

低压交流再供电系统拓扑结构优化研究

黄怀铎 王 水 刘洪赐
中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518000

摘 要：文章聚焦核电厂大修期间低压交流再供电系统拓扑结构优化研究。首先阐述核电现场再供电基础理论与大修工况下典型供电拓扑特性，剖析现有核电再供电拓扑存在的人力物力浪费、可靠性不足、边界破损等痛点与优化需求，明确优化评价指标与约束条件。接着构建多目标优化模型，确定优化原则、函数及算法。随后从核电专属拓扑重构、现有供电方式适配、故障自适应、大修专项场景等方面开展拓扑优化设计。旨在提升核电大修供电可靠性、降低资源损耗、提升供电灵活性，满足核电厂检修期间用电需求升级与安全规范要求。

关键词：低压交流再供电系统；拓扑结构优化；供电可靠性

引言：在核电机组换料大修常态化与现场检修供电安全要求不断升级的背景下，低压交流再供电系统作为核电配电盘停役期间关键负荷供电核心，其拓扑结构优化至关重要。当前，传统临时拉缆、单一直供拓扑在核电大修场景中存在资源耗费大、安全风险高、防火屏障破坏、可靠性偏低等诸多痛点，难以满足核电检修安全、高效、合规的实际需求。本文深入剖析核电大修低压再供电基础理论与典型拓扑，针对性地开展拓扑结构优化研究，以提升系统综合性能，保障核电关键负荷不间断供电，为核电机组大修安全平稳推进提供有力支撑。

1 低压交流再供电系统基础理论与典型拓扑分析

1.1 低压交流再供电系统核心概念

低压交流再供电系统是核电厂大修配电的核心支撑环节，电压等级为380VAC/220VAC，经变换、分配、控制，将正常运行母线电能可靠输送至停役配电盘下游关键负荷，专门应用于核电机组换料大修检修场景，关乎机组检修安全与合规运行。其核心内涵包括停盘负荷应急补给、检修设备持续供电、合规负荷保供，通过合理拓扑与接线方式，实现电能安全转接、精准分配、合规供电。系统主要涉及LRT箱、再供电开关、分配电箱、PJ插头、临时电缆等核心设备，专为核电大修停役检修设计，区别于常规民用配电网，更强调安全隔离、供电可靠、边界合规，是保障核电大修顺利开展的关键设施。

1.2 典型低压交流再供电拓扑结构特性分析

核电现场低压交流再供电系统典型拓扑分为常规临时直供、LRT系统供电、分配电箱分路供电、PJ插头插接供电四类。临时直供拓扑以单路临时电缆端接为主，结构简单、部署灵活，适配零散小负荷保供，但需大量敷设临时电缆，破坏防火屏障。LRT系统供电拓扑为核电专属固定再供电拓扑，从LRT箱内直接端接，无需大量

临时线缆，针对常规大修负荷设计，但覆盖负荷有限、接口操作不便。分配电箱并接分路拓扑可同时供给多个负荷，适配多负荷集中再供电场景，但接线复杂、保护配合难度大。PJ插头插接拓扑拆装便捷，适配核岛、常规岛指定负荷，但大负荷粗电缆插拔难度高、易接触不良。各类拓扑均围绕核电大修工况设计，特性差异为优化设计指明方向^[1]。

1.3 现有拓扑结构核心痛点与优化需求

当前核电大修低压再供电系统现有拓扑结构在实际运行中面临诸多核心痛点，难以适配核电高效、安全、合规检修需求。一是资源耗费巨大，受制于电源数量、电缆敷设距离，大量临时电缆铺设与拆除，浪费大量人力、物力，拉长检修工期。二是供电可靠性偏低，存在接触不良、接地报警、绝缘异常等问题，触发主控报警，增加检修工作量。三是安全边界破损，跨列临时电缆导致防火屏障无法闭合，破坏实体隔离要求。四是覆盖范围有限、灵活性差，固定拓扑仅覆盖常规负荷，临时新增负荷无法满足，大负荷电缆操作困难。基于此，拓扑优化需聚焦降本增效、安全合规、可靠性提升、灵活适配四大需求，破解现有结构短板。

1.4 拓扑优化性能评价指标与约束条件

核电低压交流再供电系统拓扑优化，区别于普通配电系统优化，必须建立贴合核电安全规范的性能评价指标体系，同时明确电厂专属刚性约束条件，确保优化方案合规可行、落地有效。核心评价指标分为四大类，全方位衡量优化效果：（1）供电可靠性指标，涵盖故障停运时间、绝缘报警频次、供电稳定率、接头故障发生率，直观反映系统大修工况下持续保供能力，是核心考核指标。（2）经济性指标，涵盖临时电缆用量、人力投入、检修耗时、耗材损耗，最大限度降低资源损耗，控

制大修供电成本。(3)安全合规指标,包括防火屏障完整性、实体隔离合规性、触电风险等级、绝缘达标率,严守核电安全准则,杜绝安全违规问题。(4)灵活性指标,包括临时负荷适配性、操作便捷度、复役切换时长、扩容难度,适配大修灵活多变的供电需求。约束条件主要分为三类,均为不可突破的刚性要求:核电电气安全约束,包括保护定值匹配、绝缘电阻达标、防止保护误动拒动、接地规范;现场边界约束,不得破坏防火屏障与实体隔离,不得占用安全通道、检修区域;工况约束,适配大修停役窗口、负荷容量限制,符合电厂运行技术规范,不影响正常运行系统安全。

2 低压交流再供电系统拓扑多目标优化模型构建

2.1 优化设计原则

核电低压交流再供电系统拓扑多目标优化设计,需始终立足核电大修现场实际,遵循四大核电专属核心原则,兼顾技术可行性、经济合理性与现场合规性,杜绝脱离实操的理想化设计。安全合规优先原则,作为首要核心原则,以严守防火屏障、保障实体隔离、杜绝触电风险为核心,禁止破坏核电安全边界,所有接线、布线、设备安装均需符合核电电气安全规范,实现供电全程安全可控,不留安全隐患。降本增效原则,紧扣大修成本管控需求,最大限度减少临时电缆用量、压缩人力投入、缩短接线复役工期,解决大修再供电资源浪费难题,提升供电环节工作效率。可靠适配原则,全面提升供电稳定性,杜绝绝缘报警、接触不良、供电中断问题,兼顾固定负荷与临时新增负荷需求,既能满足常规负荷供电,也能灵活适配突发新增负荷。易操作易复役原则,简化现场接线操作流程,降低人工操作难度,缩短停役、复役切换时间,方便停役与复役切换,适配大修紧凑检修节奏,避免因供电系统调整影响机组检修工期^[2]。

2.2 多目标优化函数建立

结合核电大修再供电核心需求与评价指标,建立低压交流再供电系统拓扑多目标优化函数,涵盖安全、可靠、经济、高效四大核心目标,采用加权求和法将多目标转化为可求解的数学模型。安全合规目标函数以最大化防火屏障完整率、实体隔离合规率为核心,量化拓扑对核电安全规范的契合度。可靠性目标函数以最小化绝缘报警次数、故障停运时长、接触不良概率为核心,引入电源数量、接线方式参数。经济性目标函数以最小化临时电缆用量、人力投入、工期损耗为核心,降低大修资源耗费。高效性目标函数以最小化接线复役时长、最大化操作便捷度为核心,适配大修紧凑检修节奏。同

时,引入权重系数体现核电安全优先的优先级,可根据大修实际需求动态调整权重。

2.3 多目标优化算法适配与求解

核电低压再供电系统拓扑多目标优化问题具有现场约束多、工况特殊、非线性特点,需适配合适的优化算法,确保求解贴合现场实际。结合核电大修工况特性,优先选用改进型工程适配算法,主要包括改进粒子群算法、贪心寻优算法、工程经验修正算法,各类算法适配不同优化场景。改进粒子群算法适配多目标协同优化,可快速求解兼顾安全、成本、效率的最优拓扑解集。贪心寻优算法适合现场线路路径、接线方式的迭代优化,贴合核电厂房布局。工程经验修正算法结合核电大修实操经验,剔除不符合现场规范的拓扑方案,提升结果实用性^[3]。求解过程中,以核电现有配电布局、负荷清单、安全边界为基础,代入优化函数与约束条件,通过算法迭代搜索最优解,最终筛选出可落地、合规、高效的优化方案。

3 低压交流再供电系统拓扑结构优化设计

3.1 基础拓扑重构优化

基础拓扑重构优化是核电低压再供电系统优化的核心环节,也是解决传统模式痛点的关键,彻底摒弃传统大量临时拉缆模式,针对现有单一直供、LRT系统覆盖不足的短板,重构集约化、少缆化、合规化的新型拓扑结构。优化核心思路是构建环形供电网络雏形,替代传统单一直供拓扑,打破单一电源供电局限,提升供电冗余度,在各配电盘后部预留标准化再供电接口,统一接口规格、接线规范,取消跨安全边界长距离临时电缆敷设,杜绝防火屏障破损问题。合理划分供电分段,按照检修区域、负荷类型分区供电,整合现有电源资源,提升电源利用率,避免电源数量不足导致的供电难题,减少电源闲置浪费。优化节点连接方式,合并零散分路,减少冗余接线,降低接头数量,简化现场操作流程,减少故障隐患点。保留原有LRT系统功能,扩大其覆盖负荷范围,通过线路优化、接口拓展,将常规大修负荷全部纳入固定拓扑,大幅减少临时电缆用量,省去大量线缆铺设、拆除工作,降低人力物力耗费,缩短供电准备工期。

3.2 分布式电源并网适配拓扑优化

结合核电现场直流再供电小车、备用开关电源等备用供电设备的实际应用需求,开展分布式电源并网适配拓扑优化,实现多电源灵活接入、协同供电,提升系统供电冗余度与应急保障能力。优化设计以备用电源快速转接、不破坏现有接线布局为核心,增设标准化备用电源接口,统一接口规格、接线规范,实现备用开关、直

流再供电小车与主再供电拓扑的无缝对接,无需重新布线、改线,即插即用。采用就近接入、分段供电原则,将备用电源接入负荷密集区段、关键负荷点位,减少电缆敷设距离,避免长距离布线带来的损耗与故障风险,提升电源调配灵活性。优化接口防护设计,采用绝缘密封、防误插结构,杜绝接地、绝缘不良问题,避免主控报警、电气故障。完善保护定值配合机制,统一各电源侧热继电器、断路器保护参数,实现上下级保护精准配合,防止保护误动或拒动,保障多电源并网后运行稳定,满足不同工况下备用供电、应急保供需求,应对突发供电故障。

3.3 故障自适应拓扑优化

故障自适应拓扑优化核心目标是提升核电再供电系统稳定性,快速处置绝缘报警、接触不良等常见故障,保障大修期间关键负荷不间断供电,减少故障对检修工作的干扰。优化设计增设绝缘监测、故障预警模块,实时监测线路绝缘状态、接头接触电阻、线路温度等参数,异常数据提前预警,便于运维人员及时处置,避免故障扩大引发供电中断。在拓扑关键节点加装智能隔离装置,实现故障区段自动定位、快速隔离,不影响其他负荷正常供电,保障非故障区域供电稳定。针对接头接触不良、接地故障等高发问题,优化接线端子与PJ插头设计,采用固定式电缆接头替代插拔式大负荷接头,用断路器替代人工插拔操作,控制电源通断与切换,降低粗电缆操作难度,减少接触故障^[4]。建立故障快速回归机制,简化故障排查流程,配套故障排查指引台账,运维人员可快速定位故障点、完成修复,缩短故障处置时间,减少对大修检修工作的干扰,全面提升供电可靠性。

3.4 特殊场景专项拓扑优化

针对核电大修各类特殊再供电场景,摒弃通用化设计思路,开展专项拓扑优化,精准适配不同场景的供电需求,实现全场景覆盖。核岛380VAC负荷场景,对安全隔离、绝缘要求极高,采用PJ插头+再供电抽屉专用

拓扑,拆装便捷、安全隔离性强,接线规范密闭,符合核岛工况要求,杜绝安全隐患。LBM直流负荷场景,适配直流再供电小车拆线端接拓扑,采用专用直流接口对接,接线标识清晰,杜绝交直流接线失误,保障直流负荷供电稳定。多负荷集中供电场景,如检修车间、集中作业区,采用分配电箱并接分路拓扑,统一调度、集中管控,分路独立保护,提升供电效率,避免负荷相互干扰。跨列供电场景,摒弃长临时电缆穿越防火门模式,采用预留预埋专用通道,通过专用穿墙套管布线,保障防火屏障完整、实体隔离合规,满足核电安全规范。针对临时新增负荷,在各供电分区预留扩展接口,无需大范围改线即可快速接入,灵活适配大修期间突发、临时供电需求,提升拓扑灵活性。

结束语

核电低压交流再供电系统拓扑结构优化研究,紧扣大修现场实际痛点,针对传统临时供电资源浪费、安全边界破损、可靠性偏低、操作不便等问题,通过构建多目标优化模型,从基础拓扑重构、备用电源适配、故障自适应、大修专项场景等方面开展研究,有效减少人力物力损耗、严守核电安全规范、提升供电可靠性与检修效率。研究成果完全贴合核电厂大修再供电实际工况,摒弃不符合现场应用的冗余设计,解决了现有再供电模式的核心难题,对提升核电大修检修效率、保障机组检修安全具有重要实践意义。

参考文献

- [1]俞文慧.高低压互补供电系统的动态协调控制技术[J].中国高新科技,2025(9):57-58,61.
- [2]李昕禹,邓永红,李清林,等.深井专用双相交流电机地面供电系统关键技术研究[J].电子质量,2025(5):42-46.
- [3]谢维兴.通信电源交流供电系统改进设计方案与故障诊断研究[J].通信电源技术,2025,42(23):101-103.
- [4]常贤.供电系统中零线带电原因及处理方法[J].数字传媒研究,2023,40(5):77-79.