

某核电厂502大修LHR励磁机转子匝间短路抢修经验总结

赵 晨

中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518000

摘 要：某核电厂502大修期间，5LHR柴油发电机组励磁机转子直流电阻不平衡系数达3.2%，超出2%的程序标准。经排查确认W相绕组发生匝间短路，13根线芯熔断。面对无备件、返厂困难、现场条件受限等复杂局面，项目组突破思维定势，创新采用冷拆工艺替代热拆方案，自主设计环抱式专用吊具，因地制宜搭建临时烘房完成热套回装，最终历时11天完成抢修并一次再鉴定合格。本文系统梳理了故障排查、方案决策、拆装工艺创新及经验反馈，为同型机组励磁系统抢修提供可借鉴的工程实践参考。

关键词：励磁机转子；匝间短路；冷拆工艺；热套回装；抢修经验

引言：核电厂后备柴油发电机组是应对全场失电事故的关键安全设施，其励磁系统可靠性直接关系到应急电源的带载能力。某核电厂某核电厂502大修中发现5LHR柴油发电机励磁机转子直流电阻不平衡系数严重超标，确认为W相绕组匝间短路，13根线芯熔断。返厂维修面临热套拆装、动平衡、超速试验及电气性能验证四重技术壁垒，而厂内无备件、整体返厂又受制于厂房空间和专用工具缺失。项目组通过前后台联动与多轮次技术论证，将整体返厂方案优化为励磁机转子单独返厂修复，自主解决了冷拆、吊装、现场加热等关键工艺，最终11天完成抢修。本文系统总结此次抢修的关键技术与经验教训。

1 设备概况与故障发现

1.1 LHR柴油发电机励磁系统简介

5LHR柴油发电机组是某核电厂二期工程应急备用电源，发电机型号TFHY5500-4，配套励磁机型号ZLWS2-800A，额定电压104.2V、额定电流279.0A，安装于发电机非驱动端端盖外侧。励磁方式为自励，起励电源为24V直流电，正常运行由励磁变经AVR向定子提供直流电，转子产生的三相交流电经旋转整流桥整流后为发电机转子提供励磁电流。励磁机转子铁芯共96槽，绕组由48个支路组成（每两槽一支路），每相16个支路并联，通过与汇流环焊接连接，构成UVW三相及中性点四条汇流环，各相汇流环引出两根铜排接至旋转整流桥正负极。

1.2 故障发现与排查过程

某核电厂502大修期间，测量励磁机转子直流电阻发现不平衡系数达3%，超出 $\leq 2\%$ 的程序标准。更换仪器复测结果一致——大线夹测量为2.8%和2.9%，小线夹

为3.2%，双桥为3.0%和3.2%。通过逐项排除法定位：对比不同表计数据排除表计误差；对比铜排与接线柱数据排除接触不良；对比正负极铜排数据排除焊接问题。剩余可能为分支绕组与汇流环间焊接点或绕组线圈本体故障。拆除励磁机外罩背板发现转子线圈发黑，进一步拆除机头润滑油箱及励磁外罩后，确认W相绕组发生匝间短路，转子绕组过热烧毁，熔断线芯13根，场内无法修复，须返厂更换绕组线圈。

1.3 故障根本原因分析

励磁机转子制造中绕组相关工序多为手工操作。故障断股位于PG带绑扎、同支路两线圈重叠的最外侧端部。分析认为最可能原因是生产过程中漆包线引入初始绝缘损伤——嵌线整理、端部打箍、吊运转运或清理油漆等环节异常受力导致漆包线受损。该缺陷未能通过出厂直阻测量和耐压试验检出，长期带载运行后电流发热使损伤恶化，最终发展为匝间短路^[1]。此外，同类机组曾多次出现中间接头故障，本次因初始表现为直阻不平衡，维修人员主观优先怀疑中间接头而滞后检查线圈本体，这一经验主义倾向值得反思。

2 抢修方案决策与论证

2.1 多方案对比分析

故障确认后，项目组面临的核心问题是：如何以最短时间恢复设备可用性，同时兼顾安全性和经济性。初步提出四类方案。方案一为整机更换柴油发电机，经核实厂内无LHR整机备件，其他基地设备的主出线位置、互感器配置及管路接口均不相同，无法使用，不可行。方案二为借用发电机运出专用工具，田湾电厂虽有设计但尺寸与现场不匹配，重新加工耗时过长，不可行。方

案三为返厂励磁机转子及同轴发电机转子,需在联轴间隙穿入假轴,现场空间不足且风险高,不可行。方案四为励磁机转子单独返厂修复,上电起初认为现场不具备热套安装、动平衡、超速试验及电气性能验证条件,经多轮次技术交流后最终同意该方案,由项目组逐一承接四项技术难题的现场解决方案。

2.2 关键技术难题的现场解决方案

针对励磁机安装热套难题,现场无烘房,项目组决定使用暖风机,搭设保温防火布临时烘房,实现转子整体加热至温升 120°C 并保温4小时。针对动平衡试验,技术处牵头在核电厂内由柴油机带动发电机转子整体进行在线动平衡,上电派人现场调整平衡块。针对超速试验,后核实其仅为新机制造阶段所需试验项目,返厂维修后无需执行^[2]。针对整体电气性能验证,电气处负责现场进行励磁特性试验验证。四道技术壁垒逐一攻破后,励磁机转子单独返厂修复方案正式通过。

3 抢修准备与风险预控

3.1 抢修准备

方案确定后,项目组立即启动抢修准备工作,重点包括三个方面。一是文件准备——编制励磁机转子拆除专项方案、返厂运输方案及现场回装方案,制定再鉴定质量计划,明确各工序的验收标准和控制点。二是工器具与材料准备——确认M20丝杆、两台千斤顶、拉马横杆、铜棒、铝棒、青稞纸等拆除专用工具到位;落实环抱式专用吊具的测绘加工;准备硅胶铝保温棉、防火布、暖风机等热套用物资;核实M24地脚螺栓力矩扳手、 $138\text{N}\cdot\text{m}$ 扭矩扳手等紧固工具的校准状态。三是人员组织与交底——明确机械、电气、起重、脚手架各专业分工,厂家技术人员现场指导拆除和回装关键工序,技术处负责在线动平衡,电气处负责励磁特性试验。

3.2 风险预控与协调机制

风险预控方面,对冷拆工艺中千斤顶施力不均可能造成大轴划伤的风险,明确两人同步打压、受力均匀的要求;对热套回装中转子降温过快的风险,提前组织回穿演练;对明火作业拆除整流盘的风险,提前办理动火票并屏蔽现场火焰探测器。本次抢修涉及厂内拆除、返厂运输、厂家维修、现场回装、再鉴定试验等多个环节,跨地域、跨单位、跨专业的协调难度极大。项目组建立了“前后台联动、每日碰头”的协调机制。前台负责拆除、回装及现场试验的实施与问题反馈;后台负责与上海电机厂的技术对接、运输协调及备件跟踪。每日召开抢修协调会,汇总当日进展、识别次日风险、调整作业计划。运输过程中,后台密切跟踪运输状态,提前

获知山东冻雨天气后协调司机赶乘最后一班轮渡,避免了次日停航造成的延误。返厂维修期间,后台每日与厂家确认线圈绕制、下线、浸漆等关键工序的完成情况,确保返修进度受控。回装前,提前协调技术处和电气处人员到场,确保再鉴定试验与在线动平衡无缝衔接^[3]。

4 厂内拆除与返厂维修关键工艺

4.1 拆除阶段的创新工艺

拆除工作启动后,先拆除机头万向节,随后进行励磁机定子拆除。定子地脚由四颗M24螺栓固定,两侧对角设有定位销。施工时先打出定位销,松开地脚螺栓,在定子间垫入3mm厚青稞纸防护,用起重倒链将定子微起,取出地脚垫片并做好原位标记。人员手扶定子两侧,配合手拉葫芦将其向机头侧平移抽出。定子拆下后,使用大块青稞纸围绕一周进行防护,防止后续工作磕碰损伤。整流盘拆除原厂家建议采用热拆工艺,需明火加热至 150°C 后敲出。项目组综合考虑现场安全风险,采取加热前在整流盘上拴铁丝作为挂点,加热均匀后用铜棒配合架子管缓慢敲出,待脱离转轴时穿入铁丝挂点由两人抬出。励磁机转子拆除难度最大。厂家仍建议热拆,但转子表面覆盖绝缘漆,明火必然导致漆层燃烧,可能损伤硅钢片。项目组老师傅观察转子结构后,提出利用轴套位置预留的M20螺孔作为受力点,穿入丝杆后套上拉马横杆,在横杆与轴头间放置两台千斤顶,两侧均匀施力将转子缓慢拉出,成功实现冷拆。拆除过程中,两台千斤顶由一人双手同时操作打压,确保受力均匀。因转子为中空结构,千斤顶的选择根据现场尺寸及吨位共同确定。

4.2 返厂维修的主要工序

故障转子随即装车运往上海电机厂。转子到达后即进入烘箱加热带解,同时新线圈绕制同步完成。随后依次完成汇流环处理,清理绝缘包裹和残留焊点,铁芯送线圈分厂进行绕组下线。完成打槽楔、耐压及匝间试验后进行端部绑扎。焊接汇流环前先进烘箱加热软化铜线,焊接时将铜线缠绕三圈再施焊。对汇流环及铜排进行绝缘包裹,接线完成后进行直阻绝缘及耐压试验。VPI浸漆和清洁完成后装车发往现场。运输途中遭遇山东冻雨天气,高速路口全部封闭,司机赶上当天最后一班轮渡前往大连(次日轮渡停航),确保了转子按时抵达。

5 现场回装与再鉴定

5.1 回装阶段的工艺创新

转子抵达现场后,立即组织卸车。受大风影响无法使用吊车,脚手架人员搭设平台使叉车将转子叉至厂房门口,用钢管滚动方式将包装箱推至起重架下。因厂

房门前台阶水平距离较长,超出叉车叉臂范围,协调起重吊车将转子吊至工业运输车上转运。回装最大挑战在于转子热套工艺。项目组在底部铺设保温防火材料,架上转子,围绕一周搭设烘房框架,使用硅酸铝保温棉包裹,两台暖风机风管斜对角对吹轴孔,加热4小时。加热完成后,因环境温度仅10℃,转子降温极快,项目组提前与起重进行回穿演练,使用钢丝吊带吊出,在轴套丝孔拧入M20丝杆,手扶调整对准键槽口后回套,遇卡涩时用铝棒抵住内圈、铜棒敲击打入。回装到位后用小力敲击并用铜棒抵住至转子降温,防止冷却后爬轴。整流盘回装采用热装工艺,轴承加热器加热后对准键槽口敲入。整流部件回装以键槽口为基准,按拆接线记录安装二极管及铜排,固定螺栓按138N·m力矩紧固。安装时注意检查二极管固定螺栓绝缘套、绝缘垫无裂纹等异常。励磁机定子回装时在定转子间放入3mm青稞纸防护,按标记回装垫片,打入销钉定位后拧紧地脚螺栓。整体耐压试验时建立作业区专人监护,6个二极管首尾短接后施加1125V(0.75倍出厂值)持续1min合格。耐压后回装发电机转子接线^[4]。

5.2 再鉴定与在线动平衡

再鉴定空载试验期间增加励磁回路试验。保护专业解开5LHR900AR柜内908BN外接线,使用外置直流源逐步升高励磁电流,记录6个电流点位的二次PT电压和发电机端电压,绘制励磁特性曲线,与历史参数对比趋势一致,试验合格。在线动平衡方面,空载试验期间驱动端最大振动3.88mm/s、非驱动端3.74mm/s,较历史值均有所上涨。经一次试重确认不平衡角度后调整平衡块,最终驱动端振动降至2.05mm/s,满足验收标准。非驱动端轴向振动3.24mm/s,频谱显示为2X频主导,属非不平衡问题,综合评价合格。再鉴定期间,柴油发电机空载试验测量径向初始振动最大值3.88mm/s,通过动平衡处理后径向最大振动值2.05mm/s,满足动平衡验收标准。

5.3 良好实践与经验反馈

良好实践包括:针对转子中空结构不可采用常规吊装的问题,自主测绘并加工环抱式专用吊具,安全高效完成了励磁机转子的吊装;因地制宜使用防火布、保温

棉搭设临时烘房,现场加热4小时后转子温度达到工艺要求,一次安装到位。经验反馈包括:5/6LHR柴油发电机为二期新增设备,重大关键敏感设备,缺少备件储备;技术决策应与现场可执行性相结合,整体返厂虽理论上完整但受厂房、行车限制无法快速实施;发现励磁机转子直阻不平衡问题后,应克服经验主义,全面排查中间接头与线圈本体两种可能,避免因主观判断延误故障定位^[5]。此外,针对柴油发电机励磁机不可用故障,最可行的修复工艺应将故障部件部分返厂处理,拆装过程须联系厂家提供图纸和工艺文件支持,这类文件通常不体现在EOMM手册中,需单独获取。

结束语

本次某核电厂502大修LHR励磁机转子匝间短路抢修,从故障发现到再鉴定合格历时11天,在无备件、无专用工具、无现场烘房的条件下,成功完成了励磁机转子单独返厂修复。关键技术创新包括:利用轴套M20螺孔实现冷拆,规避了明火热拆对硅钢片的热损伤风险;创新设计环抱式专用吊具,解决了中空转子吊装难题;因地制宜搭建临时烘房并优化热套流程,确保一次安装到位。此次抢修验证了励磁机转子单独返厂修复的技术可行性,为同型机组提供了可复制的抢修范式。建议多基地提前梳理备件储备、专用工具和厂家合同,编制标准化抢修预案,缩短后续同类故障响应时间。

参考文献

- [1]张学峰,李会军,曹少飞,等.大型汽轮发电机转子匝间在线监测系统研究及应用[J].电工材料,2022(5):71-74.
- [2]肖寒.600MW汽轮发电机转子匝间短路故障处理[J].科学与信息化,2025(6):123-125.
- [3]李关平.浅析昆明旅游索道发电机组常见故障处理方法——柴油发电机及交流发电机常见故障处理[J].模型世界,2023(2):61-63.
- [4]李俊卿,张承志,何玉灵,等.不平衡电压下励磁绕组匝间短路对同步调相机磁场及转子振动特性的影响[J].电工电能新技术,2025,44(1):33-44.
- [5]白雨卉,武玉才.基于新型励磁电流偏差计算的发电机转子绕组匝间短路检测[J].大电机技术,2024(6):1-7,44.