

高原环境对风力发电机绝缘老化特性影响研究

李华伟

云南龙源新能源有限公司 云南昆明

【摘要】随着全球能源结构的转型升级，风力发电作为清洁能源的主力军，其应用场景正从沿海平面向高原山地等复杂环境拓展。但高原地区具有独特的低气压、强紫外线以及昼夜温差等环境因素，对风力发电机绝缘系统的长期可靠性构成了显著的挑战。基于此，本文就高原环境对风力发电机绝缘老化特征影响展开探究分析，并提出相应的改进措施，旨在为风力发电机在高原环境下的绝缘性提升提供必要的参考借鉴。

【关键词】高原环境；风力发电机；绝缘老化；影响

【收稿日期】2025 年 11 月 5 日

【出刊日期】2025 年 12 月 6 日

【DOI】10.12208/j.jeea.20250238

Research on the influence of plateau environment on insulation aging characteristics of wind turbines

Huawei Li

Yunnan Longyuan New Energy Co., Ltd., Kunming, Yunnan

【Abstract】With the transformation and upgrading of the global energy structure, wind power, as a mainstay of clean energy, is expanding its application scenarios from coastal plains to complex environments such as plateau and mountainous areas. However, plateau regions present unique environmental factors, including low atmospheric pressure, strong ultraviolet radiation, and significant diurnal temperature variations, which pose notable challenges to the long-term reliability of wind turbine insulation systems. Based on this, this paper explores and analyzes the impact of plateau environments on the insulation aging characteristics of wind turbines, proposing corresponding improvement measures. The aim is to provide necessary references for enhancing the insulation performance of wind turbines in plateau environments.

【Keywords】Plateau environment; Wind turbine; Insulation aging; Influence

在发电机组安全运行中，绝缘材料是保障发电机安全运行的核心屏障，其老化失效会直接引发设备短路、停机甚至是火灾等严重事故。但高原地区的极端条件会导致风力发电机绝缘系统性能和寿命造成较为严重的影响。所以，深入探究高原地区环境对风力发电机绝缘老化特性的影响规律，揭示多因素耦合作用下的老化机理，能对提升高原地区风力发电设备的可靠性和经济性具有重要的研究价值。

1 高原环境因素对绝缘材料的老化影响

1.1 低气压效应

根据大气规律，每海拔升高 1000 米，气压平均下降 12kPa，因此，高原地区的气压较海平面非常低。对于高原地区，海拔通常在 3000 米以上，其气压可降低至 70kPa，仅有海平面气压的 70% 左右，而这种低气压环境下对风力发电机的绝缘系统会产生多个方面的影响。首先，低气压会使绝缘材料内部气隙扩大，局部

放电起始电压显著下降，从而加速电老化进程^[1]。其次，高原地区的气体渗透性增强，潮气和央企更容易侵入绝缘层，从而引发各种化学反应，并且低气压还会降低绝缘材料的散热效率，导致绝缘材料内部温度逐渐升高，进一步加速绝缘材料的老化进程。

1.2 紫外线辐射效应

高原地区由于空气稀薄、云层覆盖较少，使得高原地区的紫外线辐射显著高于平原地区。通常情况下，海拔升高 100 米，紫外线强度平均增加约 10%，由于紫外线-B 辐射波段的能量较高，会使绝缘材料中的聚合物链被吸收，从而引起光氧化反应，以至于材料表面逐渐脆化、开裂甚至是粉化进程加速。例如，对于硅橡胶绝缘子，当长期暴露在高原环境下，硅橡胶绝缘子的表面会因紫外线的降解而出现龟裂，对应的憎水性下降，并引发电弧放电现象。同时，环氧树脂绝缘部件也会因为紫外线的诱导而断裂，甚至是出现机械强度下

降等情况。再加上昼夜温差等其他因素的影响下，会使绝缘材料的老化进程加速，最终影响到风力发电机设备的正常运转。

1.3 温度循环效应

高原地区的昼夜温差是最为典型的特征，由于高原地区空气稀薄、地表热容小。通常情况下，白天太阳辐射强烈时，会导致地表温度迅速升高，而夜晚缺乏云层保温，使得热量损失极快，其高原昼夜温差可达到 25°C 以上。在这种剧烈的温度循环下，对风力发电机绝缘系统会造成严重的影响，一方面，热涨冷缩效应必然会使风力发电机绝缘材料内部产生相应的周期应力，从而出现微裂纹扩展和界面脱粘^[2]。另一方面，由于反复的温度变化会加速材料中添加剂的迁移和析出，并进一步引发局部性能的劣化。例如，交联聚乙烯电缆在温度循环的基础下，会出现“电树枝”显现，从而缩短其使用寿命，而电机绕组绝缘则会因为热疲劳而出现分层或者脱落等情况，给风力发电机组的运行造成严重的安全隐患。

1.4 沙尘侵蚀效应

由于高原地区的沙尘天气频发，其颗粒物浓度较高、粒径分布广泛，对于风力发电机绝缘材料的老化有着较为显著的影响。在沙尘侵蚀效应中，机械磨损是沙尘侵蚀的直接后果，其沙尘颗粒在风力作用下的高速冲击绝缘材料表层，会形成微削效应，以至于材料表面出现划痕、凹坑甚至是局部剥落。如硅橡胶绝缘子长期在沙尘的侵蚀后，对应的憎水性表面会被破坏，并形成亲水性通道，进而引发局部放电^[3]。此外，沙尘侵蚀中的化学腐蚀能进一步加剧绝缘材料的老化进程，这是因为沙尘中含有酸性或者碱性颗粒，吸附在绝缘表面和材料中的添加剂会发生电化学反应，以至于分子链断裂或交联结构破坏，其表面容易形成导电性腐蚀产物，最终缩短绝缘设备寿命。

2 高原环境风力发电机绝缘系统防护策略

2.1 材料优化设计

针对高原地区的极端环境因素，绝缘系统需通过材料科学的创新设计实现针对性防护策略。在绝缘材料的耐候性优化策略中，应重点解决紫外线辐射增强导致的材料降解问题。研究发现，随着海拔升高，紫外线辐射强度呈指数增长，直接加速了绝缘材料的光氧化降解过程。为此，可采用苯并三唑类紫外吸收剂和受阻胺类光稳定剂对硅橡胶基体或环氧树脂体系进行改性，通过有效吸收或散射紫外辐射能量，阻断聚合物链的光化学降解路径，从而显著延缓材料表面的脆化与

开裂^[4]。同时，为提升材料在温度循环与沙尘侵蚀环境下的综合稳定性，需合理添加抗氧化剂和金属钝化剂等抗老化助剂，以阻断热氧化与电化学腐蚀的协同作用机制。在机械性能增强方面，纳米复合技术为绝缘材料的强化提供了有效途径，通过将纳米级二氧化硅和碳纳米管等高模量填料均匀分散于绝缘基体中，形成纳米粒子与聚合物链之间的强界面结合，可显著提升材料的拉伸强度、耐磨性与抗裂纹扩展能力。实验发现，纳米二氧化硅改性环氧树脂的断裂伸长率得到了大幅度提升，使绝缘系统能够更好地抵御沙尘颗粒的微切削效应以及热胀冷缩引起的循环应力疲劳，从而延长了绝缘系统在高原复杂环境条件下的使用寿命。

2.2 结构防护措施

为有效应对高原地区的强紫外辐射、高频率沙尘问题，在对高原地区风力发电机绝缘老化结构的防护时，需构建多层次防护体系，通过结构优化实现环境侵蚀的系统性阻隔。在表面防护技术层面，功能性涂层的开发是提升绝缘材料表面耐受性的核心策略。超疏水涂层系统可在绝缘表面构建微纳结构，使水滴接触角提升至 150° 以上，有效降低沙尘颗粒与湿气的附着概率，同时抑制电晕放电引发的局部热积累现象。防尘涂层则通过精确调控表面微观形貌与电荷分布，实现对颗粒物沉积的主动抑制，并利用其光催化特性分解吸附的有机污染物，显著延缓绝缘表面的物理化学劣化过程。在密封技术优化方面，双层复合密封结构能够维持绝缘腔体在低压环境下的气压稳定性，有效阻隔沙尘通过微小缝隙的侵入。同时，在关键连接部位设计迷宫式密封槽与气压平衡装置，既可阻挡大颗粒沙尘侵入，又能动态平衡内外压差，避免密封结构因压力差异导致的形变失效^[5]。这种“表面主动防护+内部被动隔离”的协同防护机制，通过多尺度环境侵蚀阻隔策略，可显著提升绝缘系统在高原极端环境条件下的长期运行可靠性与安全稳定性。

2.3 智能监测与维护技术

高原风力发电机组绝缘系统在极端环境条件下面临低气压、强紫外辐射、显著温差及沙尘侵蚀的复合威胁，亟需建立基于智能感知与预测性维护的主动防护体系。该体系依托多源异构传感器网络构建绝缘状态动态感知机制，在绝缘子本体、电缆接头等关键绝缘界面上部署光纤光栅应变传感器、超高频局部放电监测单元及温湿度耦合传感模块，同步获取局部放电特征参数、介质损耗角正切值、表面温度梯度及环境湿度时序数据^[6]。通过低功耗无线传感网络实现数据的实时传输

与云端集成，建立绝缘劣化进程的多维度动态追踪模型。在此基础上，融合大数据分析与深度学习技术的预测性维护系统进一步提升决策精度。基于长短期记忆神经网络构建的绝缘寿命预测模型，通过挖掘历史故障数据库与实时监测信号的非线性关联，精准识别早期绝缘失效特征。数字孪生技术则通过高保真建模，量化气压波动、温度梯度及沙尘浓度等高原环境参数对绝缘性能的耦合影响机制，优化维护周期决策模型^[7]。系统通过自适应算法生成高精度维护工单，指导运维人员实施关键部件的预防性更换或密封结构参数优化，实现从被动应急抢修向主动预防性维护的范式转变。该技术路径显著提升高原风电场绝缘系统的长期运行可靠性与全寿命周期经济性^[8]。

结束语：针对高原地区风力发电机绝缘老化机理分析，以此构建高原风电绝缘老化的系统性研究框架，能够为行业的发展提供理论性支撑和技术性指导。因此，在后续的探究中，还可将智能化监测和预测性维护技术应用其中，才能有效实现高原风力发电机全生命周期的高效运维，最终为全球清洁能源的发展贡献出应有的力量。

参考文献

- [1] 张勇,满宇光,唐兆祥,等.水轮发电机绕组绝缘介质损耗因数测量的标准与方法研究[J].大电机技术,2025,(05): 58-65.
- [2] 张卓.发电机直流耐压试验方法及常见异常处理[J].设备管理与维修,2025,(18):56-58.
- [3] 曹文超,陶炜,陆新原,等.发电机绝缘实时监测诊断软件设计与应用[J].设备管理与维修,2025,(16):163-165.
- [4] 杨延,曲鑫.水轮发电机组出口封闭母线绝缘异常分析及处理[J].水电站机电技术,2025,48(07):101-103.
- [5] 张泓铎,雷原,李季聪.一种风力发电机组电缆沉降监测系统的应用分析[J].中国设备工程,2025,(02):189-191.
- [6] 汤振阳.海上直冷风力发电机绝缘结构可行性研究[J].上海大中型电机,2024,(03):40-44.
- [7] 丽晶,刘俊,王蔚.风力发电机组滑环处用控制软电缆的研发[J].电世界,2024,65(04):31-32+35.
- [8] 刘迪,宋大成,王鑫鹏,谢鑫,王健,石琼.直驱风力发电机定子接头绝缘防水密封性研究[J].防爆电机,2023,58(04): 73-76.
- [9] 王鹏,赵政嘉,刘雪山,周群,雷勇,王为.电力电子设备中的电气绝缘问题[J].高电压技术,2018,44(07):2309-2322.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS