

文章编号:2095-0411(2018)01-0022-06

基于蒙特卡罗模拟的光伏电站运行风险评估

毕海普,雷伟刚,姜晓雨,袁雄军,王凯全

(常州大学 环境与安全工程学院,江苏 常州 213164)

摘要:分布式光伏电站的健康安全运行是实现太阳能广泛应用的重要保障之一。建立了基于蒙特卡罗模拟的动态风险评估方法,确定了影响电站运行输出功率、直流电压、直流电流、温度、风速、瞬间辐射量6个主要评估动态因素,以某分布式光伏电站为例,监测数据拟合得出指标分布函数的A-D检验的 P 值均 <1.5 ,拟合良好;进一步构造动态风险值的IF函数模型计算电站的运行风险,平均值为24.87,89.70%时间都处于正常运行,与实际运行情况吻合;敏感性图和数据得出最大的两个风险影响因素是电压(-0.49)和功率(+0.35),为风险的管理和转移提供依据。基于蒙特卡罗模拟的分布式光伏电站的定量动态风险值分析为评估分布式光伏电站系统的运行状态提供科学依据。

关键词:分布式光伏电站;动态风险评估;蒙特卡罗方法;Crystal Ball软件

中图分类号:X9

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2018.01.004

The Operating Risk Assessment of Photovoltaic Power Station Based on Monte Carlo Simulation

BI Haipu, LEI Weigang, JIANG Xiaoyu, YUAN Xiongjun, WANG Kaiquan

(School of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: The safety operation of distributed photovoltaic power station is one of the major driving factors to achieve the extensive use of solar energy resources. The dynamic risk assessment method was established with output power, voltage, current, temperature, wind and solar radiant quantity as indexes to analyze the operating risk of the distributed photovoltaic power station based on Monte Carlo simulation. The application results of one distributed photovoltaic power station showed that the fitting distribution function matched well with monitoring data as the P value of A-D test was less than 1.5 for each index. Moreover, the average simulated risk based on IF function model was 24.87 with 89.70 percent good running of the studied time, which matched well with monitoring operating situation. It was concluded that the main factors to the operation risk of distributed photovoltaic power

收稿日期:2017-07-17。

基金项目:江苏省高等学校自然科学研究项目(16KJB620001);建筑消防工程技术公安部重点实验室开放课题(KFKT2015ZD03);公安部科技项目(2016JSYJD04)。

作者简介:毕海普(1982—),女,河南南阳人,博士,讲师。通信联系人:王凯全(1950—),E-mail:wkq@cczu.edu.cn

station were voltage (-0.49) and output power ($+0.35$) according to the sensibility graph and data, which could provide reference for the management and transfer of risk. The quantitative analysis of dynamic risk assessment based on Monte Carlo simulation could assist in the monitoring and adjusting suggestion for distributed photovoltaic power station.

Key words: distributed photovoltaic power station; dynamic risk assessment; Monte Carlo method; Crystal Ball

光伏电站的大量建立及广泛推广是实现太阳能充分利用的关键环节,分布式光伏电站主要基于建筑物表面(例如屋顶),近距离解决用户的用电问题,同时通过并网以实现供电差额的弥补与外放。小容量的分布式光伏电站多为无人智能报警监控管理,因此对动态风险的监控和分析更为重要^[1-3]。分布式光伏电站风险评估值取决于指标的选取和指标的表现。在大量光伏电站建立的大背景下,许多国内外学者专家对于如何维护光伏发电系统相继做出了研究并取得了突破。如通过故障树分析进行电压降级及电流情况下的电网可靠性研究,通过统计工具来解释分析历史数据从而研究飓风对于分布式网络的伤害,考虑极端天气(如强风、雷电)的配电系统可靠性评估研究等,分析极端天气条件对电站运行的影响^[4-7]。同时,研究还关注对于电网内的分布式电源进行优化整合可以产生一定益处,如减少电力损耗及优化电压分布^[8-9]。现代高速计算机的出现以及 Crystal Ball 软件的开发,使得这种蒙特卡罗模拟方法(Monte Carlo method)在全球得以推广应用,以概率统计理论为理论基础的数值计算方法,尤其是需要计算某种随机发生事件出现的概率,可以通过事件发生频率来估算该事件的概率,但是目前在工程问题应用中比较少见^[10]。本文拟建立动态评估体系,分析光伏电站设备运行状态,并针对评价结果提出合理的决策建议,为分布式光伏电站敏感因素的设置和运行状态风险实现预警提供定量参数。

1 基于蒙特卡罗模拟的动态风险评估方法

1.1 动态风险评估模型的指标参数

分布式光伏电站的运行风险因素可以事故树来确定,事故树分析是从顶上事件电站的动态风险开始,层层向下分析事故的发生原因,通过对事故树的简化、计算其最小割集,分析其结构重要度发现多数基本事件,基本上都与输出功率、电压、电流、温度、风速、辐射量这几个参数有关,因此以这 6 个典型因素作为对分布式光伏电站运行造成影响的指标参数。

基于实际监测数据,设定相应的范围,然后对每个指标参数进行风险赋值。如常见电压的平均值为 617.804V 直流电,近似取整为 600,选取 $600 \pm 50\text{V}$ 即 550~650V 这一为正常范围且过电压或者低电压可能性较小的区间范围,因此赋最小风险值 5 分;而根据逆变器参数可知,逆变器最小工作电压为 450V,一旦输入电压小于最小工作电压,逆变器是无法工作的,将造成停电故障,因此赋最大风险值 30 分;同时,该逆变器最大输入电压为 850V,因此将大于 850V 判定为过电压,一旦发生过电压时间若不及时处理将有可能造成异常事故,因此赋值 25 分;而 450~550V 和 650~850V 两个范围是有可能造成低电压以及过电压情况的,处于中间量,因此分别赋值 15 分和 10 分。同理得到其他 5 个因素的风险赋值,因素风险赋值见表 1。

1.2 动态风险评估计算模型

应用层次分析法可以最大限度地降低权重计算的主观影响,基于风险评估专家、电站管理和操作等相关人员对风险评估指标因素打分,得出 6 个因素比较矩阵,并经过计算进行一致性检验^[11]。计算结果显示功率(权重 0.40)、电压(权重 0.31)、电流(权重 0.11)、温度(权重 0.06)、风速(权重 0.06)、日照(权重 0.06)的最大特征根 5.0694,一致性比率 0.014<0.1,通过一致性检验。动态风险计算中假设风险值最高为 100,最低为 0,电流因素总占 11 分,电压 31、功率因素分别占 40 分,风速、日照及温度等外部动态环境因素均占 6 分。

基于 Crystall Ball 软件,建立电子表格模型。定义决策变量为 A_2 输出功率、 B_2 直流电流、 C_2 直流电压、 D_2 温度、 E_2 瞬间辐射量、 F_2 风速,预测变量为 G_2 风险值。利用水晶球软件对各动态参数进行拟合分布,并对指标的拟合分布参数进行检验,常用的有卡方检验、柯尔莫格罗夫-斯米尔诺夫(K-S)检验以及安德森-达林(A-D)检验。

预测变量风险值与各决策变量之间的关系以 IF 函数表示为:

$$\text{IF}(C_2>850,25,\text{IF}(C_2>650,10,\text{IF}(C_2>550,5,\text{IF}(C_2>450,25,30))))+\text{IF}(A_2>500,41,\text{IF}(A_2>250,20,\text{IF}(A_2>150,5,\text{IF}(A_2>100,10,30))))+\text{IF}(B_2<250,5,\text{IF}(B_2<400,1,\text{IF}(B_2>588,11,5))))+\text{IF}(D_2<5,6,1)+\text{IF}(E_2<500,6,1)+\text{IF}(F_2<1.5,6,1)。$$

IF 函数的语法结构为 IF(条件,结果 1,结果 2),如果符合条件,显示结果 1,否则,显示结果 2。简单来说,IF 函数是一个判断真假的逻辑函数。

此处 IF 函数的意义是:如果直流电压单元格 C_2 的值大于 850,则属于 >850 的范围,取 25,否则再判断是否大于 650,若大于则属于 650~850 的范围取 10,否则再判断是否大于 550,若大于则属于 550~650 的范围取 5,否则属于 <450 的范围取 30;如果输出功率单元格 A_2 的值大于 500,则属于 >500 的范围,取 41,否则再判断是否大于 250,若大于则属于 250~500 的范围取 20,否则再判断是否大于 150,若大于则属于 150~250 的范围取 5,否则再判断是否都大于 100,若大于 100 属于 100~150 的范围,取 10,否则属于小于 100 的范围取 30;如果直流电流单元格 B_2 的值小于 250,则属于 <250 的范围,取 5,否则再判断是否小于 400,若小于则属于 250~400 的范围取 1,否则属于大于 400 范围,再判断是否大于 588,若大于 588 取 11,否则取 5;如果温度单元格 D_2 小于 5,则取 6,否则取 1;如果瞬间辐射量 E_2 小于 500,则取 6,否则取 1;如果风速 F_2 小于 1.5,则取 6,否则取 1。

2 分布式光伏电站动态风险实例分析

2.1 研究背景

本研究所用发电数据来自山东某 10MW 光伏发电项目,该项目 2015 年 5 月正式投入使用,并网发

表 1 指标因素分级风险赋值表

指标因素	指标值范围	风险赋值
电压/V	550~650	5
	650~850	10
	450~550	15
	≥ 850	25
	≤ 450	30
功率/kW	150~250	5
	100~150	10
	250~500	20
	≤ 100	30
	≥ 500	41
电流/A	250~400	1
	其他	5
	≥ 588	11
温度/℃	≥ 5	1
	< 5	6
风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	≥ 1.5	1
	< 1.5	6
辐射量/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	≥ 500	1
	< 500	6

电,同时实行“自发自用、余电上网”的发电模式,该项目是临沂市有史以来最大的、也是首个升压至 10kV 高压并网的单体屋顶分布式光伏电站,以逆变器 1# 为例,基于 2016 年 2 月份的功率峰值统计剔除 4d 出现异常运行状况,同时逆变器参数中,电网频率为 50/60±4.5 Hz,逆变器数据完全符合。

基于监测数据,对 2 月份各动态参数平均值、极值等作为风险分级评分的参考(见表 2)。

由表 2 所得数据,可作为 2 月各因素风险分级赋值范围的依据。

表 2 分布式光伏电站监测数据表

	功率/kW	电压/V	电流/A	温度/℃	风速/(m·s ⁻¹)	瞬间辐射量/(W·m ⁻²)
均值	200.8	617.804	334.4	6.996	2.144	629.6
最大值	290.2	648	465.6	12.9	4.5	784
最小值	139.2	595.1	224.8	-1.1	0	431

2.2 指标参数分布类型拟合结果与分析

基于监测数据,指标参数分布类型的蒙特卡罗拟合结果如图 1 所示。由于样本数量的限制,相较于要求相当数量数据的卡方检验,本研究选择安德森-达林检验(A-D)来进行排序拟合排名。

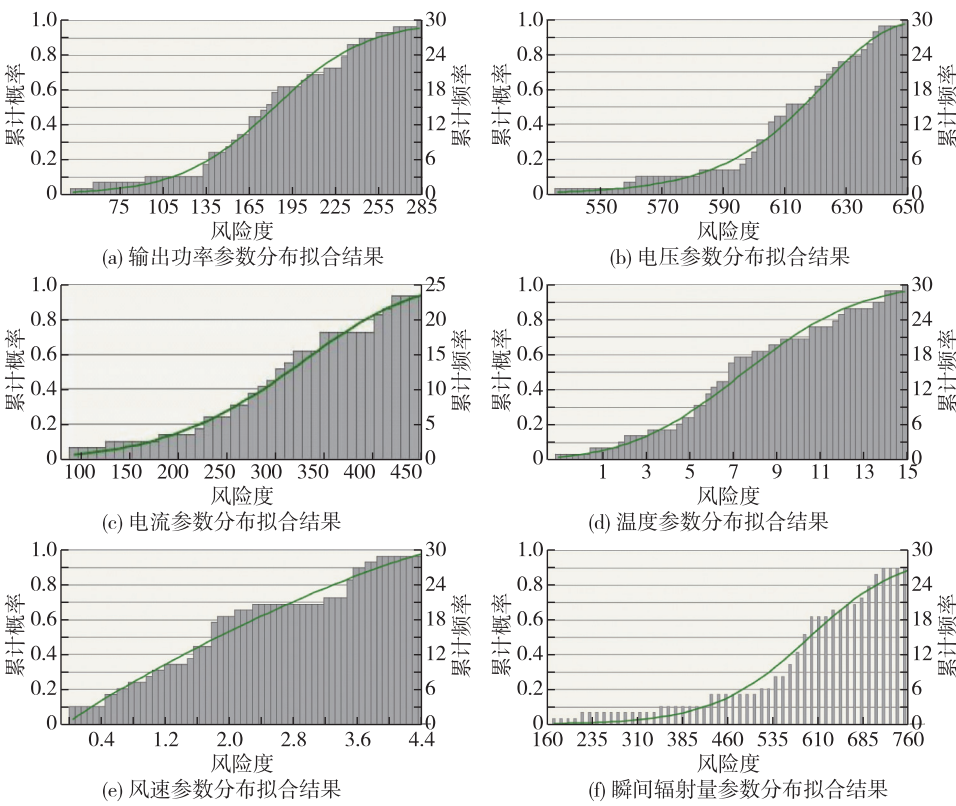


图 1 指标参数分布类型的拟合结果

图 1(a)到图 1(f)分别为输出功率、电压、电流、温度、风速、瞬间辐射量的累计频率拟合结果图,拟合结果显示输出功率拟合度第一的分布类型是逻辑分布,平均值=186.90,标度=32.54,A-D 检验的 P 值为 0.657,一般认为 P 值小于 1.5 表明拟合程度良好;直流电压拟合分布类型结果为最小极值分布,最可能值=621.01,标度=19.62,A-D 检验的 P 值为 $0.724<1.5$;电流拟合分布类型结果为 Weibull

分布,位置 $=-234.76$,标度 $=581.26$,A-D 检验的 P 值为 $0.464 < 1.5$;温度拟合分布类型结果为 Gamma 分布,分布参数为位置 $=-107.05$,标度 $=0.11$,形状 $=999$,A-D 检验的 P 值为 $0.282 < 1.5$;风速拟合分布类型结果为 Beta 分布,最小值 $=-0.05$,最大值 $=4.62$,Alpha $=0.92551$,Beta $=1.223$,A-D 检验的 P 值为 $0.565 < 1.5$;瞬间辐射量拟合分布类型结果为逻辑分布,平均值 $=597.01$,标度 $=80.53$, P 值为 $0.057 < 1.5$,拟合良好。

2.3 动态风险拟合结果与分析

设置预测变量风险值与各指标因素之间的 IF 函数,选择蒙特卡罗随机抽样法,基于模拟次数与均值和标准差的变化来确定合适的模拟次数,选择均值与标准差已趋于稳定状态的4 000作为模拟次数。模拟结果见图 2。

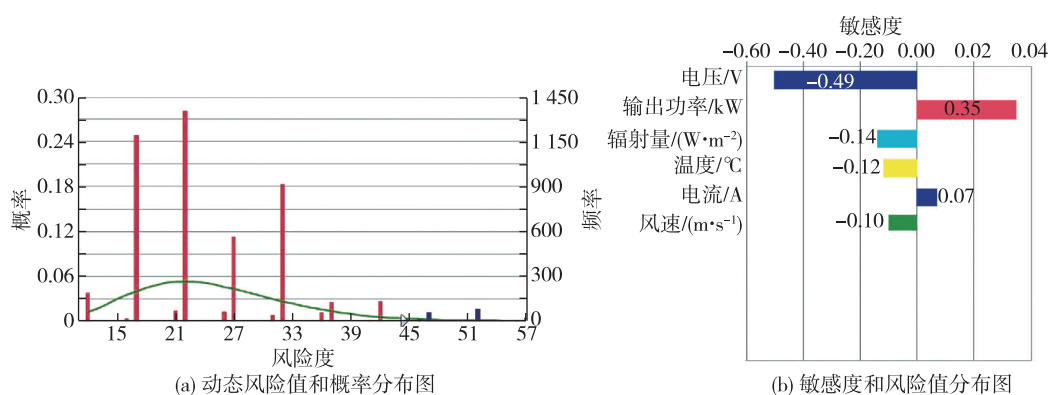


图 2 动态风险拟合结果

图 2(a)显示风险值服从负二项分布,拟合风险值的平均值为 24.87,百分位数为 50%的模拟风险值为 22。基于 2 月异常运行状态点的风险值的计算发现异常点数据风险最小值为 48,最大值 59,可以作为风险衡量的参考数据。参考上下限浮动将风险值范围调整为 45~60,发现确定值变为 3.45%。也就是说 2 月份有 3.45%的可能性,该光伏电站的风险值在异常数据的风险值之间,会出现一些异常的运行故障。风险值为 12~16 之间的比例为 4.08%,属于超低风险,处于高度的安全运行状态,几乎可以说是“绝对安全”,但是分布比例较少。风险值为 17~37 之间的比例高达 89.70%,是分布最多的风险值范围,也是该分布式光伏电站运行风险值最主要的集中范围,处于相对正常的状态,距离绝对安全和运行异常都有一些距离。风险值为 38~45 之间的比例为 2.77%,属于正常运行的范围,但是在这个范围内,若稍不注意,极有可能发展成异常运行,需要建立防御机制和紧急预案来避免事故发生。总的来说,根据对 2 月份的数据进行模拟的结果来看,该分布式光伏电站运行较正常,仅有 3.45%的可能性发生风险值(最大 100)在 45~60 内的小故障,大部分时刻(89.70%)都处于正常运行,且不易发展为运行事故的状态。

图 2(b)是使用等级系数法进行灵敏度分析结果,可知最大的两个风险影响因素是电压和功率。由于电压一旦低于最低工作电压便会导致核心设备逆变器停止工作,电压存在负面影响,因此等级相关为 -0.49 。而输出功率必须大于最低工作功率,否则也会导致出现断电情况,因此等级相关为 $+0.35$ 。而 3 个环境动态因素敏感度大致相同,分别为 -0.14 , -0.12 , -0.10 。分析已定义的动态参数的变量对于分布式光伏电站运行风险的敏感性变化分析,以找到最敏感因素,并以此作为控制电站运行的主要关注因素,转移风险。

3 结 论

建立了基于蒙特卡罗的动态风险评估模型和方法,并基于 Crystal Ball 软件进行了实例仿真模拟,主要结论如下:

1)基于事故树分析发现电站运行动态风险的主要指标因素是输出功率、直流电压、直流电流、温度、风速、瞬间辐射量,确定这6个动态因素为评估分布式光伏电站运行风险系统所考虑的主要因素;层次分析法计算结果显示它们的权重分别为0.40,0.31,0.11,0.06,0.06,0.06。然后基于对指标监测值的分析,确定指标风险值赋值标准,并进一步在水晶球软件中设置IF函数计算和模拟电站动态风险值。

2)应用山东某分布式光伏电站监测大数据对6个指标因素的分布类型进行拟合,计算结果显示6个指标分别符合逻辑分布、最小极值分布、Weibull分布、Gamma分布、Beta分布、逻辑分布,A-D检验的 P 值均 <1.5 ,拟合良好。动态风险模拟结果显示,风险模拟值范围从最小值12到最大值61,风险值服从负二项分布,拟合风险值的平均值为24.87,百分位数为50%的模拟风险值为22;模拟结果该分布式光伏电站运行较正常,仅有3.45%的可能性发生风险值为45~60内的小故障,大部分时刻(89.70%)都处于正常运行,且不易发展为运行事故的状态。等级系数法进行灵敏度分析结果显示最大的两个风险影响因素是电压和功率,等级相关分别为-0.49和+0.35,应作为控制电站运行的主要关注因素。

3)引入 Crystal Ball 软件进行分布式光伏电站运行风险评估,可对不确定性因素导致的分布式光伏电站的运行风险和风险分布进行定量分析,及时了解电站运行状况,并依据评估结果对电站运行进行微调,以确保电站持续的安全平稳运行。

参考文献:

- [1] KUNDUR P, PASERBA J, AJJARAPU V, et al. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions[J]. IEEE Trans Power Syst, 2004, 19(3):1387-1401.
- [2] MCCALLEY J D, XIAO F, JIANG Y, et al. Computation of contingency probabilities for electric transmission decision problems[C]// International Conference on Intelligent Systems Application To Power Systems. Arlington VA, USA: IEEE Xplore, 2005: 540-545.
- [3] 赵争鸣.大容量并网光伏电站技术综述[D].北京:清华大学,2010.
- [4] GUIKEMA S D, QUIRING S M, HAN S R. Prestorm estimation of hurricane damage to electric power distribution systems[J]. Risk Analysis, 2010, 30(12):1744-1752.
- [5] GABBAR H A, ISLAM R, ISHAM M U, et al. Risk-based performance analysis of microgrid topology with distributed energy generation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1):1363-1375.
- [6] ALVEHAG K, SODER L. A reliability model for distribution systems incorporating seasonal variations in severe weather[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2):910-919.
- [7] 植耀玲. 基于蒙特卡洛模拟对雷击风险评估风险值不确定性的探讨[D]. 南京:南京信息工程大学, 2011.
- [8] NIKNAM T, TAHERI S I, AGHAEI J, et al. A modified honey bee mating optimization algorithm for multiobjective placement of renewable energy resources[J]. Applied Energy, 2011, 88(12):4817-4830.
- [9] ROCCHETTA R, LI Y F, ZIO E. Risk assessment and risk-cost optimization of distributed power generation systems considering extreme weather conditions[J]. Reliability Engineering System Safety, 2014, 136(1):47-61.
- [10] 詹姆斯.R.埃文斯.模拟与风险分析[M].上海:上海人民出版社,2001.
- [11] 白雪,耿凯,潘新星,等.层次分析法在农村生活污水处理工艺评价中的应用[J].常州大学学报(自然科学版),2013, 25(3):13-16.

(责任编辑:殷丽莉)