

## 中华人民共和国机械行业标准

JB/T 501—2006  
代替JB/T 501—1991

---

### 电力变压器试验导则

Test guide for power transformers

2006-05-06 发布

2006-10-01 实施

---

中华人民共和国国家发展和改革委员会 发布

## 目 次

1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 主要符号 .....	1
4 试验程序 .....	2
5 油箱密封试验（例行试验） .....	3
6 绝缘特性测量（例行试验） .....	4
7 变压器油试验（例行试验） .....	5
8 电压比测量（例行试验） .....	12
9 电压矢量关系校定（例行试验） .....	13
10 绕组电阻测量（例行试验） .....	17
11 绝缘试验（例行、型式、特殊试验） .....	19
12 局部放电测量（例行试验） .....	24
13 空载损耗及空载电流的测量（例行试验） .....	25
14 短路阻抗及负载损耗的测量（例行试验） .....	30
15 有载分接开关试验（例行试验） .....	33
16 温升试验（型式试验） .....	34
17 油箱机械强度试验（型式试验） .....	40
18 声级测定（特殊试验） .....	41
19 三相变压器的零序阻抗测量（特殊试验） .....	41
20 短路承受能力试验（特殊试验） .....	43
21 空载电流谐波测量（特殊试验） .....	45
22 风扇和油泵电机所吸取功率测量（特殊试验） .....	46
图 1 电压比测量原理图 .....	12
图 2 双电压表法试验原理图 .....	15
图 3 引入辅助变压器的联结组标号试验接线图 .....	17
图 4 外施耐压试验原理图 .....	19
图 5 施加对地试验电压的时间顺序 .....	21
图 6 单相变压器的感应耐压试验原理图 .....	22
图 7 分级绝缘变压器单相感应耐压试验（ACSD）的连接方法 .....	23
图 8 Y或D联结三相变压器的逐相试验 .....	23
图 9 长时感应试验施加试验电压的时间顺序 .....	24
图 10 干式变压器局部放电试验的原理接线图 .....	25
图 11 空载损耗及空载电流测量原理图 .....	27
图 12 三柱式铁心示意图 .....	30
图 13 短路阻抗及负载损耗测量接线图 .....	31
图 14 相互负载法原理接线图 .....	35
图 15 循环电流法原理接线图 .....	36
图 16 三相变压器零序法温升试验原理接线图 .....	37

图 17 单相变压器零序法温升试验原理接线图.....	37
图 18 确定切断电源瞬间热电阻和油平均温度的方法.....	39
图 19 三相变压器零序阻抗试验原理接线图.....	42
图 20 三相变压器短路试验线路图.....	44
图 21 电机吸取功率测量原理图.....	46
表 1 绝缘特性测量部位.....	4
表 2 变压器油耐压规定值.....	6
表 3 变压器油含水量规定值.....	8
表 4 变压器油含气量规定值.....	10
表 5 变压器油溶解气体气相色谱分析含量值.....	12
表 6 电压比电桥法联结组标号试验.....	14
表 7 双电压表法测定联结组.....	16
表 8 空气密度 $k_d$ 与因数 $k_\delta$ 的关系 .....	20
表 9 磁滞损耗、涡流损耗与总的铁心损耗之比.....	28
表 10 不同耐热等级绝缘的参考温度.....	32
表 11 YNyn0d11 的试品零序阻抗测量组合.....	42
表 12 YNyn0yn0 的试品零序阻抗测量组合.....	43

## 前 言

本标准代替JB/T 501—1991《电力变压器试验导则》。

本标准与JB/T 501—1991相比主要变化如下：

——编写规则按 GB/T 1.1—2000《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写规则》的规定（见全文）；

——按编写规则要求取消“篇”的编制（1991年版的第一、二、三篇）；

——根据标准内容，对规范性引用文件中的引用标准进行了修订（见第2章）；

——以目前我国变压器试验技术水平和试验方法对原内容进行了修订，增加了试验导则的可操作性（1991年版的第5、6、7、8、9、10、12、13、15、17、19、20、21、22、23章；本版的第5、6、7、8、9、10、13、14、16、17、18、19、20、21、22章）；

——对有些在其相应“试验导则”标准已有规定的试验项目，采取直接引用而不再赘述的原则（见第11、18章）；

——对与现行国家标准的条款规定不一致的内容进行了修订（1991年版的第11、16、18章；本版的第11章）。

本标准由中国机械工业联合会提出。

本标准由全国变压器标准化技术委员会归口。

本标准起草单位：沈阳变压器研究所、保定天威保变电气有限公司、西安西电变压器有限公司、上海市电力公司、中国电力科学研究院。

本标准主要起草人：董慧生、胡振忠、吕建玉、姜益民、范建斌。

本标准于1964年首次发布，1991年第一次修订，本次为第二次修订。

# 电力变压器试验导则

## 1 范围

本标准规定了油浸式和干式电力变压器例行试验、型式试验和特殊试验的程序及方法。  
本标准适用于油浸式和干式电力变压器的试验。  
特种变压器可参照本标准。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

- GB/T 311.6—1983 高电压试验技术 第五部分 测量球隙（eqv IEC 60052: 1960）  
 GB/T 507—1986 绝缘油介电强度测定法（neq IEC 156）  
 GB 1094.1 电力变压器 第1部分：总则（GB 1094.1—1996，eqv IEC 60076-1: 1993）  
 GB 1094.2 电力变压器 第2部分：温升（GB 1094.2—1996，eqv IEC 60076-2: 1993）  
 GB 1094.3 电力变压器 第3部分：绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙（GB 1094.3—2003，eqv IEC 60076-3: 2000）  
 GB 1094.5 电力变压器 第5部分：承受短路的能力（GB 1094.5—2003，eqv IEC 60076-5: 2000）  
 GB/T 1094.10 电力变压器 第10部分：声级测定（GB/T 1094.10—2003，IEC 60076-10: 2001，MOD）  
 GB/T 5654—1985 液体绝缘材料工频相对介电常数、介质损耗因数和体积电阻率的测量（neq IEC 247: 1978）  
 GB 6450 干式电力变压器（GB 6450—1986，eqv IEC 60726: 1982）  
 GB/T 6451—1999 三相油浸式电力变压器技术参数和要求  
 GB/T 7449—1987 电力变压器和电抗器的雷电冲击和操作冲击试验导则（eqv IEC 722: 1987）  
 GB 7597—1987 电力用油（变压器油、汽轮机油）取样方法  
 GB/T 7600—1987 运行中变压器油水分含量测定法（库仑法）  
 GB/T 7601—1987 运行中变压器油水分测定法（气相色谱法）  
 GB/T 10228—1997 干式电力变压器技术参数和要求  
 GB/T 16274—1996 油浸式电力变压器技术参数和要求 500kV级  
 GB/T 16927.1—1997 高电压试验技术 第一部分：一般试验要求（eqv IEC 60060-1: 1989）  
 GB/T 17623—1998 绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定法（neq IEC 567: 1992）  
 DL 423—1991 绝缘油中含气量的测定—真空压差法

## 3 主要符号

- $U_r$ ——额定电压，V；  
 $I_r$ ——额定电流，A；  
 $S_r$ ——额定容量，kVA；  
 $K$ ——电压比；  
 $R$ ——电阻， $\Omega$ ；  
 $T$ ——温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$R_{xg}$ ——相电阻,  $\Omega$ ;  
 $R_{xn}$ ——线电阻,  $\Omega$ ;  
 $K_{\delta}$ ——空气密度修正系数;  
 $K_d$ ——空气密度;  
 $f_r$ ——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;  
 $Z_k$ ——校正到参考温度的短路阻抗, %;  
 $Z_i$ ——短路阻抗,  $\Omega$ ;  
 $P_r$ ——电阻损耗, W;  
 $\theta_p$ ——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,  $\Omega$ 。

#### 4 试验程序

本试验程序并未标准化, 未注明试验类型的试验项目属例行试验。

具体试验项目包括以下内容:

- a) 油箱机械强度试验 (型式试验);
- b) 油箱密封试验;
- c) 绝缘特性测量;
  - 1) 绝缘电阻、吸收比及极化指数测定 (35kV、4 000kVA 及以上和 66kV 及以上应提供绝缘电阻和吸收比, 330kV 及以上应提供绝缘电阻值、吸收比及极化指数; 其它中小型变压器只提供绝缘电阻值);
  - 2) 介质损耗因数测量 (35kV、8 000kVA 及以上和 66kV 及以上)。
- d) 变压器油试验;
  - 1) 介质损耗因数测量;
  - 2) 含气量测定;
  - 3) 含水量测定;
  - 4) 击穿电压测量;
  - 5) 溶解气体气相色谱分析。
- e) 电压比测量;
- f) 电压矢量关系校定;
- g) 绕组电阻测量;
- h) 空载损耗及空载电流测量 (需做 LI 的产品);
- i) 操作冲击试验 (220kV 及以上);
- j) 线端雷电全波冲击试验 (型式试验);  
电压为110kV及以上为例行试验。
- k) 线端雷电截波冲击试验 (型式试验);
  - 1) 中性点端子雷电全波冲击试验 (型式试验);
  - m) 不引出的中性点端子雷电全波冲击试验 (特殊试验)
  - n) 外施耐压试验;
  - o) 空载损耗及空载电流测量 (35kV、8 000kVA及以上和66kV及以上);

p) 感应耐压试验;

注: 不同电压等级产品按GB 1094.3的规定。

q) 局部放电测量;

注: 适用于干式变压器和额定容量10 000kVA、电压等级66kV级及以上油浸式变压器。

r) 空载损耗及空载电流测量;

s) 空载电流谐波测量(特殊试验);

t) 短路阻抗及负载损耗测量;

u) 三相变压器的零序阻抗测量(特殊试验);

v) 有载分接开关操作试验;

注: 有载分接开关操作试验可在试验中穿插进行。

w) 温升试验(型式试验);

x) 声级测定(特殊试验);

y) 风扇电机和油泵所吸取功率测量(特殊试验);

z) 短路承受能力试验(特殊试验);

注: 需做此试验的产品, 试验项目j) ~m) 应在其后进行。

## 5 油箱密封试验(例行试验)

### 5.1 一般要求

油箱密封试验应在装配完毕的产品上进行, 对于可拆卸的储油柜、净油器、散热器或冷却器可单独进行。对于拆卸运输的变压器一般进行两次密封试验, 第一次是在变压器装配完毕, 且装全所有充油组件后进行; 第二次是在变压器拆卸外部组部件、在运输状态下对变压器本体进行的。

### 5.2 试验目的

检测变压器油箱和充油组部件本体及装配部位的密封性能, 防止运行时渗漏油的发生, 以及防止变压器主体在运输时的漏气、漏油或因进水而引起的变压器受潮。

### 5.3 试验方法

#### 5.3.1 试验准备

试验前连接好试验管路、紧固试漏系统的所有紧固件, 在油箱或储油柜顶部安装好压力表, 并擦净油箱及充油组部件的外表面, 以便在试漏过程中观察渗漏油情况。打开注油系统通向变压器及变压器组部件之间连接的所有阀门, 并打开吸湿器连管的盖板(中小型变压器打开储油柜上部放气塞), 向变压器内注入变压器油至规定油面高度。

#### 5.3.2 装全所有充油组部件的密封试验

5.3.2.1 吊罐油柱法: 利用吊罐油柱的静压力来达到要求的试漏压力的方法。

从油箱底部连接好吊罐, 关闭储油柜与油箱间的阀门, 打开吊罐与油箱间的所有阀门, 利用垂直的吊罐油面压力给变压器油箱及组部件施加一个静压力; 吊罐油柱的高度由试漏压力计得出。

5.3.2.2 充气加压法: 利用向储油柜胶囊内或储油柜油面上充入一定压力的干燥气体来达到要求的试漏压力的方法。

将储油柜内油面调整到规定高度, 通过吸湿器联管上安装的充气装置或在储油柜放气塞外装的气门, 向储油柜的胶囊内或储油柜内充入干燥空气或氮气, 通过压力传递向油箱及组部件施加油压; 注意充气速度不要过快, 当压力表指示达到规定值时关闭阀门。

#### 5.3.3 运输前变压器本体的密封试验

5.3.3.1 充油运输变压器: 可采用吊罐油柱法试漏; 也可采用向油箱内油面上部充氮的方法试漏。

5.3.3.2 充氮运输变压器: 可直接通过氮气压力进行试漏; 也可采用吊罐油柱法试漏, 试漏完成后应排油充氮。

具体操作方法见 5.3.2。

### 5.3.4 试漏压力及持续时间

试漏压力及持续时间应符合GB/T 6451或GB/T 16274的规定或用户要求，但最后一次补漏后的试漏时间不得少于试漏规定总时间的1/3，应注意油箱底部所受压力一般不要超过油箱所能承受的压力值。

### 5.4 试验结果的判定

试验过程中要随时检查压力表的压力是否下降，油箱及其充油组部件表面是否渗漏油，重点检查可漏焊缝和密封面的渗漏油情况。如果符合GB/T 6451或GB/T 16274的规定，则判定该变压器密封试验合格。

## 6 绝缘特性测量（例行试验）

### 6.1 测量目的与项目

在变压器制造过程中，绝缘特性测量用来确定绝缘的质量状态，发现生产中可能出现的局部或整体缺陷，并作为产品是否可以绝缘强度试验的一个辅助判断手段；同时向用户提供出厂前的绝缘特性试验数据，用户由此可以对比和判断运输、安装、运行中由于吸潮、老化及其它原因引起的绝缘劣化程度。本试验应包括下列试验项目：

- a) 绝缘电阻、吸收比及极化指数测定；
- b) 介质损耗因数测量。

### 6.2 绝缘电阻、吸收比和极化指数测量

**6.2.1** 电压为35kV、容量为4 000kVA和66kV及以上的变压器应提供绝缘电阻值（R60）和吸收比（R60/R15），电压等级为330kV及以上的变压器应提供绝缘电阻值、吸收比和极化指数（R10min/R1min）；测量时使用5 000V、指示量限不低于100 000MΩ的兆欧表；其它变压器只测量绝缘电阻值，测量时使用2 500V、指示量限不低于10 000MΩ的兆欧表；兆欧表的精确度不应低于1.5%。

**6.2.2** 严格按仪表使用说明书和测量要求，正确选择兆欧表的测量状态、连接仪表端子与被试端，按表1的测量部位逐项进行测量。

绝缘特性测量部位

顺序号	双绕组变压器		三绕组变压器	
	被试绕组	接地部位	被试绕组	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

顺序号4和5的项目，只对16 000kVA及以上的变压器进行。

**6.2.3** 高压测试连接线应尽量保持悬空，必须需要支撑时，要确认支撑物的绝缘状态和距离，以保证测量结果的可靠性。

**6.2.4** 测量绝缘电阻时，首先将兆欧表调整水平，在不连接试品的情况下使兆欧表的电源接通，其表指示应调整到∞，测试连接电缆接入时，兆欧表指示应无明显差异。

**6.2.5** 正确使用兆欧表的三个端子，必须使E端接地、L端接火线、G端屏蔽；测量时，待兆欧表处于额定电压后再接通线路，与此同时开始计时，手动兆欧表的手柄转速要均匀，维持在每分120转左右。

**6.2.6** 试验应在完成总装配之后进行，测试前向温度计座内注入其2/3深度以上的绝缘油（油温为10℃～40℃、相对湿度小于85%）并插入温度计记取顶层油温，当测量温度不同时，按GB/T 6451的规定换算；变压器油箱和铁心接地套管（如果有）应可靠接地，将被试绕组以外的其余绕组的出线端子分别短接后与油箱相连并可靠接地；如果有夹件单独引出接地套管也必须将其引出端子可靠接地。



6.2.7 如果使用的仪表不具备自动放电功能，在每次测量结束后应首先断开兆欧表的高压端，并对地放电，以避免被试绕组向兆欧表放电而损坏仪表。

6.2.8 在空气环境温度及相对湿度较高、外绝缘表面泄露电流严重的情况下，应使用兆欧表的屏蔽端子而使外绝缘表面屏蔽；试验时应记录环境温度。

6.2.9 测量绝缘电阻时应同时准确测量被试品温度，对油浸式变压器在油的温度稳定后（即油箱上下部油温相差很小时），可将顶层油的温度视为试品的温度，否则应取油平均温度为试品温度。

6.2.10 变压器高压、中压及低压绕组应连同其中性点分别连接在一起进行测试，当绕组线端连同其中性点未连接在一起时，通过绕组的电流会影响绝缘电阻值。

6.2.11 当铁心与夹件有单独引出端子至油箱外接地时，应测量铁心与夹件对油箱的绝缘电阻 $R_{1min}$ 。

### 6.3 介质损耗因数测量

6.3.1 试验电源的频率应为额定频率，其偏差不大于 $\pm 5\%$ ；电压波形应为正弦波，测量时应注意非正弦的高次谐波分量对介质损耗因数及电容测量值的影响。

6.3.2 根据试品的电压等级施加相应电压，当试品额定电压为10kV及以上时，取10kV；当试品额定电压低于10kV时，取试品额定电压，并按表1的测量部位逐项进行测量。

6.3.3 测量套管介质损耗因数及电容值时选择测试仪器的“正接法”，测量变压器器身介质损耗因数及电容值时选择测试仪器的“反接法”。

6.3.4 将被试绕组以外的其余绕组与油箱相连并可靠接地；如果铁心和夹件单独引出时也必须将其引出端子可靠接地。

6.3.5 同绝缘电阻测量一样，要十分注意高压连线的支撑物及产品外绝缘污秽、受潮等因素对测量结果带来的较大误差。

6.3.6 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因数；良好绝缘的试品当电压升高时，介质损耗因数不变或略有升高。

6.3.7 在 $10^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 时，介质损耗因数的测试结果应不超过下列规定：

- a) 35kV级及以下的绕组 $20^{\circ}\text{C}$ 时应不大于1.5%；
- b) 66kV级及以上的绕组 $20^{\circ}\text{C}$ 时应不大于0.8%；
- c) 330kV级及以上的绕组 $20^{\circ}\text{C}$ 时应不大于0.5%。

当绕组温度与 $20^{\circ}\text{C}$ 不同时，换算方法按GB/T 6451的规定进行。

## 7 变压器油试验（例行试验）

变压器油的例行试验包括击穿电压测量、介质损耗因数测量、含水量、含气量测定及溶解气体气相色谱分析。

### 7.1 击穿电压测量

#### 7.1.1 试验目的

变压器油的击穿电压是衡量变压器油被水和悬浮杂质污染程度的重要指标；油的击穿电压越低，变压器的整体绝缘性能越差，直接影响变压器的安全运行；因此必须严格测试，并将变压器油击穿电压控制在不同范围内。

#### 7.1.2 试验方法

变压器油击穿电压测量的试验方法按GB/T 507的规定进行。

#### 7.1.3 试验仪器

本导则推荐使用全自动击穿电压测试仪—油试验器，整套仪器应满足以下条件：

- a) 油杯：用透明玻璃或塑料制成，有效容积在300mL~500mL之间，并带有封盖；
- b) 电极：由黄铜或不锈钢磨制而成，形状可以是球形或球盖形（蘑菇形），几何尺寸应满足GB/T507的规定，电极距离为2.5mm；
- c) 调压装置：采用自动升压系统，可采用自耦式调压器或电阻分压器；

- d) 变压器：采用低压侧电源为 50Hz 的升压变压器；高压侧输出电压波形应为近似正弦波，峰值因数应在  $\sqrt{2}$  ( $1 \pm 5\%$ ) 范围内，升压速度控制在 2kV/s，并且当电压大于 15kV 时，变压器的最小短路电流应大于 20mA；
- e) 保护装置：包括和试验电极串联的限流电阻和接在初级线路上的断路器，断路器应在试样击穿后 0.02s 内受击穿电流作用而动作，以保护试验设备；
- f) 其它部分：仪器应有自动搅拌器、安全防尘罩，最好具有自动显示和记录击穿电压值、计算平均值和规定值偏差、打印试验结果的功能。

#### 7.1.4 试品取样

试品按 GB 7597 规定的方法取样。

#### 7.1.5 试验过程

试验过程按如下要求：

- a) 熟悉仪器使用说明书，并按要求连接试验仪器并调试正常，并经计量部门检定合格；
- b) 首次使用时应拆卸电极，用清洗剂彻底清洗电极和油杯，再用蒸馏水清洗几遍，用电吹风彻底吹干；安装电极时要用标准规调整电极间隙到 2.5mm；正常使用情况下不必每次拆洗电极；
- c) 将平衡到室温的试油倒入油杯，并洗刷两次，最后倒入油杯的试油油面超过电极 40mm 为宜；
- d) 盖上安全防尘罩、选定标准值、按“开始”键，仪器自动开始测试；每测试完一次，仪器打印一次击穿电压值；在测试完六次后，仪器打印出六次击穿电压的平均值和标准值偏差。

#### 7.1.6 注意事项

注意事项按如下要求：

- a) 先要检测交流电源，在保证仪器要求的情况下才能接通电源；
- b) 仪器外壳和接地点应可靠接地；
- c) 油杯和电极清洗后，严禁用手或不洁净物接触；
- d) 油杯较长时间未用或测得击穿电压值过低（低于 10kV）时，应按 7.1.5 b) 要求重新清洗；
- e) 环境相对湿度不得大于 75%；
- f) 确认仪器检定有效期，标准规也应定期检定，其厚度应保证在  $(2.5 \pm 0.1)$  mm 之内；
- g) 样品和规定值偏差大于 10% 时应引起注意，最好重复取样做平行试验，以便证实是否是由操作不当所引起。

#### 7.1.7 结果的判定

7.1.7.1 在合同没有规定时，试验结果的判定按表 2。

变压器油耐压规定值

电 压 等 级 kV	击 穿 电 压 kV
≤35	≥35
66~220	≥40
330	≥50
500	≥60

7.1.7.2 在合同有特殊规定时，按合同规定判定是否合格。

### 7.2 介质损耗因数测量

#### 7.2.1 试验目的

变压器油介质损耗因数是衡量变压器油本身绝缘性能和被杂质污染程度的重要参数；油的损耗因数越大，变压器的整体介质损耗因数也就越大，绝缘电阻相应降低，油纸绝缘的寿命也会缩短；因此必须严格测试以便将油的介质损耗因数控制在较低范围内。

#### 7.2.2 试验方法

变压器油介质损耗因数试验方法按 GB/T 5654 的规定进行。

### 7.2.3 试验仪器

变压器油介质损耗因数测量试验一般采用电桥及配套装置或介损仪进行测量。

注：本导则推荐采用瑞士Tettex2821电桥及配套装置、奥地利BRVR DTL自动介损仪和国产同类电桥及配套装置，也可采用其它与上述性能相当的同类仪器。

具体要求如下：

- a) 主机：具有分辨率为  $10^{-5}$  的交流（工频）电桥；
- b) 电极杯：采用零件易于拆卸和清洗、重新装配后空杯电容量不易改变的三端电极杯；
- c) 恒温加热装置：应能保持温度在规定值  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  以内。

### 7.2.4 试品取样

试品按GB 7597规定的方法取样。

### 7.2.5 试验过程

试验过程按如下要求：

- a) 熟悉仪器使用说明书，并按要求连接试验仪器并调试正常，并经计量部门检定合格；
- b) 完全拆卸电极杯，先用丙酮、后用洗涤剂彻底清洗，再用蒸馏水清洗几遍，并放到蒸馏水中煮沸 1h；然后放在鼓风干燥箱里干燥 1h~2h 后，再重新装配电极；
- c) 测量空杯介损应接近零、电容量应在规定值范围内；
- d) 用试油洗刷两次油杯，正式测试时按规定量（一般 40mL~45mL）倒入试油；
- e) 接通恒温控制装置，给试油加温至规定温度，按规定施加电压、测试；测试过程不宜超过 10min。
- f) 如使用自动介损测量仪，设置完参数按“开始”键即可自动完成测试过程。

对于新仪器，a)、b)、c) 必须实施，而在正常使用情况下，可不必每次都实施。

### 7.2.6 注意事项

注意事项按如下要求：

- a) 先检测交流电源，在保证仪器要求的情况下才能接通电源；
- b) 仪器外壳和接地点应可靠接地；
- c) 确认仪器检定的有效期限；
- d) 自动介损测量仪电源不宜接在磁饱和稳压电源上；
- e) 油杯清洗后严禁用手或不洁净物接触电极；
- f) 油杯使用时间较长或受到严重污染（介损值超过 10%）后应按 7.2.5 b)、c) 清洗和测量空杯介损；
- g) 测试下一个油样时，如果上次油样结果大于此油样对应的合格值；油杯应用介损值较低的油洗刷几次后，再用试油洗两次；
- h) 装、倒试油时，内电极不宜接触任何物体。

### 7.2.7 结果的判定

7.2.7.1 测量同一油样时，两次测试值之差不应大于 0.000 1 加上两个值中较大一个的 25%；如果不能满足上述重复性要求应继续测量油样，直到满足要求，此时测量结果才能视为有效；取两次有效测量中较小的一个值作为油样的介质损耗因数。

7.2.7.2 合同没有规定时，变压器油介质损耗因数（90℃）规定值：330kV级及以下产品，应小于 0.010；500kV级产品，应小于 0.007。

7.2.7.3 合同有规定时，按合同规定判定是否合格。

## 7.3 含水量测定

### 7.3.1 试验目的

水分影响油纸绝缘性能、加快油纸绝缘老化速度，为了将变压器油中含水量控制到较低范围，必须在注油前后对油中含水量进行测定；一般 66kV 级及以上产品进行此项试验。

### 7.3.2 试验方法

变压器油含水量测定方法按GB/T 7600或GB/T 7601的规定进行。

### 7.3.3 试验仪器

试验仪器按如下要求：

a) 试验仪器应是以库仑法为基础、用卡尔·费休试剂作电解液的微量水分测试仪；

注：本导则推荐采用日本CA系列的AQ-6型、MKC-3P和MKA-3P型、美国VA-02型及国产WS-1~WS-5型微量水分测试仪，也可采用其它与上述性能相当的同类仪器。

b) 电解液最好分为阴极液和阳极液两种；

c) 应定期用纯水或标准水分含量试剂校验仪器的准确性；

d) 其它试验器材有：至少准备1支2mL或5mL和100mL注射器用于取样，还要常备一个电吹风用于干燥电解池；

### 7.3.4 试品取样

试品按GB 7597规定的方法取样。

### 7.3.5 试验过程

试验过程按如下要求：

a) 按说明书要求接通微量水分测试仪的电源及设置仪器参数；

b) 若电解液发生过碘现象，可以注入适量的含水甲醇或纯水予以消除；

c) 仪器稳定后，通过抽取100mL注射器中的油样3次~5次将2mL或5mL注射器清洗干净，然后正式向仪器电解池中进样；进样量依油中含水量大小来定，仪器说明书有规定的按其规定进行，无规定的一般一次所进试样中的水分含量不得高于10 $\mu$ L/L。

### 7.3.6 注意事项

注意事项按如下要求：

a) 在进样前应将进样口处及针头擦拭干净，不得用手接触上述位置；

b) 进样应迅速、利落；

c) 环境湿度越高操作越应谨慎；夏季试验场地的相对湿度一般不应高于85%；

d) 每次更换电解液时，应用石油醚、无水乙醇将电解池彻底清洗并用电吹风吹干。

### 7.3.7 结果的判定

7.3.7.1 取测试数据中相互差值不大于1 $\mu$ L/L的3个数据的平均值作为试验结果。

7.3.7.2 在合同没有规定时，试验结果的判定按表3。

变压器油含水量规定值

电压等级 kV	含水量 $\mu$ L/L
$\leq 110$	$\leq 20$
220	$\leq 15$
$\geq 330$	$\leq 10$

7.3.7.3 在合同有规定时，按合同规定判定是否合格。

## 7.4 含气量测定

### 7.4.1 试验目的

变压器油溶解空气的能力很强，当空气含量过高时，在注油和运行中易在油中形成气泡，导致局部放电；即使溶解的空气不产生气泡，其中的氧气也会加速油纸绝缘老化；因此变压器油中的含气量应控制在较低的范围；一般330kV级及以上产品进行此项试验。

### 7.4.2 试验方法

本导则推荐采用两种含气量测定方法，一种为真空压差法，其方法按DL 423的规定；另一种为机械振荡法，其不是标准测定方法。

#### 7.4.2.1 真空压差法

真空压差法按如下要求:

a) 试验仪器是以真空压差法为基础的气体含量测定仪, 另外至少准备一支 100mL 玻璃针管用于取样;

本导则推荐采用国产GCD-II型绝缘油含气量测定仪, 也可采用由上述仪器改造的、用真空表代替U形压差计的仪器。

b) 仪器出厂前应由制造单位精确标定, 并将标定端口封死, 故仪器在使用中如未发生玻璃件的整修, 则不需要再标定;

c) 试品按 GB 7597 规定的方法取样;

d) 试验过程如下:

1) 对脱气室抽真空, 当真空度低于 13.33Pa 时, 切断与真空泵的通路, 保持 15min, 确认真空度无变化;

2) 以样品油 30mL~50mL 冲洗脱气室内管壁后, 排除清洗油, 对于首次使用的仪器此步必不可少, 否则正式进样的体积会受到一定影响;

3) 使油样从喷嘴中成单滴(约每秒一滴)滴入脱气室, 注入油样的多少, 视油中含气量的高低而定; 若油中含气量高, 注入油样可以少些, 但最少不得低于 20mL; 待稳定 3min 后准确读出脱气室中的油量 (mL) 和 U 型压差计中的压差 P (mm); 根据标准或仪器说明书中给出的公式计算出油中含气量。

#### 7.4.2.2 机械振荡法

机械振荡法按如下要求:

a) 试验仪器主要为自动脱气振荡仪, 另需准备 100mL 玻璃针管若干支、5mL 玻璃针管至少两支;

b) 本方法虽然方便快捷、简单易行, 但若不对所有针管的体积进行检定就会明显影响测量精确度, 因此应用称重法对针管表观体积进行校正;

c) 试品按 GB 7597 规定的方法取样;

d) 试验过程如下:

1) 排除 100mL 玻璃针管中多余的油样, 剩 30mL;

2) 用 5mL 玻璃针管抽取 5mL 空气注入装有试油的针管内, 把此针管放入恒温 50℃ 的振荡仪中振荡 20min, 再静放 10min;

3) 取出装有试油的针管, 冷却至室温;

4) 用 5mL 玻璃针管取出剩余的气体, 记下体积 V;

5) 记录当时的室温 t 和大气压力 P。

e) 计算如下:

根据以下公式计算试油中的含气量:

$$X = 11.5 - \frac{V_g}{V_o} \times 100$$

$$V_g = (5 - V) \times \frac{P \times T_o}{P_o \times T}$$

$$V_o = 30.0 \times (1 - 0.0008 \times t)$$

式中:

X 一试油在标准状态下的气体百分含量, %;

$V_g$  一试油在室温饱和状态下所吸收的空气换算成标准状态下的体积, mL;

$V_o$  一在室温 t、压力 P 下 30mL 试油换算成标准状态下的体积, mL;

V 一试油在室温下、5mL 空气中吸收饱和后的残气体积, mL;

- $P$  —试验时的大气压力, kPa;  
 $T_0$  —标准状态时的绝对温度, 273.2K;  
 $P_0$  —标准状态时的大气压力, 101.3kPa;  
 $T$  —试验时的绝对温度,  $(t+273.2)$  K;  
 $t$  —试验时的室温, °C;  
 11.5—变压器油在标准状态下的饱和含气量, %;  
 0.000 8—变压器油的热膨胀系数,  $1/^\circ\text{C}$ 。

#### 7.4.3 注意事项

注意事项按如下要求:

- 严格按取样方法取样, 尤其注意试样不能接触空气;
- 经常检查玻璃针管、特别是 100mL 针管密封情况;
- 在确信待测试样在标准状况下饱和含气量不是 11.5%时, 应慎用机械振荡法; 或以试油的真实饱和含气量代替 11.5%进行计算。

#### 7.4.4 结果的判定

7.4.4.1 取两次平行试验结果的算术平均值为测定结果, 两次测定值之差应小于平均值的10%。

7.4.4.2 在合同没有规定时, 试验结果的合格判定见表4。

变压器油含气量规定值

电 压 等 级 kV	含 气 量 %
330	≤1
500	

7.4.4.3 在合同有规定时, 按合同规定判定是否合格。

### 7.5 溶解气体气相色谱分析

#### 7.5.1 试验目的

变压器油中溶解的和气体继电器中收集的一氧化碳、二氧化碳、氢气、甲烷、乙烷、乙烯、乙炔等气体的含量, 间接地反映了充油设备(变压器、互感器、电抗器、套管等)本身的实际情况, 通过对这些组分的变化情况进行分析, 就可以判断设备在试验或运行过程中的状态变化情况, 并对判断和排除故障提供依据; 一般220kV级及以上产品进行此项试验。

#### 7.5.2 试验方法

根据对变压器油中溶解气体进行脱气的方式不同, 在实际工作中所使用方法分为两种; 但都是先采集充油设备中的油样, 然后脱出油样中的气体, 再用气相色谱仪进行分离、检测, 最后对谱图数据进行处理, 计算出各组分的浓度; 具体试验方法按GB/T 17623的规定。

##### 7.5.2.1 机械振荡法(溶解平衡法)

机械振荡法按如下要求:

- 脱气过程: 一般用 40mL 油样注入 5mL 氮气, 然后在 50°C 下进行恒温定时振荡, 振荡 20min、静放 10min 即可达到平衡; 取出气样, 记下体积值(精确到 0.1mL);
- 分离、检测气样: 用 1mL 玻璃针管取出 1mL 气样, 立即注入色谱仪、输入脱出气样体积值, 色谱仪进行分离、检测, 色谱工作站随之记录谱图、读取峰高或峰面积值, 并自动计算出油中溶解气体各组分的浓度。

##### 7.5.2.2 真空脱气法(变径活塞泵全脱气法)

真空脱气法按如下要求:

- 脱气过程: 变径活塞脱气装置由变径活塞泵、脱气室、磁力搅拌器和真空泵、集气室等组成; 先由真空泵对脱气室抽真空, 将 20mL 变压器油注入脱气室, 装置自动进行多次脱气、集气, 使气样合并、并收集到集气室内, 最后排出油样; 记下油样和气样的体积(精确到 0.1mL);

b) 分离、检测气样：同 7.5.2.1 b)。

### 7.5.2.3 气态样品中各组分浓度的测试

主要是针对从气体继电器中取出的气样进行测试分析；取 1mL 气样注入色谱仪进行测试，得出峰面积或峰高值，直接计算出结果。

### 7.5.3 试验仪器

试验仪器按如下要求：

- a) 色谱仪应具备热导鉴定器、氢焰离子化鉴定器及镍触媒转化器，建议使用单次进样自动阀切换控制双柱分离的气路流程，便于自动控制；色谱柱对所测组分的分离度要满足定量分析的要求；测试过程中，色谱仪基线要平稳；色谱仪对各种溶解气体的最小检测浓度 ( $\mu\text{L/L}$ ) 为：氢气 2、烃类 0.1、一氧化碳 5、二氧化碳 10。
- b) 色谱工作站要求结构简单、运行稳定；可针对不同的样品状态和脱气方式分别进行处理，通常只需输入试验参数就可直接计算出结果，并保存、打印结果及谱图；
- c) 载气或反应气可用压缩气瓶或气体发生器作为气源，要求达到足够的纯度，氮气（或氩气）、氢气纯度不低于 99.99%、空气应纯净无油。

### 7.5.4 试品取样

试品按 GB 7597 规定的方法取样。

### 7.5.5 仪器的标定

仪器的标定按如下要求：

- a) 每次试验前均应采用外标法对仪器进行标定；
- b) 在仪器稳定的状态下，用 1mL 玻璃针管取 1mL 含待测组分各已知浓度的标准混合气注入色谱仪，色谱工作站自动读取并记录色谱图的峰高或峰面积值；
- c) 标定的条件和试验的条件应相同，仪器工作要稳定，至少标定两次，且其重复性应在其平均值的  $\pm 2\%$  以内；
- d) 仪器参数设定要以满足试验的要求为先决条件，根据仪器性能分别设定。

### 7.5.6 注意事项

注意事项按如下要求：

- a) 应根据待测油样中所溶解的气体组分含量的高低选用标气中各组分的浓度，对于例行试验和投运试验，因其各组分含量较低，宜选用低浓度的标气；对于运行中的设备，因气体含量较高，宜选用高浓度的标气；
- b) 仪器标定和样品分析应使用同一进样注射器，保证进样体积相同；
- c) 标气应在有效期内使用，禁止超期使用；
- d) 取样时针管内的空气要排净，针芯可自由滑动、不卡涩；
- e) 胶头内的空气亦应排净；
- f) 对于真空脱气装置，要定期对它的气密性进行测试，保证脱气完全；
- g) 气样应尽快地测试，防止泄露，保存期应短于油样；
- h) 对结果进行判定时，应考虑到各种可能对结果产生干扰的因素（如电焊、油样被污染等原因），防止误判；
- i) 应对所有针管体积进行标定，以减小误差。

### 7.5.7 结果的判定

对出厂和新投运的产品，各种气体组分的含量应满足表 5 的规定，并且在产品绝缘耐受电压试验、局放试验、温升试验及空载运行试验前后各组分不能有明显升高。





8.3 电压比测量中计算的比值应按各分接的铭牌电压计算，当电压百分数或对应匝数与铭牌电压无差异时，可按电压百分数或匝数计算的比值。

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

8.5 三绕组变压器至少在包括第一对绕组在内的两对绕组上分别进行电压比测量。

8.6 绝缘装配后的半成品电压比测量，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测量应分别对各分接进行电压比测量，如果可能还应验证联结组及电压矢量关系是否正确。

8.8 电压比测量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：

a) 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。

b) 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：

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。

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：

——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（注意高压绕组端有较高的感应电压），如果故障相与正常相相同，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；

——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；

——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。

c) 装配后的电压比测量，如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：

$$U_A = U_{AB} + U_{CA} - U_{BC}$$

$$U_B = U_{BC} + U_{AB} - U_{CA}$$

$$U_C = U_{CA} + U_{BC} - U_{AB}$$

式中：

$U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$  —各相内部所处分接电压的百分数；

$U_{AB}$ 、 $U_{BC}$ 、 $U_{CA}$ —各双相实测分接电压的百分数。

## 9 电压矢量关系校定（例行试验）

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、检查绕组间电压矢量关系有多种方法，现推荐目前常用的三种。

### 9.1 电压比电桥法

这种方法是目前较常用而简便的方法；电桥本身有常见的联结组标号（0、6、11、5）的接收回路，在进行电压比测量的同时，也验证了联结组标号、检查了绕组电压的矢量关系；对于电压比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 1094.1中所规定的各种联结组标号产品的试验；具体方法见表6。

表 6 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
Yd1	A—C <sub>q</sub> a—c <sub>q</sub> B—B <sub>q</sub> b—b <sub>q</sub>	11
Dy1	C—A <sub>q</sub> c—a <sub>q</sub>	
Yy2	A—A <sub>q</sub> a—c <sub>q</sub> B—B <sub>q</sub> b—a <sub>q</sub>	6
Dd2	C—C <sub>q</sub> c—b <sub>q</sub>	
Yd3	A—A <sub>q</sub> a—b <sub>q</sub> B—B <sub>q</sub> b—c <sub>q</sub>	11
Dy3	C—C <sub>q</sub> c—a <sub>q</sub>	
Yy4	A—A <sub>q</sub> a—b <sub>q</sub> B—B <sub>q</sub> b—c <sub>q</sub>	0
Dd4	C—C <sub>q</sub> c—a <sub>q</sub>	
Yd5	A—A <sub>q</sub> a—a <sub>q</sub> B—B <sub>q</sub> b—b <sub>q</sub>	5
Dy5	C—C <sub>q</sub> c—c <sub>q</sub>	
Dd6	A—A <sub>q</sub> a—a <sub>q</sub> B—B <sub>q</sub> b—b <sub>q</sub>	6
Yy6	C—C <sub>q</sub> c—c <sub>q</sub>	
Yd7	A—C <sub>q</sub> a—c <sub>q</sub> B—B <sub>q</sub> b—b <sub>q</sub>	5
Dy7	C—A <sub>q</sub> c—a <sub>q</sub>	
Yy8	A—A <sub>q</sub> a—c <sub>q</sub> B—B <sub>q</sub> b—a <sub>q</sub>	0
Dd8	C—C <sub>q</sub> c—b <sub>q</sub>	
Yd9	A—A <sub>q</sub> a—b <sub>q</sub> B—B <sub>q</sub> b—c <sub>q</sub>	5
Dy9	C—C <sub>q</sub> c—a <sub>q</sub>	
Yy10	A—A <sub>q</sub> a—b <sub>q</sub> B—B <sub>q</sub> b—c <sub>q</sub>	6
Dd10	C—C <sub>q</sub> c—a <sub>q</sub>	
Yd11	A—A <sub>q</sub> a—a <sub>q</sub> B—B <sub>q</sub> b—b <sub>q</sub>	11
Dy11	C—C <sub>q</sub> c—c <sub>q</sub>	
Yy0	A—A <sub>q</sub> a—a <sub>q</sub> B—B <sub>q</sub> b—b <sub>q</sub>	0
Dd0	C—C <sub>q</sub> c—c <sub>q</sub>	
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 <sub>q</sub> 、B <sub>q</sub> 、C <sub>q</sub> 分别表示电桥高压侧的端子，a <sub>q</sub> 、b <sub>q</sub> 、c <sub>q</sub> 分别表示电桥低压侧的端子。		

## 9.2 双电压表法

当电压比测量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。

9.2.1 采用双电压表法试验时，单相按照图 2 (a)、三相按照图 2 (b) 接线。

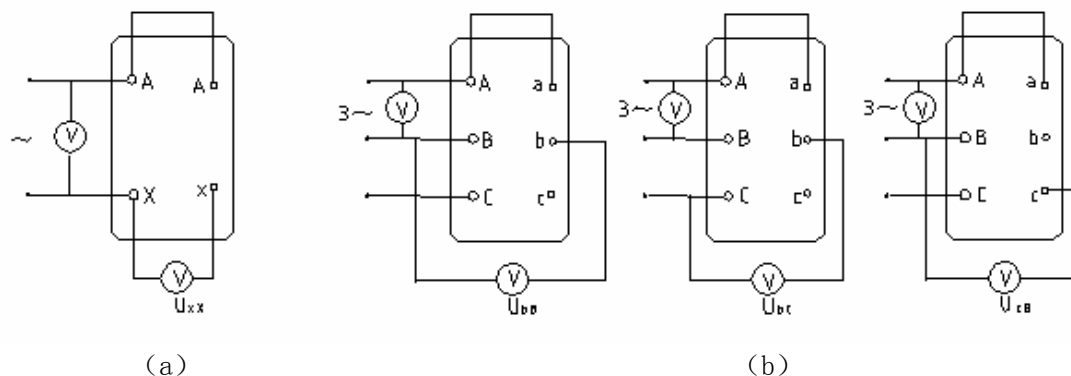


图 2 双电压表法试验原理图

首先连接A—*a*，然后在试品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）。

将测得的各电压值（X—*x*或B—*b*、C—*b*和B—*c*）和表7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第1栏中的标号。

电压计算如下：

$$L = U_{2r} \sqrt{1 + K + K^2}$$

$$P = U_{2r} \sqrt{1 + K^2}$$

$$R = U_{2r} \sqrt{1 + \sqrt{3}K + K^2}$$

$$M = U_{2r} (K - 1)$$

$$N = U_{2r} \sqrt{1 - K + K^2}$$

$$Q = U_{2r} \sqrt{1 - \sqrt{3}K + K^2}$$

$$T = U_{2r} (1 + K)$$

式中：

$L$ 、 $P$ 、 $R$ 、 $M$ 、 $N$ 、 $Q$ 、 $T$ —各相应电压计算值（表7中第5栏）；

$U_{2r}$ —试验时低压的线电压；

$K$ —试品的额定电压比。

表 7 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	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-R	173	145	132	120	115	111	109	108	107	106	105	104	103.5	103	102.5	102	
3	90	P	b-R	141	120	112	105	103	102	101	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	90	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	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	107.5	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	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	270	P	b-B	141	120	112	105	103	102	101	101	101	100.5	100.5	100.5	100	100	100	100	
		R	b-C	193	161	146	130	122	118	115	113	111	109.5	107.5	106.5	106	105	104	103	
		Q	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	b-B	100	88	87	88	90	92	93	94	95	95	96	96.5	97	97.5	98	98.5	
		L	b-C	173	145	132	120	115	111	109	108	107	106	105	104	103.5	103	102.5	102	
		M	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	b-B	52	54	62	73	79	83	86	88	90	91	92.5	93.5	94.5	95.5	96	97	
		P	b-C	141	120	112	105	103	102	101	101	101	101	100.5	100.5	100.5	100	100	100	100
		Q	c-B	52	54	62	73	79	83	86	88	90	91	92.5	93.5	94.5	95.5	96	97	

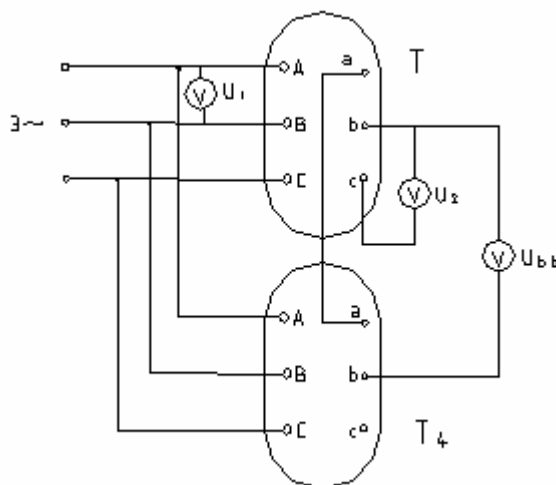
9.2.2 如果被试变压器的电压比超过 30 倍时,各电压值的区别很小;可采用一台辅助变压器,其联结组标号为Yy0 或II0,按照图 3 连接;此时应以辅助变压器的同名线端代替被试变压器的高压端(如图

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:

$$K_1 = K / K_a$$

式中:

$K_a$ —辅助变压器的电压比。



T—试品 T<sub>1</sub>—辅助变压器 (Yy0)

图 3 引入辅助变压器的联结组标号试验接线图

### 9.3 测试仪法

测试仪法是一种自动化程度高、测量准确、功能齐全的目前采用的较为常见方法。

9.3.1 测试仪是以微处理器为核心对整机进行控制, 可实现自动加压、测试、计算和显示等功能; 可自动对产品进行绕组电压矢量关系及联结组标号的识别检定, 并能进行电压比测量。

9.3.2 接线方法: 三相变压器的高压侧 A、B、C、0 分别接 H 插座的黄、绿、红、黑四个夹子, 低压侧对应接 L 插座的四个夹子; 单相变压器高压侧与低压侧都接黄色和黑色夹子, 其它夹子悬空; 具体的操作方法见相应测试仪的使用说明书。

注: 高、低压侧应正确对应接线, 切不可接反。

## 10 绕组电阻测量 (例行试验)

绕组电阻测量是检查线圈内部导线、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量; 三相变压器绕组为 Y 联结无中性点引出时, 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 AO、BO、CO; 但对中性点引线电阻所占比重较大的 yn 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 ao。绕组为 D 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量其线电阻。

10.2 带有分接的绕组, 应在所有分接下测量其绕组电阻。有载调压变压器如有正、反励磁开关 (极性选择器) 时, 应在一个方向上测量所有分接的绕组电阻, 在另一个方向上可以只测量 1~2 个分接。测量绕组电阻时, 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 绕组电阻测量时, 必须准确记录绕组温度; 变压器引线装配完工后测量绕组电阻时, 器身不应停放在空气流动较快和周围空气温度变化较大的场所, 此时记录环境温度; 总装配完工后, 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; 对于油浸式变压器, 在油温度已经稳定后, 向被

试变压器温度计座内注入至少 2/3 深度以上的变压器油，并插入温度计；此时可将油顶层温度作为绕组温度，对于大型变压器应取油平均温度作为绕组温度。

10.4 根据产品技术数据中绕组电阻计算值，合理选择直流电阻测试仪或专用电桥（精确度应不低于 0.2 级）；其要求如下：

- a) 检查仪器，根据仪器使用说明书和绕组电阻大小选择直流电阻测试仪的测试电流。
- b) 各绕组引出端子必须全部处于开路状态；如有开口三角形联结的绕组应将其开路处不得连接。
- c) 测量带有分接的变压器绕组电阻时，有载调压变压器不须切断测量电路，只须重新启动仪器。
- d) 对无励磁调压变压器在变换分接位置时，必须切断电源；对于 D/D 联结的变压器，可以逐相变换分接而不切断电源。
- e) 当被试品为容量较大的五柱变压器且低压为 D 接时，直流电阻测量应采用助磁法，以缩短测量时间；试验后，应注意消磁。
- f) 测量时一定要等待绕组自感效应影响降至最小程度，再读取数据，否则将会造成较大的误差。
- g) 每次测量完毕，必须对测量回路彻底放电并加以确认后，才可进行下一步操作。

10.5 电阻的换算：三相电阻的不平衡率是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；三相电阻的不平衡率应符合 GB/T 6451、GB/T 16274 或 GB/T 10228 的规定。

当三相线电阻的不平衡率小于 1% 时，线电阻与相电阻的换算按下式进行：

$$\text{Y形联结} \quad R_{xg} = R_{xn} / 2$$

$$\text{D形联结} \quad R_{xg} = 1.5R_{xn}$$

当三相线电阻的不平衡率大于 1% 时，线电阻与相电阻的换算按下式进行：

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

$$R_b = (R_{ab} + R_{bc} - R_{ac}) / 2$$

$$R_c = (R_{bc} + R_{ac} - R_{ab}) / 2$$

$$\text{D形联结 (a-y、b-z、c-x)} \quad R_a = (R_{ac} - R_p) - \frac{R_{ab} \times R_{bc}}{R_{ac} - R_p}$$

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

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

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

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；

$R_{xg}$ —三相的相电阻；

$R_{xn}$ —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：

$$R_{\theta} = K_t \times R_t$$

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

式中：

$K_t$ —电阻温度换算系数；

$R_{\theta}$ 、 $R_t$ —温度为  $\theta^{\circ}\text{C}$ 、 $t^{\circ}\text{C}$  时的电阻；

$T$ —系数，铜绕组为235、铝绕组为225。

## 11 绝缘试验（例行、型式、特殊试验）

### 11.1 概述

对变压器的绝缘要求是用各种绝缘试验来验证的；绝缘试验必须在绝缘特性测量、电压比测量、油耐压试验的结果得到确认并满足标准规定后方可进行。如无其它特殊规定，试验应按下述顺序进行：

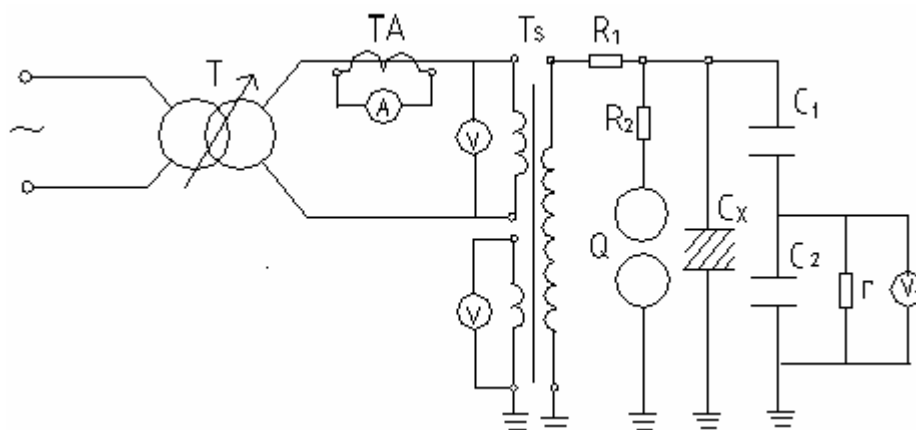
- 线端的操作冲击试验（SI）（见 11.2）；
- 线端的雷电全波和截波冲击试验（LI 和 LIC）（见 11.2）；
- 中性点端子的雷电冲击试验（LI）（见 11.2）；
- 外施耐压试验（见 11.3）；
- 感应耐压试验（见 11.4、11.6）；
- 长时感应电压试验（ACLD）（见 11.5）。

### 11.2 操作冲击和雷电冲击试验

操作冲击和雷电冲击试验按 GB/T 1094.4 的规定进行。

### 11.3 外施耐压试验（例行试验）

11.3.1 本试验用来验证线端和中性点端子及它们所连接绕组对地及其它绕组的外施耐受强度；其原理线路见图 4。



T—调压器 A—电流表  $T_s$ —试验变压器 TA—电流互感器 V—电压表  $V_p$ —峰值电压表

$R_1$ —保护电阻  $R_2$ —阻尼电阻  $r$ —放电电阻 Q—球隙  $C_x$ —试品  $C_1$ —电容分压器主电容  $C_2$ —分压电容

图 4 外施耐压试验原理图

11.3.2 外施耐压时，被试产品铁心及外壳必须可靠接地；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，对低压接线盒、手孔盖板、升高座等所有凸起部分均需放气，直到油溢出为止；应将试品的被试绕组所有端子连接并引至试验变压器高压线端，非被试绕组所有端子连接并可靠接地。

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

值的5%)。

11.3.4 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。

11.3.5 试验应从不大于规定试验值的1/3的电压开始，并与测量相配合尽快地增加到试验值，维持其电压恒定，持续60s；试验完了，应将电压迅速降低到试验值的1/3以下，然后切断电源。

11.3.6 应测量电压的峰值，试验电压值应是测量电压的峰值除以 $\sqrt{2}$ 。

11.3.7 试验电压的测量，应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，也可采用球隙测量。

11.3.8 使用球隙测量时，应按GB/T 311.6的规定，并注意以下各项：

- a) 球隙阻尼电阻在频率50Hz时通常可按 $1\Omega/V$ 选用，150Hz~200Hz时可按 $0.5\Omega/V$ 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，在预放电电压10%以前升压速度不限，以后的升压速度要求均匀，约每秒上升电压预计为放电电压的2%；
- d) 在每次测量中，要取三次放电电压的平均值；每次放电间隔不小于1min，且每次放电电压与平均值差不得大于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预放电；
- f) 球隙的距离不能超过0.5倍球的直径；
- g) 空气密度 $k_a$ 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不同，因此对空气密度应进行校正。其方法按GB/T 16927.1的有关规定。

当 $k_a$ 与1相差较大时（即 $k_a < 0.95$ 或 $k_a > 1.05$ 时），应用 $k_s$ 代替 $k_a$ ，见表8。

表8 空气密度 $k_a$ 与因数 $k_s$ 的关系

$k_a$	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15
$k_s$	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/T 311.6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：

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

式中：

$S_y$ —试验电压 $U_y$ 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 $U_y$ 最接近的一个电压（ $U_1$ 或 $U_2$ ）；

$S$ —与 $U$ 相对应的球隙距离（ $S_1$ 或 $S_2$ ）。

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

11.3.10 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。

#### 11.4 短时感应耐压试验（ACSD）

##### 11.4.1 概述



本试验是用来验证油浸式变压器试品每个线端和它们连接的绕组对地及对其它绕组的耐受电压强度以及相间和被试绕组纵绝缘的耐受电压强度；该试验应在外施耐压试验之后进行。

本试验通常在一个绕组的端子上施加尽可能接近正弦波的交流电压，试验频率应适当大于额定频率；除非另有规定，当试验电压频率等于或小于2倍额定频率时，全电压的试验时间应为60s；当试验频率超过两倍额定频率时，试验持续时间 $t$ 按下式计算：

$$t = 120 \times \frac{f_r}{f}$$

式中：

$t$  — 试验时间，s；

$f_r$  — 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。

试验电压值应是测量电压的峰值除于 $\sqrt{2}$ ，具体按GB 1094.3或技术条件的规定。

#### 11.4.2 高压绕组为全绝缘的变压器的 ACSD 试验

相对地试验以外施耐压方式进行；相间试验对三相变压器应施加对称三相电源，在变压器不带分接绕组的试验电压尽可能接近2倍额定电压，但不应超过GB 1094.3规定的感应耐受电压；试验期间变压器Y联结绕组的中性点端子接地，避免电位悬浮。

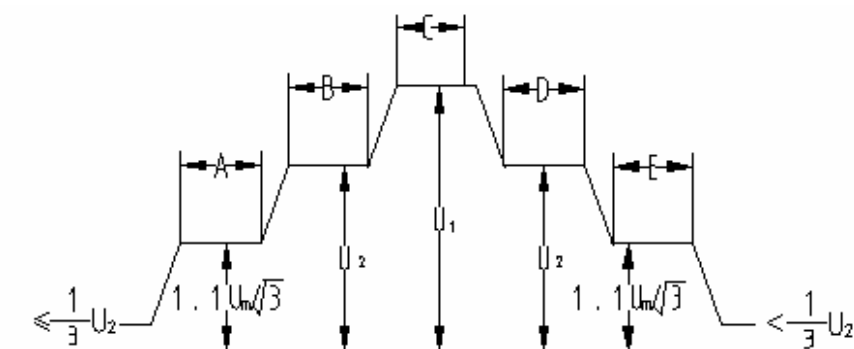
##### 11.4.2.1 $U_m \leq 72.5\text{kV}$ 且额定容量小于 10 000kVA的变压器

ACSD试验中一般不进行局部放电测量；试验应从不大于规定试验电压值的1/3电压开始，并与测量相配合尽快地增加到试验值。试验完应将电压迅速降低到试验电压的1/3以下，然后切断电源。

如果试验电压不出现突然下降，电流指示不摆动，没有放电声，则试验合格。

##### 11.4.2.2 $U_m = 72.5\text{kV}$ 且额定容量为 10 000kVA及以上和 $U_m > 72.5\text{kV}$ 的变压器

ACSD试验中应进行局部放电测量；局部放电测量电压 $U_2$ 为：相对地 $U_2 = 1.3U_m/\sqrt{3}$ 、相间 $U_2 = 1.3U_m$ 。施加电压的顺序见图5。



A=5min B=5min C=试验时间 D $\geq$ 5min E=5min  $U_1$ —感应耐受试验电压值

图 5 施加对地试验电压的时间顺序

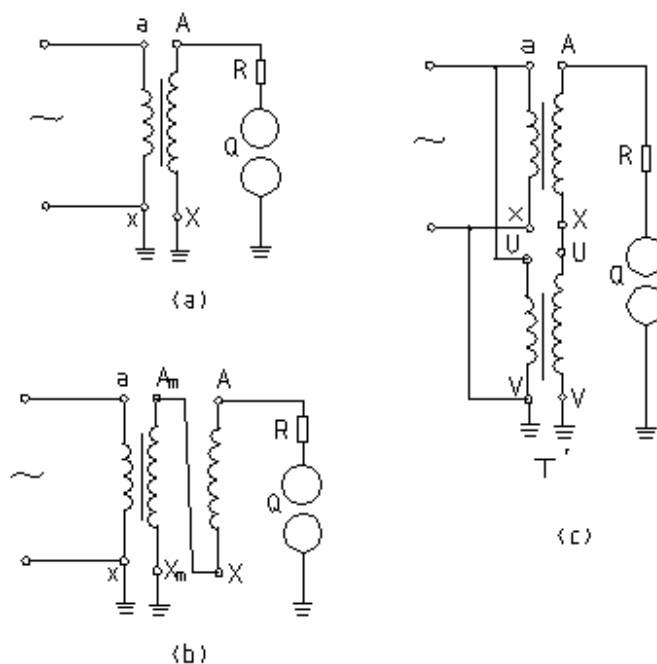
在电压上升至 $U_2$ 和从 $U_2$ 下降的过程中，应记录局部放电的起始电压及熄灭电压，背景噪声水平应不大于100pC。

如果符合以下情况，则试验合格：

- 试验电压不出现突然下降；
- 在 $U_2$ 下的第二个5min期间，所有测量端子的“视在电荷量”的连续水平不超过300pC；
- 局部放电特性无持续上升趋势；
- 在 $1.1U_m/\sqrt{3}$ 下的视在电荷量的连续水平不超过100pC。

### 11.4.3 高压绕组为分级绝缘的变压器的 ACSD 试验

单相变压器只要求相对地试验，一般情况下中性点端子接地，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 6 (a) 进行；特殊情况下可采用中性点支撑法，用励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，见图 6 (b)；当上述方法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 6 (c)；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。



R—阻尼电阻 Q—球隙 T'—支撑变压器

图 6 单相变压器的感应耐压试验原理图

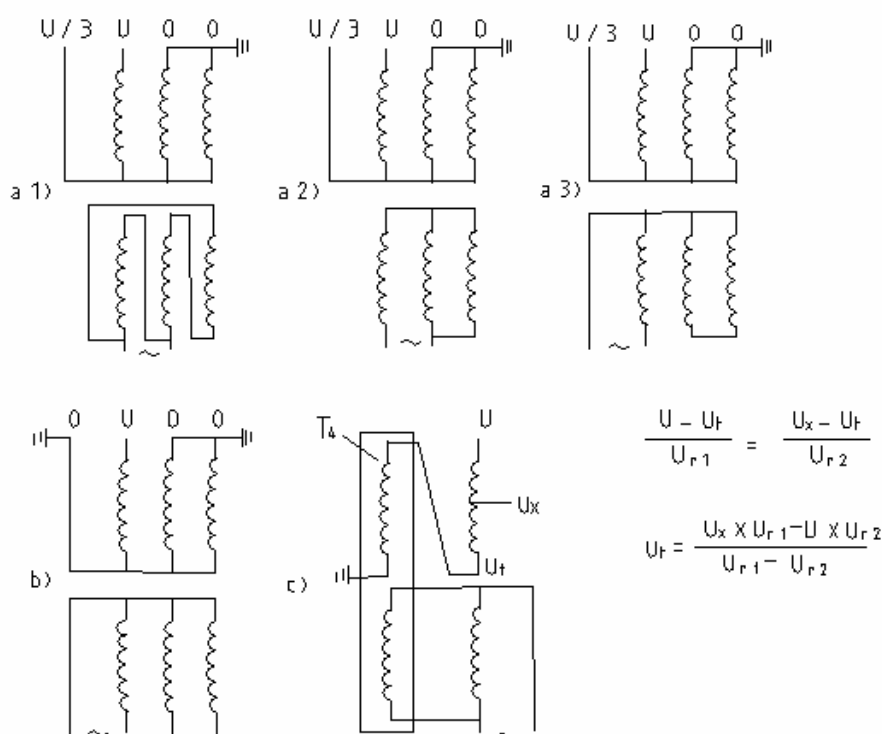
三相变压器要求进行两种试验，即带有局部放电测量的相对地试验和带有局部放电测量的中性点接地的相间试验。

局部放电测量电压 $U_2$ ：对于单相试验，为 $1.5U_m/\sqrt{3}$ （相对地）；对于相间试验， $U_m \leq 363\text{kV}$ 时，为 $1.3U_m$ （相间）， $U_m = 550\text{kV}$ 时，为 $1.2U_m$ （相间）。施加试验电压的时间顺序见图5。

如果符合以下情况，则试验合格：

- 试验电压不出现突然下降；
- 在 $U_2$ 下的第二个 5min 期间，所有测量端子的视在电荷量的连续水平对于相对地试验不超过 500 pC、对于相间试验不超过 300 pC（当 $U_2 = 1.2U_m$ 时，可能有一个相当低的视在电荷量的协商值）；
- 局部放电特性无持续上升趋势；
- 在 $1.1U_m/\sqrt{3}$ 下的视在电荷量的连续水平不超过 100pC。

分级绝缘变压器相对地单相感应耐压试验的连接见图7。



T<sub>4</sub>—辅助增压变压器 U—相对地感应试验电压规定值

图 7 分级绝缘变压器单相感应耐压试验（ACSD）的连接方法

当中性点端子设计成可耐受U/3的电压时，可采用连接法a1)、a2)、a3)；如果变压器具有不套绕组的磁回路（壳式或五柱铁心），则只有a1)可采用。

如果三相变压器具有不套绕组并作为被试心柱磁通流过的磁回路，则推荐用连接法b)；如果变压器有三角形联结的绕组，则试验期间三角形联结的绕组必须打开。

连接法c)表示一台辅助增压变压器对被试自耦变压器的中性点端子给予支撑电压U<sub>f</sub>，两个自耦联结的额定电压为U<sub>r1</sub>、U<sub>r2</sub>，其相应的试验电压为U、U<sub>x</sub>；这种连接也可用于一台套有绕组磁回路且其中性点绝缘小于U/3的三相变压器。

### 11.5 长时感应电压试验（ACLD）

本试验用来验证变压器在运行条件下无局部放电，是在瞬变过电压和连续运行电压下的质量控制试验。三相变压器试验接线有如下两种，在定货时由制造单位与用户协商确定。

#### 11.5.1 逐相施加电压的方式进行试验

D联结绕组的逐相试验意味着每个线端及它所连接的绕组要进行两次试验，试验时应将其一个端子接地或通过电源的中性点接地；Y联结的绕组试验时应将其中性点端子接地；除非另有规定，带分接绕组应置于主分接，其原理线路见图8。

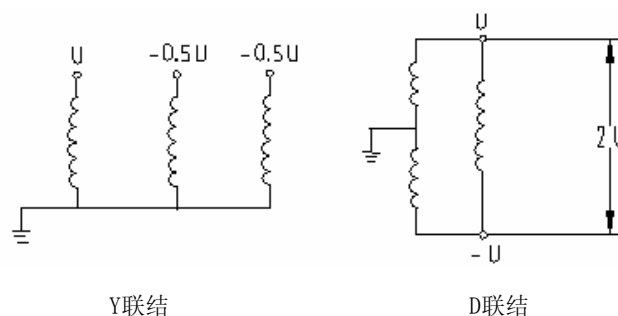
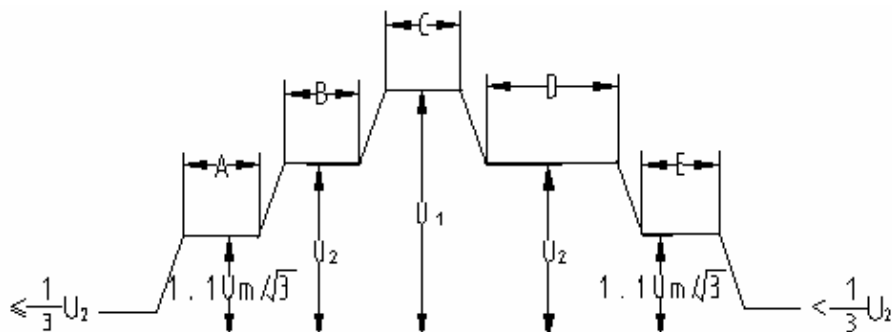


图 8 Y 或 D 联结三相变压器的逐相试验

### 11.5.2 采用对称三相加压的方式进行试验

当高压绕组为D联结时，采用此加压方法高压将出现悬浮电位，对于这类变压器最好采用单相加压方式。

施加试验电压的时间顺序见图9。



A=5min B=5min C=试验时间（按ACSD） D $\geq$ 60min（对于 $U_m\geq 300\text{kV}$ ）或30min（对于 $U_m< 300\text{kV}$ ）

E=5min  $U_1=1.7U_m/\sqrt{3}$   $U_2=1.5U_m/\sqrt{3}$

图9 长时感应试验施加试验电压的时间顺序

试验中背景噪声水平应不大于100pC；其试验程序如下：

- 在 $U_2$ 的第一个阶段中应读取并记录一个读数，对该阶段不规定其视在放电量；
- 在施加 $U_1$ 期间不要求给出视在放电量；
- 在电压 $U_2$ 的第二个阶段应连续观察局部放电水平，并每隔5min记录一次。

如满足下列要求，则试验合格：

- 试验电压不产生突然下降；
- 在 $U_2$ 下的长期试验期间，局部放电量的连续水平不大于500pC，局部放电不呈现持续增加的趋势，偶然出现的较高脉冲可以不计；
- 在 $1.1U_m/\sqrt{3}$ 下，视在放电量的连续水平不大于100pC。

### 11.6 干式变压器感应耐压试验

干式变压器感应耐压试验按GB 6450的规定。

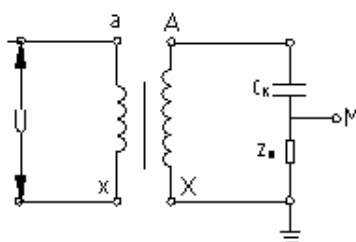
### 12 局部放电测量（例行试验）

测定干式变压器在某一规定电压下的局部放电量，测定干式变压器局部放电的起始电压和熄灭电压，评价产品的设计结构和制造质量。

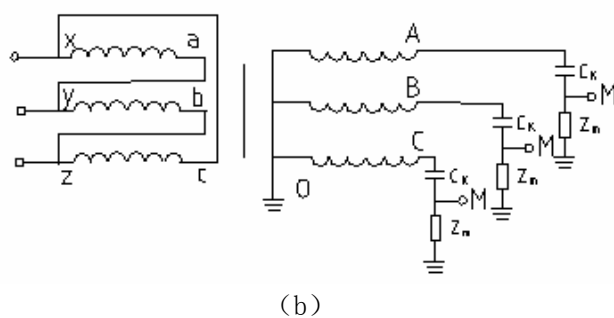
12.1 干式变压器局部放电测量试验分接位置通常置于额定分接。

12.2 局部放电测量通常采用电气法：一般在低压绕组励磁，采用对称方式加电压并逐相进行测量，非励磁Y接绕组将其中性点接地，非励磁D接绕组将试验相绕组的尾端接地。为防止电晕干扰，出线端子应有防晕措施。

12.3 变压器局部放电试验多采用并联测量回路，其基本原理接线见图10。



(a)



(a) 单相变压器励磁原理接线图 (b) 三相变压器三相励磁原理接线图  
 $C_k$ —耦合电容  $Z_n$ —测试阻抗 M—测量仪器

图 10 干式变压器局部放电试验的原理接线图

试验时将试区周围的试验设备及可能产生悬浮放电的物体可靠接地，并尽量远离被试品。

当试验频率提高后应考虑采用电抗器进行补偿。

12.4 每次校准前应检查方波发生器电池电量是否充足，与校准方波发生器之间的连线最好选用同轴电缆，以免造成方波的畸变；其引线应尽可能短，回路接地可靠，当更换试品或改变任一参数时，必须重新校准。

12.5 局部放电试验所施加的电压幅值、持续时间及允许值按如下规定：

- a) 当绕组直接接地或通过小阻抗接地时，应先加  $1.5U_m/\sqrt{3}$  线对地的予加电压，时间为 30s，然后不切断电源再施加  $1.1U_m/\sqrt{3}$  的线对地电压 3min，测量此间的局部放电量。
- b) 当绕组不接地或通过大阻抗（如消弧线圈）接地的系统上时，应先加  $1.5U_m$  相对相的电压，其时间为 30s，此时有一个线路端子接地；然后不切断电源再施加  $1.1U_m$  相对相电压 3min，测量此间的局部放电量；然后将另一个线路端子接地，重复进行本试验；按 Y 联结运行的单相变压器不必重复进行。
- c) 局部放电量的允许值应符合相关标准或技术条件的规定。

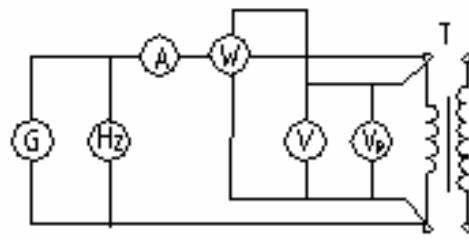
### 13 空载损耗及空载电流的测量（例行试验）

空载损耗及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或产品技术协议允许的范围内，以检查和发现试品磁路中的局部缺陷和整体缺陷。

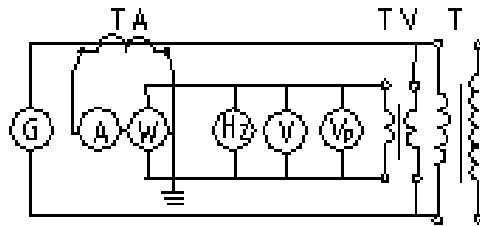
13.1 空载损耗及空载电流的测量，应从试品各绕组中的一侧绕组（一般为低压绕组）线端供给额定频率的额定电压（应尽可能为对称的正弦波电压），其余绕组开路；如果施加电压的绕组是带有分接的，则应使分接开关处于主分接的位置；如果试品绕组中有开口三角形联结绕组，应使其闭合。运行中的地电位处（分级绝缘变压器其中性点、铁心、拉带等）和油箱或外壳应可靠接地。

测量时变压器的温度应接近于试验时的环境温度。

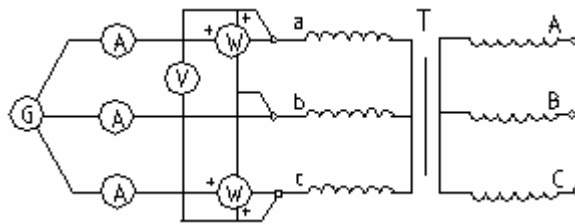
13.2 空载试验时按图 11 的接线进行。单相变压器参照图 11 (a) 和 (b) 的接线，三相变压器参照图 11 (c)、(d)、(e)、(f) 的接线；其中 (f) 为 yn 或 zn 联结绕组的接线；三相变压器与单相变压器空载试验时，均需测量电压方均根值、平均值和频率；施加电压以平均值（方均根值刻度）为准。



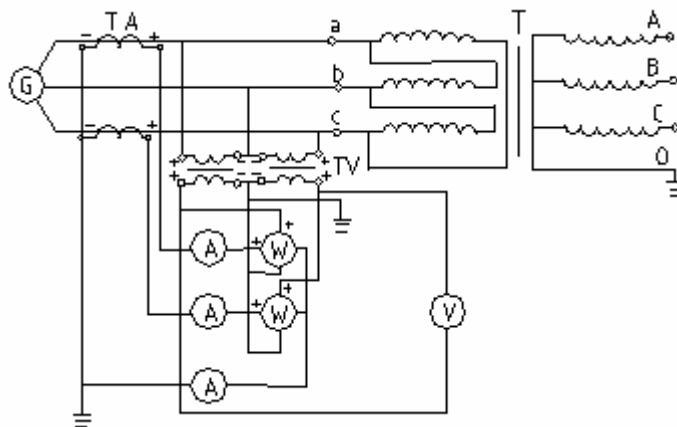
(a)



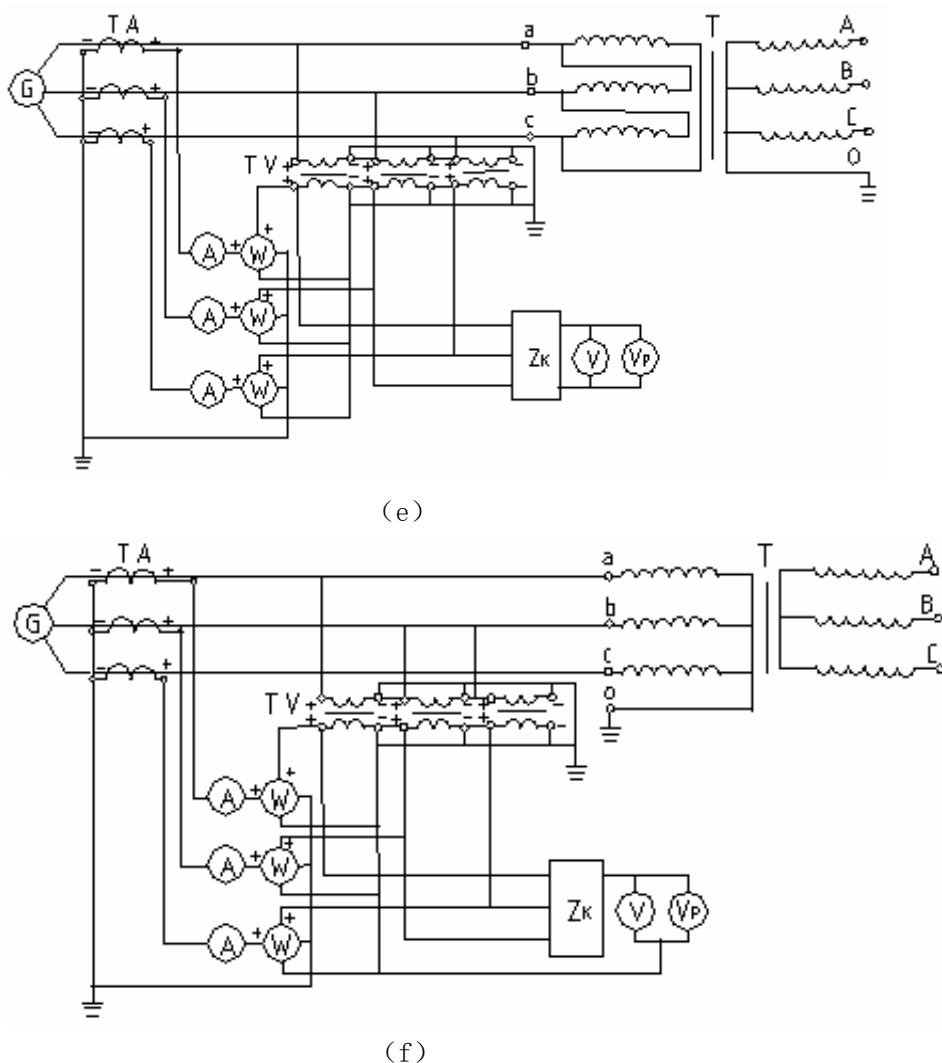
(b)



(c)



(d)



G—可调电源 TA—电流互感器 TV—电压互感器 T—试品  
A—电流表 V—电压表  $V_p$ —平均值电压表 W—瓦特表 Zk—转换开关

图 11 空载损耗及空载电流测量原理图

13.3 图 11 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，读取功率时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），直接从瓦特表读出。

13.4 图 11 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。

13.5 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。功率测量应采用小于 0.2 低功率因数的功率表。

13.6 图 11 (a)、(c) 测量电压取于产品，测量功率没有线路损耗。图 11 (b)、(d)、(e)、(f) 所测量的功率不但包括仪表损耗，而且还包括线路损耗，当它大到不容忽略时，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：

- a) 断开试品、将试验线路的端部短路，施加三相电流的平均值，从瓦特表中读取。
- b) 用试验电流的平方与三相试验线路电阻的乘积计算得出。

13.7 图 11 给出的是用电压表、电流表和瓦特表进行测量，也可以用功率分析仪进行测量，一般使用功率分析仪测量准确度较高；因为仪器本身的精确度较高，可以准确地依据平均值电压采集数据，避免因仪器指针晃动、试验人员读数等引起的随机误差。功率分析仪接线方法可依照仪器使用说明书进行。

13.8 当试验电压三相不对称度小于 2% 时，可以三个线电压的算术平均值或 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。

试验中如认为产品有剩磁，则必须退磁，以消除剩磁对空载试验结果的影响。

13.9 当电压波形畸变，即平均值电压表与方均根值电压表读数不同时，试验电压应以平均值电压表（该表的刻度具有同一平均值的正弦波形方均根值）读数为准，令平均值电压表的读数为  $U'$ 。

方均根值电压表与平均值电压表并联；令方均根值电压表读数为  $U$ 。

对于三相变压器试验时：

若 D（或 Y）联结绕组励磁，则电压应在各相端子间测量。

若 YN 或 ZN 联结绕组励磁，则电压应在相和中性点端子间测量。

如果  $U$  和  $U'$  之差在 3% 以内，则此试验电压波形满足要求。

设测得的空载损耗为  $P_m$ ，则校正后的空载损耗  $P_0$  按下式计算：

$$P_0 = P_m(1 + d)$$

式中：

$$d = (U' - U) / U' \quad (d \text{ 通常为负值})$$

如果  $U$  和  $U'$  之差大于 3%，应按协议确认试验的有效性。

空载损耗与空载电流应在同一绕组同时测量，对于三相变压器，空载电流应取各相空载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。

13.10 当试验频率  $f$  与额定频率  $f_r$  有差异、且偏差不大于  $\pm 5\%$  时，施加电压应用  $U_f$  代替  $U_r$ ，按下式计算：

$$U_f = U_r(f / f_r)$$

式中：

$U_r$ —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：

$$P_0 = P_0' [P_1(f_r / f) + P_2(f_r / f)^2]$$

式中：

$P_0'$ —电压校正后的  $P_0$ ；

$P_1$ —磁滞损耗与总的铁心损耗之比；

$P_2$ —涡流损耗与总的铁心损耗之比。

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。

对于 50Hz 和 60Hz 正常使用的磁感应强度， $P_1$  和  $P_2$  可采用表 9 的数值。

表 9 磁滞损耗、涡流损耗与总的铁心损耗之比

	取向硅钢片	非取向硅钢片
$P_1$	0.5	0.7
$P_2$	0.5	0.3

13.11 当对空载损耗在各相的分布状况产生怀疑，或者缺乏必要的试验设备而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；具体操作方法如下：

a) 当励磁绕组为 a—y、b—z、c—x 三角形联结时，施加电压  $U=U_r$ （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三角形联结时，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 $I_{0ab}$ 。

三空的空载电流百分数计算如下：

$$I_0 = \frac{0.289(I_{0ab} + I_{0bc} + I_{0ac})}{I_r} \times 100, \%$$

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

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

三空的空载电流百分数计算如下：

$$I_0 = \frac{0.33(I_{0ab} + I_{0bc} + I_{0ac})}{I_r} \times 100, \%$$

励磁绕组为Y或D联结的三相空载损耗均按下式计算：

$$P_0 = (P_{0ab} + P_{0bc} + P_{0ac})/2$$

c) 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： $P_{0ac}=K_p P_{0ab}=K_p P_{0bc}$ 。

三柱式铁心的几何尺寸示意图见图12，其中 $K_p$ 是由铁心的几何尺寸决定的，可按下式计算：

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

式中：

$H$ —铁心窗高，mm；

$M_0$ —铁心柱中心距离，mm；

$S_1$ —铁心柱截面积， $\text{cm}^2$ ；

$S_2$ —铁轭截面积， $\text{cm}^2$ 。

注1：对于三相五柱式铁心的产品，本公式不适用；

注2： $K_p$ 的计算值仅供参考，作为判断依据应以原始出厂数据为准。

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是，则说明变压器磁路中有局部缺陷。

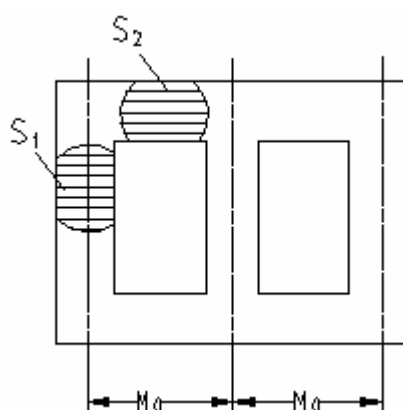


图 12 三柱式铁心示意图

在三相五柱式变压器进行单相空载试验时，铁心柱中的磁通是额定磁通 $\Phi$ ，但上下铁轭及旁轭中的磁通不是额定磁通 $\Phi$ ，而且铁轭中的磁通分布是比较复杂的，三次单相空载试验时铁轭及旁轭中的磁通是变化的，因此对三相五柱式变压器不能由三次单相空载试验的结果得到变压器的空载损耗。

#### 14 短路阻抗及负载损耗的测量（例行试验）

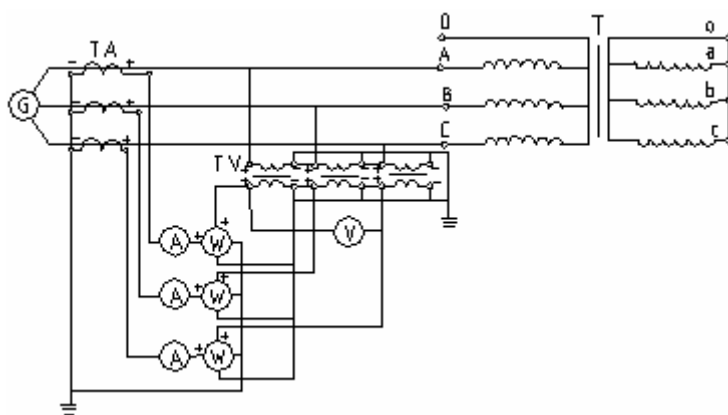
负载损耗是一个重要参数，它对于变压器的经济运行以及变压器本身的使用寿命，都有着极其重要的意义；而短路阻抗，它决定了变压器在电力系统运行时对电网电压波动的影响，以及变压器发生出口短路事故时电动力的大小，同时短路阻抗还是决定变压器能否并联运行的一个必要条件。

通过短路阻抗和负载损耗的测量，可以验证这两项指标是否在国家标准及用户要求范围内，同时还可以通过试验发现绕组设计与制造及载流回路和结构的缺陷。

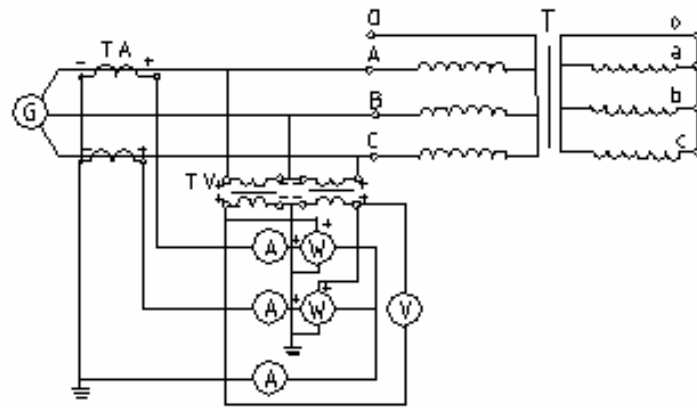
**14.1** 短路阻抗及负载损耗的测量，应当在试品的一个绕组的线端施加额定频率，且近似正弦的电流，另一个绕组短路，各相处于同一个分接位置。测量应在 50%~100%额定电流下进行；为避免绕组发热对试验结果产生明显误差，试验测量应迅速进行；同时准确记录试验时绕组温度。

**14.2** 短路阻抗及负载损耗的测量与空载试验的测量线路相同，只是测量中无需进行电压波形校正；测量方法上的要求与 13.3~13.6 的规定完全相同。

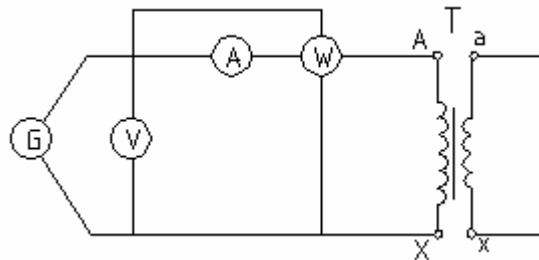
**14.3** 短路阻抗及负载损耗的测量接线见图 13 (a)、(b)；对于额定电流很小的试品，仪表（电压表及瓦特表电压线圈）和电压互感器的吸收电流在测量电流中不可忽略时，应将电压取于电源，接线见图 13 (c)、(d)。



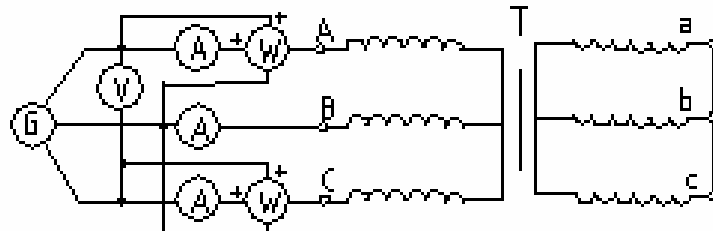
(a)



(b)



(c)



(d)

G—可调电源 T—试品 TA—电流互感器 TV—电压互感器 A—电流表 V—电压表 W—瓦特表

图 13 短路阻抗及负载损耗测量接线图

14.4 短路阻抗是在额定频率和参考温度下，一对绕组中某一绕组端子之间的等效串联阻抗；其百分数等于短路电压与额定电压之比，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，短路阻抗应按下列公式折算并校正到表 10 所列的参考温度。

$$Z_{kt} = \frac{U_{kt}}{U_r} \times \frac{I_r}{I_k} \times 100$$

$$Z_k = \sqrt{Z_{kt}^2 + \left(\frac{P_{kt}}{10S_r}\right)^2 \times (K_t^2 - 1)}$$

式中：

$Z_{kt}$ —绕组温度为  $t^\circ\text{C}$  时的短路阻抗，%；

$U_{kt}$ —绕组 $t$ °C时通过试验电流 $I_k$ 的短路电压, kV;

$U_r$ —施加电压侧的额定电压, kV;

$I_r$ —施加电压侧的额定电流, A;

$Z_k$ —参考温度时的短路阻抗, %;

$P_{kt}$ — $t$ °C时的负载损耗, W;

$S_r$ —额定容量, kVA;

$K_t$ —电阻温度换算系数(同10.5)。

表 10 不同耐热等级绝缘的参考温度

绝缘的耐热等级	参考温度 °C
A	75(80)
E	95
B	100
F	120
H	145
C	170

1: 括号内数值适用于干式变压器;  
2: 对于大型电力变压器, 其阻抗受温度影响较小, 可不必进行温度校正。

14.5 短路阻抗通常还以每相欧姆数表示, 也应校正到表 10 所列的参考温度。

$$Z_i = \frac{Z_k U_r^2}{100 S_r}$$

式中:

$Z_i$ —短路阻抗,  $\Omega$ /相;

$U_r$ —绕组的额定电压, kV;

$S_r$ —绕组的额定容量, MVA;

$Z_k$ —绕组的短路阻抗, %。

14.6 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温度成正比, 而其它损耗与温度成反比。两部分损耗应分别校正到表 10 所列的参考温度, 通常用下面的公式计算:

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

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;

$K_t$ —电阻温度换算系数(同10.5);

$\sum I_r^2 R$ — $t$ °C时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:

Y或YN联结的绕组

$$P_r = 1.5 I_r^2 R_{xn} = 3 I_r^2 R_{xg}$$

D联结的绕组

$$P_r = 1.5 I_r^2 R_{xn} = I_r^2 R_{xg}$$

式中：

$P_r$ —绕组的电阻损耗，W；

$I_r$ —绕组的额定电流，A；

$R_{xn}$ —线电阻， $\Omega$ ；

$R_{sg}$ —相电阻， $\Omega$ 。

在试验中，短路连接线不宜过小，对于铜质导线，一般选择电流密度为（3~4）A/mm<sup>2</sup>；而对于大容量变压器，其低压侧电流很大，由于短路连接的电阻损耗引入的测量误差较大，可在试验结果中加以校正。

**14.7** 变压器的短路阻抗和负载损耗应在主分接测量，对于调压范围超过±5%的变压器还应测量两个极限分接的数据；对于三绕组变压器，其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之间、在绕组1与绕组3之间、在绕组2与绕组3之间。

多于多绕组的变压器，绕组也应成对的选取，其原则与三绕组相同；试验时，非被试绕组开路。

**14.8** 不同容量的绕组间测量时，施加电流应以较小容量的额定电流为准，试验结果中负载损耗应注明容量；短路阻抗应折算到大容量一侧。

**14.9** 当试验频率不等于额定频率时（其偏差小于5%），负载损耗可以认为近似相等，短路阻抗按下式折算：

$$Z_k = \sqrt{\left(Z_{kt} \times \frac{f_r}{f}\right)^2 + \left(\frac{P_{kt}}{10S_r}\right)^2 \left[K_t^2 - \left(\frac{f_r}{f}\right)^2\right]}$$

式中：

$Z_k$ —参考温度下的短路阻抗，%

$Z_{kt}$ —试验温度下的短路阻抗，%

$f_r$ —额定频率，Hz；

$f$ —试验频率，Hz；

$P_{kt}$ —试验温度下的负载损耗，W；

$S_r$ —额定容量，kVA；

$K_t$ —电阻温度换算系数（同10.5）。

**14.10** 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，可进行如下的单相负载试验：

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：AO、BO、CO）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。

对于供电侧绕组为Y、另一侧为y或d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、另一侧为yn、y或d联结的产品，可轮流在供电侧每个双相上施加 $2/\sqrt{3}$ 额定电流，依次短路一相线圈（如在AB端供电、BC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。对于自耦联结绕组的三个单相损耗，一般B相较其它两相略大一些。

## 15 有载分接开关试验（例行试验）

### 15.1 操作试验

在变压器完成装配后，有载分接开关应承受如下顺序的操作试验，且不应发生故障：

- a) 变压器不励磁，完成 8 个操作循环（一个操作循环是从分接范围的一端到另一端，并返回到原始位置）；
- b) 变压器不励磁，且操作电压降到额定值 85% 时，完成一个操作循环；
- c) 变压器在额定频率、额定电压下空载励磁时，完成一个操作循环；
- d) 将变压器的一个绕组短路，并尽可能使分接绕组中的电流达到额定值，在粗调选择器或极性选择器操作位置处或中间分接每一侧的两个分接范围内，完成 10 次分接变换操作。

## 15.2 辅助线路绝缘试验

辅助线路绝缘试验是在变压器装配完成后，应按 GB 1094.3 第 10 章的规定对分接开关的辅助线路进行工频耐压试验。

## 16 温升试验（型式试验）

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）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。

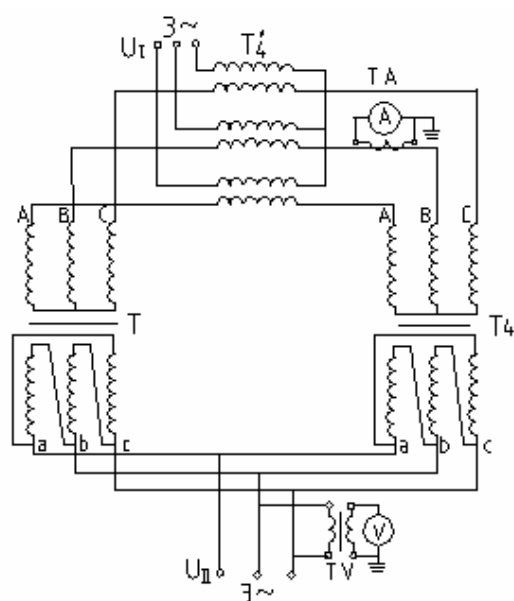
16.1 温升试验的地点应清洁宽敞，在试品周围 2m~3m 处不得有墙壁、热源、杂物堆积及外来辐射气流等干扰，室内可有自然的通风，但不应引起显著的空气回流。

以空气为冷却介质的试品，环境温度应在 10℃~40℃；以水为冷却介质的试品，入口水温不得高于 25℃。

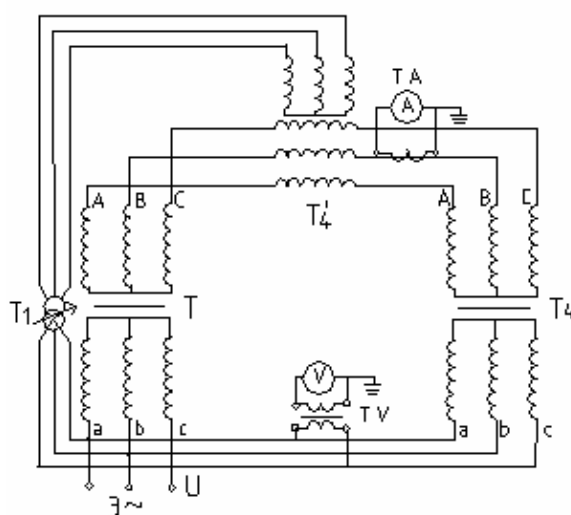
16.2 温升试验应模拟试品在运行中最严格的状态，应在额定容量、最大电流分接进行。试验的额定条件为：铁心损耗等于空载损耗（校正值），线圈及附加损耗等于实测参考温度的负载损耗（额定容量、最大电流、最大负载损耗的分接）。当最大电流分接为最大损耗分接时，试验在最大电流分接进行；当最大电流分接与最大损耗分接不同时，试验一般应选择最严格的分接进行，并对另一要求进行折算。

16.3 温升试验可采用下列方法之一：

- a) 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；
- b) 相互负载法：是利用一台与试品电压比和联结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，见图 14，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，使其达到额定值；负载辅助变压器的电源可以与供给额定励磁的电源不同，见图 14 (a)；也可以是相同的，见图 14 (b)；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。



(a)



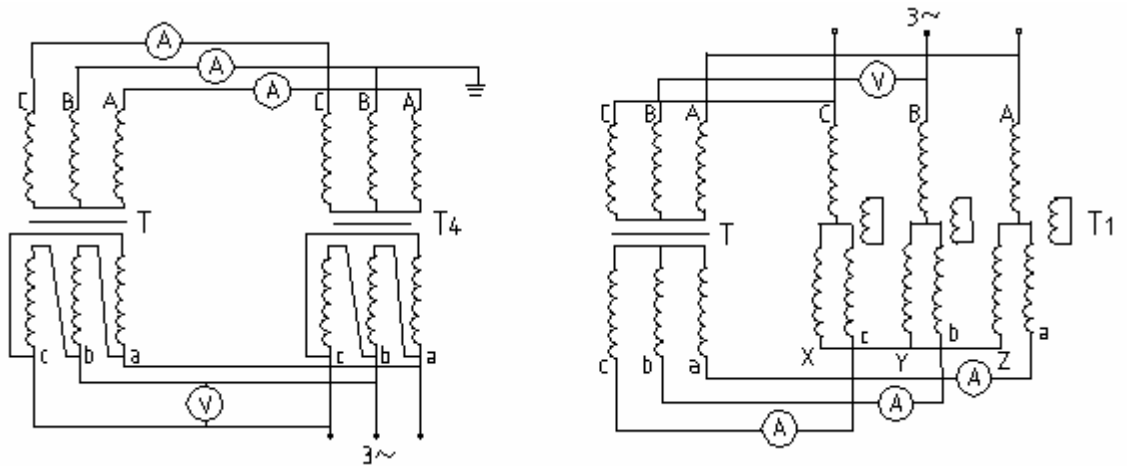
(b)

T—试品  $T_4$ —辅助变压器  $T_4'$ —负载损耗辅助变压器  $T_1$ —调压器  
TA—电流互感器 TV—电压互感器 A—电流表 V—电压表

图 14 相互负载法原理接线图

c) 循环电流法：用循环电流法进行温升试验，见图 15；将试品的一侧与辅助变压器同名端并联，供给额定励磁，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的试验电流下的阻抗压降之和。

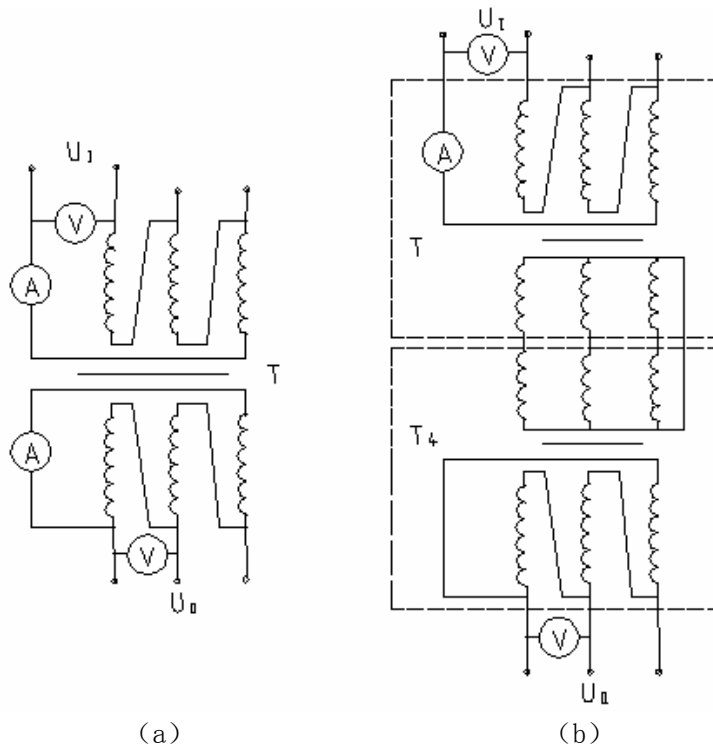
用这种方法进行温升试验，往往试验电流不能等于额定电流，但试品的试验损耗应不低于总损耗的80%，试验电流应不低于额定电流的90%，试验结果应进行相应的换算；用循环电流法进行温升试验时，电源除供给两台变压器的空载容量外，还供给试品与辅助变压器的试验容量差。



T—试品 T<sub>4</sub>—辅助变压器 T<sub>1</sub>—三相调压器 A—电流表 V—电压表

图 15 循环电流法原理接线图

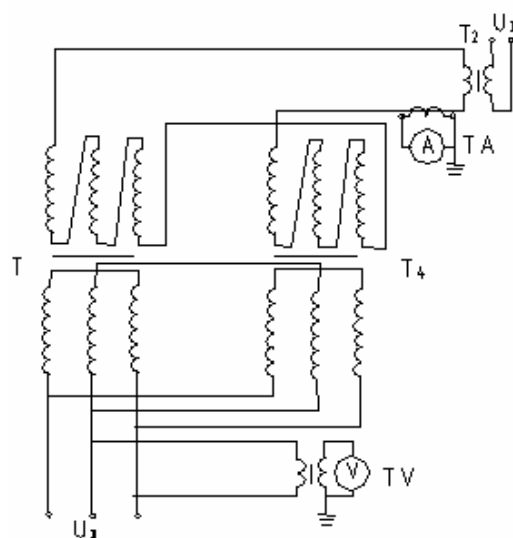
d) 零序法：采用零序法进行温升试验，是在绕组的一侧供给额定励磁，在另一侧零序回路中供电，使绕组产生额定电流，两侧绕组的零序电流应分别有零序回路；三相变压器用零序法进行温升试验的原理接线图见图 16、单相变压器见图 17。



(a)

(b)



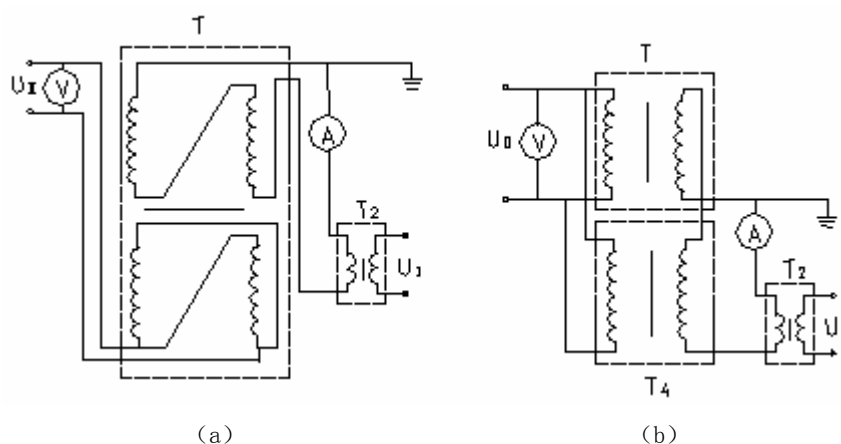


(c)

T—试品 T<sub>1</sub>—辅助变压器 T<sub>2</sub>—中间变压器 A—电流表 V—电压表 TA—电流互感器

TV—电压互感器 U<sub>I</sub>—供试验用的单相交流电源 U<sub>II</sub>—供试验用的三相交流电源

图 16 三相变压器零序法温升试验原理接线图



(a)

(b)

T—试品 T<sub>2</sub>—中间变压器 T<sub>2</sub>—辅助变压器 A—电流表 V—电压表 U<sub>I</sub>、U<sub>II</sub>—供试验用的单相交流电源

图 17 单相变压器零序法温升试验原理接线图

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常将会使铁心夹件、拉螺杆、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。

- e) 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大电流；然后持续 1h，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。

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可采用模拟法进行温升试验，具体方法见 GB 6450 中的规定。

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

16.5 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; 同时油浸式变压器还应监视顶层油温度和散热器进出口温度, 干式变压器还应监视铁心温度。此外, 还应记录环境温度和入口水温度(如果是水冷却器)。

16.6 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(3 000A 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。

16.7 温升试验后期, 油浸式变压器当顶层油温升的变化率小于每小时 1K, 并维持 3h 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最后 1h 内的平均值; 干式变压器当温升变化值每小时不大于允许温升的 2% 或每小时不大于 2K(二者之中取较小的值)时, 即认为温升已经稳定, 达到了最终温升。

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; 如果施加电流与规定的电流之差在 ±10% 之内, 可以直接测量热电阻, 然后按 GB 1094.2 的规定折算。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。

16.8 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, 此时绕组对油的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。

16.9 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流大小。

使用数字电压表用降压法测量冷热电阻进行温升试验时, 可将两个绕组串联。

冷电阻测量后要准确的记录绕组温度, 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。

16.10 冷却介质的温度测量: 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 1 000mL 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 1m~2m, 位于冷却表面高度的一半。对于具有风冷却器的试品, 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 1m~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。

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

16.11 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。

16.12 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; 试验可选用下列方法:

a) 图解法: 利用停电后电阻随时间的变化曲线, 采用图 18 的方法画出直线 L 与纵坐标交点 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:

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

式中:

$\theta_p$  — 油的平均温度, ℃;

$R_1$  — 绕组的冷态电阻值, Ω;

$\theta_1$ —冷态电阻的绕组温度，℃；  
 $T$ —对于铜导线为235、铝导线为225。

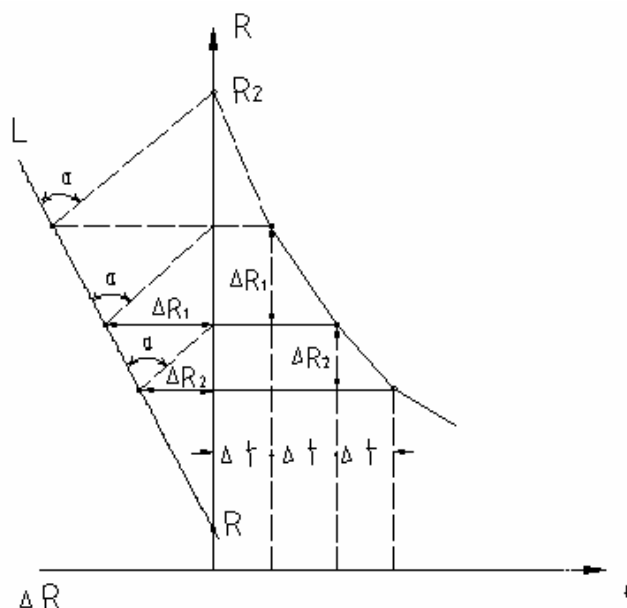


图 18 确定切断电源瞬间热电阻和油平均温度的方法

- b) 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，将分度值不低于 0.2℃ 的温度计置于充油的油温度计座中，测量散热器或冷却器进出口的油温，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顶层油温度和底部油温度的平均值。

对于管式或波纹式的油箱，温差值应取散热管或波纹顶部和底部表面温度之差，散热管或波纹应尽可能选取油箱某一侧的中间部分。

- c) 估算法：额定容量低于 2 500kVA 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。

16.13 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 1cm~2cm，在上铁轭设置 3 个~5 个测量点，取其最高温度计算温升。

16.14 绕组温度的测定：绕组温度是靠冷电阻的变化率决定的；因此准确测量冷电阻的阻值、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；具体规定如下：

- 冷态电阻测量和绕组温度见第 10 章的相关规定，推荐使用目前国内外市场上各种型号的变压器直流电阻测量仪进行电阻测量；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、稳定时间等。
- 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、稳定时间等完全相同；切断试验电源时应尽量减少对冷却条件的干扰（保持油泵继续运行），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。
- 具体的绕组温度测定应符合 GB 1094.2 中 5.4、5.5 的规定。

16.15 干式变压器温升计算按如下方法：

- 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励磁、绕组达到额定负载时，绕组温升如下计算：

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

式中:

$\Delta\theta$ —绕组对空气的温升, K;

$R_1$ —绕组的冷态电阻,  $\Omega$ ;

$R_2$ —电源切断瞬间的电阻,  $\Omega$ ;

$\theta_2$ —试验最后 1h 内空气的平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

b) 当试品铁心达到额定励磁、绕组电流达到 90%及以上额定电流时, 温升如下计算:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_t \left(\frac{I_t}{I_r}\right)^q$$

式中:

$\Delta\theta_t$ —负载电流为  $I_t$  时绕组对空气的温升, K;

$I_r$ —额定电流, A;

$q$ —空气自冷 (AN) 为 1.6、风冷 (AF) 为 1.8。

#### 16.16 油浸式变压器的温升计算如下:

a) 顶层油温升计算: 当采用直接负载法、相互负载法、循环电流法或零序法使试品铁心达到额定励磁、绕组达到最大额定电流时, 以及采用短路法使输入功率等于总损耗, 当达到稳定状态时, 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, 但试验损耗与规定的总损耗之差在 20% 以内时, 按下式校正:

$$\left(\frac{\text{总损耗}}{\text{试验损耗}}\right)^x$$

式中:

$x$ —自然油循环且额定容量不大于 2 500kVA 为 0.8; 自然油循环且额定容量大于 2 500kVA 为 0.9; 强迫非导向油循环和强迫导向油循环为 1.0。

b) 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、绕组流过额定容量的最大电流, 达到稳定状态后停电测量热电阻, 计算方法按 16.15 a) 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; 如果施加的电流与规定的电流之差在 10% 以内, 可采用如下校正系数来确定高于油平均温度的绕组温升:

$$\left(\frac{\text{额定电流}}{\text{试验电流}}\right)^y$$

式中:

$y$ —自然油循环及强迫非导向油循环为 1.6、强迫导向油循环为 2.0;

额定电流—指须施加的额定容量时的最大电流值。

c) 对于多绕组变压器, 它的两个以上的绕组可以同时带负载, 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规定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经协商可按 16.16 a) 的方法校正; 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 16.16 b) 的方法校正; 在计算中可考虑该负载组合下的杂散损耗和涡流损耗。

#### 17 油箱机械强度试验 (型式试验)

油箱机械强度试验包括真空强度和正压机械强度试验。油箱机械强度试验一般在不装器身的单独油箱上进行；对于箱盖和器身相连接的桶式油箱或其它特殊结构的油箱，可以在装配车间带器身进行。试验的油箱应无焊接与密封的缺陷，试验应在专用的场地上进行。

### 17.1 试验目的

通过正压和真空试验检测油箱的机械强度是否符合设计要求，保证油箱在后续的使用过程中不出现异常变形。

### 17.2 试验方法

试验方法按如下要求进行：

- a) 试验准备：首先将油箱放置平稳，并连接好真空泵或压缩空气及试验管路，在油箱上安装好合适量程的压力表或真空表，按规定紧固箱沿和法兰盖板的螺栓；
- b) 测试点的选择：测试点一般选在强度比较薄弱、变形比较大的位置，测试点的具体数量可根据油箱的结构、大小及加强铁的数量按如下选择：
  - 1) 高、低压侧：一般在油箱高度方向的中部箱壁和加强铁上至少各取 3 点，带盒壁结构的油箱需在盒壁上至少选择 1 个测试点；
  - 2) 箱顶：根据不同结构或变形有特殊要求的，选择易变形的部位作为测试点，对于平顶式油箱应在箱盖中部或其它薄弱部位至少选取 2 个测试点；
  - 3) 两侧端面：是否选择测试点可根据油箱宽度及加强铁而定，对于宽度较大、加强铁较少的油箱可取测试点进行试验。
- c) 测试基准线：在每个被测试面拉细绳作为测试基准线，在测试点的两端将细绳固定好，注意基准线的固定不可随油箱的变形而移动；
- d) 初始值的确定：试验时一般先进行真空强度试验，然后进行正压强度试验；在试验之前，为释放焊接应力可先对油箱进行真空预抽，使之消除一定的变形应力；预抽解除后，用钢板尺测量测试基准线到油箱上各测试点的距离，将此数值作为真空强度试验的初始值；预抽真空度可根据油箱的大小由企业自行制定；真空强度试验后，油箱恢复变形后的测量值为正压试验的初始值；
- e) 试验数据的获得：试验压力和时间按 GB/T 6451 或 GB/T 16274 的规定进行；当达到规定的试验压力和时间时，用钢板尺测量基准线到各测试点的距离，该数值与它的初始值之差为测试点的弹性变形量；解除正压或真空后再次进行测量，此数值与它的初始值之差为测试点的永久变形量。

### 17.3 结果的判定

油箱的弹性变形与允许变形量应符合企业有关技术条件的规定，如果弹性变形与允许变形量在规定的范围内，则油箱的机械强度试验合格；如果超出了规定，应对油箱进行加固，并重新按上述规定试验。

### 17.4 注意事项

注意事项按如下要求：

- a) 油箱的所有紧固件必须装配齐全且要紧固到位；
- b) 整个试验应指派专人监视，在试验过程中应随时观察压力表和真空表的指示值和油箱的变形量，特别是正压强度试验时应控制试验压力不得超出规定值；如发现油箱有异常变形或声音，应立即停止试验并查找原因；正压试验时不要在油箱附近长时间停留，随时注意安全。

## 18 声级测定（特殊试验）

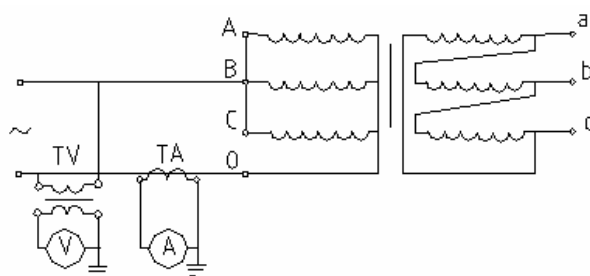
声级测定按 GB/T 1094.10 的规定进行。

## 19 三相变压器的零序阻抗测量（特殊试验）

### 19.1 概述

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。



TA—电流互感器 TV—电压互感器 A—电流表 V—电压表

图 19 三相变压器零序阻抗试验原理接线图

试验时一般从三相线端对中性点供电，以电流为准，测量电压。零序阻抗通常以每相的欧姆数表示，计算公式如下：

$$Z_0 = 3 U / I$$

式中：

$Z_0$ —零序阻抗， $\Omega$ /相；

$U$ —试验电压，V；

$I$ —试验电流，A。

## 19.2 有平衡安匝的零序阻抗测量

19.2.1 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，绕组中有一个封闭的三角形联结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。

19.2.2 如无特殊要求，零序阻抗的测量应按以下测量组合进行：

对于YNd11的试品，只测量高压绕组，试验时ABC—O供电、低压开路。

对于YNyn0d11的试品，低压开路时的测量组合见表11。

表 11 YNyn0d11 的试品零序阻抗测量组合

序号	供电端子	开路端子	短路端子
1	ABC—O	$A_m B_m C_m - O_m$	—
2	ABC—O	—	$A_m B_m C_m - O_m$
3	$A_m B_m C_m - O_m$	ABC—O	—
4	$A_m B_m C_m - O_m$	—	ABC—O

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沿三角接线自行构成回路，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。

## 19.3 无平衡安匝的零序阻抗测量

19.3.1 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点~5点的零序阻抗；试验电流应尽量等于额定电流，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；以该试验电流等差递减分别测量各点的零序阻抗。

19.3.2 如无特殊要求，零序阻抗的测量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—o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YNyn0yn0的试验，测量组合见表12。

表 12 YNyn0yn0 的试品零序阻抗测量组合

序 号	供电端子	开路端子	短路端子
1	ABC—O	$A_m B_m C_m—O_m$ abc—o	——
2	ABC—O	abc—o	$A_m B_m C_m—O_m$
3	ABC—O	$A_m B_m C_m—O_m$	abc—o
4	ABC—O	——	$A_m B_m C_m—O_m$ abc—o
5	$A_m B_m C_m—O_m$	ABC—O	abc—o
6	$A_m B_m C_m—O_m$	ABC—O abc—o	——
7	$A_m B_m C_m—O_m$	abc—o	ABC—O
8	$A_m B_m C_m—O_m$	——	ABC—O abc—o
9	abc—o	$A_m B_m C_m—O_m$	ABC—O
10	abc—o	ABC—O $A_m B_m C_m—O_m$	——
11	abc—o	——	ABC—O $A_m B_m C_m—O_m$
12	abc—o	ABC—O	$A_m B_m C_m—O_m$

以上测试组合中序号1、6、10是空载零序阻抗、其它均为短路零序阻抗。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量组合进行测量。

## 20 短路承受能力试验（特殊试验）

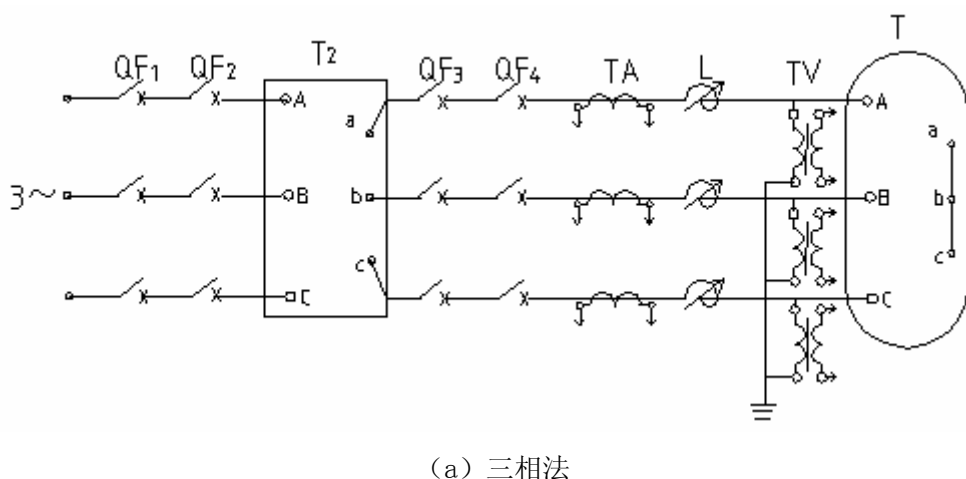
短路承受能力试验是模拟运行中最严酷的短路故障，即网络容量足够大（见GB 1094.5的规定）、负载阻抗为零，而且在电压过零时获得最大的非对称电流。变压器绕组、分接开关、套管、引线及各机械紧固部件将承受来自短路电流所产生的巨大的动稳定效应与热效应的考核。从而验证结构的合理性与运行的可靠性。

**20.1** 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验证。

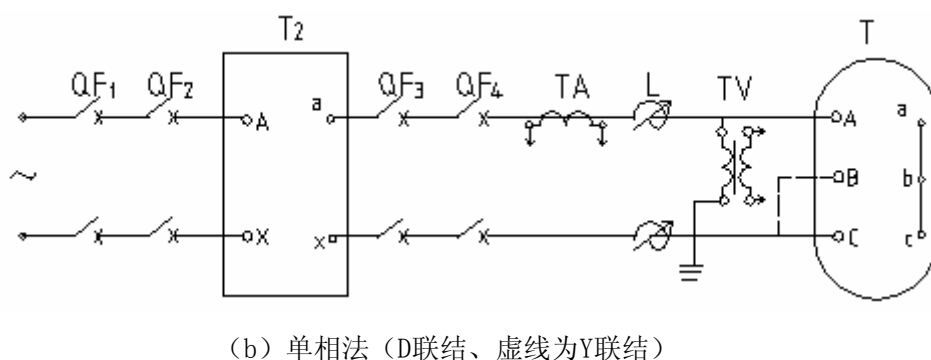
试品的对称短路电流值及持续时间按GB 1094.5的规定。

**20.2** 承受短路的动稳定能力应通过试验或计算和设计验证其结构、工艺和制造的可靠性；试验通常在强电流试验站进行；试验电源可以是网络，也可以是冲击发电机组，一般均需配置合适的短路试验变压器和电抗器。

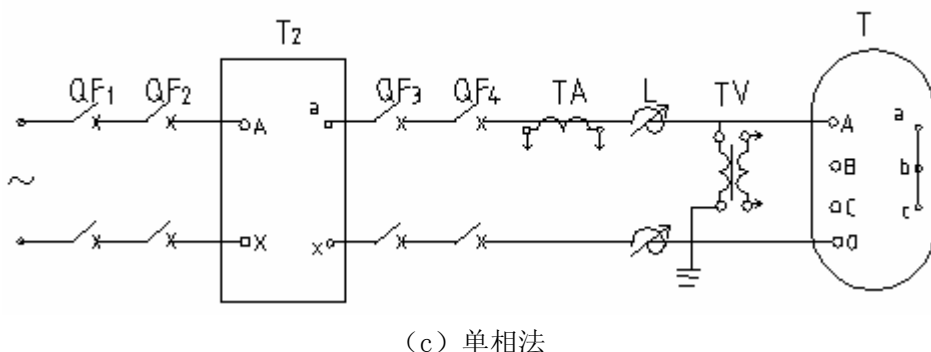
**20.3** 对于三角形联结的绕组进行三相试验时，如果低压侧为星形联结，可采用测量低压电流的方法；对于三角形联结的绕组进行单相试验时，单相电压应施加在三角形的两个角上，试验时的电压应与三相试验时的相间电压相同；对于星形联结绕组，如果电源容量不足以进行上述单相试验，而中性点可以利用且能承受相关的电流时，经协商单相电源可施加于线端与中性点之间；具体的短路试验的线路原理见图20。



(a) 三相法



(b) 单相法 (D联结、虚线为Y联结)



(c) 单相法

QF<sub>1</sub>、QF<sub>2</sub>、QF<sub>3</sub>、QF<sub>4</sub>—断路器 L—限流电抗器 T<sub>2</sub>—中间变压器 T—试品、  
TA—电流互感器(接示波器电流测量回路) TV—电压互感器(接示波器电压测量回路)

图 20 三相变压器短路试验线路图

#### 20.4 短路试验前变压器应具备的条件和准备工作按如下要求进行:

- 应按照 GB 1094.1 中规定的例行试验项目(不包括雷电冲击试验)和要求,试验合格后方可进行短路试验;对试验没有影响的附件(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短路阻抗和负载损耗。
- 短路试验开始时,绕组的平均温度最好在 10℃~40℃之间。
- 试品运到试验站后,应在现场吊心沿线圈的轴向在高压侧和低压侧的线段和垫块上高压侧和低压侧分别画出 2 条、3 条直线,如有可能幅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。
- 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在 ±0.2% 以内;有条件时,可进行绕组频谱分析测量。

#### 20.5 短路电流非对称分量的峰值计算按 GB 1094.5 的规定。



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

对于单同心式绕组的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）和交叠式绕组的变压器采用预先短路的方法试验时，制造单位需与用户协商。

20.7 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；Y联结的绕组应在相电压过零时合闸，D联结的绕组应在线电压过零时合闸。

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

分级绝缘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；Y联结的变压器，如电源容量不足且有中性点可以利用时，经制造单位与用户协商，可在线端与中性点间使用单相电源进行试验。

20.9 首先施加小于70%试验电流进行调试；当合闸相角、试验电流的峰值和对称值及持续时间均达到要求时，再进行100%试验电流的正式试验；小于70%试验电流不记入试验次数。

20.10 对于I类和II类的单相变压器，试验次数为三次；如无另行规定，带有分接的变压器的试验应分别在最大、额定和最小分接位置上各进行一次；三相变压器试验次数为九次，在不同分接位置上进行，即在旁柱的最大分接、中柱的额定分接和另一旁柱的最小分接位置上分别进行三次。

对于III类变压器，其试验程序和分接位置通常由制造单位和用户协商确定，一般与I类和II类变压器相同。

每次试验施加的短路电流为：峰值 $(100\pm 5)\%$ 、方均根值 $(100\pm 10)\%$ 。

每次试验的持续时间应为：对I类变压器0.5s、对II类和III类变压器0.25s，其允许偏差为 $\pm 10\%$ 。

20.11 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。

20.12 短路试验后应重复全部例行试验，包括在100%规定试验电压下的绝缘试验；如果规定了雷电冲击试验，也应在此阶段中进行；但对于I类变压器，除绝缘试验外的其它试验项目，可以不做。

20.13 首先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。

20.14 如果试验中短路电流峰值与稳定值、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，符合GB 1094.5的规定；且例行试验复试项目，包括100%规定试验电压下的外施、感应及雷电冲击试验（如有规定）合格；在外观及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、标记无明显位移、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。

## 21 空载电流谐波测量（特殊试验）

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。

21.1 空载电流谐波测量是通过谐波分析仪来完成的。

该试验通常与空载试验同时进行，所以试验接线原理及注意事项同空载试验。若无特殊规定，变压器应在空载状态下以额定频率的额定电压励磁，测量变压器各项空载电流的总谐波含量及各单次谐波含量；一般基波分量为100%，测量结果以基波分量的百分数表示。

21.2 用户对测量电压有要求时按用户要求进行，并向用户提供实测值。

21.3 变压器的单相空载电流谐波和三相空载电流谐波是不同的；在三相空载试验时三次谐波电流比较小，五次谐波电流比较大；而在单相空载试验时三次谐波电流很大。

由单相变压器组成三相变压器组时的空载电流和单相试验时的空载电流是不一样的，单相变压器进行单相空载电流谐波测量是不对应变压器的实际运行情况的。

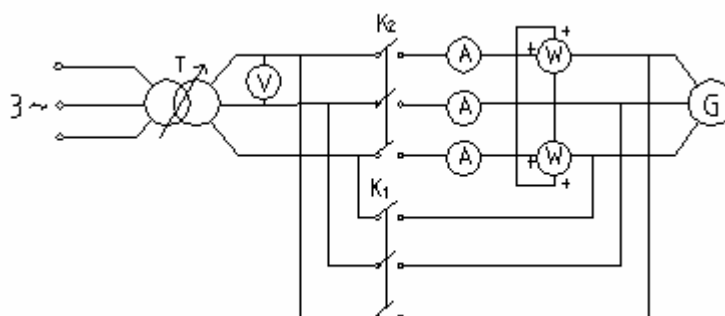
## 22 风扇和油泵电机所吸取功率测量（特殊试验）

测量被试品冷却（散热）装置风扇和油泵电机在工作状态下所吸取的功率，向用户提供实测数据。

### 22.1 试验前准备

22.1.1 准备好试验记录，检查仪器功能是否正常，并确认仪器检定有效期。

22.1.2 相关试验设备及仪表按要求正确接线，试验接线见图21。



K<sub>1</sub>、K<sub>2</sub>—刀闸开关 T—调压器 G—电机 A—电流表 V—电压表 W—瓦特表

图 21 电机吸取功率测量原理图

22.1.3 被试品的冷却（散热）装置风扇和油泵装备完好。

### 22.2 试验方法

试验方法采用两瓦特表或三瓦特表法。

### 22.3 注意事项

22.3.1 根据电机铭牌数据正确选择瓦特表、电压及电流表的电压、电流量程及功率因数（ $\cos \phi = 0.8$ ）。

22.3.2 正确接线后，应首先合刀闸开关K<sub>1</sub>，调节电压至额定电压，启动电机并调整转向正确，然后合刀闸开关K<sub>2</sub>；将刀闸开关K<sub>1</sub>拉掉待表计起值稳定后同时读取各表的起值。

22.3.3 测量结果应和铭牌数据符合对应规律。