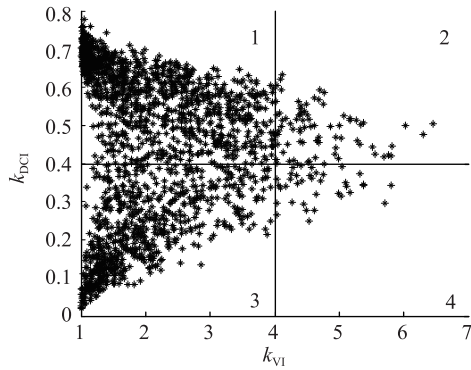


图1  $k_{VI}$ - $k_{DCI}$  二维分布示意

Fig.1 Distribution diagram of  $k_{VI}$ - $k_{DCI}$

图1为天气情况的  $k_{VI}$ - $k_{DCI}$  二维分布, VI 作为衡量指标比较不同地点或不同时间段的太阳辐射强度。按照晴朗、阴雨、全天高波动和混合天气 4 类典型天气划分, 由图1可知, 晴朗天气和辐射量低的极阴天气都可能使波动特性处于较低的水平, 但是高水平波动特性只可能出现在多云天气。

波动特性可以在晴空指数的基础上进一步对天气类型进行研究, 对有相同  $k_{DCI}$  值, 但不同  $k_{VI}$  值的天气进行区分。  $k_{VI}$  计算公式的应用范围广, 根据研究的时间尺度、时间间隔的更改可以灵活变换。

### 1.3 辐照度模拟模型

$t$  时刻的地表水平面上的太阳辐射强度  $I(t)$  可表示为:

$$I(t) = I_B(t) + \Delta I(t) \quad (4)$$

式中:  $I_B(t)$  为  $t$  时刻, 地表水平面上太阳辐射强度的基准值;  $\Delta I(t)$  为  $t$  时刻, 地表水平面上太阳辐射强度的波动分量, 近似认为服从均值为  $\mu$ 、方差为  $\sigma^2$  的正态分布。文中  $I_B(t)$  即为  $I_s(t)$ , 计算式如下:

$$I_B(t) = I_s(t) = I_c(t) k_{DCI} \quad (5)$$

以晴空曲线为基准值时, 能够确保基准曲线始终位于太阳辐射曲线的中间, 拟合效果显著。根据美国 NREL 实测数据, 连续 2 天地表水平面上的太阳辐射强度的曲线如图 2 所示。

## 2 光伏电站建模

### 2.1 光伏电站多状态模型

文中重点分析由太阳辐照强度引起的光伏电

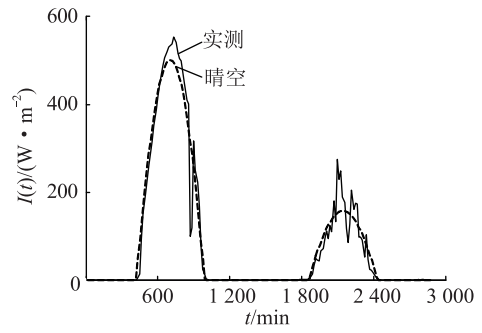


图2 连续两天太阳辐射强度

Fig.2 Solar irradiance of two consecutive days

站运行状态的改变。地表太阳辐照度与晴空指数以及波动特性密切相关, 因此可以根据  $k_{VI}$  与  $k_{DCI}$  值的大小对光伏电站的运行状态进行划分, 建立多状态可靠性模型。分别根据  $k_{VI}$  与  $k_{DCI}$  的值将状态划分为  $M$  份和  $N$  份, 建立光伏电站 ( $M \times N$ ) 状态模型 (以图 1 中划分方式为例,  $M=N=2$ , 因此模型状态数为 4)。为了简化分析过程, 在后面的算例计算中均设定  $N=M$ 。

如果光伏电站此时状态为  $i^h$ , 在运行状态出现变化时, 将有概率达到  $M^2$  个状态数, 则当状态为  $j^h$  时的概率  $P_{ij}$  的表达式为:

$$P_{ij} = \lambda_{ij} / \left( \sum_{j=0}^{M^2} \lambda_{ij} \right) \quad (6)$$

$$\lambda_{ij} = n_{ij} / T_i \quad (7)$$

式中:  $\lambda_{ij}$  为状态  $i$  到状态  $j$  的转移率;  $n_{ij}$  为从状态  $i$  到  $j$  的转换次数;  $T_i$  为处于状态  $i$  的总时间。可知:

$$\sum_{j=0}^{M^2} P_{ij} = 1 \quad (8)$$

光伏电站的运行状态由  $i$  变化为  $j$ , 图 3 为变化后的状态  $j$  的判定依据。

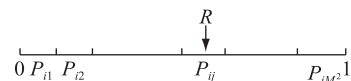


图3 光伏电站状态转移的判定过程

Fig.3 PV station state transition decision process

如图 3 所示, 全部可能状态依次累加排列在数轴  $[0, 1]$  之间,  $R$  为  $[0, 1]$  间服从均匀分布的随机数, 若  $R$  落在区间  $P_{ij}$ , 则状态变化后光伏电站将运行于状态  $j$ 。

### 2.2 光伏电站出力模型

光伏发电系统一般只向电网提供有功功率, 在光伏电站附件建有专门的无功补偿装置, 如静止无功补偿装置 (static var compensator, SVC) 等。因此, 无功能够实时予以平衡, 可以不予考虑。

根据 NASA 网站的多年月平均温度, 利用 RET-

Screen 软件可估算环境温度造成的发电量损失约为 4%, 由于风速对光伏发电量的影响较为复杂, 因此文中不考虑环境风速、温度等因素。光伏电站的输出功率计算公式用三段式表示为<sup>[10]</sup>:

$$P_V(t) = \begin{cases} \frac{P_{sn} I^3(t)}{I_{std} R_c^2} \eta_c & 0 < I(t) \leq R_c \\ \frac{P_{sn} I(t)}{I_{std}} \eta_c & R_c < I(t) \leq I_{std} \\ P_{sn} \eta_c & I_{std} < I(t) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $P_V(t)$  为时刻  $t$  光伏电站的输出功率;  $P_{sn}$  为光伏电站的额定输出功率;  $I_{std}$  为标准测试条件下的单位光强;  $\eta_c$  为标准测试条件下获得的光伏阵列能量转化效率;  $R_c$  为设定值。

### 3 光伏电站可靠性分析

文中首先研究基于状态转移抽样的光伏电站多状态可靠性模型, 然后采用该模型对光伏发电系统进行可靠性分析。

#### 3.1 可靠性指标

发电系统可靠性的评价指标分为确定性指标和概率性指标, 常用的概率性指标有失负荷概率 (loss of load probability, LOLP)、缺电频率 (loss of load frequency, LOLE)、缺电时间期望 (loss of load expectation, LOLE) 等。文中利用序贯蒙特卡洛模拟对光伏发电系统的可靠性评估, 因此采用时序可靠性指标中具有代表性的指标 LOLF。

缺电频率 LOLF, 即给定时间内系统不能满足负荷需求的次数, 一般用次/a 表示, 其表达式为:

$$f_{LOLF} = \sum F \left[ \prod_{i \in A} P_i \prod_{j \in B} (1 - P_j) \sum_{k=1}^m \lambda_k \right] \quad (10)$$

式中:  $F$  为系统处于状态  $i$  的频率;  $\lambda_k$  为转移率;  $P_i$  为故障概率;  $A, B$  分别为故障及正常运行集合。

#### 3.2 可靠性分析过程

序贯蒙特卡洛仿真是基于抽样元件状态持续时间的概率分布。该方法通过抽样, 首先模拟按时间顺序的元件状态转移过程, 然后合并形成了按时间顺序的系统状态转移过程。

光伏电站具有模块化和间歇性的特点, 在自然停机的时间可以进行检测和维修, 因此文中忽略其故障率的问题, 仅仅考虑光伏电站有功输出随太阳辐照度变化的情况。综合传统发电机组的随机故障停运与光伏电站多状态模型对可靠性的影响, 采用序贯蒙特卡洛模拟法对光伏电站进行可靠性分析。对光伏电站进行可靠性分析过程如下:

(1) 根据双状态停运模型, 确定传统发电机组

每小时的停运状态, 从而得到传统发电机组在模拟周期内的可用放电容量序列;

(2) 根据式(6)与图 3 判定光伏电站的运行状态, 形成多状态运行序列表;

(3) 根据光伏电站所处状态下的实测数据拟合  $\Delta I(t)$  的正态分布参数, 计算对应时刻的太阳辐照度;

(4) 根据式(9)可获得光伏电站在模拟周期内的出力序列;

(5) 判断系统运行状态, 计算系统的可靠性指标 LOLF。

基于上述分析过程, 文中所提基于序贯蒙特卡洛算法的可靠性分析流程如图 4 所示。

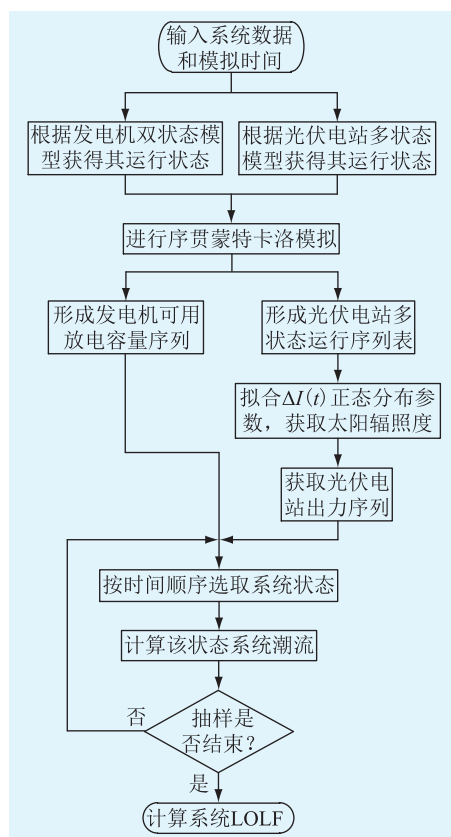


图 4 可靠性分析流程

Fig.4 Flow chart of reliability analysis

## 4 算例分析

在 RBTS<sup>[15]</sup> 系统中接入光伏电站, 以其为算例评估光伏发电系统可靠性。RBTS 包含 11 台传统发电机, 总装机容量为 240 MW, 将系统年负荷峰值由 185 MW 增加为 205 MW, 具体年负荷曲线参见文献[15]。光伏电站输出功率计算中所需的参数  $I_{std}$  设定为  $1\ 000\ \text{W/m}^2$ ,  $R_c$  取值为  $150\ \text{W/m}^2$ <sup>[11]</sup>。光伏电站长期的实测辐照强度数据来源于美国

NREL 某个光伏电站,以此计算可靠性模型中所需要的相关参数<sup>[15]</sup>。

#### 4.1 光伏电站模型不同状态划分原则的比较

同时将  $k_{VI}$ ,  $k_{DCI}$  的坐标长度平均分成  $M$  份,依此作为二维分布图  $M^2$  个区间的划分界限,并定义为等间隔原则状态划分方式。等间隔原则下,光伏电站采用 100 状态模型如图 5 所示。 $k_{DCI}/k_{VI}$  等频划分方式是指对  $k_{DCI}$ 、 $k_{VI}$  坐标轴依次进行  $M$  状态划分,先对  $k_{DCI}$  坐标轴进行  $M$  状态等频划分,然后在划分得的各个状态中,再依据  $k_{VI}$  坐标轴进行  $M$  状态划分,最终得到光伏电站  $M^2$  状态模型,并定义为  $k_{DCI}/k_{VI}$  等频划分方式。等频原则下,光伏电站采用 100 状态模型时, $k_{VI}$ - $k_{DCI}$  的二维分布情况如图 6 所示。

图 1 中位于  $k_{VI}$ - $k_{DCI}$  二维分布图边缘的点分布稀疏,所以状态数增加到一定数值,必然导致落在图形边缘状态里的数据量大大减少,使得这些状态统计得到的相关参数不具说服力。等频原则下,每个状态区间里包含实测数据点的个数相同,各状态统计所得的参数更具说服力。显然,等频原则下,各个状态区间的坐标长度并不相等。

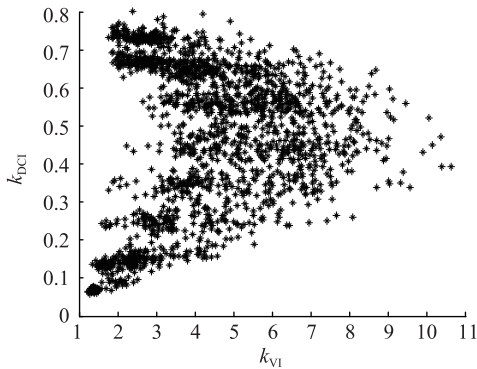


图 5  $k_{VI}$ - $k_{DCI}$  二维分布示意(等间隔模型)  
Fig.5 Distribution diagram of  $k_{VI}$ - $k_{DCI}$   
(equal interval model)

对比分析图 5 和图 6,与等间隔原则划分方式相比,采用同一状态数的光伏电站模型时,等频原则下  $k_{VI}$ - $k_{DCI}$  分布图更均匀。等频原则的划分方式本身已经对模型精度进行了改善,与等间隔划分方式相比,随着状态数的增加,对模型精度的提高效果更早出现了“饱和”状态。经过算例分析得到  $k_{DCI}/k_{VI}$  等频划分方式 100 状态 ( $M=N=10$ ) 模型,能够同时满足模型精度和分析工作量的要求<sup>[16-17]</sup>。

#### 4.2 光伏电站模型不同状态划分顺序的比较

光伏电站模型的等频原则划分方式,根据横纵坐标轴状态划分的先后顺序,可以分为两类: $k_{DCI}/k_{VI}$  划分方式和  $k_{VI}/k_{DCI}$  划分方式。 $k_{DCI}/k_{VI}$  划分方式

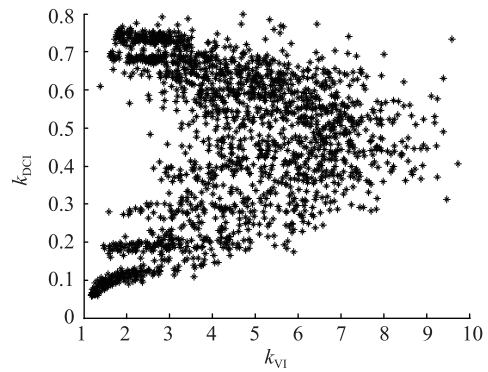


图 6  $k_{VI}$ - $k_{DCI}$  二维分布示意( $k_{DCI}/k_{VI}$  等频)  
Fig.6 Distribution diagram of  $k_{VI}$ - $k_{DCI}$   
(equal frequency of  $k_{DCI}/k_{VI}$  model)

在 4.1 节已经进行了详细讲解。定义  $k_{VI}/k_{DCI}$  划分方式为:先对  $k_{VI}$  坐标轴进行  $M$  状态等频划分,然后在划分得的各个状态中,再依据  $k_{DCI}$  坐标轴进行  $M$  状态划分,最终得到光伏电站  $M^2$  状态模型。 $k_{VI}/k_{DCI}$  等频划分方式下,以光伏电站 36 状态 ( $M=6$ ) 模型为例, $k_{VI}$ - $k_{DCI}$  的二维分布情况如图 7 所示。

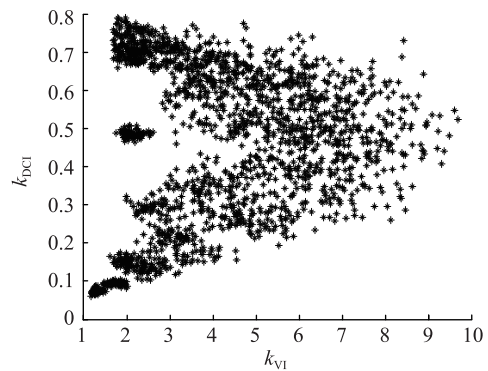


图 7  $k_{VI}$ - $k_{DCI}$  二维分布示意( $k_{VI}/k_{DCI}$  等频)  
Fig.7 Distribution diagram of  $k_{VI}$ - $k_{DCI}$   
(equal frequency of  $k_{VI}/k_{DCI}$  model)

图 7 中有一些点分布于 2 个“箭尾”之间,这是对坐标轴的划分顺序所决定的。 $k_{VI}/k_{DCI}$  划分方式可能将上“箭尾”下方和下“箭尾”上方的部分点归类于同一个状态区间,对天气情况相差很大的数据进行了平均化处理,从而出现分布于“箭尾”之间的点。实际上只有高  $k_{DCI}$  值的晴朗天气和低  $k_{DCI}$  值的阴雨天气,才有较低的  $k_{VI}$  值,分布于“箭尾”处。不存在同时具备中等  $k_{DCI}$  值和低  $k_{VI}$  值的天气,所以出现在“箭尾”之间的点不符合实际规律。综上所述,等频原则下,只有  $k_{DCI}/k_{VI}$  划分方式是合理的。

采用  $k_{DCI}/k_{VI}$  等频划分方式 100 状态 ( $M=N=10$ ) 模型的状态转移抽样法对光伏电站进行分析。选取抽样方法仿真过程中,首先将样本按照晴朗、阴雨、全天高波动和混合天气 4 类典型天气划分,对

连续 2 天的太阳辐照度数值进行抽样并绘制辐照强度随时间变化曲线,如图 8 所示。

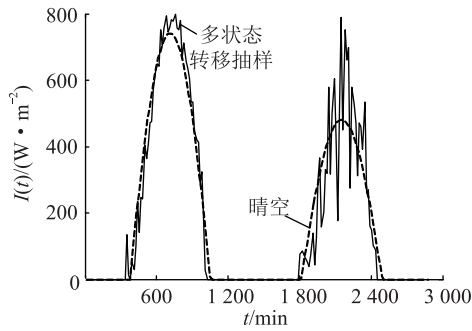


图 8 连续两天太阳辐射强度(多状态转移抽样法)

Fig.8 Solar irradiance of two consecutive days (state transition sampling based on multi-state model)

图中不仅反映出不同的天气情况,而且体现出天气类型变化的连续性。辐照强度波动分量的正态分布拟合,同时考虑了时间和天气两方面因素。图 8 中左侧曲线为波动水平低的晴朗天气;右侧曲线上午和中午波动水平高,而下午辐照强度曲线平缓,所以是混合天气。由此可以看出基于状态转移抽样的  $k_{DCI}/k_{VI}$  等频划分方式 100 状态模型模拟得到的太阳能辐射强度与实际特点相吻合。

#### 4.3 光伏电站多状态模型对可靠性评估的影响

将文献[4]中对太阳辐照度的模拟方法称为直接抽样法,分析光伏电站  $k_{DCI}/k_{VI}$  等频划分方式 100 状态( $M=N=10$ )模型和光伏电站容量对光伏发电系统可靠性评估的影响,可靠性指标 LOLF 值的变化情况如图 9。

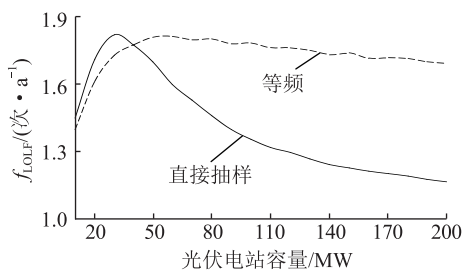


图 9 多状态模型对 LOLF 评估的影响

Fig.9 Effect of PV station multi-state model on LOLF evaluation

分析图 9 得知,随着光伏电站容量增加,可靠性指标 LOLF 值的变化趋势为先上升后下降。由于光伏电站出力与辐照度相关,具有波动性,当光伏电站容量较小时,系统多处于功率缺额状态,光伏电站接入对发电容量的补充可能将一段持续较长时间停电状态,分割为几段短时间停电状态,从而导致 LOLF 值上升。LOLF 峰值点处,采用直接法的光伏电站容量小于多状态模型。这是由于多状态模

型考虑了日晴空指数的变化,某些日期的辐照度基准值会处于较低状态,故在光伏电站容量较大时,LOLF 值仍处于上升状态。由于多状态模型考虑了天气类型的转移过程,一年中处于整天辐射强度低的总天数的概率一定,从而导致越过峰值点后曲线的下降趋势稳定,即年停电次数指标很难随着光伏电站容量的进一步增加得到显著改善。然而由于直接法忽略天气类型的变化,光伏电站的出力是抽样结果的直接累加,因此随着光伏电站容量的进一步增加,出现了 LOLF 值明显下降的不合理现象。

## 5 结论

文中采用 VC++6.0 软件实现了含光伏电站发电系统的可靠性分析,验证了基于状态转移抽样的光伏电站多状态可靠性模型的正确性。采用美国 NREL 实际光伏电站的实测数据,对 RBTS 进行了可靠性分析,并得出以下结论:(1) 提出的基于状态转移抽样,并考虑晴空指数与波动特性的光伏电站多状态可靠性模型,适用于太阳辐照度的长期模拟,证实了模型的正确性与准确性。(2) 与等间隔原则相比,等频原则下的光伏电站多状态模型可在控制可靠性分析工作量的前提下有效提高模型精度。(3) 等频原则下,  $k_{VI}/k_{DCI}$  划分方式得到的太阳辐射不符合实际规律,只能采用  $k_{DCI}/k_{VI}$  划分方式建立光伏电站模型。(4) 多状态模型考虑了天气类型、波动特性以及各状态之间的转移过程,所以采用多状态模型的可靠性分析结果具有说服力。

#### 参考文献:

- [1] 王震,鲁宗相,段晓波,等. 分布式光伏发电系统的可靠性模型及指标体系[J]. 电力系统自动化,2011,35(15):18-24.  
WANG Zhen, LU Zongxiang, DUAN Xiaobo, et al. Reliability model and indices of distributed photovoltaic power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15): 18-24.
- [2] KHATOD D K, PANT V, SHARMA J. Analytical approach for well-being assessment of small autonomous power system with solar and wind energy sources [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2): 535-545.
- [3] ZHANG P, WANG Y, XIAO W D, et al. Reliability evaluation of grid-connected photovoltaic power system [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(3): 379-389.
- [4] 黄廷城,叶琳浩,张勇军. 基于 AHP-熵权法的配电网用电可靠性综合评估[J]. 广东电力,2018,31(1):44-50.  
HUANG Tingcheng, YE Linhao, ZHANG Yongjun. Comprehensive evaluation on electricity consumption reliability of power distribution network based on AHP-Entropy weight method [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(1): 44-50.
- [5] 林成虎,王志英,余文辉,等. 南方电网供电可靠性管理集成应用模块建设[J]. 广东电力,2017,30(7):131-135.

- LIN Chenghu, WANG Zhiying, YU Wenhui, et al. Construction of integrated application for CSG power supply reliability management[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(7):131-135.
- [6] 郑明, 李保宏, 陆莹, 等. 海上风电场集群输电电网可靠性分析[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2):49-54.
- ZHENG Ming, LI Baohong, LU Ying, et al. Reliability analysis of offshore wind farm transmission network cluster[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(2):49-54.
- [7] CASTRO R M G, FERREIRA L A F M. A comparison between chronological and probabilistic methods to estimate wind power capacity credit[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(4):904-909.
- [8] 蒙沛南. 广西主要城市倾斜面上太阳辐射总量的气候学计算[J]. 广西科学, 1995, 2(2):18-20.
- MENG Peinan. The climatology calculation of global solar irradiation on tilted surfaces in Guangxi region[J]. Guangxi Science, 1995, 2(2):18-20.
- [9] KARKI R, HU P, BILLINTON R. Reliability evaluation considering wind and hydro power coordination[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2):685-693.
- [10] 汪海瑛, 白晓民, 马纲. 并网光伏电站的发电可靠性评估[J]. 电网技术, 2012, 36(10):1-5.
- WANG Haiying, BAI Xiaomin, MA Gang. Reliability assessment considering the coordination of wind power, solar energy and energy storage[J]. Power System Technology, 2012, 36(10):1-5.
- [11] CHA S T, JEON D H, BASE I S, et al. Reliability evaluation of distribution system connected photovoltaic generation considering weather effects[C]//8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Ames, America, 2004:451-456.
- [12] 丁明, 鲍玉莹, 毕锐. 应用改进马尔科夫链的光伏出力时序序列模拟[J]. 电网技术, 2016, 40(2):459-464.
- DING Ming, BAO Yuying, BI Rui. Simulation of PV output time series used improved Markov chain[J]. Power System Technology, 2016, 40(2):459-464.
- [13] 熊小萍, 杨露, 李宁, 等. 基于仿射最小路法的含分布式电源配电网可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17):43-50.
- XIONG Xiaoping, YANG Lu, LI Ning, et al. Reliability analysis of distribution network with distributed generators based on affine minimal path method[J]. Automation of Electric Power System, 2017, 41(17):43-50.
- [14] STEIN J S, HANSEN C W, RENO M J. The variability index: a new and novel metric for quantifying irradiance and PV output variability[C]//World Renewable Energy Forum, Denver, America, 2012.
- [15] BILLINTON R, KUMAR S, CHOWDHURY N, et al. A reliability test system for educational purposes-basic data[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(3):1238-1244.
- [16] 王敏, 宗炫君, 袁越, 等. 含光伏电站的发电系统可靠性分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34):42-49.
- WANG Min, ZONG Xuanjun, YUAN Yue, et al. Reliability analysis of generation systems with photovoltaic stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34):42-49.
- [17] 李琥, 刘国静, 朱磊, 等. 含UPFC南京西环电网系统可靠性评估研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(1):26-31.
- LI Hu, LIU Guojing, ZHU Lei, et al. Study on system reliability evaluation of Nanjing West loop power network with UPFC[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1):26-31.

## 作者简介:



宗炫君

宗炫君(1990),女,博士在读,工程师,从事电网规划工作(E-mail:jssfnxzj@126.com);  
袁越(1966),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统运行分析与控制(E-mail:yyuan@hhu.edu.cn);  
蒋科(1987),男,博士在读,工程师,从事电网规划及设计工作。

## Reliability analysis for the PV power plant based on the clearness index and variability characteristic

ZONG Xuanjun<sup>1,2</sup>, YUAN Yue<sup>2</sup>, JIANG Ke<sup>2,3</sup>, ZOU Sheng<sup>1</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Co., Ltd. Economic Research Institute, Nanjing 210008, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** In order to analyze the influence of grid connected PV power plant on the reliability of power generation system, a multi-state reliability model of PV power plant is established based on the clearness index and fluctuation characteristic, a state division principle of equal interval and equal frequency is proposed, and two state division methods according to different coordinate orders are gave. Then sequential Monte Carlo simulation technology is utilized to assess the reliability of generation system with PV power plant. Simulation results on Roy Billinton test system(RBTS) are in line with measured data demonstrate the rationality of proposed model. Finally, simulation results show that the model with equal frequency division principle and  $k_{DCI}/k_{VI}$  state division method can get more accurate results in reliability analysis of the generation system with PV power plant.

**Keywords:** PV power plant; reliability model; clearness index; fluctuation characteristic; state division; sequential Monte Carlo simulation

(编辑 方晶)