

JB

中华人民共和国机械行业标准

JB/T 501—1991

电力变压器试验导则

1991-06-28 发布

1992-07-01 实施

中华人民共和国机械电子工业部 发布

电力变压器试验导则

代替 JB 501—64

1 主题内容与适用范围

本标准规定了油浸式和干式电力变压器出厂试验、型式试验、特殊试验的方法及试验程序。

本标准适用于油浸式和干式电力变压器试验。

特种变压器可参照本标准。

2 引用标准

GB 311.1~311.6	高压输变电设备的绝缘配合 高电压试验技术
GB 507	绝缘油介电强度测定法
GB 1094.1~1094.5	电力变压器
GB 6450	干式电力变压器
GB 6451.1~6451.5	三相油浸式电力变压器技术性能参数和要求
GB 7252	变压器油中溶解气体分析的判断导则
GB 7328	变压器和电抗器的声级测定
GB 7354	局部放电测量
GB 7449	变压器和电抗器的雷电冲击和操作冲击试验导则
GB 7600	运行中变压器油水分含量测定法（库仑法）
GB 7601	运行中变压器油水分测定法（气相色谱法）
GB 10230	有载分接开关
ZB K41 001	已用变压器油试验的技术要求
SY 2654	电气用油介质损失角正切测定法

3 主要符号

U_n —— 额定电压	V
I_n —— 额定电流	A
S_n —— 额定容量	kV · A
K —— 电压比	
R —— 电阻	Ω
t —— 温度	$^{\circ}\text{C}$
R_{xs} —— 相电阻	Ω
R_{xn} —— 线电阻	Ω
K_d —— 空气密度修正系数	
K_d —— 空气密度	
f_n —— 额定频率	Hz
P_0 —— 空载损耗	W
I_0 —— 空载电流	%

P_k ——校正到参考温度的负载损耗	W
e_k ——校正到参考温度的阻抗电压	%
Z_k ——短路阻抗	Ω
P_r ——电阻损耗	W
θ_s ——平均温度	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta\theta$ ——温升	K
Z_0 ——零序阻抗	$\Omega/\text{相}$
Z_s ——系统阻抗	Ω

4 试验程序

本程序未注明的试验项目属出厂试验。4.3~4.7的顺序可以互换，4.8~4.26的出厂试验和型式试验项目需依次进行。但其中4.10~4.14按GB 7449的规定。

4.1 油箱的机械强度试验（型式试验）

4.2 油箱的密封试验

4.3 绝缘特性试验

4.3.1 绝缘电阻及吸收比测定（35kV 4000kV·A及以上和63kV及以上的所有产品应提供绝缘电阻吸收比，其它中小型变压器只提供电阻值）

4.3.2 介质损耗率测定（35kV 8000kV·A及以上和63kV及以上的所有产品）

4.4 变压器油试验

4.4.1 变压器油介质损耗率测量

4.4.2 变压器油含气量测量

4.4.3 变压器油含水量测量

4.4.4 变压器油击穿电压测量

4.4.5 变压器油气相色谱测量

4.5 电压比测量

4.6 电压矢量关系校正

4.7 绕组电阻测量

4.8 空载损耗及空载电流测量（330kV及以上的所有产品）

4.9 局部放电测量（330kV及以上的所有产品）

4.10 线端雷电全波冲击试验（型式试验）

注：电压为220kV级容量120MVA及以上的产品为出厂试验。

4.11 线端雷电截波冲击试验（型式试验）

4.12 中性点雷电全波冲击试验（型式试验）

4.13 中性点不引出的雷电全波冲击试验（特殊试验）

4.14 操作冲击试验（330kV及以上的所有产品按GB 1094.3方法2的规定）

4.15 外施耐压试验

4.16 空载损耗及空载电流测量（35kV级8000kV·A以上和63kV及以上的所有产品）

4.17 感应耐压试验

注：对于330kV及以上的产品，合同无特殊要求，可按GB1094.3中方法1或方法2的规定。

4.18 局部放电测量（220kV及以上的所有产品）

注：对于干式变压器为特殊试验。

4.19 空载损耗及空载电流测量

- 4.20 空载电流谐波试验（特殊试验）
- 4.21 阻抗电压及负载损耗测量
- 4.22 三相变压器的零序阻抗测量（特殊试验）
- 4.23 有载分接开关的操作试验

注：有载分接开关的操作试验可在试验中穿插进行。

- 4.24 温升试验（型式试验）
- 4.25 声级测量（特殊试验）
- 4.26 风扇电机和油泵所吸取的功率测量（特殊试验）
- 4.27 短路试验（特殊试验）

第一篇 出厂试验

5 油箱密封试验

油箱密封试验应在装配完毕的产品上进行，带有可拆卸的贮油柜、静油器、散热器或冷却器可单独进行。试验采用下列方法之一：

- a. 静油柱法；
- b. 静气压法。

5.1 采用静油柱法进行试验时，在变压器箱盖或贮油柜加一个垂直的吊罐或利用贮油柜的油面压力，其吊罐或贮油柜的油面高度应使油箱所承受的压力和持续的时间符合GB 6451.1~6451.5的规定。

5.2 采用静气压法进行试验时，在变压器的箱盖上或贮油柜上连接一个气压表，在贮油柜放气塞外应装有一个气门，通过该气门输入干燥空气给油箱施加静气压，施加的压力和持续的时间应符合GB 6451.1~6451.5的规定。

5.3 在密封试验解除前应全面的、细致的检查油箱所有焊缝和密封，应没有任何渗油和漏油现象。

静气压法解除压力时，残留压力应不低于有关技术条件的规定。

5.4 对于不带贮油柜或全密封型的试品，应在正常油面高度下进行密封试验。

5.5 对于充氮运输的产品，还要在运输状态下充氮进行二次密封试验。

5.6 利用静油柱法或静气压法时，油箱各部位的压力和持续时间应按GB 6451.1~6451.5的规定，产品无渗漏油，则该试验合格。

6 绝缘特性测量

绝缘特性测量是考核试品的绝缘性能，是进行高压试验和运行的重要参考依据。应包括下列试验项目：

- a. 绝缘电阻及吸收比测量；
- b. 介质损耗率测量。

绝缘电阻及吸收比和介质损耗率的测量部位按表1的规定进行。

6.1 绝缘电阻及吸收比

6.1.1 35kV级4000kV·A及以上和65kV级及以上的所有试品均测量其绝缘电阻及吸收比(R_{60}/R_{15} 即绝缘电阻60S与15S的比值)。测量时应使用5000V、指示量限不低于100000MΩ的高阻计。35kV级3150kV·A及以下和10kV的所有试品均应测量其绝缘电阻60S的阻值，测量时使用2500V、指示量限不低于10000MΩ的高阻计。其精度均高于±1.5%。

6.1.2 绝缘电阻测量时。首先将高阻计调整水平，在不连接试品的情况下，使高阻计的电源接通，其

表 1

顺序号	双线圈变压器		三线圈变压器	
	被测线圈	接地部位	被测线圈	接地部位
1	低压	外壳及高压	低压	外壳、高压及中压
2	高压	外壳及低压	中压	外壳、高压及低压
3		—	高压	外壳、中压及低压
4	(高压及低压)	(外壳)	(高压及中压)	(外壳及低压)
5	—	—	(高压、中压及低压)	(外壳)

注：表1中顺序号4和5的项目，只对16000kV·A及以上的变压器进行。

仪表指示应调整到 ∞ ，测试连接电缆接入时，高阻计指示应无明显差异。

6.1.3 正确的使用高阻计的三个端子，必须使E端接地，L端接火线，G端屏蔽。

6.1.4 测量时，待高阻计处于额定电压后再接通线路，与此同时开始计时。手动高阻计的手柄转速要均匀，维持在每分120转左右。

6.1.5 每次测试完毕后，应首先断开火线，以避免停电后被测绕组向高阻计放电而反方向冲击仪表。

6.1.6 按照表1的测试部位进行测量，当一个部位测试完毕后，首先应将被测绕组放电，然后改接另一个测试部位，测试前应对该绕组充分放电，以消除残余电荷对测量的影响。

6.1.7 在空气湿度较高时，外绝缘表面泄漏严重的情况下，在测量中应使外绝缘表面屏蔽。

6.1.8 测试时，绕组温度应在10~40℃之间，不同温度下的阻值换算按GB 6451.1~6451.5的有关规定。

6.2 介质损耗率测量

6.2.1 试验电源的频率应为额定频率，其偏差不大于 $\pm 5\%$ ，测试仪器采用“西林电桥”，用反接法进行测量。

6.2.2 施加电压按下列规定：

- 额定电压为6kV及以下的试品，取额定电压；
- 额定电压为10~35kV的试品，取10kV；
- 额定电压为63kV及以上的试品，取10kV或大于10kV，但不超过绕组线端较低电压的50%。

6.2.3 当对试品绝缘性能产生怀疑时，可在不同电压下测量其介质损耗率，良好绝缘的试品应随着电压的升高介质损耗率不变或略有升高。

6.2.4 在10~40℃时，介质损耗率的测试结果应不超过下列规定：

- 35kV级及以下的绕组20℃时应不大于2%；
- 63kV级及以上的绕组20℃时应不大于1.5%。

当绕组温度与20℃不同时，换算方法按GB 6451.2~6451.5的方法进行。

7 变压器油试验

7.1 变压器油击穿电压试验，测定方法按GB 507进行。试验规定及合格判断见ZB K41 001。

7.2 变压器油介质损耗率测量，测定方法按SY 2654进行。试验规定及合格判断见ZB K41 001。

7.3 变压器油的含水量试验，测定方法按GB 7600或GB 7601的规定进行。试验规定及合格判断见

ZB K41 001。

7.4 变压器油含气量试验，测定方法按GB 7252的规定进行。试验规定及合格判断见ZB K41 001。

7.5 变压器油中溶解气体分析的方法和合格判断按GB 7252和相应技术条件的规定。

8 电压比测量

电压比测量是验证变压器能否达到预期的电压变换效果。绝缘装配后的电压比试验是检验绕组的匝数与绕向是否正确；引线装配后的电压比试验是检查分接开关与绕组的联结组标号是否正确；总装后的电压比试验是检查变压器分接开关内部所处位置与外部指示位置是否一致及线端标志是否正确。

8.1 对于有并联支路的绕组，如果在电压比试验中可以明显的发现一匝的误差时，应分别对每个支路进行电压比测量；否则，应进行电势差试验，以确保并联支路的匝数相等，在此前提下方能进行电压比测量。电势差试验方法及注意事项如下：

8.1.1 在非被试绕组供给激磁电压，其大小应使每匝电压为1 V。

8.1.2 连接并联支路的一端，测量各同名端的电势差，其电势差应等于零。为了避免由于回路接触不良造成电势差为零，允许在测量中加入一匝，使电势差为1 V。临时匝应分别正绕与反绕串入回路，其电势差均应近似等于1 V。

8.1.3 为了避免串联匝数增加电势差减小的现象，测量电势差的电压表应尽量采用高内阻的电压表。

8.1.4 电势差试验时，被试绕组的电压虽然只有一伏，但其电位往往很高。在并联支路中如有串联线段，试验中可将其打开，分别测量几个并联支路的电势差，以降低被试绕组的电位。

8.1.5 测量仪表的一端应可靠接地，仪表的量程开始应置在最大位置，送电指示正常后，再逐级缩小量程，以避免损坏仪表。

8.2 电压比试验所使用的仪器的精度和灵敏度均不应低于0.2%。推荐采用电压比电桥（精度为0.1%），其原理接线图如图1所示。

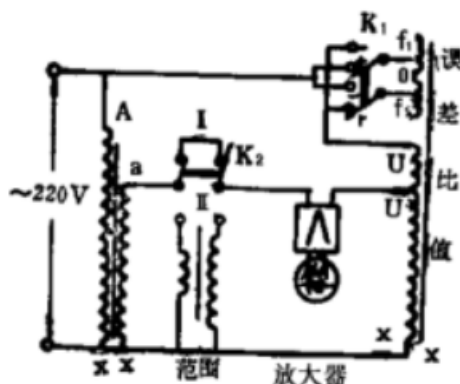


图1 电压比电桥原理图

K₁——误差极性转换开关 K₂——范围开关

8.3 电压比试验中计算的比值应按各分接的名牌电压计算，当电压百分数或对应匝数与名牌电压无差异时，可按电压百分数或匝数计算其比值。

8.4 试验应分别在各分接上进行。有正、反激磁的有载调压变压器，转换选择器正向联接时，如在所有分接选择器位置进行了电压比测量，反向联接时，允许只抽试1~2个分接。

8.5 三绕组变压器，至少在两对绕组上分别进行电压比测量。

8.6 半成品（绝缘装配后）电压比测量，三相应分别进行相的电压比测量。同时，应检查绕组的电压矢量关系（绕向与标志）是否正确。

8.7 引线装配后或总装配后的电压比试验应分别对每对双相（如AB/ab, BC/bc, CA/ca）各分接进行电压比测量，如果可能还应验证联结组及向量标号是否正确。

8.8 电压比故障的查找

电压比试验中如果发现电压比误差超过了国家标准所允许的偏差，产品被判定为不合格。确定故障部位及匝数的多少按下列方法和程序进行。

8.8.1 所有分接中只有部分分接超差时，断定是高压绕组分接区错匝，应用高压某段分接绕组对低压绕组用设计匝数进行电压比测量以确定故障的部位和匝数。

8.8.2 所有分接均超差且误差相同时，应首先判定是高压绕组公用段还是低压绕组错匝。

8.8.2.1 如果故障误差小于低压绕组一匝的误差，应判定是高压绕组公用段错匝。

8.8.2.2 如果故障误差大于两个绕组任何一个绕组一匝所引起的误差时，可根据线圈结构选择下列方法之一：

a. 圆筒式线圈末端抽头的绕组，可用分接区对低压用设计匝数进行电压比测量（注意高压绕组线端有较高的感应电压），如果故障相与良好相相同，则说明是高压公用线段错匝，而不是低压错匝。反之，则是低压错匝；

b. 如果是分为两部分的连续式线圈，用设计匝数分别对公用线段与低压绕组进行电压比测量。如果故障相的上半段与下半段电压比均不对时，是低压绕组错匝；若只有其中一个半段电压比不对时，则是高压这个半段错匝；

c. 如果高、低压绕组均没有分接且无法断开时，可临时绕线匝，用低压绕组对临时匝进行电压比测量，以确定故障绕组。

8.8.3 总装配后电压比试验，发现产品三相内部所处的分接位置与外部指示不同时，用下列公式确定各相内部所处的实际位置：

$$fA = fAB + fCA - fBC \dots\dots\dots (1)$$

$$fB = fBC + fAB - fCA \dots\dots\dots (2)$$

$$fC = fCA + fBC - fAB \dots\dots\dots (3)$$

式中：fA、fB、fC——各相内部所处分接电压的百分数；

fAB、fBC、fCA——各双相实测分接电压的百分数。

9 电压矢量关系校定

电压矢量关系校定（又称联结组标号试验）是检验绕组的绕向、绕组的联结组及线端的标志是否正确。联结组标号是变压器并联运行的条件之一，验证联结组标号，检查绕组间电太矢量关系有多种方法，这里只推荐目前常用的三种，可酌情选用。

9.1 电压比电桥法

这种方法是目前最常用最简便的方法，电桥本身有常见的联结组标号（0，6，11，5）的接收回路，在进行电压比试验的同时，也验证了联结组标号，检查了绕组电压的矢量关系。对于电压电桥没有联结组标号的产品，只要适当的改变产品与电桥的连接，就可以用电桥上的联结组标号去进行GB 1094.4中所规定的各种联结组标号产品的试验。具体方法参照表2。

9.2 双电压表法

当电压比试验时所用电桥没有确定联结组标号的功能或采用其它方法无法验证产品高、低压间的电压矢量关系时，需用双电压表法验证其联结组标号。

9.2.1 采用双电压表法试验时，按照图2a（单相）或图2b（三相）接线。首先连接A—a，然后在试品

表2 电压比电桥法联结组标号试验

产 品 联 结 组 标 号	产 品 与 电 桥 的 连 接	电 桥 组 别 开关位置
Y, d ₁ D, y ₁	A—C _Q a—c _q B—B _Q b—b _q C—A _Q c—a _q	11
Y, y ₂ D, d ₂	A—A _Q a—c _q B—B _Q b—a _q C—C _Q c—b _q	6
Y, d ₃ D, y ₃	A—A _Q a—b _q B—B _Q b—c _q C—C _Q c—a _q	11
Y, y ₄ D, d ₄	A—A _Q a—b _q B—B _Q b—c _q C—C _Q c—a _q	0
Y, d ₅ D, y ₅	A—A _Q a—a _q B—B _Q b—b _q C—C _Q c—c _q	5
D, d ₆ Y, y ₆	A—C _Q a—a _q B—B _Q b—b _q C—A _Q c—c _q	6
Y, d ₇ D, y ₇	A—C _Q a—c _q B—B _Q b—b _q C—A _Q c—a _q	5
Y, y ₈ D, d ₈	A—A _Q a—b _q B—B _Q b—c _q C—C _Q c—a _q	0
Y, d ₉ D, y ₉	A—A _Q a—c _q B—B _Q b—a _q C—C _Q c—b _q	5

续表 2

产 品 联 结 组 标 号	产 品 与 电 桥 的 连 接	电 桥 组 别 开 关 位 置
Y, y ₁₀ D, d ₁₀	A—A _Q a—b _q B—B _Q b—c _q C—C _Q c—a _q	0
Y, d ₁₁ D, y ₁₁	A—A _Q a—a _q B—B _Q b—b _q C—C _Q c—c _q	11
Y, y ₀ D, d ₀	A—A _Q a—a _q B—B _Q b—b _q C—C _Q c—c _q	0

注：表中A、B、C分别表示产品高压侧的三相线端，a、b、c分别表示产品低压侧的三相线端；A_Q、B_Q、C_Q分别表示电桥高压侧的端子；a_q、b_q、c_q分别表示电桥低压侧的端子。

的高压侧施加适当的电压（通常不超过300V，一般为100V），依次测量X—x间电压（单相）或B—b、C—b和B—c的线端电压（三相）。

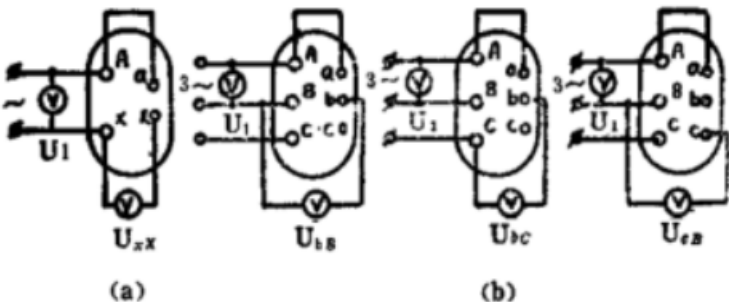


图 2 双电压表法试验联结组原理图

将测得的各电压值（X—x或B—b、C—b和B—c）和表 3 中第 5 栏所列的相应电压相比较，如果分别相等，则试品的联结组矢量标号为 1 栏中的标号。

电压如下计算：

$$L = U_2 \sqrt{1 + K + K^2} \dots\dots\dots (4)$$

$$P = U_2 \sqrt{1 + K^2} \dots\dots\dots (5)$$

$$R = U_2 \sqrt{1 + \sqrt{3} K + K^2} \dots\dots\dots (6)$$

$$M = U_2 (K - 1) \dots\dots\dots (7)$$

$$N = U_1 \sqrt{1 - K + K^2} \dots\dots\dots (8)$$

$$Q = U_1 \sqrt{1 - \sqrt{3}K + K^2} \dots\dots\dots (9)$$

$$T = U_2 (1 + K) \dots\dots\dots (10)$$

式中: L — T 各相应电压计算值(表3中第5栏);

U_2 —试验时低压的线电压;

K —试品的额定电压比。

表3 双电压表法测定联结组

钟 时 序	电压 相角 位移	代 号	实 测 线端	额定电压比 K															
				1	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9~10	11~12	13~14	15~16	17~20	21~25	26~30
0	0	M	b-B	0	33	50	67	75	80	83	86	88	90	91.5	92.5	93.5	94.5	95.5	96.5
		N	b-C	100	88	87	88	90	92	93	94	95	95	96	96.5	97	97.5	98	98.5
		N	c-B	100	88	87	88	90	92	93	94	95	95	96	96.5	97	97.5	98	98.5
1	30	Q	b-B	52	54	62	73	79	83	86	88	90	91	92.5	93.5	94.5	95.5	96	97
		Q	b-C	52	54	62	73	79	83	86	88	90	91	92.5	93.5	94.5	95.5	96	97
		P	c-B	141	120	112	105	103	102	101	101	101	100.5	100.5	100.5	100	100	100	100
2	60	N	b-B	100	88	87	88	90	92	93	94	95	95	96	96.5	97	97.5	98	98.5
		M	b-C	0	33	50	67	75	80	83	86	88.5	90	91.5	92.5	93.5	94.5	95.5	96.5
		L	c-B	173	145	132	120	115	111	109	108	107	106	105	104	103.5	103	102.2	102
3	90	P	b-B	141	120	112	105	103	102	101	101	101	100.5	100.5	100.5	100	100	100	100
		Q	b-C	52	54	62	73	79	83	86	88	90	91	92.5	93.5	94.5	95.5	96	97
		R	c-B	193	161	146	130	122	118	115	113	111	109.5	107.5	106.5	106	105	104	103
4	120	L	b-B	173	145	132	120	115	111	109	108	107	106	105	104	103.5	103	102.5	102
		N	b-C	100	88	87	88	90	92	93	94	95	95	96	96.5	97	97.5	98	98.5
		T	c-B	200	167	150	133	125	120	117	113	113	110.5	108.5	107.5	106.5	105.5	104.5	103.5
5	150	R	b-B	193	161	146	130	122	118	115	113	111	109.5	107.5	106.5	106	105	104	103
		P	b-C	141	120	112	105	103	102	101	101	101	100.5	100.5	100.5	100	100	100	100
		R	c-B	193	161	146	130	122	118	115	113	111	109.5	107.7	106.5	106	105	104	103
6	180	T	b-B	200	167	150	133	125	120	117	114	112.5	110.5	108.5	107.5	106.5	105.5	104.5	103.5
		L	b-C	173	145	132	120	115	111	109	108	107	106	105	104	103.5	103	102.5	102
		L	C-B	173	145	132	120	115	111	109	108	107	106	105	104	103.5	103	102.5	102
7	210	R	b-B	193	161	146	130	122	118	115	113	111	109.5	107.5	106.5	106	105	104	103
		R	b-C	193	161	146	130	122	118	115	113	111	109.5	107.5	106.5	106	105	104	103
		P	c-B	141	120	112	105	103	102	101	101	101	100.5	100.5	100.5	100	100	100	100
8	240	L	b-B	173	145	132	120	115	111	109	108	107	106	105	104	103.5	103	102.5	102
		L	b-C	200	167	150	133	125	120	117	114	113	110.5	108.5	107.5	106.5	105.5	104.5	103.5
		N	c-B	100	88	87	88	90	92	93	94	95	95	96	96.5	97	97.5	98	98.5

9.2.2 如果被试变压器的电压比超过30倍时,各电压值的区别很小,可采用一台辅助变压器,其联结组标号为Yy0或II0,按照图3连接,此时,应以辅助变压器的同名线端代替被试变压器的高压端(如图3,以辅助变压器的a、b、c代替A、B、C端),同前测量比较各电压值,但在计算L—T的值时,必须以 K_1 代替 K ,此时:

续表 3

钟 时 序	电 压 角 移 位	代 号	实 测 线 端	额定电压比										K					
				1	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9~10	11~12	13~14	15~16	17~20	21~25	26~30
9	270	P R Q	b-B	141	120	112	105	103	102	107	101	101	100.5	100.5	100.5	100	100	100	100
			b-C	193	161	146	130	122	118	115	113	111	109.5	107.5	106.5	106	105	104	103
			c-B	52	54	62	73	79	83	87	88	90	91	92.5	93.5	94.5	95.5	96	97
10	300	N L M	b-B	100	88	87	88	90	92	93	94	95	95	96	96.5	97	97.5	98	98.5
			b-C	173	145	132	120	115	111	109	108	107	106	105	104	103.5	103	102.5	102
			c-B	0	33	50	67	75	80	83	86	88	90	91.5	92.5	93.5	94.5	95.5	96.5
11	330	Q P Q	b-B	52	54	62	73	79	83	86	88	90	91	92.5	93.5	94.5	95.5	96	97
			b-C	141	120	112	105	103	102	107	101	101	100.5	100.5	100.5	100	100	100	100
			c-B	52	54	62	73	79	83	86	88	90	91	92.5	93.5	94.5	95.5	96	97

$K_1 = K / K_s \dots\dots\dots (11)$

式中： K_s ——辅助变压器的电压比。

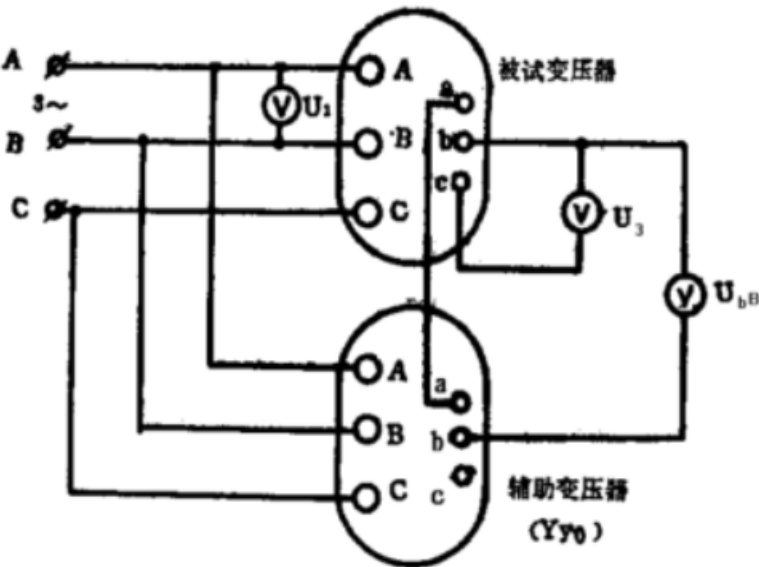


图 3 引入辅助变压器的联结组标号试验接线图

9.3 光线示波器法

这种方法适用于各种电压矢量关系的较定，一般多用于高、低压矢量小于30°的特种Z接的联结组标号。

采用这种方法时，在试品的高压侧施加三相对称数值不大而足以使示波器高、低压电压振子正常工作的电压。将高、低压的电压（如AB—ab，BC—bc，CA—ca）对应的引入分压箱，特别要注意分压箱及振子的极性，然后调节示波器的振幅使其有所差别，以便于辨认。测得的波形如图4。高压电压正半波过零与低压电压的角度差 α 就是低压越前或滞后高压的角度。

三相变压器应至少在两对对应线端上测量。如果对测量结果有怀疑时，应在已知矢量关系的产品上验证试验接线的正确性。

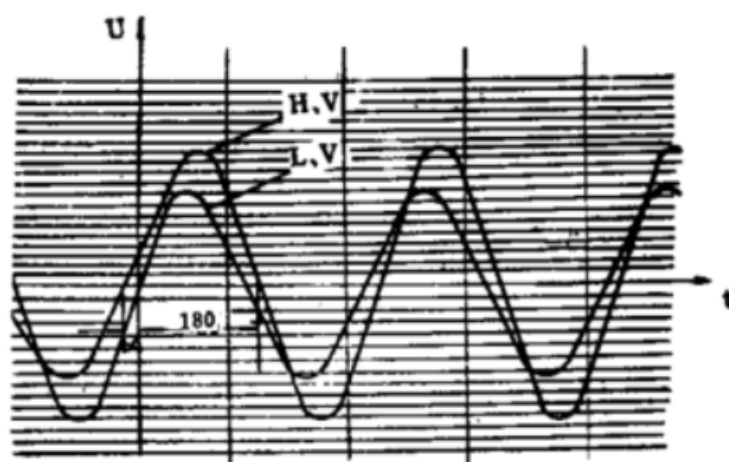


图4 示波器法测量的波形图

10 绕组电阻的测定

绕组电阻测定是检查线圈内部导线的焊接质量，引线与线圈的焊接质量，线圈所用导线的规格是否符合设计，以及分接开关、套管等载流部分的接触是否良好。

10.1 变压器各绕组的电阻应分别在各绕组的线端上测定。三相变压器绕组为星形连接无中性点引出时，应测量其线电阻，例如AB、BC、CA，如有中性点引出时，应测量其相电阻，例如A0、B0、C0。但对中性点引线电阻所占比重较大的 y_n 联结且低压为400V的配电变压器，应测量其线电阻（ab、bc、ca）及中性点对一个线端的电阻，如a0。绕组为三角形联结时，首末端均引出的应测量其相电阻，封闭三角形的试品应测定其线电阻。

10.2 带有分接的绕组，应在所有分接下测定其绕组电阻。

有载调压变压器，如有正、反激磁开关（极性选择器）时，应在一个方向上测量所有分接的绕组电阻，然后在另一个方向上测量1~2个分接。

测定绕组电阻时，无励磁分接开关应使定位装置进入指定位置，有载分接开关应采用电动操作。

10.3 测量电源可采用甲种干电池、蓄电池或恒流源。电源应有足够的容量，避免在测量过程中由于放电电流过大或时间延长使电源内阻发生变化而产生测量误差。40MV·A及以上的变压器推荐采用蓄电池或恒流源，31.5MV·A及以下的试品，可以用甲种干电池，有条件也可采用恒流源。

10.4 测量中应调节试验电流或指零仪器的灵敏度，使被测电阻变化千分之一时，测量仪表或电桥检流计有明显的指示。

10.5 为了缩短试验时间，当采用电池供电时，推荐在供电回路中串联一个4至6倍被测电阻的附加电阻。在绕组充电的过程中，将附加电阻短路，使电流有较快的上升速度，当试验电流达到预计值或略过些时，打开短路开关。这种测量方法被称之为电路突变法。

另外，测量带有无励磁分接开关的变压器各分接绕组电阻时，在变换分接位置之前，可预先短路其非被测绕组（例如低压a—b—c），使磁场能量贮存在非被测绕组中，磁场能量在不放掉的情况下完成分接变换，为了使磁场能量消耗小，建议在电阻小的非被试绕组上短路。

测量半成品绕组电阻时，在变换分接位置之前，如有可能，可预先连接下一个分接，在电路不开断的情况下完成分接变换。

10.6 绕组电阻测定时，必须准确记录绕组温度。对于干式变压器，绕组温度应取绕组表面不少于3点温度的平均值。对于油浸变压器，器身浸入油中不励磁三小时后认为绕组与油的平均温度相同。油的平

均温度应等于油顶层温度(箱顶油温度计座中放置温度计)与散热器进、出口油温差的一半,当试品温度与环境温度相差小于 3°C 时,可以将油顶层温度做为绕组温度。在测量温升试验的冷电阻时,强迫油循环的产品,应在油泵工作的情况下测量绕组电阻及温度。

10.7 绕组电阻的测定采用下列方法之一:

- a. 电桥法;
- b. 电压降法。

出厂试验可视产品容量的大小采用精度 $0.2\sim 1.0$ 级的电桥测定其电阻。温升试验的冷、热电阻应采用如图5的电压降法或使用精度高于 0.05 级的电桥和电流常数小于 10^{-8} 的检流计进行测量。

10.7.1 采用电桥法时,应按电桥使用说明,并选用10.3条所规定的直流电源。测量中,应在电流稳定后接通检流计,电桥达到平衡后,记录读数,打开检流计,如有可能应将试验电流降至最低再切断电源。

11Ω 及以下的被测电阻采用双臂电桥, 11Ω 以上时也应采用双臂电桥,但也可采用单臂电桥,采用单臂电桥时应考虑连线电阻的影响。

采用双臂电桥测量时,电流连线与电位连线必须分别与被测线端连接。电流连线应有足够的截面,在测量中不应因发热而引起电流变化,电位连线的电阻应足够小,由于它的接入,桥臂电阻的变化应忽略不计。

双臂电桥使用标准电阻时,标准电阻与被测电阻间的连线应有足够的截面,它的接入应不影响电桥的精度。

10.7.2 采用电压降法时,参照图5。

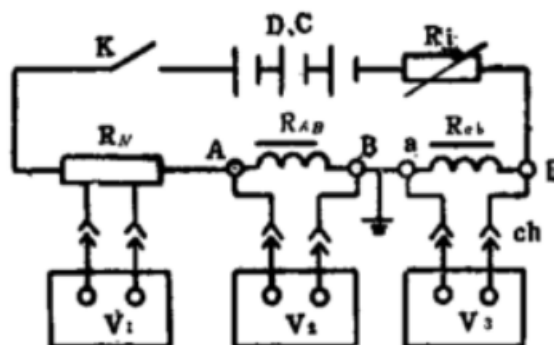


图5 电压降法测量电阻接线图

K——电源开关; DC——直流电源; R——附加电阻; R_N ——标准电阻;

R_{AB} ——被测侧高压电阻; R_{ab} ——试品低压电阻; ch——表插头; V——数字电压表。

测量时,应在电流稳定(R_N 上的电压表稳定)后,再接通 R_{AB} 与 R_{ab} 上的数字电压表,稳定后读取 V_1 、 V_2 、 V_3 的读数,首先将被测电阻的所有连线与数字电压表断开,如有可能,将试验电流降至最低后切断电源。试验电流等于 V_1 与标准电阻的比值,被测电阻等于 V_2 或 V_3 与试验电流的比值。

10.8 电阻的换算

三相电阻的不平衡率以三相电阻的最大值与最小值之差为分子,三相电阻的平均值为分母进行计算。

三相线电阻的不平衡率小于 2% 时,线电阻与相电阻的换算如下进行:

$$\text{Y形联结} \quad R_{xg} = R_{xn}/2 \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\text{D形联结} \quad R_{xg} = 1.5R_{xn} \quad \dots\dots\dots (13)$$

三相电阻不平衡率大于2%时,线电阻与相电阻的换算如下进行:

$$Y \text{ 形联结} \quad R_a = (R_{ab} + R_{ac} - R_{bc}) / 2, \dots\dots\dots (14)$$

$$R_b = (R_{ab} + R_{bc} - R_{ac}) / 2, \dots\dots\dots (15)$$

$$R_c = (R_{bc} + R_{ac} - R_{ab}) / 2, \dots\dots\dots (16)$$

D形联结 (a—y, b—z, c—x);

$$R_a = (R_{ac} - R_p) - \frac{R_{ab} \times R_{bc}}{R_{ac} - R_p} \dots\dots\dots (17)$$

$$R_b = (R_{ab} - R_p) - \frac{R_{ac} \times R_{bc}}{R_{ab} - R_p} \dots\dots\dots (18)$$

$$R_c = (R_{bc} - R_p) - \frac{R_{ab} \times R_{ac}}{R_{bc} - R_p} \dots\dots\dots (19)$$

$$R_p = (R_{ab} + R_{bc} + R_{ac}) / 2 \dots\dots\dots (20)$$

式中: R_{ab} 、 R_{bc} 、 R_{ac} ——各相的线电阻;

R_a 、 R_b 、 R_c ——各相的相电阻;

R_{ps} ——三相的相电阻;

R_{ps} ——三相的线电阻。

进行不同温度下绕组电阻的换算时,采用下式:

$$R_t = K_t \times R_\theta \dots\dots\dots (21)$$

$$K_t = (T + \theta) / (T + t) \dots\dots\dots (22)$$

式中: R_t 及 R_θ ——温度 $\theta^\circ\text{C}$ 和 $t^\circ\text{C}$ 时的电阻;

T ——系数,铜绕组时为235,铝绕组时为225。

11 绝缘试验

变压器的绝缘试验包括下列内容:

a. 外施耐压试验(见第11.1条);

b. 感应耐压试验(见第11.2条);

c. 线端的雷电全波冲击试验(220kV级容量120MV·A及以上和300kV及以上的变压器)(按GB7449);

d. 操作冲击试验($U_m \geq 300\text{kV}$ 的变压器)(按GB 7449);

e. 带有局部放电测量的感应耐压试验(按GB 1094.3及GB 7354的规定)。

绝缘试验前必须测量绝缘电阻及吸收比、介质损耗率,或者通过测量绝缘样件的含水量或油中的露点等方式,了解被试变压器的绝缘性能及干燥程度。符合有关标准规定后方可进行绝缘试验。

11.1 外施耐压试验

外施耐压是用以考核变压器在工频电压下主绝缘的抗电强度。外施耐压试验的原理见图6。

11.1.1 外施耐压时,被试产品铁心及外壳必须可靠的接地。试品的油面指示必须高于穿缆式套管或套管升高座。试验前,应对所有与主体油连通的套管放气,对低压接线板,手孔盖板,升高座等所有凸起部分均需放气,直到流油为止。

11.1.2 应将试品的被试绕组所有端子连接接火线,非被试绕组所有端子连接接地。

11.1.3 外施耐压试验的频率应不低于80%额定频率,最好在45~55Hz之间。其电压波形应接近正弦(两个半波完全一样,且峰值与有效值之比等于 $\sqrt{2} \pm 0.07$,或者诸谐波有效值不大于基波有效值的5%)。

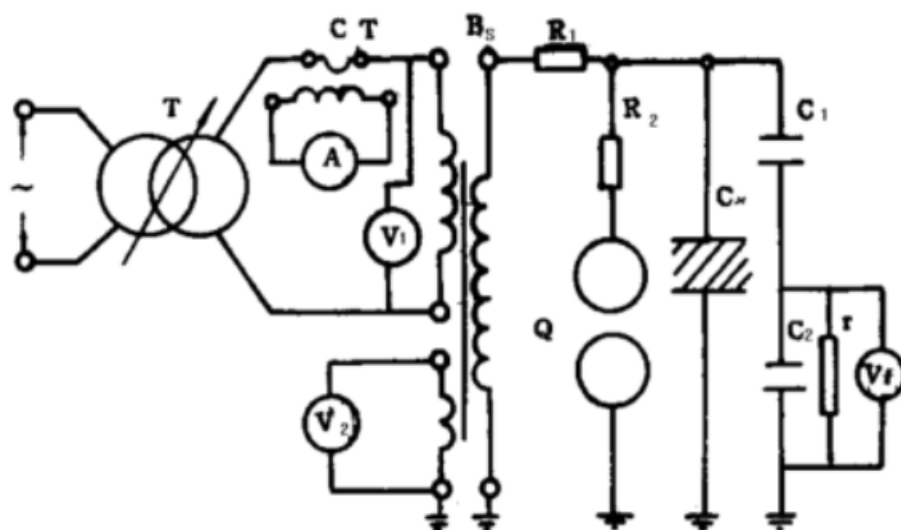


图6 外施耐压试验原理图

T——调压器； A——电流表； Bs——试验变压器； CT——电流互感器；
 V₁、V₂——电压表； Q——球隙； R₁——保护电阻； R₂——阻尼电阻；
 C₁——分压电容； C_x——试品； C₂——电容分压器主电容； r——放电电阻；
 V_f——峰值电压表。

11.1.4 试验变压器在试验电压下，其稳态短路电流应不小于0.1A，对于容量较大的产品，其稳态短路电流应不小于1A。

11.1.5 试验电压的初始值应低于1/3试验电压，并与测量相配合尽快的加到试验值，维持其电压恒定，持续60s。然后将电压迅速降低到1/3以下试验电压，最后切断电源。

11.1.6 电压波形符合11.1.3条要求时，可按有效值施加电压。否则，应按峰值除以 $\sqrt{2}$ 施加电压。

11.1.7 试验电压的测量，推荐采用经过计量部门校准的电容分压器配合峰值电压表测量，也可以用球隙测量。

11.1.8 使用球隙测量时，应按GB 311.6的规定，并应注意以下各项：

- a. 球隙阻尼电阻在频率50Hz时通常可按1Ω/V选用，150~200Hz时可按0.5Ω/V选用。
- b. 球隙必须放电才能测出电压，试验电压低于300kV时，通常在80%试验电压下放电，高于300kV时通常在50%~85%试验电压间取3~4点放电，以求出高压输出电压与原边表读数之间关系，做出校正曲线，求出100%试验电压表的读数。试验时，应将球隙调整到120%试验电压的距离，以保护试品。
- c. 球隙放电时，在予放电电压40%以前，升压速度不限。以后的升压速度要求均匀，约每秒上升电压予计为放电电压的2%。
- d. 在每次测量中，要取三次放电电压的平均值。各次放电间隔不小于1min，且放电电压与平均值不得大于3%。
- e. 如果空气中灰尘或纤维使放电不正常，正式放电前，先进行几次予放电。
- f. 球隙的距离不能超过0.5倍球的直径。
- g. 空气密度k对放电电压有直接影响。试验时的空气密度往往与标准情况下不同，因此对空气密度应进行校正。其方法按GB311.2R的有关规定。

当 k_d 与1相差较大时，（即 $0.95 > k_d > 1.05$ 时）应用 k_s 代替 k_d 。（见表4）

表4 空气密度 k_d 与因数 k_a 的关系

k_d	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15
k_a	0.72	0.77	0.82	0.86	0.91	0.95	1.00	1.05	1.09	1.13

h. 当放电电压与对应球隙距离按GB 311无法直接查出时,应用相邻的两个电压与对应距离按下式求得。

$$S_y = S - \frac{S_1 - S_2}{U_1 - U_2} (U - U_y) \quad \dots\dots\dots (23)$$

式中: S_y ——试验电压 U 的球隙距离;
 S_1 ——电压为 U_1 时的球隙距离 (U_1 大于 U_y);
 S_2 ——电压为 U_2 时的球隙距离 (U_2 小于 U_y);
 U —— U_1 与 U_2 中和试验电压 U_y 最近的一个电压 (U_1 或 U_2);
 S ——与 U 相对应的球隙距离 (S_1 或 S_2)。

11.1.9 为了减少电源的容量或消除发电机的自励磁现象,可在试验回路联接适当的电抗器,以补偿电容电流,消除或减少上述现象。

11.1.10 试验过程中,如果电压不突然下降,电流指示不摆动,没有放电声,则认为试验合格;如果有轻微放电声,在重复试验中消失,也视为试验合格;如果有较大的放电声,在重复试验中消失,需吊心检查,寻找放电部位,采取必要的措施,根据放电部位决定是否复试。

11.2 感应耐压试验

感应耐压试验是用以考核试品绕组匝间、层间、段间及相间的绝缘强度。该试验应在外施耐压试验之后进行。当最高工作电压超过300kV时,可用操作冲击试验代替该试验。

11.2.1 感应耐压试验通常施加两倍的额定电压,为了减少激磁容量,试验电压的频率应不小于100Hz,最好频率为150~400Hz。持续时间 t 按下式计算:

$$t = 120 \times \frac{f_n}{f} \quad \dots\dots\dots (24)$$

式中: t ——试验时间, s;
 f_n ——额定频率, Hz;
 f ——试验频率, Hz。

如果试验频率超过400Hz,持续时间应不小于15s。

11.2.2 全绝缘的变压器,应在试品的低压绕组(或其它绕组)的线端施加三相对称的交流电源,其它绕组开路。试品各绕组星形联结的中性点应接地,非星形联结的绕组,也应选择合适低线端接地,或者在中间变压器绕组上制造人为接地点,以避免电位悬浮。

11.2.3 110kV级及以下的全绝缘变压器的感应耐压试验,各绕组线端的感应线电压应不超过对地的耐压水平,三相电压不平衡时(不平衡度大于2%),应按测量中较高的电压为准。

11.2.4 分级绝缘的绕组,感应耐压试验中,不能同时满足线端和中性点两个绝缘水平的试验电压时,中性点绝缘水平允许用外施耐压试验来考核。

11.2.5 具有两个分级绝缘绕组的试品感应耐压试验时,为达到一个绕组端对地的试验电压,另一个绕组线端对地超过该绕组的试验电压,或者相间超过试验电压,或绕组其它部位超过了试验电压而又无法避免时,应在结构上加强某些部位的绝缘,或者与用户协商解决。

11.2.6 分级绝缘的绕组线端对地与线端间及线端对相邻绕组最近点的试验电压应达到GB 311所规定的试验电压。如果试验不能一次完成，可按线端对地、匝间、线端间的试验顺序进行。

11.2.7 单相变压器试验时，通常是在中性点端子接地的情况下进行，为了达到试验电压可以变换分接位置或提高感应倍数进行试验，结构允许时按图7a进行试验。用激磁绕组或非被试绕组的电压来提高中性点电位，使线端满足要求，是既方便又经济的方法（见图7b）。当上述方法均无法达到试验目的时，可借助支撑变压器来完成，支撑变压器与试品低压并联，使两台变压器的感应电压在相位上一致或相反，支撑变压器与试品高压串联（见图7c）。试验中，应用电容分压器或球隙校对支撑电压极性的正确性。

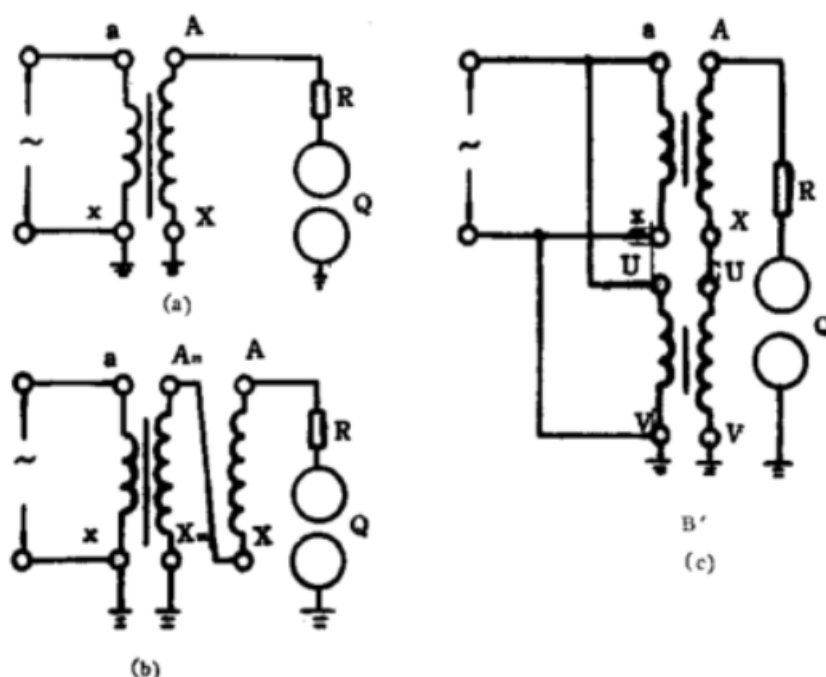


图7 单相变压器的感应耐压试验原理图

R——阻尼电阻

Q——球隙

B'——支撑变压器

如果试品是自耦变压器时，支撑电压为 U_t ，A端与 A_n 端的额定电压分别为 U_{n1} 和 U_{n2} ，而与其对应的试验电压分别为 U_1 和 U_2 ，则有如下关系：

$$\frac{U_1 - U_t}{U_{n1}} = \frac{U_2 - U_t}{U_{n2}}$$

$$U_t = \frac{U_2 \cdot U_{n1} - U_1 \cdot U_{n2}}{U_{n1} - U_{n2}} \quad (25)$$

11.2.8 三相变压器感应耐压试验时，通常施加单相电压逐相试验。推荐采用图8的试验方法。

制定试验方案时应考虑试品各个绕组的试验电压及分接开关的绝缘水平，结合试验站现有的设备，选择图8接线的一种。为了使各绕组线端及相邻绕组最近点达到或接近试验电压，各绕组均应至少有一点接地，或者通过与其连接的其它绕组接地，接地点的选择对达到试验要求尤为重要。

相同电压决定于感应倍数，而线端对地的电压是与感应倍数有关外，还与被试相末端连接绕组的支撑电压有关，被试绕组沿轴线的电位分布对于线端在端部的绕组呈直角三角形，线端在中部的呈等腰三

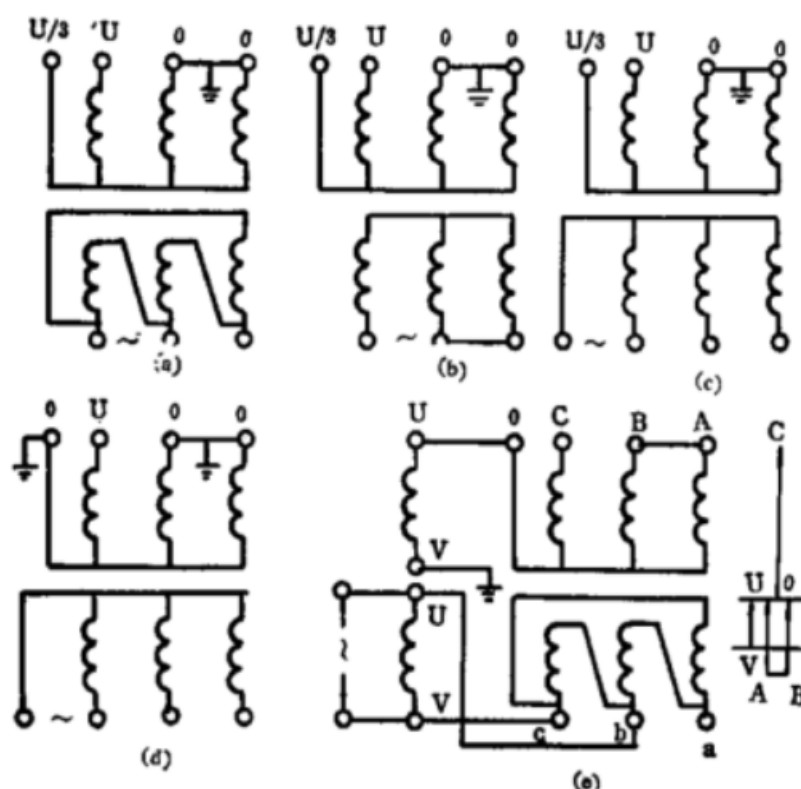


图8 三相变压器被试相激磁法试验接线图

角形。适当的选择接地点不但可以改变电位分布的形状，而且可以改变相邻绕组最近点的试验电压。三相分级绝缘变压器感应耐压试验有两种方法。

11.2.8.1 被试相激磁法

当中性点高于线端试验电压三分之一时，可采用图8(a)(b)(c)的试验接线。如果试品具有不套线圈的磁回路(壳式或五柱式铁心)则只有采用图8(a)的方法。

如果三相变压器铁心具有不套线圈的磁回路，推荐采用图8(d)的方法试验。如果试品有三角形联结的绕组，试验时必须将三角形取线打开。

当三相三柱式铁心的自耦变压器，其中性点试验电压低于线端试验电压三分之一时，或者其它特殊结构，上述方法均无法达到试验要求时，可采用图8(e)的方法试验。试验时，被试相的激磁绕组与支撑变压器的低压绕组并联，使两台变压器的感应电压在相位上一致，支撑变压器与试品的中性点串联。试验中，应用电容分压器或球隙校对支撑电压极性的正确性。

11.2.8.2 非被试相激磁法

当缺少必要的试验设备(中间变压器、电流互感器、电压互感器等)，或试验线路绝缘不允许，或支撑变压器的电压比不能满足要求时，可以考虑采用非被试相激磁法进行感应耐压试验。非被试相激磁法的试验方法见图9。

当试品联结组标号为YNyn0时，可采用图9(a)的接线试验，激磁电压仅为被试相激磁法图8(a)的一半。

当试品联结组标号为YNd11时，可采用图9(b)的接线试验，激磁电压仅为被试相激磁法图8(a)的一半。

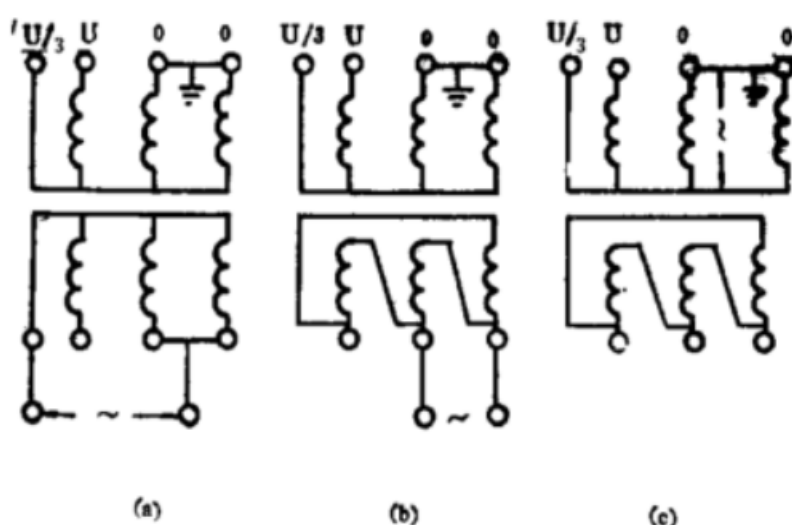


图9 非被试相激磁法原理图

如果无法从低压绕组供给激磁，可以考虑在高压被试绕组的非被试相供给激磁，见图9(c)。

11.2.9 感应耐压试验时，随着试验电压的升高和电源频率增高，负载性质可能是感性逐渐转化为容性，为防止发电机自励磁现象的发生，应在电源侧并联适当的电抗器。

11.2.10 感应试验时，在试验电压的持续时间内，如果电源监视的电压和电流不发生变化，没有放电声，并且在感应耐压试验的前后，空载试验数据无明显差异时，则试品承受了感应耐压的考核，试验合格；如果有轻微放电声，在复试中消失，也视为试验合格；如果有较大放电声，在复试中消失，需吊心检查，寻找放电部位，采取必要的措施，根据放电部位决定是否复试。

12 空载损耗与空载电流的测量

空载损耗与空载电流是变压器运行的重要参数，通过测量验证这两项指标是否在国家标准允许的范围，并且检查和发现试品磁路中的局部缺陷和整体缺陷。

12.1 空载损耗与空载电流的测量，应从试品各绕组中的一侧绕组线端供给额定频率的额定电压（为对称的正弦波电压），其余绕组开路。如果施加电压的绕组是带有分接的，则应使分接开关处于主分接的位置。如果试品绕组中有开口三角联结绕组，应使其闭合。运行中处于地电位的线端和油箱或外壳应可靠接地。

12.2 空载试验时按图10的接线进行。单相变压器参照图10(a)和(b)的接线，三相变压器参照图10(c)、(d)、(e)的接线，三相变压器空载试验与单相变压器空载试验时，均需测量电压有效值、平均值和频率。

12.3 图10的接线，所测功率均包括电压表和瓦特表的电压线圈以及电压互感器的损耗，这些损耗统称仪表损耗，当它大到不容忽略时，应从测量损耗中扣除。振动式频率表的读数应在接近额定电压时读取，读取功率前应切断振动式频率表接线。

仪表损耗可用相同的试验线路，断开试品，施加相同的电压（试品额定电压），直接从瓦特表上读出。

12.4 图10的试验线路要特别注意电压互感器、电流互感器的极性及瓦特表电压端子和电流端子的极性。三相功率应是两瓦特表或三瓦特表的代数和。

12.5 空载试验所用电流及电压互感器的精度应不低于0.2级,所用仪表的精度应不低于0.5级。功率测量,应采用低功率因素的功率表。

12.6 图10 (a)、(c) 测量电压取自产品,测量功率没有线路损耗。图10 (b)、(d)、(e) 所测量的功率不但包括仪表损耗,而且还包括线路损耗,当它大到不容忽视时,也应从测量功率中减掉。

线路损耗的数值可以从下列两种方法之一中选择:其一、断开试品,将试验线路的端部短路,施加试验电流的三相平均值,从瓦特表中读取。其二、可用试验电流的平方与三相试验线路电阻的乘积计算得出。

12.7 当试验电压三相不对称度小于2%时,可以三个线电压的平均值或a—c间的线电压为准施加电压,测量空载数据。如果三相电压的不对称度大于2%、但不超过5%时,可分别以a—b, b—c, c—a为准施加电压,试验数据取三次试验的算术平均值。

12.8 当电压波形畸变,即平均值电压表与有效值电压表读数不同时,应以平均值电压表(有效值刻度)施加电压 U_1 ,测量空载损耗 P_m 、空载电流 I 和有效值电压表的电压 U 。

如果 $U' = U$,则空载损耗不需要校正, $P_0 = P_m$ 。

如果 $U' \neq U$ 时,则空载损耗 P_0 按下式计算。

$$P_0 = P_m / (P_1 + K_u P_2) \quad (26)$$

式中: P_1 ——磁滞损耗与总的铁损之比;

P_2 ——涡流损耗与总的铁损之比;

K_u —— $(U/U')^2$;

U' ——当电源不带试品时,平均值电压表为 U_1 时有效值电压表的读数(线电压)。

空载电流应以平均值电压表(有效值刻度)施加额定电压所测得三相电流的算术平均值占额定电流的百分数计算。对于容量不等的多绕组试品,空载电流的基数应取较大容量的额定电流。

12.9 当试验频率 f 与额定频率 f_n 有差异时,施加电压应用 U_1 代替 U_n ,如下计算:

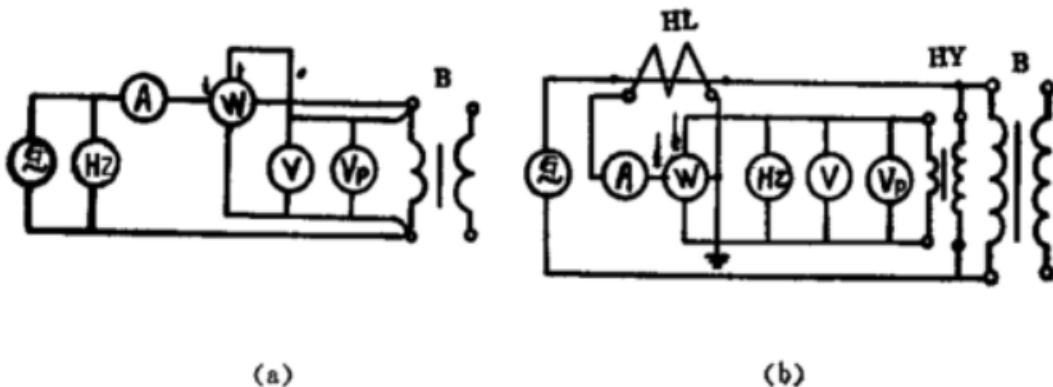
$$U_1 = U_n (f/f_n) \quad (27)$$

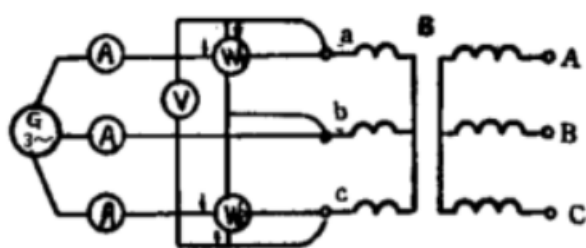
式中: U_n ——额定频率时的额定电压。

测得的空载损耗应按下式进行校正:

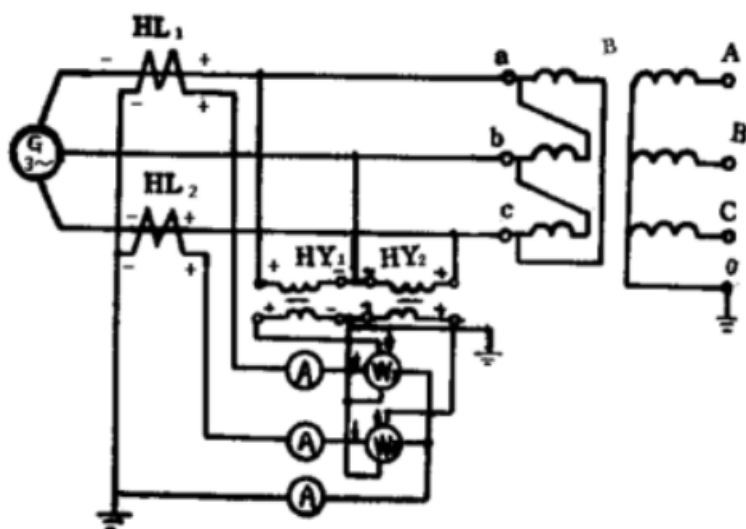
$$P_0 = P_0' [P_1 (f_n/f) + P_2 (f_n/f)^2] \quad (28)$$

当试验频率与额定频率相差不超过 $\pm 5\%$ 时,测得的空载电流不需要校正。

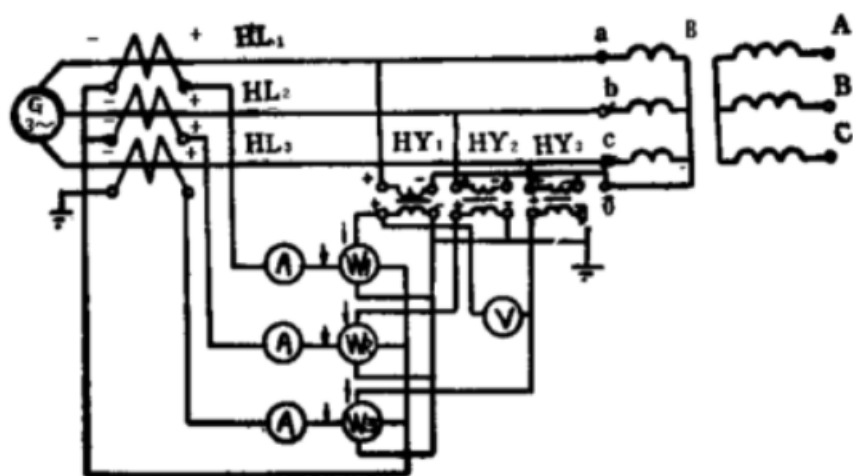




(c)



(d)



(e)

图 10 空载损耗和空载电流测量原理图

③——单相发电机 ④——3相发电机 B——试品 HL——标准电流互感器
 HY——标准电压互感器 ⑤——电流表 ⑥——频率表 ⑦——瓦特表
 ⑧——平均值电压表 ⑨——电压表

对于50Hz和60Hz正常使用的磁感应强度, P_1 和 P_2 可采用表5的数值。

表5 磁滞损耗、涡流损耗与总的铁心损耗之比

	P_1	P_2
取向硅钢片	0.5	0.5
非取向硅钢片	0.7	0.3

12.10 当对空载损耗在各相的分布状况产生怀疑时,或者缺乏必要的试验设备,无法进行三相空载测量时,可进行单相空载试验。如果是后者原因,试验必须校正电压波形对测量的影响。

12.10.1 当激磁绕组为a—y, b—z, c—x三角形接线时,施加电压 $U = U_n$ (额定线电压)。测量方法如下:

第一次试验:从a—b端供电, b—c端短路,测量 P_{0ab} 和 I_{0ab} 。

第二次试验:从b—c端供电, a—c端短路,测量 P_{0bc} 和 I_{0bc} 。

第三次试验:从a—c端供电, a—b端短路,测量 P_{0ac} 和 I_{0ac} 。

对施加电压绕组为a—z, b—x, c—y的三角形接线时,施加电压,测量方法和顺序均与上相同,只是第一次测量的是 P_{0ac} 和 I_{0ac} ;第二次测量的是 P_{0bc} 和 I_{0bc} ;第三次测量的是 P_{0ab} 和 I_{0ab} 。

三相的空载电流百分数计算如下:

$$I_0 = \frac{0.289 \times (I_{0ab} + I_{0bc} + I_{0ca})}{I_n} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (29)$$

12.10.2 当施加电压的绕组为星形联结 (非供电绕组可以短路时) 或中性点引出的星形联结时,施加电压 $U = 2U_n / \sqrt{3}$, 测量方法如下:

第一次试验:从a—b端供电, c—0或c相上的其它绕组短路,测量 P_{0ab} 和 I_{0ab} 。

第二次试验:从b—c端供电, a—0或a相上的其它绕组短路,测量 P_{0bc} 和 I_{0bc} 。

第三次试验:从a—c端供电, b—0或b相上的其它绕组短路,测量 P_{0ac} 和 I_{0ac} 。

三相的空载电流百分数计算如下:

$$I_0 = \frac{0.33 (I_{0ab} + I_{0bc} + I_{0ca})}{I_n} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (30)$$

激磁绕组为星形或三角形联结的三相空载损耗均按下式计算:

$$P_0 = (P_{0ab} + P_{0bc} + P_{0ca}) / 2 \quad \dots\dots\dots (31)$$

12.10.3 三次测得的空载试验数据应符合下列规律:

第一: $P_{0ab} = P_{0bc}$ 偏差一般小于3%;

第二: $P_{0ac} = K_p P_{0ab} = K_p P_{0bc}$ 。 K_p 是由铁心的几何尺寸决定的,三柱式铁心的几何尺寸示意图见图11。

$$K_p = \frac{H + 2M_0 (S_1/S_2)}{H + M_0 (S_1/S_2)} \quad \dots\dots\dots (32)$$

式中: H ——铁心窗高;

M_0 ——铁心柱中心距离;

S_1 ——铁心柱截面积;

S_2 ——铁轭截面积。

注：① 对于三相五柱式铁心的产品，本公式不适用；

② K_p 的计算值仅供参考，做为判断依据应以原始出厂数值为准。

三次测量的空载数据如果不符合以上两个规律的任何一个时，则说明变压器磁路中有局部缺陷。

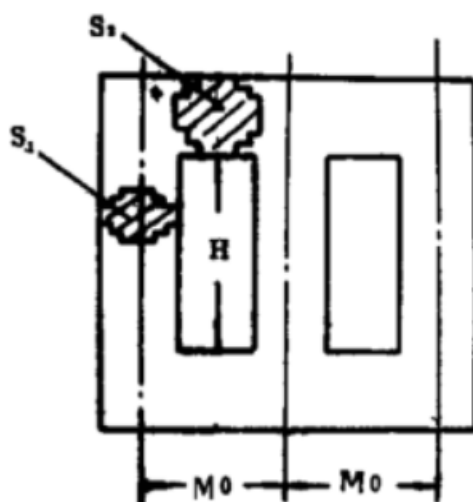


图 11 三相心式铁心示意图

13 阻抗电压、短路阻抗及负载损耗的测量

阻抗电压和负载损耗是变压器运行的重要参数，通过测量，验证这两项指标是否在国家标准允许的范围内，并且从中发现设计与制造绕组及载流回路中的缺陷和结构的缺陷。

13.1 阻抗电压与负载损耗的测量，应在试品的一个绕组的线端施加额定频率，且近似正弦的电流，另一个绕组短路，各相处于同一个分接位置。测量应在25%~100%（最好不少于50%）额定电流下进行。测量应迅速进行，试验时绕组所产生的温升应不引起明显的误差。测量前应准确的测量绕组的平均温度，详见10.6条的规定。

13.2 阻抗电压和负载损耗的测量与空载试验的测量线路相同，按图10的接线进行。只是测量中无需进行电压波形校正。测量方法上的要求与12.3~12.6的规定完全相同。

13.3 对于额定电流很小的试品，仪表（电压表及瓦特表电压线圈）和电压互感器的吸收电流在测量电流中不可忽略时，应将电压取于电源。单相测量按图12(a)的接线进行，三相测量按图12(b)的接线进行。

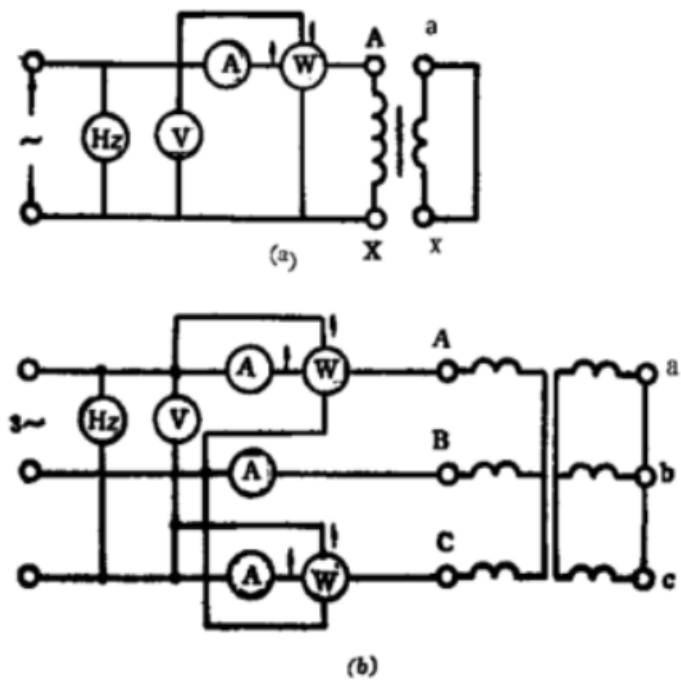


图12 电压取于电源的测量接线图

①—电流表 ②—电压表 ③—瓦特表 ④—频率表

13.4 阻抗电压是绕组通过额定电流时的电压降，标准规定以该电压降占额定电压的百分数表示。阻抗电压测量时应以三相电流的算术平均值为准，如果试验电流无法达到额定电流时，阻抗电压应按下列公式折算并校正到表 6 所列的参考温度。

表 6 参考温度

绝缘的耐热等级	参考温度 ℃
A	75 ¹⁾
E	75
B	75
其它绝缘的耐热等级	115

注：1) 当为导向强迫油循环绕组温升为70K时，参考温度为80℃。

$$c_{kt} = \frac{U_{kt}}{U_n} \times \frac{I_n}{I_k} \times 100\% \dots\dots\dots (33)$$

$$e_k = \sqrt{e_{kt}^2 + \left(\frac{P_{kt}}{10S_n}\right)^2 \times (K_t^2 - 1)} \dots\dots\dots (34)$$

式中：e_{kt}——绕组温度为 t℃时的阻抗电压，%；
U_{kt}——绕组 t℃时流过试验电流 I_k 的电压降，V；
U_n——施加电压侧的额定电压，V；
I_n——施加电压侧的额定电流，A；
e_k——参考温度时的阻抗电压，%；
P_{kt}——t℃时的负载损耗，W；

S_n ——额定容量, $\text{kV} \cdot \text{A}$;

K_t ——温度系数。

13.5 短路阻抗通常以每相欧姆数表示, 也应校正到表 6 所列的参考温度。

$$Z_t = e_k \times \frac{U_n^2}{S_n} \quad \dots\dots\dots (35)$$

式中: Z_t ——短路阻抗;

U_n ——绕组的额定电压, kV ;

S_n ——绕组的额定容量, $\text{MV} \cdot \text{A}$;

e_k ——绕组的阻抗电压, %。

13.6 负载损耗是绕组通过额定电流时所产生的损耗。测量时, 应以三相电流的算术平均值为准, 施加额定电流, 如果试验电流无法达到额定电流时, 负载损耗应按额定电流与试验电流之比的平方增大, 负载损耗中的电阻损耗与电阻成正比变化, 而其它损耗与电阻成反比变化。两部分损耗应分别校正到表 6 所列的参考温度, 通常用下面的公式计算:

$$P_k = \frac{P_{kt} + \sum I_n^2 R \times (K_t^2 - 1)}{K_t} \quad \dots\dots\dots (36)$$

式中: P_k ——参考温度下的负载损耗;

P_{kt} ——绕组试验温度下的负载损耗;

K_t ——电阻温度因数 (详见 10.8 条的规定);

$\sum I_n^2 R$ ——被测一对绕组的电阻损耗。

三相变压器一对绕组的电阻损耗应为两绕组电阻损耗之和, 计算方法如下:

$$\begin{aligned} \text{"Y" 或 "Yn" 联结的绕组} \quad P_r &= 1.5 I_n^2 R_{xs} \\ &= 3 I_n^2 R_{xs} \quad \dots\dots\dots (37) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{"D" 联结的绕组} \quad P_r &= 1.5 I_n^2 R_{xs} \\ &= I_n^2 R_{xs} \quad \dots\dots\dots (38) \end{aligned}$$

式中: P_r ——绕组的电阻损耗;

I_n ——绕组的额定电流;

R_{xs} ——线电阻;

R_{xs} ——相电阻。

13.7 变压器的阻抗电压和负载损耗测量应在主分接下进行, 有载调压变压器还应测量在最高和最低电压下的数据, 进行温升试验的产品必须测量额定容量电压最低的负分接负载损耗。

13.8 三绕组变压器, 其阻抗电压、短路阻抗及负载损耗应在成对的绕组间进行测量。如:

在绕组 1 与绕组 2 间;

在绕组 2 与绕组 3 间;

在绕组 3 与绕组 1 间。

多于三绕组的变压器, 绕组应成对的选取, 其原则与三绕组相同。

试验时, 非被试绕组开路。

13.9 不同容量的绕组测量时, 施加电流应以较小容量的额定电流为准, 试验结果负载损耗应注明容量; 阻抗电压应将其测量结果换算到较大容量。

13.10 当试验频率不等于额定频率时 (其偏差小于 5 %), 负载损耗可认为近似相等, 阻抗电压按下式进行校正:

$$e_k = \sqrt{\left(e_{kt} \times \frac{f_s}{f} \right)^2 + \left(\frac{P_{kt}}{10 S_n} \right)^2 \left[K_t^2 - \left(\frac{f_s}{f} \right)^2 \right]} \quad \dots\dots\dots (39)$$

式中: e_s ——参考温度下的阻抗电压, %;

e_{s1} ——试验温度下的阻抗电压, %;

f_s ——额定频率, Hz;

f ——试验频率, Hz;

P_{s1} ——试验温度的负载损耗, W;

S_n ——额定容量, kV·A;

K_t ——电阻温度系数(见10.8的规定)。

13.11 当对变压器的绕组是否存在缺陷及对产品结构的合理性产生怀疑时,可进行单相负载试验。

对于供电侧绕组为YN另一侧为yn或d联结的产品,可以轮流在一个相绕组(例如: A0; B0; C0)上施加额定电流,而另一侧三相短路,三次测量的阻抗压降平均数乘以 $\sqrt{3}$ 就相当于三相测量的压降,三次负载损耗之和应相当于三相测量的负载损耗。

对于供电侧为Y另一侧为y或d形联结的产品,可轮流在每个双相上施加额定电流,而另一侧三相短路依次测量阻抗压降和负载损耗。允许将单相测量的结果换算到三相数据,其阻抗压降应乘以 $\sqrt{3}/2$,总的负载损耗应为三次负载损耗之和的一半。

对供电侧绕组为D,另一侧绕组为yn、y或d联结的产品,可轮流在供电侧每个双相上施加 $\sqrt{3}/2$ 额定电流,依次短路一相线圈(例如在AB端供电,EC端短路)而另一侧绕组三相短路,依次测量阻抗压降和负载损耗。允许将单相测量结果换算到三相数据,其阻抗压降等于三次测量的平均数,其负载损耗等于三次负载损耗之和的一半。

对于独立绕组的三个单相的负载损耗应基本相等。对于自耦联接绕组的三个单相损耗一般B相比较其它两相略大一些。

14 有载开关操作试验

14.1 操作试验

14.1.1 变压器不励磁,在100%的额定操作电压下完成8个操作循环。试验应逐级操作检查,检查分接指示和遥控位置、旋转方向保护、控制电压失压后自动起动、手动、电动联锁保护、极限位置保护、级进及超越操作等是否正常。

14.1.2 变压器不励磁,在85%的额定操作电压下完成一个操作循环(1→n, n→1),机械运转应正常,位置指示正常。

14.1.3 变压器在额定频率、额定电压下空载运行,完成一个操作循环。在分接过渡时,电流表及功率表摆动显正常。分接开关完成一个操作循环。

14.1.4 变压器的一个绕组短路,在尽可能达到额定电流的情况,在主分接两侧 ± 2 级范围内完成10次分接变换。

14.2 辅助回路绝缘试验在变压器装配完成后,按照 GB 1094.3 第9章规定进行工频耐压试验。

第二篇 型式试验

15 温升试验

温升试验是验证试品在额定工作状态下,主体所产生的总损耗(空载损耗与负载损耗之和)与散热装置热平衡的温度是否符合有关标准的规定,并验证产品结构的合理性,发现油箱(或外壳)和结构件上的局部过热的程度。

15.1 温升试验的地点应清洁宽敞,在试品周围2~3m处不得有墙壁、热源、杂物堆积及外来辐射气流

等干扰，室内可有自然的通风，但不应引起显著的空气回流。

以空气为冷却介质的试品，环境温度应在 $10\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，以水为冷却介质的试品，入口水温不得高于 30°C 。

15.2 温升试验应模拟试品在运行中最严格的状态、应在额定容量、最大电流、最大总损耗的分接进行。试验的额定条件为：铁心损耗等于空载损耗（校正值），线圈及附加损耗等于实测参考温度的负载损耗（额定容量、最大电流、最大负载损耗的分接）。

15.3 温升试验时，采用下列方法之一：

- a. 直接负载法；
- b. 相互负载法；
- c. 循环电流法；
- d. 零序法；
- e. 短路法。

15.3.1 直接负载法

在变压器的绕组一侧供给额定励磁，在另一侧绕组连接适当负载，这种方法是最真实的温升试验。负载可以用一般的电器（如电抗器、电阻或灯泡），也可以把极板放在水中，通过调节极板距离和溶解盐来改变负载电流。还可以用移圈调压器作负载，调节动圈来改变负载电流。

15.3.2 相互负载法

这种方法是利用一台与试品电压比和连接组向量标号相同的辅助变压器，其一侧绕组与试品同名端并联，供给额定励磁，另一侧绕组通过负载辅助变压器与试品同名端并联，详见图13，通过调节负载辅助变压器的输入电压来改变试品的负载电流，使其达到额定。负载辅助变压器的电源可以与供给额定励磁的电源不同，详见图13（a），也可以是相同的，见图13（b）所示。但是，无论是同一电源，还是两个电源，必须保证两个电源的相位及频率完全相同，否则是无法进行试验的。

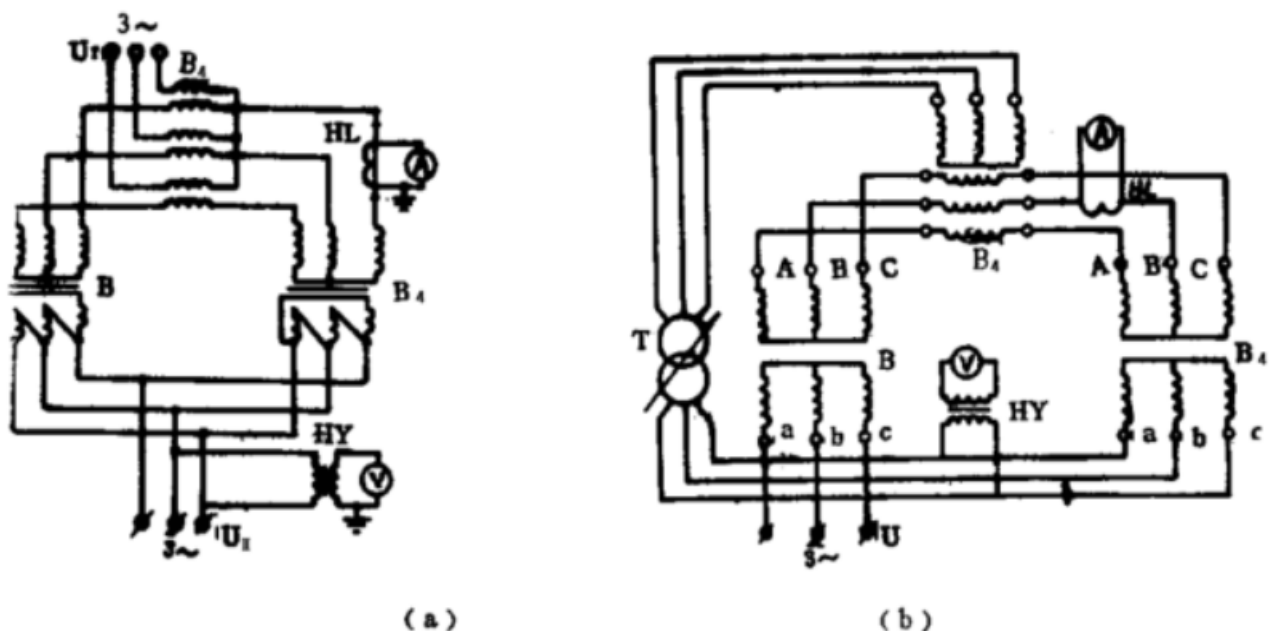


图13 相互负载法原理接线图

B——试品 B₄——辅助变压器 B'₄——负载损耗辅助变压器 T——调压器
 HL——标准电流互感器 HY——标准电压互感器 ④——电流表 ⑤——电压表

15.3.3 循环电流法

用循环电流法进行温升试验（详见图14），将试品的一侧与辅助变压器同名端并联，供给额定激磁，另一侧的同名端也相应并联，靠试品与辅助变压器在另一侧的感应电势差使负载电流接近试品额定电流。辅助变压器的容量及励磁侧的电压应分别大于或等于试品容量及额定电压。靠调节分接或移圈调压器的动圈所产生的电势差，应尽量接近试品和辅助变压器在试验电流下的阻抗压降之和。

用这种方法进行温升试验，往往试验电流不能等于额定电流，但试品的试验损耗应不低于总损耗的80%，试验电源应不低于额定电流的30%。试验结果应进行相应的换算。用循环电流法进行温升试验时，电源除供给两台变压器的空载容量外，还供给试品与辅助变压器的试验容量差。

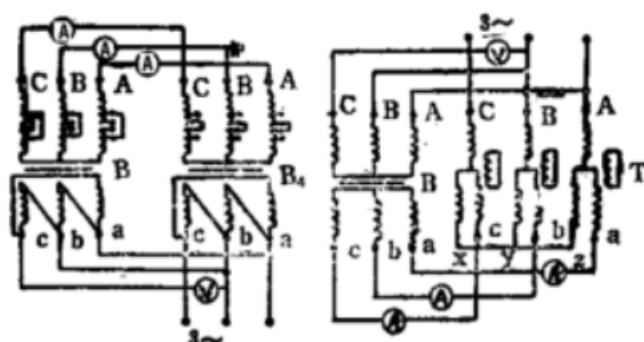


图14 循环电流法原理接线图

B——试品 B₄——辅助变压器 T——三相变压器 A——电流表 V——电压表

15.3.4 零序法

采用零序法进行温升试验，是在绕组的一侧供给额定激磁，在另一侧零序回路中供电，使绕组产生额定电流，两侧绕组的零序电流应分别有零序回路。三相变压器用零序法进行温升试验的原理接线图见15，单相变压器见图16。三相变压器因采用此方法，使负载电流的相序为零，因此，三相磁通的相序也是零，绕组磁势平衡后的漏磁通将会使铁心夹件、拉紧杆，防尘罩等附加损耗猛增，造成局部过热。YN联结的绕组，中性点连线的电流将会等于3倍额定电流，因此，试验前需采取必要的措施，试验方能顺利的进行。

15.3.5 短路法

用短路法进行温升试验时，将试品的一侧绕组短路，另一侧供电，使其输入功率等于最大总损耗。当温升稳定后，将得到相当于额定状态的油顶层温升及油平均温升。

油的温升稳定后降低输入功率，使绕组中的电流等于额定容量的最在电流。然后，持续一小时，测量绕组对油的温升。

将额定容量的最大电流时绕组对油的温升加上最大总损耗时油的平均温升，就等于试品在额定容量运行时绕组对冷却介质的最高温升。

15.3.3 油浸式变压器的温升试验可以采用以上五种方法的任意一种，但以短路法为最简单，因此，油浸式变压器多采用短路法。干式变压器应根据产品特点和设备条件选用前四种方法，如果有合适的辅助变压器，采用循环电流法最简单。对于单台干式变压器，征得用户同意，可采用模拟法进行温升试验，详见GB 6450第5.11.1.3条的规定。

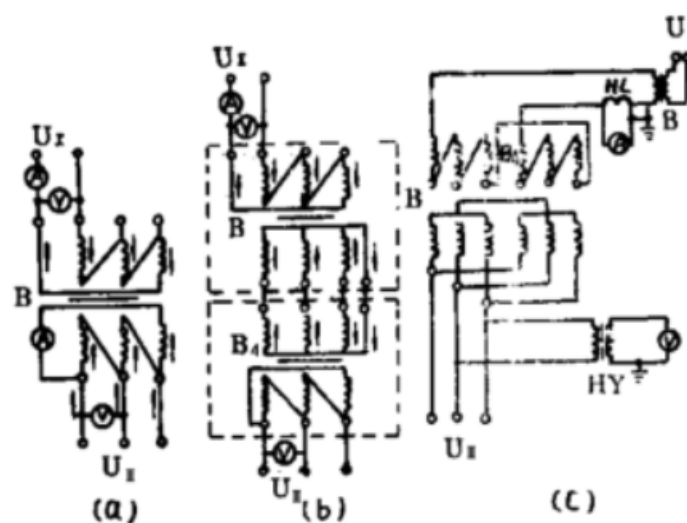


图15 三相变压器零序法温升试验原理接线图

B—试品 B₄—辅助变压器 B₂—中间变压器 ④—电流表 ⑤—电压表 HL—标准电流互感器
HY—准电压互感器 U_I—供试验用的单相交流电压 U_{II}—供试验用的三相交流电压

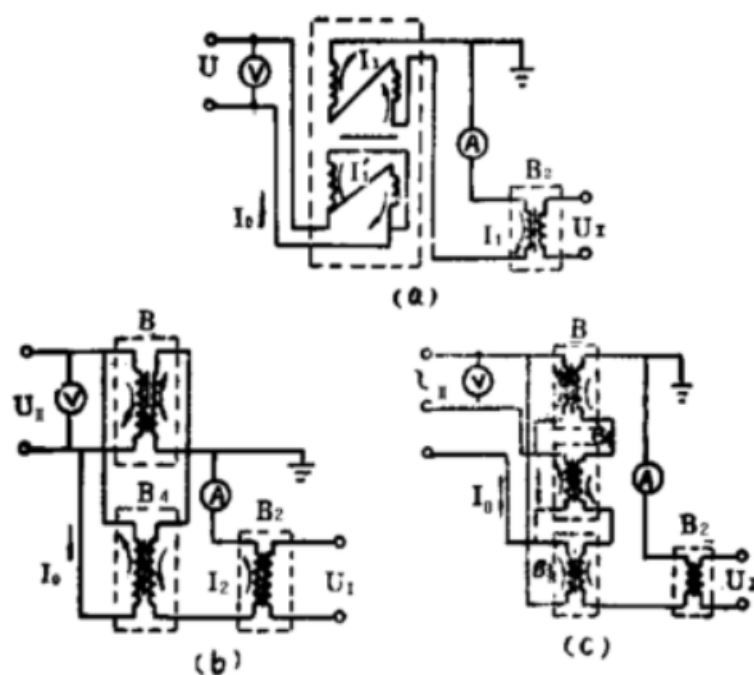


图16 单相变压器零序法温升试验原理接线图

B—试品 B₄—辅助变压器 B₂—中间变压器 ④—电流表 ⑤—电压表
U_I—供负载损耗用的交流电压 U_{II}—供空载损耗用的交流电压

15.4 为了缩短温升试验的时程,试验开始时,可以采用提高输入功率或恶化冷却条件(并油泵应正常运行)的办法,使温度迅速提高,当监视部位的温升达到70%预计温升时,应立即恢复额定发热与冷却状态。

15.5 试验中应维持输入功率恒定,每半小时记录一次监视部位的温度,油浸式变压器监视油顶层温度和散热器进出口的温度,干式变压器监视铁心温度。此外,还应记录环境温度和入口水温(如果是水冷却器)。

15.6 温升试验开始后1h左右应在带电的情况下,检查低压侧油箱壁和强电流(3000A以上)瓷套周围有无局部过热部位,然后在试验中用热电偶或点温计测量其温升。

15.7 温升试验后期,当监视部位的温升连续4h每小时温升不再上升1K时,可以认为温升已经达到稳定状态。注意,计算温升时冷却介质的温度取在最后1/4时程里,在相等的时间间隔内这些温度的平均值。

读取各监视部位和环境温度的最终值,对于直接负载法、相互负载法、循环电流法和零序法温升行将结束;对于短路法应降低输入功率使绕组中的电流为额定容量的最大电流,持续1h。各种方法最后均需断电测量热电阻,利用冷、热电阻的变化率计算绕组温升。

15.8 如果对其它绕组进行温升试验需要重复送电时,应维持额定电流1h,然后断电测量热电阻决定绕组此时对油的温升,此线油温差加上总损耗下的油平均温升,就等于额定状态下绕组对冷却介质的温升。

15.9 为了每次试验可以获得两个绕组的温升。使用电桥测量冷热电阻时,应在测量一对绕组的冷电阻时,需反复测量找出电阻测量时间最短的两回路中的电池极性和电流大小。

使用数字电压表用压降法测量冷热电阻进行温升试验时,可将两个绕组串联,见第10.7.2条及图5的接线。

冷电阻测量后要准确的记录绕组温度,详见第10.6条。将温升试验中带电的部分做好标记,悬起保持足够的绝缘距离,使冷热电阻测量处于同一状态,以减少测量误差。

15.10 冷却介质的温度测量

15.10.1 冷却空气(环境)温度的测量应避开吹风和热辐射,为了避免变压器温度变化与冷却空气温度变化之间因滞后而引起的误差,温度计应插入油不少于1000mL的悬空的金属油杯中,其时间常数为2h左右。温度计的精度应不低于0.2℃。

温度计应分布在试品周围,一般不少于3个,距离冷却表面1~2m,位于冷却表面高度的一半。对于吹风冷却的试品,如果有一个流向分明的气流流向冷却器,而没有很多空气回流,则温度计应放在气流的入口处。温度计距箱身和冷却表面的距离应为1~2m,以防热辐射,如果不具备这些条件时,冷却空气温度应在变压器周围避开回流测量,最好放在没有冷却器的一侧。

15.10.2 冷却水温度应在冷却器入口处测量,最好每只散热器均测量,取其平均温度作为冷却介质温度。

15.11 顶层油的温度,应由放在油箱顶部充油的温度计座中精度不低于0.2℃的温度计测量。如果是集中冷却,温度计座应置于出油管处。

15.12 油平均温度是绕组温度的一部分,直接关系到绕组温升,准确的确定油平均温度尤为重要。试验中。可酌情选用下列方法:

15.12.1 图解法

利用停电后电阻随时间的变化曲线,采用图17的方法画出直线L与纵座标交点R,R就是相当于油的平均温度的电阻,油平均温度按下面的公式计算:

$$\theta_p = \frac{R}{R_1}(T + \theta_1) - T \quad \dots\dots\dots(40)$$

式中: θ_p ——油的平均温度,℃;

R_1 ——绕组的冷态电阻值, Ω ,
 θ_1 ——冷态电阻的绕组温度, $^{\circ}\text{C}$,
 T ——对于铜导线为235, 铝导线为225。

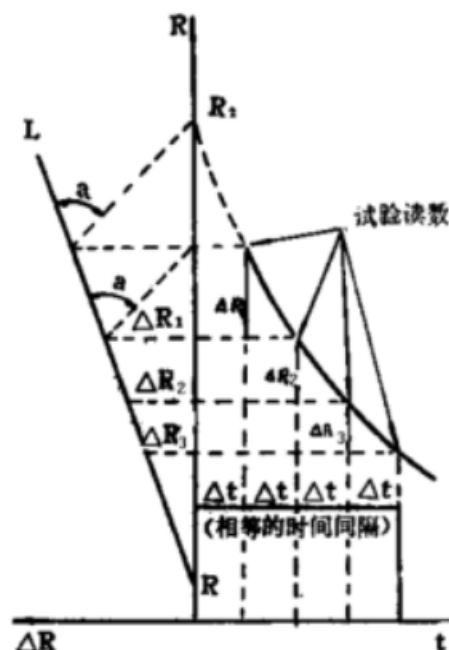


图17 确定切断电源瞬间热电阻和油平均温度的方法

15.12.2 测量计算法

试验时,用带有油温度计座的连管将油箱与散热器或冷却器连接起来,将准确度不低于 1°C 经过对比指示相同的温度计置于充油的油温度计座中,测量散热器进出口的油温,每片散热器与冷却器由于所处位置不同,散热功率也不同,应尽可能多的测量其进出口油温,取其平均值进行计算。对于油浸自冷、油浸风冷及强迫油循环冷却的变压器,油的平均温度应等于油顶层温度减去进出口温差之半。

对于管式油箱和带散热器的油箱,温差值应取散热管元件顶部和底部表面温度之差,散热管和散热元件应尽可能选取油箱某一侧的中间部分。

15.12.3 估算法

额定容量低于 $2500\text{kV}\cdot\text{A}$ 采用自然油循环的板式油箱、波纹油箱、带有散热管油箱或带有片式散热器油箱的变压器,其油的平均温升可按顶层油温升的80%计算。

15.13 铁心温度的测量通常采用校准的热电偶,热电偶应嵌入铁轭表面 $1\sim 2\text{cm}$,在上铁轭设置 $3\sim 5$ 个测量点,取其最高温度计算温升。

15.14 绕组温度的测量

绕组温度是靠冷热电阻的变化率决定的。因此,准确测量冷、热电阻的阻值,冷电阻的绕组温度和热电阻的冷却介质的温度是极为重要的。

15.14.1 冷态电阻测量和绕组温度见第10.6, 10.7条的规定,使用电桥的精度一般应不低于0.05级,必须采用双臂接法测量。检流计的电流常数应不大于 10^{-8}A/格 ,其阻尼应适中。电源用蓄电池(120Ah以上)或恒流源,如果用蓄电池必须有可调的限流电阻,调节电源的电流和检流计的灵敏度,使电阻变化千分之一,检流计偏转 $3\sim 5$ 格。一般取AB线端进行测量。

为了使冷、热电阻的测量误差减小到最低,应记录冷电阻测量时电源电流、电压、检流计的灵敏度,稳定时间。应采用提高电源电压及高、低压同时测量或恒流源等措施,使被测电阻的稳定时间小于2 min。

15.14.2 热电阻的测量要与冷电阻测量时的连线、仪器仪表、电源及电流电压、检流计灵敏度、稳定时间等完全相同。

调正电桥指示,使之等于估算的热电阻值(油浸变压器热电阻为冷电阻的1.2倍左右)。停电的同时切断风扇和水泵的电源使其停止转动,但油泵继续运转,并以最快的速度打开短路工具,接通电源测量热电阻。要特别注意切断与被测绕组并联的供电回路和电压、功率测量回路。否则,测量将会失败。

15.14.3 为了得到温升稳定后的热电阻,可以在负载电流上叠加一个低值直流,用叠加法(带电测温)直接测量热电阻。但在多数情况下,是用下面的方法得到停电瞬间的热电阻。

a. 由停电到测得第一个有效的热电阻 R_1' 最好在2min内,最多不得超过3min。

b. 在10~12min内每隔相等的时间(30~60s)测定一个电阻值,并记录其阻值和与其对应的时间。例如: $R_1', R_2', R_3', \dots, R_4', \dots$ 及 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_4, \dots$ 。

c. 再隔5~10min补充测量一个参考值 R_n' 。给出 $R_1' - R_n', R_2' - R_n', R_3' - R_n', \dots, R_4' - R_n', \dots$ 及 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_4, \dots$ 的坐标各点(如果是方格坐标时,取 $L_g(R_1' - R_n')$, $L_g(R_2' - R_n')$, $L_g(R_3' - R_n')$, \dots , $L_g(R_4' - R_n')$, \dots 的值),用直线连接,其与R轴的交点就是停电瞬间即 $t = 0$ 时热电阻 R_1' 与 R_n' 的差值。详见图18。

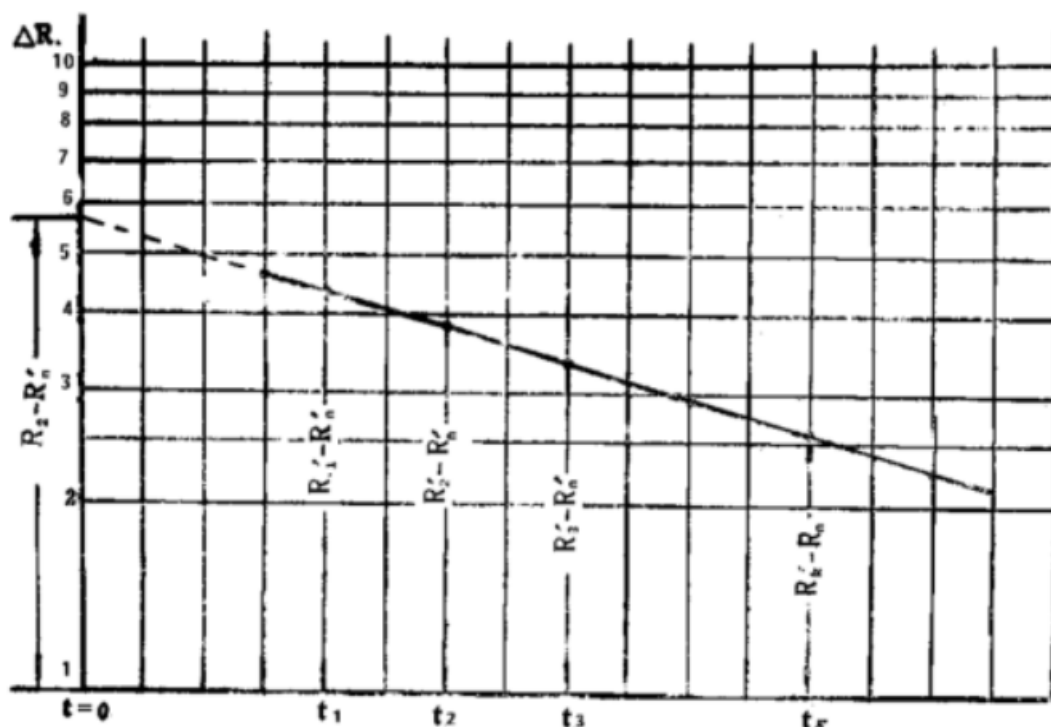


图18 半对数坐标纸求热电阻图解法

d. 以上方法普遍使用于温升测量中,但也可以用图17的方法确定停电瞬间的热电阻。

e. 绕组的温度用下式计算:

$$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1} (T + \theta_1) - T \quad \dots\dots\dots (41)$$

式中: θ_1 ——绕组温度;

R_2 ——停电瞬时的热电阻；

R_1 ——温度为 θ_1 时绕组冷电阻；

T ——对于铜导线为235，铝导线为225。

15.15 干式变压器温升计算

15.15.1 采用直接负载法、相互负载法、循环电流法或零序法使试品铁心达到额定激磁，绕组达到额定负载时，绕组温升如下计算：

$$\Delta\theta = \frac{R_2}{R_1} (T + \theta_1) - (T + \theta_2) \quad \dots\dots\dots(42)$$

式中： $\Delta\theta$ ——绕组对空气的温升，K；

θ_2 ——试验后期1/4时程，空气的平均温度，℃。

15.15.2 当试品铁心达到额定激磁，绕组电流达到90%以上最大额定电流时，温升如下计算：

$$\Delta\theta = \Delta\theta_1 \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^q \quad \dots\dots\dots(43)$$

式中： $\Delta\theta_1$ ——负载电流为 I_1 时绕组对空气的温升；

I_n ——额定电流；

q ——空气自冷（AN）为1.6，风冷（AF）为1.8。

15.16 油浸式变压器的温升计算

15.16.1 油顶层温升

当采用直接负载法、相互负载法、循环电流或零序法使铁心达到额定激磁，绕组达到最大额定电流时，采用短路法使输入功率等于总损耗，达到稳定状态时，顶层油的温升等于顶层油的温度与冷却介质温度之差。

如无法达到额定发热状态，但试验损耗不低于80%总损耗时，按 $\left(\frac{\text{总损耗}}{\text{试验损耗}} \right)^x$ 校正；

其中： x ——空气自冷为0.8；风冷却或水冷却为1.0。

15.16.2 绕组的温升计算

采用直接负载法、相互负载法、循环电流法、零序法进行温升试验，铁心达到额定励磁，绕组中有额定容量的最大电流，达到稳定状态后，停电测量热电阻，计算方法同15.15.1的规定。当采用短路法使输入功率为最大总损耗，达到稳定状态后，测量最大总损耗时油对冷却介质的温升。然后降低到额定容量最大电流1h后，测量绕组对油的温升，将总损耗时油对冷却介质的温升，加上绕组对油的温升就等于绕组对冷却介质的温升。

如果不能达到额定容量最大电流时，试验应在不小于90%的额定容量最大电流下进行。另外，也可用能提供总损耗的试验电流。但不论任何一种情况下，均可采用校正系数 $\left(\frac{\text{额定电流}}{\text{试验电流}} \right)^y$ 确定高于油平均温度的绕组温升；

其中： y ——自然油循环及强迫非导向油循环为1.6；

强油导向油循环为2.0。

额定电流——指须施加的额定容量最大电流值。

15.17 对于多绕组变压器，在使用时，它的两个以上的绕组却可以同时带负载，其温升试验一般按独立的双绕组进行。

在某些情况下，某个绕组的容量可能妨碍变压器在满值的总损耗下进行试验，此时，油浸式变压器的顶层油温升和油平均温升就按第15.16.1条的方法加以校正。

为了确定该绕组在其最严格情况下与指定负载组合的温升,必要时可按第15.16.2条的规定进行校正。在计算中可考虑该负载组合下的杂散损耗和涡流损耗。

16 雷电冲击试验

16.1 变压器绕组最高电压 U_m 小于300kV级容量120MV·A及以下的变压器,线端雷电全波冲击试验按GB 1094.3及GB 7449的规定。

16.2 线端雷电截波冲击试验按GB 1094.3及GB 7449的规定。

16.3 中性点(引出)雷电全波冲击试验按GB 1094.3及GB 7449的规定。

17 油箱机械强度试验

油箱机械强度试验包括真空强度和正压机械强度两方面。油箱机械强度试验应在不装器身的单独油箱上进行。

17.1 根据GB 6451.1~6451.5的规定,35kV级4000kV·A及以上和63kV级及以上的所有油浸式电力变压器均应进行该标准所规定的正压和真空机械强度试验。对于35kV级3150kV·A及以下和10kV级的所有产品进行正压试验。其它各种规格的产品均应按照GB 6451.1~6451.5的要求按下列试验方法进行试验。

17.1.1 试验应在焊接与密封无缺欠的油箱上及在专用的场地上进行。施加正压与负压的泵与试验管路应事先装配好,在产品油箱上装有校准的压力表或真空表。

17.1.2 将油箱放平,在油箱下列部位设置不少于以下规定的测量点:

- a. 在低压侧油箱中心线的箱沿,中部的箱壁和加强点各一点,另外距几何中心结构薄弱处两点;
- b. 在高压侧油箱中心线的箱沿,在箱壁和高压盒壁上各设一个测量点;
- c. 在箱盖几何中心处设一测量点;
- d. 对于侧面有直线部分的油箱,在其直线薄弱部位设置测试点。

在通过以上测量点的两端拉细钢丝绳,然后用钢板尺测量钢丝绳距测量点的垂直距离作为原始数据。

17.1.3 对于35kV级及以下的变压器其正压或真空机械强度试验可以一次按GB 6451.1~6451.2施加压力。对于63kV级及以上的变压器正压和真空机械强度从50%试验值开始分4~6级逐级加压,仔细观察和测量各位置的弹性变形和永久变形。发现超过有关标准规定立即终止试验。

17.2 试验自始至终应指派专人监视测试仪表,控制压力不得超过规定,在达到规定持续时间阶段测量各点其弹性变形,持续时间终了时,解除压力测量其永久变形。如果弹性变形与永久变形超出有关技术条件规定,应采取有效措施,按上述规定重新试验。如果弹性和永久变形在规定范围内,则试验通过,试品合格。

第三篇 特殊试验

18 雷电冲击试验

中性点不引出,三相雷电全波冲击试验,按GB7449的规定。

19 声级测量

声级测量,按GB 7328的规定。

20 三相变压器零序阻抗的测量

零序阻抗是三相电流当相序为零时绕组中的阻抗。向用户提供该数据，是为了准确的计算事故状态下短路电流的零序分量，以便调整继电保护。

对于运行中有零序回路的绕组（YN联结）均需测量零序阻抗，试验的原理接线图见图19。

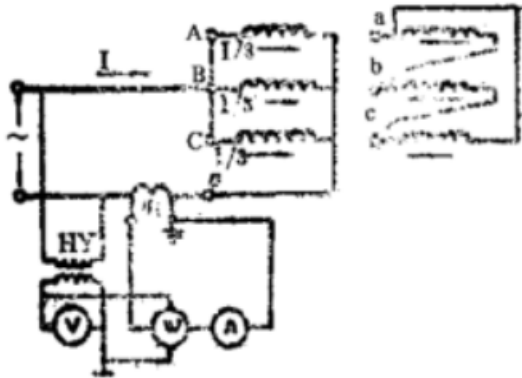


图19 零序阻抗试验线路图

HL——标准电流互感器 HY——标准电压互感器 Ⓐ——电流表 Ⓥ——电压表 Ⓜ——瓦特表

试验时一般从三相线端对中点供电，以电流为准，测量电压和功率。零序阻抗通常以每相的欧姆数表示，计算方法如下：

$$Z_0 = 3U/I \dots\dots\dots(44)$$

式中：Z₀——零序阻抗，Ω/相；
U——试验电压，V；
I——试验电流，A。

20.1 有平衡安匝的零序阻抗测量

20.1.1 对于联结组标号为YNyn0d11，YNd11yn0，Dyn11yn11 的三绕组变压器和YNd11 的双绕组变压器，绕组中有一个是封闭三角形连接的绕组均属有平衡安匝的试品。

有平衡安匝的试品其零序阻抗是线性的，一般只测量一点。试验电流应尽量等于额定电流，受设备能力限制时，应不低于25%额定电流。

20.1.2 如无特殊要求，零序阻抗的测量按下列测试组合进行。

对于YNd11的试品，只测量高压绕组，试验时ABC—0供电，低压开路。

对于YNyn0d11的试品，测试组合见表 7。

表 7

序	供 电 端 子	开 路 端 子	短 路 端 子
1	ABC—0	A _m B _m C _m 0 _m	—
2	ABC—0	—	A _m B _m C _m —0 _m
3	A _m B _m C _m —0 _m	A B C 0	—

对于其它有平衡安匝的绕组联结组合可参照以上两种联结组合的部位进行测量。在以上测量中由于电流经三角形接线自行构成回路，因此所测的零序阻抗都是“短路零序阻抗”，而没有空载零序阻抗。

20.2 无平衡安匝的零序阻抗测量

20.2.1 对于联结组标号为YNyn0yn0的三绕组变压器和Yyn0的双绕组变压器及所有联结组合中无闭合三角形的试品，均属无平衡安匝的产品。

无平衡安匝的试品其零序阻抗是非线性的，每个测试组合均需测量4～5点的零序阻抗。试验电流应尽量接近额定电流，如果零序阻抗太大，应控制其试验电压不超过额定的相电压。以该试验电流为100%，等差值递减分别测量各点的零序阻抗。

20.2.2 如无特别要求，零序阻抗的测试组合按下列规定进行。

对于Yyn0的试品，只测量低压绕组。试验时abc—0供电，高压绕组开路。这种试品只有空载零序阻抗，而没有短路零序阻抗。对于YNy0yn0的试验，测试组合见表8。

表 8

顺 序	供 电 端 子	开 路 端 子	短 路 端 子
1	ABC—0	A _n B _n C _n 0 _n a b c 0	—
2	ABC—0	a b c 0	A _n B _n C _n —0 _n
3	ABC—0	A _n B _n C _n	abc—0
4	ABC—0	—	A _n B _n C _n —0 _n abc—0
5	A _n B _n C _n —0 _n	A B C 0 a b c 0	—
6	A _n B _n C _n —0 _n	A B C 0	abc—0
7	A _n B _n C _n —0 _n	—	ABC—0 abc—0
8	abc—0	A B C 0 A _n B _n C _n 0	—
9	abc—0	—	A _n B _n C _n —0 _n ABC—0

以上测试组合中项1、项5、项8是空载零序阻抗，其它均属短路零序阻抗。对于空载零序阻抗测量时，应指派专人监视试品油箱各部位，避免由于零序磁通集中而引起箱壁内局部过热，大型产品尤应注意。

对于其它无平衡安匝的试品可参照以上的测试组合进行测量。

21 短路试验

短路试验是模拟运行中最严酷的短路故障，即网络容量足够大（见GB1094.5的规定），负载阻抗为零，而且在电压过零时获得最大的非对称电流。变压器绕组、分接开关、套管、引线、各机械紧固部件将承受来自短路电流所产生的巨大的动稳定效应与热效应的考核。从而验证结构的合理性与运行的可靠性。

21.1 变压器承受热稳定的能力，通常按照产品在运行温度下发生短路，对称短路电流产生的热效应全部用来提高绕组温度。其最高温度应不超过GB 1094.5的规定。GB 1094.5规定变压器承受热稳定能力可通过计算来保证。

试品的对称短路电流值及持续时间按GB 1094.5的规定。

21.2 短路试验承受动稳定的能力除了在设计时需要计算外，还必须通过试验来验证设计结构、工艺和制造的可靠性。试验通常在强电流试验站进行，试验电源可以是冲击发电机组，也可以是网络，一般均需配置合适的短路试验变压器和电抗器。短路试验的线路图见图20。

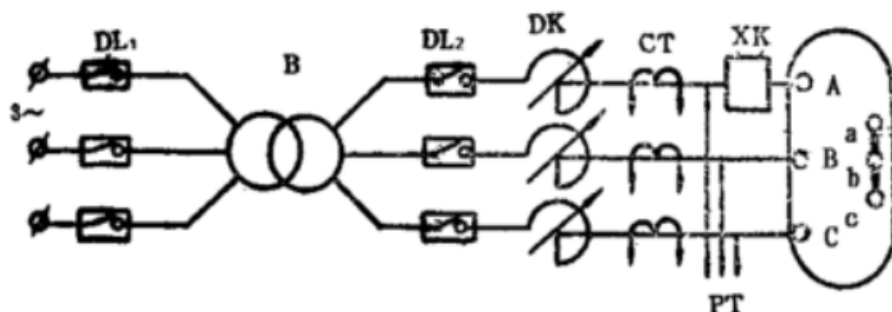


图20 短路试验原理线路图

DL₁——合闸用断路器 DL₂——保护用断路器 DK——可调负载电抗器 B——辅助变压器
CT——电流互感器 PT——电压互感器 XK——选相开关

21.3 短路试验前变压器应具备的条件和准备工作按下列要求进行。

21.3.1 应按照GB 1094.1中规定的出厂试验项目和要求，试验合格后方能进行短路试验。对试验没有影响的附件（例如：可拆卸的冷却器）可以不安装。其中负载试验应在最大分接、主分接和最小分接上进行，提供以上三个分接的阻抗电压和负载损耗。

21.3.2 试验可以在常温下进行，绕组温度为0~40℃。

21.3.3 试品运到试验站后，应在现场吊心检查并且再次进行机械紧固（包括线圈、铁心和引线及分接开关）。用白铅油沿线圈的轴向在线段和垫块上高压侧和低压侧分别画出2~3条直线，如有可能轴向也应画对应轴向的等条数的直线作为标记。然后拍照，定为试品短路试验前的形态。

21.3.4 试验前应精确测量高、低压绕组每相各分接的电阻值，电阻电桥的精度应高于0.2级。

21.3.5 试验前还应精确测量被试一对绕组试验分接的电抗值，重复测量电抗的误差应小于±0.2%。推荐采用HE5型互感器校验器，按照图21和图22的接线测量阻抗或导纳。阻抗小于30Ω的测量其阻抗，阻抗大于30Ω的测量其导纳。

21.4 短路电流非对称分量的峰值计算，按GB1094.5的规定。

21.5 短路试验可以采用预先短路，选相合闸，也可以预先送电，选相短路的方法。

对于同心式变压器采用预先短路时，为了避免最初几个周波中由于铁心饱和产生的励磁电流迭加在短路电流上，施加电压的绕组应该选距铁心较远的那个绕组。

对于双同心式绕组（高/低/高）和交叠式绕组采用预先短路的方法试验时，制造厂需与用户协商。

21.6 为了在试品绕组中获得规定的初始峰值电流，应采用选相合闸装置控制在电压过零的瞬间合闸，星形联结的绕组应在相电压过零时合闸，三角形联结的绕组应在线电压过零时合闸。

21.7 三相变压器应使用三相电源进行试验，没有三相电源也可使用单相电源。使用单相电源时，三角形联结的绕组单相电源应施加在三角形的两个角上。试验期间该单相电源应相当于三相试验的相电压。

星形联结的绕组单相电源应施加于一个线端与另外两个线端连在一起的线端上。试验期间，单相电压应等于三相试验时线电压的 $\sqrt{3}/2$ 倍。

单相电源主要用于3150KV·A及以上的变压器。分级绝缘的变压器，需考虑其中性点绝缘是否能够满足单相电源的试验要求，星形联结的变压器，如电源容量不足且有中性点可以利用，经制造厂与用户协商后，可在线端与中性点间使用单相电源进行试验。

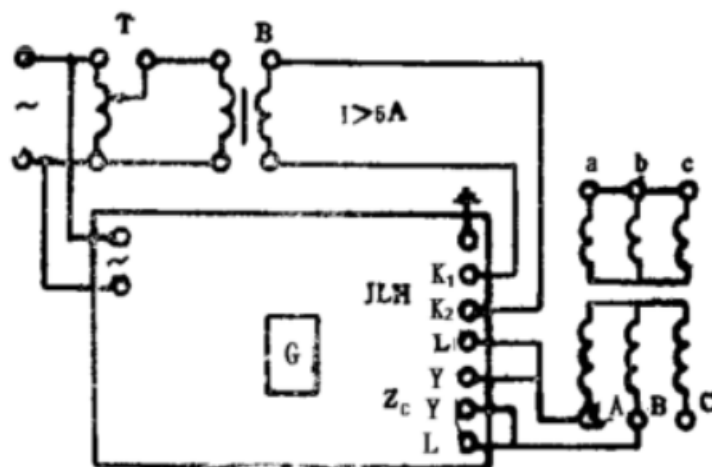


图21 用HE5电桥测量试品阻抗接线图

T——调压器 B——隔离变压器

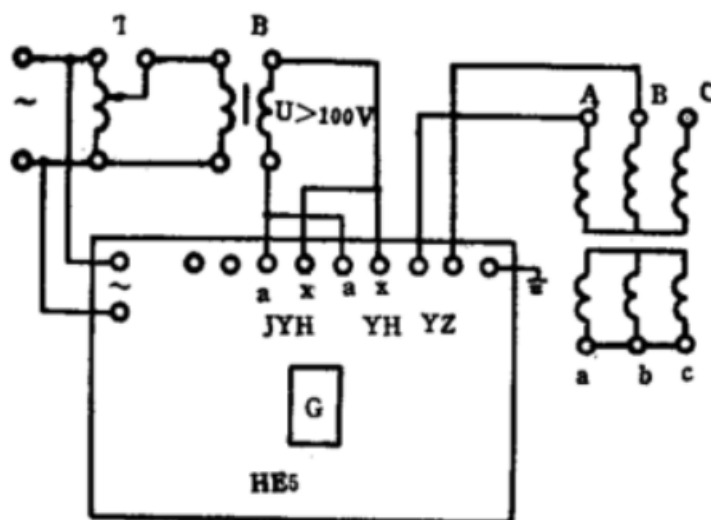


图22 用HE5电桥测量试品导纳接线图

T——调压器 B——隔离变压器

21.8 首先施加小于70%试验电流进行调试。当合闸相角、试验电流的初始峰值和对称值及持续时间均

达到要求时, 然后进行100%试验电流的正式试验。小于70%试验电流不记试验次数。

21.9 小于3150kV·A的单相及三相变压器, 试验次数为3次。每次试验时间 $0.5 \pm 10\%$ 。三次试验应分别在每相的最大、额定和最小分接位置上进行。三相变压器当一相的试验分接达到100%最大非对称电流时, 其它两相的非对称电流不低于75%时, 则认为三相在该分接通过了试验。单相变压器在一个分接位置达到100%最大非对称电流, 其它两个分接不应低于75%最大非对称电流。

大于或等于3150kV·A的变压器试验次数、时间及试验分接应由制造厂与用户协商确定。

21.10 每次试验除用示波器记录电流波形外, 还应派专人监视试品。每次试验过后, 应对电流波形、气体继电器进行观察, 并测量该分接的电抗值, 如在以上三方面发现问题或有怀疑时, 应补充测量直流电阻、空载损耗及空载电流, 做为判断缺陷的依据。

21.11 短路试验后, 应复试例行的出厂试验项目, 其中外施耐压与感应耐压按GB 1094.5规定的试验电压进行。

21.12 外观检查油箱的几何形状有无变形, 套管有无裂痕, 安全气道的玻璃有无碎裂或压力释放阀有无喷油。

然后吊心检查, 查看分接开关有无熔焊现象, 引线机械紧固及绝缘包扎有无松动、开裂及变形, 绕组有无变形, 垫块和各支撑件有无位移, 各部位有无放电痕迹。

最后, 分别在高压侧与低压侧按短路试验前的部位拍照, 以进行比较。

21.13 如果试验中短路电流初始峰值与稳定值、持续时间及试验次数均达到GB 1094.5的规定。试验中的波形和电抗与原始值比较, 对于圆柱形同心式绕组不大于2%, 对筒式绕组不大于4%。例行出厂试验合格, 且在吊心检查中油箱的几何形状无变形, 高、低压套管与分接开关无损伤, 绕组和支撑件无变形, 标记无位移, 无放电痕迹, 气体继电器中无气体, 压力释放阀无喷油等, 则认为该产品经受住短路试验考核, 试验合格。若以上任何一项超出了允许范围和规定, 则认为试验不合格, 并对不合格的原因做出结论。

22 空载电流谐波的测量

通过测量空载电流的谐波构成及数值以检查铁心的饱和程度, 验证设计的合理性。

22.1 空载电流谐波测量是通过谐波分析仪来完成的。目前大多数场合均使用国产GXF—2型工频谐波分析仪。

22.2 仪器的电压输入应取被测电压, 被测电压低于220V时, 直接输入; 高于220V时, 应经过互感器输入。

仪器的电流输入借助于仪器的附件电阻盒, 该盒有四个端子, 其中两个黑色端子与电流互感器二次回路串联, 两个红色端子与仪器的电流输入端子相联。测量时, 参照仪器使用说明书。

23 风扇电机和油泵电机所吸取功率的测量

采用图10的测试线路, 用 $\cos\phi = 1$ 的瓦特表, 采用两瓦特表法分别测量每个冷却器的油泵电机与风扇电机(数个一起测量)。测量前应调整电机的旋转方向使之符合要求。

每个冷却器的风扇电机与油泵电机所吸取的功率总和就是散热功率。

附加说明:

本标准由机械电子工业部沈阳变压器研究所提出并归口。

本标准由沈阳变压器厂、沈阳变压器研究所负责起草。

本标准主要起草人王述伦、彭桂先。

中 华 人 民 共 和 国
机 械 行 业 标 准
电力变压器试验导则
JB/T 501—1991

★

机械科学研究院出版发行
机械科学研究院印刷
(北京首体南路2号 邮编 100044)

★

开本 880×1230 1/16 印张 X/X 字数 XXX,XXX
19XX 年 XX 月第 X 版 19XX 年 XX 月第 X 印刷
印数 1—XXX 定价 XXX.XX 元
编号 XX—XXX

机械工业标准服务网: <http://www.JB.ac.cn>