

热带气旋对核电站安全的影响及应对策略分析

巫君雄 王鹏飞 商志国 刘津文 戴维龙

广东省阳江市阳东区阳江核电有限公司 广东阳江 529500

摘要: 当前全球气候变暖正在加速演进,气候系统更加不稳定,近年来影响我国的热带气旋气候事件发生频率高、影响范围广、致灾性强。阳江核电站由于其沿海的地理位置、对安全的高敏感性、运行系统的复杂性,其受热带气旋影响的频率高、遭受影响大、灾害应对管理难度高,虽未导致核安全受威胁影响,但热带气旋影响导致的其他异常事件仍可能发生。因此分析热带气旋对核电站可能造成的影响,并针对风险因素进行分析,是现阶段防台风安全管理的重要内容之一。本文将历史热带气旋灾害事件和阳江核电站的设计基准为切入点,论述热带气旋可能对电站可能造成的影响,并针对设计薄弱点及对可能造成的影响进行应对策略分析,论证本质安全提升和组织管理强化在应对热带气旋中的重要作用。

关键词: 热带气旋;核电站;影响分析;应对策略分析

1 热带气旋影响分析

热带气旋是重要的天气系统,广义上指生成于热带或副热带洋面上的低压涡旋,是具有组织的对流和确定的气旋性环流的非锋面性涡旋。根据 GB/T 19201-2006《热带气旋等级》的定义,热带气旋划分为热带低压、热带风暴、强热带风暴、台风、强台风和超强台风六个等级。热带气旋产生的大风、暴雨以及导致的次生灾害具有巨大破坏力,对核电站的安全可能造成重大影响,分析主要的安全风险和应对策略对核电站的防御热带气旋有重要指导意义,有利于减少热带气旋造成的损失。

1.1 热带气旋导致的电站厂房和线路受损历史灾害事件分析

2018年,台风“玛莉亚”导致宁德核电站发生厂房局部破坏事件。2018年7月4日,第8号台风“玛莉亚”在美国关岛以东洋面生成。7月10日,台风“玛莉亚”的中心位于台湾宜兰东南约1080km,中心附近最大风力17级(58m/s)。10日傍晚减弱为强台风级(15级)。11日,台风“玛莉亚”在福建连江黄岐半岛沿海登陆,登陆时中心附近最大风力14级(42m/s)。11日晚,台风“玛莉亚”在江西境内减弱为热带低压。受台风“玛莉亚”影响,宁德核电厂3号机组汽轮机厂房东南角一外墙板脱落,脱落外墙板掉落至3GEV001TS厂变A上部,触发发电机100%定子接地保护报警。从国家气象部门所发布的数据来看,台风“玛莉亚”穿越台湾岛后在连江登陆,其在登陆前及登陆时的

强度已减弱,在宁德厂址的设计基准热带气旋包络范围内,实际上也小于当地历史上发生的最大台风“桑美”强度。在各电厂台风评价距离范围内来看,本次台风强度只占到中等偏上水平。由于登陆地点较近,台风“玛莉亚”给厂址造成的实际风速偏大,部分墙体彩钢板抗拔承载力不满足1.0kPa设计基本风压的要求,导致墙板松脱。2013年,台风“尤特”导致阳江核电站发生线路故障跳闸事件。2013年8月14日强台风“尤特”登陆期间,阳江核电厂内外部线路发生故障跳闸,保护均正确动作。电站先后失去500kV主开关站、220kV首澳站以及220kV音山站外部电源。台风“尤特”引起的线路频繁跳闸,其根本原因为强台风“尤特”登陆时风速超出线路设计标准,导致线路耐张塔跳线摆幅过大,对挂线金具、均压环、横担及塔身等发生风偏闪络,引起线路跳闸。台风“尤特”登陆时阳江核电厂附近录得10m高3s极大风速60.5m/s,10m高10min最大风速45.3m/s。由于500kV架空线设计风速为20m高风速,220kV架空线设计风速为15m高风速,根据风速高度换算公式,换算到15m和20m高风速分别为48.3m/s、50.5m/s。

1.2 核电站防风设计基准分析

(1) 厂房防风设计基准

以阳江核电站为例,根据阳江核电站根据最终安全分析报告,阳江核电站厂址百年一遇热带气旋经过陆地摩擦系数修正后影响厂址的最大可能风速为40.9m/s,达13级风力。根据《建筑结构荷载规范 GB50009-2006》、《压水堆

核电厂核安全有关的混凝土结构设计规范 EJ/T925-95》、《压水堆核电厂核安全有关的钢结构设计规范 EJ/1062-1998》，阳江核电站常规岛厂房 10 米高度 10 分钟设计风速为 41.4m/s，达 14 级风力，核岛厂房设计风速 80m/s，大于 17 级风力。

(2) 线路防风设计基准

阳江核电站 500kV 外部输电线路包括阳五甲乙线、阳鳌甲乙线、阳鳌丙线三条线路。阳五甲乙线路和阳鳌甲乙线设计基本风速为 37m/s，35m/s 和 33m/s，大跨越基本风速为 45m/s，均按无覆冰设计。原跳线为普通跳线，后结合南方电网公司企业标准《输电线路防风设计技术导则》的要求，线路原设计的软跳线改造为了鼠笼型硬跳线，改造后的最大设计风速为 41.4m/s，达 13 级。阳鳌丙线防风设计类似，比阳五甲乙线路和阳鳌甲乙线设计基本风速略高，最大设计风速为 43m/s，达 14 级。

1.3 核电站可能受到热带气旋强风的影响

统计 2013 年至 2023 年 10 年内历年影响广东沿海的台风中心最大风力，梳理发现其平均值达 14.3 级，达强台风级，且自 2019 年以来，呈现波动上升的趋势，结合国际气象组织对全球气候恶化的预测，未来在广东沿海的核电站将可能面临更严峻的考验。

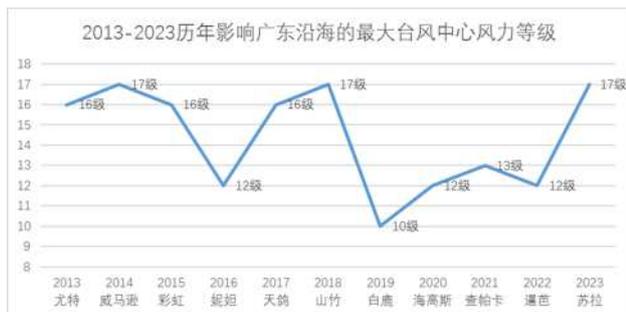


图 1 2013-2023 历年影响广东沿海的最大台风中心风力等级

(1) 核电站建筑物可能受到的影响

根据阳江核电站开展的汽轮机厂房、泵站厂房防风性能核算，在以 17 级超强台风作为载荷输入情况下，厂房建筑物主体结构构件及节点的承载能力和使用性能指标满足规范要求。但厂房的金属围护结构包括屋盖系统的屋面板间连接、外板-龙骨连接及龙骨-檩条连接、墙面系统的墙板-檩条连接、檩条、檩条-柱连接承载能力不满足 17 级超强台风的载荷。当 17 级超强台风影响核电站时，将可能出现类似宁德核电站 2018 年厂房局部破坏事件。从建筑物本身来看，金属围护结构的损坏将引入多种风险，包括损坏部件

形成的飞射物风险，热带气旋及其产生的飞射物可能进一步损坏常规岛除盐水罐、主蒸汽系统管道和主给水管道等露天布置的管道、取水口拦截网等安全重要设备。金属围护结构的损坏还将引入建筑物外围通风设备损坏和建筑物雨水倒灌设备受淹风险，通风系统的损坏将影响如柴油机等对运行温度有严格要求的系统设备运行，雨水倒灌将直接影响如汽轮机、励磁机、循环水泵等重要设备。上述引入的风险都将对机组运行安全的造成影响，严重时可能停机停堆。

(2) 核电站输电线路可能受到的影响

当热带气旋影响核电站时，雷击及热带气旋产生的极端风压、极大风力可能导致输电线路及附属结构损坏、塔杆倒伏。热带气旋作用下输电线路产生的风偏超过限值时，将可能导致发生线路短路。热带气旋夹杂的盐分、污秽附着在输电线路及相关设备上，也将可能导致发生线路短路。线路短路将可能导致失去厂外电源，对机组运行安全的造成影响，严重时可能停机停堆。

2. 热带气旋应对策略

2.1 本质安全提升

根据核电站防风设计基准、热带气旋历史灾害事件以及核电站可能受热带气旋影响的分析，建筑物防风和输电线路防风是核电站应对热带气旋的关键和重点。从本质安全的角度对建筑物、厂房附属构件、建筑物通风设备、输电线路等进行改造和提升是核电站预防和应对热带气旋影响最直接有效的策略。

(1) 重要建筑物防风提升

阳江核电站在对建筑物厂房实施防风等级核算和评估的基础上，对汽轮机厂房、泵站厂房、主蒸汽管道顶棚、常规岛废液储存罐厂房等多个重要建筑物厂房实施了厂房墙面及屋面防风加固提升优化，采用在墙板波谷处加密自攻钉、墙板搭接处加缝合钉，更换房顶墙背板，在柱与檩条之间增设斜撑杆，在梁跨中位置加檩托板，对于边角区在所有波峰位置处增加抗风钉，针对屋面防水薄弱位置涂刷防水涂料结合缝织聚布等多种工艺手段，进一步提高墙面、屋面的防风防雨能力，同时阳江核电站成立厂房防漏雨项目组对厂房漏雨缺陷进行专项整治。自 2021 年实施完成以来，阳江核电站厂房建筑物防风损坏及漏雨缺陷数量呈逐年下降趋势，且未出现类型宁德核电站的厂房局部破坏事件，从本质安全提升的角度实施预防和应对策略取得实效。

(2) 重要输电线路防风提升

阳江核电站针对热带气旋可能导致线路跳闸和受损问题,对 500kV 厂内架空线改造为电气廊道地下管线,包括新建电气廊道大桥、新增电气廊道安装调试及旧架空线拆除,核电站管辖的 500kV 线路转为了地下电气廊道管线,从本质安全的角度,从线路源头上避免了站内 500kV 线路因热带气旋影响受损的风险。针对 220kV 输电线路架空线,阳江核电站采取线路杆塔重建、杆塔局部加固、杆塔基础加固、更换导地线等改造方式,从本质安全的角度整体提升 220kV 输电线路防风能力,共计重建了线路杆塔 73 基,杆塔局部加固了 50 基,杆塔基础加固 36 基,更换导地线 60 吨,实现 220kV 辅助电源全部输电线路杆塔具备抵御 15 级台风能力,有效提高了 220kV 辅助电源可靠性,降低热带气旋对线路的影响。

2.2 组织管理强化

(1) 应急组织管理精细化

针对热带气旋可能造成的多种影响,阳江核电站从风险细化分析的角度,建立上游为《三防事件专项应急预案》,下游为专项处置组行动单的应对热带气旋应急预案体系,包括应对热带气旋影响线路安全及电源故障风险的电源应急处置组,应对雨水倒灌影响设备受淹风险的防水淹应急处置组,应对系统淡水供应及水库垮坝风险的水源应急处置组,应对冷却水取水口杂物和海生物堵塞风险的冷源应急处置组,应对柴油发电机应急电源故障风险的柴油机应急处置组,应对热带气旋破坏通信系统风险的通信应急处置组,应对热带气旋影响交通运输风险的后勤应急处置组,应对热带气旋导致人员受伤风险的医疗急救应急处置组,应对热带气旋破坏保卫周界风险的安全保卫应急处置组。以应急指挥部统筹、各应急处置组应急细化分工处置的策略,可全面立体有效应对热带气旋,高效处置热带气旋导致的异常事件。

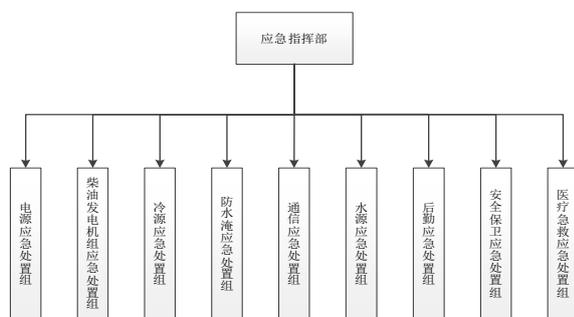


图 2 热带气旋应急响应组织体系

(2) 日常管理组织常态化

应急预案作为应对策略最后一道屏障,在真正面临热带气旋袭击之前,对热带气旋实施常态化的预防管理可以起到良好的持续备战效果。阳江核电站通过建立防热带气旋的日常管理小组,作为非应急组织对核电站应对热带气旋的准备工作进行统一推进和管理,包括制定年度防热带气旋工作计划、落实改进行动、演习演练、培训考核、交流对标、技术改进、管理巡视、预案适应性升版等工作。通过日常管理组织常态化的策略,利用管理小组的形式协调管理资源和落实常态化管理责任,可有效提升应急准备能力。

3 结论

基于上述分析,核电站的建筑物设计防风设计能力、输电线路防风设计能力是直接影响热带气旋破坏程度的重要因素,热带气旋对核电站的影响主要为建筑物受损和输电线路受损导致的重要设备故障以及核安全风险。根据国家气候中心预测,未来几年气候年景总体偏差,极端天气气候事件呈现多发态势,全球气候变暖正在加速演进,气候变化对我国影响深远,热带气旋作为影响沿海地区的重要的天气系统,我国沿海核电站的易受其影响。针对热带气旋对核电站的主要风险和影响,本文阐述了以本质安全提升和组织管理强化为重点的应对策略所能够给核电站带来的热带气旋防范能力提升作用,以阳江核电站在防范热带气旋影响的实践中所取得的实效进行印证,以期为核电站防范应对热带气旋的理论研究与实践提供一些借鉴。

参考文献:

- [1] 陶凯,廖新利,苏鹏 & 徐伟. 热带气旋多致灾因子综合风险评估研究进展 [J]. 水利水电技术,2024(6):1-12.
- [2] 叶荣辉,戈军,张文明 & 赵红军. 影响粤港澳大湾区的热带气旋统计分析 [J]. 水利水电技术,2020(7):37-43.
- [3] 张昆,黄全义,栗健. 中国沿海地区热带气旋危险性分析 [J]. 地理空间信息,2024,22(02):92-96.
- [4] 纪忠华,王璐,路雨,何汉源,张琨. 热带气旋强度变化对我国东南沿海核电厂址影响分析 [C]// 中国自然资源学会水资源专业委员会、中国地理学会水文地理专业委员会、中国水利学会水资源专业委员会、中国水利学会水文专业委员会、中国可持续发展研究会水问题专业委员会. 面向未来的水安全与可持续发展——第十四届中国水论坛论文集. 中国水利水电出版社,2016:296-301.