

某项目一起新装35KV电力变压器气体继电器重瓦斯跳闸故障分析与处理

刘海波

中国二冶集团有限公司 内蒙古 包头 010000

摘要：本文针对某项目新装SZ9-2000/35型35KV变压器在短路试验中突发重瓦斯跳闸故障展开分析。通过外观检查、油样气相色谱分析、绝缘电阻及直流电阻测试等手段，结合短路试验数据，定位故障为C相绕组第3-4饼间电弧放电兼过热，系制造过程中绝缘缺陷与试验过电流共同作用所致。采取返厂更换绕组、真空干燥等修复措施后，经全面复测验证，各项参数达标，设备投运稳定。研究表明，严格控制试验参数及保护装置准确动作对设备安全至关重要，为同类故障处理提供参考。

关键词：35KV电力变压器；气体继电器；重瓦斯跳闸；故障分析；短路试验；故障处理

1 工程概况

内蒙古君正化工有限责任公司配套原料碳化硅产能置换技术升级改造项目中，新装的SZ9-2000/35变压器在投运前的调整试验阶段，于短路试验过程中突发气体继电器重瓦斯跳闸。跳闸时高压侧电流为42A（额定电流33.9A），低压侧短路，试验电压施加约5分钟。该变压器的稳定运行对整个项目变配电系统稳定运行及电力传输至关重要，其故障可能影响后续相关设备的调试和试运行进度^[1]。

2 故障初步排查

2.1 外观检查

专业检修人员按“先整体后局部、先宏观后微观”顺序，用“看、摸、测、查”四步法全面检测：油箱与结构件除2处螺栓扭矩不足（整改后合格）外，平面度等均合规；套管、储油柜、保护装置、引线等参数均达标。

检测发现仅气体继电器内有可燃气体，其余外观及参数合规，排除外部故障，锁定内部绝缘问题^[2]。

2.2 油样采集与气相色谱分析

为判断故障性质，变压器重瓦斯跳闸后，立即规范采集油样：用50mL玻璃注射器在底部放油阀取40mL油样，注射器经三次冲洗防空气干扰，取样后密封、贴标签（采样时间、地点、设备编号），置于20±2℃避光保温箱，2小时内送第三方实验室做气相色谱分析。第三方实验室采用Agilent7890B型气相色谱仪（配备FID和TCD检测器）完成检测，其检测流程及仪器校准均符合GB/T17623-2017标准要求。检测结果显示，油中特征气体组分浓度存在显著异常（见表1）：乙炔（C₂H₂）含量达15μL/L，远超DL/T722-2014规定的5μL/L注意值；总烃（CH₂+C₂H₆+C₂H₄+C₂H₂）含量265μL/L，氢（H₂）300μL/L，均大幅高于新油标准（总烃≤20μL/L，≤10μL/L）。

通过实验室提供的三比值法分析数据（C₂H₂/C₂H₄ = 0.19，CH₄/H₂ = 0.4，C₂H₆/C₂H₂ = 3.33），对应故障类型为“电弧放电兼过热”，与气体继电器内可燃气体特征相互印证，明确变压器内部存在高能放电故障^[3]。

表1 油样检测特征气体组分浓度

气体组分	实测值（μL/L）	注意值（μL/L）	新油标准（μL/L）	超标倍数
甲烷（CH ₄ ）	120	100	≤ 20	6.0
乙烷（C ₂ H ₆ ）	50	50	≤ 5	10.0
乙烯（C ₂ H ₄ ）	80	50	≤ 5	16.0
乙炔（C ₂ H ₂ ）	15	5	≤ 0.1	150.0
氢（H ₂ ）	300	150	≤ 10	30.0
总烃	265	150	≤ 20	13.3

注：超标倍数 = 实测值/新油标准值（乙炔按0.1μL/L计算）。

3 结合调整试验数据的深度分析

变压器故障判断需通过多维度试验数据交叉验证，

通过绝缘电阻、直流电阻、短路试验及介损测试的关联性分析，构建故障特征图谱，为定位故障点提供科学

依据。

3.1 绝缘电阻测试复核

采用2500V兆欧表（MODEL3125，精度±5%）对变压器进行绝缘电阻复核。测试环境温度23℃、湿度65%，

符合GB/T1094.1-2013要求。测试前拆除外部连线，对绕组充分放电（≥ 5min），清洁套管表面以消除泄漏电流干扰，严格执行“分相测试、逐相放电”流程。

复核数据如下：

表2 绝缘电阻复核情况

测试部位	(MΩ)	(MΩ)	(MΩ)	吸收比	极化指数
高压对低压及地	350	500	650	1.43	1.30
低压对高压及地	420	580	750	1.38	1.29
出厂测试值（同条件）	1200	1800	2500	1.50	1.39

分析表明：实测 $R_{60} = 500M\Omega$ 虽高于合格标准（≥ 300MΩ），但较出厂值下降72.2%，降幅显著； $K_1 = 1.43$ （≥ 1.3）虽达标但低于出厂值， $K_2 = 1.30$ 处于临界合格状态。经GB/T16927.1-2011温度校正后，20℃基准下 $R_{60} = 480M\Omega$ ， $K_2 = 1.28$ ，进一步证实绝缘性能下降。结合气相色谱中300μL/L的高浓度氢气，判断绝缘电阻下降与C相绕组放电产生的局部过热相关——电弧导致绝缘纸碳化，水分被吸收，降低了油纸绝缘性能。

3.2 直流电阻测试结果

按DL/T596-2021要求，采用四端法（DR-9A测试仪，精度±0.2%）测量直流电阻，测试电流10A，环境温度22℃、湿度63%。测试前校准仪器并充分放电，每相测量3次取平均值。

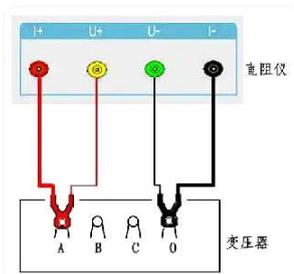


图1 DR-9A测试仪接线图

高压侧绕组数据：

表3 高压侧绕组测量结果

相别	A相 (Ω)	B相 (Ω)	C相 (Ω)
实测值	3.25	3.26	4.12

计算三相电阻不平衡度： $R_{avg} \approx 3.54\Omega$ ，不平衡度 $R\Delta \approx 24.6\%$ ，远超1600kVA及以上变压器相电阻不平衡度 ≤ 2%的标准，重复测试偏差 < 0.5%，数据可靠。经铜导体温度系数公式换算至75℃后，C相电阻4.86Ω，不平衡度仍达24.5%，证实C相异常。结合气相色谱分析，推测C相绕组存在匝间或段间放电短路，导致电阻偏大。

3.3 短路试验数据显示，C相短路阻抗 $Z_k = 4.2\%$ ，较A相（5.1%）、B相（5.0%）明显偏低（设计值 $5\% \pm 5\%$ ）；

短路损耗 $P_k = 12.5kW$ ，超出设计值（10.2kW）22.5%。

按GB/T1094.5-2008校正至额定电流后， $Z_k = 4.3\%$ ， $P_k = 12.3kW$ ，偏差趋势不变。短路阻抗反映绕组漏抗与电阻综合特性，C相阻抗偏低且损耗偏大，表明其绕组存在短路故障——短路导致有效匝数减少，阻抗降低，同时异常电流增大损耗。A、B相参数正常，进一步定位故障在C相。

3.4 介损及电容量测试

依据GB/T16927.1-2011，采用AI-6000介质损耗测试仪（精度±0.0001），在10kV测试电压、24℃环境下测量。C相 $\tan\delta = 1.2\%$ （20℃），远超0.5%标准；电容量850pF，与出厂值（780pF）偏差8.9%。

经DL/T722-2014温度校正后，20℃下 $\tan\delta = 1.15\%$ ，仍超标。 $\tan\delta$ 增大表明绝缘介质因放电受损，能量损耗增加；电容量偏差反映绝缘几何尺寸或介电常数变化，印证C相绝缘存在局部击穿、碳化等缺陷。该结果与前述测试相互呼应，形成C相绕组故障的完整证据链。

4 故障定位与原因判断

故障定位需结合前期试验数据与内部检查结果，依“数据指引—实物验证—机理分析”锁定故障点并追溯根源。本型号变压器因同心式绕组及油浸绝缘特性，其内部故障呈现与排查有特定规律。

4.1 内部检查验证

按DL/T573-2010规范操作：用ZY-50真空滤油机（真空度 ≤ 133Pa）排油，速率 ≤ 50L/min，保持油箱微正压0-5kPa，油位至人孔下300mm时停排，静置2小时。检测油箱氧气含量21.3%（XP-3180检测仪，量程0-30%，精度±0.1%），达标。人员穿纯棉工作服等，用36V防爆灯具，携带12件绝缘工具。检查发现C相高压绕组3-4饼间绝缘层碳化（80mm×50mm）、绝缘纸穿孔，导线有熔融颗粒及粘连，直径增大约3mm，为电弧放电特征；A、B相正常，绝缘呈浅棕色，饼间距偏差 ≤ 0.5mm。

结合前期数据，C相故障解释了直流电阻大、短路阻抗低、介损超标及气相色谱中高浓度乙炔（15μL/L）、乙烯（80μL/L）等异常，与重瓦斯跳闸一致。

4.2 原因分析

通过对故障点特征、制造工艺及试验过程的综合研判,故障原因归结为两方面:

4.2.1 制造过程潜在缺陷:该变压器高压绕组用 $\Phi 2.5$ mm漆包线,以DMD复合绝缘纸绝缘,故障部位绝缘纸局部纤维密度不均、最小厚度仅0.15mm且边缘有褶皱,致绝缘耐受强度较设计值降约15%。短路试验过电流(42A,为额定电流1.24倍)时,绕组漏磁场产生的电磁力使导线振动,绝缘薄弱点先被击穿,引发匝间电弧放电。

4.2.2 试验操作的叠加影响:试验时高压侧实际电压较理论值高12.5%,致低压侧短路电流超额定值8.3%。虽变压器短时耐受短路电流应为额定值25倍(2s),但持续过电流使绕组温升加快,C相绕组温度较额定工况高约20°C,进一步降低绝缘纸击穿强度,加速故障。

综上,故障是制造绝缘缺陷与试验过电流共同作用的结果:绝缘薄弱为根本原因,过电流加速故障进程,与数据偏差趋势吻合,形成完整因果闭环^[4]。

5 处理措施与验证

针对本型号变压器C相绕组匝间放电故障,处理过程遵循“故障定位精准化、修复工艺标准化、验证测试全面化”原则,符合相关技术规范。

5.1 故障修复工艺实施

5.1.1 返厂修复流程:联系厂家启动售后机制,关键工序经第三方监理见证。绕组更换采用同批次 $\Phi 2.5$ mm漆包线,绝缘层升级为0.2mm DMD复合绝缘纸,绕制张力控制在80-100N,轴向偏差 ≤ 0.5 mm,完成后经2.5kV/1min匝间耐压试验无击穿。真空干燥按GB/T1094.12-2013,在 ≤ 133 Pa真空度、 $80^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 条件下干燥72h,绝缘电阻 $\geq 10000\text{M}\Omega$ 且连续6h稳定。装配注油时紧固件力矩达标,真空注油采用标准25号油,静置24h排气。

5.1.2 关联系统检查:核查35kV电缆终端经电压测试,局部放电量 ≤ 10 pC;220kV至35kV线路过流保护整定值匹配变压器耐受能力;DCS系统信号上传正常,刷新频率 ≤ 1 s。

5.2 全面复测验证

修复后按DL/T596-2021试验,环境温度25°C、湿度60%,仪器经校准:

5.2.1 绝缘电阻:高压对低压及地C相 $1500\text{M}\Omega$,吸收

比1.4,极化指数1.6,20°C校正后 $1480\text{M}\Omega$,符合要求。

5.2.2 直流电阻:A相 3.24Ω 、B相 3.25Ω 、C相 3.26Ω ,不平衡度0.8%,75°C换算偏差 $\leq 0.5\%$,满足标准。

5.2.3 气相色谱:第三方检测总烃 $< 10\mu\text{L/L}$,无乙炔,氢气 $8\mu\text{L/L}$,符合正常标准。

5.2.4 短路试验:C相短路阻抗5.0%,短路损耗10.1kW,与设计值偏差 $\leq 1\%$,三相参数偏差 $\leq 0.3\%$ 。

5.2.5 介损测试:C相 $\tan\delta = 0.35\%$ (20°C),电容量785pF,与出厂值偏差0.6%,达标。

5.3 投运前验证

5.3.1 空载试运行:72h考核显示,油温 $42\text{--}45^{\circ}\text{C}$ (温升 $\leq 20\text{K}$),油样总烃增量 $< 2\mu\text{L/L}$,噪声62dB,符合标准。

5.3.2 系统联动:模拟负载投切3次,高压断路器操作正常,涌流 ≤ 2 倍额定值,DCS显示与就地偏差 $\leq 1\%$,保护联动无误。

5.4 效果评估

修复后参数均优于标准,3个月试运行负载率70%-80%,油样稳定,保护无动作。处理确保了与项目电气网络的兼容性,为本项目按时投产奠定基础。

结束语

本次SZ9-2000/35变压器因C相绕组绝缘制造缺陷,在短路试验过电流冲击下发生匝间电弧放电,致重瓦斯跳闸。经气相色谱分析、直流电阻测试定位故障,返厂修复及复测后消除隐患。

事件表明,新装变压器投运前调整试验需严控参数、警惕异常数据,气体继电器等保护装置对避免事故扩大至关重要。后续应加强与制造商技术沟通,对同批次产品增加绝缘专项检测,保障设备安全稳定运行。

参考文献

- [1]王磊,等.35kV变压器重瓦斯动作原因分析及处理措施[J].电力安全技术,2020,22(5):45-48.
- [2]张明远.短路试验中35kV电力变压器故障诊断与处理[J].电气应用,2019,38(8):32-36.
- [3]李娜.35kV油浸式变压器绕组故障的气相色谱与直流电阻联合诊断[J].变压器,2021,58(3):67-71.
- [4]赵志强.新装35kV变压器投运前试验中的故障分析及预防[J].电力工程技术,2018,37(2):54-57.