

Analysis and optimization measures for overcurrent faults in the static variable frequency starting system of the camera during simultaneous adjustment

Shengchun Liu¹ Jie Zhang² Hairong Wang¹ Zhenzhong Fu¹ Zhanshan Yang¹

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

2. State Grid Qinghai Electric Power Company Electric Power Science Research Institute, Xining, 810000, China

Abstract

This article focuses on the overcurrent tripping fault of the static frequency conversion starting system (SFC) during the debugging of a large phase-shifting camera project, and conducts a comprehensive process review and in-depth analysis. By examining historical data, analyzing start-up waveforms, calculating system parameters, and conducting simulation verification, the root cause was identified as weak inter turn insulation in the SFC input transformer, which caused breakdown under specific harmonic and operational overvoltage excitations, resulting in a phase to phase short circuit on the secondary side and triggering overcurrent protection action on the SFC input side. The article elaborates on the fault diagnosis process in detail and proposes comprehensive optimization measures based on analysis from four dimensions: equipment selection, system design, protection configuration, and operation and maintenance strategies. After implementation, it effectively improves the reliability and safety of the SFC starting system, which has important reference value for the debugging and operation of similar projects.

Keywords

phase-shifting camera; Static variable frequency starting system; Overcurrent fault; optimization measures

一起调相机静止变频起动系统过流故障分析及优化措施

刘生春¹ 张杰² 王海蓉¹ 付振忠¹ 杨占山¹

1. 青海德泓电力科技有限公司, 中国·青海 西宁 810000

2. 国网青海省电力公司电力科学研究院, 中国·青海 西宁 810000

摘要

本文针对某大型调相机工程调试中静止变频起动系统 (SFC) 过流跳闸故障, 展开全过程梳理与深度分析。通过检查历史数据、分析起动波形、计算系统参数及仿真验证, 定位根本原因: SFC 输入变压器匝间绝缘薄弱, 在特定谐波与操作过电压激励下击穿, 引发二次侧相间短路, 进而触发 SFC 输入侧过流保护动作。文中详细阐述故障诊断过程, 并基于分析从设备选型、系统设计、保护配置、运维策略四维度提出综合优化措施。实施后有效提升 SFC 起动系统可靠性与安全性, 对同类工程调试与运行具有重要参考价值。

关键词

调相机; 静止变频起动系统; 过流故障; 优化措施

1 引言

随特高压直流输电技术发展, 电网对动态无功支撑和电压稳定性要求提高, 同步调相机因优异性能大规模应用。调相机需外部动力起动, 静止变频起动系统 (SFC) 因起动平滑、控制精确等优点成主流方式。但 SFC 结构复杂, 起动中承受剧烈电气应力, 过流故障常见且危害大, 可能损设备、影响调相机并网与电网安全。本文以某换流站 300Mvar 调相机 SFC 为对象, 记录其首次起动试验过流跳闸故障并分析根因, 提出优化方案, 为同类系统提供借鉴^[1]。

2 系统结构与故障过程描述

本工程 SFC 系统为“交-直-交”电流源型, 核心含输入开关 (总电源)、输入变压器 (Dyn11 接线, 35kV/2 × 1.8kV 变比, 供压、隔离电网、抑谐波)、晶闸管桥式整流器与逆变器 (交直、直交转换)、平波电抗器 (平滑电流、限故障电流); 输出侧经开关、起动母线、离合器连调相机转子, 控制部分由励磁与 SFC 本体系统协同管理起动逻辑等。调相机首次起动试验中, SFC 上电备发指令时跳闸, 监控显示输入侧过流 (12.5kA, 超定值), 现场变压器内有爆破声与烟气, 检查发现其压力释放阀动作、油箱有

放电痕迹，初判故障在 T1 内部。

3 故障诊断与根因分析

3.1 电气量数据分析

调取故障录波装置记录的波形数据，是分析故障的第一步。其特征分析如下：

SFC 输入侧电流：故障发生时，B 相和 C 相电流瞬间急剧增大，峰值达到约 13kA，且两者相位接近反向。A

相电流变化相对较小。这表明故障类型为严重的相间短路故障。

SFC 输入侧电压：B 相和 C 相电压瞬间崩溃，大幅降低，A 相电压也随之波动。这是典型的相间短路导致的电压特征。

直流侧电流与电压：在故障瞬间， I_{dc} 和 U_{dc} 均为零。这证明了故障发生在 SFC 系统主电路通电但晶闸管尚未触发的时刻，故障点位于晶闸管桥之前，即输入变压器及其连接母线范围内。

表 1：故障关键电气量特征分析

电气量	故障前状态	故障瞬间特征	分析结论
SFC 输入电流	接近于零	B、C 相出现幅值巨大、方向相反的冲击电流	指向 B、C 相间短路
SFC 输入电压	35kV 额定电压	B、C 相电压崩溃，A 相电压波动	支撑相间短路结论
直流侧电流 I_{dc}	0	始终为 0	故障点在晶闸管桥之前
直流侧电压 U_{dc}	0	始终为 0	故障点在晶闸管桥之前
保护动作信息	-	“SFC 输入侧过流保护”，12.5kA	主保护正确动作，切除故障

3.2 输入变压器解体检查

对故障变压器进行返厂解体，是定位故障直接证据的关键步骤。解体后发现：

绕组损坏情况：变压器二次侧 B 相绕组靠近中性点区域存在严重的匝间短路和对地放电点，并发展为 B 相与 C 相绕组间的贯穿性放电通道。这是导致相间短路的直接物理证据。
2. 绝缘材料检查：损坏区域的匝间绝缘纸存在多处击穿碳化点，且其材质和厚度经检测，略低于同类高端产品的标准。
3. 连接件与屏蔽：绕组内部的电磁屏蔽措施存在局部不完善，可能导致电场分布不均^[2]。

3.3 根本原因综合分析

结合前文所述 300Mvar 调相机 SFC 系统结构及首次起动试验跳闸故障，该故障的直接原因为输入变压器匝间绝缘

击穿，即变压器二次侧绕组制造时存在微观瑕疵或绝缘材料本身有薄弱点，致使局部放电起始电压和耐压裕度不足；诱发原因为操作过电压与谐波激励，SFC 系统上电瞬间属于“空载变压器合闸”过程，会产生高幅值操作过电压与含大量谐波的励磁涌流，虽系统设有避雷器等过电压抑制措施，但保护水平未完全覆盖变压器绝缘最薄弱点，在过电压与特定频率谐波共同激励下，绝缘薄弱点电场强度超耐受极限，引发局部放电并迅速发展为匝间击穿；根本原因则在于设备制造质量与绝缘设计裕度，制造环节中绕组绕制、绝缘处理工艺控制不严，是绝缘薄弱点存在的内因，且该变压器应用于 SFC 这种谐波和暂态过程严重的特殊负载，其匝间绝缘和冲击绝缘水平设计裕度却未高于普通配电变压器，存在设计考虑不足的问题。

表 2：故障根因归纳

原因类别	具体描述
直接原因	SFC 输入变压器二次侧 B 相绕组匝间绝缘发生击穿，并发展为 B-C 相间短路。
诱发原因	SFC 系统上电时的操作过电压与励磁涌流，对变压器绝缘形成了强烈的电气冲击。
根本原因	变压器制造过程中存在绝缘瑕疵，且其绝缘设计（针对 SFC 应用场景）的耐受裕度不足。

4 优化措施与实施方案

4.1 设备层面优化

加强匝间绝缘：要求新更换的变压器采用更高等级的匝间绝缘材料，并增加绝缘纸的厚度和层数。提高绝缘水平；明确提出工频耐受电压和雷电冲击耐受电压应比标准值提升一个等级。
优化工艺控制：要求在绕制、浸渍、烘烤等关键工序增加在线监测和出厂试验项目，如进行更加严格的局部放电试验和倍频耐压试验。

对 SFC 系统的其他关键设备，如整流/逆变桥晶闸管、平波电抗器、交/直断路器等，进行全面的状态评估和隐患排查。

4.2 系统设计与配置优化

为了进一步提升静止变频器系统的稳定性和安全性，本工程对过电压抑制方案进行了优化。在 SFC 输入变压器的两侧，即高压侧和低压侧，均安装了高性能的氧化锌避雷器，此举旨在确保避雷器的保护特性，特别是残压水平，能够与变压器提升后的绝缘等级相匹配，从而提供更加有效的过电压保护。此外，为了专门针对操作过电压进行抑制，考虑在变压器的高压侧增设 RC 吸收回路，该回路能够有效地吸收系统在操作过程中产生的过电压，降低对设备绝缘的威胁。

同时，为了改善系统的电流和电压特性，工程还增设了限流与滤波装置。首先，对在 SFC 输入侧加装空芯电抗

器的方案进行了深入评估，目的是通过限制系统的短路容量和励磁涌流的幅值，从而降低短路故障对系统的冲击。此外，对输入变压器的阻抗电压百分比进行了优化调整，以实现限制短路电流和确保电压稳定性之间的最佳平衡。这种优化不仅有助于提高系统在故障情况下的恢复能力，还能在正常运行条件下保持电压的稳定，从而延长设备的使用寿命，提高整个 SFC 系统的运行效率和可靠性^[3]。

4.3 保护与控制策略优化

为保障 SFC 系统安全运行，本工程完善优化保护配置：为输入变压器新增差动保护，与原有过流保护构成双重化保护，提升动作选择性与速动性；配置轻、重瓦斯保护，灵敏反映变压器内部故障。同时优化过流保护定值与时间阶梯，避免励磁涌流误动，确保故障时快速切除。上电逻辑方面，修改 SFC 控制程序：合上输入开关 QF1 后，增加 100-200 毫秒延时，待励磁涌流衰减稳定后再投控制系统或后续操

作，避免电气应力最大时敏感操作，降低上电风险，提升系统稳定性与安全性。

4.4 运维管理策略优化

4.4.1 加强调试与投运前检验：

制定严格的 SFC 系统分步调试大纲。在首次上电前，必须完成所有一次设备的绝缘电阻、直流电阻、变比等试验，以及保护装置的传动试验。

对输入变压器，必须进行感应电压试验，确保其绝缘性能达标。

4.4.2 制定专项巡检与预防性试验制度

将 SFC 系统及其输入变压器列为重点巡检设备，定期进行红外测温、油色谱分析、超声波检测等状态监测。

缩短 SFC 输入变压器的预防性试验周期，重点关注其绝缘性能的变化趋势。

表 3：综合优化措施一览表

优化层面	具体措施	预期效果
设备层面	1. 提升变压器匝间绝缘等级与工艺 2. 提高工频和冲击绝缘水平 3. 强化关键元器件可靠性	从源头上提升设备本质安全，杜绝先天性缺陷
系统设计	1. 优化过电压抑制（避雷器、RC 回路） 2. 评估加装限流电抗器 3. 优化变压器阻抗	抑制外部电气冲击，为设备创造良好的运行环境
保护控制	1. 增设变压器差动、瓦斯保护 2. 优化过流保护定值 3. 优化系统上电时序逻辑	构建快速、可靠、有选择性的保护防线，防止故障扩大
运维管理	1. 加强投运前检验与调试 2. 制定专项巡检与监测制度 3. 缩短预防性试验周期	实现全过程闭环管理，及时发现并消除潜在隐患

5 效果验证

在采取上述优化措施后：

新采购的 SFC 输入变压器通过了更为严苛的出厂试验，尤其是局部放电量小于 50pC，远优于标准要求。

在第二次调试中，对 SFC 系统进行了分步上电：先空载投入输入变压器，录得的励磁涌流和过电压均在安全范围内；随后逐步进行 SFC 空载试验和带调相机起动试验。

整个起动过程顺利，所有电气参数正常，保护装置未误动。截至目前，该调相机组已成功并网运行超过一年，SFC 系统多次起动均稳定可靠。

6 结论

本文通过调相机 SFC 起动系统过流故障案例，展示从故障现象记录、电气数据分析、设备解体到根因定位的全过

程方法。分析表明，故障根源是 SFC 输入变压器绝缘薄弱，且对操作过电压等严酷工况耐受能力不足。基于此，本文提出涵盖设备选型、系统设计、保护配置、运维管理的综合优化措施，实践证明措施有效可行，显著提升系统安全性与可靠性，对解决同类大型旋转电机变频起动问题具参考推广价值。未来，结合数字孪生的实时监测与预测性维护，将是提升 SFC 运维水平的重要方向。

参考文献

- [1] 朱朝柱. 基于调相机的电力系统无功补偿方案研究与应用 [J]. 电力设备管理, 2025, (04): 47-49.
- [2] 简优宗, 原晓琦, 张亦驰, 等. 大初始阻力矩分布式调相机的变频启动控制 [J]. 大电机技术, 2024, (06): 8-12.
- [3] 石祥建. 大型同步调相机静止变频器高可靠控制及应用技术研究 [D]. 东南大学, 2023. DOI:10.27014/d.cnki.gdnau.2023.005722.