基于油色谱分析的500 kV变压器故障预警方法

刘　阳[1]，童　涛[1]，熊军辉[1]，刘红文[2]，万亚玲[3]

（1.国网江西省电力有限公司电力科学研究院，江西 南昌 330096；2.云南电网有限责任公司电力科学研究院，云南 昆明 650000；3.国网江西省电力有限公司南昌供电分公司，江西 南昌 330096）

摘　要：油色谱分析是电力变压器最常用的状态监测手段之一，能够及早发现设备内部的异常情况，有效预防潜伏性故障。文中以一起500 kV变压器故障分析为基础，通过在线油色谱乙炔超标对变压器进行预警，通过对油色谱进行分析，判断为金属部件悬浮放电；结合试验、内部检查确定产气故障原因为器身固定压钉松动，提出了相应的运维检修建议。结果表明，油色谱分析能够有效地提前发现变压器内部的潜伏性故障，避免更严重的故障发生。

关键词：变压器；油色谱分析；故障预警

中图分类号：TM 407　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1006-348X（2025）03-0005-03

0　引言

电力变压器是电力系统中的重要设备，一旦发生故障，将会威胁到电力系统的稳定性和安全性[1-2]。我国110 kV及以上等级的电力变压器主要采用油纸绝缘结构，当变压器内部有放电或过热故障时，绝缘油和绝缘纸会分解产生气体。绝缘油色谱分析法可以通过分析变压器绝缘油中的溶解气体组分，判断内部绝缘状态，是变压器故障诊断及预警的重要手段[3-4]。

文中通过分析某500 kV变压器在线油色谱异常问题，介绍了一种利用油色谱分析，进行变压器故障预警的方法，对油中溶解气体的组成、含量、产气速率展开分析，结合有关试验、内部检测，查找故障原因，提出针对性预防措施，为变压器运行维护提供参考。

1　油色谱分析预警原理

1.1　油色谱分析原理

变压器绝缘油由许多不同分子量的碳氢化合物组成，其中包含大量的C-H键和C-C键，绝缘纸由纤维素组成，内含大量的无水右旋糖环和弱的C-O键及葡萄糖甙键。在电或热故障下，绝缘油与绝缘纸发生分解，其中的化学键发生断裂，产生氢气、一氧化碳、二氧化碳和低分子烃类气体，如甲烷、乙烯、乙烷、乙炔等，并逐步溶解在绝缘油中。因此，通过对绝缘油色谱进行分析，得到油中溶解气体组分，可以提前发现变压器内部潜伏性缺陷。

1.2　油色谱预警原则

通过对油中溶解气体数据进行在线监测，可以对运行中变压器的故障进行诊断并及时追踪故障发展趋势，实现故障预警。根据《变压器油中溶解气体分析和判断导则》（DL/T 722—2014）[5]，可通过气体绝对含量和产气速率的测量实现变压器故障预警。

1）气体绝对含量。将油色谱数据中特征气体的绝对含量与注意值进行对比，当特征气体含量超过注意值时，应重点关注。500 kV变压器运行中的油中溶解气体注意值为：氢气150 μL/L、总烃150 μL/L、乙炔1 μL/L。同时，首次检测到乙炔时应引起注意。

2）产气速率。除了要对气体的绝对含量进行关注，还需要结合产气速率，对故障进行分析。产气速率的计算有绝对产气速率和相对产气速率两种方式。绝对产气速率为每运行日产生某种气体的平均值，变压器的绝对产气速率的注意值为：氢气10 mL/d、总烃12 mL/d、乙炔0.2 mL/d，相对产气速率为每运行月

收稿日期：2025-04-29

基金项目：国家电网有限公司科技项目（特高压交流油浸纸套管典型异常产气缺陷诊断方法及差异化运维策略研究，5218202400R）。

作者简介：刘阳（1999），男，硕士，助理工程师，研究方向为变压器状态检修技术。

某种气体含量增加值相对于原有值的百分数；变压器总烃的相对产气速率注意值为10%（对总烃初值很低的设备不适用）。

2 故障预警案例

2.1 事件基本情况

某500 kV变电站1号主变A相油色谱在线监测数据显示，乙炔含量从长期稳定在0.9 μL/L突增至1.58 μL/L，超过注意值，现场继续跟踪监视；三日后，油色谱在线监测数据显示乙炔含量已达3.41 μL/L，且在线监测数据保持稳定增长趋势，增长数据见表1。

对1号主变A相取油开展离线油色谱检测，上部乙炔含量为3.61 μL/L、中部为3.43 μL/L、下部为3.57 μL/L，差别很小，与在线监测数据十分接近，详见表2。

由于油中乙炔含量已超过注意值1μL/L，且计算得到乙炔绝对产气速率约65.5 mL/d，远大于注意值0.2 mL/d，因此将设备临时停运进行分析。

表1 #1主变A相油色谱在线监测数据

μL/L

采集时间	H_2	CO	CO_2	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_2H_2	总烃
Day1 06:00:06	12.31	71.76	823.82	1.97	0.24	0.29	0.90	3.40
Day1 14:00:06	13.99	76.76	868.02	2.09	0.27	0.30	1.19	3.84
Day1 22:00:06	15.72	83.85	861.13	2.18	0.29	0.30	1.58	4.35
Day2 06:00:06	15.15	81.88	857.45	2.15	0.30	0.30	1.68	4.43
Day2 14:00:06	14.99	78.48	879.32	2.12	0.30	0.30	1.78	4.50
Day2 22:00:06	16.67	83.16	883.40	2.20	0.33	0.29	2.15	4.97
Day3 06:00:06	17.30	71.34	858.70	2.05	0.37	0.30	2.44	5.15
Day3 14:00:06	21.76	78.86	931.74	2.23	0.40	0.31	2.90	5.84
Day3 22:00:06	24.48	76.84	934.92	2.22	0.43	0.31	3.17	6.13
Day4 06:00:06	25.92	85.51	953.99	2.40	0.45	0.32	3.41	6.58
Day4 13:03:00	27.31	84.61	921.39	2.33	0.46	0.32	3.56	6.67
Day4 16:29:00	27.59	86.39	926.21	2.40	0.47	0.31	3.63	6.81

表2 #1主变A相离线油色谱数据

μL/L

部位	H_2	CO	CO_2	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_2H_2	总烃
上部	23	92	1 022	2.53	0.33	0.37	3.61	6.84
中部	24	92	973	2.48	0.28	0.40	3.43	6.59
下部	26	95	981	2.53	0.31	0.35	3.57	6.76

2.2 油色谱数据分析

故障主变油中溶解气体为氢气、乙炔，三比值编码为“200”，判断为低能放电。

采用MSS编码进行分析，编码为“2202”，当第一位编码（C_2H_2/C_2H_4）为2，且第二编码（H_2/CH_4）为2或3时，存在金属部件悬浮放电的可能性较大[6]。

2.3 电气试验分析

停电后，现场开展1号主变A相诊断性试验，项目包括绕组连同套管绝缘电阻、绕组连同套管介损及电容量、直流电阻、铁芯及夹件绝缘电阻、低电压短路阻抗、感应耐压及局放、局放后油中溶解气体检测等。诊断试验发现夹件对地绝缘电阻13.5 MΩ，不满足《电气设备预防性试验规程》（DL/T 596—2021）[7]中“不低于100 MΩ”的标准要求，其余试验均未见异常。

2.4 现场检查处理

对1号主变A相开展内检，对油箱底部异物、油箱磁屏蔽、铁芯垫脚绝缘、铁芯夹件接地线、各部位连接件及螺栓、调压开关等部位进行了重点检查，检查发现两处异常：

1）器身上部共16处压钉，其分布如图1所示。其中，主柱高压出线侧布置了6个压钉，旁柱布置了2个压钉；沿主柱、旁柱器身中心线镜像至另一侧，也对应布置了8个压钉，合计16处。

依次检查，发现靠近高压套管位置的①号压钉松动较严重（可用手拧动），与对应的压钉碗之间存在放电痕迹，如图2所示。另外，①号压钉镜像位置压钉、⑧号压钉存在轻微松动（扳手拧紧可拧30°左右），其他压钉无松动现象。

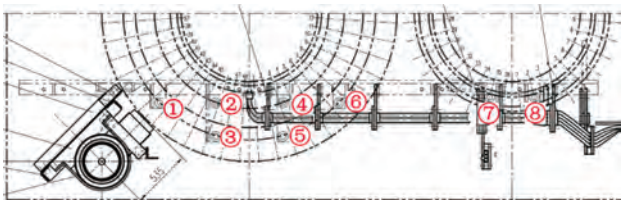

图1 器身压钉分布图

图2 ①号压钉放电痕迹

2）在靠近人孔处垫脚内部，发现两处金属异物（最长一根长约1.5 cm）。两处异物取出后，使用2 500 V兆欧表开展夹件对地绝缘电阻测试，夹件绝缘电阻为

13 GΩ，数据合格。

2.5 故障原因分析

综合现场试验和检查情况分析，主柱高压出线侧①号压钉松动，压钉与压钉碗存在接触不良现象，导致运行中出现间隙性悬浮放电现象，这与油中溶解气体特征三比值判断结果“低能放电”、MSS编码判断结果“悬浮放电可能性较大”吻合。因此，判断①号压钉松动，导致间隙性悬浮放电为某500 kV变电站1号主变A相乙炔出现间歇性增长的原因；夹件绝缘电阻不合格原因为靠近人孔处夹件垫脚内部存在金属异物，造成夹件与油箱底部减震垫短接，与产生乙炔无关。

1号主变压钉结构如图3所示，压钉穿过夹件支板处为丝孔，支板下方紧固M48的金属螺母，将两者锁紧，压钉下部通过器身压板垫块的外部支撑配合压紧固定。该主变压钉采用单备帽，防松能力较差，容易在运行过程中因受振动导致松动。

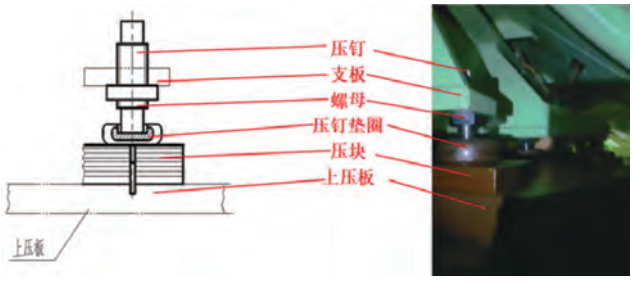

图3 压钉结构示意图

综上所述，1号主变A相乙炔出现间歇性增长原因为压钉防松动措施不完善，在主变运行过程中器身振动作用下发生松动，导致压碗悬浮并产生间隙性放电。如不及时处理，压钉松动导致线圈轴向压紧力下降，在遭受短路冲击情况下极易发生主变损坏。

现场对放电痕迹进行清理并复紧全部压钉后，将变压器恢复正常运行，运行两月内的油色谱数据正常，未出现乙炔气体，说明已消除1号主变产气缺陷。

3 结语

通过本次异常产气分析和故障处置，可以得到以下结论及建议：

1）油色谱分析是判断变压器内部状态的有效手段。通过油色谱在线监测，可以对变压器的潜伏性故障进行预警，在运行维护过程中，应重点注意乙炔等特征气体含量的变化趋势，提前发现设备隐患。

2）对于运行年限较长的变压器，应结合大修开展变压器内检工作，重点关注器身内部紧固件的松动情况，能够有效避免因紧固件松动造成的故障。

参考文献：

[1] 马宏忠，吴金利，陈冰冰，等.电力变压器振动特性分析与固有频率识别[J].高压电器，2023，59(6)：82-92.
[2] 张立静，盛戈皞，倪子瞻，等.油浸式电力变压器匝间故障早期的电热特性研究[J].中国电机工程学报，2023，43(15)：6124-6136.
[3] 张鹏飞，周力行，张倬栋，等.变压器油色谱混沌特性的过热故障分析及预测[J].高压电器，2019，55(8)：237-243.
[4] 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.
[5] 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.
[6] 万达，伍志荣，孟玉禅，等.简析涉及变压器类设备纸绝缘放电的油气相色谱特征[J].变压器，2023，60(2)：10-21.
[7] 国家能源局.电气设备预防性试验规程：DL/T 596—2021[S].北京：中国电力出版社，2015.