

高压变压器油/气套管现场介质损耗试验方法讨论

申积良¹, 黄福勇¹, 周卫华¹, 汤美云²

(1. 湖南省电力公司试验研究院, 湖南 长沙 410007; 2. 湖南省电力公司, 湖南 长沙 410007)

摘要: 高压变压器油/气套管是一种新型电气设备, 由于结构特殊, 现场试验需要打开 SF₆ 气室, 工作难度大。为了在不打开 SF₆ 气室情况下, 对高压变压器油/气套管进行介质损耗试验, 笔者结合电路分析和试验, 提出了一种新的中性点加压试验方法, 并在现场设备上实际应用, 对试验接线可能引起的误差及测量结果等进行了分析和比较, 证明分析和试验结果有很好的一致性, 新的试验方法方便可行。

关键词: 变压器; 绝缘油/SF₆ 气体高压套管; 现场试验; 介质损耗测量

中图分类号: TM406

文献标志码: B

文章编号: 1001-1609(2009)04-0071-03

New Dielectric Test Method for Oil/Gas Insulated High Voltage Bushing of Transformer

SHEN Ji-liang¹, HUANG Fu-yong¹, ZHOU Wei-hua¹, TANG Mei-yun²

(1. Hunan Electric Power Corporation Test & Research Institute, Changsha 410007, China;

2. Hunan Electric Power Corporation, Changsha 410007, China)

Abstract: Oil/SF₆ gas insulated high voltage bushing is a new type of electric equipment in transformer. Because of its special structure, it is very difficult to open the SF₆ gas chamber in field test. This paper presents a new test method for dielectric loss of the bushing, in which the chamber needn't be opened. A test circuit with a voltage on the neutral point is designed and applied to field test device. The test data and the possible error are analyzed. Field test shows that the test data is consistent with the analytical one.

Key words: transformer; oil/SF₆ gas insulated high voltage bushing; field test; dielectric loss test

0 引言

近年投运的大型电力变压器中, 为了实现和 GIS 连接, 变压器高压出线套管普遍采用绝缘油/SF₆ 气体结构高压电容型套管 (简称油/气套管)。由于油/气套管是一种新型结构设备, 《电力设备预防性试验规程》(DL/T 596-1996) 等有关标准中, 没有对其试验方法进行规定, 采用以往标准中规定的试验方法进行套管试验, 试验接线时需要将 SF₆ 气室打开, 处理过程中工作量大, 现场试验极不方便。部分设备运行维护单位的油/气套管试验基本上没有进行。为了对这些设备的运行状况、设备缺陷等进行有效的检测试验, 笔者根据设备结构特点和现场条件, 对油/气套管试验方法进行了分析, 提出了一种新的试验方法和接线, 并对新方法的接线对测量结果的影响及可能引起的误差等进行了分析和比较。

1 设备结构特点及试验中的问题

油/气套管主要应用于变压器出线和 GIS 连接,

一般都采用油纸电容型结构, 安装后下端和变压器连接, 浸于变压器油中, 上端和 GIS 连接, 处于全封闭的 SF₆ 气室内。进行套管介质损耗及电容量测量时, 需要将 SF₆ 气室内的 SF₆ 气体排空, 打开气室, 才能进行试验接线, 试验结束后, 又要对该气室重新抽真空, 注入合格 SF₆ 气体, 操作麻烦, 工作量大, 要求高, 操作过程中容易造成新的缺陷。油/气型油纸电容式变压器套管的结构见图 1。



图 1 油/气型油纸电容式变压器套管

2 油/气套管介质损耗 ($\tan\delta$) 和电容量测量试验方法及接线

为了便于现场进行变压器高压油/气套管 $\tan\delta$ 和电容量测量试验, 试验在不打开 SF₆ 气室的情况下进行。这时无法直接在套管线端施加试验电压, 测

收稿日期: 2008-11-27; 修回日期: 2009-02-17

作者简介: 申积良(1950), 男, 高级工程师, 从事高压试验技术试验研究。

量时通过被测高压套管所在绕组中性点对高压套管施加试验电压。试验时变压器和 GIS 之间连接的隔离开关和接地刀闸处于断开位置, 变压器中性点接地解开(或断开接地刀闸), 高压套管 $\tan\delta$ 和电容量测量试验接线及等值电路见 2^[1]。

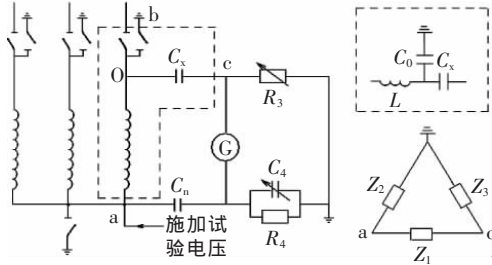


图 2 油/气高压套管 $\tan\delta$ 和电容量测量试验接线等值电路

3 试验接线对测量值的影响及误差分析

图 2 中的高压套管介质损耗测量电桥平衡电路

$$Z_{ab} = (R_0 + R_1 + \frac{R_0 R_x R_L + \frac{R_L}{\omega^2 C_x C_0} + \frac{L R_x}{C_0} - \frac{L R_0}{C_x}}{R_x^2 + \frac{1}{\omega^2 C_x^2}}) - j(\frac{1}{\omega C_0} - \omega L + \frac{R_x R_L}{\omega C_0} - \frac{R_0 R_L}{\omega C_x} - \omega L R_0 R_x - \frac{L}{\omega C_x C_0})$$

$$Z_{bc} = (R_0 + R_x + \frac{R_0 R_x R_L - \frac{R_L}{\omega^2 C_0 C_x} - \frac{R_0 L}{C_x} - \frac{R_x L}{C_0}}{R_L^2 - \omega^2 L^2}) - j(\frac{1}{\omega C_0} + \frac{1}{\omega C_x} + \frac{R_0 R_L}{\omega C_x} + \frac{R_x R_L}{\omega C_0} + \omega L R_0 R_x - \frac{L}{\omega C_0 C_x})$$

$$Z_{ca} = (R_1 + R_x + \frac{R_x R_0 R_L + \frac{R_L}{\omega^2 C_0 C_x} + \frac{R_0 L}{C_x} - \frac{R_x L}{C_0}}{R_0^2 - \frac{1}{\omega^2 C_0^2}}) - j(\frac{1}{\omega C_x} - \omega L + \frac{R_0 R_L}{\omega C_x} - \frac{R_x R_L}{\omega C_0} - \omega L R_x R_0 - \frac{L}{\omega C_0 C_x})$$

Z_{ab} 、 Z_{bc} 、 Z_{ca} 分别是电桥电路中 a 点对 b 点(地)、c 点对 b 点(地)和 a 点对 c 点(电桥的测量端)之间的等值阻抗。下面分别就试验接线对测量结果的影响进行分析:

(1) 阻抗 Z_{ab} 为 a 点对 b 点(地)之间的等值阻抗, 和整个电桥电路并联, 电桥平衡时, 不影响电桥的平衡状态, 故对测量结果没有影响。

(2) 阻抗 Z_{bc} 为电桥 c 点对地之间的阻抗, 它和电桥的第 3 桥臂即 R_3 并联, 引入的值会对电桥的平衡状态产生影响。以 QS₁ 电桥为例, 在高压套管电容为 250 pF 时, R_3 的读数为 1 274 Ω 左右, 即数量级为 10^3 左右。在 Z_{bc} 中, 实数部分中的第 1 项的数量级为 10^2 左右; 第 2 项的数量级为 10^3 左右; 第 3 项中, 分母的第 1 项远远小于第 2 项, 可以忽略。分子中 1、3、4 项的值远远小于第 2 项, 也可忽略。故有功部分中的第 3 项近似等于 $C_0^2 R_L / (C_0 C_x)$, 其值数量级为 10^3 左右。所以 Z_{bc} 有功部分数量级为 $10^3 \sim 10^4$ 左右。此时 Z_{bc} 为串联等值, 将其变换为并联等值后, 等值的电阻值在 10^8 以上。这一电阻和桥臂电阻 R_3 并联, 即在 1 274 Ω 左右的 R_3 上并联一电阻值为 $10^8 \Omega$ 的电阻, 对 R_3 的值的的影响完全可以忽略, 所以

中, 和常规的测量电路比较, 电路中增加了变压器绕组的电感 L 和 O 点的一个 GIS 气室的对地杂散电容 C_0 , 它们和被测高压套管 C_x 共同构成一个星形电路。为了分析试验接线对测量结果的影响, 令它们的等值复阻抗参数分别为

$$Z_l = R_l + j\omega L$$

$$Z_0 = R_0 - j \frac{1}{\omega C_0}$$

$$Z_x = R_x - j \frac{1}{\omega C_x}$$

对电路进行星形-三角形等值变换得^[3]

$$Z_{ab} = \frac{z_a z_b + z_1 z_c + z_c z_a}{z_c} = z_b + z_a + \frac{z_1 z_b}{z_c} \quad (1)$$

$$Z_{bc} = \frac{z_a z_b + z_1 z_c + z_c z_a}{z_a} = z_b + z_c + \frac{z_1 z_c}{z_a} \quad (2)$$

$$Z_{ca} = \frac{z_a z_b + z_1 z_c + z_c z_a}{z_b} = z_a + z_c + \frac{z_c z_a}{z_b} \quad (3)$$

由式(1)、(2)、(3)得

可以认为对试验不产生影响^[1,2]。

阻抗 Z_{bc} 的虚数部分中的 1、2 项的和所确定的电容值在 10^{-10} 以内(C_0 的电容值和高压套管电容相当, 一般为几百 pF), 第 3 项中分母的第 1 项远小于第 2 项, 分子中 1、2、4 项远远小于第 3 项, 故 Z_{bc} 虚数部分中第 3 项值约等于 $R_0 R_x / (\omega L)$, 在高压套管的损耗值不小于 0.01%, R_x 不会小于 10^5 , GIS 气室的对地杂散电容 C_0 的损耗值不大于 0.01% 时, R_0 不会大于 10^5 , 可以确定 $R_0 R_x / (\omega L)$ 的值不会大于 10^{-8} F, 其值比 1、2 项大 2 个数量级, 所以虚数值确定的电容量即为 $R_0 R_x / (\omega L)$ 所确定的电容, Z_{bc} 的虚数部所确定的电容值在 10^{-9} 以内, 其值为负, 这一电容并联在桥臂电阻 R_3 上, 它将影响介质损耗测量值, 根据电桥平衡计算可以确定, 对介质损耗值的影响在 0.1% 左右, 使测量值偏大。由于运行中高压套管的损耗要求值为 0.8% (500 kV)、1.0% (220 kV)、1.0% (110 kV)^[3], 所以偏大值对于高压套管损耗是在可以接受范围内。

(3) Z_{ca} 阻抗是电桥平衡后被测高压套管测量读数, 其实数部分(阻性分量)和虚数部分(容性分量)分别为

$$R_{ca} = (R_L + R_x + \frac{R_x R_0 R_L + \frac{R_L}{\omega^2 C_0 C_x} + \frac{R_0 L}{C_x} - \frac{R_x L}{C_0}}{R_0^2 - \frac{1}{\omega^2 C_0^2}}) - j(\frac{1}{\omega C_{ca}}) = -j(\frac{1}{\omega C_x} - \omega L + \frac{\frac{R_0 R_L}{\omega C_x} - \frac{R_x R_L}{\omega C_0} - \omega L R_x R_0 - \frac{L}{\omega C_0 C_x}}{R_0^2 - \frac{1}{\omega^2 C_0^2}})$$

显然，等式右边和高压套管本身的等值阻抗明显不同，其中实数项和虚数项分别增加了

$$R_L + \frac{R_x R_0 R_L + \frac{R_L}{\omega^2 C_0 C_x} + \frac{R_0 L}{C_x} - \frac{R_x L}{C_0}}{R_0^2 - \frac{1}{\omega^2 C_0^2}} - j(-\omega L + \frac{\frac{R_0 R_L}{\omega C_x} - \frac{R_x R_L}{\omega C_0} - \omega L R_x R_0 - \frac{L}{\omega C_0 C_x}}{R_0^2 - \frac{1}{\omega^2 C_0^2}})$$

以 500 kV 变压器高压套管介质损耗测量为例，500 kV 变压器高压套管的电容量为 250 pF，介质损耗为 0.224%。

对电容量测量值的影响：

电容量值为虚部各项的代数和，为了分析对电容量值的影响，可直接分析阻抗值的影响。高压套管的容抗值为 $1/(\omega C_x) = 1/(314 \times 250 \times 10^{-12})$ ，其值约为 10^7 。其中 ωL 项，对于 500 kV 变压器一般为 10^2 左右，对高压套管容抗测量影响可以忽略。对于后一项，分母中第 1 项和第 2 项比较，可以忽略不计，分子中等值 R_x, R_0, R_L 的值都比较小，第 1、2、3 项和第 4 项比较，可以忽略不计，因此，这一项的值近似为 $-j\frac{\omega^2 C_0^2 L}{\omega C_0 C_x} \approx -j\omega L$ (C_x 和 C_0 一般是相同数量级)，对于高压套管容抗测量影响也可以忽略。

对介质损耗测量值的影响：

不考虑电容变化的影响时，对介质损耗的影响主要反映在对电阻值的影响。电阻为实部各项的代数和，当高压套管介质损耗为 0.224%、等值容抗为 10^7 时，其串联等值电阻为 10^4 ，而此时 R_L 不应大于 ωL 的值，即不会大于 10^2 ，因此，增加的第一项 R_L 对高压套管电阻测量值影响也可以忽略。

在第 2 项中分母第 1 项和第 2 项比较，完全可以忽略不计，分子中等值 R_x, R_0, R_L 的值都比较小，第 1、3、4 项和第 2 项比较，完全可以忽略不计，因此，这一项的值近似为 $-\frac{\omega^2 C_0^2 R_L}{\omega^2 C_0 C_x} \approx R_L$ (C_x 和 C_0 一般是相同数量级)，其值即不会大于 10^2 ，相对于串联等值电阻为 10^4 ，其对于高压套管等值电阻测量影响也可以忽略。

4 现场试验及试验结果比较

为了对以上分析结果进行验证，分别采用线端加压和中性点加压两种方法对 5 台变压器进行了现场试验，测量数据基本相近，见表 1、2。

5 结语

综上所述，采用新试验接线进行油/气套管介质

表 1 500 kV 变压器油/气套管介质损耗/电容量试验测量结果比较

试验项目		C_x /pF	Tan δ /%	试验电压/kV	接线方法	备注
2 号变 (SSP300000/500)	A	241.29	0.224	10	正接线	中性点加压
	B	236.15	0.225	10	正接线	
	C	235.59	0.218	10	正接线	
1 号变 (SSP300000/500)	A	247.10	0.22	10	正接线	型号和 2 号变相同。 数据为安装过程中线端 加压试验方法测量结果。
	B	251.00	0.20	10	正接线	
	C	245.70	0.21	10	正接线	

表 2 不同试验接线情况下油/气套管介损、电容量测量结果比较

序号	变压器型号及生产厂家	试验接线	测量部位	tan δ /%	C_x /pF	结果比较
1	SFSZ10-120000/220 (山东鲁能)	在中性点加压 (正接线)	B 相套管	0.239	360.4	$\Delta \tan \delta = -0.02\%$
		套管线端加压 (正接线)	B 相套管	0.259	362.9	$\Delta C_x = -2.5$ pF
2	SFSB6-31500/110 (衡阳变压器厂)	在中性点加压 (正接线)	A 相套管	0.127	249.7	$\Delta \tan \delta = -0.005\%$
		套管线端加压 (正接线)	A 相套管	0.132	250.0	$\Delta C_x = -0.3$ pF
3	SF9-50000/110 (亚细亚集团变压器有限公司)	在中性点加压 (正接线)	A 相套管	0.207	216.7	$\Delta \tan \delta = 0.000\%$
		套管线端加压 (正接线)	A 相套管	0.207	216.7	$\Delta C_x = 0$ pF

损耗和电容测量试验，对所测电容值影响很小，完全可以忽略。对介质损耗影响在 0.1% 左右，引起的变化在可以接受范围。同时由于在正常情况下变压器绕组 L 和 GIS 气室的对地杂散电容 C_0 的阻抗值基本上是不变的，对测量结果的影响是相同的，因此，对高压套管介质损耗试验结果进行纵向比较时，即与历史数据进行比较时，是不影响试验结果的分析和对高压

套管绝缘状况变化情况的判断。该方法可有效地检测高压油/气套管内部可能出现的绝缘缺陷。

参考文献：

[1] 刘耀南, 邱昌容. 电气绝缘测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
 [2] 邱关源. 电路[M]. 北京: 人民教育出版社, 1978.
 [3] DL/T 596-1996. 电力设备预防性试验规程[S].