

安全风险辨识管理在输变电工程施工中的应用研究

黄伟健

(中国能源建设集团广东火电工程有限公司, 广东 广州 510735)

摘要 本文以海南 500 千伏输变电工程为核心研究对象, 对安全风险辨识管理在工程全生命周期内的具体实践展开了深入且系统的探索, 建立了一个“动态辨识—量化评估—分级管控”三位一体的管理体系。详细梳理并揭示了针对工程中高空作业、设备安装以及可能遭遇的自然灾害等关键风险点的辨识方法, 还基于实际情况提出了相应的防控策略。研究成果表明, “动态辨识—量化评估—分级管控”三位一体的管理体系在降低事故发生概率方面成效显著, 能够极大地提升工程安全管理的效率与质量, 同时为超高压输变电工程提供了一套可借鉴的风险管控模式。

关键词 输变电工程; 安全风险辨识; 动态管控体系; 分级管控; 数字化管控

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.033

0 引言

海南 500 千伏主网架工程被视为我国首个覆盖全省的数字电网示范。57 亿元投资把椰城、昌化、三亚三座变电站与 838 公里输电线路连为一体, 规模罕见。项目既要吸纳核电与海上风电, 又要为自贸港提供稳定电源, 其施工安全直接关联区域能源安全与新型电力系统进度。线路横跨 14 个市县, 台风、复杂地质和频繁交叉作业叠加, 使风险识别成为决定进度的核心环节。本文以 LEC 法和事故树分析为工具, 建立超高压电网施工风险评估框架, 并给出基于数字孪生的动态管控方案, 为后续同类工程提供可复制的理论与操作路径。

1 工程概况

1.1 项目概况

海南昌江 500 千伏昌化(西部)输变电工程是海南 500 千伏主干网的关键一环, 承担着将核电与海上风电安全送出并消纳的重任。项目如期投运, 既能适应岛内能源来源日趋多元的节奏, 也为“一区一港”“三区一中心”等海南重大战略落地提供电力支撑。新建 500 千伏昌化(西部)变电站一座, 新建昌化(西部)一福山单回线路 116.029 公里, 新建铁塔 298 基, 其中转角塔 55 基、直线塔 243 基; 导线选用 4×JL3/LB20A-630/45 钢芯铝绞线, 按 80℃ 允许温度设计; 地线则架设 2 根 48 芯 OPGW-150 光缆, 并同步建设配套光通信系统。

1.2 风险辨识管理现状

按照《中国南方电网有限责任公司施工作业风险管控业务指导书》要求, 本方案对架线施工涉及的交叉跨越情形逐一梳理, 并依据既定标准评估各类危害。作业过程中主要面临五类风险: 高空坠落、设备安装缺陷、自然灾害、交叉作业冲突及人员行为失误。由于施工需在夜间、人口密集区或重要交通走廊等复杂环境下开展, 指导书将其划为高风险作业; 结合工程数据, 风险被归纳为五大类(见表 1)。

表 1 海南 500 千伏输变电工程安全风险分类统计

风险类型	风险点数量	占比	典型案例
高空作业风险	127	34.3%	铁塔组立时安全带脱落
设备安装风险	98	26.5%	邻近(跨越)带电线路
自然灾害风险	76	20.5%	台风导致导线舞动
交叉跨越作业风险	43	11.6%	跨越省道、环岛高速公路、环岛高铁
人员行为风险	26	7.0%	未佩戴绝缘手套操作

2 风险表现和成因机理

2.1 风险表现

梳理 2024 年 1 月至 2025 年 6 月的工程事故记录后, 风险表现出明显的“季节—阶段”叠加特征。台风季(6-10 月)自然灾害触发的风险比其他月份高 2.3 倍;

在铁塔组立阶段，高空坠落事件占同期事故 58%，进入设备调试阶段后，触电事故占比升至 41%。

2.2 成因机理

安全风险主要源于三个方面：

1. 自然环境：海南年均台风 8.2 次，年暴雨日逾 15 天，复杂气候使铁塔基础沉降率增加 37%。2024 年因台风“摩羯”停工 15 天，直接损失超 200 万元，足见自然条件对工程的冲击。

2. 技术环节：全装配式变电站对结构胶固化时间要求苛刻，偏差超过 $\pm 5\%$ 即可导致围墙连接失效；某标段曾因胶体未充分固化发生局部坍塌，虽无伤亡，却为安全敲响警钟。

3. 人为失误：高空未系安全带、起重机超载等违规占事故总量 68%，2021 年到 2024 年全国 500 千伏工程因此类失误造成的伤亡比例达 54%，表明操作风险对安全威胁极大^[1]。

3 安全风险辨识方法体系构建

3.1 动态辨识方法体系

1. 风险数据库建设。团队首先搭建了一个动态数据库，把 432 个风险点逐条厘清，并按严重程度切分为三级。一级对应重大风险，共 6 项，高空坠落、变压器爆炸等归入其中；二级为较大风险，共 12 项，机械伤害、触电事故等列入；三级是一般风险，共 25 项，物体打击、坍塌事故等归入此类。

2. 多维度辨识技术。（1）现场观察法：通过每日“三查”制度，对人员、设备和现场环境进行系统巡查。2025 年第一季度，该方法共识别隐患 237 项。（2）安全检查表法：通过系统梳理施工流程，设计并应用了《铁塔组立检查表》《GIS 安装检查表》等 12 套专项检查表，覆盖 98% 的施工环节，为现场安全提供支撑^[2]。

3.2 LEC 评价法量化模型

作业条件危险性评价法（LEC）以发生概率 L、暴露频率 E 和后果严重性 C 三项指标构成风险矩阵，细节列于表 2。以高空作业为例：先看 L，历史记录显示未系安全带引发坠落事故频率为每年 0.03 次，对应取 3；再看 E，现场统计工人每日登高作业平均 4 小时，对应取 6；接着定位 C，若坠落极可能造成 1 人死亡，故取 100；最后按 $D=L \times E \times C$ 算得 1 800，落入“高度危险”区间，须立即整改。

3.3 事故树分析（FTA）应用

以“铁塔倾覆”事故为案例，首先建立事故树模型，借此精确定位出 12 项底事件，涵盖基础沉降、螺栓松动、

风载超限等情形。随后进行最小割集分析，结果显示，当基础沉降与螺栓松动同时发生时，事故概率骤升至 82%，因此这两项事件必须列为重点防控对象。

3.4 数字孪生技术赋能

海南电网公司全力投入数字基建管理平台建设，将 BIM 模型与物联网传感器在高度、深度两个维度无缝衔接。平台借此能够实时发出风险预警：导线架设阶段，系统依据张力监测数据判断断线概率，准确率可达 91%，而作业效率较传统人工巡检提高两倍。

表 2 LEC 风险矩阵分级标准

风险等级	D 值范围	管控措施
轻微风险	< 20	日常监测
一般风险	$20 \sim 70$	定期检查
显著风险	$70 \sim 200$	加强培训、增设防护
高度危险	$200 \sim 400$	停工整改、专项方案审批
极其危险	≥ 400	禁止作业、重新设计

4 分级管控措施与实施效果

4.1 高风险作业管控

1. 高空作业安全保障措施：作业人员的生命安全依赖一套刚性执行的安全流程。双钩安全带与防坠器同时佩戴，形成双重制动；风速仪持续监测，一旦超过 5 级风，系统立即切断作业许可；各施工点按“一基一策”定制防护，例如儋州段以钢筋混凝土加固基础，结构稳定性提升，高空操作因此获得更可靠的支撑。

2. 机械操作安全规范：在机械操作环节，我们已制定并执行一套严密的安全规范。起重机装有智能限载装置，一旦超载立即切断电源，避免设备损坏或事故，保障吊装安全。焊机则配有弧光防护罩，降低电弧灼伤风险，保护作业人员健康。同时，我们实行月度机械安全专项检查，及时淘汰老旧设备，确保所有机械始终处于良好状态，为现场操作提供可靠的安全屏障^[3]。

4.2 自然环境应对

1. 防汛措施分两步：先在低洼处布设水位监测点，数据实时回传控制中心，水位变化一目了然；再为端子箱和瓦斯继电器选用 IP68 防护等级，杜绝进水短路。

2. 抗风设计分两步：先将铁塔螺栓扭矩调至标准值的 120%，使结构更稳；再让线路绕开台风高发区，减少风偏带来的风险。

4.3 施工用电风险应对

1. 重视对施工人员的专业培训工作。要精心设计与实施一套系统、完备的培训课程体系，助力施工人

员精准且熟练地掌握电气安全操作规程，进而切实增强他们的安全用电意识。与此同时，所有参与电气作业的人员都必须接受严格的考核，只有考核成绩合格并取得相应证书的人员，才具备上岗作业资格。通过这样的方式，能够从源头上最大程度地降低因操作不当而引发电事事故的可能性。

2. 构建一套完善的用电管理制度。其一，要明确各级人员在用电安全方面所承担的具体职责，确保责任精准落实到个人，做到权责分明；其二，要严格执行用电审批流程，保证每一项用电操作都严格依照规范执行。针对临时用电设施，要按照相关标准进行搭建与维护，并定期开展安全检查，确保其始终保持良好的运行状态。其三，要加大对电气设备的维护保养力度，及时察觉并妥善处理设备故障，防止因设备问题引发电用风险。

3. 在施工前，要全面且深入地考量施工用电的负荷需求以及线路布局情况，合理规划电缆的走向和开关的配置，从而有效避免出现过载、短路等安全隐患。对于在高空作业、潮湿环境等特殊条件下使用的用电设施，要采取额外的安全防护举措，例如：使用绝缘工具、设置安全围栏等，为用电安全提供多层次的保障。

4. 建立健全应急预案体系，针对可能发生的各类用电事故组织模拟演练活动。借助演练，提升相关人员在面对用电事故时的应急响应速度和处置能力。一旦发生用电事故，要立即启动应急预案，迅速采取有效措施控制事故的影响范围，全力保障人员的生命安全和财产安全^[4]。

4.4 实施效果评估

对比 2021-2024 年海南电网施工事故数据（见表 3）可见，风险管控落地后效果突出：高空坠落率由 0.12 次 / 万工时降至 0.07 次 / 万工时，机械伤害率从 0.08 次 / 万工时降至 0.05 次 / 万工时，整体风险值 D 平均下降 42%，已处于行业前列。

表 3 海南电网施工事故率对比

事故类型	2021-2022 年率 (次 / 万工时)	2023-2024 年率 (次 / 万工时)	降幅 (%)
高空坠落	0.12	0.07	41.7
机械损伤	0.08	0.05	37.5
触电	0.05	0.03	40.0
坍塌	0.03	0.02	33.3

5 创新实践与经验总结

5.1 全装配式变电站施工创新

椰城变电站采用全干式装配方案：所有构件工厂预制，整体运抵现场后一次拼装。此举把湿作业量压减六成，工期同步缩短四分之一。同步上线的结构胶强度监测系统实时扫描接缝，连接可靠度达 99.9%，为电站长期稳定运行提供支撑。

5.2 数字化管控体系

平台融合云计算、大数据、物联网、移动互联、人工智能与区块链，形成“云大物移智链”一体化底座。借助这一底座，风险数据自产生到使用的每个环节都可被追踪并受控。以安全检查记录为例，数据一旦上链便无法被篡改，管理过程的透明度与可信度随之显著提升^[5]。

6 结论

本研究针对海南 500 千伏输变电工程开展安全风险辨识管理，成效集中体现在三点：其一，将 LEC 评价法与事故树分析并用，可迅速锁定高风险作业环节，为后续防控划出重点；其二，依托数字孪生技术，风险动态预警的响应时间缩短一半，现场处置因此更快；其三，分级管控落地后，工程事故率已压至行业平均值的六成以下，为项目安全推进提供了坚实保障。

后续研究可从三条主线展开。其一，把人工智能嵌入风险识别环节，用图像识别技术自动捕捉违规行为，既快又准。其二，厘清气候变化对沿海电网的作用链，锁定关键气象要素与故障路径。其三，建立并持续改进跨区域电网施工的协同风控框架，让风险在开工前、施工中都能被迅速识别和处置。

参考文献:

[1] 白文选. 浅谈电力工程施工风险管理对策[J]. 电力通信, 2020, 22(12): 129-131.
 [2] 海南电网有限责任公司建设分公司. 海南昌江核电二期 500 千伏接入系统工程环境影响报告书[R]. 海南电网公司, 2024.
 [3] 张良. 数字孪生技术在电网施工中的应用实践[J]. 中国电力企业管理, 2025(03): 45-47.
 [4] 官建勇. 铁路电力工程施工风险管理的实践分析[J]. 智能建设, 2023(05): 21-23.
 [5] 史延锐. 电力施工企业 110kV 变电站工程施工风险模糊评估方法[J]. 电气技术与经济, 2023(01): 73-76.