

风电场电气设备中风力发电机的运行维护研究

熊格格

湖南省水利水电职业技术学院 湖南长沙 410000

摘要: 本文针对风力发电机的运行维护展开研究。首先分析了风力发电机常见故障类型,包括叶片类、齿轮箱类、发电机类和变流器类故障,并探讨了其发生原因。然后介绍了几种常用的风力发电机运行状态监测与故障诊断技术,如基于振动信号、油品分析、电气参数和红外热成像的诊断方法。最后研究了预防性维护策略,包括基于可靠性和大数据的维护策略优化,以及状态检修维护和定期巡检维护等具体策略。本研究可为风电场风力发电机运维提供理论指导和实践参考。

关键词: 风力发电机; 运行维护; 故障诊断; 预防性维护

引言

随着全球能源紧缺和环境污染问题日益突出,开发清洁可再生能源已成为各国的共识。风能作为一种重要的可再生能源,近年来得到快速发展。据统计,截至2023年底,全球风电累计装机容量已达到1021吉瓦(GW),相比2022年的837GW,增长了13%。这一增长主要得益于2023年全球风电新增装机容量达到了创纪录的117GW,比2022年增长了50%,成为有史以来最好的一年。其中,陆上风电的新增装机容量首次超过100GW,达到106GW,比2022年增长了54%。随着风电规模不断扩大,风力发电机的安全可靠运行面临更多挑战。

一、风力发电机常见故障类型及原因分析

(一) 叶片类故障

风力发电机叶片常见故障主要表现为空气动力学性能下降和结构强度降低。空气动力学性能下降通常是由于叶片表面粗糙度增加、形状变形或气动外形受损导致的。例如,长期运行后,叶片前缘会出现磨损、老化,导致气动阻力增大,进而引起风能捕获效率下降。结构强度降低主要是由疲劳载荷、极端环境等因素引起的。风力发电机叶片在运行过程中承受交变应力作用,易发生疲劳失效。此外,雷击、冰冻等极端天气也会对叶片结构造成损伤,降低其强度和刚度。材料缺陷、制造工艺不过关等原因也可能导致叶片出现开裂、脱层等早期

失效问题,影响其结构完整性。

(二) 齿轮箱类故障

风力发电机齿轮箱易发生的故障包括齿面磨损、齿根疲劳断裂和轴承损坏等。齿面磨损通常是由于润滑不良、杂质污染、齿面接触应力过大等原因导致的。疲劳断裂则主要是齿轮承受交变载荷,在齿根处产生疲劳裂纹,进而扩展断裂。风力发电机载荷的随机性和间歇性会加剧这一过程。轴承故障与滚动体、保持架的疲劳磨损密切相关。此外,风力发电机振动引起的齿轮啮合冲击、偏航产生的非线性载荷等因素也可能导致齿轮箱的异常磨损。齿轮材料的选择、热处理工艺的控制、装配质量的保证等也都会影响齿轮箱的使用寿命。

(三) 发电机类故障

风力发电机定子绕组绝缘和轴承是最容易发生故障的部件。绝缘老化主要是由于绕组长期处于交变电压、高温、潮湿等恶劣工况,使绝缘材料性能逐渐退化。机械应力、电晕放电等也会加速绝缘老化过程。当绝缘强度下降到一定程度,就可能引发匝间短路、对地短路等电气故障^[1]。风电发电机轴承会承受来自风轮的径向力、推力及自身重力,还会受到转子不平衡、偏航晃动等因素的影响,导致滚动体和滚道出现点蚀、剥落等磨损。轴承游隙增大会加剧振动,恶化发电机运行状态。此外,密封失效导致的润滑脂泄露、污染,电流擦伤引起的沟道等也是轴承早期失效的常见原因。

(四) 变流器类故障

风力发电机变流器的关键部件如电容器、IGBT模块较为容易出现故障。电容器的损坏通常表现为电容量降

作者简介: 熊格格(1991.2-),女,土家族,长沙,研究生,讲师,研究方向:电力。

低、内阻增大、甚至击穿。电容器长期处于高温、潮湿的运行环境，介质性能会逐渐退化。电压畸变率高、谐波含量大也会加剧电容器的损耗。电容器性能的下降会影响直流母线电压的稳定性，甚至诱发连锁故障。IGBT模块的损坏主要与器件选型、散热设计、驱动保护电路等因素有关。型号选择不当、散热能力不足会使IGBT工作在超出安全工作区的状态。驱动电路故障、浪涌电压等异常因素也可能引起IGBT击穿、栅极损坏。变流器结构布局的不合理还会导致EMC问题，加剧器件的应力。

二、风力发电机运行状态监测与故障诊断技术

(一) 基于振动信号的风力发电机故障诊断技术

风电机组在运行过程中，其叶片、齿轮箱、发电机等关键部件都会产生不同特征的振动。通过在部位布置加速度传感器，可以采集到风电机组的振动信号。对采集到的时域振动信号进行分析处理，如通过快速傅里叶变换等方法得到其频谱特性，能够有效反映机组的运行状态。例如，叶片的不平衡、空气动力学性能下降通常会引起其振动幅值增大，主要表现在低频段；齿轮箱的齿面磨损、齿轮疲劳断裂等故障则会引起中高频段的振动加剧并伴随显著的边频带；发电机的定转子碰摩、绕组松动等故障也会导致振动频谱的变化^[2]。此外，先进的信号处理算法如小波分析、经验模态分解等能够提取到更多的故障特征信息。通过建立风电机组振动与故障的映射关系，再结合模式识别、机器学习等方法，就可实现风电机组的故障诊断与寿命预测。相比其他诊断技术，基于振动信号的方法具有适用范围广、灵敏度高、实时性强等特点，已在风电行业得到广泛应用。

(二) 基于油品分析的风力发电机故障诊断技术

风力发电机的齿轮箱、主轴承等关键部件都需要润滑油对其进行冷却与润滑。润滑油在使用过程中，其物理化学性质会发生变化，所含颗粒也能反映零部件的磨损程度。定期取样分析风电机组的润滑油，可以及时发现潜在的异常磨损或故障。例如，通过光谱分析仪可测得油品中各金属元素如铁、铜、铬等的含量，据此判断齿轮、轴承的磨损情况；在显微镜下观察油品的污染度，可判定密封失效或外界杂质入侵等问题；运用红外光谱分析技术可监测到油品的老化与变质程度。当油品分析发现铁磁性碎屑、大尺寸磨粒明显增多，或运动粘度、酸值等指标严重超标时，就意味着风电机组已出现零部件损伤等异常情况。油样的采集和分析虽然无法做到在线实时，但其能获得设备内部零件损伤的直接证据。基

于油品分析的故障诊断方法作为事后诊断手段，可为状态检修、故障溯源等提供可靠依据。

(三) 基于电气参数的风力发电机故障诊断技术

风力发电机通过变流器并网发电，因此可以从发电机和变流器两个方面入手，提取电气故障特征量。常用的发电机电参量如定子电流、电压，转子电流等，需要在发电机端配置传感器和数据采集装置。这些电参量不仅包含发电机的电气故障信息，也能反映其机械故障征兆。例如，通过对定子电流进行频谱分析，不仅可以识别匝间短路、绕组开路等电气故障，还能检测到转子碰摩、断条等机械异常^[3]。变流器作为风力发电机组并网的关键设备，其性能直接影响风电机组出力。变流器的直流母线电压、输出电压畸变率等参数的异常波动往往意味着变流器自身器件发生退化或损坏。特别是对变流器输入、输出侧的电能质量指标进行在线监测，可及时发现IGBT损坏、谐波超标等故障隐患。总的来说，电气参数的采集实现比较简便，且能以较高的采样频率进行在线监测。

(四) 基于红外热成像的风力发电机故障诊断技术

风力发电机运行时，其内部的发电机、变流器、齿轮箱等部件都会产生一定的热量。这些部件的温度分布若出现异常，往往意味着其存在缺陷或故障。例如，发电机绕组匝间短路会引起局部温度的异常升高；变流器的散热不良、功率器件老化也会导致其外壳温度超标；齿轮箱的轴承与齿轮磨损发热、油液泄露同样会引起其外表面热异常。利用红外热像仪对风电机组进行巡检，可快速、直观地识别出这些热异常点，为故障部位的定位判断提供依据。与其他监测方法相比，红外热成像的优势在于其非接触、大范围、图像化的检测模式，不仅可用于风电机组地面可达部件的检测，还可借助无人机等开展叶片、机舱罩的热成像检查，实现风电设备故障的全方位监测。将风电机组热成像数据与其设计温升限值、正常运行时的热图相对比，设定温升阈值，就可实现风电机组故障的自动预警。

三、风力发电机预防性维护策略研究

(一) 基于可靠性的风力发电机维护策略优化

基于可靠性的维护策略旨在通过优化维护计划，最大限度地提高风力发电机的可用性和可靠性。该策略以风电机组各关键部件的可靠性分析为基础，综合考虑其失效机理、失效后果和维修成本等因素，合理安排维护时间与频次。具体实施时，首先需建立风电机组及其部

件的可靠性模型,收集运行工况、故障历史等数据,获得部件失效率、修复率等可靠性参数。在此基础上,可应用维修时限优化、机会维修优化等方法,平衡风电机组的可靠性提升和维护成本,得到最优的维护时间间隔与维护项目组合^[4]。同时,针对安全关键部件还需制定必要的定期更换策略。基于可靠性的维护策略能够减少风电机组的计划外停机时间,实现维护资源的经济高效利用,但其实施难度相对较大,需要专业的可靠性分析工具和丰富的机组运行数据作为支撑。

(二) 基于大数据的风力发电机预测性维护策略

随着风电场的规模化发展与信息化水平提升,风电机组运行过程中会产生海量的状态监测数据。通过大数据分析技术,可挖掘风电机组的健康退化规律,为其预测性维护提供依据。一方面,需建立风电机组历史运行数据与故障发生之间的关联模型,通过机器学习算法如支持向量机、神经网络等,训练出故障预警和剩余寿命预测模型,及时发现机组的潜在故障征兆,预估其退化趋势,合理制定检修计划,从而避免严重故障的发生,延长设备的使用寿命。另一方面,还可对同型风电机组的群体数据开展对比分析,识别出不同机组之间的性能差异,找出系统设计、制造、安装、运维等环节中的共性问题,针对性地制定预防措施。此外,通过大数据分析还能优化风电场的备品备件管理,合理配置维修资源,最大化风电场的出力效益。

(三) 风力发电机状态检修维护策略

状态检修维护策略以风电机组的实际健康状态为依据,动态优化维护决策。该策略充分利用在线监测系统采集的数据,通过信号处理、特征提取等方法,实时评估风电机组各关键部件的性能退化水平。一旦监测参数出现异常,偏离设定的阈值范围,即触发报警,生成检修工单,通知检修人员查明原因,制定针对性的维修方案。与基于运行时间的定期检修策略相比,状态检修维护的显著优势在于,其仅对确实需要维护的设备开展工作,既避免了盲目检修可能带来的“过度维护”,也防止了必要检修的遗漏。而且,状态检修的维护决策可及时修正和动态更新,与设备的实际退化过程相适应。但是,状态检修策略的实施对在线监测系统的可靠性、监测数据的完整性以及检修人员的专业技能等提出了更高要求。只有不断完善状态监测管理平台,明确状态评价标准,建立高效的生产管理流程,才能真正发挥状态检修维护

的最大效用。

(四) 风力发电机定期巡检维护策略

通过人工定期巡视风电场,可直观地发现风电机组外观的损伤与异常。一般情况下,风电场的日常巡检频次为每日一次,重点检查风电机组的运行工况,关注发电机、变桨系统等部件的声音和温度,查看液压站、冷却系统等有无泄漏,并对塔筒、叶片外观进行检查。每周的例行维护还包括对机舱、齿轮箱等进行例行保养,检查螺栓、电缆的连接情况^[5]。月度、季度、年度的定期检修则侧重于对风电机组进行全面的测试和校准,如对偏航系统进行回转试验,对变桨系统的润滑、密封等进行检修,并更换润滑油、冷却液等。定期巡检虽然是一种传统的维护方式,但其可有效消除风电机组运行的安全隐患,是风电场必不可少的日常管理工作。而且,在定期检修过程中,检修人员还可借助红外热像仪、超声波探伤仪等专业设备,提高故障隐患识别的灵敏度。

结束语

综上所述,风力发电机运行维护是一项复杂的系统工程,需要从故障分析、状态监测、维护策略等多方面入手。只有准确把握风力发电机故障发生规律,采用合适的诊断技术,制定有效的预防性维护策略,才能尽可能避免或减少故障发生,延长设备使用寿命,提高风电场发电效率和经济效益。未来,随着传感器、物联网、大数据等技术的进一步发展和应用,风力发电机智能运维必将迎来更广阔的前景。同时,还需加强跨领域合作,借鉴其他行业先进经验,不断创新风电运维模式,推动风电产业高质量可持续发展。

参考文献

- [1] 吴生炎.风电场电气设备中风力发电机的运行维护分析[J].通讯世界,2024,31(11):106-108.
- [2] 李莉.探究风电场电气设备中风力发电机的运行维护的措施[J].电气技术与经济,2024,(01):307-309.
- [3] 王芸波.风电场电气设备中风力发电机的运行维护研究[J].中国设备工程,2023,(13):76-78.
- [4] 兰文西.风电场电气设备中风力发电机的运行维护的措施解析[J].电气技术与经济,2023,(02):54-56.
- [5] 赵宝.分析风电场电气设备中风力发电机运行故障及维护[J].电气技术与经济,2022,(04):122-124.