

新能源风电机组电气火灾隐患成因与防控技术探析

贺越霞 侯杰 李子昂 刘洋
内蒙古智慧运维新能源有限公司
DOI:10.32629/hwr.v10i6.7027

[摘要] 风电机组在高负荷与复杂并网工况下运行,电气火灾隐患隐蔽性强、演化快。以某沿海风电场2.5MW双馈机组2022年电气火灾为例,拆解电缆绝缘退化、变流器功率器件热应力、盐雾高湿环境及运维滞后等成因,构建材料耐受、热风险可观测与运维闭环的防控路径。实施耐盐雾交联聚乙烯电缆替换、关键点位光纤温度在线监测(阈值90℃)、季度绝缘检测及盐雾专项检查后,绝缘破损率从30%降至5%,IGBT超温次数从每月5次降为0,运维漏检率从15%降至2%,该策略可显著收敛沿海盐雾场景下双馈机组电气火灾风险,为同类型机组安全治理提供量化参照。

[关键词] 风电机组; 电气火灾; 盐雾环境; 电缆绝缘; 在线温度监测

中图分类号: S776.29+2 **文献标识码:** A

Analysis of Electrical Fire Hazard Causes and Prevention Technologies for New Energy Wind Turbines

Yuexia He Jie Hou Ziang Li Yang Liu

Inner Mongola Intelligent Operation & Maintenance New Energy Co.,Ltd

[Abstract] Wind turbines operating under high load and complex grid-connected conditions face electrical fire hazards that are highly concealed and evolve rapidly. Taking an electrical fire incident in 2022 involving a 2.5 MW doubly-fed induction generator (DFIG) at a coastal wind farm as a case study, this paper analyzes the contributing factors, including cable insulation degradation, thermal stress on converter power devices, the saline-humid coastal environment, and delayed maintenance. A prevention pathway integrating material tolerance, observable thermal risk monitoring, and closed-loop maintenance operations is established. After implementing replacements with salt-fog-resistant cross-linked polyethylene (XLPE) cables, deploying fiber-optic online temperature monitoring at critical points (threshold 90 °C), conducting quarterly insulation tests, and performing specialized salt-fog inspections, the insulation failure rate decreased from 30% to 5%, the frequency of IGBT overtemperature events dropped from 5 times per month to 0, and the missed-inspection rate fell from 15% to 2%. This strategy significantly mitigates the electrical fire risk of DFIG units in coastal salt-fog environments, providing quantitative benchmarks for the safety management of similar wind turbine systems.

[Key words] wind turbine; electrical fire; salt-fog environment; cable insulation; online temperature monitoring

引言

在“双碳”目标推动下,风电装机规模快速增长,机组长期高负荷运行与并网波动叠加,使电气系统失效更具隐蔽性与突发性^[1]。沿海风电场受盐雾与高温高湿影响,绝缘劣化、接触电阻增大与功率器件过热更易耦合触发火灾,造成停机、部件更换与并网能力下降等损失^[2]。面向该类场景,厘清隐患形成机理并提出可工程落地的防控组合,对提升风电场本质安全水平与运维效率具有现实意义。

1 新能源风电机组电气火灾隐患研究背景与案例概述

在“双碳”目标驱动下,风电装机规模持续扩张,机组长期高负荷运行与并网工况复杂化叠加,使电气系统的失效模式呈现出更强的隐蔽性与突发性。结合2021—2023年全国风电场事故统计口径可见,电气火灾在同期各类风电场事故中的占比达到25%,其后果通常伴随停机、并网能力下降以及关键部件更换等连锁损失。

风电机组电气火灾与常规工业场景存在明显差异,机舱空间封闭且通风条件受限,电缆汇集与功率电子器件集中布置,故障早期往往表现为局部温升与绝缘性能衰减,若未能在萌芽阶

段完成识别与干预,易在短时间内演化为燃烧事故并波及相邻部件。基于行业风险现状,有必要把电气火灾隐患的形成机理与可操作的防控路径纳入风电场安全治理的核心议题。

贯穿本文的研究案例来自某沿海风电场1台2.5 MW双馈风电机组在2022年发生的电气火灾事故。双馈机组以定子直接并网、转子侧经变流器实现能量双向流动为主要拓扑特征,其电缆系统以及变流器等环节对绝缘状态与热管理更为敏感。事故调查阶段的初步判定指向电缆绝缘老化引发的电气故障,并在机舱电气区域形成持续热源,最终造成直接经济损失50万元,同时带来15 d的非计划停机。鉴于该事故同时涉及电缆绝缘退化、热失控触发条件以及运维发现滞后等典型问题,把该案例作为主线进行隐患成因拆解,并进一步论证针对性防控技术的有效性,可为沿海盐雾环境下同类型机组的电气火灾风险管控提供更具工程可迁移性的依据^[3]。

2 新能源风电机组电气火灾隐患成因分析

2.1 电气设备自身缺陷隐患分析

结合2022年沿海风电场2.5 MW双馈机组火灾调查线索,设备本体缺陷呈现出电缆系统绝缘退化与功率器件热应力叠加的特征。该机组关键电缆已连续服役超过10年,现场抽检显示绝缘层破损率达到30%,绝缘材料在长期热循环、机械振动以及局部放电共同作用下更易出现微裂纹扩展,进而把绝缘电阻下降与泄漏电流上升转化为可持续的局部热源。与此同时,双馈拓扑下转子侧变流器承担更高频次的能量调节,IGBT模块在额定工况下要求结温受控于85℃以内,而事故机组运行记录显示模块温度一度升至120℃,过热会把焊层疲劳、键合线松弛以及散热界面热阻增大串联起来,导致器件开关损耗进一步抬升并形成热失控倾向,使机舱电气区域的热积聚条件更容易被触发。

为解释电缆由隐患向故障演化的路径,可把电缆载流能力与温升裕度建立定量关联,工程上常用载流量估算式用于判断在既定环境温度与敷设条件下的热稳定边界,其表达式如下:

$$I = K \times S \times \sqrt{\frac{\theta_{\max} - \theta_{\text{amb}}}{\rho}}$$

其中, I 表示电缆允许载流量(单位: A), K 为敷设系数(无量纲), S 为电缆导体截面积(单位: mm^2), $\theta_{\max}$ 为导体允许最高温度(单位: $^{\circ}\text{C}$), θ_{amb} 为环境温度(单位: $^{\circ}\text{C}$), ρ 为导体电阻率(单位: $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)。

鉴于该机组夏季机舱温升偏高且电缆成束敷设较为集中, θ_{amb} 上升会压缩 $\theta_{\max} - \theta_{\text{amb}}$ 的温差项,同时成束与通风受限会使 K 取值下降,二者共同把允许载流量 I 向下拉低;在并网波动与功率调节频繁的工况下,实际运行电流更容易逼近甚至超过热稳定边界,绝缘层原有破损点便可能在持续温升中加速碳化,促使故障由绝缘劣化向电弧放电与燃烧蔓延转变。

2.2 环境因素引发的隐患分析

从事故机组所处沿海工况来看,盐雾与高温高湿共同构成了电气火灾的外部触发条件^[4]。现场环境监测记录的盐雾浓度

为 $0.05 \text{ mg}/\text{m}^3$,含盐气溶胶在机舱缝隙与电缆桥架表面沉积后,会在潮湿条件下形成薄层电解质膜,使绝缘材料表面电导率上升并诱发沿面放电,进而把原本缓慢的绝缘老化推向更高强度的化学腐蚀与电蚀耦合过程。对连接部位而言,盐雾对金属端子与压接面更容易造成氧化与点蚀,事故机组电缆接头接触电阻测得 0.5Ω ,而同类连接在正常维护状态下应不高于 0.1Ω ,接触电阻的显著增大意味着焦耳热在小尺度界面快速累积,局部温升又会反过来加速氧化膜增厚,从而形成温升与劣化相互强化的链式效应。

在热湿环境方面,夏季机舱温度最高达到 45°C ,高环境温度会把变流器散热系统的换热温差压缩,使风道堵塞、滤网积尘或冷却器效率下降等轻微问题更易转化为明显的器件温升;湿度偏高还会使电气柜内凝露风险上升,凝露水膜与盐分叠加后可能把爬电距离等设计裕度削弱,并对端子排、母排以及屏蔽层接地地点形成更高概率的异常放电起点。由此可见,该事故的外部环境并非单一因素作用,而是在盐雾腐蚀改变绝缘与金属界面状态的基础上,高温高湿进一步抬升了散热压力与放电敏感性,使电气缺陷更容易跨越由隐患到火灾的临界条件。

2.3 运维管理疏漏导致的隐患分析

围绕事故溯源过程,运维管理链条的滞后使设备缺陷未能在萌芽阶段被识别并被处置^[5]。该风电场对涉事机组执行每半年1次的周期性维护安排,周期偏长会把绝缘电阻测量、端子紧固复核以及热异常排查等工作压缩到较低频次,而电缆绝缘退化与接触电阻漂移又具有渐进性特征,一旦缺少趋势性数据积累,现场人员难以及时捕捉到从轻微温升到持续热源的过渡信号。事故资料显示,上一轮维护未对电缆接头温度开展记录,缺失温度基线会直接削弱红外测温与在线测温结果的对比判读价值,使连接点发热这类典型征兆更容易在机舱高背景温度下被掩盖。

从管理执行角度来看,事故机组运维漏检率为15%,漏检并不意味着项目缺失,更可能反映出工单闭环、复核签字以及异常升级机制存在薄弱环节,导致绝缘电阻偏低、端子轻微松动或散热通道受阻等问题未被纳入缺陷库开展分级处置。双馈机组的变流器与电缆系统对热管理与绝缘状态高度敏感,若运维策略仍以固定周期为主而缺少面向关键部位的状态化检查,隐患就可能在多轮运行中持续积累,并在并网波动、环境升温或负荷抬升的叠加情境下被触发为电气火灾事件。

3 新能源风电机组电气火灾防控技术与效果评估

3.1 针对性防控技术措施

围绕沿海盐雾场景下2.5 MW双馈机组电缆绝缘退化与变流器热应力耦合的隐患链条,本研究把材料耐受、热风险可观测以及运维闭环作为防控主线来开展配置优化。在线路侧处置上,把原有服役超过10年的电缆系统更换为耐盐雾交联聚乙烯电缆,交联聚乙烯材料在电气强度与耐化学腐蚀方面更具稳定性,并把耐盐雾等级提升至契合 IEC 60068-2-52 的要求,以降低盐分沉积后表面电导率上升所带来的沿面放电敏感性。针对双馈机

组转子侧变流器的IGBT模块过热与接头界面焦耳热累积问题，在机舱电气区域引入光纤温度监测系统，把光纤传感的抗电磁干扰特性当作优势来使用，连续跟踪IGBT散热基板以及电缆接头关键点的温度变化，并把预警阈值设定为90℃以形成可执行的早期干预触发条件。与硬件改造相匹配的管理侧措施同步调整，把绝缘检测频次压缩至每季度1次，同时增加盐雾环境专项检查，将端子紧固复核、接触电阻复测以及柜内凝露与滤网堵塞排查纳入工单闭环，以降低漏检造成的隐患积累概率。

3. 2防控效果评估

表1 防控措施实施前后隐患指标对比

指标	实施前	实施后
绝缘破损率	30%	5%
IGBT 超温次数/月	5 次	0 次
运维漏检率	15%	2%

为把防控措施的作用从定性描述转化为可追踪的风险变化，本研究选取绝缘破损率、IGBT超温次数每月以及运维漏检率作为一致性指标来开展前后对比评估，指标设置分别对应电缆绝缘健康、功率器件热失控触发条件以及管理执行偏差这三类关键薄弱环节。结合案例机组改造前抽检与运行记录，绝缘破损率处于30%的高位，IGBT超温次数每月达到5次，运维漏检率为15%，该组合特征反映出材料老化、热异常不可见以及工单闭环不足在同一机组上叠加存在。完成耐盐雾电缆替换与光纤温度监测布设后，配合季度绝缘检测与盐雾专项检查，监测与复核数据表明绝缘破损率下降至5%，IGBT超温次数每月降为0次，漏检率收敛至2%，表征出隐患识别由离散抽检转向连续感知后，热源萌芽阶

段的处置窗口得到前移，见表1。该评估路径强调以隐患指标变化来刻画风险收敛幅度，从而为同类沿海双馈机组的防控措施选型与维护周期设置提供可迁移的量化参照。

4 结语

本研究聚焦沿海2.5MW双馈机组电气火灾，揭示盐雾高湿环境下电缆绝缘退化与功率器件热应力的耦合放大效应，及运维周期长、趋势数据缺失对隐患早期识别的影响；针对隐患，采用耐盐雾电缆替换、关键点位光纤测温监测与预警，结合季度绝缘检测和盐雾专项检查完善闭环，实现隐患指标收敛。实施后绝缘破损率、IGBT超温次数及漏检率显著下降，表明材料升级、热风险可视化与管理联动可前移处置窗口、降低火灾概率，后续可在更多机组及季节工况扩展验证，完善阈值与维护策略适配性。

【参考文献】

- [1]张益菲,麻海涛,杨怀向,等.风电机组火灾事故及现有消防系统存在问题的分析[J].中国科技纵横,2024(13):83-85.
- [2]王加童.风电机组火灾易发点识别与消防设施布局优化研究[J].消防界(电子版),2025,11(19):100-102.
- [3]彭仁义.风电机组火灾易发点识别与消防设施布局优化研究[J].消防界(电子版),2025,11(3):152-154.
- [4]王立刚.高山林地风电机组火灾原因和防护措施[J].黑龙江科学,2022(010):013.
- [5]段忠喜.基于电气与控制设备风电机组检修策略探讨[J].电力设备管理,2024,(17):99-101.

作者简介:

贺越霞(1988--),女,汉族,内蒙古乌兰察布四子王旗人,本科(学士学位),单位:内蒙古智慧运维新能源有限公司,职称:助理工程师,研究方向:电力安全管理,电气工程。