

# 油纸套管绝缘介质老化诊断分析

白 斌

(德阳电业局, 四川 德阳 618000)

**摘 要:**分析水分、温度和放电能量 3 种因素对纸纤维素长链及绝缘油碳氢键的影响;对比主绝缘  $\tan\delta$  测定和油中溶解气体色谱分析两种诊断方法,指出单一诊断方法存在的缺陷,提出采用综合诊断对套管绝缘状态作出精确评价。

**关键词:**油;纸;老化;诊断

**Abstract:** The influences of three factors that is moisture content temperature and discharge energy on paper cellulose chain and insulating oil hydrocarbon chain are analyzed. Through comparing  $\tan\delta$  determination method of main insulation with chromatographic analysis method of dissolved gas in oil, the defects in single diagnostic method are pointed out and the comprehensive diagnosis is suggested to carry out a precise evaluation of the insulating state of the bushing.

**Key words:** oil; paper; ageing; diagnosis

**中图分类号:** TM85 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0082-04

绝缘纸和绝缘油组合的油纸绝缘是高压套管主要组成形式。套管体积小,油量少,结构封闭,电场强度高且集中,在电场、热效应、水分等因素长期作用,绝缘发生劣化或老化,降低电气强度,故障持续发展导致绝缘击穿。统计显示套管故障的 67% 发生在油纸介质里<sup>[1]</sup>,故障为:①外部应力作用、密封绝缘老化造成套管密封损坏,绝缘受潮;②制造过程中绝缘褶皱,造成局部电应力集中使纸放电。因此对油纸老化程度判别,诊断套管绝缘状态,对确保电力变压器安全运行有重要意义。

下面论述油纸套管的老化机理,分析诊断方法,评估油纸的绝缘状态。

## 1 绝缘介质老化机理

套管绝缘介质主要是绝缘纸和绝缘油。绝缘纸的主要化学组成是纤维素,纤维分子的长链决定绝缘纸的电气性能。绝缘油是芳烃、烷烃及环烷烃等碳氢化合物组成的混合物。介质老化涉及固体绝缘纸的老化和绝缘油的老化;纸老化是纤维素降解,油老化是碳氢化学键的裂解。绝缘纸的老化是不可逆的,且老化程度是影响套管的使用寿命的主要因素;绝缘油的老化可通过更换新油或脱气过滤解决。介质老化过程是多种因素综合作用结果,老化的主要因素为:①水分;②局部过热;③局部放电。

### 1.1 水分

纤维素是长链的糖和单糖构成的有机物,并且纤

维素之间有大量孔隙,具有吸气性、吸油性和吸水性。良好的绝缘纸水分含量为 0.1% 左右,对纸老化速度影响可忽略不计;水分含量 0.1% 才对油纸老化产生很大影响。水分在油纸中分布,取决油纸系统的溶解饱和度。溶解饱和度受温度的影响很明显。温度升高时,水分大量迁移到油中;温度降低时,水分大量迁移到纸。

水分对纸的影响为可使纤维素中配糖键断裂,产生自由的糖,使长链分子断裂成短链分子,纤维变弱、缩短,改变纸的结构。纤维素老化也产生水分;纸中水分的增加,加快纸的老化速度。纸的含水量 0%、1%、2% 和 4% 时 DP 与老化时间关系见图 1<sup>[3]</sup>,从图 1 中可看出,在 120℃ 时,纸的  $\omega(\text{H}_2\text{O})$  为 2% 时,老化时间仅 100 天左右,老化率与  $\omega(\text{H}_2\text{O})$  大致成正比。

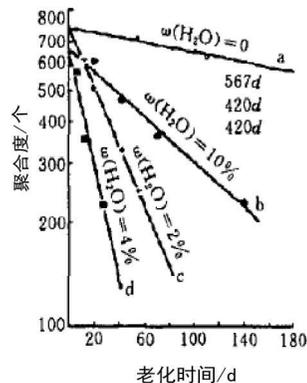


图 1 120℃ 时水分对老化率的影响

水分对绝缘油老化影响微小,只是造成绝缘油劣化,降低绝缘油的电气强度。绝缘油老化是受温度

影响,使油碳键大分子氧化裂解并生成碳类、水、一氧化碳和二氧化碳气体等。

### 1.2 局部过热

过热引起的油纸老化属于热老化,热老化过程是化学反应。绝缘纸老化与时间和温度关系构成热老化模型:  $L = A \exp(B/T)$ , 式中:  $L$  为绝缘材料击穿时间;  $T$  为绝对温度;  $A$ 、 $B$  为常数<sup>[4]</sup>。击穿时间  $L$  与温度  $T$  呈指数关系,即温度对绝缘纸老化速度起主要作用。过热的温度导致纤维链断裂的特性曲线见图 2<sup>[4]</sup>,从图可看出温度达到 140℃ 以上,纤维链断裂率明显增大;温度大于 200℃ 时,绝缘纸发生热解反应,引起纸纤维素结构链改变,即长链分子断裂成短链分子,造成纸的化学性能劣化,并主要产生  $CO$ 、 $CO_2$  气体和水,  $CO$  和  $CO_2$  是由纸纤维焦化所致。

绝缘油是碳氢化合物,由化学键不同的  $C-O$ 、 $C-H$  及  $H-H$  组成,具有不同的键能。温度引起绝缘油烃类碳键断裂或脱氢反应过程需要能量(活化能),使化学键断裂,活化能平均为 50 kcal/mol 左右的绝缘油与温度关系见表 1<sup>[4]</sup>;从表 1 可看出, >600℃ 时,碳键才能断裂。不同化学键结构的碳氢化合物有不同的热稳定性,油随温度增高使  $C-H$  键和  $C-C$  键断裂,生成氢原子和不稳定的碳氢化合物自由基;氢原子或碳氢化合物自由基重新化合,形成大量的氢气和低分子烃类气体和少量的  $CO$  和  $CO_2$ 。生成气体随温度升高出现顺序是烷烃→烯烃→炔烃。

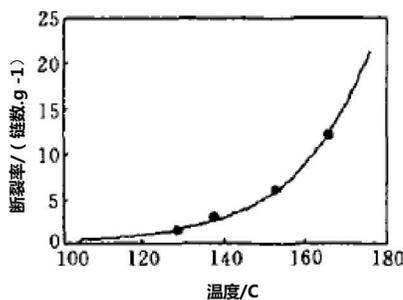


图 2 纤维素链的断裂率与温度之间的关系

表 1 绝缘油的活化能与温度关系

温度(℃)	200~300	400~500	500~600
活化能(kcal/mol)	11	23	54

### 1.3 局部放电

局部放电引起油纸老化属于电老化,电老化主要受放电能量和放电时间的影响。油纸面长期出现 5~10 pc 的低能量的局部放电<sup>[5]</sup>,可使油老化。油老化的机理是放电通过离子反应产生离子轰击键能最弱的  $C-H$  键(338 kJ/mol),促进  $C-H$  键断裂,重新化合成

氢气。随着放电能量的增强及引起温度的升高,使  $C-C$  键(607 kJ/mol)、 $C=C$  键(720 kJ/mol)和  $C\equiv C$  键(960 kJ/mol)重新化合成烃类气体<sup>[6]</sup>,使绝缘油成为高碳链 X 物状,失去轴向绝缘能力。油中放电产物会使绝缘纸凝集生成 X 蜡,降低纸的散热能力。

局部放电对纸的侵蚀,造成的局部老化远大于具有自恢复绝缘能力的油。局部放电产生电子和离子等带电粒子冲击绝缘纸,破坏纸的分子结构,导致纤维裂解;带电粒子撞击,使纸局部温度升高,引起纸过热,甚至炭化。

## 2 诊断技术

### 2.1 综合诊断必要性

套管的规格、结构、安装环境是多样,诊断必须把握运行状态、环境条件、检修工艺等因素。推定套管使用寿命而进行单一诊断技术是一项重要工作;基于诊断实例,积累单一诊断趋势数据对绝缘老化诊断有较精确的评价。绝缘状况的精确评价与运行状态、故障程度、显示信号的处理和数量、绝缘结构及故障部位有很大相关性,有时单一诊断方法无法诊断出存在的缺陷,为综合诊断提供很好的必要性。

### 2.2 诊断方法

套管诊断分两类。①局部放电量(PD)、电气特性测定、热图像测定等组成测定诊断;②利用绝缘油气体成分分析等组成化学诊断。

确定诊断项目分为不停电状态下实施带电诊断项目和处在停电状态下进行停电诊断项目。

在故障发展期采用以上方法进行的诊断,都是通过定量地把握绝缘状态,利用分析方法,作出定性地精确诊断。

现场的诊断项目有:主绝缘及末屏对地的绝缘电阻测定( $R$ )、主绝缘的  $\tan\delta$ (DLF)及电容量测定、油中溶解气体色谱分析(DGA)<sup>[7]</sup>。

本节对主绝缘  $\tan\delta$ 测定和油中溶解气体色谱分析两种诊断方法进行分析。

#### 1) 分析主绝缘 $\tan\delta$

油纸介质在交流电压作用下产生电导和极化的过程伴随能量损耗,简称为介质损耗。介质损耗由电导损耗和极化损耗组成。电导损耗是由带电质子或离子迁移从电场中吸收能量产生;极化损耗是由介质在交流电场中存在周期性极化所吸收的电场能量转变为热

能产生。套管绝缘介质发生受潮、局部放电、局部过热或电弧放电等故障,引起绝缘劣化或老化,使电导电流增大,导致电导损耗增加;同时,极化损耗也增加。介质损耗  $P$  与  $\tan\delta$  关系为:  $P=U^2\omega C \tan\delta$  式中:  $U$  为电压;  $C$  为电容,  $\omega=2\pi f^{[8]}$ 。当  $U$ 、 $\omega$  及  $C$  一定时,损耗  $P$  与  $\tan\delta$  成正比。停电诊断方法分 3 类。① 规程法:通过表 2<sup>[9]</sup>可对油劣化或油纸老化程度进行初步评价;② 趋势法:分析 10 kV 电压时  $\tan\delta$  趋势数据,能够反映绝缘介质劣化或老化程度,但是存在滞后效应;③  $\tan\delta-U$  关系曲线法:从随电压升高  $\tan\delta$  的增加陡度看出纸纤维和油老化程度或油劣化程度,见图 3。

表 2 套管 20℃ 时  $\tan\delta$  要求值

电压等级 (kV)		20~35	66~110	220~500
大修后	充油型	3.0	1.5	—
	油纸电容型	1.0	1.0	0.8
	充胶型	3.0	2.0	—
	胶纸电容型	2.0	1.5	1.0
	胶纸型	2.5	2.0	—
	充油型	3.5	1.5	—
运行中	油纸电容型	1.0	1.0	0.8
	充胶型	3.5	2.0	—
	胶纸电容型	3.0	1.5	1.0
	胶纸型	3.5	2.0	—

实例 1:表 3 为某座变电站 220 kV 变压器 110 kV 油纸电容型套管 A 相在进行预防性试验的主绝缘  $\tan\delta$  测定值 (10 kV 试验电压时)。从表 3 可看出,  $\tan\delta$  值低于表 2 要求值;从  $\tan\delta$  趋势数据看出,2006 年 3 月 2 日油纸绝缘已存在油劣化、油纸老化或放电,2006 年 6 月 9 日绝缘油劣化或油纸老化程度加快,表明故障性质严重。

油纸电气性能变化过程对  $\tan\delta$  影响为:① 绝缘油老化生成的杂质受电场作用解离为离子,使绝缘油的电导率大大增加,电导电流增加引起电导损耗增大,  $\tan\delta$  随之增大;② 绝缘油的局部放电引起游离损耗产生,使绝缘油温度上升,  $\tan\delta$  也上升。③ 绝缘纸老化形成局部的“杂质”——纸‘分子断链’<sup>[9]</sup>,增加了偶极子和夹层极化的损耗,引起  $\tan\delta$  增大。

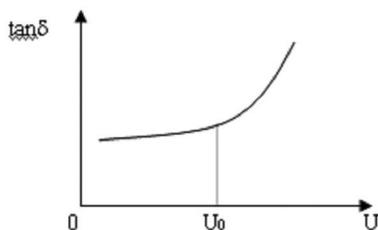


图 3  $\tan\delta-U$  关系曲线

绝缘油劣化的定性诊断可通过末屏对地的绝缘

电阻、微水含量和油  $\tan\delta$  判定,油纸老化原因的诊断由气体分析确定。

表 3 110 kV 套管 A 相主绝缘  $\tan\delta$  及电容量 C

时 间	$\tan\delta(\%)$	$\Delta \tan\delta(\%)$	C(pf)
20040421	0.376	—	381.07
20060302	0.651	0.275	379.71
20060609	0.918	0.267	382.30

## 2) 分析气体

套管内发生过热、放电等故障产生的热量使绝缘油和绝缘纸发生局部热分解,从而产生  $H_2$ 、 $CO$ 、 $CO_2$  及烃类等气体,  $CO$  和  $CO_2$  主要是纤维纸老化分解产生,非故障下  $CO$  和  $CO_2$  气体含量变化稳定。气体的成分和含量取决于故障类型和故障能量密度。诊断方法为  $H_2$ 、 $CH_4$ 、 $C_2H_2$  气体达到异常水平时主导气体及三比值法。三比值法在故障性质严重时才采用,  $CO$  和  $CO_2$  气体含量变化作为辅助诊断方法。主导气体和故障相关情况如下。

①  $H_2$  主导型 放电和受潮是主要原因;

②  $CO$ 、 $CO_2$ 、 $C_2H_4$ 、 $CH_4$  主导型 由过热引起故障是主要原因;过热主要原因是穿缆线鼻与引线头焊接不良、穿缆引线绝缘纸破损;X 蜡沉淀于绝缘纸等;

③  $C_2H_2$  主导型 放电引起故障是主要原因;放电主要原因是电容芯子卷制缺陷和电容屏设计尺寸不当等。

判断气体异常水平见表 4<sup>[10]</sup>。

表 4 套管油中溶解气体浓度注意值 ( $\mu l/l$ )

气体	含量
$H_2$	500
$CH_4$	100
$C_2H_2$	2(110 kV 及以下)
$C_2H_4$	1(220~500 kV)

实例 2:某局一台 220 kV 变压器 110 kV 套管 C 相油中溶解气体色谱见表 5<sup>[10]</sup>。

表 5 110 kV 套管 C 相油中溶解气体色谱数据 ( $\mu l/l$ )

时 间	$H_2$	$CH_4$	$C_2H_6$	$C_2H_4$	$C_2H_2$	$CO$	$CO_2$
19970806	20.8	19.6	17.6	27.9	0.0	513.6	4422.3
19990406	35.5	25.4	20.1	33.8	0.0	614.2	6048.1
200104081	184.54	135.8	989.2	7401.1	0.0	1564.6	12526.1

从表 5 看出,  $H_2$  和  $CH_4$  含量超过注意值。  $C_2H_2$  为 0,  $H_2$  占氢烃总量的 27% 以下,判断为无放电故障。  $CH_4$  占  $H_2$ 、 $CH_4$  和  $C_2H_2$  3 种气体总量的 77.7%, 为主导气体  $CH_4$ , 诊断为过热故障。  $CH_4$  超过注意值的 40 倍,  $H_2$  超过注意值的 2 倍,故障性质较严重。

故障类型用三比值 ( $C_2H_2/C_2H_4$ ,  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_4/C_2H_6$ ) 编码计算为 022, 判断套管存在  $>700^\circ C$  的严重过热故障; CO 和  $CO_2$  含量变化大, 且  $CO_2/CO > 7$  为固体绝缘材料—绝缘纸老化所致, 判断为绝缘纸热老化程度严重。故障原因为穿缆引线绝缘纸破损与导电管靠接产生局部过热<sup>[11]</sup>。

### 3) 综合分析

套管存在过热、放电等故障, 导致油纸电气、物理、化学性能的变化, 油纸分解产生气体, 油纸产生电量 (电流和放电量) 增加。气体含量和电量增长与套管绝缘结构、故障能量大小、故障部位、运行和检修等因素有直接联系。电气特性和化学试验对不同故障类型有较高的灵敏性, 由于为单一诊断方法, 不能对绝缘状况作出精确评价, 应将电气特性和化学试验结果进行综合分析。

实例 3: 某座变电站 220 kV 变压器 110 kV 套管 C 相油中溶解气体色谱数据和 10 kV 电压下的主绝缘  $\tan\delta$  见表 6 和表 7。

表 6 110 kV 套管 C 相油中溶解气体色谱数据 ( $\mu l/l$ )

时 间	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
20060609	83.43	13.28	4.84	4.74	0.0	832.871	713.41

表 7 110 kV 套管 C 相主绝缘  $\tan\delta$  及电容量 (C)

时 间	$\tan\delta(\%)$	C (pF)
20040421	0.406	381.07
20060302	1.036	379.43
20060609	1.610	382.27

从表 6 化学试验数据显示绝缘良好, 表 7 电气特性试验数据看出绝缘油劣化、油纸老化或放电。两种诊断方法差异受绝缘结构、故障部位、故障程度等因素影响。测试绝缘油的  $\tan\delta$  和微水含量均合格, 排除绝缘油劣化的因素。套管内部由于制造工艺不良、绝缘设计不当或 X 蜡造成油纸局部过热或局部放电故障, 加快 H<sub>2</sub> 和烃类气体的产气量和产气速率。故障部位在电容芯子内部, 故障发展过程中期阶段。由于 0.8~0.12 mm 厚的绝缘纸卷制十几层形成对气体扩散的阻碍性, 造成纸的透气性差, 致使电容芯子外部绝缘油中溶解气体含量低于注意值, 降低了化学诊断方法的精确性。

绝缘纸过热引起温度上升, 加剧纸分子的热运动, 使偶极子极化损耗增加。局部放电产生带电粒子撞击纸, 引起绝缘纸局部温度上升, 加速绝缘纸热老化; 绝缘纸的体积电阻率随温度升高而减小, 使电流

增加, 损耗增大。绝缘纸的散热性差, 温度积累效应加速故障点的温度上升速率, 电流随之增加, 损耗增大, 加剧绝缘纸的老化循环。油—纸构成的介质损耗取决于油纸性能和数量间的比例, 数量大的绝缘纸老化产生损耗远大于油损耗, 使套管  $\tan\delta$  随绝缘纸的损耗增加而增大。

## 3 结 论

- 1) 水分使纸纤维素长链断裂; 纸老化可产生水; 水分增加, 加快了纤维纸的老化速度;
- 2) 水分引起绝缘油劣化; 温度对绝缘油裂解、老化起主要作用;
- 3) 局部放电形成累积效应和局部过热引起绝缘油碳氢断裂和纤维纸的化学反应与物理效应, 致使油纸老化; 长期低能量局部放电也可使油纸老化;
- 4) 套管绝缘状态的监测和诊断采用单一诊断方法存在缺陷, 应用综合诊断分析, 对绝缘结构、运行状态、测定诊断和化学诊断进行相关性分析, 才能对绝缘状态作出精确评价。

## 参 考 文 献

- [1] 操敦奎. 变压器油中气体分析诊断与故障检查 [M]. 中国电力出版社, 2005.
- [2] 钟洪璧, 高占邦, 王官正, 王世阁. 电力变压器检修与试验手册 [M]. 中国电力出版社, 2001.
- [3] J. MK. MacAlpme 张潮海. 糠醛浓度判断变压器绝缘纸寿命的综述 [J]. 高电压技术, 2001, 27(4): 63—64.
- [4] 蒋雄伟, 贾志东, 谢恒. 绝缘材料老化寿命模型的研究进展 [J]. 高电压技术, 2000, 26(3): 44—46.
- [5] 岳明镜. 新型油纸电容式套管绝缘可靠性研究 [J]. 高电压技术, 2000, 26(2): 71—73.
- [6] 孙才新, 陈伟根, 李俭, 等. 电气设备油中气体在线监测与故障诊断技术 [M]. 科学出版社, 2003.
- [7] DL/T596—1996. 电力设备预防性试验规程 [S].
- [8] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术 [M]. 中国电力出版社, 2002.
- [9] 周悦, 朱建新. 高压油纸套管的频率响应测量及分析 [J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 163—164.
- [10] 王惠杰, 冯雪梅, 周义民等. 一起过热性故障的实例分析 [J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 180—181.

### 作者简介:

白 斌 (1971—), 男, 工程师, 现从事绝缘试验。

(收稿日期: 2008—12—12)