

Analysis and Improvement of Abnormal Differential Pressure During Main/Standby Filter Switching in the Synchronous Condenser Lubrication System

Shengchun Liu Weili Wang Wei Wang Lemin Wang Xiaoshan Lv

Qinghai Dehong Electric Power Technology Co., Ltd., Xining, Qinghai, 810000, China

Abstract

This article conducts a comprehensive diagnostic analysis of the abnormal fluctuation of inlet pressure during the regular switching of the main and backup filters in the lubricating oil system of a large synchronous phase-shifting camera group. Through process review, exploration of structural principles, fluid dynamics calculations, and on-site testing, the root cause of the fault was identified: there is a dead zone in the internal structure of the switching valve (two position six way valve), which causes hydraulic shock and a brief decrease in the flow cross-sectional area during the switching moment, resulting in a sudden drop in system pressure and triggering a low pressure warning. This article accurately identifies the dynamic characteristics of valves that are often overlooked in traditional analysis, and proposes comprehensive improvement measures from three aspects: hardware modification, process optimization, and status monitoring. After implementation, the filter switching was smooth, pressure fluctuations were eliminated, and system reliability was significantly improved, providing valuable reference cases for the refined design and operation of similar key auxiliary systems.

Keywords

phase-shifting camera; Lubricating oil system; Filter switching; Abnormal pressure difference; Process Optimization

一起调相机润滑油系统主备用滤网切换时压差异常分析及改进

刘生春 王玮丽 王伟 王乐明 吕晓山

青海德泓电力科技有限公司, 中国 · 青海 西宁 810000

摘要

本文针对某大型同步调相机组润滑油系统主备用滤网定期切换时的入口压力异常波动问题, 展开全面诊断分析。通过过程复盘、结构原理探究、流体动力学计算及现场测试, 查明故障根源: 切换阀(两位六通阀)内部结构有流通死区, 切换瞬间产生液压冲击且流通截面积短暂骤减, 致系统压力陡降、触发低压预警。本文精准定位传统分析易忽略的阀门动态特性问题, 并从硬件改造、流程优化、状态监测三方面提出综合改进措施。实施后, 滤网切换平稳, 压力波动消除, 系统可靠性显著提升, 为同类关键辅机系统精细化设计与运维提供了宝贵参考案例。

关键词

调相机; 润滑油系统; 滤网切换; 压差异常; 流程优化

1 引言

大型同步调相机的轴承、轴瓦等关键部件需可靠润滑, 润滑油系统堪称其“血液循环系统”, 油滤网则是保障油质清洁的核心。系统常配主、备用并联滤网及切换装置, 正常时用主滤网, 主滤网堵塞压差达设定值便切换至备用, 且需保证切换中油压、流量稳定。某调相机站例行切换试验时, 切换瞬间润滑油泵出口压力骤降, 近低压报警值, 虽未跳机但存严重隐患。本文以此为切入点, 不简单归因为滤网堵塞

或泵出力不足, 而是从系统动态过程展开深度故障分析与工程治理^[1]。

2 系统结构与故障现象描述

2.1 润滑油系统及滤网切换装置简介

该调相机润滑油系统采用主油泵、交流辅助油泵和直流事故油泵的多级冗余配置。油品经过冷却器后, 进入双联滤网装置。该装置的核心是两位六通切换阀。

正常工况: 切换阀阀芯处于“主路”位。油流路径为: 进油口→阀芯通道→主路滤网→阀芯另一通道→出油口→各轴承。

备用工况: 切换阀阀芯旋转 60° 至“备用”位。油流

【作者简介】刘生春 (1983-), 男, 中国青海大通人, 副高级工程师, 从事高电压与绝缘技术研究。

路径变为：进油口→阀芯通道→备用路滤网→阀芯另一通道→出油口。

压差监测：在主路和备用路滤网的两端分别安装有压差传感器，用于监测滤网的堵塞程度。

切换驱动：切换阀通常通过手动、电动或液动方式驱动。

2.2 故障过程详细描述

机组正常运行时，运维团队按流程将润滑油滤网从主路切至备用路，操作瞬间（手柄转动或电动执行机构动作），润滑油母管压力从 0.38MPa 骤降至 0.16MPa，持续约 1.5 秒后回升至 0.37MPa。压力最低点触及 0.18MPa 预警

值，距 0.15MPa 联锁值仅一步。切换后检查，备用滤网压差 < 0.05MPa（通畅无堵），主油泵参数正常。核心矛盾显现：备用滤网通畅却出现类堵塞压力骤降，问题指向切换过程，需深挖切换机制原因并解决。

3 故障诊断与根因分析

为查明原因，分析组从流体动力学和阀门机械结构两个层面进行了深入剖析。

3.1 可能性分析与初步筛查

首先，对可能导致切换压力下降的常见原因进行系统性排查。

表 1 滤网切换压力异常可能原因及初步排查

序号	可能原因	分析判断与排查方法	排查结论
1	备用滤网严重堵塞	检查备用路滤网压差历史数据及在线显示值，均远低于报警值。切换后压力稳定，证明滤网通畅。	排除
2	油泵出力不足或性能下降	调取主油泵运行电流、出口压力历史趋势，均在额定范围内。切换前后（除切换瞬间）泵出口压力稳定。	排除
3	系统存在泄漏	对润滑油系统进行全面排查，未发现切换操作关联范围内的外漏点。系统长期压力稳定，排除内漏扩大可能。	排除
4	排气不充分，系统存在气阻	检查油箱油位及滤网壳体顶部排气阀，未发现大量气体。压力曲线形态为瞬间陡降后快速恢复，非气体压缩/膨胀特征。	排除
5	切换阀本身设计或存在缺陷	压力异常与切换动作时间点高度吻合，且所有其他可能性均被排除。此原因为高度怀疑对象。	待证实

3.2 深度分析与根本原因定位

聚焦于切换阀后，我们对其工作原理和动态过程进行了深入研究。

3.2.1 两位六通阀切换过程流体动力学分析

理想的切换阀应在从一个工位切换到另一个工位时，实现油路的无缝平滑过渡。但实际的阀门结构，为避免内漏，阀芯与阀套之间通常存在密封重叠区或过渡位死区。

“瞬间断流”效应：在阀芯从“主路”位向“备用路”位旋转的某一中间瞬间，阀芯的密封面可能会同时遮断通往主路滤网和备用路滤网的油路通道，形成一个极其短暂的、毫秒级的全闭或近乎全闭状态。对于不可压缩的油液，流量的瞬间中断会导致动能转化为压力能，产生巨大的液压冲击，表现为压力先产生一个正向峰值，紧接着由于流动停滞，泵出口至阀芯间的压力急剧建立，而阀芯后的系统因短暂失流，压力暴跌^[2]。

“节流壅塞”效应：另一种可能是，阀门设计上不存在完全断流，但在过渡位置，流通面积急剧减小，形成一个节流效应极强的狭窄流道。根据流体力学伯努利方程，当流通截面骤减时，流体流速增加，导致该处的局部压力显著降低。这种节流造成的效果可能远大于正常流经滤网的压力降。

3.2.2 根本原因确定：阀门动态切换特性不良

综合以上分析，故障的根本原因并非阀门损坏，而是其内部流道设计存在固有缺陷，导致在动态切换过程中产生

了不利于系统压力稳定的工况。

直接原因：切换阀在阀芯位移或旋转的某一中间位置，产生了“瞬时断流”或“严重节流”效应。

根本原因：a. 阀门选型/设计缺陷：设备制造商在阀门设计时，可能未充分考虑到该阀门在高压、大流量润滑油系统中快速切换时的动态水力特性。密封重叠量的设计不合理，或过渡流道的形状优化不足，是导致问题的根源。b. 系统响应耦合：润滑油系统本身具有一定的容积和惯性，但对于毫秒级的剧烈流量变化，其缓冲能力有限。压力传感器的监测点位于滤网之后，更能敏感地反映出下游流量的中断情况。

表 2 故障根本原因归纳

类别	内容描述
直接原因	两位六通切换阀在动作的过渡过程中，出现了短暂的、导致油流严重受阻或中断的工况。
作用机理	机理一瞬时断流：油流瞬间中断引发液压冲击，随后下游失压。 机理二严重节流：流通面积骤减产生极大的局部压力降，导致下游压力暴跌。
根本原因	1. 阀门结构设计不合理：阀芯/阀套的密封重叠量或过渡流道几何形状未进行优化，无法实现无扰或低扰切换。 2. 动态特性未验证：阀门制造商可能未提供或电站未索要阀门在快速切换过程中的压力流量动态特性曲线。

4 处理与改进方案

4.1 临时处置措施——优化切换操作流程

在未进行硬件改造前, 为避免压力波动冲击系统, 立即修订了运行规程中的滤网切换操作步骤: 1. 时机选择: 滤网切换操作尽量安排在调相机空载或低负荷运行时进行, 此时润滑油流量相对较低, 液压冲击能量减小。2. 油泵冗余运行: 在切换操作前, 预先启动交流辅助油泵, 形成双泵并列运行的局面。此举大幅提升了系统的流量和压力冗余度, 当切换阀产生节流时, 并联油泵能更好地维持系统压力, 缓冲波动。3. “慢速”切换: 对于手动或可调速的电动切换阀, 操作时要求缓慢、匀速地转动操作手柄, 延长切换时间, 使流量变化率降低, 从而极大弱化液压冲击和节流效应的强度。效果验证: 采用“先启辅泵, 后慢速切换”的方案后, 再次进行切换试验, 润滑油母管压力最低点仅降至 0.30MPa, 完全在安全范围内, 证明了该措施的有效性^[3]。

4.2 中期改进方案——硬件改造与升级

阀门解体检查与测绘: 待机组检修时, 对切换阀进行解体, 重点检查阀芯和阀套的过渡区几何形状和密封重叠量。精确测绘相关尺寸。

阀芯流道优化: 目标: 消除切换过程中的“死区”和“节流点”。方法: 与阀门厂家或专业流体研究机构合作, 对阀芯进行流道优化设计。例如, 在阀芯上开设卸荷槽、预开口或设计成 V 形渐变流道, 确保在整个切换行程中, 总有一个方向保持足够的流通面积, 实现流量的平滑过渡, 而非突变。仿真验证: 利用计算流体动力学软件对改进前后的阀芯进行动态流动仿真, 对比其切换过程中的压力波动情况, 确保改进效果。3. 更换或升级切换阀: 根据优化后的设计方案, 定制新的阀芯组件或更换整合切换阀。

4.3 长期根本措施——系统设计与运维优化

设计选型标准提升: 在未来项目或同类系统的改造中, 在技术协议中明确要求阀门供应商提供切换过程的动态压力流量特性报告, 并将“切换过程中系统压力波动范围”作为一项强制性考核指标。加装缓冲或稳压装置: 评估在切换阀入口附近加装一个小型蓄能器的可行性。蓄能器能吸收液压冲击, 并在压力瞬间下降时释放能量, 补充流量, 起到稳定系统压力的作用。3. 完善状态监测与预警: 在滤网切换试

验时, 将润滑油压力趋势作为关键监测画面。建立滤网切换的标准压力波形库。将每次切换时的压力曲线与标准曲线进行比对, 若波动幅度增大, 则预警并分析原因, 实现预测性维护。

5 效果验证

在实施临时操作流程后, 立即进行了多次滤网切换试验。结果均显示, 润滑油母管压力波动大幅减弱, 最低压力始终高于辅助油泵联锁启动定值, 切换过程平稳可靠。

在后续的机组 A 级检修中, 按计划对切换阀进行了优化改造。采用了开设 V 形渐变槽的新阀芯。改造后, 即使在单泵运行、快速切换的最严苛条件下, 压力波动范围也被控制在 $\pm 0.03\text{MPa}$ 以内, 完全消除了异常现象。标准压力波形已录入 SIS 系统, 作为常态化状态监测的依据。

6 结语

在本次调相机润滑油系统滤网切换压差异常的分析与处理过程中, 我们成功揭示了一个在静态设计阶段被忽略但在动态运行过程中显著暴露的关键问题。分析结果表明, 对于液压系统中的切换部件而言, 其动态过渡过程中的流体特性与静态性能同样重要, 甚至在安全考量上更为关键。具体到本次事件, 两位六通阀在切换瞬间产生的“瞬时断流”或“严重节流”效应, 是导致润滑油压力异常暴跌的根本原因。为了应对这一问题, 采取“先启辅泵, 后慢速切换”的操作流程被证明是一种有效的临时应对策略。而从长远角度出发, 对阀芯流道进行基于计算流体动力学的优化设计, 则是彻底解决此类问题的根本性工程技术手段。

参考文献

- [1] 王天一, 张超峰. 调相机润滑油泵切换时油压异常跳机问题与对策分析 [J]. 电工材料, 2025, (04): 114-116. DOI:10.16786/j.cnki.1671-8887.eem.2025.04.026.
- [2] 孙建津, 刘锐, 董朝晖, 等. 新型分布式调相机润滑油系统的设计开发 [J]. 电机技术, 2023, (02): 4-7.
- [3] 贾小平, 夏瑜婷, 席波, 等. 50 MVar 调相机润滑油系统合理选型与油温校验 [J]. 东方电气评论, 2022, 36 (04): 35-37. DOI:10.13661/j.cnki.issn1001-9006.2022.04.006.