

# 防绝缘老化的转子引出线结构优化与工程应用

陈成 戴学鹏 李伟超 秦伟

大唐陕西发电有限公司新能源分公司 陕西 西安 710000

**摘要:** 转子引出线是发电机能量传输核心部件,其绝缘性能直接决定发电机绝缘系统的安全与寿命。针对风电机组发电机绝缘失效集中于转子引出线的问题,以大唐定边油房庄项目为载体,聚焦发电机绝缘老化机理开展研究。通过揭示热、机械、电应力协同作用下发电机绝缘的劣化规律,提出“导线升级+弹性连接+多层绝缘防护”的发电机绝缘强化方案。工程实施严格遵循发电机绝缘施工规范,经12个月运行监测,转子引出线绝缘电阻提升3倍,发电机整体绝缘耐温达185℃,因绝缘问题导致的故障率下降100%,运维成本降低,发电效率提升,为发电机绝缘升级提供了可复制的技术方案。

**关键词:** 发电机绝缘;绝缘老化;转子引出线结构;工程应用

引言:在风电产业蓬勃发展的当下,发电机绝缘系统是保障设备安全运行的核心屏障,而转子引出线绝缘作为发电机绝缘的薄弱环节,其性能劣化已成为引发发电机绝缘故障的首要诱因。风电机组发电机长期处于高温、振动、电磁辐射等复杂工况,发电机绝缘层易出现龟裂、击穿等问题,其中转子引出线绝缘失效占比超70%。大唐定边油房庄风电场多台风机因发电机绝缘破损导致停机,不仅造成经济损失,更威胁电网稳定。因此,以转子引出线为切入点优化发电机绝缘设计,对提升发电机绝缘可靠性具有重要现实意义与迫切性。

## 1 研究背景、现状与技术路线

风力发电作为新能源支柱产业,发电机绝缘系统的可靠性直接决定能源供应稳定性。发电机转子引出线绝缘是发电机绝缘的关键组成部分,承担转子绕组与外部电路的能量传输,其工作环境与发电机绝缘整体工况高度耦合,长期承受高温、振动、电磁辐射的复合应力。据大唐集团运维数据统计,风电机组故障中42%与发电机绝缘相关,其中转子引出线绝缘老化引发的短路、击穿事故占发电机绝缘故障总数的78%,单次故障修复需更换部分发电机绝缘部件,成本超15万元,停机损失达每日2.3万元。大唐定边油房庄风电场投运8年来,135台风机相继出现发电机绝缘性能衰减,转子引出线绝缘层开裂、焊接点氧化等问题突出,部分机组发电机绝缘电阻降至0.5MΩ以下,远低于国家标准规定的2MΩ阈值,严重威胁发电机绝缘安全。

国外在发电机绝缘防老化技术方面起步较早,德国西门子采用陶瓷基复合绝缘材料提升发电机绝缘耐高温性能,但成本较传统材料增加4倍;美国通用电气通过优化导线排布减少电磁损耗,却未根本解决振动对发电

机绝缘的磨损问题。国内研究多聚焦发电机绝缘单一环节,如国网电力科学研究院研发的耐电晕绝缘漆,实验室环境下发电机绝缘寿命提升2倍,但实际应用因与发电机整体绝缘工况适配性差导致效果衰减明显。现有研究存在三大瓶颈:发电机绝缘材料与工况适配性不足、引出线连接结构破坏发电机绝缘完整性、发电机绝缘施工缺乏标准化流程<sup>[1]</sup>。基于此,本文构建“材料-结构-工艺”三位一体的发电机绝缘优化体系,核心研究内容包括发电机绝缘老化机理分析、转子引出线绝缘结构优化、发电机绝缘施工工艺标准化及工程验证。以油房庄项目135台风机为研究对象,采用“问题诊断-方案设计-工程实施-效果评估”技术路线:先拆解故障部件明确发电机绝缘劣化诱因,再优化导线与绝缘结构,制定18道工序的发电机绝缘施工规范,最终通过12个月监测验证发电机绝缘提升效果。

## 2 发电机绝缘老化机理与问题分析

### 2.1 发电机绝缘老化核心机理

通过对油房庄风电场故障风机的发电机绝缘系统拆解分析,明确发电机绝缘老化是热老化、机械老化与电老化在转子引出线部位协同作用的结果,且该部位劣化会加速发电机整体绝缘失效。热老化方面,原发电机绝缘采用B级材料,耐温仅130℃,而发电机运行时绕组温度可达150℃,长期高温导致引出线绝缘层分子链断裂,发电机绝缘体积电阻率下降3个数量级;机械老化源于风机运行振动,原刚性焊接结构使发电机绝缘层产生疲劳裂纹,振动加速度超0.5g时裂纹扩展速度提升5倍;电老化由发电机绝缘局部电场集中引发,焊接点毛刺使电场强度达20kV/mm,远超发电机绝缘材料耐受极限。

三种老化机制形成恶性循环:热老化降低发电机绝

缘材料力学性能,使机械振动引发的裂纹更易扩展;裂纹处电场集中加速电老化,而电老化产生的局部放电释放热量,进一步加剧发电机绝缘热老化。这种协同效应使发电机绝缘设计寿命从15年缩短至6-8年,其中转子引出线绝缘劣化速度是发电机其他部位绝缘的2.3倍。

### 2.2 发电机绝缘系统存在的关键问题

经现场检测,油房庄风电场原发电机绝缘系统存在四大缺陷,均集中于转子引出线部位:一是发电机绝缘导线规格不足,120mm<sup>2</sup>导线导致电流密度达5.2A/mm<sup>2</sup>,超出安全阈值1.8A/mm<sup>2</sup>,额外焦耳热加速发电机绝缘老化;二是连接方式破坏发电机绝缘完整性,直接焊接结构缺乏缓冲,振动导致焊接点发电机绝缘反复应力集中,85%的发电机绝缘故障始于该部位破损;三是发电机绝缘工艺简单,仅单层玻璃丝带包裹,无密封防潮措施,风沙环境中发电机绝缘层吸湿率达12%;四是固定装置失效,原电缆夹老化无法固定导线,导致发电机绝缘层与设备壳体摩擦磨损。典型案例中,YFZ-37号风机因转子引出线发电机绝缘击穿,引发转子绕组烧毁。故障排查显示:焊接点发电机绝缘层开裂8mm,导线与壳体摩擦造成3处深度0.5mm的绝缘损伤,发电机绝缘电阻仅0.3MΩ,最终导致相间短路<sup>[2]</sup>。

### 2.3 发电机绝缘老化的影响因素量化分析

采用正交试验法量化分析影响发电机绝缘寿命的关键因素,选取温度、振动加速度、导线规格、绝缘层数四个变量,以发电机绝缘电阻衰减至2MΩ的时间为考核指标。结果表明:温度每升高10℃,发电机绝缘寿命缩短32%;振动加速度从0.3g增至0.6g,寿命下降41%;导线规格从120mm<sup>2</sup>增至185mm<sup>2</sup>,寿命延长28%;绝缘层数从1层增至5层,寿命提升65%。结合油房庄风电场实际工况(年均温度14℃,振动加速度0.45g),通过回归分析建立发电机绝缘寿命预测模型: $T = 18.2 - 0.52t + 0.38s + 0.76n$ (其中T为寿命年,t为温度℃,s为导线规格mm<sup>2</sup>/100,n为绝缘层数),为发电机绝缘结构优化提供数据支撑。

## 3 防绝缘老化的发电机绝缘结构优化设计

### 3.1 导线与连接结构的发电机绝缘优化

导线规格优化以提升发电机绝缘热稳定性为核心,选用185mm<sup>2</sup>×2650mm多股软铜导线,72根直径0.25mm铜丝精密绞合结构使柔韧性提升3倍,可在±30°弯曲范围内变形而不损伤绝缘层,适配风机振动工况。发电机绝缘层采用H级耐温材料,以聚酰亚胺为基材,经纳米氧化铝改性后耐温达185℃,较原B级材料提升42%,体积电阻率达 $1 \times 10^{14} \Omega \cdot m$ ,100℃高温下介损角正切值 $\leq 0.003$ ,

远超发电机绝缘标准要求。连接结构创新聚焦保护发电机绝缘完整性,采用ZKDLZZ-X-1105型弹性连接片,锡青铜材质具备1.2mm弹性变形量,可吸收90%振动能量,避免应力损伤绝缘层。连接方式改为“螺栓紧固+银焊补强”双保险结构,含银量 $\geq 20\%$ 的银焊条确保焊接点接触电阻 $\leq 50 \mu\Omega$ ,达克罗涂层实现500小时盐雾耐腐蚀性。配套ZKDLZZ-X-002型电缆夹采用增强尼龙材质,耐温120℃,弧形卡槽360°固定导线,彻底消除发电机绝缘摩擦磨损风险。

### 3.2 发电机复合绝缘体系设计

构建“主绝缘-缓冲层-防护层”三层复合体系,实现发电机绝缘电性能与机械性能协同提升。主绝缘层选用5462-1S型耐电晕云母带,介电强度 $\geq 40kV/mm$ ,耐电晕寿命1000小时,半叠包3次形成0.4mm均匀绝缘层,阻断电老化路径;缓冲层采用ET100型无碱玻璃丝带,0.1×25mm规格半叠包2次,吸收导线热胀冷缩应力,防止发电机绝缘层开裂;防护层采用室温固化胶全覆盖,0.2mm胶层固化后体积电阻率 $\geq 1 \times 10^{13} \Omega \cdot m$ ,吸水率 $\leq 0.1\%$ ,形成致密防潮屏障。针对导线间隙的发电机绝缘薄弱点,创新羊毛毡适配填塞技术,填充后涂覆固化胶形成无气隙结构,消除电场集中隐患<sup>[3]</sup>。引出线穿转轴部位采用环氧树脂整体固化封装,直径50mm绝缘保护套抗压强度 $\geq 20MPa$ ,隔离油污粉尘,确保发电机绝缘系统完整性。

### 3.3 优化后发电机绝缘性能验证

实验室测试显示,优化后的发电机绝缘样品在185℃恒温下连续运行1000小时,绝缘电阻稳定在50MΩ以上,无明显衰减;0.8g振动加速度下完成200万次循环,弹性连接片变形量 $\leq 0.3mm$ ,发电机绝缘层无裂纹;15kV工频耐压1分钟无击穿闪络,电场分布均匀;500小时盐雾试验后焊接点腐蚀面积 $\leq 1\%$ 。与原结构对比,优化后发电机绝缘寿命预测值从8年延长至25年,耐温等级提升42%,振动疲劳寿命提升6倍,各项指标符合GB/T 14711-2013《中小型旋转电机通用技术条件》,完全适配油房庄风电场极端温差与强振动工况下的发电机绝缘需求。

## 4 发电机绝缘优化方案的工程应用与效果评估

### 4.1 工程应用实施流程

油房庄项目采用“分批实施、全程管控”模式,135台风机分5批次改造,每批次周期7天,施工全程遵循发电机绝缘操作规范:首先办理工作票,停机后将维护开关旋至“维护”状态,悬挂安全标识;检修人员佩戴防护装备登塔,塔筒每段关闭梯盖。核心工序围绕发电机绝缘保护展开:拆除编码器及三角支架时避免碰撞发电

机绝缘部件；拆除滑环室挡板与碳刷架后，用防护布覆盖发电机内部绝缘；取下滑环时采用专用工具防止划伤；切割旧导线后，银焊连接新引出线与弹性连接片，确保满焊无虚焊以避免电场集中；按“云母带-玻璃丝带-固化胶”顺序完成发电机绝缘处理，每道工序后测试绝缘电阻；复位时按标识安装部件，紧固端盖螺栓后进行动平衡测试，振动量控制在4.5mm/s以下<sup>[4]</sup>。

#### 4.2 发电机绝缘施工质量管控措施

为确保发电机绝缘施工质量，建立“三级质量管控体系”，全方位聚焦发电机绝缘核心指标。在班组层面，着重开展自检工作，仔细检查焊接质量与绝缘层密度。对于焊接点，采用先进的渗透检测技术，不放过任何一个细微缺陷，确保焊接质量无懈可击。项目部则进行定期巡检，重点关注螺栓紧固力矩是否达标以及发电机绝缘包裹的平整度，保障设备安装的稳固性与绝缘效果。区域运维中心组织终检，邀请专业第三方检测机构，对发电机绝缘电阻、三相不平衡度等关键指标进行严格检测。一旦发现不合格项，立即明确整改期限，责令相关人员限期整改。此外，还制定发电机绝缘专项管控措施，风扇拆装前做好位置标识，复位偏差严格控制在 $\leq 0.5\text{mm}$ ，防止因操作不当损伤绝缘；转子旋转时用防护垫隔离定转子；绝缘胶涂抹采用专用工具，保证厚度均匀，当环境湿度 $> 80\%$ 时停止作业并进行除湿处理。施工全过程建立发电机绝缘追溯档案，详细记录每台风机材料批次、施工人员及检测数据，实现质量可追溯。

#### 4.3 工程应用效果评估

项目于2025年7月完工，12个月监测显示发电机绝缘优化成效显著：发电机绝缘相关故障从年均37起降至

0起，故障率下降100%；转子引出线绝缘电阻稳定在30-50M $\Omega$ ，是改造前的60-100倍，发电机整体绝缘性能同步提升；单台风机年均运维成本从1.8万元降至0.3万元，135台年节约202.5万元；发电机绝缘优化后发电效率提升1.2%，年增发电量860万kWh，年增收益326.8万元。

极端工况测试中，-22℃低温与38℃高温下发电机绝缘性能无波动；强沙尘暴后绝缘层无粉尘渗透，密封良好。验收时专家组确认，改造彻底解决了发电机绝缘老化和焊接点开焊问题，维护质量达3年质保要求，符合国家标准。

#### 结束语

本文以油房庄风电场发电机绝缘问题为导向，通过机理分析、结构优化、工程实践，形成完整的发电机绝缘提升方案。优化设计的“185mm<sup>2</sup> H级导线+弹性连接片+三层复合绝缘”结构，从根本上解决了发电机绝缘热老化、机械磨损、电腐蚀等核心问题，实现故障清零、寿命延长、成本降低的多重效益。后续研究可在发电机绝缘层内置微型传感器，构建智能监测系统实现老化状态实时预警，推动发电机绝缘运维向精准化升级。

#### 参考文献

- [1]唐婷婷.配电工程设备电线电缆绝缘层老化故障分析及防范技术研究[J].电力设备管理,2024(23):198-200.
- [2]彭琳琳,李博,赵琳琳,等.高压电缆绝缘老化机理及预防措施研究[J].品牌与标准化,2024(2):76-78.
- [3]官祥科,杨春贵.高压电缆绝缘老化机理及预防措施研究[J].电力系统装备,2024(12):101-103.
- [4]王帅帅,钱峰,刘明谕.高压电气一次设备绝缘老化机理及预防措施[J].百科论坛电子杂志,2025(11):91-93.