

# 高海况环境下海岛配电网可靠性提升综合管控路径研究

王旭东 卓亚楠 方潮海 周 洁

国网浙江省电力有限公司舟山供电公司 浙江 舟山 316000

**摘要:** 针对高海况台风、盐雾、风暴潮多重侵袭下,海岛配电网故障频发、网架脆弱、抗灾韧性不足的问题,本文量化核心环境影响因子,剖析多维度故障机理与电网脆弱性。构建多因素耦合可靠性评估模型,结合蒙特卡洛模拟完成风险研判,从常态化预防、智能运行管控、应急处置三方面搭建综合管控体系。仿真验证该体系可大幅降低停电频次与时长,显著提升海岛电网抗灾供电可靠性。

**关键词:** 高海况环境;海岛配电网;可靠性提升;综合管控路径

**引言:** 海岛配电网长期面临极端高海况侵袭,强风、暴雨、高浓度盐雾等恶劣环境,极易引发设备绝缘失效、杆塔损毁、线路跳闸等故障,叠加网架结构薄弱、应急保障能力有限等问题,导致电网供电稳定性差、灾害风险突出,严重制约海岛民生保障与产业发展。现有研究缺乏高海况多因素耦合的精准评估与系统性管控方案。为此,本文开展可靠性提升管控路径研究,为海岛电网防灾减灾、安全稳定运行提供技术支撑。

## 1 高海况下海岛配电网故障机理与脆弱性分析

### 1.1 高海况环境特征与影响因子量化

(1) 高海况核心环境因子: 台风过境期间,电网承受极端风速可达17级以上,伴随300mm/日以上的暴雨及5-7m巨浪,盐雾浓度超0.5mg/m<sup>3</sup>。此类因子呈现显著季节性聚集特征,7-9月为灾害高发期,单次台风持续影响约72h,其中极值风速段集中在登陆前后6h窗口内,对电网构成多重物理侵袭。(2) 环境因子量化指标体系: 基于岛域微气象监测网络,确立风速、降雨强度、盐雾沉降率及潮位高度四项主控因子。通过历史故障数据反演,建立环境耦合函数 $\lambda = \lambda_0 \cdot \exp(\alpha \cdot v/v_{cn}) \cdot (RH/80\%)^\beta$ ,其中 $v$ 为10min平均风速,RH为相对湿度,实现设备故障率与环境参数的定量关联。

### 1.2 海岛配电网典型故障机理分析

(1) 一次设备故障机理: 风偏闪络因导线水平偏移超出绝缘裕度引发相间短路;杆塔倾覆主因基础冲刷导致承载力下降,当风速超35m/s时倒塔率急剧攀升;盐雾在绝缘子表面形成导电膜,泄漏电流增大至mA级诱发沿面放电;海缆受锚害及潮汐磨损,外护层破损后水分渗入加速绝缘老化。(2) 二次系统故障机理: 强风致微波天线增益下降,误码率升至10<sup>-3</sup>量级引发遥控中断;盐雾侵入测控装置导致电源模块短路;保护装置在谐波畸变率超8%时频发误动,低频振荡下方向元件灵敏度衰减致拒动率上

升约40%<sup>[1]</sup>。(3) 电网连锁故障机理: 单条馈线跳闸后,潮流经联络开关转移致使相邻变压器负载率骤升至120%以上,过载保护级联动作形成“故障-过载-跳闸”传播链,区域停电范围呈指数扩张直至孤岛运行。

### 1.3 海岛配电网运行脆弱性评估

(1) 脆弱性评价指标选取: 设备耐受度涵盖杆塔抗风等级与绝缘子爬距;网架结构以N-1通过率及线路分段数为量化依据;运维保障聚焦抢修到达时效及备品储备系数;应急能力考察黑启动时间与分布式电源渗透率。

(2) 脆弱性评估模型构建: 采用AHP确定主观权重,熵权法基于信息熵修正客观权重,通过最小二乘组合赋权得到综合评价 $W = \lambda W_{AHP} + (1-\lambda)W_{熵权}$ ,将电网划分为Ⅰ(高脆弱)、Ⅱ(中脆弱)、Ⅲ(低脆弱)三级。

(3) 薄弱环节识别: 基于脆弱性热力图,定位出位于迎风面且无联络的10kV线路段、运行年限超15年的老旧箱变及单一通道供电区域,为差异化补强提供靶向目标。

## 2 高海况海岛配电网可靠性评估模型构建

### 2.1 配电网可靠性评估基础理论与指标体系

(1) 传统配电网可靠性评估理论以概率统计为基础,核心指标包括系统平均停电频率(SAIFI)、系统平均停电持续时间(SAIDI)、用户平均停电持续时间(CAIDI)及供电可靠率(RS-3),上述指标基于长期统计平均表征电网持续供电能力,但对于高海况下短时极端扰动的刻画存在固有局限。(2) 适配高海况的可靠性评估指标优化: 新增抗灾韧性指标,以极端工况下电网可维持供电负荷占比及非故障区段自愈用时衡量;故障恢复速率指标定义为单位时间内修复线路长度与恢复用户数之比;极端工况供电稳定性指标引入电压骤降频次与频率偏差累积量,量化台风眼过境期间电能质量劣化程度,形成“常规指标+韧性专项”的双层指标体系。

### 2.2 高海况多因素耦合可靠性评估模型

(1) 环境-设备-网架多因素耦合关系建模: 构建台风风速-盐雾沉降率-设备失效率三维响应面, 定义环境荷载因子 $E(t) = \omega_v \cdot (v/v_{crit})^2 + \omega_s \cdot (\rho/\rho_0)$ , 引入可靠性衰减系数 $\eta(E) = 1/[1+(E/E_0)^7]$ , 量化环境胁迫对设备可用率的折减效应, 实现多因素非线性耦合的数学表征。(2) 基于蒙特卡洛模拟的可靠性评估算法优化: 针对海岛电网馈线少、负荷密度低的小样本特征, 采用拉丁超立方抽样替代简单随机抽样, 在不增加抽样次数前提下提升极端尾部分布拟合精度; 引入半马尔可夫过程描述设备状态修复时间相依性, 适应高扰动工况下故障率非平稳演化的运行实际<sup>[2]</sup>。(3) 模型参数校准与边界条件设定: 基于海岛三年内历史台风事件数据, 以极大似然估计反演设备失效分布参数; 设定边界条件为风速 $\leq 50\text{m/s}$ 、盐雾浓度 $\leq 1.0\text{mg/m}^3$ 、潮位 $\leq$ 历史最高潮位, 超边界时模型输出警告并切换至保守估计模式, 确保评估结果贴合实际运行场景。

### 2.3 可靠性仿真分析与风险研判

(1) 典型海况场景仿真: 设定台风过境、台风登陆、强盐雾持续、风暴潮顶托四类场景, 分别模拟风速12级、14级、16级及盐雾浓度0.3/0.5/0.8 $\text{mg/m}^3$ 组合工况下的电网时序状态, 输出各节点失负荷概率及系统SAIFI预估值, 构建“场景-工况-可靠性指标”三维仿真数据集。

(2) 可靠性短板分析: 对比常规工况与高海况下的可靠性指标差异率, 以雷达图呈现各维度薄弱度排序。结果表明强盐雾场景下绝缘失效贡献度达45%, 台风场景下线路断线贡献度约52%, 明确防护加固优先级与差异化改造靶区。(3) 分级风险研判: 以风速、盐雾浓度、潮位三因子阈值划分四级标准——一般(风速 $\leq 10$ 级)、较大(10级 $<$ 风速 $\leq 13$ 级)、重大(13级 $<$ 风速 $\leq 15$ 级)、特别重大(风速 $> 15$ 级), 对应设定SAIFI阈值区间分别为 $\leq 0.5$ 、0.5~2.0、2.0~5.0、 $> 5.0$ 次/户·年, 匹配预警启动、抢修备勤、负荷转移及紧急停运四类差异化管控策略。

## 3 高海况环境下海岛配电网可靠性提升综合管控路径

### 3.1 常态化预防管控路径: 设备与网架韧性提升

(1) 设备抗海况升级改造: 针对高温高湿高盐雾环境, 优选防护等级 $\geq \text{IP65}$ 的全密封配电设备, 金属构件采用316L不锈钢或热喷涂铝合金, 防腐涂层 $\geq 300\mu\text{m}$ ; 绝缘子选用防污型硅橡胶复合绝缘子, 爬电比距 $\geq 35\text{mm/kV}$ , 憎水HC1级。杆塔基础采用高强灌浆料+环氧树脂防腐, 埋深由2.5m加深至3.5m, 抗风标准提升至50 $\text{m/s}$ 。制定《海岛配电网设备抗风防腐改造技术导则》, 分批次完成全岛升级。(2) 网架结构优化:

构建“手拉手”多端环网供电架构, 重要负荷区实现N-2主变冗余。合理部署分段与联络开关, 单条馈线分段增至4~6段, 非故障区段转供恢复比例 $\geq 85\%$ 。主干线路全部电缆入地, 消除风偏隐患; 次干关键档距增设防风拉线和间隔棒。目标年环网化率由45%提升至80%, 单线供电风险线路占比降至10%以内<sup>[3]</sup>。(3) 常态化巡检与隐患排查: 部署无人机自主巡检系统(红外热像+紫外检测), 配合杆塔倾斜传感器、绝缘子泄漏电流在线监测, 构建“天-地-云”立体巡检网络。依据气象预警提前72h启动特巡, 建立隐患分级数据库, 将盐雾附着量、基础冲刷深度、绝缘子老化指数等12项指标纳入动态评价。巡检频次由季度加密至月度, 台风季提升至周度, 实现识别—登记—整治—销号全过程闭环管理。

### 3.2 运行态智能管控路径: 源网荷储协同优化

(1) 分布式电源与储能协同调控策略: 建立以储能为核心、光伏与柴油发电为辅助的孤网协调框架。台风来临前24h储能满充备用, 光伏逆变器切换至虚拟同步机模式提供惯量支撑。风速攀升至20 $\text{m/s}$ 时, 储能快速响应平抑功率波动(响应时间 $\leq 100\text{ms}$ ), 频率偏差控制在 $\pm 0.2\text{Hz}$ 以内。风速超25 $\text{m/s}$ 时, 主动降低新能源出力至30%并增发柴油发电以保障稳定性, 采用模型预测控制算法滚动优化各单元出力计划。(2) 配电网动态重构技术应用: 基于实时拓扑识别与负荷预测, 采用改进二进制粒子群算法(惯性权重非线性递减)求解最优开关组合, 兼顾负载均衡与有功网损最小。故障隔离后5min内完成非故障区段负荷转供, 极端工况下优先保障医院、通讯基站、政府机构等重要用户。重构方案执行前经安全校验, 节点电压偏差 $\leq \pm 7\%$ , 线路负载率 $\leq 100\%$ <sup>[4]</sup>。

(3) 数字化管控平台搭建: 深度融合气象局台风路径数据、微气象站实测数据及SCADA/EMS运行数据, 基于数字孪生构建电网虚拟镜像, 实现未来4h运行状态滚动推演。平台内嵌智能预警引擎, 以风速、盐雾浓度、负荷水平为特征, 采用随机森林算法预测设备故障概率, 风险超阈值时自动生成预警等级及调控策略, 以三维可视化界面辅助调度决策。

### 3.3 应急处置管控路径: 故障快速恢复体系

(1) 应急预案分级体系: 依据风速等级及预计故障规模, 划分为Ⅳ级(蓝色, 10级 $<$ 风速 $\leq 12$ 级)、Ⅲ级(黄色, 12~14级)、Ⅱ级(橙色, 14~16级)、Ⅰ级(红色,  $> 16$ 级)。Ⅳ级启动预警值班与特巡; Ⅲ级实施重要负荷预转移与抢修队伍就位; Ⅱ级执行非核心馈线主动停电保护, 启动跨岛支援; Ⅰ级启动全岛黑启动与外部应急电源接入。每级明确启动条件、处置流程

及物资调配标准。(2) 应急供电保障方案: 配置移动式储能车 ( $\geq 2\text{MW}/4\text{MWh}$ ) 及集装箱式柴油发电机组 ( $\geq 5\text{MW}$ ), 总容量不低于全岛峰值负荷20%, 重要用户应急供电时长  $\geq 72\text{h}$ 。预制海缆快速接头与应急抢修浮箱, 制定海缆受损72h内临时复接规程。建立应急物资岛内外双储备机制, 关键备品备件岛上库存不低于7天用量, 签订陆上物资紧急调运协议, 确保交通中断时物资快速送达<sup>[5]</sup>。(3) 灾后快速复盘与优化机制: 台风过境后48h内完成故障统计、处置时间线回溯与预案执行评价。以实际故障数据修正设备失效率参数库, 动态更新可靠性评估模型。建立"一灾一档"数据库, 通过跨次台风纵向对比识别管控薄弱环节, 驱动应急预案版本迭代与策略持续优化, 形成"实战-复盘-改进"螺旋上升机制。

### 3.4 管控路径仿真验证与效果分析

(1) 仿真场景与参数设置: 基于DigSILENT/PowerFactory搭建海岛配电网仿真模型, 涵盖3座35kV变电站、8回10kV馈线、4组分布式光伏 (3MW) 及2组储能 (4MW/8MWh)。设置12级、14级、16级三级台风过境时序场景, 环境参数依据近五年实测数据拟合输入, 仿真时长为24h连续运行。(2) 管控策略有效性验证: 设置"无管控"与"综合管控"对比方案。仿真结果表明: 综合管控下SAIFI由2.85次/户·年降至1.12次/户·年 (降幅60.7%), SAIDI由8.6h/户·年降至3.1h/户·年; 16级台风场景下重要用户失电时间由4.5h缩减至0.8h; 故障后恢复供电比例由62%提升至89%; 频率最低点由49.2Hz提升至49.6Hz, 各指标均验证综合管控路径有效。(3) 管控路径优化与落地建议: 基于仿真结果提出分阶段实施路径——短期 (1年内) 优先完成关键设备防腐改造与数字

化平台上线, 投资约1200万元; 中期 (2~3年) 推进环网工程与储能配置, 实现环网化率80%; 长期 (5年) 完成全岛N-2冗余改造。同步建议出台《海岛配电网差异化建设标准》, 推动跨岛协同应急机制常态化, 形成"设备升级+智能管控+应急保障"三位一体的可复制推广方案。

### 结束语

本文系统阐明高海况下海岛配电网故障机理与脆弱性特征, 搭建适配极端工况的可靠性评估模型, 构建全流程、多层次的综合管控体系。经多场景仿真验证, 所提路径可有效优化电网运行状态、降低故障风险、提升灾后恢复能力。研究形成设备升级、智能管控、应急保障三位一体的方案, 可为沿海海岛配电网韧性改造与安全管控提供可复制的实践参考。

### 参考文献

- [1] 高中林, 陈鸣, 王安全, 等. 基于源网荷储一体化的新型海岛农村配电网构建与研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(03): 98-105.
- [2] 姜涛, 唐少南, 李雪, 等. 应对台风影响的海岛微网群韧性全过程提升[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6625-6640.
- [3] 李维波, 阮道杰. 基于改进灰狼算法和计及网损最低的岛礁配电网动态重构策略[J]. 中国舰船研究, 2025, 20(03): 210-218.
- [4] 王爱玉, 王金全. 基于北斗短报文通信的偏远海岛配电网自动化建设新模式[J]. 农村电气化, 2023, 11(03): 71-76.
- [5] 潘凯岩, 赵瑞峰, 刘宏达. 考虑分布式光伏灵活运行模式的配电网孤岛鲁棒划分方法[J]. 现代电力, 2024, 41(02): 189-196.