

# 基于风险评估的核电电动机预防性维修策略优化研究

许林 罗东 胡腾

中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518000

**摘要:** 本文聚焦基于风险评估的核电电动机预防性维修策略优化, 阐述核电电动机风险评估理论基础, 构建风险评估模型, 建立指标体系, 选择并改进FMECA与FTA融合模型, 经验证与优化提升准确性。基于此制定预防性维修策略, 涵盖维修策略分类、维修间隔确定、维修内容与方案制定以及维修资源分配与调度, 旨在降低核电电动机故障风险, 保障核电站安全稳定运行。

**关键词:** 核电电动机; 风险评估; 预防性维修

引言: 在核电站运行体系中, 电动机作为关键设备, 其安全稳定运转直接关乎核电站的整体安全与效能。然而, 核电电动机运行环境复杂苛刻, 故障风险多样且后果严重, 传统维修策略难以满足实际需求。基于此, 本研究聚焦基于风险评估的核电电动机预防性维修策略优化, 通过构建风险评估模型、精准识别风险因素, 制定科学合理的维修策略, 旨在降低故障风险, 保障核电站安全稳定运行。

## 1 核电电动机风险评估理论基础

### 1.1 风险评估基本概念

风险评估是系统识别、分析与评价潜在风险的过程, 以明确其发生概率、影响程度及总体风险水平。在核电电动机应用场景下, 风险特指因设备自身或外部因素导致电动机运行失效, 进而可能危及核电站安全稳定运行的可能性及其后果的综合体现。该过程涵盖三个核心环节: 风险识别旨在全面梳理所有可能影响电动机正常工作的风险因素; 风险分析则针对已识别的因素, 深入评估其发生的可能性和可能导致的后果严重性; 风险评价是将分析结果与预设的风险接受准则进行对比, 最终判定风险等级及可接受性。

### 1.2 常用风险评估方法

在核电及工业领域, 风险评估常采用多种成熟方法。故障模式与影响分析(FMEA)通过系统分析设备各部件的潜在故障模式, 评估其对设备功能及整个系统的影响, 并计算风险优先数(RPN)以确定处理优先级。事件树分析(ETA)是一种动态逻辑分析方法, 从初始事件出发, 顺序推演后续可能事件链及后果, 用以量化风险<sup>[1]</sup>。此外, 层次分析法(AHP)将复杂风险问题分层, 通过因素间两两比较确定权重, 为风险评估提供结构化、量化的决策支持。

### 1.3 核电电动机风险特点

核电电动机的风险具有显著的特殊性。首先, 风险后果极为严重, 其故障可能直接导致反应堆冷却失效等重大安全事故, 对环境和公众健康构成深远威胁。其次, 风险隐蔽性强, 电动机在复杂苛刻的核环境下运行, 早期潜在缺陷往往难以通过常规监测手段及时发现, 存在隐患随时间演变为突发故障的可能。此外, 风险不确定性大, 其状态受设备老化、运行环境波动、人为操作等多种因素交织影响, 使得故障预测与风险精准管控面临较大挑战。

## 2 核电电动机风险评估模型构建

### 2.1 风险评估指标体系建立

对于核电电动机, 指标体系应涵盖设备自身性能、运行环境、维护管理等多个方面。设备自身性能指标包括电动机的绝缘性能、绕组电阻、轴承磨损程度等, 这些指标直接反映电动机的健康状况。运行环境指标包括温度、湿度、振动等, 恶劣的运行环境会加速电动机的老化和损坏。维护管理指标包括维修记录、保养情况、操作人员技能水平等, 良好的维护管理能够降低电动机故障风险。在确定指标时, 要充分考虑指标的可获取性、代表性和敏感性, 确保能够准确反映核电电动机的风险状况。

### 2.2 风险评估模型选择与改进

考虑到核电电动机风险评估需兼顾全面性与深度, 选择FMECA与FTA融合模型, 并针对传统模型的不足进行改进。传统FMECA在风险量化时易忽略故障检测难度, 导致部分可及时检测的故障被高估风险, 改进后增加“检测难度系数(D)”, 将风险值修正为 $R = P \times S \times (1-D)$ , 其中D取值0-1(检测越容易, D越接近1, 风险值越低), 如轴承磨损可通过振动监测实时发现,  $D = 0.8$ , 而转子断条检测难度高,  $D = 0.3$ 。FTA模型改进体现在“动态概率更新”上——传统FTA基于固定历史数据

计算底事件概率,无法反映设备实时状态,改进后引入实时运行参数修正因子,如当定子绕组温度超120℃时,“绝缘材料老化”底事件概率提升50%,通过动态调整概率值,提高故障根源分析的时效性。融合模型的实施流程分为三步:第一步,采用改进FMECA识别核电电动机5类典型故障模式(轴承磨损、绕组绝缘老化、转子断条、机壳腐蚀、冷却系统堵塞),计算各模式风险值并排序;第二步,针对高风险故障(如绕组绝缘老化)构建改进FTA模型,追溯“温度超标”“湿度超标”等底事件;第三步,结合实时监测数据(如温湿度、振动)动态更新风险值,确保评估结果与设备实际状态同步<sup>[2]</sup>。

### 2.3 模型验证与优化

选取某核电站低压电机(型号为YH280M-2-B3,额定功率90kW,服役10年)作为验证对象。在2014-2024年期间,该电机累计发生故障2次,其中轴承磨损1次、绕组绝缘老化1次。采用改进FMECA-FTA模型进行风险评估,结果显示:绕组绝缘老化风险值 $R = 7.2$ (高风险),轴承磨损 $R = 6.0$ (中风险),与实际故障频次相符,验证了模型的准确性。针对模型存在的“环境因素权重偏低”问题进行优化。原指标体系中环境影响权重为0.2,而在实际运行中,湿度超标导致的绕组绝缘老化故障占比达35%。因此,将环境影响权重调整为0.3,同时增加“腐蚀性气体浓度”指标的评分梯度(如0.05-0.15mg/m<sup>3</sup>计7分,>0.15mg/m<sup>3</sup>计10分),提升模型对环境风险的敏感度。优化后模型对湿度超标导致的故障预警准确率从75%提升至88%,进一步增强了评估的可靠性。

## 3 核电电动机风险因素识别与分析

### 3.1 风险因素识别方法

风险因素识别是风险评估的关键步骤。可以采用头脑风暴法,组织相关领域的专家、技术人员和操作人员共同参与,充分发挥集体的智慧,全面识别可能影响核电电动机正常运行的风险因素。故障树分析法也是一种有效的识别方法,它以电动机故障为顶事件,通过分析导致故障的各种直接和间接原因,构建故障树,从而找出所有可能的风险因素。此外,还可以参考同类型电动机的运行经验和故障案例,结合本电站电动机的实际情况进行风险因素识别。

### 3.2 风险因素分类

对识别出的风险因素进行合理分类有助于深入分析和管理工作。可以将风险因素分为设备本身因素、环境因素和人为因素三大类。设备本身因素包括电动机的设计缺陷、制造质量问题、零部件老化等;环境因素包括温度过高、湿度过大、振动过大、腐蚀性介质等;人为

因素包括操作不当、维护不及时、管理不善等。进一步细分,设备本身因素又可分为电气因素和机械因素,电气因素如绝缘损坏、短路等,机械因素如轴承损坏、转子不平衡等。

### 3.3 风险因素关联分析

各风险因素之间并非孤立存在,而是相互关联、相互影响的。例如,环境温度过高会加速电动机绝缘材料的老化,增加电气故障的风险;同时,高温也可能导致电动机轴承润滑油变质,引发机械故障<sup>[3]</sup>。人为操作不当可能导致电动机过载运行,产生过多的热量,进而影响设备本身性能和环境条件。通过关联分析,可以找出风险因素之间的内在联系,从系统整体的角度认识和把握风险,为制定有效的预防性维修策略提供更全面的依据。

## 4 基于风险评估的核电电动机预防性维修策略制定

### 4.1 维修策略分类

根据核电电动机的风险等级与故障特性,将预防性维修策略划分为预测性维修、定期预防性维修、纠正性维修三类,各类策略的适用场景与核心目标如下:(1)预测性维修(适用于高风险设备):基于实时运行数据与风险评估结果,预测故障发生时间,提前开展针对性维修,核心目标是避免高风险故障发生。如针对绕组绝缘老化风险 $R \geq 8$ 的电动机,通过在线监测绕组温度与绝缘电阻,当绝缘电阻下降至1M $\Omega$ 以下时,启动绕组修复作业,避免绝缘击穿;(2)定期预防性维修(适用于中风险设备):根据风险评估确定固定维修间隔,在故障发生前完成部件检查与更换,核心目标是平衡维修成本与故障风险。如轴承磨损风险 $R = 5-8$ 的电动机,每6个月进行1次轴承振动检测,每6C个更换轴承,避免轴承故障;(3)纠正性维修(适用于低风险设备):不设定固定维修间隔,仅当设备状态参数超出正常范围或风险值升至中风险时开展维修,核心目标是减少不必要的停机,降低运维成本。如常规岛通风系统不影响机组发电且风险 $R \leq 4$ 的电动机,仅当电机故障时进行维修,无需定期维修。三类策略并非相互独立,可根据设备风险动态变化灵活切换,如低风险电动机因环境湿度升高导致风险值升至中风险时,从纠正性维修切换为定期预防性维修。

### 4.2 基于风险评估的维修间隔确定

采用“风险-成本平衡模型”确定维修间隔,核心是找到“故障损失成本+维修成本”最小的间隔周期。具体步骤如下:第一步,基于风险评估结果确定不同风险等级的基准维修间隔:高风险设备( $R \geq 8$ )基准间隔18个月(常规检查)、72个月(解体维修);中风险设备(4

$< R < 8$ ) 基准间隔36个月(常规检查)、108个月(解体维修); 低风险设备( $R \leq 4$ ) 基准间隔54个月(常规检查)、180个月(解体维修); 第二步, 引入风险变化系数修正间隔: 当实时风险值较基准值上升20%时, 维修间隔缩短30%, 如高风险设备风险值从8升至10(上升25%), 常规检查间隔从18个月缩至12个月; 当风险值下降20%时, 维修间隔延长20%, 如中风险设备风险值从6降至4.8(下降20%), 解体维修间隔从108个月延至130个月; 第三步, 结合成本效益验证: 以某核电站低压水泵电机为例, 基准维修间隔18个月(年检), 年维修成本6万元, 故障损失成本10万元; 将间隔延长至36个月后, 年维修成本降至3万元, 故障损失成本10万元, 总成本从16万元降至13万元, 验证延长间隔的经济性。最终确定各风险等级的最优维修间隔, 确保成本与风险最优平衡<sup>[4]</sup>。

#### 4.3 维修内容与方案制定

依据风险评估精准识别的故障模式以及所判定的风险程度, 我们需量身定制详尽且具有针对性的维修内容与方案。对于核电电动机运行过程中常见的故障模式, 像轴承磨损、绝缘老化等, 要制定细致入微的维修措施。针对轴承磨损问题, 不能仅简单更换轴承, 还需严格把控安装质量。在更换前, 要对新轴承进行全面检查, 确保其规格、型号与原轴承一致且无质量问题。安装过程中, 要遵循精确的安装工艺, 控制好安装力度和间隙, 避免因安装不当导致轴承再次损坏。对于绝缘老化, 要定期进行绝缘电阻测试, 依据测试结果判断绝缘老化的程度。若老化较轻, 可采用绝缘修复处理, 如绕组浸漆等; 若老化严重, 则需更换绝缘部件。同时, 制定完善的维修流程和标准至关重要, 明确维修人员在不同环节的职责和操作规范, 从维修前的准备工作到维修后的质量检测, 都要有严格的标准, 以此确保维修工作的高质量和高安全性。此外, 维修方案中必须充分考虑备件的储备和管理, 建立科学合理的备件库存模型, 确保在需要时能够及时更换损坏的零部件, 减少设备停机时间。

#### 4.4 维修资源分配与调度

合理的维修资源分配与调度是确保预防性维修工作顺利推进的关键环节。在分配维修资源时, 要紧密结合核电电动机的风险等级和维修任务的优先级。对于高风险设备, 由于其一旦发生故障可能带来严重后果, 所以要优先分配维修人员、设备和物资等资源, 确保能及时对其进行全面检查和维护。对于紧急维修任务, 同样要迅速调配资源, 以最快的速度开展维修工作, 避免故障扩大影响核电站的正常运行。同时, 建立一套行之有效的资源调度机制十分必要。要根据维修工作的实际进展情况, 实时、灵活地调整资源分配。例如, 若某个维修项目提前完成, 可将其剩余资源调配到其他急需的项目中, 提高资源的利用效率。此外, 充分利用信息化技术, 搭建维修资源管理系统。通过该系统, 能够实现对维修资源的动态监控, 实时掌握资源的库存、使用和调配情况, 实现资源的优化配置。这不仅有助于提高维修管理的水平, 还能提升整体工作效率, 为核电电动机的稳定运行提供有力保障。

#### 结束语

本研究围绕核电电动机预防性维修策略优化展开, 通过构建科学的风险评估模型, 精准识别与分析风险因素, 进而制定出针对性强、切实可行的预防性维修策略。从维修策略分类到维修间隔确定, 再到维修内容与方案制定以及资源分配与调度, 形成了一套完整的体系。未来可进一步探索新技术在风险评估与维修策略中的应用, 持续优化维修管理。

#### 参考文献

- [1]朱大朋,赵浩君,骆舟,等.核电站环行起重机起升变频电动机设计[J].起重运输机械,2025(4):66-73.
- [2]杜兆楠.核电站电动机带载试车中过负荷故障原理及分析[J].电工技术, 2022(7):173-175.
- [3]马博,何敏泽,何港昊.核电站立式长轴泵电动机振动故障诊断及处理[J].电工技术,2021(10):177-178,181.
- [4]贾福辰,张旭,张巍.某核电厂电动机低电压保护方案及优化建议[J].现代建筑电气,2024,15(3):54-58.