

# 含光伏电站的电力系统运行风险评估

徐乾宸,王琦,张文祺,姜宁秋,陈良耳,陆斌

(南京师范大学电气与自动化工程学院,江苏 南京 210042)

**[摘要]** 因光伏电站发电具有随机性和不稳定性,并网后可能会带来电网运行风险的问题,且光伏电站的不同运行配置也会给发输电系统带来不同的影响,提出一种基于非序贯蒙特卡罗的风险评估方法对光伏电站接入电网后造成的运行风险进行准确评估和分析. 首先,利用非序贯蒙特卡罗模拟法对太阳光辐照度分布区间进行模拟,建立了光伏电站随机输出模型,然后对整个系统的元件运行状态和光伏电站出力进行随机抽样,进行交直流潮流计算. 其次,结合风险理论,对光伏电站并网运行状态下设定的风险指标进行计算. 最后,以 IEEE-RTS24 节点系统为例,验证该评估方法的可靠性和可行性.

**[关键词]** 光伏电站,运行风险,非序贯蒙特卡罗,风险指标

**[中图分类号]** TM615 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2017)03-0007-08

## Operation Risk Assessment of Power System with Photovoltaic Power Stations

Xu Qianchen, Wang Qi, Zhang Wenqi, Jiang Ningqiu, Chen Lianger, Lu Bin

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** With the randomness and instability of the supply of photovoltaic power station, power grid is likely to have the problem of operational risk when connected to it, and different operations and configurations of the photovoltaic power station also have different influences on the power system. Therefore the paper presents a risk assessment method based on non-sequential Monte Carlo method to perform accurate assessment and analyze the operation risk of the photovoltaic power station on the power system. Firstly, non-sequential Monte Carlo method is used to simulate the solar irradiance distribution and establish the stochastic output model of photovoltaic power station. Then random sampling of the operating states of the whole system and output of the photovoltaic power station are carried out and the AC/DC power flow calculation is carried out and the risk index of power system with photovoltaic power stations is calculated on the basis of the risk theory. Finally, the IEEE-RTS24 system is simulated to verify the reliability and feasibility of the method.

**Key words:** photovoltaic power station, operation risk, non-sequential Monte Carlo, risk index

光伏电站在带来良好的经济效益和环境效益的同时,由于其出力的随机性和稳定性等问题,对电力系统产生了相应的运行风险. 电力系统在正常状态下运行时不会出现切负荷等问题,但是在受到诸如光伏电站并网后出力的波动性和不稳定性等扰动时,往往会出现功率失衡、电压越限和电力不足等问题. 随着光伏电站规模的不断扩大,这些问题愈发明显,严重影响电能质量甚至电力系统的稳定运行. 因此,如何定量地评估光伏电站出力的随机性及系统中元件故障所引发的系统安全稳定风险,根据风险值采取对应的措施降低风险是亟须解决的问题.

电力系统风险评估的研究主要经过传统电网和新能源接入两个评估阶段. 对于传统电网评估阶段,运行风险的研究主要针对的是电力市场环境下的发输电系统、大型电力系统的静态和暂态安全风险<sup>[1-3]</sup>. 但随着新能源的接入,由于其出力的波动性和不稳定性,传统电网的评估方法已经不再适用于新形式下的电网环境. 而对于新形式下新能源接入后的电力系统风险评估,主要包括风力发电和光伏发电两个方面. 对于风力发电,目前研究成果较为显著,文献[4-5]提出了基于分散抽样蒙特卡罗算法的含风电场发输电系统风险评

收稿日期:2016-12-27.

基金项目:江苏省智能电网技术与装备重点实验室课题资助.

通讯联系人:王琦,博士,副教授,研究方向:可再生能源发电技术. E-mail: wangqi@njnu.edu.cn

估方法,进行系统状态判断和指标计算,并给出关于风电接入系统的风险指标.文献[6]提出了一种考虑风电功率误差分布的电力系统改进风险评估方法,较传统评估方法更加精细地计算了系统运行风险.但对于风力发电与光伏发电,它们之间的出力影响因素以及出力特性都存在差别,所以风力发电的风险评估方法并不适用于光伏电站.而对于光伏电站,目前则还处于并网可靠性评估阶段.文献[7]基于序贯蒙特卡罗法建立了光伏电站的发电可靠性评估模型,在此基础上对系统的载峰荷能力进行了研究.文献[8]提出一种新的光伏电站多状态可靠性模型,并基于序贯蒙特卡罗法评估了系统的可靠性.文献[9]提出一种光伏电站多状态转移时序模型,应用序贯蒙特卡罗法评估光伏接入对系统可靠性的影响,并提出一种基于典型天气电站出力的计算光伏提高可靠性性限制的计算方法.综上所述,目前对接入光伏电站的电力系统运行风险进行定量评估的研究较少,多数研究基本还停留在可靠性评估的阶段,并没有真正意义上实现对光伏电站的运行风险进行评估.因此,针对光伏电站并网运行诸多特点而可能对电力系统造成的影响,建立相应的风险指标,进而设计含光伏电站的电力系统风险评估流程具有重要意义.

本文在现有研究基础上,首先建立太阳能辐照度模型和光伏电站出力模型,然后介绍非序贯蒙特卡罗模拟法在电力系统风险评估中的应用,考虑系统中诸如光伏电站出力的间歇性、负荷的波动性、发电机和线路随机故障等因素,建立相关停运模型,并基于风险理念建立节点级的电压越限、电力不足等风险指标,设计含光伏电站的电力系统评估流程.最后,以 IEEE-RTS24 节点系统进行算例分析,计算相关风险指标,对含光伏电站的电力系统的运行风险进行了评估.

## 1 考虑气象因素的光伏电站建模

光伏发电系统的输出功率主要由光照强度决定.光伏发电具有间歇性、随机性的特点,为了准确模拟光伏电站的出力特性,进而对其并网后的运行风险进行评估,需要分别搭建太阳光辐照度和光伏电站出力模型.

### 1.1 太阳能辐照度概率分布模型

文献[10]针对全年天气变化稳定地区,采用了不同的概率分布,对太阳光辐照度模拟,得出正态分布的概率模型较为符合.该数学模型如下

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(r-\mu)^2}{2\sigma^2}}, r \in \mathbf{R}. \quad (1)$$

式中, $r$  为太阳辐照度.

文献[11]基于中国气象科学研究院和中国计量科学研究院的统计数据,按国际规定提供了太阳光辐照度标准数据,与我国大部分区域的气象相符.依据国标提供的数据,查标准正态分布表计算得出,式(1)中的数学期望值  $\mu$  为  $500 \text{ W/m}^2$ ,方差  $\sigma^2$  值为 780.

### 1.2 光伏电站出力模型

光伏电站出力主要与太阳光辐照强度有关.如果一个光伏电站具有  $m$  个电池组件,那么该光伏电站输出功率为

$$P_M = rS\eta_0 \cdot CEE \cdot IE. \quad (2)$$

式中, $r$  为辐照度( $\text{W/m}^2$ ).  $CEE$  为相应的连接效率.  $IE$  为转换效率.  $S$  为光伏阵列的总面积,  $\eta_0$  为电池组件光电转换效率.

公式简化为

$$P_{\text{SOLAR}} = rS\eta. \quad (3)$$

式中, $\eta = \eta_0 \cdot CEE \cdot IE$  为光伏发电系统的总效率.

此外,以下分段函数可近似表示两者的关系.

$$\eta = \begin{cases} \eta_c(S_i/S_k), & 0 \leq S_i \leq S_k, \\ \eta_c, & S_i > S_k. \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\eta_c$  为电池厂家标准条件下测试时的能量转换效率,一般取 15%.  $S_k$  为某一入射光辐照度阈值,一般取  $150 \text{ W/m}^2$ .

## 2 含光伏电站的电力系统运行状态评估

### 2.1 非序贯蒙特卡罗法

非序贯蒙特卡罗模拟法是一种广泛应用于电力系统风险评估的方法,其基本思想是利用元件故障状态之间的独立性,抽样判断出元件状态,从而得出系统的整体状态. 本文利用非序贯蒙特卡罗法,假设一个元件(如发电机、输电线路等)存在工作状态和失效状态,用  $S_i$  表示元件状态,  $P_i$  表示失效概率,则有

$$S_i = \begin{cases} 1(\text{运行状态}), & \text{若 } R_i > P_i, \\ 0(\text{失效状态}), & \text{若 } 0 \leq R_i \leq P_i. \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $R_i$  为区间  $[0,1]$  上抽取的随机数.

因此,对一个含有  $m$  个元件的系统重复抽  $N$  次,可得到系统状态集合  $S = (S_1, S_2, \dots, S_k, \dots, S_l)$ . 其中,一个状态可能出现多次. 当抽取次数  $N$  足够大时,即可近似确定状态  $S_k$  的概率为

$$P(S_k) = \frac{m(S_k)}{N}. \quad (6)$$

式中,  $m(S_k)$  为状态  $S_k$  出现的次数,  $N$  为总抽样次数.

本文将预定的抽样次数作为终止判据. 当模拟结束时,检验方差系数. 若不满足要求,则需增加抽样次数再进行新的抽样.

### 2.2 发电机实时状态概率模型

发电机的状态模型一般有两状态模型和降额状态模型两种.

两状态模型仅有两种状态,为运行状态和停运状态. 发电机运行在额定工况的效率较高,故一般认为该状态下发电机的输出功率即为额定功率,不会发生降额运行. 在进行非序贯蒙特卡罗模拟时,设发电机运行状态为  $S_i$ , 失效概率为  $PF_i$ , 在  $[0,1]$  区间产生均匀分布的随机数  $R_i$ , 使发电机的运行状态具有以下的概率模型.

$$S_i = \begin{cases} 1(\text{运行状态}), & \text{若 } R_i > PF_i, \\ 0(\text{停运状态}), & \text{若 } 0 \leq R_i \leq PF_i. \end{cases} \quad (7)$$

降额状态模型具有多种状态. 假设容量为 300 MW 的发电机发  $[180, 300]$  区间内的多个额定功率值时,发电机的状态概率模型即可认为是降额状态模型. 在多状态蒙特卡罗模拟抽样时,在  $[0,1]$  区间产生均匀分布的随机数  $R_i$ , 那么概率模型为

$$S_i = \begin{cases} 1(\text{运行状态}), & \text{若 } R_i > PF_i + PP_i, \\ 0(\text{停运状态}), & \text{若 } PP_i \leq R_i \leq PF_i + PP_i, \\ 2(\text{降额状态}), & \text{若 } 0 \leq R_i \leq PP_i. \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $PP_i$  为第  $i$  个降额运行的发电机概率.

实际电力系统中发电机可能存在多种运行状态的情况. 因此,本文考虑发电机两状态和降额状态同时存在的情况,对每台发电机的状态依次进行抽样,并选用如下集合  $S$  来模拟发电机实际的状态.

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\} \cup \{S_{n+1}, S_{n+2}, \dots, S_{N_G}\}, \quad n \in N_G. \quad (9)$$

式中,  $N_G$  为发电机的所有台数,  $n$  为两状态运行的发电机台数.

### 2.3 输电线路故障模型

文献[12]综合考虑了机组的运行方式、负荷的实时变化和网络结构的变化等实时运行条件对运行可靠性的影响,给出了元件实时可靠性模型的建模原则,建立了线路的双曲函数模型.

$$F_i(L) = \frac{1}{2} [1 + \tanh(a_i L + b_i)], \quad (L \geq 0). \quad (10)$$

式中,  $L$  为线路  $l$  的潮流,一般取线路传输的视在功率,  $a_i$  和  $b_i$  为待定参数.

考虑线路潮流不在正常允许范围的情形,若大于等于越限上阈值,那么线路的停运概率接近 1, 实际工程计算考虑精度通常取 0.999 99. 考虑线路潮流在正常允许范围,那么线路停运概率为

$$\bar{F}_i = \frac{1}{L_{\max}^{\text{normal}}} \int_0^{L_{\max}^{\text{normal}}} F_i(L) dL. \quad (11)$$

式中,  $L_{\max}^{\text{normal}}$  是线路潮流越限下阈值.

将上述结果代入式(10),用数值积分法求出待定参数  $a_1$  和  $b_1$ ,即可得到基于线路潮流的线路实时故障模型.

## 2.4 负荷概率模型

在蒙特卡罗模拟法常用的有离散模型和连续模型两种. 离散型负荷可用一系列的离散数据如负荷功率和它们对应得概率来描述;连续型负荷则可用正态分布近似描述它们的不确定性,其有功功率和无功功率的概率密度函数分别为

$$f(p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} e^{-\frac{(p-\mu_p)^2}{2\sigma_p^2}}, \quad (12)$$

$$f(q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_q} e^{-\frac{(q-\mu_q)^2}{2\sigma_q^2}}. \quad (13)$$

电力系统在运行过程中存在着不确定性,实际负荷功率是随着时间的变化而变化的,离散型负荷并不能准确反映负荷变化. 将两者进行对比,本文采用连续模型进行模拟.

## 3 含光伏电站的电力系统的风险指标与评估流程

### 3.1 风险理论

电网运行风险评估主要针对扰动事件发生的可能性和后果两方面对系统问题的暴露程度进行分析,其公式可以由公式表述为

$$Risk(X_{t,f}) = \sum_i P_r(E_i) S_{ev}(E_i). \quad (14)$$

式中,  $X_{t,f}$  为  $t$  时刻系统的运行状态,  $E_i$  为在第  $i$  个不确定性风险扰动造成的系统状态,  $P_r(E_i)$  为  $E_i$  系统状态下风险发生的概率,  $S_{ev}(E_i)$  为  $E_i$  系统状态下所造成的损失严重程度.

### 3.2 风险指标

风险定量评估的目的是应对不同的要求,建立表示系统不同风险的风险指标. 风险指标可以存在一个或者多个. 在大多数情况下风险指标就是随机变量的期望值,但是在某些情况下风险指标的概率分布也是可以计算出来的. 此外,期望值是所研究现象的长期平均数字特征,并非是确定性的参数数据.

#### (1) 电压越限

电压越限指标  $PSLV$  是一种越限指标,其表达式为

$$PSLV = \sum_{S_k \in D_{s,v}} P_{S_k} V_{S_k}. \quad (15)$$

式中,  $P_{S_k}$  为系统状态  $S_k$  发生的概率,  $S_k$  为元件  $k$  的系统状态,  $V_{S_k}$  为在系统状态  $S_k$  下的电压越限严重度,  $D_{s,v}$  为系统电压越限状态的集合. 式中,

电压越限严重度  $V_{S_k}$  为

$$V_{S_k} = \sum_i V_{S_{ki}}. \quad (16)$$

假设该节点  $i$  电压为  $V_i$ ,那么节点电压越限严重度函数为

$$V_{S_{ki}} = \begin{cases} 0, & V_i > V_0, \\ (V_i - 1)/(V_0 - 1), & V_i < V_0. \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $V_0$  为系统运行人员可接受的母线运行电压最低值,本文取  $V_0 = 0.95$ .

#### (2) 电力不足期望值 $EDNS$

电力不足期望  $EDNS$  是风险评估中一种充裕性的可靠性指标,其表达式为

$$EDNS = \sum_{S_k \in D_{s,c}} P_{S_k} C_{S_k}. \quad (18)$$

式中,  $P_{S_k}$  为系统状态  $S_k$  的概率,  $S_k$  元件  $k$  的系统状态,  $C_{S_k}$  为系统状态  $S_k$  下的切负荷量,  $D_{s,c}$  为系统失负荷状态的集合.



### (3) 综合风险指标

加权考虑上述两种风险指标,权值分别为 0.22 和 0.78,应用层次分析法计算,其表达式为

$$R_{\text{com}} = \omega_1 V_{S_{\text{fi}}} + \omega_2 EDNS. \quad (19)$$

式中,  $R_{\text{com}}$  为综合风险指标,  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  为权值。

### 3.3 含光伏电站的电力系统风险评估流程

含光伏电站的电力系统风险评估流程大致分为三部分:

(1) 使用非序贯蒙特卡罗模拟法进行随机抽样,判断太阳光的辐照度区间,求出此时光伏电站的出力。

(2) 对于电力系统的所有状态进行非序贯蒙特卡罗随机抽样,判断系统的状态,从而进行系统的交直流潮流计算。

(3) 计算电网风险发生的概率和后果,根据之前设定的风险指标计算电网运行风险指标,从而分析光伏电站并网所造成的影响。

综上所述,使用非序贯蒙特卡罗模拟法进行含光伏电站的电力系统风险评估的计算流程如图 1 所示。

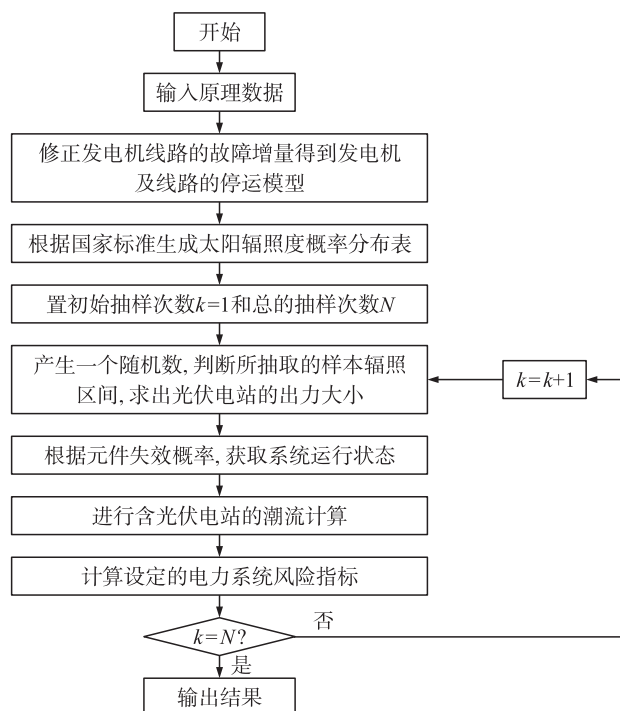


图 1 含光伏电站的电力系统运行风险计算流程图

Fig. 1 Operational risk calculation flow chart of power system with photovoltaic stations

## 4 算例分析

采用 IEEE-RTS24 节点系统为例进行仿真分析(如图 2 如所示)。该系统共有 24 个节点,32 台发电机,38 条支路,5 台变压器。总装机容量 3 405 MW,总负荷 2 850 MW<sup>[13-14]</sup>。

### 4.1 分析方案设计

IEEE-RTS24 节点系统中没有光伏电站,为了对于本模型进行仿真分析,假使一台最大出力 400 MW

的光伏电站,并入节点 21,采用非序贯蒙特卡罗模拟,设置仿真次数为 10 000,计算传统风险指标如电力不足期望值  $EDNS$ 、电压严重度  $V_{S_k}$  和综合风险指标。

依据文献[11]确定的太阳光辐照度的概率密度函数,得出各辐照度区间和各区间的概率,分布如表 1 所示。

表 1 太阳光辐照度分布

Table 1 Solar irradiance distribution

编号 $i$	辐照度区间/(W/m <sup>2</sup> )	概率 $P_i$	$F(x)$
1	(0,50)	0.050 1	0.050 1
2	(50,150)	0.103 5	0.153 6
3	(150,250)	0.103 6	0.257 2
4	(250,500)	0.242 8	0.500 0
5	(500,750)	0.242 8	0.742 8
6	(750,850)	0.103 6	0.846 4
7	(850,950)	0.103 5	0.949 9
8	(950,1 000)	0.050 1	1.000 0

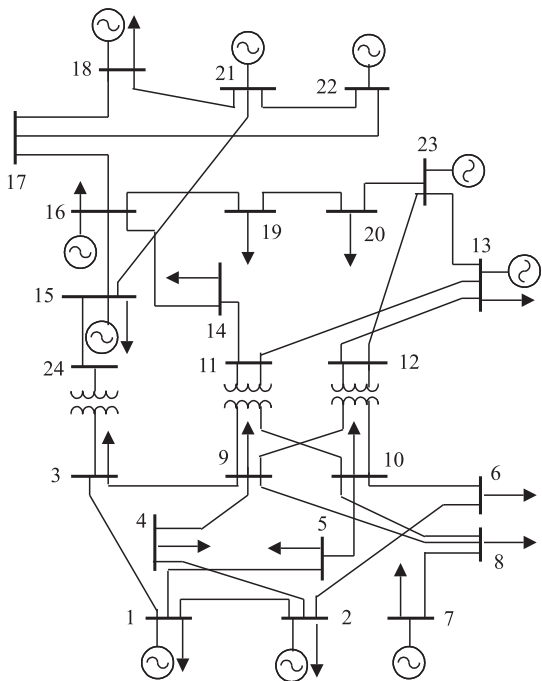


图 2 IEEE-RTS24 系统

Fig. 2 IEEE-RTS24 system

根据评估流程计算,得到各辐照度区间的电力不足期望值指标值如表 2 所示。

表 2 各辐照度区间电力不足期望值风险指标

Table 2 Expected risk index of power shortage for each irradiance interval

辐照度( W/m <sup>2</sup> )	0~50	50~150	150~250	250~500	500~750	750~850	850~950	950~1000
节点 1	0.003 7	0.007 5	0.008 1	0.015 0	0.022 3	0.008 2	0.007 8	0.003 8
节点 2	0.003 6	0.007 3	0.008 0	0.015 0	0.022 3	0.008 1	0.007 7	0.003 8
节点 3	0.005 1	0.010 1	0.010 9	0.020 1	0.030 0	0.029 1	0.010 9	0.006 0
节点 4	0.004 0	0.008 1	0.008 7	0.017 1	0.024 3	0.008 9	0.008 6	0.004 2
节点 5	0.004 4	0.008 6	0.008 9	0.019 6	0.024 9	0.101 7	0.008 6	0.004 2
节点 6	0.000 6	0.010 7	0.010 9	0.022 4	0.031 8	0.011 6	0.010 7	0.005 4
节点 7	0.000 6	0.001 9	0.000 8	0.003 4	0.003 4	0.001 4	0.000 7	0.000 2
节点 8	0.005 0	0.011 2	0.010 4	0.021 3	0.031 2	0.011 5	0.010 0	0.005 0
节点 9	0.004 8	0.010 5	0.011 2	0.021 9	0.031 5	0.011 2	0.010 4	0.005 1
节点 10	0.005 0	0.011 2	0.011 2	0.021 9	0.035 6	0.012 4	0.010 5	0.005 5
节点 13	0.005 0	0.011 6	0.010 9	0.021 8	0.032 1	0.011 0	0.011 3	0.005 7
节点 14	0.004 4	0.009 3	0.010 7	0.019 1	0.027 5	0.009 6	0.009 5	0.004 9
节点 15	0.003 3	0.006 9	0.006 9	0.014 5	0.021 0	0.007 2	0.007 2	0.003 7
节点 16	0.004 1	0.008 3	0.008 5	0.017 8	0.025 3	0.008 8	0.008 9	0.004 5
节点 18	0.005 6	0.011 9	0.011 6	0.024 4	0.035 1	0.012 9	0.012 9	0.006 2
节点 19	0.004 7	0.009 8	0.009 6	0.020 2	0.029 1	0.010 2	0.010 1	0.005 2
节点 20	0.005 0	0.011 1	0.010 5	0.021 4	0.032 8	0.010 6	0.010 7	0.006 0

从表 2 中可以看出,各节点的电力不足 *EDNS* 风险值在太阳光辐照度区间 (500,750) 对比其他区间最大,而在区间 (950,1000) 对比其他区间最小. 这说明,太阳光辐照度处于 (500,750) 区间内对于系统的可靠性影响最大,而处于 (950,1000) 区间内对系统反而最小. 同时,将各辐照度区间各节点 *EDNS* 风险指标值按照一定的权重进行合并,可得各节点电力不足期望值 *EDNS* 风险指标如图 3 所示.

从图 3 可以看出,节点 5 的电力不足 *EDNS* 风险值最大,而节点 7 的 *EDNS* 风险值最小. 这说明,在电力不足 *EDNS* 方面、节点 7 的可靠性程度较大,而节点 5 的可靠性程度则较小. 因此,在太阳光辐照度区间处于 (500,750) 时,应格外关注节点 5. 相反,在太阳光辐照度区间处于 (950,1 000),可以大致忽略节点 7 的影响. 若考虑系统负荷波动,使用非序贯蒙特卡罗模拟法按照评估流程进行计算,得到各节点电压越限风险指标 *PLSV*(如图 4 所示).

从图 4 中可以看出,节点 6 的电压越限风险值最大,而节点 12 的电压越限风险值最小. 这说明,光伏电站并入后,若在负荷波动较大或电力系统突发故障情况下,节点 6 的可靠性程度较小,而节点 12 的可靠性程度较大. 若采用层次分析法进行计算,得到各节点综合风险指标值如图 5 所示.

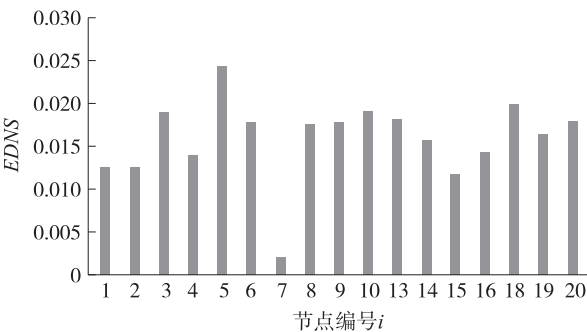


图 3 各节点电力不足期望值风险指标

Fig. 3 Expected risk index of power shortage of each node

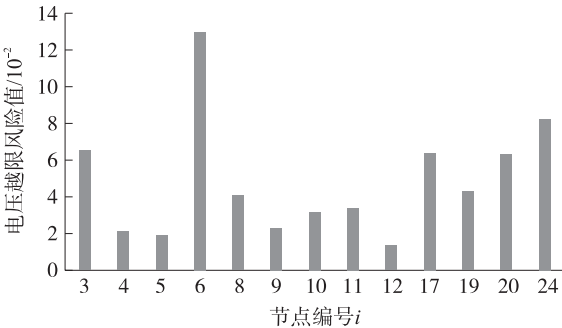


图 4 电压越限风险指标

Fig. 4 Risk index of voltage violation

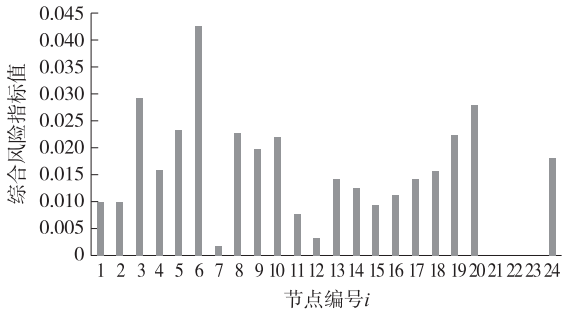


图 5 综合风险指标值

Fig. 5 Comprehensive risk index

从图 5 中可以看出,节点 21、节点 22 和节点 23 的风险值为 0,这说明在环境的恶化或是突发故障状况下对其几乎没有影响. 而节点 6 的风险值为最大,这说明恶劣环境或突发故障对其影响最大,因此需要格外关注.

#### 4.2 考虑光伏电站不同接入容量运行风险对比

分别选择容量为 50 MW、100 MW、150 MW、200 MW、250 MW、300 MW、350 MW、400 MW 并入节点 21,按照前面的流程计算系统的电力不足 *EDNS* 风险指标,电压越限 *PLSV* 风险指标和综合风险指标.

从图 6~8 中可以看出,光伏电站在接入容量不同时,其系统的风险指标也会发生变化. 随着光伏电站容量不断增加,电力不足、电压越限以及综合风险指标都呈现上升的趋势. 这说明在突发故障或恶劣环境情况下,容量越大的光伏电站所受的威胁越大,需要格外关注.

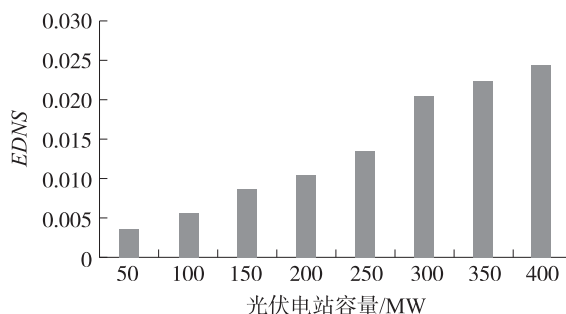


图 6 不同容量下电力不足期望值风险指标对比

Fig. 6 Comparison of expected risk index of power shortage in different capacity

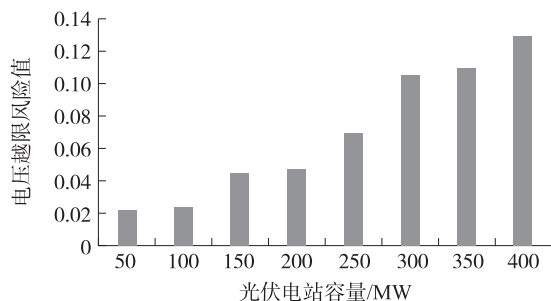


图 7 不同容量下电压越限风险指标对比

Fig. 7 Comparison of risk index of voltage violation in different capacity

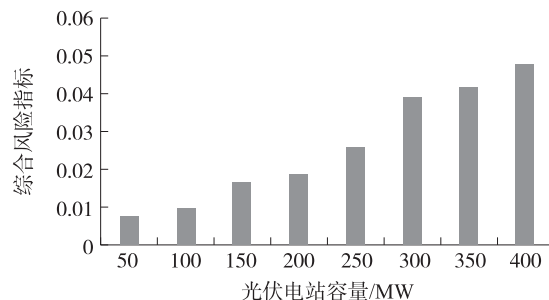


图 8 不同容量下综合风险指标对比

Fig. 8 Comparison of comprehensive risk index in different capacity

## 5 结语

本文主要针对光伏电站接入对于电力系统的运行风险展开研究,对太阳光辐照度模型、光伏电站出力模型、线路故障模型、发电机故障模型以及负荷模型分别进行搭建. 在此基础上,收集各元件以及天气状况历史数据,利用非序贯蒙特卡罗模拟法进行抽样,模拟系统的状态并进行潮流计算,对诸如电力不足期望值 *EDNS*、电压越限风险值 *PLSV* 以及综合指标进行计算,得出气候恶劣或突发故障条件下各节点的风险情况. 基于 IEEE-RTS24 节点系统的算例分析表明,本文所提出的算法可以综合考虑各种诸如元件故障、太阳光辐照度和负荷等随机因素,快速准确地计算含光伏电站的电力系统各风险指标,从而便于电力系统运行规划的人员提前准备相应的措施降低风险,维护电力系统的稳定,满足新形式下光伏电站并网的需求.

#### [参考文献] (References)

- [1] 高燕,康重庆,钟金,等. 发电系统扩展中可靠性的经济价值评估与决策[J]. 中国电机工程学报,2007,27(25): 56-60.  
GAO Y, KANG C Q, ZHONG J, et al. Economic value assessment and determination of reliability in generation and transmission expansion[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(25): 56-60. (in Chinese)
- [2] 张忠会,李玉婷,何乐彰,等. 蒙特卡洛方法在电力系统静态安全风险评估中的应用[J]. 电测与仪表,2015,52(19): 106-111.  
ZHANG Z H, LI Y T, HE L Z, et al. Application of Monte Carlo methods in power system static security risk assessment[J].

- Electrical measurement and instrumentation, 2015, 25(19):106-111. (in Chinese)
- [3] 赵珊珊, 仲悟之, 张东霞, 等. 暂态电压稳定风险评估方法及应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19):1-4.  
ZHANG S S, ZHONG W Z, ZHANG D X, et al. A transient voltage instability risk assessment method and its application[J]. Automation of electric power systems, 2009, 33(19):1-4. (in Chinese)
- [4] 蒋程, 刘文霞, 于雷, 等. 计及风电的发电系统可靠性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(4):7-13.  
JIANG C, LIU W X, YU L, et al. Reliability assessment of power generation system considering wind power penetration[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2013, 25(4):7-13. (in Chinese)
- [5] 蒋程, 刘文霞, 张建华, 等. 含风电接入的发输电系统风险评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2):260-270.  
JIANG C, LIU W X, ZHANG J H, et al. Risk assessment of generation and transmission systems considering wind power penetration[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2014, 29(2):260-270. (in Chinese)
- [6] 黎静华, 左俊军, 汪赛. 大规模风电并网电力系统运行风险评估与分析[J]. 电网技术, 2016, 40(11):3 503-3 513.  
LI J H, ZUO J J, WANG S. Analysis and assessment of operation risk for power system with large-scale wind power integration[J]. Power system technology, 2016, 40(11):3 503-3 513. (in Chinese)
- [7] 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 H Y, BAI X M, MA G. Reliability assessment of grid-integrated solar photovoltaic system[J]. Power system technology, 2012, 36(10):1-5. (in Chinese)
- [8] 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 M, ZHONG X J, ZHANG X S, et al. Reliability analysis of generation systems with photovoltaic stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34):42-49. (in Chinese)
- [9] 杨锡运, 刘玉奇, 张璜, 等. 含并网光伏电站的系统可靠性评估方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(9):2 689-2 696.  
YANG X Y, LIU Y Q, ZHANG H, et al. Reliability evaluation method of grid connected with photovoltaic power station[J]. High voltage engineering, 2016, 42(9):2 689-2 696. (in Chinese)
- [10] 李克煌, 唐志明, 杨瑞霞, 等. 太阳能光伏发电机及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005:10.  
LI K H, TANG Z M, YANG R X, et al. Solar photovoltaic generator and its application[M]. Beijing: Science Press, 2005:10. (in Chinese)
- [11] 中国标准化与信息分类编码研究所, 中国计量科学研究院, 中国气象科学研究院. 太阳能在地面不同接收条件下的太阳光谱辐照度标准: GB/T 17683.1-1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.  
China National Institute of Standardization, China National Institute of Metrology, Chinese Academy of Meteorological Sciences. Solar energy-reference solar spectral irradiance at the ground at different receiving conditions: GB/T 17683.1-1999[S]. Beijing: Standards Press of China, 1999. (in Chinese)
- [12] 程林, 何剑, 孙元章. 线路实时可靠性模型参数对电网运行可靠性评估的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(13):8-13.  
CHENG L, HE J, SUN Y Z. Impact of transmission line's real-time reliability model parameter upon power system operational reliability evaluation[J]. Power system technology, 2006, 30(13):8-13. (in Chinese)
- [13] ALLAN R N, BILLINTON R. A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results[J]. IEEE transactions on power systems, 1991, 6(2):813-821.
- [14] GOEL L, LIANG X. A test system for teaching overall power system reliability assessment[J]. IEEE transactions on power systems, 1996, 11(4):1 670-1 676.

[责任编辑: 陈 庆]