

文章编号:1001-1609(2006)05-0385-03

干式变压器绝缘树脂老化实验

柳再本

(浙江三变科技股份有限公司, 浙江 三门 317100)

Research on the Aging Experiment of the Insulation Resin of Dry-type Transformer

LIU Zai-ben

(Zhejiang Sanbian Sci-Tech Co. Ltd., Sanmen 317100, China)

摘要: 介绍了干式变压器绝缘树脂的老化理论及热老化实验原理。参考标准进行了绝缘树脂老化试验,并进行了实验数据处理及结果分析。通过实验得到了绝缘树脂的热老化性能参数,如温度指数等,验证了绝缘树脂耐热等级的可靠性。

关键词: 绝缘树脂; 热老化实验; 热质量损失

中图分类号: TM412

文献标识码: B

Abstract: In this paper, the aging theory of the insulation resin and the experiment principle of heating aging are introduced. According to the standard, the aging experiment is designed, and experiment data processing and results analysis are completed. Then the properties parameters, such as temperature index, are gotten by experiment. The reliability of insulation resin with heat-resistant class is verified.

Key words: insulation resin; heating aging experiment; mass loss during aging course

0 引言

多年来国内外学者对变压器的可靠性分析和寿命评估进行了广泛研究。变压器中使用的材料有金属材料和绝缘材料,作用在绝缘材料上的温度高低以及持续时间长短直接影响变压器的寿命。可靠性分析和寿命评估对评定产品质量,加强可靠性管理,发现变压器中的薄弱环节等方面具有较大作用。这类研究目前主要有3种方法:①通过收集投入运行的多台变压器的运行资料数据,运用数理统计方法进行评估。这种方法不需做实验,但要求收集的数据量大;②运用变压器试品或模拟试品进行加速寿命试验,根据试验数据推算出变压器的寿命分布。这种方法采用的数学理论比较完善,组织实施也比较容易,但往往耗资巨大,也难以描述元器件损坏的内在机理;③分析变压器各部分元件的失效过程,着重研

究组成变压器各绝缘材料的老化机理及其受环境因素的影响情况,由此推算变压器的寿命。这样的方法不仅耗资不大,而且有助于改进变压器的设计。对于干式变压器而言,仅有的一些文献仍然停留在绝缘材料的性能和老化机理的实验探讨以及变压器寿命的经验性评估阶段。这种寿命推算存在一定的难度,各种方法都存在局限性。

笔者采用第3种方法,分析了环境因素温度对变压器绝缘树脂老化的影响;并参考IEC标准设计进行了相应的绝缘材料老化实验,得到了变压器主要绝缘材料——环氧树脂在空气中的耐热性能参数。

1 变压器绝缘树脂老化的原因

材料的老化是由内因和外因两部分引起的。内因主要是构成材料的基本成分,即高聚物本身的结构状态和材料体系内部各组分的性质、比例等。外因是指外界的环境因素,包括物理因素、化学因素和生物因素等,其中太阳光、热、空气中的氧和湿度等是材料老化的重要因素。干式变压器一般在室内使用,变压器运行时的热环境以及所承担负载的大小对变压器的绝缘树脂老化起着决定性的作用,树脂的热氧化性能决定了变压器的使用寿命。热老化主要决定于最热点温度,不同的负荷条件和环境温度下不同的最热点温度。

电工产品的使用寿命通常取决于绝缘材料的耐热性能。评估绝缘材料的耐热性能最好使用有关的运行经验作基础,根据长期运行的大量统计结果来进行评估。但对于新产品的开发不能使用这种方法。必须使用材料评定试验,用加速寿命试验的方法去获取绝缘材料的热氧化性能参数。由于聚合物和电气绝缘技术的迅速发展,原先认可的、以化学成分和运行经验为基础的、用“耐热等级”划分各类绝缘材

收稿日期:2006-01-10; 修回日期:2006-03-20

作者简介:柳再本(1969-),男,浙江省三门县人,工程师,主要从事电力变压器设计与制造工作。

料耐热性的方法已经不一定适用,有必要考虑采用新的方法。通常采用完全的试验程序获得材料的温度指数(T_1),它代表一个特定点的性能;或采用比较试验法求得材料的相对温度指数(R_{T_1}),它代表被试材料相对已知参考材料的运行性能。

2 绝缘树脂热氧老化实验分析

2.1 实验原理

根据阿累尼乌斯公式^[1],在热环境影响下的化学反应速度可表达如下:

$$k=A \cdot e^{-E/RT} \quad (1)$$

式(1)中: k 为化学反应速度; E 为活化能; R 为气体常数; T 为绝对温度; A 为常数。

由于采用关系斜率的方法,只要用来进行性能诊断的失效标准与被试材料分子变化的特定程度存在对应关系时,这种加速模式就是可靠的。因此模式的可靠性并不一定要求诊断性能的值与分子变化程度之间存在严格的线性关系。除了这个基本假设外,还必须满足热老化化学机理方面的某些一般假设:①材料或其简单组合在宏观物理结构上是均匀的;②热降解过程是在匀相中进行的,其老化机理,如结构的化学变化、解聚等,应是一级化学反应。在这种情况下,其低分子量降解产物的释放量及挥发基本上是微不足道的,因而可以忽略不计;③老化反应在本质上是不可逆的。

热老化试验的目的是确定绝缘材料的性能在温度升高时经过多长时间会发生不可逆的劣化,并测出失效时间。使用失效时间的对数和热力学温度(绝对温度)的倒数之间的阿累尼乌斯线性规律来描述材料的热氧老化性能。阿累尼乌斯斜率的度量采用半差来表示。

半差理论上的正确形式应是取对应的热力学温度倒数之间的差值,以 HIK 表示,即: $HIK = \lg 2/b$, 式中: b 是所得回归线 $Y=a+bX$ 的斜率; Y 是回归线达到失效标准所需时间的对数,即热寿命的对数; X 是热力学温度倒数, $1/T=1/(273+\theta)$ 。即 $\lg t=a+b/T$ 。其中: θ 为摄氏温度; T 为绝对温度,并且 $T=273+\theta$ 。

但实际工程使用的半差是取对应摄氏温度的差值 HIC,可由 HIK 求得: $HIC \approx T_1^2 \cdot HIK$, 这个比例关系式适用于选定的参考温度 T_1 。式中 T_1 是对应于 T_1 或 R_{T_1} 的绝对温度。在线性耐热图上 HIK 各处相等,而 HIC 则随温度变化。

有些情况下可以使用耐热关系式中 20 000 h 和 5 000 h 对应的摄氏温度(θ_{20} 和 θ_5)来表示耐热性,用这两个数值也可以求出半差,对应的公式为:

$$HIK=(1/T_{20}-1/T_5)/2$$

2.2 实验总体设计方案

热氧老化实验的具体方法是将试样暴露在高于

预估温度指数的多个老化温度下,查看绝缘材料性能的变化,以得到材料性能与暴露时间、温度的变化关系,最终得到通常运行条件下的绝缘材料寿命估计值。

按标准获取试样后,将高温烘箱的实验温度设定在 155 ℃和 170 ℃。测定绝缘材料的原始指标参数后,将试样分别放入烘箱内。按预定时间间隔取出一组试样,测试材料的相应指标参数。进行数据分析处理,得到树脂材料的耐热图和耐热特征参数。

测试根据 GB 2567-1981 的规定,采用直接浇铸法制备。测试形状为长方体,尺寸为 120 mm×15 mm×6 mm。

根据国家标准^[2]或国际电工委员会标准 IEC 216-2 的推荐,对合成树脂的性能判定指标推荐使用:①弯曲强度;②热质量损失两个指标(见表 1)。

表 1 参数失效的标准

指标	推荐标准	辅助标准
弯曲强度/%	降到原有强度的 50	降到原有强度的 25, 75
热质量损失/%	减少 5	减少 3, 10

在热因子作用下,一种材料的所有性能不会以同一速度劣化。因而,采用不同的性能、不同的测试方法和失效标准,可以获得不同的温度指数。但作为一种实用的绝缘材料,对应不同性能指标的温度指数不应相差过分悬殊。

由于实验条件所限,只对热质量损失一种指标进行了测量。同时,为与树脂提供商瑞士 Ciba 公司的性能数据相比较,采用热质量损失 3.4%(接近上述 3%的辅助标准)作为确定温度指数 T_1 的标准。此处属于试验终点选择的问题。没有针对弯曲强度指标进行热老化实验,表明实验存在局限性。

2.3 实验设备

电光分析天平、高温烘箱、超声清洗槽。

2.4 实验步骤

(1)按标准取 32 个试样,分别做上标记;

(2)在超声波环境中,用无水酒精和丙酮对试样进行清洗,去除试样表面的油污。清洗完毕后,将试样在 120 ℃的温度下烘干 2 h 后取出;

(3)将试样称重后放入高温烘箱中,编号为 1~16 的试样放入设定温度为 170 ℃的烘箱,编号为 17~32 的试样放入设定温度为 155 ℃的烘箱;

(4)每隔一周,将试样取出,冷却后称重,计算质量损失。

2.5 实验结果和数据处理

根据变压器实际运行条件,高温烘箱温度分别设定为 170 ℃和 155 ℃。每次称重有 32 组数据,记录为称重 1,称重 2,平均值,质量损失%。电光分析天平测量精度 0.000 1 g,高温烘箱灵敏度±0.01 ℃。

采用算术平均的方法,两种不同温度下的重量损失情况见表 2。

表 2 不同温度下热质量损失随时间的变化

暴露时间 t/h	热质量损失 $\%$	
	170 °C	155 °C
24	0.111 3	0.058 8
48	0.121 8	0.074 1
120	0.200 0	0.086 9
240	0.462 8	0.111 8
360	0.609 6	0.122 1
528	0.790 5	0.151 5
696	0.898 5	0.174 8
864	1.018 0	0.192 7
1 200	1.155 7	0.225 8

采用工程数学的最小二乘法,得到热质量损失和时间的对数之间的拟合曲线见图 1,图中的横坐标为时间的对数,纵坐标为热质量损失。

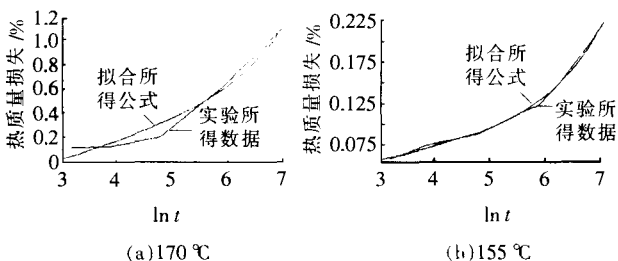


图 1 质量损失和时间的关系曲线

拟合所得的表达式为:

170 °C 下的拟合曲线为:

$$LOM = -0.391 35 + 5.554 1 \times 10^{-4} t + 0.132 94 \ln t$$

155 °C 下的拟合曲线为:

$$LOM = 0.017 54 + 1.023 3 \times 10^{-4} t + 0.124 95 \ln t$$

这里的 LOM 代表热质量损失; t 为暴露时间,单位为小时(h)。

2.6 结果分析

从 Ciba 公司提供的资料来看,树脂在 170 °C 下的重量损失见表 3。

表 3 树脂在 170 °C 下的重量损失

时间 t/h	重量损失 $\%$
350	0.79
500	0.98
700	1.10
850	1.20

试验所得的数据比 Ciba 公司提供的数据要小一些。由于实验的具体条件不同,这种比较并不能提供一个确定的优劣信息。但从这些数据中可以大致判断,厂方目前使用的绝缘树脂材料是符合 F 级绝缘标准的。

由于实验条件和时间所限,仅测量两个温度点下的性能曲线,无法得到准确的树脂耐热性能曲线,

只能根据拟合的曲线来估算绝缘材料的温度指数。由拟合出的曲线可以计算出,树脂绝缘材料在 155 °C 和 170 °C 温度下,质量损失达到指定的 3.4% 的时间大约分别是 28 000 h 和 3 600 h。

由这两个数值得到温度和质量损失达到指定标准的时间之间的线性关系式为:

$$t = 1/3(840 400 - 4 880 \cdot \theta)$$

这里 t 表示时间,单位为 h; θ 为温度,单位为 °C。

令 $t = 20 000$ h,可得到对应的温度值为 160 °C,即实验所用的绝缘树脂的温度指数 $T_1(20 000$ h) 为 160 °C,该材料符合 F 级绝缘标准。 t 和 θ 的拟合线性图见图 2。而应用公式 $\lg t = a + b/T$ 可得拟合曲线为:

$$\lg t = -21.862 77 + 11 260.58/T$$

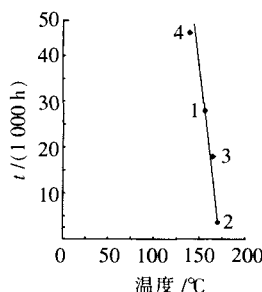


图 2 时间和温度的关系曲线

这里 $T = 273 + \theta$, $\lg t$ 和 $1/T$ 的拟合线性图见图 3。

令 $t = 20 000$ h,可得到对应的温度值为 157.4 °C,即实验所用的绝缘树脂的温度指数 $T_1(20 000$ h) 为 157 °C,材料符合 F 级绝缘标准 155 °C。半差 $HIC = \lg 2/b \approx 2.67 \times 10^{-5}$ 。对于 $t_1 = 20 000$ h 时, $\theta_1 = 157.4$ °C;对于 $t_2 = 10 000$ h 时,由式(8)得 $\theta_2 = 162.4$ °C。所以半差 $HIC = \theta_2 - \theta_1 = 5$ °C。由于实验条件所限,以上分析所得的数据需要进一步验证。在条件许可的情况下,应该按照国家标准 GB 2567-1981 的规定,详细进行材料的热老化实验,获取至少 4 个温度下的材料热氧老化性能曲线,从而得到较为准确的温度指数等热氧老化性能指标。

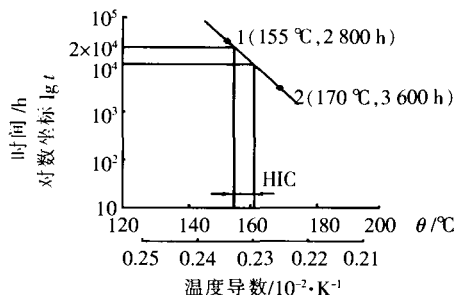


图 3 时间对数和热力学温度倒数的关系曲线

3 实验设备及试验情况说明

考虑到耐热性试验的昂贵价格,通常选择单一性能和终点来试验得出一个材料的耐热性结果。该实验是某公司为提高干式变压器可靠性(下转第 392 页)

涡流损耗。电抗器电导损耗： $P_L = I^2 \cdot r$ (r 为电抗器电阻)；试验电缆介质损耗： $P_C = U_C^2 \omega C \tan \delta$ (交流聚乙烯介质损耗因素取值范围为0.02%~0.05%)。

电抗器的涡流损耗与电抗器的体积大小、流过电抗器的电流、电抗器与铁板的高度等因素有关,需要根据试验设备和现场状况而定。

2.2.4 试验方法的选择

选择采用串联谐振还是串-并谐振的试验回路,参考的主要两个因素是电缆容量和设备额定容量。从式(1)可知,当电缆电容较大时,通过降低试验频率,可以降低试验电流,减少励磁变和电抗器的输出功率。如果频率在试验要求的下限时仍然超出励磁变和电抗器额定容量,应当采用串-并谐振法。

2.2.5 试验中应注意的事项

(1)当电压较高时,电晕损耗的功率不可忽视,过强的电晕会降低回路的品质,且电晕会产生很多干扰,影响试验电压波形。

(2)接地线应短、粗、直,接地点离分压器要近。一旦试品被击穿,击穿电压将瞬时跌落到零,由于 du/dt 很大,流过放电点和回路的电流可以达到千安

(上接第387页)

研究项目的一部分,整个研究项目包括电磁优化设计,温度场计算和绝缘树脂老化实验等。实验分析了温度对变压器绝缘树脂老化的影响,得到的指标表明所用的绝缘材料及该类型干式变压器达到F级绝缘耐热标准。试验方法见2.2实验总体设计方案及2.4实验步骤。

4 结语

通过实验,得到了变压器绝缘树脂的热氧老化

(上接第389页)

(其中: U_1, U_2 均以mV计)计算电路的线性度。 K 为拟合直线的斜率,取表1中比值的平均值。可以看出,电路的线性度非常好,在5%~120% I_n 范围内,线性度达0.04%。

3.2 高压侧功耗试验

高压侧低功耗是设计的出发点。系统正常工作时,高压侧供电电压须大于2.500V,试验中,高压侧供电电压为2.750V,满量程时测量出高压侧供电电流为8.179mA,则高压侧功耗为:

$$2.750 \times 8.179 = 22.5 \text{ mW} \approx 23 \text{ mW}$$

此值远远小于光供电电流互感器高压侧功耗须不超过200mW的要求。

4 结语

在光供电电子式互感器中,高压侧电路的低功

耗要求,往往限制了高压侧调制电路的方案。降低功耗既是要求,同时又是难点^[4]。笔者介绍了一种基于V/F转换的高压侧信号调制方法,并完成了系统设计。经试验,该系统线性度非常理想,且高压侧功耗仅23mW,大大提高了系统可靠性。

(3)电缆的屏蔽层需要通过接地线临时与大地可靠连接再与成套装置连接,不可利用杆塔连接。

3 结语

对于交联聚乙烯电缆而言,直流耐压试验已经不适合电缆的投产交接试验,采用交流耐压试验,根据电缆实际电容的大小,选择串联谐振或者串-并联谐振的试验方法,可以很好地模拟电缆的实际运行工况,从而有效地检出电缆的缺陷,保证电力系统的安全运行。

参考文献:

- [1] 贾涛. 开展XLPE电缆交流耐压试验的必要性与可行性[J]. 新疆电力, 2002(12): 4-7.
- [2] 江日洪. 浅谈橡塑绝缘电力电缆交接预防性试验的方法[J]. 电力试验, 2005(6): 10-12.

性能参数,如重量损失与时间的关系曲线,温度指数TI等。指标验证了该绝缘材料作为F级绝缘的可信性。通过试验所得的温度指数等数据可以进一步用于变压器寿命评估的参考,建立起关于绝缘材料温度的使用寿命经验公式。

参考文献:

- [1] 程尚模. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [2] GB 11026.1-1989. 确定电气绝缘材料耐热性的导则 制定老化试验方法和评价试验结果的总规程[S].

耗要求,往往限制了高压侧调制电路的方案。降低功耗既是要求,同时又是难点^[4]。笔者介绍了一种基于V/F转换的高压侧信号调制方法,并完成了系统设计。经试验,该系统线性度非常理想,且高压侧功耗仅23mW,大大提高了系统可靠性。

参考文献:

- [1] 颜研, 罗承沐. 一种新型光电电流互感器的研制[J]. 传感器技术, 2002(1): 23-27.
- [2] 韩正超. 模拟量信号的隔离及V/F的应用[J]. 四机科技, 2004(2): 23-26.
- [3] 李双, 方志, 赵中原, 等. 一种用在Rogowski线圈电流互感器中的V/F转换电路的设计[J]. 继电器, 2002, 30(10): 55-57.
- [4] 王少奎. 电子式电流互感器的发展现状及研制难点[J]. 变压器, 2003(5): 20-25.