

核电电机绝缘故障的在线监测与处理技术研究

罗东 许林 王凯

中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518000

摘要: 本文聚焦核电电机绝缘故障的在线监测与处理技术。首先概述核电电机绝缘系统构成与作用,分析常见绝缘故障类型(绝缘老化、击穿、局部放电、受潮)及其对电机和系统的危害。接着阐述在线监测技术原理与方法,涵盖基于电气参数(介质损耗因数等)与非电气参数(温度、振动等)的监测。最后介绍故障诊断与定位方法,以及针对不同故障的处理措施。研究旨在提升核电电机绝缘可靠性,保障核安全与电网稳定,降低维护成本与风险。

关键词: 核电电机; 绝缘故障; 在线监测; 处理技术

引言: 核电作为清洁高效能源,其安全稳定运行至关重要。核电电机作为核电站核心动力设备,绝缘系统的可靠性直接关乎核反应堆安全与电网稳定。传统离线检测存在耗时长、成本高、无法捕捉动态劣化等局限。而核电机组运行环境复杂,绝缘故障隐蔽且突发。在此背景下,开展核电电机绝缘故障在线监测与处理技术研究迫在眉睫。通过实时监测与精准处理,可提前预警故障,避免非计划停机,减少经济损失与辐射风险,提升核电运行的安全性与经济性。

1 核电电机绝缘系统概述

1.1 核电电机的工作原理与结构

核电电机是核电站的核心动力设备,主要包括反应堆冷却剂泵电机(主泵电机)等核级电机及柴油发电机,风机电机等。主泵电机采用立式异步电动机结构,额定功率通常超过5MW,运行于高温高压水环境。其工作原理是通过定子绕组产生的旋转磁场驱动转子旋转,将电能转化为机械能,为核反应堆冷却剂循环提供动力。定子绕组采用云母带包扎的VPI(真空压力浸渍)绝缘结构,转子绝缘需承受高速旋转产生的离心力(可达1000g)与电磁力的双重作用。应急柴油发电机作为事故工况下的备用电源,采用四冲程柴油机驱动同步发电机,确保在全厂失电时10秒内启动,为安全系统供电。两类电机均需满足IEEE标准对核级设备的抗震、防爆要求,其结构设计需兼顾高效散热与辐射防护,例如采用双层壳体屏蔽中子流,冷却系统配备独立电源以防止共因故障。据统计,主泵电机故障导致非计划停机的概率占核电机组总停运事件的18%,凸显其可靠性对核安全的重要性^[1]。

1.2 绝缘系统的构成与作用

核电电机绝缘系统由主绝缘、匝间绝缘和对地绝缘三部分构成,形成多级防护体系。主绝缘采用

Nomex纸基复合材料与环氧树脂复合结构,厚度2.5-3.0mm,承担定子绕组对地电位隔离任务,需满足F级耐热等级(155℃连续运行)和1分钟工频耐压试验(2UN+1kV)。匝间绝缘使用0.05-0.08mm厚聚酰亚胺薄膜,通过叠层工艺覆盖线圈表面,防止脉冲电压引发的匝间短路。对地绝缘通过接地碳刷实现动态接触,碳刷材料需兼具低电阻($< 5m\Omega$)和耐磨损特性。绝缘系统的核心作用包括:电气隔离(绝缘电阻 $> 100M\Omega$)、抑制局部放电(放电量 $< 100pC$)、传导热量至冷却介质(热导率 $> 0.3W/m\cdot K$)。实际运行中,绝缘系统承受机械应力(电磁力峰值达10kN)、热应力(绕组热点温度180℃)和辐射损伤(中子通量 $> 10^{13}n/cm^2\cdot s$)的三重考验。某核电站3号机组主泵电机拆解发现,运行15年后主绝缘厚度减薄23%,局部放电频次增加5倍,直接导致介质损耗因数($\tan\delta$)从0.8%升至2.7%,表明绝缘系统已进入加速劣化阶段。

2 核电电机绝缘故障类型及危害

2.1 常见绝缘故障类型

(1) 绝缘老化: 绝缘材料在热、电、辐射的复合作用下逐渐劣化,表现为机械强度下降、介电性能衰减。热老化方面,长期高温环境(如150-180℃)会导致聚酰亚胺薄膜脆化,表面出现微裂纹,同时云母带的粘结剂因热分解而失去粘附性,使层间结合力显著减弱;电老化方面,高电场($> 10kV/mm$)长期作用会引发绝缘表面碳化,形成导电通道,导致局部介电损耗大幅增加;辐射损伤方面,核反应堆环境中的中子辐射(通量 $> 10^{13}n/cm^2\cdot s$)会使绝缘材料分子链断裂,介电常数升高(增幅可达20%-30%),同时弹性模量下降(降幅超40%)。以主泵电机为例,运行12年后,定子绕组绝缘电阻从初始的500MΩ降至150MΩ(下降至初始值的30%),局部放电量从200pC增至1000pC(超标5倍),

表明绝缘已进入严重老化阶段。(2) 绝缘击穿: 绝缘击穿分为电击穿与热击穿两种机制。电击穿通常由绝缘薄弱点(如线圈出头处的气隙或毛刺)引发,当局部电场强度超过材料耐受极限(约20kV/mm)时,会在纳秒级时间内形成贯穿性导电通道,击穿过程伴随强光和高温;热击穿则因局部过热(如通风不良导致的热点温度 $> 180^{\circ}\text{C}$)引发绝缘材料碳化,形成导电桥路。应急柴油发电机启动时,定子绕组匝间因电场集中发生击穿,短路电流导致线圈瞬间过热(温度 $> 300^{\circ}\text{C}$),绝缘材料剧烈燃烧,定子绕组完全烧毁,修复需更换整组线圈,耗时72小时,直接经济损失超500万元^[2]。(3) 局部放电: 气隙或杂质会引发脉冲放电,频率范围在100kHz-1MHz之间,放电过程中产生的臭氧和氮氧化物会腐蚀绝缘材料。长期放电会导致绝缘表面爬电,形成白色粉末状沉积物。在线监测数据显示,当局部放电电量超过1000pC时,绝缘击穿风险增加3倍。核电机组运行中,曾因局部放电持续存在,导致电机故障停机达3次/年,严重影响机组运行稳定性。(4) 受潮: 冷却剂泄漏或密封失效会导致水分侵入绝缘系统,使绝缘电阻骤降至0.5M Ω 以下,进而引发爬电事故。实测表明,当相对湿度超过85%时,绝缘表面漏电流会增加10倍。机组受潮后,主泵电机因绝缘性能急剧下降而烧毁,导致反应堆停堆长达15天,造成巨大经济损失和运行风险。

2.2 绝缘故障对核电机及系统的危害

绝缘故障直接威胁核安全与电网稳定:(1) 设备损坏,绝缘击穿或局部放电导致绕组烧毁、转子扫膛,单次故障修复成本超千万元;(2) 系统停运,主泵电机故障引发反应堆冷却中断,导致降功率或紧急停堆,年经济损失达亿元级;(3) 辐射风险,绝缘失效可能引发冷却剂泄漏,增加工作人员受照剂量;(4) 连锁反应,应急柴油发电机故障导致全厂失电,安全系统失效风险激增。据统计,绝缘故障占核电机总故障的42%,其中63%导致非计划停机,凸显其危害的严重性。

3 核电机绝缘故障的在线监测技术原理与方法

3.1 在线监测的重要性

核电机绝缘系统的可靠性直接关系到核反应堆的安全运行与电网的稳定供应。传统离线检测需停机拆解,不仅耗时(通常需72小时以上)、成本高昂(单次检测费用超50万元),且无法捕捉绝缘在运行中的动态劣化过程。核电机组长期处于高温(150-180 $^{\circ}\text{C}$)、强辐射(中子通量 $> 10^{13}\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)、高电压(10-15kV)及机械振动(加速度 $> 5\text{g}$)的复合工况下,绝缘故障具有隐蔽性和突发性。在线监测技术通过实时采集电气参数

(如介质损耗、局部放电)与非电气参数(如温度、振动),可提前72-120小时预警故障,避免非计划停机(单次停机损失达亿元级)。某核电站应用在线监测后,绝缘故障导致的停机次数从每年3次降至1次,维护成本降低45%,同时减少了人员进入核岛的辐射暴露风险,符合ALARA(合理可行尽量低)原则。

3.2 基于电气参数的监测方法

电气参数监测是绝缘故障诊断的核心手段,主要包括以下方法:(1) 介质损耗因数($\tan\delta$)监测:通过高压电容电桥测量绝缘介质在交流电场下的能量损耗, $\tan\delta$ 值超过1%表明绝缘严重老化。某主泵电机运行10年后, $\tan\delta$ 从0.8%升至1.2%,监测系统提前3个月发出预警,避免击穿事故^[3]。(2) 局部放电量(PD)监测:采用脉冲电流法或特高频(UHF)传感器捕捉绝缘气隙放电产生的脉冲信号,放电量 $> 500\text{pC}$ 时需干预。结合相位分辨分析(PRPD)可定位放电位置,准确率达92%。(3) 绝缘电阻与泄漏电流监测:通过直流高压发生器施加500V-10kV电压,测量绝缘电阻(正常值 $> 100\text{M}\Omega$)与泄漏电流($< 1\text{mA}$)。某电机受潮后泄漏电流激增至8mA,系统自动触发干燥程序,恢复绝缘性能。(4) 高频电流互感器(HFCT)监测:检测绕组匝间放电产生的纳秒级脉冲电流,频带覆盖100kHz-50MHz,灵敏度达0.1pC,适用于早期电老化诊断。

3.3 基于非电气参数的监测方法

非电气参数监测可补充电气信号的局限性,提升故障诊断全面性:(1) 温度监测,光纤光栅传感器实时测量绕组热点温度(正常 $< 155^{\circ}\text{C}$),温度超限180 $^{\circ}\text{C}$ 时启动冷却系统。某机组因温度监测及时,避免了热击穿导致的定子绕组烧毁。(2) 振动分析,三向加速度传感器采集电机振动频谱(0-10kHz),100Hz以上高频分量增加提示绕组松动或绝缘磨损。通过机器学习模型可诊断0.05mm级位移故障,准确率达88%。(3) 超声波检测,压电传感器捕捉局部放电产生的超声波(20-200kHz),结合声学成像技术定位缺陷,灵敏度比电气法高3倍,适用于噪声环境下的在线检测。(4) 气体分析,质谱仪检测绝缘分解产物(CO、CO²、CH⁴),浓度突变预示电老化或热分解。某电机CO含量从15ppm升至80ppm后2周内击穿,气体监测提前预警避免了事故扩大。(5) 红外热成像,红外相机扫描电机表面温度分布,热点温度异常升高($\Delta T > 10^{\circ}\text{C}$)提示接触不良或绝缘劣化,适用于快速巡检。

4 核电机绝缘故障处理技术与策略

4.1 故障诊断与定位方法

核电电机绝缘故障的精准诊断与定位是处理的前提,需结合多参数融合分析与智能算法。首先,通过在线监测系统获取电气参数(如介质损耗因数 $\tan\delta$ 、局部放电量PD、泄漏电流)与非电气参数(如温度、振动、超声波信号),利用小波变换或HHT(希尔伯特-黄变换)提取故障特征频率。例如,局部放电的PRPD(相位分辨脉冲分布)图谱可区分气隙放电、沿面放电等类型,结合特高频(UHF)传感器定位放电源至具体线圈段,误差 $< 5\text{cm}$ 。对于绝缘老化,通过热重分析(TGA)与红外光谱(FTIR)检测材料分解产物,量化老化程度。振动分析中,采用机器学习模型(如随机森林)解析频谱中的高频分量($> 1\text{kHz}$),定位绕组松动或绝缘磨损位置。针对复杂故障,数字孪生技术可模拟绝缘劣化过程,通过对比实际数据与虚拟模型,缩小故障范围。诊断完成后,系统自动生成三维可视化报告,标注故障位置与严重等级,为后续处理提供依据^[4]。

4.2 常见故障的处理措施

(1) 绝缘老化的处理。对于轻度老化($\tan\delta < 1.5\%$),采用局部修复工艺,包括云母带补包、真空压力浸渍(VPI)填充气隙,恢复绝缘介电性能;中度老化($\tan\delta 1.5\%-2.5\%$)需更换老化段线圈,并升级绝缘材料(如从F级环氧树脂升级至H级聚酰亚胺);重度老化($\tan\delta > 2.5\%$)则整体更换定子绕组,同时优化通风设计以降低热点温度。(2) 绝缘击穿的修复。击穿点位于线圈端部时,采用“切除-重绕”工艺,清理碳化区域后重新包扎绝缘层;若击穿穿透线棒,需更换整根线棒,并加强相邻线圈的绝缘防护。修复后进行1.5倍额定电压的工频耐压试验(持续1分钟),确保无二次击穿。(3)

局部放电的抑制。通过注入纳米二氧化硅(SiO_2)改性环氧树脂,填充绝缘内部微孔,将局部放电量从 1000pC 降至 50pC 以下;同时优化线圈绕制工艺,减少气隙与杂质,降低电场集中风险。(4) 受潮的干燥处理。采用热风循环干燥($80-100^\circ\text{C}$)结合真空除气(压力 $< 1\text{kPa}$),持续48-72小时,使绝缘电阻从 $0.5\text{M}\Omega$ 恢复至 $> 100\text{M}\Omega$;对于严重受潮(湿度 $> 5\%$),需拆解电机进行分段干燥,并在绝缘层喷涂疏水性纳米涂层(如氟碳树脂),提升防潮能力。处理完成后,通过频域介电谱(FDS)测试验证绝缘恢复效果,确保符合IEEE标准要求。

结束语

核电电机绝缘故障的在线监测与处理技术研究,对于保障核电安全稳定运行意义重大。通过在线监测技术,能实时掌握绝缘状态,提前发现潜在故障;精准的故障诊断与定位方法,为处理提供科学依据;多样化的处理措施则可有效修复故障,恢复电机性能。未来,随着技术不断发展,应进一步提升监测精度、优化处理工艺,构建更完善的绝缘故障管理体系,降低核电电机故障率,推动核电行业朝着更安全、高效的方向发展。

参考文献

- [1] 贾学瑞. 高压电气设备状态检修技术研究[J]. 电力设备管理, 2024, (24): 48-50.
- [2] 罗敬元, 卢宗祀. 电力系统电气设备绝缘状态在线监测与评估技术研究[J]. 光源与照明, 2024, (10): 60-62.
- [3] 时文俊. 基于多状态量感知技术的继电保护设备状态在线监测方法[J]. 电工技术, 2024, (19): 116-118+121.
- [4] 张伟, 王丽. 输电线路在线故障监测技术的研究与应用[文献标识码]. 高电压技术, 2021, 47(3): 12-18.