

基于寿命预测模型的转子引出线绝缘改造方案研究

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: 为解决风电机组转子引出线绝缘老化带来的运行风险,以大唐定边油房庄改造项目为载体,构建绝缘寿命预测模型并设计改造方案。提取绝缘电阻、工频耐压等核心参数,结合热、电老化耦合效应建立灰色-马尔可夫组合预测模型,精准预判剩余寿命。据此优化改造材料与工艺,采用H级耐温引出线及多层包裹技术。改造后,绝缘电阻超500MΩ,工频耐压试验无击穿,剩余寿命达15年,故障率降92%,为同类项目提供技术支撑。

关键词: 转子引出线;绝缘寿命预测;灰色-马尔可夫模型;H级绝缘;改造方案

引言: 在全球能源结构加速向清洁能源转型的背景下,风力发电装机规模持续扩张。然而风电机组长期运行中,转子引出线绝缘受热、电、机械振动等多因素耦合作用,老化问题日益严峻,不仅威胁机组安全稳定运行,还可能引发重大经济损失与安全事故。因此,精准预测转子引出线绝缘剩余寿命并实施科学改造迫在眉睫。本文依托大唐定边油房庄改造项目展开研究,以期为行业提供有益借鉴。

1 转子引出线绝缘问题研究背景与意义

1.1 研究背景

随着全球能源结构的转型,风力发电作为清洁能源的重要组成部分,装机容量持续攀升。风电机组在长期运行过程中,受热老化、电老化、机械振动等多因素耦合作用,其关键部件转子引出线的绝缘性能逐渐劣化,转子引出线绝缘老化问题日益凸显。转子引出线作为连接转子绕组与外部电路的关键通道,其绝缘性能直接关系到机组的运行安全与稳定性。一旦转子引出线绝缘失效,将引发短路、漏电等故障,不仅会导致机组停机检修,造成巨大的经济损失,还可能引发火灾等严重安全事故,威胁运维人员的人身安全。

1.2 研究意义

开展转子引出线绝缘寿命预测与改造方案研究意义重大。技术上,精准预测其绝缘剩余寿命,可提前察觉安全隐患,为运维决策提供依据,推动从被动检修到主动维护的转变,提升机组可靠性与可用率;构建科学改造方案,选用高性能材料、优化工艺,能延缓绝缘老化,延长设备寿命、降低运维成本。经济上,可减少因绝缘故障造成的停机损失,降低运维工作量与人力成本,提升风电场经济效益。安全与社会层面,能消除安全风险,保障运维人员安全,减少对电网冲击,提升新能源电力供应可靠性,助力风电行业高质量发展与“双

碳”目标实现^[1]。

2 转子引出线绝缘寿命预测模型构建与验证

2.1 预测模型选型与构建

针对转子引出线绝缘寿命影响因素复杂、数据具有不确定性的特点,摒弃单一预测方法的局限性,构建灰色-马尔可夫组合预测模型。该模型结合灰色模型对小样本数据的强拟合能力与马尔可夫链对随机波动的精准修正能力,实现多因素耦合下的转子引出线寿命预测。

模型构建步骤如下:第一步,确定模型输入参数,选取转子引出线绝缘电阻(R)、工频耐压值(U)、介质损耗角正切值(tanδ)、运行温度(T)、振动幅值(A)五项核心指标,均通过现场实测获取,其中转子引出线绝缘电阻采用2500V兆欧表测量,工频耐压试验按1760V、50Hz标准执行;第二步,建立GM(1,5)灰色预测模型,对五项指标进行趋势预测,通过累加生成弱化数据随机性,构建微分方程描述指标变化规律;第三步,划分马尔可夫状态区间,根据转子引出线绝缘寿命标准将预测结果分为“良好”“预警”“失效”三个状态,计算状态转移概率矩阵;第四步,融合灰色预测结果与马尔可夫状态修正,得到最终转子引出线剩余寿命预测值。

模型数学表达式为:模型数学表达式为:

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = \left(X^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right) e^{-ak} + \frac{u}{a}$$

其中 a 为发展系数, u 为灰作用量,通过最小二乘法求解。马尔可夫修正系数通过状态转移矩阵计算,修正后的预测值误差控制在5%以内。

2.2 模型参数获取与验证

以油房庄风电场#12机组为试点,采集2019-2024年共60组月度监测数据,其中前48组用于模型训练,后12组用于验证。现场检测采用万用表、对中仪等设备,按

《电机绕组绝缘电阻的测量规范》执行，确保数据准确性。实测数据显示，#12机组转子引出线绝缘电阻从2019年的1200MΩ降至2024年的85MΩ，工频耐压值从2200V降至1500V，呈现明显下降趋势。模型训练后得到发展系数 $a = 0.032$ ，灰作用量 $u = 186.5$ ，状态转移矩阵显示“预警”到“失效”的转移概率为0.12。验证结果表明，灰色-马尔可夫组合模型预测值与实测值的平均相对误差为3.8%，远低于单一灰色模型的11.2%和BP神经网络模型的8.5%。对该机组预测的转子引出线绝缘剩余寿命为1.2年，与6个月后出现绝缘击穿故障的实际情况高度吻合，验证了模型的可靠性。基于该模型对油房庄风电场135台机组进行全面寿命评估，结果显示32台机组转子引出线绝缘剩余寿命不足2年，需立即改造；68台机组剩余寿命2 - 5年，建议限期改造；35台机组剩余寿命超过5年，可维持定期监测，为改造优先级划分提供科学依据^[2]。

3 基于预测结果的转子引出线绝缘改造方案设计

3.1 改造目标与原则

结合寿命预测结果与现场运行需求，明确改造核心目标：将转子引出线绝缘剩余寿命延长至15年以上，转子引出线绝缘电阻稳定在500MΩ以上，工频耐压试验满足1760V/1min无击穿要求，同时降低施工对机组运行的影响，单台机组改造停机时间控制在8小时内。改造遵循三项原则：一是材料升级与工况匹配原则，选用耐温、耐振动、耐电晕的高性能材料；二是工艺标准化原则，制定统一施工流程确保改造质量；三是安全优先原则，严格执行风电场安全作业规范。

3.2 改造材料优化选型

基于老化机理分析与寿命预测需求，对改造材料进行系统性优化，核心材料选型如下表所示：

材料名称	规格参数	选型依据	数量需求
转子相引出线	185*2650mm, H级绝缘, 耐温 $\geq 185^{\circ}\text{C}$	耐温等级比原B级提升, 适应150℃高温工况, 绝缘层采用聚酰亚胺复合结构	135件
耐电晕绝缘带	5462-1S13×20, 耐电晕强度 $\geq 20\text{kV/mm}$	抵御局部放电侵蚀, 比普通绝缘带寿命提升2倍	若干
弹性连接片	ZKDLZZ-X-1105, 导电率 $\geq 98\%$	吸收振动能量, 减少机械磨损, 降低接触电阻	135件
银焊条	含银量 $> 20\%$, 熔点 650°C	确保焊接接头导电性能与机械强度, 避免虚焊漏焊	若干
电缆夹	ZKDLZZ-X-002, 阻燃等级V0	强化固定效果, 减少振动摩擦, 原电缆夹统一更换	135个

所有材料进场前均进行抽样检测，绝缘材料需通过工频耐压与耐温试验，金属部件需满足导电性能要求，确保材料质量符合改造标准。

3.3 精细化施工方案设计

结合油房庄风电场机组结构特点，制定“安全管控 - 精准拆解 - 规范改造 - 严格验收”四阶段施工方案，总工期为45天，人员分3组并行作业，每组配置1名安全负责人、2名技术人员、3名施工人员。第一阶段为安全管控准备（1天/台）：携带工作票至风场主控室办理停机手续，将机组置于急停状态，液压锁死高速刹车盘，在塔基控制柜悬挂“禁止合闸，有人工作”标识牌。施工人员佩戴安全帽、双钩安全带，完成安全交底后通过免爬器登塔，在机舱内设置安全防护围栏，检查手拉葫芦等吊装设备可靠性。第二阶段为精准拆解作业（3小时/台）：按“外部部件 - 传动系统 - 绝缘部件”顺序拆解，核心步骤包括：用3mm内六角拆除编码器固定螺栓并妥善存放；使用13mm套筒棘轮拆除滑环室后挡板8颗螺栓；通过8mm内六角拆除转子引出线与滑环的连接螺栓；采用27mm呆扳手拆卸碳刷支架固定螺栓，按住卡簧取出碳刷架。拆解过程中对风扇座与扇叶相对位置做精

准标识，避免影响转子动平衡^[3]。第三阶段为核心改造施工（3小时/台）：首先用角磨机切割旧相导线，清理焊接部位氧化物；采用含银焊条焊接新型弹性连接片与H级绝缘引出线，确保焊缝饱满无虚焊；实施多层绝缘包裹工艺，先用5462 - 1S耐电晕云母带半叠包3次，每层涂抹室温固化胶，再用ET100无碱玻璃丝带半叠包2次，相导线空隙用羊毛毡填塞并固化；更换全新电缆夹固定引出线，确保间距均匀、固定牢固。第四阶段为复位与检测（1小时/台）：按拆解逆序安装部件，依据标识复位风扇扇叶，使用30mm棘轮紧固发电机非驱动端大盖螺栓；安装完成后清理机舱内碳粉与杂物，恢复安全措施。启动机组进行空载测试，检测转子引出线绝缘电阻、三相不平衡度等参数，确保符合标准。

3.4 质量与安全管控措施

质量管控实行“三级检验”制度：施工班组自检重点检查焊接质量与绝缘包裹厚度，技术人员复检聚焦转子引出线绝缘电阻与安装精度，项目监理终检执行工频耐压与振动检测。明确质量否决项：焊接部位出现漏焊虚焊、转子引出线绝缘电阻低于500MΩ、振动幅值超过 2.0m/s^2 的机组需返工处理。安全管控强化“双监护”机

制：机舱内作业实行1人操作1人监护，地面设置安全瞭望岗，实时监控登塔人员状态。制定应急处置预案：若施工过程中出现转子引出线绝缘击穿，立即启动急停程序，切断电源后组织人员撤离；若发生人员坠落险情，通过机舱救援设备实施紧急救援。所有施工人员需经风电场安全培训考核合格后方可上岗。

4 改造效果验证与效益分析

4.1 技术指标验证

改造后对135台机组全面检测，核心技术指标达设计要求。转子引出线绝缘电阻平均值达820MΩ，较改造前提升超10倍，热态绝缘电阻稳定超100MΩ，远超标准；工频耐压1min无击穿，匝间冲击耐压达2500V；转子振动幅值控制在1.8m/s²内，避免绝缘机械磨损。对#12机组跟踪监测12个月，预测其转子引出线绝缘剩余寿命15.3年，实际绝缘电阻月降幅控制在0.5%内，验证长效性。且改造后机组启动响应时间缩至30秒，发电效率提升1.2%，运行稳定性未受影响^[4]。

4.2 经济与安全效益分析

经济效益上，改造项目总投资860万元，较传统方案，10年周期内避免3次重复改造，节省1200万元。改造前年均因转子引出线绝缘故障停机28次，每次损失约5万元，改造后降至2次，年减少损失130万元，投资回收期6.6年。H级绝缘材料降低运维工作量，运维人员减30%，降低人力成本。安全效益上，消除短路、漏电风险，未发生相关安全事故，按标准提供3年质保与免费技术支持，保障风电场安全稳定运行。

5 转子引出线绝缘运维的优化建议与未来展望

5.1 现存问题与优化方向

项目实施发现，转子引出线绝缘运维存在两个问题：一是寿命预测模型实时性欠佳，依赖定期检测数据，难以动态评估运行状态；二是偏远风电场材料运输与储存困难，聚酰亚胺材料需避光防潮，增加了运维成本。

因此，优化方向有三：其一，开发基于物联网的在

线监测系统，实时采集绝缘电阻、温度等参数，实现寿命动态预测；其二，建立区域材料储备中心，优化物流，保障材料供应及时与储存质量；其三，加强施工人员培训，着重提升焊接、绝缘包覆等关键工序的操作技能。

5.2 未来研究展望

未来相关研究可从模型、材料、工艺三维度深入推进。模型方面，引入人工智能算法，利用大数据分析，构建智能化闭环系统，实现故障预警、寿命评估与运维决策的智能化管理；材料方面，研发新型纳米复合绝缘材料，其耐老化、抗振动性能更优，可延长设备寿命、降低成本；工艺方面，探索机器人自动化施工技术，解决高空作业效率低、质量不一问题，推动绝缘改造向工业化、规模化升级。

结束语

本文以大唐定边油房庄引出线改造项目为实践基础，通过绝缘老化机理分析、寿命预测模型构建、改造方案设计与验证的完整研究链，解决了转子引出线绝缘管理的精准化问题。改造实践表明，该方案可显著提升转子引出线绝缘性能、延长使用寿命并降低运行风险。未来可将寿命预测模型与风电场智慧运维平台融合，实现转子引出线绝缘状态实时监测与寿命动态更新，同时拓展模型在其他电机设备绝缘管理中的应用，为新能源装备运维技术升级提供更广泛的支撑。

参考文献

- [1]陈强.超高压电力设备绝缘老化机理研究[J].高电压技术, 2021, 47(3): 567-574.
- [2]李娜.基于数据驱动的电力设备寿命预测模型研究[J].电力系统自动化, 2022, 46(5):78-85.
- [3]唐伟,刘圳,徐玮宏,等.牵引变压器绝缘介电特性模拟与老化分析[J].电工电能新技术,2025,44(01):1-9.
- [4]傅振兴,陈孔华.探究变压器绝缘老化检测试验及寿命评估对策[J].大众标准化,2025,(02):160-162.