

光伏发电系统中电气设备的故障诊断与维护技术

代忠铭

国华爱依斯(黄骅)风电有限公司 河北省沧州市 061100

摘要: 本文系统研究光伏发电系统中电气设备的故障诊断与维护技术。详细分析逆变器、变压器、线缆等常见电气设备的故障类型及成因,阐述基于电气参数分析、红外热成像、振动监测等多种故障诊断方法,并结合少量关键公式辅助说明。同时,深入探讨预防性维护、状态检修等维护技术及配套管理措施,旨在提升电气设备运行可靠性,降低故障风险,提高光伏发电系统的整体效益,为光伏产业可持续发展提供有力的技术支撑。

关键词: 光伏发电系统; 电气设备; 故障诊断; 维护技术; 状态检修

引言

在全球能源危机与环境问题日益严峻的背景下,光伏发电作为清洁能源的重要组成部分,凭借其清洁无污染、可再生等优势,在能源领域的地位愈发重要。然而,由于电气设备长期暴露在复杂多变的户外环境中,如高温、高湿、风沙、雷电等,同时还受到设备自身老化、制造工艺缺陷以及操作不当等因素影响,故障问题频发。据统计,电气设备故障可使光伏发电系统发电效率降低 15% - 30%,严重时甚至会引发火灾、爆炸等重大安全事故,造成巨大的经济损失和社会影响。因此,深入研究光伏发电系统中电气设备的故障诊断与维护技术,及时、准确地发现和排除设备故障,对于保障光伏发电系统安全、稳定、高效运行,推动光伏产业健康可持续发展具有重要的现实意义。

1 光伏发电系统电气设备常见故障类型

1.1 逆变器故障

逆变器是光伏发电系统中将直流电转换为交流电的核心设备,其故障对系统发电效率和稳定性影响显著。常见的逆变器故障包括功率器件故障、控制电路故障和散热系统故障。

功率器件如 IGBT 模块在长期运行过程中,由于电流、电压波动以及散热不良,容易出现过热、短路等问题。当 IGBT 模块导通和关断时,会产生功率损耗,其功率损耗 P_{loss} 与电流、电压、导通时间等因素相关。控制电路负责对逆变器的运行进行监测和控制,一旦控制芯片损坏、电路板元件老化或焊点松动,就会导致逆变器输出电压、频率不稳定,甚至无法启动。散热系统故障同样不容忽视,逆变器工作时产生大量热量,若散热风扇损坏、散热片堵塞,会使

内部温度过高,触发过热保护,降低逆变器使用寿命,严重时造成设备损坏。

1.2 变压器故障

变压器在光伏发电系统中承担着电压变换和电能传输的重要任务,其故障类型主要有绕组故障、铁芯故障和分接开关故障。绕组故障包括绕组短路、断路和匝间绝缘损坏等。当绕组发生短路时,根据欧姆定律 $I = \frac{U}{R}$ (其中 I 为电流, U 为电压, R 为电阻),由于短路处电阻极小,会导致电流急剧增大,使绕组发热,严重时烧毁变压器。铁芯故障主要表现为铁芯过热和接地不良。铁芯硅钢片之间的绝缘损坏会导致涡流损耗增加,影响变压器正常运行。分接开关长期操作会导致触头磨损、接触不良,引起局部过热,甚至引发电弧故障。

1.3 线缆故障

线缆作为电能传输的载体,其故障会直接影响电力输送。常见的线缆故障有绝缘老化、机械损伤和接头故障。长期暴露在户外环境下,线缆绝缘层受紫外线、温度变化、潮湿等因素影响,会逐渐老化、开裂,导致绝缘电阻下降,容易引发漏电、短路等故障。机械损伤多由施工不当、外力拉扯或长期振动引起,可能造成线缆内部导体断裂或绝缘层破损。线缆接头连接不牢固、氧化、腐蚀等问题,会使接触电阻增大,根据焦耳定律 $Q = I^2 Rt$ (其中 Q 为热量, I 为电流, R 为电阻, t 为时间),接触电阻增大将导致接头处发热,严重时引发火灾。

1.4 其他电气设备故障

光伏发电系统中的配电柜、继电器、熔断器等电气设

备也可能出现故障。配电柜内的断路器、接触器等元件，因频繁操作、过载运行，会出现触头磨损、线圈烧毁等问题，影响配电柜的正常分合闸操作。继电器可能出现触点粘连、误动作等故障，熔断器则可能因电流过大熔断，失去对电路的过载和短路保护功能。

2 光伏发电系统电气设备故障诊断方法

2.1 基于电气参数分析的诊断方法

通过实时监测电气设备的电压、电流、功率、频率等参数，并与设备正常运行时的参数范围进行对比分析，可判断设备是否存在故障。例如，正常运行的逆变器输出电压应稳定在额定值附近，当输出电压偏离额定值超过一定范围时，可能表明逆变器存在故障^[1]。

对于变压器，可通过监测空载电流、负载损耗等参数来判断其运行状态。空载电流增大可能意味着绕组存在短路或铁芯故障；负载损耗异常增加则可能与绕组电阻变化、铁芯损耗增大等因素有关。利用智能电表、数据采集器等设备实时采集电气参数，并借助数据分析软件进行处理和分析，能够及时发现设备潜在故障。

2.2 红外热成像诊断方法

红外热成像技术是利用物体表面的红外辐射特性，将物体表面的温度分布转换为可见的热图像。正常运行的电气设备各部位温度分布相对均匀，当设备出现故障，如接触不良、过载等情况时，故障部位会因能量损耗产生异常发热，通过红外热成像仪扫描设备，可直观检测到温度异常区域，从而判断故障类型和位置。例如，在检测变压器故障时，红外热成像仪可清晰显示绕组过热、接头发热等故障点，具有非接触、检测速度快、灵敏度高优点，能够在设备运行状态下进行检测，及时发现潜在故障隐患。

2.3 振动监测诊断方法

许多电气设备在运行过程中会产生振动，当设备出现故障时，其振动特性会发生变化。通过在设备上安装振动传感器，采集设备的振动信号，分析振动信号的频率、幅值等特征参数，可判断设备是否存在故障。以变压器为例，内部绕组松动、铁芯硅钢片振动异常等故障会导致变压器振动异常。通过傅里叶变换将时域振动信号转换为频域信号，分析频谱图中特定频率成分的幅值变化，能够准确判断故障类型和严重程度。该方法适用于变压器、电机等旋转或振动较大的电气设备，可提前发现设备的机械故障^[2]。

2.4 局部放电检测诊断方法

局部放电是指电气设备在高电压作用下，由于绝缘缺陷等原因，在绝缘内部或表面发生的局部放电现象。局部放电会逐渐破坏设备的绝缘性能，最终导致设备故障。利用高频电流传感器、超声波传感器等检测装置，检测电气设备的局部放电信号，分析放电的强度、频率、相位等特征，可判断设备的绝缘状况和故障类型。局部放电量 Q 可通过公式 $Q = \frac{1}{U} \int_0^T i(t) dt$ (其中 U 为施加电压， $i(t)$ 为放电电流， T 为周期) 计算得出。通过检测局部放电量及其他特征参数，并结合行业标准和经验数据，能够对设备绝缘状况进行准确评估，为设备维护和检修提供重要依据。

2.5 基于人工智能的诊断方法

随着人工智能技术的发展，基于神经网络、支持向量机等算法的故障诊断方法在光伏发电系统电气设备故障诊断中得到广泛应用。通过收集大量电气设备正常运行和故障状态下的数据，对人工智能模型进行训练，使其学习故障特征与故障类型之间的映射关系。以逆变器故障诊断为例，将逆变器的电气参数、温度、振动等数据输入训练好的神经网络模型，模型可自动识别故障类型和故障程度。基于人工智能的诊断方法具有自学习、自适应能力强等优点，能够处理复杂的故障诊断问题，提高故障诊断的准确性和效率^[3]。

3 光伏发电系统电气设备维护技术

3.1 预防性维护

预防性维护是基于设备的运行时间、使用频率等因素，按照预定的维护计划对电气设备进行定期维护。主要包括定期清洁、紧固、润滑、绝缘检测等工作。定期对逆变器的散热风扇进行清洁，防止灰尘堵塞，保证良好的散热效果；对变压器的分接开关进行润滑，减少触头磨损；定期检测线缆的绝缘电阻，确保线缆绝缘性能良好。通过预防性维护，能够及时发现和处理设备的潜在问题，延缓设备老化和损坏速度，降低设备故障率^[4]。

3.2 状态检修

状态检修是根据设备的实际运行状态，通过各种监测手段获取设备运行数据，对设备的健康状况进行评估，然后有针对性地进行维护和检修。与预防性维护相比，状态检修更加注重设备的实际状态，能够避免过度维护和维护不足的问题。例如，利用油色谱分析、局部放电检测等技术手段对变压器的绝缘状况进行评估，根据评估结果制定个性化的检

修计划, 确保在设备出现故障前及时进行维修, 既保障设备可靠运行, 又降低维护成本^[5]。

3.3 故障维修

当电气设备发生故障后, 需及时进行故障维修。首先要准确判断故障的类型和位置, 然后采取相应的维修措施。对于简单故障, 如线缆接头松动、熔断器熔断等, 可直接进行修复或更换; 对于复杂故障, 如逆变器功率器件损坏、变压器绕组短路等, 需要专业的维修人员和设备进行维修。在故障维修过程中, 要严格遵守安全操作规程, 确保维修人员安全。同时, 对维修过程和更换的零部件进行详细记录, 为后续设备维护和管理提供参考。

3.4 设备更新与升级

随着技术的不断进步, 新型电气设备在性能、可靠性和效率等方面都有显著提升。对于运行年限较长、技术落后、故障率高的电气设备, 适时进行更新与升级, 能够提高光伏发电系统的整体性能。例如, 将传统逆变器更换为效率更高、智能化程度更强的新型逆变器, 可提高发电效率; 更换节能型变压器, 能够降低变压器损耗。在设备更新与升级过程中, 需综合考虑设备使用寿命、维修成本、技术发展趋势等因素, 制定合理的更新计划。

4 光伏发电系统电气设备维护管理措施

4.1 建立设备维护档案

为每一台电气设备建立详细的维护档案, 记录设备的基本信息、安装时间、运行参数、维护记录、故障维修记录等内容。利用信息化管理系统实现设备维护档案的电子化管理, 便于档案查询和管理, 同时实现设备维护信息共享, 为制定科学合理的维护计划提供依据。

4.2 加强人员培训

对从事电气设备维护工作的人员进行专业培训, 培训内容包括设备结构原理、故障诊断方法、维护技术和安全操作规程等。培训采用理论教学与实践操作相结合的方式, 通过理论教学使工作人员掌握设备相关知识, 通过实践操作提高工作人员的故障诊断和维护技能。定期对维护人员进行考核, 确保其具备相应工作能力。鼓励工作人员参加行业技术交流和培训活动, 及时了解最新技术发展动态, 提升专业水平。

4.3 引入智能化管理系统

利用物联网、大数据、云计算等技术, 引入智能化管理系统, 实现对电气设备的远程监测、故障预警和智能管理。

在设备上安装各类传感器, 实时采集设备运行数据并传输至监控中心, 监控中心利用大数据分析技术对数据进行处理和分析, 及时发现设备异常并发出故障预警。智能化管理系统还可根据设备运行状态自动生成维护计划, 实现设备维护的智能化、自动化, 提高设备管理效率和准确性, 降低人工管理成本。

4.4 开展定期评估和改进

定期对电气设备维护管理工作进行评估, 分析工作中存在的问题和不足之处, 总结经验教训。根据评估结果, 及时调整和改进维护管理策略和方法, 如优化故障诊断方法、完善维护计划等。通过持续的定期评估和改进, 不断优化电气设备维护管理工作, 使其更好地适应光伏发电系统的运行需求, 提升维护管理工作质量和效率。

结论

综上所述, 光伏发电系统中电气设备的故障诊断与维护技术是保障系统安全、稳定、高效运行的关键。通过深入分析电气设备常见故障类型, 运用多种故障诊断方法, 并结合少量关键公式辅助理解, 能够及时、准确地发现设备故障。同时, 采用科学合理的维护技术和完善的维护管理措施, 可有效降低设备故障率, 提高设备运行可靠性和效率, 降低维护成本。在未来的光伏产业发展中, 结合智能化、数字化技术发展趋势, 推动光伏发电系统电气设备维护管理工作向更高水平迈进, 为光伏产业的可持续发展提供坚实的技术保障。

参考文献

- [1] 陈积东. 光伏发电系统的可靠性评估方法与故障诊断技术研究 [J]. 灯与照明, 2025,49(03):56-58.
- [2] 陈亮, 刘小宁, 贾小波, 等. 光伏发电系统在油田井场的运行状态研究 [J]. 石油化工应用, 2025,44(05):94-97.
- [3] 赵海宝. 基于机器学习的光伏发电系统故障诊断系统研究 [J]. 自动化应用, 2025,66(04):27-29. DOI:10.19769/j.zdhy.2025.04.006.
- [4] 张鹏, 桂思睿. 光伏发电系统故障诊断与远程监控技术创新研究 [J]. 产业科技创新, 2024,6(05):37-40.
- [5] 王博文. 基于深度学习的光伏发电系统故障诊断方法研究 [D]. 江南大学, 2024. DOI:10.27169/d.cnki.gwqgu.2024.001581.

作者简介: 代忠铭 (1996—), 男, 汉, 河北沧州, 本科, 中级工程师, 研究方向: 新能源电气系统