

[故障处理]

光伏发电系统电气设备故障处理

文/王妍

山东省建筑设计研究院有限公司

通过对光伏发电系统电气设备的常见故障类型进行深入分析，明确故障原因及其影响机制。利用先进的监测技术和数据分析手段，实现对电气设备运行状态的实时监测与精准诊断。通过构建故障预警模型，在故障发生前及时发出预警信号，避免突发故障对系统稳定运行的影响。实例分析结果表明，采用该方法的光伏发电系统电气设备故障率明显下降，系统稳定性和可靠性得到显著提升。

针对光伏发电系统电气设备在运行期间面临的故障频发与诊断修复效率低下的问题，学术界与工业界共同关注并致力于寻找高效、精准的故障处理方案^[1]。光伏发电作为可再生能源利用的重要方式，其电气设备的稳定运行直接关系到能源转换效率与电网安全^[2-3]。然而，由于环境因素、设备老化及运维管理不善等多重因素，电气设备故障时有发生，严重影响系统整体性能。本文提出一种创新的电气设备故障处理方法^[4-5]。该方法融合物联网监测技术、大数据分析以及人工智能算法，旨在实现对光伏发电系统电气设备的全面监控与智能诊断^[6-7]。通过实时监测设备运行状态，结合历史故障数据与运行参数，构建精准的故障预测模型，以期在故障发生前进行预警，并在故障发生后迅速定位原因，提供科学的修复指导。为验证该方法的有效性，本文将选取实际运行的光伏发电系统进行实例分析。预期通过实例分析，能够直观展示该方法在降低故障率、缩短故障处理时间以及提升系统稳定性方面的显著成效，为光伏发电系统的优化运维提供有力支持。

光伏发电系统的运行状态建模

光伏发电系统的运行状态建模是将实际运行的光伏发电系统抽象为数学模型，以便于对其性能进

行深入分析和优化。这一过程主要涵盖太阳能电池组件、逆变器以及电网连接等关键部分的建模。太阳能电池组件作为系统的核心，其建模通常采用电路模型、物理模型和统计模型。光伏发电系统的核心构成部分主要包括并网变压器、逆变器以及光伏阵列等关键设备。在对其运行特性的描述中，可以将这些设备视为在正常运行与故障停运两种状态之间不断转换的系统元件。为精确刻画这些设备的状态特征，引入状态持续时间的概念，它主要由两部分组成：工作时间与修复时间。工作时间是指设备在正常状态下持续运行的时间长度，而修复时间则是指设备从故障状态修复至正常运行所需的时间。在理论建模中，这两种时间长度均被假定遵循指数分布规律，这一假设基于大量实际数据的统计与分析，能够较为准确地反映设备状态转换的随机性与不确定性。通过对这些时间参数的深入研究，可以进一步优化光伏发电系统的运行与维护策略，提升其整体效能与可靠性。给定元件的故障率 λ 和修复率 μ ，可以量化其性能表现。在故障率 λ 的作用下，元件的正常工作时间呈现出指数衰减的特性，即随时间的推移，元件保持正常工作的概率逐渐降低。相应地，当元件发生故障后，在修复率 μ 的影响下，那么，元件的正常工作时间 T_w 和修复时间 T_r 表示为

$$T_w = -\frac{1}{\lambda} \ln \delta \quad (1)$$

$$T_r = -\frac{1}{\mu} \ln \delta \quad (2)$$

式中， r 为日地距离修正值； δ 为太阳赤纬角；

光伏发电系统的运行状态受多种设备影响，各设备间的运行状态也存在相互影响。为更精确地研究这一系统，可以对关键设备进行分层分析。第一层为并网变压器，它扮演着至关重要的角色，一旦出现故障，在光伏发电系统的运作中，若发生严重故障，整个系统将面临全面停运的风险。系统的故障层次结构清晰可辨，最顶层的故障若发生，将直接导致整个系统停止运行。逆变器层面作为关键组件，逆变器一旦出现故障，其直接关联的光伏阵列与逆变器组合将无法正常工作，这无疑会对系统的整体发电效能造成显著影响。为全面且准确地描绘光伏发电系统的实时运行状态，必须采取科学的方法对这些核心设备进行细致分层抽样。这一过程的实施，通过系统性地监测和记录各设备的运行状态序列，及时发现并解决潜在的故障问题，从而确保光伏发电系统能够持续、稳定地输出电力，满足社会对清洁能源的迫切需求。

光照和温度是影响光伏发电系统出力的重要因素，同时，光伏发电系统各设备的运行状态也是决定其出力情况的关键。由于这两方面的影响彼此独立，可以分别进行考量。光照和温度的变化规律可通过气象数据进行预测，而系统设备的运行状态则可通过设备监测数据进行评估。将这两者综合起来，就能够构建出一个光伏发电系统的多状态时序出力模型。公式为

$$P_{ot} = P_t OSC_t \quad (3)$$

式中， OSC_t 为 t 时刻光伏发电系统的运行状态系数，它是一个介于0和1之间的数值，用于量化描述系统在那一刻的整体运行状态； P_{ot} 为光伏发电系统在 t 时刻经过综合修正后的出力，即考虑了光照、温度以及设备运行状态等多种因素后的实际发电功率。

光伏发电系统电气设备故障处理

光伏发电系统电气设备故障处理是确保系统高效、稳定运行的核心环节，其重要性不言而喻。在

处理这类故障时，需要综合运用多种技术手段，通过精确的诊断、及时的处理以及科学的预防措施，来最大限度地降低故障对系统运行的负面影响。故障处理的关键在于准确识别故障类型与原因。光伏发电系统中的电气设备种类繁多，包括光伏组件、逆变器、电缆、断路器等，每种设备都有其特定的故障模式和原因。因此，在处理故障时，需要借助专业的检测工具和方法，如红外热成像、振动分析、电气测试等，对故障进行精确的定位和诊断。故障检测指标与计算公式见表1。

表1 故障检测指标与计算公式

指标名称	计算公式	描述
故障率 (λ)	$\lambda = \text{故障次数} / \text{运行时间}$	衡量设备发生故障的概率
检测准确率	$\text{准确率} = \text{正确检测次数} / \text{总检测次数}$	评估故障检测方法的可靠性

一旦故障被准确识别，就需要立即启动应急预案，并按照既定的故障处理流程进行修复。故障处理流程通常包括故障定位、原因分析、修复方案制定、修复实施以及修复效果验证等环节。在处理过程中，需要严格遵守操作规程，确保人员安全，同时尽量缩短故障处理时间，以减少对系统运行的影响。除了及时的故障处理外，预防故障的发生同样重要。通过定期的设备维护与保养，可以及时发现并处理潜在故障隐患，从而降低设备故障率，延长设备使用寿命。设备维护周期与内容见表2，为光伏发电系统电气设备的维护提供了参考依据。

表2 设备维护周期与内容

设备名称	维护周期/月	维护内容
光伏组件	3~6	清洁表面，检查接线是否松动，检查裂纹或损坏
逆变器	6~12	检查运行状态，清洁散热系统，检查电气连接
电缆与接头	12	检查绝缘性能，紧固接头，检查是否有磨损或老化
断路器	12	校验动作准确性，清洁触点，检查是否有过热或损坏

当配电网上游馈线遭遇故障情形时，含有光伏发电的部分能够自动与主电网断开连接，进而转入孤岛运行模式，此时光伏发电系统独立为孤岛内的负荷提供电力支持。为高效评估这一复杂情境下的配电网可靠性，本文提出一种创新的评估方法。

该方法首先通过开关装置作为边界来划分配电网络为不同的区域块，以此简化复杂的配电网络结构。除了传统的配电网可靠性评估指标外，本文引入额外的指标，以全面衡量光伏并网对配电网可靠性的影响。这些指标不仅考虑光伏发电系统在正常状态下的供电能力，还深入分析在故障情况下，光伏发电系统作为孤岛运行时对负荷供电的连续性和稳定性。

(1) 系统缺供电量的变化率(ENS)

$$ERS = \frac{ENS_o - ENS}{ENS_o} \quad (4)$$

式中， ENS_o 为光伏系统并网之前配电网的电力缺失量； ENS 为光伏系统并网之后配电网的电力缺失量。

这两个指标分别用于量化评估在光伏系统接入前后，配电网在供电可靠性方面的变化情况。

(2) 孤岛续航成功率 P

在孤岛运行模式下，负荷存在遭遇二次停电的风险，这对电力系统的稳定性和可靠性构成挑战。为准确衡量孤岛运行模式下负荷供电的连续性，本文引入一项关键指标，即孤岛续航成功率 P ，公式为

$$P = C_{gc} / C_{ga} \quad (5)$$

式中， C_{gc} 为孤岛成功维持运行的次数； C_{ga} 为在仿真时间段内孤岛运行出现的频次。

案例分析

本文以IEEE-RBTSBus6系统中的主馈线F4作为研究对象，开展了一次深入的可靠性评估。如图1所示，该馈线涵盖了23个负荷节点、23台配电变压器、30条传输线路、23个熔断器（均设置于各负荷支路的起始端）、4个断路器以及1个分段开关。关于元件的可靠性参数与负荷参数的详细数据。在系统中，变压器、馈线、光伏逆变器以及光伏阵列的故障率（单位为次/年）分别为0.015、0.046、0.353和 1.33×10^{-2} ，而其平均修复时间（单位：小时/次）则分别为200 h、5 h、240 h和250 h。此外，该系统中的光伏阵列被设定安装在地理纬度为 31.52°N 的位置，其平均大气透明度取值为0.7，电池板的倾斜角度被设定为 30° ，且安装方向为正南方，以确保最大程度利用太阳能资源。

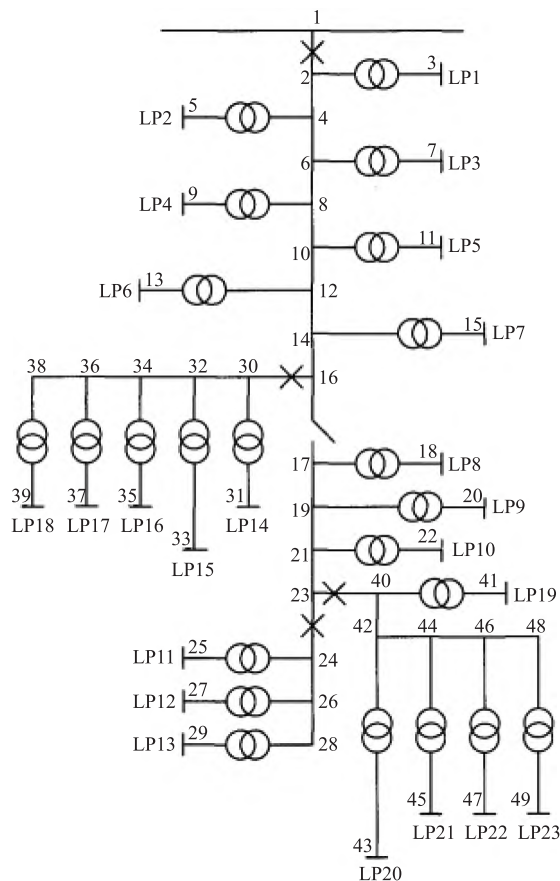


图1 算例网络

本文构建综合性能的光伏发电出力预测模型，以额定装机容量达到2 MW的光伏发电系统作为研究对象。为了深入分析该模型的表现，研究选取了6月份的仿真数据进行细致对比。结果如图2所示，直观展现两种模型在预测光伏发电出力方面的差异。通过对比可以发现，基于复杂因素考虑的综合出力模型，在预测光伏发电系统的实际出力时，与仅考虑基本因素的基本出力模型相比，呈现出明显的预测差异。这种差异不仅体现在预测值的精确度上，还反映在预测曲线与实际出力曲线的贴合度上。

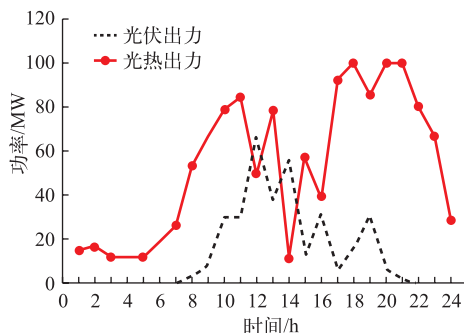


图2 不同模型的出力对比

在发电系统中，光伏发电所占的比例变化对系统的可靠性指标产生了显著影响，如图3所示。光伏发电与柴油机组相比，其出力特性呈现出明显的波动性和间歇性。这种出力特性导致了随着光伏发电系统容量的增加，系统的整体可靠性呈现出下降的趋势。随着光伏发电所占比例的上升，系统平均停电持续时间（SA/DI）和用户平均停电持续时间（CA/DI）均有所增加。这意味着，当光伏发电成为混合发电系统中更重要的组成部分时，系统遭遇停电的可能性增大，且停电的持续时间也会延长。同时，系统缺电量也随之升高，进一步表明系统在面对电力需求时，其供电能力有所下降。当混合发电系统主要依赖柴油机组供电，且光伏发电容量占比较低时，孤岛续航成功率 P 接近100%。然而，当光伏发电所占比例达到60%以上时，孤岛续航成功率 P 大幅下降。这表明，光伏发电的波动性和间歇性对孤岛运行的成功率产生了不利影响，降低了系统在失去外部电源供应时的自我维持能力。

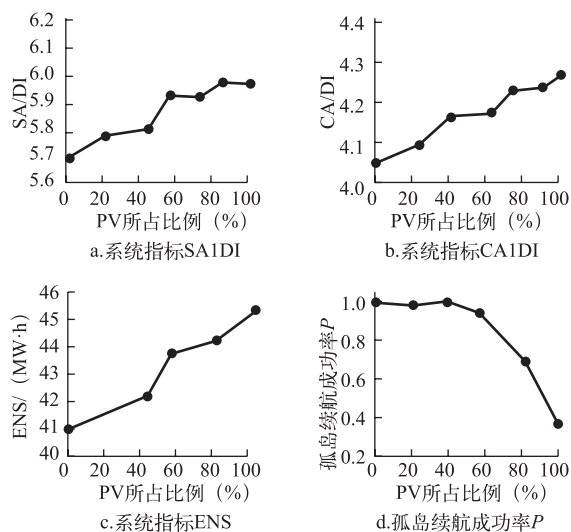


图3 不同PV比例的系统可靠性指标

结束语

光伏发电系统电气设备故障处理一直是确保系

统稳定运行的关键挑战。本研究针对此问题，提出一种创新的故障处理策略，该策略将物联网技术与大数据分析紧密结合，并辅以人工智能算法，形成一套高效、智能的故障预警与诊断体系。通过实时监测电气设备的关键参数，利用大数据分析技术挖掘数据间的潜在联系，该方法能够准确预测设备故障的发生趋势，从而在故障发生前提供及时的预警信息。同时，结合人工智能算法，该方法还能在故障发生后迅速定位故障点，为运维人员提供科学的修复建议，显著提高了故障处理的效率与准确性。实例分析结果表明，采用该故障处理策略的光伏发电系统，在故障预警、故障定位与修复等方面均表现出色，不仅降低系统的故障率，还延长电气设备的使用寿命。EA

(收稿日期：2025-08-25)

参考文献

- [1] 苏本泽. 建筑电气设计中的光伏发电系统研究[J]. 2023(1): 145-147.
- [2] 杨迪. 浅谈光伏发电系统运行的孤岛故障及其检测方法[J]. 百科论坛电子杂志, 2020(9): 1519-1520.
- [3] 唐顺兵, 毛代坤. 光伏发电系统电气设备故障分析及处理措施[J]. 电力设备管理, 2023(23): 68-70.
- [4] 李涛, 赵旭昊, 周腾. 光伏电站电气设备运行维护检修工作的重要性及要点研究[J]. 电力设备管理, 2023(11): 44-46.
- [5] 周盛龙, 常梦星, 杨鹤松, 等. 光伏电站在线监测及故障诊断系统设计[J]. 电气技术与经济, 2024(4): 95-97.
- [6] 陈俊峰. 光伏电站电气设备的运行维护研究[J]. 低碳世界, 2022, 12(9): 148-150.
- [7] 胡继宗. 分布式光伏发电系统电气设计分析[J]. 电力设备管理, 2023(15): 84-86.