

特高压换流变压器绕组股间短路故障诊断及原因分析

肖舒月¹, 童涛², 王鹏², 刘阳²

(1. 江西水利电力大学, 江西 南昌 330099, 2. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

摘要:换流变是特高压直流输电系统的核心设备,其内部故障可能导致重大停电事故。文中针对某特高压换流变总烃异常增长事件,通过油色谱分析、现场诊断试验、返厂解体检查及多物理场仿真验证,系统揭示了换流变阀侧线圈股间短路的故障机理。通过低频通流试验和负载损耗试验排除了磁路故障,并锁定故障位于绕组电回路。返厂解体发现阀侧线圈因绕制工艺不良导致股间短路,基于二维轴对称场路耦合模型的仿真结果表明,短路点电流密度增至正常值的3.5倍。文中研究结果表明,导线位移引起的股间短路是产气异常的根源,漏磁场与环流耦合作用加剧了局部过热,该结论为特高压换流变设计优化及状态检修提供了理论依据。

关键词:特高压;换流变压器;股间短路;漏磁场畸变;故障诊断

中图分类号:TM 41 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2025)03-0065-03

0 引言

特高压换流变作为直流输电系统的核心枢纽^[1-4],其阀侧绕组长期承受高幅值谐波电流与复杂电磁应力,导致股间短路故障率显著高于常规变压器^[5-8]。据统计,换流变故障中约35%由绕组绝缘缺陷引发,其中股间短路因隐蔽性强、诊断难度大而备受关注。股间短路通常由导线位移、绝缘劣化或机械应力引发,导致局部环流和高温过热,并伴随甲烷(CH_4)、乙烯(C_2H_4)等特征气体生成^[9]。现有研究多通过油色谱分析结合电气试验进行故障诊断^[10],但对特高压换流变复杂电磁结构下的故障机理仍缺乏系统性分析,尤其是漏磁场与环流的耦合作用机制尚未明晰^[11-12]。

文中针对某800 kV异常产气换流变压器开展诊断试验与仿真分析,包括提出基于低频通流试验的磁路-电路故障分离方法,建立考虑漏磁场分布的股间短路多物理场模型以量化环流与温升关系,并结合工艺检查揭示绕制缺陷对故障的诱发机制,研究结果可为换流变设计制造、运维检修提供理论支持。

1 故障概况及设备基本信息

1.1 故障概况

2024年5月,某±800 kV换流站一台高端换流变压器在线色谱监测显示总烃周增量达24.1 $\mu\text{L/L}$,总烃含量30.22 $\mu\text{L/L}$,其中总烃周增量阈值为10 $\mu\text{L/L}$ 。随即对该换流变开展离线油样检测,结果显示甲烷(CH_4)与乙烯(C_2H_4)占比分别为39.3%与49.9%,三比值编码为022,符合高温过热(>700 $^{\circ}\text{C}$)特征。对色谱变化趋势观察约十日,换流变油中总烃增至106.8 $\mu\text{L/L}$,乙炔含量升至1.21 $\mu\text{L/L}$,同时伴随着负荷增长,缺陷存在恶化趋势,判断换流变存在爆燃风险,该换流变被迫停运。

1.2 设备基本信息

该故障换流变系2021年生产,单相四柱结构,额定容量415 MVA,网侧电压500 kV,阀侧电压600 kV。采用单相四柱、两主柱并联结构,绕组从内到外依次为铁心、调压、网绕组、阀绕组。网线圈为纠结连续式,阀线圈为螺旋式(39根导线并绕),调压线圈为单层圆筒式。网、阀线圈端部出线,网侧引线两柱并联从箱盖垂直引出,阀侧引线两柱“手拉手”并联从箱壁侧出。

收稿日期:2025-05-06

作者简介:肖舒月(2006),女,本科在读,主要从事电力设备故障诊断研究。

2 诊断试验分析

2.1 色谱数据分析

换流变油色谱报警时数据(见表 1)显示,在线与离线油样总烃偏高,以甲烷和乙烯为主,伴有微量乙炔。根据《变压器油中溶解气体分析和判断导则》(DL/T 722—2014)^[13]判断三比值编码为 022,判断故障类型为高于 700℃的高温过热。从趋势上看总烃增长与负荷相关,且变化稍滞后于负荷。

表 1 换流变油色谱数据

	氢气	乙炔	总烃	甲烷	乙烯	乙烷	一氧化碳	二氧化碳
离线	16.66	0.27	51.29	20.18	25.59	5.25	292.24	393.37
在线	22.86	0.08	49.09	27.56	20.85	0.60	200.07	314.00

2.2 现场电气试验及处理

换流变停运后,开展包括绕组直流电阻、绝缘电阻等例行试验,结果均合格。

为了判断故障换流变内部过热缺陷是否位于电回路,先后在 1 分接、23 分接、17 分接开展低频通流试验,试验接线见图 1,施加电流为各分接额定电流的 50%~60%,各分接总烃变化情况见图 2。在整个通流试验前后,总烃含量基本保持稳定。结合运行过程中油色谱在线、离线数据以及现场试验结果,初步判断发热缺陷与磁通有关,决定返厂检查。

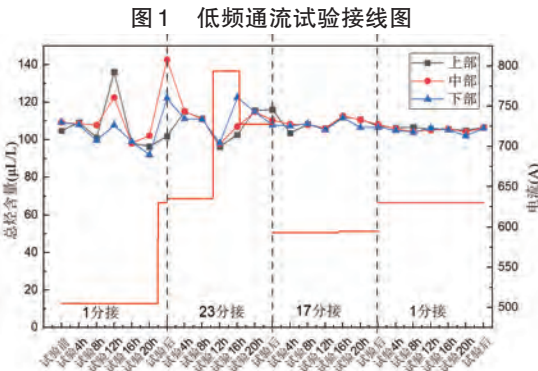
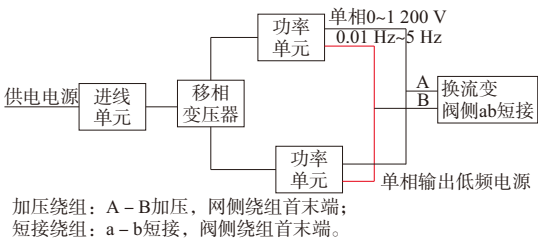


图 2 低频通流试验总烃变化趋势图

2.3 返厂试验及解体检查

换流变运抵变压器厂后,先吊芯检查,未发现异常。复装后用新变压器油进行试验。负载损耗试验对比出厂数据发现,50 Hz 下负载损耗增加约 100 kW,因电阻损耗占比大,推断故障点可能在线圈。为了进一步判断故障点位于阀线圈还是网线圈,先后在 1 分接、31 分接进行工频通流试验,通过在 1 分接和 31 分接试验情况对比,2 个分接在阀侧电流均为 1 258 A 时,31 分接网侧电流相比 1 分接网侧电流增加 40.42%,但 31 分接的产气速率相比 1 分接产气速率并未增加,反而有一定程度的减少。可初步排除网线圈,分析阀线圈故障可能性较大。具体油化数据见图 3。

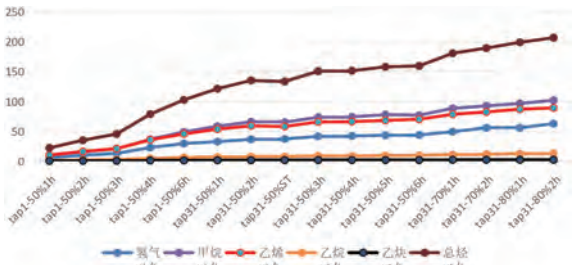


图 3 工频通流试验特征气体含量增长趋势图

对引线、器身进行拆解检查,重点关注引线接头、网阀引线绝缘、出线装置等部位,均未发现异常。吊出网侧线圈、阀侧线圈、调压线圈,调压、网侧以及柱 1 阀侧线圈内外表面及匝间检查均未发现异常。

柱 2 阀线圈检查,发现线圈内侧第 58 饼、撑条 2、3 档之间靠近换位处存在高温烧蚀痕迹,如图 4(a)所示,烧蚀范围覆盖线圈内径侧第 1-6 股导线,撑条对应位置发黑、变形;第 1 股导线换位后发生位移,如图 4(b)所示,导线被压入垫块与线饼之间。



图 4 解体检查情况

3 仿真验证及异常发热分析

3.1 股间短路仿真验证

为仿真模拟换流变股间短路引起的环流及绕组

损耗变化情况,采用二维轴对称场分股建模,用场路耦合的方式模拟计算,模型如图5所示,设置第58段K换位与内径侧一股导线短路。考虑到计算数据量较大,模型基于38次换位将线圈轴向分为39个区进行等效计算(该等效方式无法计算绕组涡流损耗,仅能考虑环流及直阻损耗)。

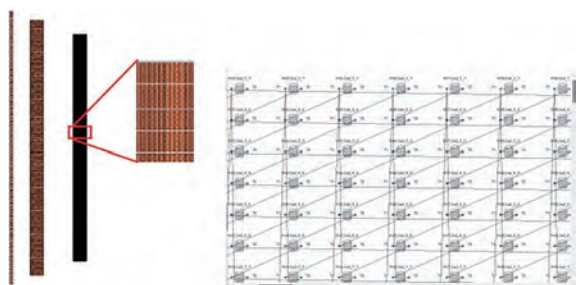


图5 换流变绕组及局部电路模型(绕组从左到右依次为调、网、阀)

仿真结果表明:1) 阀侧线圈第58段K换位内径侧两股短路,导致第58段最内径一股电流增大至124.96 A(增大约3.5倍)、最外径一股电流增大至118.29 A,同时短路点下部阀线圈中与之串联的线股均同等增大;2) 由于短路环中电流增大,两股短路相较于正常工况,直阻损耗增加约41 kW。

由于仿真模型进行了简化处理且仅考虑了两股短路工况,仿真结果中的数值仅供分析参考。由于换流变实际短路股数约6股,造成直阻损耗增加必然大于仿真结果,因此,返厂后负载损耗增加约100 kW,与解体检查发现的短路点是可以对应的。

3.2 环流发热原因分析

正常导线完全换位时,股间漏磁通产生的电流可以相互抵消,如图6(a)所示。在该换流变中,柱2阀线圈内侧第58饼的撑条2、3档之间靠近K换位处第1股导线换位后发生位移,导线被压入垫块与线饼间,6股导线间发生短路。在线圈股间短路后,形成了新的闭合回路,如图6(b)所示。

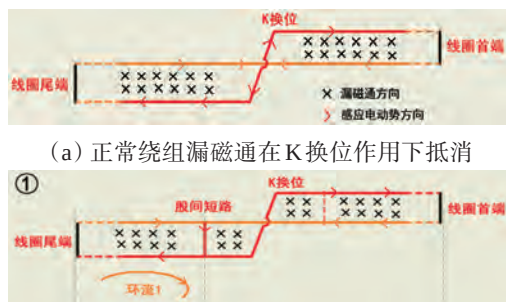


图6 漏磁通作业下股间短路

并联多根导线短路后,导线间由完全换位变为不完全换位,各导线在绕组漏磁场中所处的位置不同,感应出的漏电动势也不相同。短路导线之间电势不同,会产生循环电流,漏磁通产生的电流在短路点叠加,引起短路点高温过热,产生大量总烃气体及少量乙炔。

综上所述,换流变异常产气原因为阀侧线圈股间短路在漏磁通作用下产生环流,在短路点形成高温过热故障,由于漏磁通大小与负载电流正相关,因此,产气速率与负荷强相关。

4 结语

文中通过多维度试验与仿真分析,揭示了换流变异常产气的根本原因为阀侧线圈股间短路引发的高温过热。油色谱三比值编码022与负载电流强相关性可有效识别高温过热故障;低频通流试验结合负载损耗增量分析,可准确定位电回路缺陷,明确故障由阀侧线圈股间短路导致高温过热产气,根本原因是制造工艺问题。采用的仿真量化了漏磁场-环流-温升的耦合机制,为故障反演提供了工具,为今后持续加强设备制造工艺管控和现场试验诊断能力建设提供技术基础。

参考文献:

- [1] 万达,伍志荣,韩金华,等.简析大型变压器类设备绕组匝间短路故障录波和油气相色谱特征[J].变压器,2024,61(7):57-66.
- [2] 刘建锋,范一凡,宋伊宁,等.基于改进连续变分模态分解和深度残差网络及漏磁信号的变压器绕组故障诊断[J/OL].电网技术,2025: 1-12[2025-04-30].<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1262>.
- [3] 汲胜昌,赵德华,贾云飞,等.变压器绝缘缺陷放电发展特性及检测方法研究现状及展望[J].高电压技术,2024,50(10):4297-4314.
- [4] 周春李,李亚锦,邓光武,等.基于多维度分析的换流变预警技术研究与应用[J].电气工程学报,2021,16(4):151-158.
- [5] 周秀,刘威峰,罗艳,等.一起特高压直流低端YD-A相换流变油色谱异常故障的分析[J].变压器,2020,57(8):72-76.
- [6] 童涛,王鹏,万华,等.近区短路引起的变压器匝间短路故障案例及其综合诊断试验分析[J].水电能源科学,2024,42(8):205-208,222.

(下转第80页)

保持最小净空距离(±800 kV、1000 kV 线路为 20 m, 500 kV 线路为 13 m, 220 kV 线路为 7 m)。

一般线路:将超高树木进行砍伐,各电压等级线路与树木最小净空距离以《架空输电线路运行规程》(DL/T 741—2019)^[6]要求为准。

参考文献:

[1] 顾先丽.江西森林火点时空特征及其变化趋势[D].南昌:江西师范大学,2019.

[2] 周志宇.山火灾害下电网输电线路跳闸风险评估研究[D].北京:华北电力大学(北京),2019.

[3] 国家林业局.全国森林火险区划等级:LY/T 1063—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.

[4] 卢威.模拟高风险植被火焰条件下间隙击穿特性试验研究[D].武汉:武汉大学,2019.

[5] 杨康,陈海翔,桑荣剑,等.输电线路山火跳闸机理的模拟实验研究[J].火灾科学,2016,25(2):73-78.

[6] 国家能源局.架空输电线路运行规程:DL/T 741—2019[S].北京:中国电力出版社,2019.

(上接第 67 页)

[7] 陈宇,符劲松,肖佩,等.一起 500 kV 换流变乙炔异常增长案例的分析及处理[J].变压器,2025,62(3):13-17.

[8] 唐振,谷应科,曾祥君,等.±800 kV 特高压换流变异常产气故障分析及处理[J].变压器,2023,60(6):54-58.

[9] 王仁,李林达,李正绪,等.换流变压器内部短路电流有限元仿真及能量评估[J].变压器,2022,59(10):26-31.

[10] 张冠军,田丰,杜振斌,等.一起特高压换流变压器调压绕

组击穿故障的原因探究[J].变压器,2022,59(7):61-65.

[11] 李斌,白翔旭.多策略改进 COA 算法优化 LSSVM 的变压器故障诊断研究[J].电工电能新技术,2025,44(4):112-119.

[12] 单敬,程养春,刘孟君,等.变压器过热故障特征气体演化规律的 Wiener 模型[J/OL].高电压技术,2025:1-13[2025-04-30].<https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20241531>.

[13] 国家能源局.变压器油中溶解气体分析和判断导则:DL/T 722—2014[S].北京:中国电力出版社,2015.

(上接第 75 页)

2) 2019 年退役密封圈中含有变压器油(约 20%)、天然橡胶(约 29%)和丁腈橡胶(约 16%)。

3) 备用密封圈中含有丁腈橡胶(约 46%),不含变压器油和天然橡胶。

4) 2023 年断裂密封圈与 2019 年退役密封圈中高岭土等填料含量基本一致(约 12%),且低于备用密封圈(约 24%),与表 2 元素分析结果一致。

4 结语

文中通过对一台发生漏油换流变的密封圈开展红外光谱、工业 CT、扫描电镜和热重分析等试验测试,结果表明,本次漏油密封圈与 2019 年更换退役的密封圈材质主要成分均含有不耐油的天然橡胶。根据相似相溶原理,在长期运行过程中,变压器油会渗入密封圈,密封圈因为吸油发生溶胀变软。一方面,密封

圈膨胀后挤出密封槽,在缝隙处会产生应力集中;另一方面,小分子的变压器油渗入橡胶大分子交联网络结构,使得橡胶大分子间的作用力下降,导致橡胶硬度下降以及模量降低,材料变得脆弱,在长期运行过程中缺陷逐渐发展,最终造成密封件开裂甚至断裂,引发漏油。基于此,密封圈投运前,应开展常规试验和材料分析测试等抽检手段,质量合格后方可使用。

参考文献:

[1] 国家质量监督检验检疫总局.橡胶鉴定 红外光谱法:GB/T 7764—2017[S].北京:中国标准出版社,2017

[2] 陈曦,于钦学,任文娥,等.变压器油的热分解动力学研究及其寿命预测[J].西安交通大学学报,2009,43(8):112-115,134.

[3] 宋帅帅,杨帆,徐云慧.热重分析法测定乳液共沉法天然橡胶复合材料的组分含量[J].橡胶科技,2018,16(12):50-54.

[4] 刘莉,王炳昕,瞿永涛,等.丁腈橡胶热降解的影响因素分析[J].橡胶工业,2013,60(4):211-215.