

光伏电站故障诊断与健康评估方法研究

赵强平

(冀衡运检新能源(河北)有限公司, 河北 石家庄 050000)

摘 要 光伏电站是新能源发展的重要保障, 它的稳定运行和发电效率关系到整个能源系统的效能。本文就光伏电站的运行特点, 系统研究了故障诊断和健康评估的核心方法, 并且对信号特征分析、模型创建、智能算法应用三个部分进行了详细的阐述, 在此基础上提出了多层级诊断与评价体系。研究内容包括健康指标体系构建、退化建模以及基于数据驱动的评估方法, 以期对光伏电站的状态监控、运维决策及寿命预测有所裨益。

关键词 光伏电站; 故障诊断; 健康评估; 智能算法

中图分类号: TM615

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.015

0 引言

伴随全球能源结构的转型以及“双碳”目标推进, 光伏电站在新能源体系当中占据极为关键的地位。但是光伏电站的运行环境比较复杂, 设备长期处于高温、风沙、湿度变化等复杂环境因素的影响下, 导致组件衰减、逆变器故障、系统性能降低等问题经常发生。高效的故障诊断和健康评定技术已经成为保证光伏电站安全, 稳定并高效运转的主要手段, 经过融合多种数据源信息, 并采用智能算法形成模型以及做出状态预测分析后, 对设备运行状况加以识别判定并对其使用寿命予以评估, 为电站的运维决策提供参考, 推进光伏发电向着智能化和可持续方向发展。

1 光伏电站系统构成和故障特征分析

1.1 光伏电站系统构成

光伏电站主要包括光伏组件、汇流装置、逆变系统、升压及输电设备和监控与运维系统等, 如图 1 所示。

光伏组件是光伏发电站的关键部分, 它的质量好坏直接影响发电效果, 并且会受到光强、气温变化以及外界污染物遮挡等自然条件的影响。汇流装置把多个组件串并联后的电流收集起来, 然后传输。需要有良好的电气匹配和过流保护特性。逆变器将组件产生的直流电转换成交流电, 其工作稳定性和转换效率决定了发电站的输出品质。升压设备把电能输进电网, 要有较强的电压调节能力和绝缘能力^[1]。监控系统针对电站的运行参数展开及时收集和数据分析, 做到对功率、温度、电压、电流这些关键指标的监测, 支撑智能运维和状态评判。各个部分相互联系, 任何一个环节性能下降都会造成整体的效率损失以及安全问题, 所以从系统的角度出发去优化以及协调管理就成为光伏电站的研究方向。

1.2 光伏电站故障特征分析

光伏电站在长时间运行过程中会产生各类故障, 其表现出的特性也存在复杂性和时变性。在光伏组件

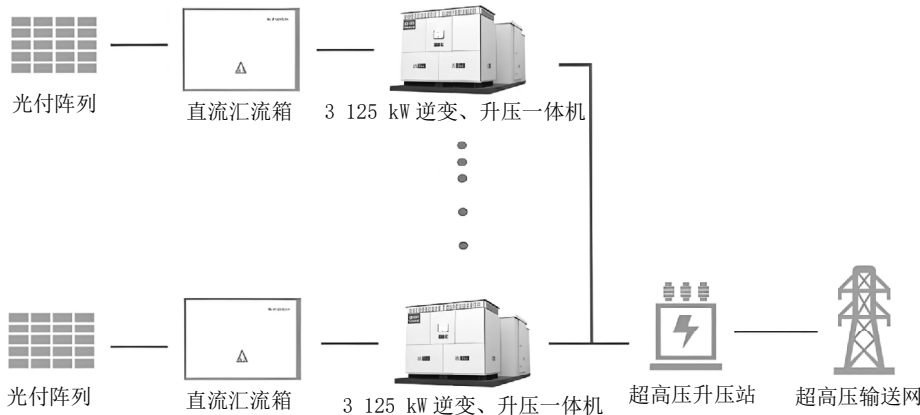


图 1 光伏电站系统

上常见的故障有隐裂、热斑现象、焊点脱落、封装老化以及光衰减等。这些故障的发生会导致输出功率降低、电压波动以及局部温升异常等情况出现。

逆变器故障包含功率模块损坏、控制单元失效、直流侧电压不平衡等现象,并且伴随着频率漂移和谐波畸变^[2]。电缆和汇流装置会发生接触电阻变大、绝缘老化、连接松动等现象,造成能量传输的损失或者安全风险。外部环境的因素如灰尘、鸟粪以及气候的变化会对系统输出的稳定性造成明显的影响。故障的特征一般反映在电压、电流、功率、温度等参数上的动态波动中,体现出非线性、耦合性和随机性特点,要通过多维监控数据和智能算法来加以辨识和提取,达到准确判断出电站工作状况的目的,并提前发出警报。

除了上述提到的组件、逆变器、电缆和汇流装置等故障,设备老化也是一个重要因素,长期运行下的逐渐磨损和环境影响可能导致性能下降。例如:电池板表面的尘土或污垢堆积,可能降低光伏组件的光照吸收效率,导致功率输出下降。因此,故障预测和监控尤其重要,能在早期发现问题并进行及时处理,避免大范围的停机或设备损坏,提高系统的可靠性和运行效率。

2 光伏电站故障诊断方法

2.1 基于信号特征的故障诊断方法

基于信号特征的故障诊断方法属于光伏电站运行监测的传统技术路线,依靠对电压、电流、功率、频率、温度等信号的时域和频域特性进行分析,找出设备运行状态出现异常的情况^[3]。其主要方法是提取出能够反映系统故障的指标,并对这些指标的变化情况利用数学模型来加以判定。

针对光伏组件而言,可以通过输出电流波形、I-V 曲线以及功率曲线的变动来判断是否存在隐裂、热斑或者遮挡等状况。在逆变器方面,则可凭借输出电流畸变率、谐波分布以及直流母线电压波动特征识别出功率模块或控制单元出现故障的情形。

信号处理常用的方法有快速傅里叶变换(FFT)、小波包分解(WPD)、经验模态分解(EMD)等,它们用来把复杂的信号拆解出来,找到里面包含故障的那些特征成分。测量技术发展之后,多传感器融合给特征提取带来了更高的分辨率和准确度,使系统能在较早时察觉到细微的故障。该类方法结构清晰、可解释性好,适合电站日常运行监测和历史数据的分析,在复杂工况下对噪声干扰比较敏感,对于特征选择和阈值设置的要求比较高,因此在智能化光伏系统中常被

用作基础层的诊断方法,与后面的算法模型结合使用来提高识别准确性。

2.2 基于模型的故障诊断方法

基于模型的故障诊断方法是以光伏电站的物理或数学模型作为基础,在建立起系统的输入输出关系后,根据实际运行数据以及模型预测值之间的偏差来判断系统当前是否存在故障^[4]。它的理论依据为系统建模和残差分析,在对残差大小、方向以及统计特性进行分析的基础上定位出故障位置,并判断故障类型。

光伏组件一般用单二极管模型或者改进的等效电路模型来表示不同的光照、温度条件下组件的电性能。逆变器模型是根据功率电子控制原理和 PWM 调制特性建立的,用于监测功率变换过程中的故障。典型办法就是卡尔曼滤波法、粒子滤波法、滑模观测器以及基于状态空间的故障估计技术等,这类方法能够将系统内部状态转化为可观测状态,在理论上具有较高的诊断准确率和实时性。其关键是模型精度和参数识别能力,精度高的模型可以很好地将外部扰动与设备故障区分开来,减少误判。

随着计算能力的提高以及数据获取的方便性,模型自适应更新成为一种趋势。当环境条件发生变化时,它能自动调整参数,使诊断模型具有有效性和稳定性,适用于复杂电站系统的准确故障识别。

2.3 基于智能算法的故障诊断方法

基于智能算法的故障诊断依靠人工智能、大数据等技术,使用光伏电站在多维运行中实现自主学习及适应性识别状态。这种办法脱离了对准确物理模型的依赖,依靠算法对数据中潜藏规律的挖掘来实现复杂故障的辨识与归类。

在实际运用当中用到较多的机器学习方法有 SVM、随机森林、K 近邻法以及决策树等,用来建立多类故障分类模型,并且可以有不错的预测能力和可解释性。随着深度学习技术的发展,卷积神经网络(CNN)、长短期记忆网络(LSTM)及自注意力机制已经被广泛应用于光伏故障诊断中,能够在高维信号中自动提取多层次特征表示,并完成故障特征高精度模型的构建。对有明显时序特征的数据,LSTM 可以捕捉到时间上的相关性,有效发现早期的衰退趋势;CNN 在空间特征提取上有着良好的表现,适合用于元件阵列图或者热成像检测中。近几年融合学习多模态诊断,融合电气信号、环境数据和红外图像,形成端到端智能诊断框架,改进对复杂故障的识别能力。此方法具有较高的鲁棒性及自动化水平,在大规模光伏电站智能监测与运维决策场景中很合适。

3 光伏电站健康评估方法

3.1 基于健康指标体系的评估方法

光伏电站健康评估的重点是创建一套科学合理健康的评价标准,以描述整个系统的工作状况。评价标准应该包含组件性能、逆变系统稳定性、环境适应能力以及能量转换效果等方面^[5]。首先应该监测光伏组件输出功率保持率、填充因子、温度系数和 I-V 曲线形态等主要数据,并利用统计学方法来判定其衰退的趋势。逆变器健康状况可以通过电能质量指标、谐波畸变率、功率因数、运行温度稳定性来进行判断,判定电力电子器件的老化情况。环境指标应该考虑辐照强度、温度、湿度、风速和灰尘沉积等因素对外界设备性能的影响,用加权因子模型量化外界条件对系统健康状况的影响效果。确立了指标体系之后就可以使用层次分析法或者模糊综合评价法来计算各个指标的权重,然后构建出综合健康评分模型。数据采集阶段要配备高精度传感器以及远程监测装置,完成重要信息的即时传送与动态刷新。为了使评价结果具有较高的可信度,在对数据异常情况进行识别、纠正的同时,也要采取相应的措施来减少噪声干扰引起的误差。多维度的指标相融合并进行相应的权重调整之后,形成一个综合健康的指数,用来反映光伏发电站的当前工作状况,并作为后续维护和决策时的参考。

3.2 基于退化建模的健康评估方法

退化建模健康评价方法旨在刻画光伏电站关键组件的性能衰减状况,以实现了对设备寿命的估算和运行可靠性评估。

首先,建立光伏组件和逆变器退化模型,光伏组件退化可以采用指数衰减模型、对数线性模型以及考虑物理机理的热失效模型描述功率输出随时间变化的趋势;光伏逆变器退化可采用可靠性统计模型或者状态空间模型等来反映功率半导体器件老化、焊点疲劳和热应力积累效应。其次,在建模时要清除历史运行数据中所含的环境扰动造成的非真实衰退变化,并对其标准化及特征提取。为了提高预测精度,可以使用贝叶斯推断、最小二乘估计来对参数进行识别,并通过滑动窗口的方法不断更新模型的参数,使模型能够适应环境的变化。针对多维特征退化过程可以使用多变量回归或者主成分分析来提取主要退化特征,在寿命预测阶段,可以利用退化模型求解出健康度曲线和剩余使用寿命(RUL),并且可以用置信区间的办法来量化预测的不确定度。为了提高稳定性,可以将退化模型与实时监测数据融合起来,利用加权融合算法对退化模型的输出进行修正,实现持续的健康评估

和趋势预测。这种做法能为光伏电站制定预防性维修计划,优化运营维护时段提供数据支持。

3.3 基于数据驱动的健康评估方法

数据驱动健康评估方法借助大量运行数据与智能算法,挖掘出多维数据特征,对光伏电站的健康状况进行动态评价。构建全站实时数据采集与管理平台,集成组件、逆变器、气象、输电等各环节的监测数据,建立高维特征数据库。对数据进行预处理,如清洗、去噪、标准化和修补缺失值等步骤,在这一阶段之后的模型输入需要稳定。在健康建模的过程中,可以利用机器学习的方法来进行特征选择以及健康状态划分的工作。随机森林被用来辨别关键的影响因子部分,而支持向量回归则是构建健康指数预测模型的一种方式。利用深度学习技术可以获取复杂的非线性特性,卷积神经网络适用于光伏阵列红外图像异常情况的判别,长短期记忆网络具有获得运行数据间时序相关性的能力,实现健康状况的实时判断。模型训练应基于多时段、多工况数据集,通过交叉验证、模型集成以提高泛化性能,用特征重要性或 SHAP 值的方法来增加可解释性,揭示出不同因素对健康状态的影响程度。用健康指数或风险等级来表达系统的状况,并设定分级预警,完成自动预警和状态趋势跟踪。融合边缘计算、云端分析,采用分布式评估架构,可对大规模光伏电站实行智能健康管理和决策优化。

4 结束语

光伏电站的故障诊断与健康评估是实现智能化运维、高效发电的重要环节,未来的相关研究应该在高维数据融合、模型自适应更新及算法可解释性等方面进一步深入,使评估方法向着实时化、自学习方向发展。随着人工智能、物联网和数字孪生技术不断发展,光伏电站的运作管理会越来越精确、可靠且高效,为清洁能源系统持续发展提供强有力的技术支持。

参考文献:

- [1] 张泽成,张宗旭,王家坤,等.光伏电站智慧型监控管理系统的探索[J].自动化博览,2024,41(08):76-81.
- [2] 隋晓东.光伏电站电气设备运行维护检修方法创新探索[J].电气时代,2024(08):63-65.
- [3] 张锐,马铭遥,马文婷,等.基于数据驱动的山地电站光伏组串融合模型[J].太阳能学报,2024,45(07):517-524.
- [4] 郭峰,郑主平,杨维湘,等.光伏电站发电支路故障点快速定位技术研究[J].价值工程,2024,43(21):115-118.
- [5] 陈翔宇.云计算在分布式光伏电站运营中的应用研究[J].电气技术与经济,2024(07):16-18.