

安全系统工程在风电场电气安全风险中的应用研究

李子昂 刘洋 侯杰 贺越霞
内蒙古智慧运维新能源有限公司
DOI:10.32629/hwr.v10i6.7022

[摘要] 面向沿海风电场电气系统强耦合与高不确定性运行特征,研究引入安全系统工程方法构建全周期电气安全风险管理体系。以人机环境管耦合视角开展危险源识别与风险评估,采用故障树分析梳理变压器绝缘老化、开关柜受潮电弧短路、电缆接头过热及雷暴暂态过电压等关键故障链路,并以风险矩阵建立风险分级,按风险值模型实现控制对象排序。在此基础上提出以多屏障为核心的安全设计优化策略与基于SCADA的数据汇聚、阈值预警和联动处置的实时监控闭环。结果表明,系统化评估牵引的设计加固与运行闭环可显著提升风电场电气安全风险控制能力,并为持续改进提供可追溯的数据依据。

[关键词] 安全系统工程; 风电场; 电气安全; 风险评估; 在线监测

中图分类号: X934 **文献标识码:** A

Application Research of Safety System Engineering in Electrical Safety Risk Management of Wind Farms

Ziang Li Yang Liu Jie Hou Yuexia He

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

[Abstract] Facing the strong coupling and high uncertainty characteristics of the electrical system in coastal wind farms, this study introduces safety system engineering methods to establish a full-cycle electrical safety risk management pathway. From the perspective of the human-machine-environment-management coupling framework, hazard identification and risk assessment are carried out. Fault tree analysis is employed to identify key fault pathways such as transformer insulation aging, moisture-induced arc short circuits in switchgear, overheating of cable joints, and lightning-induced transient overvoltages. A risk matrix is used to establish risk classification, and a risk value model is applied to prioritize control objects. Based on this, a safety design optimization strategy centered on multiple barriers is proposed, along with a real-time monitoring closed loop that integrates SCADA-based data aggregation, threshold-based early warning, and coordinated response actions. The results indicate that the systematic assessment-driven design reinforcement and operational closed-loop control can significantly enhance the electrical safety risk control capability of wind farms and provide traceable data support for continuous improvement.

[Key words] safety system engineering; wind farm; electrical safety; risk assessment; online monitoring

沿海风电场长期处于盐雾、高湿凝露与频繁雷暴等环境应力下,电气系统由箱式变压器、集电线路、开关柜与站用供电回路等环节耦合构成,故障具有定位难、扩展快与恢复时间长等特性,易引发人身伤害、设备损毁与并网可靠性下降。传统以经验检修和事后处置为主的管理方式难以覆盖风险的动态演化过程。为实现风险管理前移与全周期闭环控制,有必要引入安全系统工程,将危险源识别、风险评估、控制措施配置与验证反馈纳入统一框架,从系统层面提升风电场电气安全治理的可量化与可持续能力。

1 安全系统工程与风电场电气安全风险概述

风电场电气系统由箱变、集电线路、开关柜及站用供电回路耦合构成,受盐雾腐蚀、高湿凝露等外部条件牵引,易致绝缘衰退、接地失效等问题链式传导放大。从工程管理看,电气安全风险是设备状态、作业行为、环境应力与管理控制共同作用下的动态过程,尤其长电缆敷设与多点接地场景中,故障具定位难、扩展快、恢复久特性,故需将风险管理前移至设计、建设、运维全周期^[1]。安全系统工程以系统思维为核心,将危险源识别、风险评估、控制配置及验证反馈纳入统一框架,研究人机环境要素耦合关系,规避经验检修滞后性。结合风电场景,风险管理围绕设备本体失效模式、保护自动化策略有效性、检修隔

离与验电接地质量、应急资源响应能力等维度展开，关联并网可靠性、停电损失及触电灼伤后形成量化对象^[2]。

2 安全系统工程在风电场电气安全风险管理体系中的核心应用

2.1 风电场电气系统风险评估模型构建与应用

从安全系统工程把风电场电气系统视为人机环境管耦合系统来开展分析时，风险评估需同步刻画故障链条与管理屏障的有效性，故障树分析侧重把顶事件分解为设备失效、保护拒动以及作业隔离偏差等基础事件，用以追溯变压器绝缘老化导致相间击穿、开关柜母排受潮引发电弧短路、长距离电缆接头接触电阻增大诱发过热等关键路径；风险矩阵法则把发生可能性与后果严重程度映射为可比对的风险等级，从而把不同电气风险点纳入同一决策尺度^[3]。结合江苏盐城东台沿海某200 MW风电场的运行场景，设备长期暴露于高盐雾与高湿凝露环境，集电线路跨距大且接地点分布离散，风险识别阶段需把箱式变压器套管污秽闪络、开关柜局放发展、35 kV电缆护层破损引起的接地电流异常，以及雷暴诱发的暂态过电压共同纳入评估对象，并把检修期间验电接地执行质量作为影响可能性修正的重要因素。为把评估结果从定性描述转化为可排序的控制依据，风险值按可能性与严重程度的乘积进行计算，便于在同一风电场内对变压器、开关柜与电缆等风险点形成等级分布并据此配置资源。基于风险值的分布结果，评估阶段即可把需要优先采取的控制对象锁定在高风险区段，并把后续安全设计的防护层级、设备选型与回路冗余要求建立在可追溯的量化依据之^[4]。

2.2 风电场电气安全设计优化策略

鉴于风险评估揭示的主要矛盾集中在雷电过电压通道、潮湿盐雾引起的绝缘劣化以及单点失效对停电范围的放大效应，安全系统工程更倾向于以多屏障思路去重构电气安全设计，使防护措施在空间与功能上形成递进关系。防雷接地方面，把风机塔筒与升压站的外部接闪引下通道、场内接地网以及关键设备端口的浪涌限制功能进行统筹，接闪装置将直击雷电流导入接地网，接地网通过降低接地电阻与均压控制来抑制跨步电压，同时在箱变低压侧、开关柜进出线端与通信电源端口配置浪涌保护器以削减残压对绝缘薄弱点的冲击，这类多级防护更契合沿海雷暴频繁且土壤电阻率波动大的现实条件^[5]。面向盐雾凝露环境，设备选型需把耐环境能力作为约束条件纳入设计输入，箱式变压器宜选用具备更高爬电比距与密封等级的套管与端子结构，开关柜则把防凝露加热、母排绝缘包覆以及抗局放结构设计融入成套配置，并把电缆附件的防水密封与屏蔽连续性作为验收关键点。进一步观察系统可用性约束后，关键回路的冗余设计能够降低单一故障引发的连锁停电概率，站用电回路宜布置双电源供电并配置自动切换逻辑，保护与测控装置的电源与通信链路则需考虑独立供电与隔离接口，避免保护拒动与误动在同一故障情境下被共同触发。上述设计优化以风险等级分布为牵引，把有限投资集中于高风险链路，从而使控制措施具备更强的落地性与可维护性。

2.3 风电场电气安全监控与实时控制系统搭建

面向运行阶段风险水平的动态漂移特性，电气安全监控与实时控制系统需把状态感知、阈值预警以及联动处置整合为闭环机制，避免风险评估停留在静态文档。系统架构上可依靠SCADA平台作为数据汇聚与控制执行的核心，把箱变油温与绕组温升、电缆接头温度、开关柜局放强度、绝缘电阻以及接地电流等关键量纳入实时采集，同时把保护装置事件记录、开关分合位状态与故障录波信息接入同一数据总线，便于对异常演化开展关联分析。为提高预警的可操作性，阈值应与设备热稳定与绝缘裕度相匹配，例如当变压器油温超过85℃时触发分级告警并联动启动强迫风冷或油泵控制，当电缆接头温度出现持续上升且与负荷不匹配时推动限载指令与检修工单同步生成，开关柜局放指标越限则把除湿加热投入、间隔退出与巡检核查形成联动策略。结合东台沿海风电场的运行组织方式，监控系统还需把海雾高发季节的环境湿度与凝露风险纳入预警逻辑，并把雷电定位与浪涌计数器数据作为暂态过电压的触发证据，从而在雷暴窗口期提前调整检修隔离安排与关键设备运行方式。依靠上述监测与控制的集成，风电场电气系统能够在异常萌芽阶段获得更及时的干预条件，使风险控制从事后处置逐步转向基于状态的主动干预。

3 风电场电气安全风险管理体系效果评估与持续改进

3.1 风电场电气安全风险管理体系效果评估

效果评估把安全系统工程导入后的风险水平变化当作可量化对象来开展对照分析，其评估边界需覆盖事故后果与管理屏障有效性两个层面，以避免仅以停电次数或单一缺陷数量去替代风险控制绩效。结合江苏盐城东台沿海某200 MW风电场的运维台账与SCADA事件记录，评估指标选取年度电气事故发生率、重大电气缺陷闭环周期、保护拒动相关事件数以及综合风险降低率等变量，以同口径统计周期把导入前后进行对比，形成与风险矩阵分级相衔接的结果解读框架。该风电场在导入前年度电气事故发生率为0.8次/年，导入后降至0.1次/年，同时综合风险降低率达到87.5%，并在缺陷闭环时长与保护相关事件上呈现同步收敛趋势，由此可把风险识别、设计屏障与运行监测的联动机制视为主要贡献项。各指标对比及变化幅度见表1，其用途在于把风险控制成效从经验判断转化为可追溯的管理证据链，并为后续改进提供基准线。

表1 风电场电气安全风险管理体系效果对比表

评估指标	应用前水平	应用后水平	变化特征
年度电气事故发生率(次/年)	0.8	0.1	显著下降
综合风险降低率(%)	0.0	87.5	风险水平收敛
重大电气缺陷平均闭环周期(d)	28	12	闭环速度加快
保护拒动相关事件数(次/年)	6	1	屏障有效性增强
雷暴期暂态过电压告警复现率(%)	22	7	过电压链路被抑制
电缆接头过热告警月均次数(次/月)	5	2	热风险受控

3.2 风电场电气安全风险管理体系持续改进机制

持续改进环节更适宜把PDCA循环当作闭环治理框架来使用，

其中P侧重把年度风险再评估纳入计划管理,D强调把设计优化与监控策略更新转化为可执行的工单与技改包,C把指标偏离与事件复盘纳入审查流程,A则把纠偏措施固化为标准与阈值库的版本迭代。结合东台沿海风电场的环境应力与设备老化并行特征,风险再评估以每年1次为基本频度,并把盐雾季凝露时段的局放趋势、雷暴窗口期的浪涌计数以及电缆接头温升偏离纳入同一数据底座,以便把风险矩阵中的可能性评分按最新证据进行校核。进一步观察运行策略的适配性,监控阈值宜随年度数据而动态修订,例如把变压器油温分级预警阈值由固定经验值调整为基于夏季负荷与散热能力的分段阈值,并把阈值触发后的处置路径与备件保障时限绑定,从而降低告警疲劳对执行质量的侵蚀。为避免改进停留在制度层面,年度复盘需把典型事件的故障树路径与屏障失效点同步更新到风险清单,并把整改闭环结果回填至下一轮计划输入,使风电场电气安全风险在数据驱动下形成可持续的迭代优化链条。

4 结语

研究以安全系统工程为主线,贯通风电场电气安全风险从识别、评估到控制与验证的逻辑链条,形成以风险分级牵引资源配置、以多屏障设计抑制关键故障链路、以在线监测与联动处置实现运行闭环的管理方法。工程应用结果表明,该路径能够同步降低事故发生概率与扩大后果,缩短缺陷闭环周期并提升保护屏障有效性,使风险控制从静态台账转向基于证据的动态校

核。面向后续应用,建议以PDCA机制固化年度风险再评估、阈值库与处置流程迭代更新,并将典型事件复盘持续回填风险清单与设计输入,推动风电场电气安全管理在数据驱动下实现长期稳定改进。

[参考文献]

- [1]李超,陈东,王威.风电场集电线路35kV铝芯电缆敷设方案设计和实施[J].光纤与电缆及其应用技术,2026,(03):35-37+42.
- [2]李岩,惠凯,刘威.无人化风电场站设备异常状态实时预警方法[J].电器工业,2026,(05):78-81+86.
- [3]戴学鹏,李伟超,党淳.基于轻量化边缘计算模型的无人化风电场设备异常预警研究[J].电器工业,2026,(05):69-73.
- [4]毛攀,谢振凯,张超.基于多模态感知的风电场智能巡检系统路径规划[J].电器工业,2026,(05):74-77.
- [5]卜峰琦.风电场群协调控制与功率预测一体化技术设计与应用研究[J].自动化应用,2026,67(09):148-150.

作者简介:

李子昂(2000--),男,汉族,内蒙古自治区兴安盟人,本科,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:安全工程;消防工程;新能源发电;电气工程;自动化技术;建筑科学与工程。