

# 基于概率序列的含风光电力系统可靠性评估方法

高 博, 王小明, 谢毓广

( 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230601)

**摘 要:** 文章提出了一种基于生产模拟概率序列的含风光电力系统可靠性评估方法。首先利用 Weibull 分布与 Beta 分布描述风速与太阳辐照度的概率分布特性, 然后建立合适的风电、光伏及负荷的并网模型, 最后基于生产模拟概率序列理论, 对含风光系统的可靠性指标进行计算评估。在 MATLAB 中对 IEEE RBTS BUS6 系统进行仿真验证, 结果表明上述方法相对于蒙特卡罗方法, 能够在保证计算精度的同时, 显著缩小计算的时间代价。

**关键词:** 概率序列; 可靠性评估

**中图分类号:** TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9706(2018)03-0011-05

## Reliability Assessing Method for Grid with Photovoltaic-Wind Power Generation Based on Discretization Sequence

GAO Bo, WANG Xiao-ming, XIE Yu-guang

( State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230601, China)

**Abstract:** This paper proposes a reliability assessing method for grid with photovoltaic-wind power generation based on power system production simulation discretization sequence. First, the Weibull distribution and the Beta distribution are used to describe the probability distribution characteristics of wind speed and solar irradiance respectively. Then the models of wind farm, solar park and local load are properly built for reliability assessment. Finally, the reliability of the grid with photovoltaic-wind power generation is calculated based on the discretization sequence theory. A simulation for IEEE RBTS BUS6 system in MATLAB indicates that the proposed method calculates the reliability indexes much faster with the accuracy ensured when compared with Monte Carlo method.

**Key words:** discretization sequence; reliability assessment

## 0 引言

研究含间歇性能源的电力系统可靠性常用的方法是蒙特卡罗模拟法<sup>[1]</sup>。蒙特卡罗方法便于处理随机特性, 得出的结果精度较高, 但是仿真所需的时间代价相对较大。在含有间歇性能源的电力系统规划阶段, 常常需要对多个方案进行优选比较而进行供电可靠性评估。这类评估的精确度要求不是很高, 时间代价不能太大, 而且涉及网架结构的调整。因此, 在这种应用背景下常规的蒙特卡罗方法显得效率较低。

本文提出一种基于生产模拟概率序列的含风光电力系统可靠性评估方法。首先, 利用威布尔 (Weibull) 分布与贝塔 (Beta) 分布描述一个地区风速与太阳辐照度的概率分布特性; 然后, 建立合适的风电、光伏及负荷的并网模型; 最后, 选取停电概率 (LOLP) 和停电电量期望值 (EENS) 作为可靠性评估指标, 基于生产模拟概率序列理论, 对含风光系统的可靠性指标进行计算评估。在 MATLAB 中编程对

收稿日期: 2018-03-15

作者简介: 高 博 (1981-) 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护、新能源技术方面的工作。

IEEE RBTS BUS6 系统进行仿真计算,结果表明上述方法相对于蒙特卡罗方法,能够在保证计算精度的同时,显著缩小计算的时间代价。

## 1 风电场与光伏电站并网模型

### 1.1 风速与太阳辐照度概率分布模型

采用双参数的 Weibull 分布描述风速的概率密度<sup>[2~3]</sup>,其概率密度函数为:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left( - \left( \frac{v}{c} \right)^k \right) \quad (1)$$

式中:  $v$  为风速;  $k, c$  分别为 Weibull 分布形状参数和尺度参数。

采用 Beta 分布<sup>[3]</sup>描述短时间内(几个小时)太阳光照强度的概率分布特性,其概率密度方程为:

$$f(r) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \cdot \left( \frac{r}{r_{\max}} \right)^{\alpha-1} \cdot \left( 1 - \frac{r}{r_{\max}} \right)^{\beta-1} \quad (2)$$

式中:  $\Gamma(\cdot)$  为伽马函数;  $r$  为实际光照强度;  $r_{\max}$  为最大光照强度;  $\alpha, \beta$  为贝塔分布形状参数。

$\alpha, \beta$  的计算方法为:

$$\alpha = \mu \left[ \frac{\mu(1-\mu)}{\sigma^2} - 1 \right] \quad (3)$$

$$\beta = (1-\mu) \left[ \frac{\mu(1-\mu)}{\sigma^2} - 1 \right] \quad (4)$$

式中  $\mu$  和  $\sigma^2$  为一段时间内光照强度统计数据平均值和方差。不同季节、不同天气的  $\alpha, \beta$  取值不同。

### 1.2 风电场并网模型

风力发电机的出力与风速紧密相关,二者之间的关系如图 1 所示。

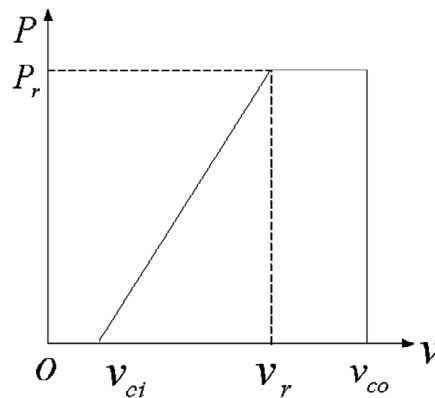


图 1 风力发电机功率输出曲线

风电机组的输出功率与风速之间的分段函数表达式如下:

$$P = \begin{cases} 0 & (V \leq V_{ci} \text{ 或 } V \geq V_{co}) \\ P_r \frac{V - V_{ci}}{V_r - V_{ci}} & (V_{ci} \leq V \leq V_r) \\ P_r & (V_r \leq V \leq V_{co}) \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $V$  为风机轮毂高度处的风速;  $V_{ci}$  为切入风速,  $V_{co}$  为切出风速,  $V_r$  为额定风速,  $P_r$  为风力发电机组额定输出功率。

本文采用风电场稳态简化模型(PZ 模型)。在潮流计算中把风力机当成 PQ 节点,认为其有功功率就是风力机的机械功率,只与风速有关。因此风电场的有功出力  $P_f$  可以用运行的风机数乘以单台风机的出力  $P_w$  求得:

$$P_f = n \times P_w \quad (6)$$

结合风速的概率密度函数可得风电场输出有功功率的概率密度为<sup>[1]</sup>:

$$f(P_f) = \frac{k}{nk_1 c} \left( \frac{P_f - nk_2}{nk_1 c} \right)^{k-1} \exp \left( - \left( \frac{P_f - nk_2}{nk_1 c} \right)^k \right) \quad (7)$$

其概率密度分布为三参数的 Weibull 分布函数。

### 1.3 光伏电站并网模型

本文假定光伏电池工作在最大功率点处。根据某一时刻的安装地点的太阳辐射量  $r$ , 单个太阳能电池板面积  $A$ , 以及电池组件的额定转换效率  $\eta$ , 可以算出单块组件在时刻的输出功率  $P$  (单位为 kW) <sup>[3]</sup>:

$$P = \frac{rA\eta}{860.4} \quad (8)$$

再根据整个光伏电站的光伏电池板元件数目  $n$ , 即可算出时刻的整个光伏电站的出力为  $nP$ 。在潮流计算中光伏电站可以按如下方式处理: 将光伏电站直接当成普通电厂参与潮流计算, 当白天光伏电场有出力时, 所在的节点设为 PV 节点(电站本身装有无功补偿装置, 具有一定的调压能力), 当光伏电站的出力为 0 时(在非日照时间段内), 该节点应转为 PQ 节点(有功出力  $P=0$ ) 参与潮流计算。

根据光照强度的概率密度函数, 可得光伏电站输出有功功率的概率密度也呈现 Beta 分布:

$$f(P_m) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \cdot \left( \frac{P_m}{P_{\max}} \right)^{\alpha-1} \cdot \left( 1 - \frac{P_m}{P_{\max}} \right)^{\beta-1} \quad (9)$$

其中  $P_{\max} = n \cdot \frac{r_{\max} A \eta}{860.4}$  为光伏电站最大输出功率。

### 1.4 负荷模型

在电网规划阶段, 负荷的预测存在一定的不确定性, 本文采用正态分布近似表示负荷预测结果(仅考虑有功), 可以较好地反映负荷预测的不确定性。

$$f(P) = \frac{k}{\sqrt{2\pi}\sigma_P} \exp \left( - \frac{(P - \mu_P)^2}{2\sigma_P^2} \right) \quad (10)$$

其中:  $\mu$  为数学期望,  $\sigma^2$  为方差,  $P$  表示有功功率。

## 2 基于概率序列的含风光系统可靠性评估

### 2.1 电力系统生产模拟概率序列

电力系统中的供能元件(如发电机等)称为资源; 耗能元件(如负荷等)称为需求。可以统一地用它们的可用容量为随机变量导出其分布规律<sup>[4, 5]</sup>。取系统内各类元件的公共容量离散化步长为  $\Delta C$ , 设某元件  $m$  的额定容量为  $C_m$ , 以  $\Delta C$  对其序列化, 令<sup>[4, 5]</sup>

$$S_m = [C_m / \Delta C] \quad (11)$$

其中  $[x]$  表示取不超过  $x$  的最大整数。

此元件共有  $S_m + 1$  个状态, 其中第  $i$  个状态的可用容量为:

$$C_m^i = i\Delta C, \quad 0 \leq i \leq S_m \quad (12)$$

各状态对应相应的概率可以按照(7)、(9)、(10)式计算。假设风电场出力, 光伏电场出力, 负荷之间互相独立。

### 2.2 含风光系统可靠性评估

记:  $\Omega_{REW}$  为系统中所有风电、光伏发电机组集合;  $\Omega_G$  为系统中所有传统机组集合;  $\Omega_L$  为系统中所有负荷集合;  $\Omega_F$  为系统中所有线路集合。对于元件  $\xi \in \Omega_{REW} \cup \Omega_L$ , 其处于状态  $i_\xi$  的概率设为  $\Pr(i_\xi)$ ,  $1 \leq i_\xi \leq S_\xi + 1$ 。

考虑网络约束时, 系统的传统机组发电费用最小的最优潮流为:

$$\begin{cases} \min \sum_{\xi \in \Omega_G} c_{\xi}(i_{\xi}) + c_{\omega}(\omega) \\ s. t. \sum_{\xi \in \Omega_G} i_{\xi} + \sum_{\xi \in \Omega_{REW}} i_{\xi} - \sum_{\xi \in \Omega_L} i_{\xi} + \omega = 0 \\ f_l^{\min} \leq f_l \leq f_l^{\max}, l \in \Omega_F \\ \omega \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

上式  $c_{\xi}(\cdot)$  中为元件  $\xi$  ( $\xi \in \Omega_G$ ) 的费用函数  $f_l$  为线路  $l$  上的潮流  $f_l^{\min}, f_l^{\max}$  分别为线路  $l$  上潮流的最大、最小允许值。 $\omega$  是松弛变量  $\omega \geq 0$   $c_{\omega}(\cdot)$  为其费用函数。一般  $c_{\omega}(\cdot)$  要远大于  $c_{\xi}(\cdot)$ 。

为提高计算速度  $f_l$  采用直流潮流求解。考虑到实际情况中,大部分线路潮流不会越界,所以式(13)中的最优潮流可以按照如下步骤加速求解:

(1) 求解优化问题:

$$\begin{cases} \min \sum_{\xi \in \Omega_G} c_{\xi}(i_{\xi}) + c_{\omega}(\omega) \\ s. t. \sum_{\xi \in \Omega_G} i_{\xi} + \sum_{\xi \in \Omega_{REW}} i_{\xi} - \sum_{\xi \in \Omega_L} i_{\xi} + \omega = 0 \\ \omega \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

这是忽略网络约束的最优潮流。得到的所有传统机组出力为  $i_{\xi}^{(0)}$  ( $\xi \in \Omega_G$ )。

(2) 若  $\omega > 0$  则系统将失负荷,跳至(5);若  $\omega = 0$ ,针对  $i_{\xi}^{(0)}$  ( $\xi \in \Omega_G$ ),以及  $\xi \in \Omega_{REW} \cup \Omega_L$ ,计算直流潮流。

(3) 若线路潮流没有越界  $i_{\xi}^{(0)}$  ( $\xi \in \Omega_G$ ) 则可行,系统不失负荷;否则,假设线路潮流越界,将线路  $h$  的潮流约束加入(14)中:

$$\begin{cases} \min \sum_{\xi \in \Omega_G} c_{\xi}(i_{\xi}) + c_{\omega}(\omega) \\ s. t. \sum_{\xi \in \Omega_G} i_{\xi} + \sum_{\xi \in \Omega_{REW}} i_{\xi} - \sum_{\xi \in \Omega_L} i_{\xi} + \omega = 0 \\ f_h^{\min} \leq f_h \leq f_h^{\max}, h \in \Omega_F \\ \omega \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

(4) 用(15)代替(14),重复(1)~(3)流程,得到  $i_{\xi}^{(1)}$  ( $\xi \in \Omega_G$ ),若系统此时没有线路潮流越界且供需平衡,则系统在该组风电、光伏、负荷状态下不会失负荷;否则跳至(5)。

(5) 系统在该组风电、光伏、负荷状态下会失负荷,该组状态的概率为  $\prod_{\xi \in \Omega_{REW} \cup \Omega_L} \Pr(i_{\xi})$ ,丢失的负荷量为  $\omega$ 。

本文选取失负荷概率(LOLP)及停电电量期望值(EENS)作为可靠性评价指标。当然,除了上述的两种可靠性指标外,本算法还能得出每条线路上的有功潮流,在实际应用中可以灵活调用。

综合上述分析,基于概率序列和直流最优潮流的风光互补系统可靠性快速评估方法整体计算流程如下:

- (1) 确定系统的容量序列化步长  $\Delta C$  (可取为各元件容量的最大公因子);
- (2) 对系统中所有元件容量进行序列化,并计算每个状态对应的概率;
- (3) 对风电、光伏、负荷元件所有可能的状态组合,实施步骤:(1)~(5);
- (4) 计算结束,统计 LOLP 和 EENS。

### 3 算例分析

采用 IEEE RBTS BUS6 中的辐射型网络,而且只考虑其中 30 个节点的部分网络<sup>[1]</sup>,电网拓扑结构如图 2 所示。本文中仿真设定的常规能源机组、风电场、光伏电站的装机容量分别为: 8MW、3MW、0.6MW。

将常规能源机组从 33kV 母线节点接入,将风电场从 18 节点接入,将光伏电站从 6 节点接入。

风电场参数如下所示:总装机容量  $5 \times 600\text{kW}$ ,风电机组的切入风速、切出风速、额定风速分别为:  $3\text{m/s}$ ,  $25\text{m/s}$ ,  $16\text{m/s}$ 。风电场接入系统线路的参数为  $12.6 + j24.96\Omega$ ,假定风电场空气密度为  $1.2245\text{kg/m}^3$ ,风力机扫掠面积为  $1840\text{m}^2$ 。

光伏电站参数如下所示:假定太阳能电池安装地点地理纬度为  $33.38^\circ$ ,太阳能电池组件的基本参数为 180 峰瓦,总装机容量为  $600\text{kW}$ ,电池板的外形尺寸为  $1580 \times 793 \times 50(\text{mm})$ ,装设于正南方。太阳能阵列的倾斜角为  $0^\circ$ ,订正后的大气透明度  $P_2 = 0.7$ 。电池组件的额定转换效率为 13%。

负荷参数:按文献[6]提供的负荷数据,以正态分布(简化为  $0, \pm 1\%, \pm 2, \pm 3\%$  七个离散点)来考虑负荷预测的不确定性。取计算步长  $\Delta C = 1.0\text{MW}$ 。

采用 MATLAB 编程,在主频为  $2.5\text{GHz}$ ,RAM 为  $2\text{GB}$  的计算机上,实现仿真分析。为了方便比较,对该系统算例再采用蒙特卡罗方法进行仿真,两种方法计算的可靠性指标值和计算时间如表 1 所示。

由下表可以看到,本文提出的基于概率序列的含风光系统可靠性评估方法与蒙特卡罗方法的计算结果精度相仿,但是计算消耗时间仅为蒙特卡罗方法的  $1/9$  左右。仿真计算结果说明该评估方法具有精度高、速度快的显著优点。

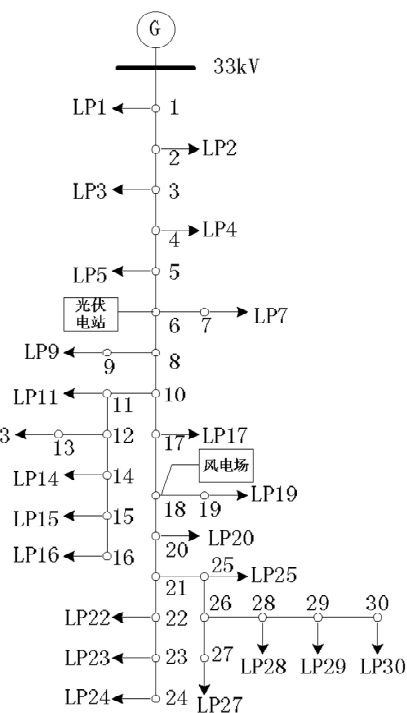


图2 IEEE RBTS BUS6 电网拓扑结构

表1 可靠性指标计算结果和计算时间

方法	LOLP	EENS/MWh	计算时间/s
本文方法	0.010137	60.7509	36
蒙特卡罗法	0.010141	60.7939	332

## 4 总结

本文出于电力系统规划阶段对可靠性评估的精度要求相对不高、时间代价不能太大这两点要求,提出一种基于概率序列的含风光电力系统可靠性评估方法。在 MATLAB 中的仿真计算表明,相对于蒙特卡罗方法,该方法不仅可以保证可靠性分析的计算精度,而且能够显著提高计算速度,大大提高了电力系统规划阶段供电可靠性评估的效率,具有较强的工程实用价值。

### 参考文献:

- [1] 陈闽江. 光伏发电系统的蒙特卡罗序贯仿真和可靠性分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004.
- [2] 吴义纯. 含风电场的电力系统可靠性与规划问题的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- [3] 王成山, 郑海峰, 谢莹华, 等. 计及分布式发电的配电系统随机潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 39-44.
- [4] 康重庆, 夏清, 相年德, 等. 随机生产模拟的序列化分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 8-12.
- [5] 康重庆, 夏清, 徐玮, 等. 电力系统不确定性分析[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [6] Allan R N, Billinton R, Abdel-gawad N M K. The IEEE reliability test system-extensions to and evaluation of the generating system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1986, 1(4): 1-7.

[责任编辑: 朱子]