

引用格式: 翟飞龙, 赵兴勇, 郝丽龙, 等. 基于出力预测的光伏系统可靠性分析[J]. 电力科学与技术学报, 2026, 41(2): 190-200.

Citation: ZHAI Feilong, ZHAO Xingyong, HAO Lilong, et al. Reliability analysis of photovoltaic system based on output prediction[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2026, 41(2): 190-200.

基于出力预测的光伏系统可靠性分析

翟飞龙, 赵兴勇, 郝丽龙, 张致毅, 燕强, 文幸

(山西大学电力与建筑学院, 山西太原 030013)

摘要: 为研究光伏系统“双高”现象带来的光伏发电可靠性问题, 提出一种将出力预测与改进蒙特卡洛方法相结合的光伏出力可靠性分析方法。首先, 对光伏历史数据进行出力特征分析与出力预测, 得到光伏出力在不同气象条件下的概率分布。其次, 综合考虑光伏组件的故障率, 建立光伏系统可靠性概率模型。再次, 建立引入自适应采样的蒙特卡洛方法, 评估光伏系统在不同气象条件下的出力可靠性, 并汇总数据, 得到一年的光伏出力可靠性。最后, 通过实际光伏场站数据验证所提分析方法的合理性和有效性。研究结果表明, 所提方法及其可靠性评价体系能较全面地反映光伏电站的出力可靠性。

关键词: 光伏发电; 出力预测; 组件故障率; 蒙特卡洛方法; 可靠性模型

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2026.02.017 中图分类号: TM732 文章编号: 1673-9140(2026)02-0190-11

Reliability analysis of photovoltaic system based on output prediction

ZHAI Feilong, ZHAO Xingyong, HAO Lilong, ZHANG Zhiyi, YAN Qiang, WEN Xing

(School of Electric Power, Civil Engineering and Architecture, Shanxi University, Taiyuan 030013, China)

Abstract: To study the reliability of photovoltaic (PV) power generation in the context of “double high” (i.e., high penetration of renewable energy plus high penetration of power electronics equipment) of PV systems, this paper proposes a method of analyzing the reliability of PV output based on the combination of output prediction and an improved Monte Carlo method. Firstly, output characteristic analysis and output prediction are performed on the PV historical data to obtain the probability distribution of PV output under different meteorological conditions. After that, a probabilistic model of PV system reliability is established by taking into account the failure rate of PV modules. Then, a Monte Carlo method is established by introducing adaptive sampling to assess the output reliability of the PV system under different meteorological conditions. The data are summarized to obtain the annual PV output reliability. Finally, the rationality and validity of the analysis method are verified by the data from actual PV stations. The results demonstrate that the proposed model and reliability evaluation system can correctly and comprehensively reflect the output reliability of PV power stations.

Key words: photovoltaic power generation; output prediction; module failure rate; Monte Carlo method; reliability model

近年来, 中国的光伏发电装机容量逐年增加。随着光伏发电的迅猛发展, 其随机性和波动性对电网的冲击也越来越明显^[1-6]。在部分高渗透率

光伏接入地区, 曾出现过光伏出力骤降导致电网频率波动超过 0.5 Hz, 电压偏差超过额定值的 ±10% 的案例^[7]。为有效评估光伏发电系统对电

收稿日期: 2025-03-03; 修回日期: 2025-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(62473242); 国网山西省电力公司科技项目(52051L230004)

通信作者: 赵兴勇(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事大规模风电及分布式发电并网、智能电网、微电网运行与控制, 电压稳定性等方面的研究; E-mail: shzhxy@163.com

网造成的影响,亟待建立光伏出力可靠性评价模型。

目前,国内外已有一些光伏发电系统可靠性的研究成果,其研究方法主要分为解析法与模拟法两种。其中,解析法采用多状态系统,对系统输出功率进行评估。文献[8]提出了一种基于离散卷积的并网光伏系统可靠性评估方法,该方法考虑了光伏阵列组件的可变可用性对光伏可靠性的影响,但该方法在处理长时间序列数据时,难以捕捉出力的瞬时波动特征。文献[9]根据分布式电源的出力和负荷需求,建立了储能协调运行模型,并在此基础上研究分布式电源出力对各类用户负荷可靠性的影响,但其模型未考虑气象因素的动态变化。文献[10]提出了计及源-网-荷影响的主动配电网可靠性计算方法,较好解决了分布式电源、配网自动化系统与柔性负荷等广泛接入电网后的故障恢复和可靠性计算复杂问题。文献[11]分析了可再生能源、负荷、线路动态热容量和设备故障概率等运行状态变化对系统运行可靠性的影响,但其选用的数据时间跨度较短,仅覆盖了某一气候条件相对稳定的季度,导致其研究结果无法全面反映不同季节、不同气候条件下的光伏发电波动特性对电网的影响。文献[12]基于决策依赖不确定性,分析了设备可靠性指标和系统运行决策变量的关系,但其采用的模型过于简化,未充分考虑光伏组件在实际运行中的老化过程以及不同地区光照、温度、湿度等气象条件的差异对组件性能和故障概率的影响。文献[13]使用聚类算法提取典型的可再生能源出力场景,减少了系统状态数量,提高了解析法的评估效率,但其缺少对不同季节下的能源出力场景的分析与研究。

解析法的优势在于其计算效率高,但这些文献对光伏出力的时序特性刻画存在明显不足,无法反映不同季节、天气下的出力波动规律。目前,以蒙特卡洛方法为代表的模拟法广泛用于光伏系统可靠性评估中^[14-17]。文献[18-19]提出了一种基于时变因素的光伏发电可靠性评估方法,其基于序贯蒙特卡洛方法,建立了系统输出功率的概率模型,进行可靠性评价,但其采样效率随系统规模扩大而显著降低。文献[20-21]将马尔可夫链与蒙特卡洛方法引入到了光伏电站可靠性评估中,提出了相应的基于元件故障的光伏电站可靠性评估模型,但其未量化气象因素对组件故障的影响。文献

[22]提出了利用基于随机扩散过程的蒙特卡罗模拟方法的太阳能光伏发电配电网可靠性预测的模型,但其模型未充分考虑实际运行中复杂多变的电网拓扑结构对光伏出力传输的影响。文献[23]构建了基于影响增量的状态枚举-蒙特卡洛混合评估方法,实现了可靠性评估精度和计算效率的平衡,提高了算法的适用性和灵活性,但其仅研究了单一组件在标准测试条件下的性能表现,缺乏对光伏系统整体生命周期性能的综合考量。文献[24]提出了数据-模型混合驱动的运行可靠性评估方法,其评估效果相较单一模型的有所提高,但其未考虑不同地区光照资源、气象条件、电网特性差异显著。文献[25]采用人工神经网络,对微电网建立出力预测模型,其预测结果优于多元回归时间序列模型的。文献[26-27]根据台风预报信息进行台风灾害模拟,得到各输电线路在台风下的故障概率,生成故障集合。文献[28]提出了一种基于蒙特卡洛方法的配电网概率可靠性快速计算方法,利用改进三点估计法以及三阶多项式正态变换,既保留了输入变量相关性,又有效缩减了输入样本点规模,且其通过级数展开得到概率可靠性,有效提升了电力系统可靠性评估效率。

本文提出一种基于蒙特卡洛方法的光伏出力可靠性模型。先分析光伏发电系统的出力特征并进行出力预测,建立光伏出力模型;再根据光伏组件参数建立组件可靠性模型;然后,构建光伏发电系统 6 状态模型,并提出光伏出力可靠性评价指标;最后,使用引入自适应采样的蒙特卡洛算法,对中国某地的 12 MW 光伏电站进行出力可靠性仿真分析,验证了本文所提方法的可行性与有效性。

1 光伏出力特点分析

1.1 光伏出力特征

光伏发电系统的出力情况会受到环境因素的影响,尤其是光照强度,其对光伏出力往往具有决定性作用。在理想情况下,光伏出力随着太阳光照强度的变化呈先增后降的变化趋势,即光伏出力在中午达到峰值;在没有光照强度的夜间,其值将减小至 0 MW。

在晴天时,正午时分的出力最大值可以达到系统装机容量的 60%,甚至更高,在其他天气条件下,光伏出力则会不同程度地减少。不同天气类型

的光伏出力曲线如图1所示为。从图1中可以看出,不同的天气类型下光伏出力的曲线明显不同。晴天时,光伏出力稳定,光伏出力曲线近似抛物线;多云时,光伏出力较晴天的略有下降;阴天和雨雪天时,光伏出力会显著降低,且伴随较大幅度的波动。不同天气条件的光伏出力可靠性也存在显著差异。

不同天气类型占比见表1。表1中数据源于中国甘肃省某地一年内的气象资料。本文将对这4种不同天气类型下的光伏出力进行预测与光伏出力的可靠性分析,并将数据汇总,得到一年之内光伏出力可靠性水平。

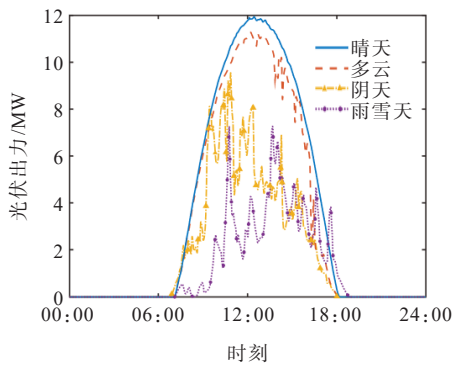


图1 不同天气类型的光伏出力曲线

Figure 1 PV output curves for different weather types

表1 不同天气类型占比

Table 1 Proportions of different weather types

天气类型	天数/d	占比
晴天	113	0.309 6
多云	174	0.476 7
阴天	42	0.115 1
雨雪天	36	0.098 6

1.2 出力预测模型

光伏出力预测通常涉及时间序列信息,这些时间序列信息会在较长时间范围内影响光伏出力结果^[29-30]。因此,本文选用对时间序列数据较为敏感的长短期记忆网络(long-short term memory, LSTM)来进行出力预测。LSTM是一种时间递归神经网络,其内部具有记忆单元。LSTM循环单元结构如图2所示。在图2中, σ 和 \tanh 分别为双极性sigmoid激活函数和双曲正切激活函数; $f_i^{(t)}$ 为 t 时刻第 i 个LSTM单元的遗忘门输出值; $i_i^{(t)}$ 为 t 时刻第 i 个LSTM单元输入门的值; $q_i^{(t)}$ 为 t 时刻第 i 个LSTM单元输出门的值; $x_j^{(t)}$ 为 t 时刻的输入向量; $O_j^{(t-1)}$ 为一个LSTM细胞 $t-1$ 时刻的所有输出; $S_i^{(t-1)}$ 为状态

单元 t 时刻的值。LSTM不仅可捕捉和保留序列中的长期依赖关系,还能通过门机制来控制记忆细胞的状态,增加或删除其中的信息,选择性地记住或忘记过去的信息,得到理想的预测效果。

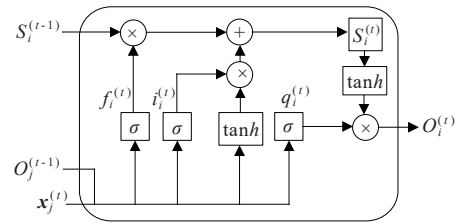


图2 LSTM循环单元结构

Figure 2 Structure of LSTM loop cell

2 可靠性模型建构

2.1 光伏组件故障率

光伏组件的故障率 $\lambda(t)$ 随时间变化的曲线近似浴盆,故称其为浴盆曲线。光伏组件故障率曲线如图3所示。按照使用时间不同,该故障率曲线可分为3个阶段。从图3中可以看出,光伏组件的早期故障率主要是光伏组件刚投入运行产生的,其值较高;之后,光伏组件的故障率会降低,且其值维持一个固定值附近,称该阶段为偶然故障率时期;而当光伏组件运行时间较长后,自身老化等因素导致故障率又开始逐渐增加,这一阶段的故障率被称为损耗故障率。在光伏系统可靠性分析中,一般假定光伏组件处于偶然故障率时期^[31]。

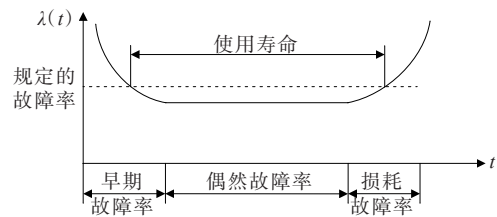


图3 光伏组件故障率曲线

Figure 3 PV module failure rate curve

分布式光伏发电系统主要由光伏阵列、DC/AC逆变器、交流汇流箱与变压器等元器件组成。其结构如图4所示。在图4中,光伏阵列内部由光伏板经串并联构成,其产生的电流先经一个DC/AC逆变器,汇入交流汇流箱中(交流汇流箱中共有 m 个光伏阵列-逆变器组汇入),再经变压器接入交流电网中^[32]。从图4中可以看出,当光伏阵列或逆变器任一组件发生故障时,该组件所在的光伏阵列-逆变器组将停运,输入交流电网的功率

会受影响;当所有光伏组件均故障时,光伏组件将全部停运。

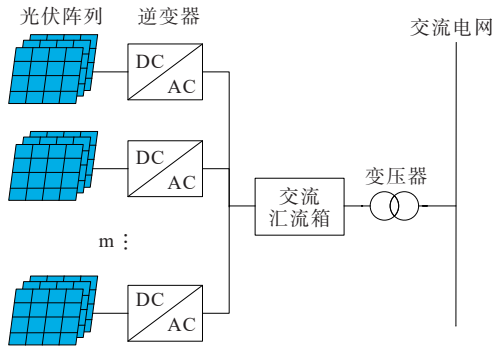


图 4 光伏发电系统结构

Figure 4 Structure of PV power generation system

为计算光伏组件故障率对整个系统造成的影响,设光伏阵列和逆变器的故障率分别为 λ_1 和 λ_2 ,故障修复时间分别为 t_1 和 t_2 ,则故障概率 p_1 和 p_2 可分别表示为

$$\begin{cases} p_1 = \lambda_1 t_1 \\ p_2 = \lambda_2 t_2 \end{cases} \quad (1)$$

单个光伏阵列-逆变器组的故障率 λ_c 、故障修复时间 t_c 和故障概率 p_c 分别为

$$\lambda_c = 1 - (1 - \lambda_1)(1 - \lambda_2) = \lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_1 \lambda_2 \quad (2)$$

$$p_c = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2) = p_1 + p_2 - p_1 p_2 \quad (3)$$

$$t_c = \frac{p_c}{\lambda_c} = \frac{p_1 + p_2 - p_1 p_2}{\lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_1 \lambda_2} \quad (4)$$

2.1.1 组件部分故障

并联组件发生故障的概率相互独立。在 m 个光伏阵列-逆变器组并联接入系统后,当其中有 i 个光伏阵列-逆变器组发生故障时,其故障率 λ_i 、故障修复时间 t_i 和故障概率 p_i 分别为

$$p_i = C_m^i p_c^i (1 - p_c)^{m-i}, i = 1, 2, \dots, m - 1 \quad (5)$$

$$t_i = \frac{t_c}{i}, i = 1, 2, \dots, m - 1 \quad (6)$$

$$\lambda_i = \frac{p_i}{t_i}, i = 1, 2, \dots, m - 1 \quad (7)$$

发生故障的光伏阵列-逆变器组互为相互独立事件,故整个光伏组件的故障率 λ_p 、故障修复时间 t_p 和故障概率 p_p 的分别为

$$\lambda_p = \sum_{i=1}^{m-1} \lambda_i, i = 1, 2, \dots, m - 1 \quad (8)$$

$$p_p = \sum_{i=1}^{m-1} p_i, i = 1, 2, \dots, m - 1 \quad (9)$$

$$t_p = \frac{p_p}{\lambda_p}, i = 1, 2, \dots, m - 1 \quad (10)$$

2.1.2 组件完全故障

当光伏阵列和逆变器发生完全故障时,整个光伏组件的故障率 λ_T 、故障修复时间 t_T 和故障概率 p_T 分别为

$$p_T = p_c^m \quad (11)$$

$$t_T = \frac{t_c}{m} \quad (12)$$

$$\lambda_T = \frac{p_T}{t_T} \quad (13)$$

2.2 可靠性模型

光伏出力下降和光伏组件故障均会导致光伏输入交流电网的功率下降。本文根据光伏发电系统可用性状态,将其分为全额运行、部分减额运行与停运3种状态,并将这3种状态进行组合,得到光伏发电系统的6状态可靠性模型。光伏发电系统可靠性状态划分如图5所示。

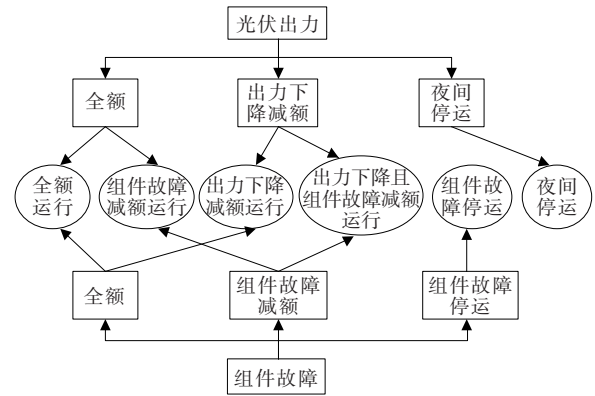


图 5 光伏发电系统可靠性状态划分

Figure 5 Reliability state division of PV power generation system

这6种状态的定义分别如下:

- 1) 全额运行状态。该状态为光伏系统的输出功率达到总装机容量的60%时的状态。
- 2) 出力下降减额运行状态。该状态为光伏出力低于总装机容量的60%的状态。
- 3) 组件故障减额运行状态。该状态为系统输出功率下降的状态。
- 4) 出力下降且组件故障减额运行状态。该状态为光伏出力低于60%的总装机容量,且光伏组件也发生部分故障,导致光伏系统输出功率下降的状态。
- 5) 组件故障停运状态。该状态为光伏组件全部故障或计划检修等导致光伏系统无法对外输出功率的状态。
- 6) 夜间停运状态。该状态为夜间无光照强度

等导致光伏出力为 0 MW,处于停运的状态。

2.3 出力可靠性指标

光伏出力可靠性指标可分为时间指标、输出功率指标和系统运行总体指标。从这 3 个方面定义光伏发电系统的可靠性指标,综合反映系统特性。其中,时间指标和输出功率指标时间尺度为 1 d,系统总体运行指标时间尺度为 1 a。

2.3.1 时间指标

1) 全额运行时间 T_{FR} :系统处于全额运行的时间。

2) 出力下降减额运行时间 T_{RP} :系统仅出力下降导致减额运行的时间。

3) 组件故障减额运行时间 T_{FP} :系统仅组件故障导致减额运行的时间。

4) 出力下降且组件故障减额运行时间 T_{RFP} :系统出力下降和组件故障导致的减额运行的时间。

5) 组件故障停运时间 T_A :所有组件全部发生故障导致的系统停运的时间。

6) 夜间停运时间 T_N :夜间光伏出力为 0 MW 导致的系统停运的时间。

7) 运行时间 T_R :系统处于运行状态的总时间,即

$$T_R = T_{FR} + T_{RP} + T_{FP} + T_{RFP} \quad (14)$$

8) 停运时间 T_O :系统处于停运状态的总时间,即

$$T_O = T_A + T_N \quad (15)$$

2.3.2 输出功率指标

1) 全额运行输出功率 P_{FR} :系统处于全额运行时的输出功率。

2) 出力下降减额运行输出功率 P_{RP} :系统出力下降导致的减额运行时的输出功率。

3) 组件故障减额运行输出功率 P_{FP} :系统组件故障导致的减额运行时的输出功率。

4) 出力下降且组件故障减额输出功率 P_{RFP} :系统同时出力下降和组件故障导致的减额运行时的输出功率。

5) 运行平均输出功率 P_R :系统处于运行状态时的输出功率的平均值,即

$$P_R = \frac{T_{FR}P_{FR} + T_{RP}P_{RP} + T_{FP}P_{FP} + T_{RFP}P_{RFP}}{T_{FR} + T_{RP} + T_{FP} + T_{RFP}} \quad (16)$$

2.3.3 系统运行总体指标

1) 故障率 λ_T 。系统在一定时间内发生完全故障率。

2) 故障修复时间 t_T 。系统发生完全故障后修复所需的时间。

3) 系统总运行时间 T_{RS} 。系统处于运行状态的总时间,即

$$T_{RS} = \sum_{j=1}^4 d_j T_{Rj} \quad (17)$$

式中, d_j 为不同天气类型的天数; T_{Rj} 为系统在不同天气类型的运行总时间,可由式(14)得到。

4) 系统总输出电量 W_{RS} 。系统处于运行状态下的输出电量总和,即

$$W_{RS} = \sum_{j=1}^4 d_j T_{Rj} P_{Rj} \quad (18)$$

式中, d_1 、 d_2 、 d_3 和 d_4 分别为晴天、多云、阴天、雨雪天在一年中的天数; P_{R1} 、 P_{R2} 、 P_{R3} 和 P_{R4} 分别为系统在晴天、多云、阴天与雨雪天这 4 种天气类型的平均输出功率; T_{R1} 、 T_{R2} 、 T_{R3} 、 T_{R4} 分别为系统在晴天、多云、阴天、雨雪天的运行状态总时间。

5) 系统设计可用率 A_a 。 A_a 为根据光伏系统组件发生完全故障的故障率 λ_T 和故障修复时间 t_T 得到的系统处于运行状态的概率,即

$$A_a = 1 - \lambda_T t_T \quad (19)$$

6) 系统实际可用率 A_b 。 A_b 为依据时间指标 T_{RS} 得出的系统处于运行状态的概率,即

$$A_b = \frac{T_{RS}}{T} \quad (20)$$

式中, T 为系统可靠性评估总时间,其值为 8 760 h。

3 可靠性分析方法

3.1 蒙特卡洛方法

蒙特卡洛方法是一种以概率统计理论和方法为基础的数值计算方法,其核心思想是通过大量的随机采样来估计或模拟问题的特征、统计量、概率分布等^[33-34]。蒙特卡洛方法的优势在于其能处理复杂的问题和在高维空间中计算,在对大型系统进行可靠性评估时灵活性较好。该方法不要求解复杂的方程或函数,只利用随机采样和统计分析来近似求解问题。

但蒙特卡洛在计算过程中需要大量的随机采样和计算资源,运行时间较长,计算效率较低。因此,将自适应采样引入到蒙特卡洛算法中,根据计算结果的方差自适应进行采样数量和分布的调整,其具体步骤可分为 5 步。

1) 建立光伏出力模型与组件可靠性模型;

- 2) 对采样数量和分布进行初始化;
- 3) 生成随机样本;
- 4) 根据生成的随机样本计算光伏出力可靠性指标,并计算可靠性指标的方差;
- 5) 判断方差是否达到收敛条件;若满足条件,则输出可靠性指标;否则,自适应调整采样数量和分布。重复上述步骤3)~4),直至满足收敛条件。

引入自适应采样的蒙特卡洛算法流程如图 6 所示。

当出力可靠性指标的方差较大时,可以增加采样数量;而当方差较小时,可以减少采样数量,节省计算资源。

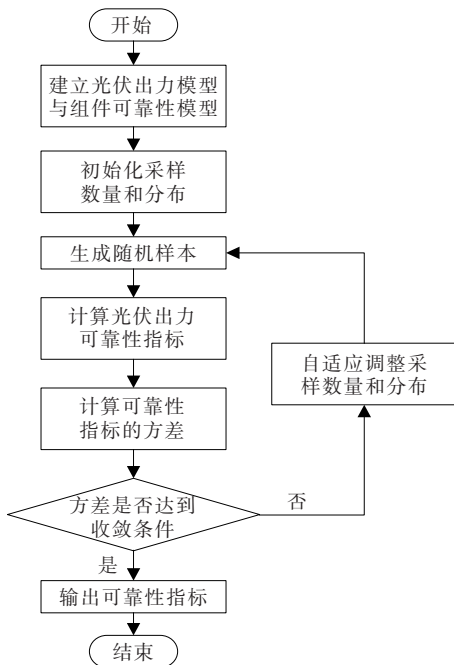


图 6 引入自适应采样的蒙特卡洛算法流程
Figure 6 Flowchart of Monte Carlo algorithm introducing adaptive sampling

3.2 可靠性评估模型

基于蒙特卡洛方法的光伏出力可靠性评估流程如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,光伏出力可靠性评估主要分为 3 部分。

首先,使用光伏气象数据和出力数据对光伏出力进行预测,建立光伏出力模型;其次,根据光伏组件参数,计算光伏组件故障率,对光伏组件可靠性进行建模;最后,将这两个模型进行结合,使用引入自适应采样的蒙特卡洛算法,对光伏出力可靠性进行分析。

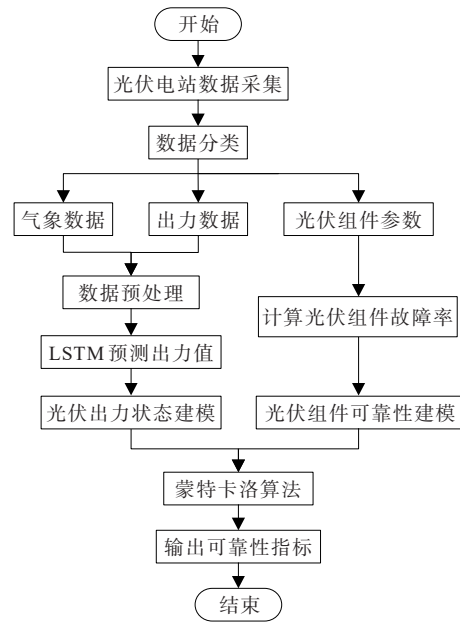


图 7 基于蒙特卡洛方法的光伏出力可靠性评估流程
Figure 7 Flowchart of PV output reliability assessment based on Monte Carlo method

4 算例分析

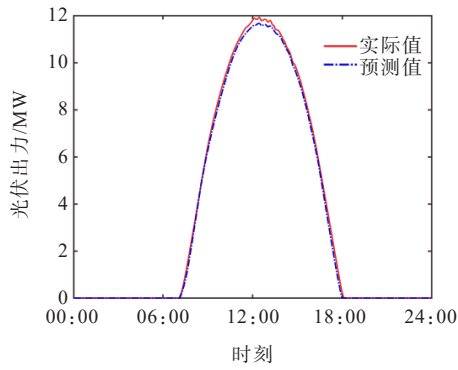
本文采用中国甘肃省某光伏电站作为研究对象。该光伏电站的总装机容量为 12 MW,由 3 个光伏阵列-逆变器组并联组成。光伏组件可靠性参数^[18,20]见表 2。

表 2 光伏组件可靠性参数
Table 2 Reliability parameters of PV modules

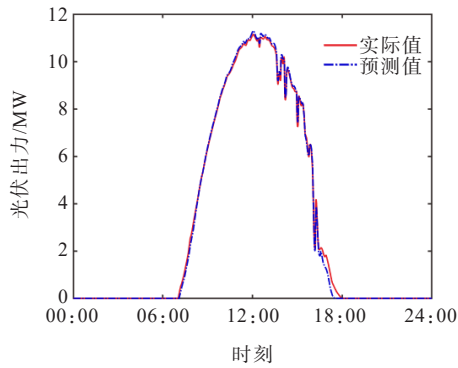
元件	故障率/ (次·年 ⁻¹)	故障修复频率/ (年·次 ⁻¹)	故障概率
光伏阵列	0.304 4	0.028 5	0.008 7
逆变器	3.399 6	0.027 4	0.093 1

4.1 光伏出力预测

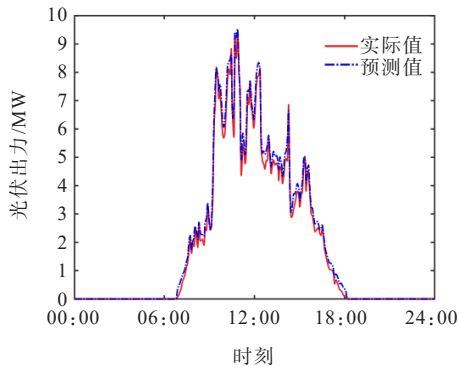
使用 LSTM 预测模型,对不同天气类型下的光伏出力进行预测,结果如图 8 所示。根据文 2.2 对光伏出力的分类,对全额运行状态、出力下降减额运行状态、夜间停运状态这 3 种状态下的光伏出力概率进行计算,得到不同天气类型下的光伏出力概率,结果见表 3。从图 8 中可以看出,光伏出力预测结果与实际值相差不大,光伏出力预测结果能较好地体现光伏出力的实际情况。由表 3 可知,在任何天气类型下,光照强度降为 0 MW 导致的夜间停运状态的概率基本一致;全额运行和出力下降减额运行状态的概率随天气类型的不同而不同。其中,全额运行状态的概率与天气恶劣程度成负相关,天气



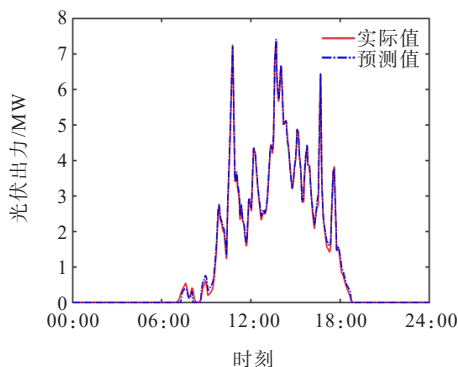
(a)晴天



(b)多云



(c)阴天



(d)雨雪天

图 8 不同天气类型下的光伏出力预测结果

Figure 8 PV output prediction results for different weather types

表 3 光伏出力概率

Table 3 PV output probability table

天气类型	全额运行	出力下降减额运行	夜间停运
晴天	0.274 3	0.177 1	0.548 6
多云	0.243 1	0.194 4	0.562 5
阴天	0.072 9	0.399 3	0.527 8
雨雪天	0.006 9	0.444 5	0.548 6

情况越恶劣,全额运行状态的概率越低;出力下降减额运行状态的概率随天气恶劣程度加重而逐渐提高。

4.2 光伏组件可靠性计算

使用文 2.1 中的式(1)~(13)对光伏组件可靠性进行计算,得到整个光伏组件可靠性数据,结果见表 4。

表 4 光伏组件可靠性计算结果

Table 4 Reliability calculation results of PV modules

组件故障情况	故障率/ (次·年 ⁻¹)	故障修复频率/ (年·次 ⁻¹)	故障概率
部分故障	7.925 8	0.034 4	0.272 4
完全故障	0.081 7	0.012 6	0.001 0

由表 4 可知,光伏组件完全故障的故障率和故障概率均远小于部分故障的故障率和故障概率,光伏组件处于正常状态的概率为 0.7266。

4.3 光伏出力可靠性分析

根据光伏出力预测结果得出的出力概率情况,结合光伏组件的故障概率计算结果,采用引入自适应采样的蒙特卡洛方法对光伏系统对外输出功率进行分析计算,进而对整个光伏系统的出力可靠性进行评价。时间指标结果与输出功率指标结果分别见表 5、6。

由表 5、6 可知,不同天气类型下的出力可靠性指标有较大差异。其中,时间指标主要体现在全额运行时间 T_{FR} 、出力下降减额运行时间 T_{RP} 和组件故障减额运行时间 T_{FP} 这三者上;输出功率指标主要体现在全额运行输出功率 P_{FR} 、组件故障减额运行输出功率 P_{FP} 和运行平均输出功率 P_R 这三者上。

在时间指标中,随着天气情况的恶劣程度加重, T_{FR} 和 T_{FP} 逐渐减小;与此相反的是, T_{RP} 和 T_{RFP} 则随着天气情况恶劣程度的加重而逐渐提高。其中, T_{FR} 随天气类型的变化最明显,阴天和雨雪天的 T_{FR} 分别较晴天的 T_{FR} 下降 73.42% 和 97.47%。但在不

表 5 时间指标结果

Table 5 Results of temporal indicators

评价指标	T_{FR}/h	T_{RP}/h	T_{FP}/h	T_{RFP}/h	T_A/h	T_N/h	T_R/h	T_O/h
晴天	4.783	3.087 8	1.793 5	1.157 9	0.024 7	13.166 7	10.822 2	13.191 4
多云	4.238 1	3.390 5	1.589 2	1.271 4	0.024 7	13.500 0	10.489 2	13.524 7
阴天	1.271 4	6.962 6	0.476 8	2.618 0	0.024 7	12.666 7	11.321 7	12.691 4
雨雪天	0.121 1	7.749 7	0.045 4	2.906 0	0.024 7	13.166 7	10.822 2	13.191 4

表 6 输出功率指标结果

Table 6 Output power index results

评价指标	P_{FR}/MW	P_{RP}/MW	P_{FP}/MW	P_{RFP}/MW	P_R/MW
晴天	10.196 8	3.563 7	7.408 3	2.589 1	7.028 2
多云	10.040 0	3.604 6	7.294 4	2.618 9	6.644 4
阴天	8.145 1	3.456 7	5.917 7	2.511 4	3.868 9
雨雪天	7.290 4	2.705 7	5.296 7	1.965 8	2.569 2

同天气类型下,太阳的光照强度总时间保持不变,故 T_R 和 T_O 相差不大。

在输出功率指标中, P_{FR} 与 T_{FR} 密切相关,故 P_{FR} 也随着天气恶劣程度的严重而不断减小,其余指标则受到光伏出力和组件故障率的共同影响,其结果较 P_{FR} 变化不显著。通过比较 P_R 可全面分析不同天气类型下输出功率:晴天时的 P_R 可达到最大值 7.028 2 MW,而在阴天和雨雪天情况下, P_R 分别降低至 3.868 9 MW 和 2.569 2 MW。

结合时间指标结果和输出功率指标结果,对光伏系统在一年内的运行情况进行模拟计算,得到系

统运行总体指标结果。其中,光伏组件的完全故障率 λ_T 及其修复频率 t_T 分别为 0.081 7 次·年⁻¹ 和 0.012 6 年·次⁻¹。由此可见,光伏系统发生完全故障的概率较低,光伏系统能长期处于正常工作状态。光伏系统的总运行时间 T_{RS} 和总输出电量 W_{RS} 分别为 3 913.128 8 h 和 23 562.162 5 MW·h。在一年评估时间中,每小时的平均输出功率能够达到 6.021 3 MW,约占总装机容量的 50%,发电量及发电功率均较为稳定。该光伏电站的设计可用率 A_a 和实际可用率 A_b 分别为 99.90% 和 44.67%。由表 5 可知,光照强度降为 0 MW 而导致的夜间停运时间 T_N 约为 13 h,光照强度是影响光伏系统可用率的重要因素。

4.4 模型评价

为验证本文所提可靠性评价方法的有效性,使用传统蒙特卡洛方法与本文所提方法进行比较,两种方法的可靠性指标比较结果见表 7,系统运行总体指标比较见表 8。

表 7 两种方法的可靠性指标比较

Table 7 Comparison of reliability indicators of the two methods

	T_{FR}/h				T_R/h			
	晴天	多云	阴天	雨雪天	晴天	多云	阴天	雨雪天
传统蒙特卡洛方法	4.844 1	4.680 8	1.850 6	0.435 4	10.832 2	10.498 9	11.332 2	10.832 2
本文所提方法	4.783 0	4.238 1	1.271 4	0.121 1	10.822 2	10.489 2	11.321 7	10.822 2
	P_{FR}/MW				P_R/MW			
	晴天	多云	阴天	雨雪天	晴天	多云	阴天	雨雪天
传统蒙特卡洛方法	9.791 1	9.423 3	7.552 3	6.604 4	6.681 0	6.316 2	3.677 8	2.442 3
本文所提方法	10.196 8	10.04	8.145 1	7.290 4	7.028 2	6.644 4	3.868 9	2.569 2

表 8 系统运行总体指标比较

Table 8 Comparison of overall indicators of system operation

评价指标	$\lambda_T/(次·年^{-1})$	$t_T/(年·次^{-1})$	T_{RS}/h	$W_{RS}/(MW·h)$	A_a	A_b
传统蒙特卡洛方法	0.079 8	0.011 5	3 916.758 8	22 419.163	0.999 9	0.447 1
本文提出方法	0.081 7	0.012 6	3 913.128 8	23 562.162 5	0.999 0	0.446 7

分析表7、8可知,使用本文所提的引入自适应采样的蒙特卡洛算法进行光伏出力可靠性分析,得到的结果与传统蒙特卡洛方法得到的结果基本一致,这验证了该方法的有效性。

5 结语

为分析研究光伏出力可靠性,本文提出一种引入自适应采样的蒙特卡洛算法,并将光伏出力与光伏组件故障率相结合,得到如下结论:

1) 本文将光伏出力与组件故障率进行结合,根据天气类型分别进行出力可靠性分析,得出可靠性结果,该结果能综合评价光伏发电系统输出功率,更全面地体现光伏出力可靠性。

2) 使用引入自适应采样的蒙特卡洛算法,能在较少次抽样下得到更精确的计算效果,且其收敛速度较传统的蒙特卡洛算法更快,有效提高了可靠性分析的效率。

3) 本文从时间指标、输出功率指标和系统运行总体指标3个方面分析光伏发电系统的可靠性指标,得到的评价结果全面客观,能够综合反映系统的运行特性。

参考文献:

- [1] 魏旭,刘东,高飞,等.双碳目标下考虑源网荷储协同优化运行的新型电力系统发电规划[J].电网技术,2023,47(9):3648-3658.
WEI Xu, LIU Dong, GAO Fei, et al. Generation expansion planning of new power system considering collaborative optimal operation of source-grid-load-storage under carbon peaking and carbon neutrality[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3648-3658.
- [2] 旷嘉庆,汤迪霏,王晗,等.计及光储充的电动汽车充电服务可靠性时序评估[J].电力工程技术,2025,44(6):94-102.
KUANG Jiaqing, TANG Difei, WANG Han, et al. Temporal evaluation of electric vehicle charging services reliability considering photovoltaic-storage-charging integration[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2025, 44(6): 94-102.
- [3] ZHEN Z, LIU J M, ZHANG Z Y, et al. Deep learning based surface irradiance mapping model for solar PV power forecasting using sky image[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(4): 3385-3396.
- [4] 朱然楷,刘书圻,钟士元,等.考虑源荷预测不确定性的电氢融合储能设备配置模型[J].电网与清洁能源,2025,41(4):77-86+96.
ZHU Rankai, LIU Shuqi, ZHONG Shiyuan, et al. Modeling of electric-hydrogen fusion energy storage equipment configuration considering source-load prediction uncertainty[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(4): 77-86+96.
- [5] 刘倩,胡强,杨凌帆,等.基于时间序列的深度学习光伏发电模型研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(19):87-98.
LIU Qian, HU Qiang, YANG Lingfan, et al. Deep learning photovoltaic power generation model based on time series[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 87-98.
- [6] 李敬如,白宇,王旭阳,等.考虑主配协同的分布式光伏接入电网安全经济承载力计算方法[J].电力建设,2025,46(10):113-121.
LI Jingru, BAI Yu, WANG Xuyang, et al. A calculation method for PVs' safe and economic carrying capacity that consider transmission and distributed network coordination[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(10): 113-121.
- [7] 侯恺,刘泽宇,贾宏杰,等.含高比例可再生能源的电力系统运行可靠性解析评估方法综述[J].高电压技术,2023,49(7):2697-2710.
HOU Kai, LIU Zeyu, JIA Hongjie, et al. Review of analytical methods for operation reliability assessment of power systems with high-penetration renewable energy [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2697-2710.
- [8] PANDIT D, NGUYEN N, ELSAIAH S, et al. Analytical assessment of time-varying reliability and penetration limit of PV-integrated systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(6): 6886-6898.
- [9] 苗友忠,李顺昕,雷为民,等.考虑用户负荷类型的含分布式电源的配电网可靠性评估[J].电力科学与技术学报,2020,35(2):93-99.
MIAO Youzhong, LI Shunxin, LEI Weimin, et al. Reliability evaluation of distribution network with distributed generation considering customer sectors[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 93-99.
- [10] 丁健,马春雷,陈宣林,等.计及"源-网-荷"影响的主动配电网可靠性评估[J].电网与清洁能源,2020,36(3):18-26.
DING Jian, MA Chunlei, CHEN Xuanlin, et al. Reliability evaluation of active distribution network considering "supply-grid-load"[J]. Power System and

- Clean Energy, 2020, 36(3): 18-26.
- [11] CHEN X L, TANG J J, LI W Y. Probabilistic operational reliability of composite power systems considering multiple meteorological factors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 85-97.
- [12] HU B, PAN C C, SHAO C Z, et al. Decision-dependent uncertainty modeling in power system operational reliability evaluations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5708-5721.
- [13] YANG W H, CAO M S, GE P J, et al. Risk-oriented renewable energy scenario clustering for power system reliability assessment and tracing[J]. IEEE Access, 2020, 8: 183995-184003.
- [14] KUMAR S, SAKET R K, DHEER D K, et al. Reliability enhancement of electrical power system including impacts of renewable energy sources: a comprehensive review[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(10): 1799-1815.
- [15] 刘庆, 王有军, 张垚, 等. 基于注意力机制的融合式 NCP-DCNN 短期光伏功率预测方法[J]. 智慧电力, 2025, 53(8): 62-69.
LIU Qing, WANG Youjun, ZHANG Yao, et al. Attention mechanism-based integrated NCP-DCNN method for short-term photovoltaic power forecasting[J]. Smart Power, 2025, 53(8): 62-69.
- [16] GENG L, ZHAO Y, LI W Y. Enhanced cross entropy method for composite power system reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3129-3139.
- [17] 邱书琦, 蹇照民, 方立雄, 等. 基于变分模态分解和集成学习的光伏发电预测[J]. 智慧电力, 2024, 52(3): 32-38.
QIU Shuqi, JIAN Zhaomin, FANG Lixiong, et al. Photovoltaic power generation forecasting based on variational modal decomposition and ensemble learning [J]. Smart Power, 2024, 52(3): 32-38.
- [18] 朱林, 韩涛, 董颖华, 等. 基于时变因素的光伏发电系统可靠性评估[J]. 中国电力, 2023, 56(1): 158-165.
ZHU Lin, HAN Tao, DONG Yinghua, et al. Reliability evaluation of photovoltaic system based on time varying factors[J]. Electric Power, 2023, 56(1): 158-165.
- [19] 孟梓睿, 刘雅雯, 巨星. 光伏-压电复合独立供电系统的运行分析[J]. 发电技术, 2024, 45(4): 696-704.
MENG Zirui, LIU Yawen, JU Xing. Operation analysis of a photovoltaic-piezoelectric composite independent power supply system[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(4): 696-704.
- [20] 朱晓荣, 王羽凝, 金绘民, 等. 基于马尔科夫链蒙特卡洛方法的光伏电站可靠性评估[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 1034-1042.
ZHU Xiaorong, WANG Yuning, JIN Huimin, et al. Reliability evaluation of photovoltaic power plant based on Markov chain Monte Carlo method[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 1034-1042.
- [21] 余洋, 钱学尧, 陈晓, 等. 面向 V2G 的电动汽车动态分类及多特征在线聚合方法[J]. 电力工程技术, 2025, 44(6): 37-48.
YU Yang, QIAN Xueyao, CHEN Xiao, et al. Dynamic classification and multi-feature online aggregation method for electric vehicles oriented to V2G[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2025, 44(6): 37-48.
- [22] MANOHAR P, ATLA C R. Development of predictive reliability model of solar photovoltaic system using stochastic diffusion process for distribution system[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2022, 12(1): 279-289.
- [23] LEI Y K, SUN Y G, HOU K, et al. Impact increment based hybrid reliability assessment method for transmission systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(1): 317-328.
- [24] 朱继忠, 骆腾燕, 吴皖莉, 等. 综合能源系统运行可靠性评估评述 II: 数据驱动法与模型-数据混合驱动法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3227-3240.
ZHU Jizhong, LUO Tengyan, WU Wanli, et al. A review of operational reliability assessment of integrated energy systems II: data-driven method and model-data hybrid driven method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3227-3240.
- [25] SABZEHGAR R, AMIRHOSSEINI D Z, RASOULI M. Solar power forecast for a residential smart microgrid based on numerical weather predictions using artificial intelligence methods[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 32: 101629.
- [26] 何俊, 于华, 邓长虹, 等. 极端天气下基于态势感知的重点区域电网负荷供电保障策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1277-1285.
HE Jun, YU Hua, DENG Changhong, et al. Power supply guarantee strategy for key regional power grid load based on situation awareness in extreme weather[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1277-1285.
- [27] 侯慧, 万屹, 王振国, 等. 台风灾害不确定性场景下双层循环风光功率预测[J]. 电力建设, 2025, 46(3): 146-154.
HOU Hui, WAN Yi, WANG Zhenguang, et al. Wind and photovoltaic generation prediction bi-level model based on uncertainty scenarios under typhoon disaster[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(3): 146-154.
- [28] 刘自发, 李颀雨, 于普洋. 一种基于蒙特卡洛方法的配电网概率可靠性快速计算方法[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(2): 9-19.

- LIU Zifa, LI Jieyu, YU Puyang. A fast calculation method for probabilistic reliability of distribution network based on Monte Carlo method[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(2): 9-19.
- [29] 岳大为, 姜毅, 杨明哲, 等. 基于模糊 GO-FLOW 法的并网型微电网可靠性评估[J]. *太阳能学报*, 2025, 46(1): 429-437.
- YUE Dawei, JIANG Yi, YANG Mingzhe, et al. Reliability assessment of grid-connected microgrids based on fuzzy go-flow methodology[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2025, 46(1): 429-437.
- [30] 葛彦硕, 周艳真, 郭庆来, 等. 基于气象协变量注意力和大语言模型的日前光伏出力预测[J]. *中国电力*, 2025, 58(12): 211-222.
- GE Yanshuo, ZHOU Yanzhen, GUO Qinglai, et al. Day-ahead photovoltaic power forecasting based on large language model with meteorological covariate attention [J]. *Electric Power*, 2025, 58(12): 211-222.
- [31] 张波, 高远, 李铁成, 等. 具备无功输出能力的光伏逆变器 IGBT 可靠性分析[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(6): 296-302.
- ZHANG Bo, GAO Yuan, LI Tiecheng, et al. Reliability analysis of igbt for pv inverter with reactive power output capability[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2024, 45(6): 296-302.
- [32] 李宏仲, 王子杰. 考虑柔性负荷响应策略的有源配电网可靠性分析[J]. *现代电力*, 2023, 40(5): 835-843.
- LI Hongzhong, WANG Zijie. Analysis on reliability of active distribution network considering flexible load response strategy[J]. *Modern Electric Power*, 2023, 40(5): 835-843.
- [33] 石蓉, 王雪妍, 陆鑫, 等. 基于改进聚类算法的清洁能源互联网源网荷储协调控制研究[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(7): 134-139+146.
- SHI Rong, WANG Xueyan, LU Xin, et al. A study on the load and storage coordination control of clean energy Internet source network based on improved clustering algorithm[J]. *Advances of Power System & Hydroelectric Engineering*, 2023, 39(7): 134-139+146.
- [34] 黄欣科, 王环, 王一波, 等. N-M 光伏直流变换器串联系统可靠性分析[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(8): 440-448.
- HUANG Xinke, WANG Huan, WANG Yibo, et al. Reliability analysis of n-m pv DC-DC converter series system[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2021, 42(8): 440-448.