

主要内容:

一、概述

二、变压器的例行试

三、变压器的特殊试验

四、变压器的冲击试验简介

五、变压器、电抗器感应耐压试验简介

六、变压器的温升试验

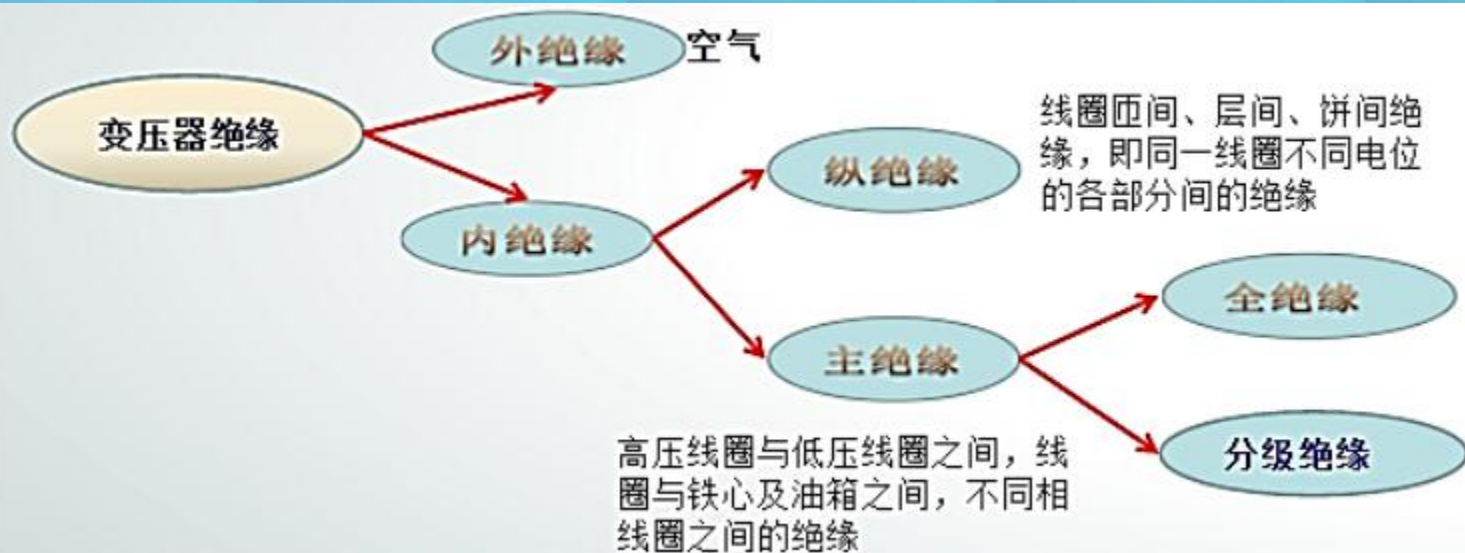
七、声级测量

一、概述

1.变压器的分类

- ①按用途：电力变压器、试验变压器、测量变压器等
- ②按绕组结构：双绕组变压器、三绕组变压器、自耦变压器
- ③按铁芯结构：芯式变压器和壳式变压器
- ④按相数：单相、三相
- ⑤按冷却方式：油浸式（油浸自冷、油浸风冷、油浸水冷、强迫油循环风冷、强迫油循环水冷）、干式、充气式
- ⑥按调压方式：无激磁调压、有载调压
- ⑦按中性点绝缘水平：全绝缘和分级绝缘

2. 变压器的绝缘



3.变压器、电抗器类产品试验主要依据标准:

- 1 **GB1094.1-2013** 电力变压器:第1部分 总则
- 2 **GB1094.2-2013** 电力变压器:第2部分 油浸式变压器的温升
- 3 **GB1094.3-2003** 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* (即将修订)
- 4 **GB/T1094.4-2005** 电力变压器:第4部分 电力变压器和电抗器的雷电冲击和操作冲击试验导则
- 5 **GB1094.5-2008** 电力变压器:第5部分 承受短路的能力
- 6 **GB/T1094.6-2011** 电力变压器 第6部分:电抗器
- 7 **GB/T1094.7-2008** 电力变压器 第7部分:油浸式电力变压器负载导则
- 8 **GB/T1094.10-2003** 电力变压器 第10部分:声级测定
- 9 **GB1094.11-2007** 电力变压器 第11部分:干式变压器
- 10 **JB/T501-2006** 电力变压器试验导则
- 11 **JB/T5346-2014** 串联电抗器
- 12 **JB/T7632-2006** 串联电抗器试验导则
- 13 **JB/T10775-2007** 6KV-35KV 级干式并联电抗器技术参数和要求
- 14 **GB20052-2013** 三相配电变压器能效限定值及能效等级
- 15 **GB/T6451-2008** 变压器技术参数和要求
- 16 **GB/T10228-2008** 干式电力变压器技术条件和要求
- 17 **GB/T25289-2010** 20kV 油浸式配电变压器技术参数和要求
- 18 **GB/T25438-2010** 三相油浸式立体卷铁心配电变压器技术参数和要求
- 19 **GB/T22072-2008** 干式非晶合金铁心配电变压器技术参数和要求
- 20 **GB/T25446-2010** 油浸式非晶合金铁心配电变压器技术参数和要求
- 21 **JB/T10088-2004** 6kv-500kv 级电力变压器声级
- 22 **GB/T7595-2008** 运行中变压器油质量
- 23 **GB/T507-2002** 绝缘油:击穿电压测定法
- 24 **DL/T1217-2013** 磁控型可控并联电抗器技术规范

例行试验项目

每台产品出厂前都要进行的试验项目

- 1.绕组电阻测量
- 2.电压比测量和电压矢量关系校定
- 3.绝缘电阻测量
- 4.绝缘例行试验（感应耐压、外施耐压、局部放电试验）
- 5.密封试验
- 6.空载电流和空载损耗测量
- 7.短路阻抗和负载损耗测量
- 8.绝缘油试验

特殊试验项目

- 1.绝缘特殊试验
- 2.短路承受能力试验
- 3.三相变压器的零序阻抗
- 4.空载电流的谐波测量
- 5.频率响应测量
- 6.绕组热点温升测量

型式试验项目

- 1.温升试验
- 2.绝缘型式试验（雷电冲击）
- 3.声级测量
- 4.风扇和油泵电机功率测量
- 5.90%~110%额定电压下的空载电流和空载损耗测量

GB1094.1-2013 新变化

4.变压器的试验顺序七原则：



- 1.非破坏试验在破坏性试验前做；
- 2.直流电阻应在负载试验前做；
- 3.空载试验在感应试验后进行；
- 4.雷电冲击试验之后再做空载以进一步证实无匝间击穿(干式变压器还要复试局部放电试验)；
- 5.突发短路后重做例行性试验对比阻抗以证实无位移/变形、绝缘性能正常；
- 6.雷电冲击试验在突发短路试验之后进行；
- 7.温升试验前后做变压器油试验（油变），以验证温升试验对油的影响。

二、变压器的例行试验

1. 绕组电阻测量


试验目的:

- ① 导线焊接或连接是否良好;
- ② 导线规格、电阻率是否符合要求;
- ③ 各相电阻是否平衡;
- ④ 为温升试验提供依据。



干变: 对 2500kVA 及以下的配电变压器, 其不平衡率相为 4%, 线为 2%; 630kVA 及以上电力变压器, 其不平衡率相(有中性点引出时)为 2%, 线(无中性点引出时)为 2%。

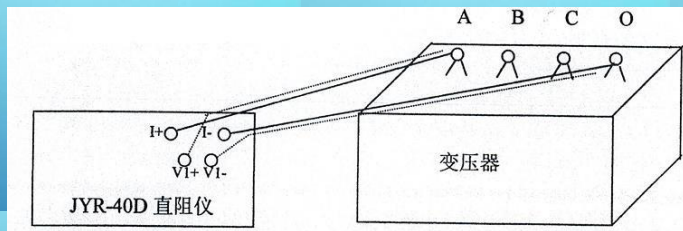
油变: 对 1600kVA 及以下的变压器, 其不平衡率相为 4%, 线为 2%; 2000kVA 及以上变压器, 其不平衡率相(有中性点引出时)为 2%, 线(无中性点引出时)为 1%。



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, 三相电阻平均值为分母进行计算

a. 直流压降法

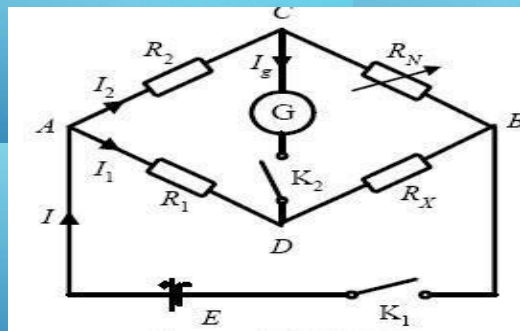
欧姆定律 $R=U/I$ 原理，结构简单，精度一般



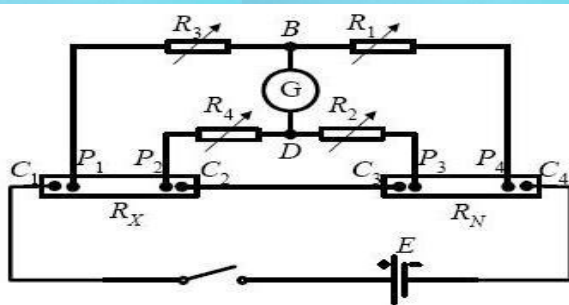
b. 电桥法

单臂电桥(惠司登电桥)

$$R_X = R_N \times R_1 / R_2$$



双臂电桥(凯尔文电桥)



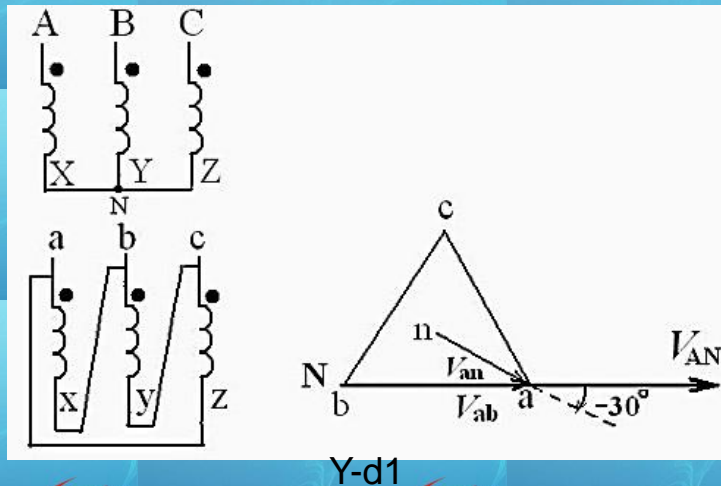
$$R_X = \frac{R_3}{R_1} R_N + \frac{R' R_2}{R_2 + R_4 + R'} \left(\frac{R_3}{R_1} - \frac{R_4}{R_2} \right)$$

双臂电桥分开使用电流引线 and 电压引线，使通过电流引线和接触电阻的压降不引入桥内，消除了接触电阻和引线的影响，对小电阻测量准确度更高。

2.电压比测量和联结组标号检定

试验目的:

- ①检查绕组匝数与绕向是否符合图样技术要求;
- ②检查各分接引线与分接开关连接是否正确;
- ③产品联结方式及标识是否符合技术要求;



注: 绕组相对铁心柱的旋转方向有左绕向和右绕向。绕向不同时, 其中通过电流时产生的磁场方向不同; 当磁场变化时, 绕组中感应的电动势的方向不同。

三相变压器的三个相绕组可以联结成星形、三角形或曲折形。联结成星形、三角形或曲折形时, 对高压绕组用大写字母 Y、D 或 Z 表示; 对中压或低压绕组用同一字母的小写形式 y、d 或 z 表示; 对有中性点引出的星形或曲折形联结用 YN(yN)或 ZN(zN)表示。国际上通行采用时钟法表示变压器的联结组。

变压器绕组变比和联结组别测试仪

3.绝缘电阻测量

试验目的:

- ①确定绝缘状态，发现产品缺陷；
- ②绝缘强度试验的预判定；



GM-5K 绝缘电阻测试仪

顺序	双绕组变压器		三绕组变压器	
	测量绕组	接地部位	测量绕组	接地部位
1	低压	高压绕组和外壳	低压	高压、中压绕组和外壳
2	高压	低压绕组和外壳	中压	高压、低压绕组和外壳
3			高压	中压、低压绕组和外壳
4	高压和低压	外壳	高压和中压	低压和外壳
5			高压、中压和低压	外壳

4.吸收比和极化指数

吸收比系指用兆欧表对变压器绝缘加压时间为60秒和15秒时测得绝缘电阻的比值，即 $K=R_{60}/R_{15}$ 。一般规定 $K \geq 1.3$ 。绝缘受潮或有局部缺陷的变压器的吸收比接近于 1.0。

对于高压大容量变压器，需用极化指数判断其绝缘状况，即 $K=R_{600}/R_{60}$ ，一般规定 $K \geq 1.5$ 。

绝缘材料在直流电场作用下，一般呈现出三种电流，即位移电流、吸收电流、泄漏电流。而位移电流是绝缘材料电容充电时的电流，在极短时间内衰减；吸收电流是绝缘介质在电场下极化产生的电流，它也随时间衰减，但较慢；泄漏电流是绝缘介质内部或表面带电粒子的传导电流，它不随时间而变化。

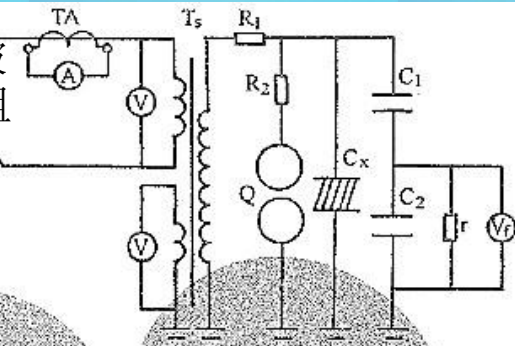
注意

因此测试绝缘电阻必须当绝缘介质的电流衰减到泄漏电流时，绝缘电阻才能稳定。

5.工频耐压试验

试验目的：考核绕组对地和绕组之间的主绝缘强度 工频交流耐压试验对考核变压器主绝缘强度、检查局部缺陷，具有决定作用。该项目在变压器油及例行绝缘试验等项目合格后方可进行。工频交流耐压具有破坏性。

试验时，变压器的被试绕组均承受同一试验电压，非被试绕组及夹件、外壳等则接地。对全绝缘变压器(绕组首末端绝缘水平相同)，产品首末端工频耐压值相同。



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_r ——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。

表 2 设备最高电压 $U_m \leq 170 \text{ kV}$ 变压器绕组的额定耐受电压²⁾

kV

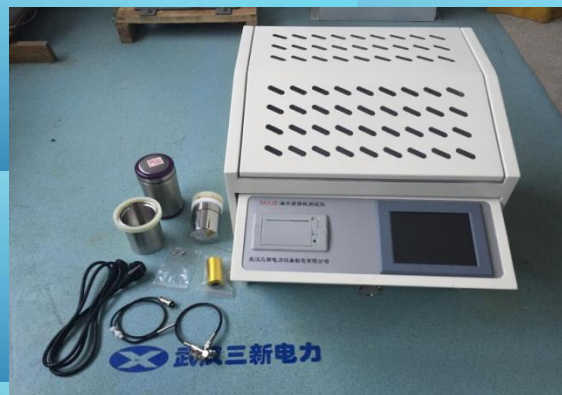
3	3.6	40	4	18
6	7.2	60	6	25
10	12	75		35
15	17.0	105		45
20	24	125	4	55
35	40.0	200		85
66	72.5	325	36	140
110	126	480		200

表 3 设备最高电压 $U_m > 170 \text{ kV}$ 变压器绕组的额定耐受电压³⁾

kV

220	252	600	800	950	60
		750	960	1050	395
330	363	850	1060	1175	460
		900	1170	1300	510
500	550	1000	1425	1560	630
		1170	1550	1675	680

6. 变压器油试验 (指标参数要求见附表)



	测量值 Measured value	保证值 Guaranteed value		
油击穿耐压(kV _{1.5} /2.5mm) Breakdown voltage	67	≥55		
介损 (90℃) tanδ	0.02213	≤0.03		
微水含量(mg/kg) Water content	11	≤20		
油色谱分析 Gas chromatography analysis included in the transformer oil		含量 (μL/L) Content		
气体组份 Gas composition	本体 Body			
	承受短路能力试验前 After Ability To Withstand Short Circuit	承受短路能力试验后 After Ability To Withstand Short Circuit	试验前 Before test	试验后 After test
氢气 H ₂	1.07	2.35	5.05	4.87
一氧化碳 CO	1.59	4.72	11.26	11.42
二氧化碳 CO ₂	128.38	145.98	87.66	79.95
甲烷 CH ₄	0.35	0.26	0.68	0.58
乙烷 C ₂ H ₆	0.34	0.20	0.16	0.16
乙烯 C ₂ H ₄	0.56	0.26	0.41	0.42
乙炔 C ₂ H ₂	0	0	0	0
烃类气体含量 C1+C2	1.25	0.72	1.25	1.16

表 变压器油试验项目和试验方法一览

序号	项目	要求		说明
		投入运行前的油	运行油	
1	外观	透明、无杂质或悬浮物		将油样注入试管中冷却至 5℃ 在光线充足的地方观察
2	水溶性酸 pH 值	≥ 5.4	≥ 4.2	按 GB7598 进行试验
3	酸值 mgKOH/g	≤ 0.03	≤ 0.1	按 GB264 或 GB7599 进行试验
4	闪点(闭口)℃	≥ 140 (10 号、25 号油) ≥ 135 (45 号油)	1) 不应比左栏要求低 5℃ 2) 不应比上次测定值低 5℃	按 GB261 进行试验
5	水分 mg/L	66~110kV ≤ 20 220kV ≤ 15 330~500kV ≤ 10	66~110kV ≤ 35 220kV ≤ 25 330~500kV ≤ 15	运行中设备, 测量时应注意温度的影响, 尽量在顶层油温高于 50℃ 时采样, 按 GB7600 或 GB7601 进行试验
6	击穿电压(kV)	15kV 以下 ≥ 30 15~35kV ≥ 35 66~220kV ≥ 40 330kV ≥ 50 500kV ≥ 60	15kV 以下 ≥ 25 15~35kV ≥ 30 66~220kV ≥ 35 330kV ≥ 45 500kV ≥ 50	按 GB/T507 和 DL/T429.9 方法进行试验
7	界面张力(25℃) mN/m	≥ 35	≥ 19	按 GB/T6541 进行试验
8	$\tan\delta(90^\circ\text{C})$	330kV 及以下 $\leq 1\%$ 500kV $\leq 0.7\%$	300kV 及以下 $\leq 4\%$ 500kV $\leq 2\%$	按 GB5654 进行试验
9	体积电阻率(90℃) $\Omega\cdot\text{m}$	$\geq 6 \times 10^{10}$	500kV $\geq 1 \times 10^{10}$ 330kV 及以下 $\geq 3 \times 10^9$	按 DL/T421 或 GB5654 进行试验
10	油中含气量(体数)	(330kV、500kV) $\leq 1\%$	一般不大于 3%	按 DL/T423 或 DL/T450 进行试验
11	油泥与沉淀物(质量分数)	/	一般不大于 0.02%	按 GB/T511 试验, 若只测定油泥含量, 试验最后采用乙醇—苯(1:4)将油泥洗于恒重容器中, 称重
12	油中溶解气体色谱分析	变压器、电抗器、互感器、套管、电力电缆		取样、试验和判断方法分别按 GB7597、SD304 和 GB7252 的规定进行

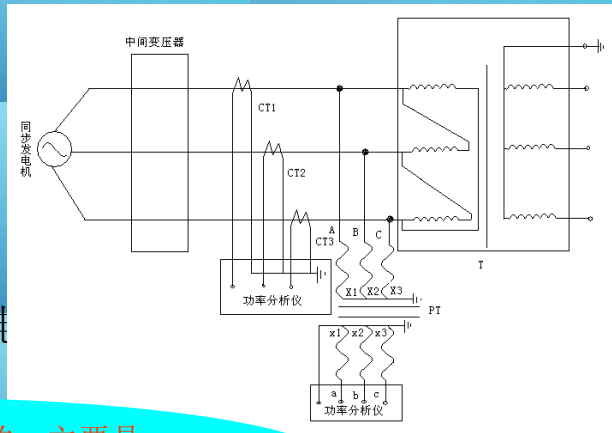
7.空载损耗及空载电流测量

试验目的：

验证铁心设计计算、工艺制造的正确性，并检查铁心中是否存在缺陷。同时也可判断产品是否存在匝间短路。

从试品的一侧(一般为低压绕组)施加额定频率的额定电压，其余绕组开路，使铁心中产生额定磁通，此时测得的损耗即为空载损耗。

空载试验时，需测量电压的有效值、平均值和频率，施加电压以平均值(方均根值刻度)为准。



注意

测试平均值和有效值的目的是，主要是确保电压波形为正弦波。



国家标准规定：空载损耗允许偏差+15% 空载电流允许偏差+30%



空载损耗包括铁心的磁滞损耗、涡流损耗和附加损耗。

8.短路阻抗及负载损耗测量

试验目的： 验证绕组设计计算，测试产品短路阻抗，为产品并联运行及抗短路能力提供依据。

国家标准规定： 负载损耗允许偏差+15% 总损耗允许偏差+10%

短路阻抗	主分接	当阻抗值 $\geq 10\%$ 时， $\pm 7.5\%$ 当阻抗值 $< 10\%$ 时， $\pm 10\%$
	其它分接	当阻抗值 $\geq 10\%$ 时， $\pm 10\%$ 当阻抗值 $< 10\%$ 时， $\pm 15\%$

试验方法:

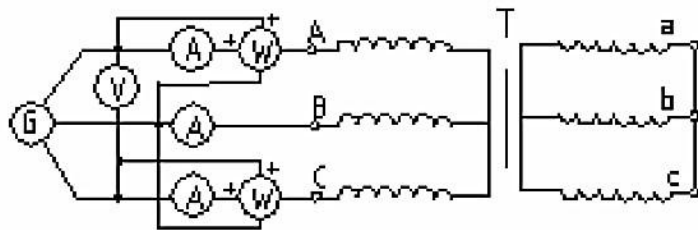
从试品的一个绕组施加额定频率且近似正弦的电流，另一绕组短路，各相处于同一分接位置。且施加的电流应在 **50%~100%** 额定电流下，为减少绕组发热产生的影响，测量过程应尽快。测试同时准确记录绕组温度。

注意

负载试验应在额定分接进行，如调压范围超过 $\pm 5\%$ ，还应测试两个极限分接数据。



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平均值为准。



(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

负载损耗校正到参考温度:

在试验温度 $t^{\circ}\text{C}$ 下进行负载损耗测量的结果 P_{kt} , 要校正到参考温度。交流系统产品参考温度为 75°C

$$P_{kt} + (K^2 - 1) \sum I^2 R_t$$

$$P_{k75} = \sum I^2 R_t K + P_{ft} / K =$$

P_{k75} -----参考温度 75°C 时的负载损耗;

P_{kt} ----- $t^{\circ}\text{C}$ 下的负载损耗;

P_{ft} -----附加损耗;

$\sum I^2 R_t$ ----- $t^{\circ}\text{C}$ 下的直流电阻损耗;

K -----温度系数。

对铜绕组

$$K = \frac{310}{235 + t}$$

对铝绕组

$$K = \frac{300}{225 + t}$$

短路阻抗的计算:

变压器的短路阻抗中包括有功分量和无功分量，其中有功分量和温度有关，需要校正到参考温度；而无功分量与温度无关。

在温度 $t^{\circ}\text{C}$ 下的短路阻抗的有功分量

$$u_{rt} = \frac{P_{kt}}{10S_n} \% \quad u_{rt} - \text{短路阻抗有功分量}\% \text{值}; S_n - \text{变压器额定容量 (kV}\cdot\text{A)}$$

在温度 75°C 下短路阻抗有功分量

$$u_{r75} = K * u_{rt}$$

短路阻抗的无功分量

$$u_x = \sqrt{u_{kt}^2 - u_{rt}^2} \%$$

75°C 的短路阻抗

$$u_{k75} = \sqrt{(u_{r75})^2 + u_x^2} = \sqrt{u_{kt}^2 + \left(\frac{P_{kt}}{10S_n}\right)^2 (K^2 - 1)} \quad u_{kt} - \text{温度 } t^{\circ}\text{C} \text{ 下的短路阻抗}$$

三、变压器的特殊试验

1. 短路承受能力试验

试验目的：验证变压器的结构能否承受在规定的短路条件时，绕组、铁心及结构件不发生变形和损坏，短路后的变压器产品是否仍可正常工作。

对只具有两个独立绕组的变压器，通常只考虑三相短路，这种考虑实质上能充分满足其他可能包括在内的故障类型。除非另有规定，承受短路耐热能力试验的持续时间为 2s，承受短路动稳定试验的时间为 0.5s(I 类)、0.25s(II、III类)。

三相或三相组变压器的额定容量分三个类别：

注：

I 类： $\leq 2500\text{kVA}$

II 类： $2501\text{kVA} \sim 100\text{MVA}$

III类： $> 100\text{MVA}$

外部短路包括三相短路、相间短路、两相对地短路和相对地故障，以三相对称短路(出口短路)最为严重。

2.试验要求:

①短路电流允许偏差:

峰值电流: $\pm 5\%$; 有效值电流: $\pm 10\%$

②持续时间允许偏差: $\pm 10\%$

③试验次数: 单相变压器进行 100% 电流下的三次试验, 三相变压器每相进行 100% 电流下的三次试验, 共需进行九次试验。

对带分接的变压器, 应分别在额定分接和两个极限分接进行(三相变压器中间柱为主分接)。

④短路试验后的后续试验 要重复进行绝缘试验(含工频耐压、感应耐压和局部放电), 试验电压 100%, 如果规定要进行雷电冲击试验, 则在重复的例行试验后进行。

按规定, 短路试验前要进行吊芯并画线, 画线分相进行, 每相在高、低压两侧面绕组由上至下画线, 线条宽度为 10mm, 并拍下彩色照片。



短路承受能力试验



印度 Tesla 变压器

3.短路电流计算方法

计算对称短路电流值，用户需提供系统安装时的视在容量。如无规定在下表中选取：

标称系统电压/KV	设备最高电压 U_m /KV	短路视在容量/MVA
6、10、20	7.2、12、24	500
35	40.5	1500
66	72.5	5000
110	126	9000
220	252	18000
330	363	32000
500	550	60000
750	800	83500

GB1094.5-2008 附录 B 中有北美与欧洲现用容量；如无规定系统零序阻抗与正序阻抗之比为 1~3

对于具有两个独立绕组的三相变压器，对称短路电流方均根值I应按下式计算：

$$I = \frac{U}{\sqrt{3} \times (Z_t + Z_s)}$$

I----对称短路电流的方均根值（kA）； U----所考虑绕组的额定电压（kV）；

①变压器的短路阻抗 $Z_t = \frac{U_k \% \times U_r^2}{100 S_r} \Omega$

$U_k \%$ ---短路阻抗百分数、 U_r ---所考虑绕组的额定电压kV、 S_r ---变压器额定容量MVA

② 系统短路阻抗 $Z_s = \frac{U_s^2}{S} \Omega$

U_s ----标称系统电压，单位为千伏（kV）；

S ----系统短路视在容量，单位为兆伏安（MVA）。

对于Ⅰ类变压器，如果系统短路阻抗等于或小于变压器短路阻抗的5%，则在计算短路电流时

系统短路阻抗可忽略不计。

试验应在被试相的电流达到最大非对称值时进行。非对称试验电流的第一个峰值（kA），

按下式计算：

$$i = I \times k \times \sqrt{2}$$

系数 $k \times \sqrt{2}$ 与X/R有关。其中：

X----变压器的电抗与系统电抗之和（ $X_t + X_s$ ），以 Ω 表示；

R----变压器电阻与系统电阻之和（ $R_t + R_s$ ），以 Ω 表示，其中 R_t 以参考温度下的电阻。

系数 $k \times \sqrt{2}$ 的值

X/R	1	1.5	2	3	4	5	6	8	10	14
$k \times \sqrt{2}$	1.51	1.64	1.76	1.95	2.09	2.19	2.27	2.38	2.46	2.55

注：若 X/R 为 1~14 之间的其他值，则 $k \times \sqrt{2}$ 可用线性插值法求得。

在短路电流计算中若包括了系统短路阻抗时，假定系统的 X_s/R_s 值等于变压器的 X_t/R_t 值。

当 $Z_s < 0.05Z_t$ 时，对主分接可用 x_t 和 r_t 代替 X_t 和 $R_t(\Omega)$ 。

其中：

x_t --- z_t 的电抗分量，%；

r_t ---参考温度下 z_t 的电阻分量，%；

z_t ---参考温度下的变压器短路阻抗，%。如果无其他规定，当 $X/R > 14$ 时，系数假定为：

对 II 类变压器，取 2.55；对 III 类变压器，取 2.69。

K_p 与 $\frac{X_s}{R_s}$ 的数值关系见图 4-14 所示曲线。工程设计中 K_p 的取值以及 i_p 的计算值如下：

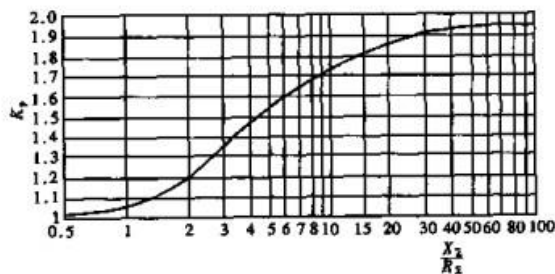


图 4-14 K_p 与比值 $\frac{X_s}{R_s}$ 的关系曲线

- (1) 当短路发生在发电机端时，取 $K_p = 1.9$ ， $i_p = 2.69 I_k''$ ， $I_p = 1.62 I_k''$ 。
- (2) 当短路发生在发电厂高压侧母线时取 $K_p = 1.85$ ， $i_p = 2.62 I_k''$ ， $I_p = 1.56 I_k''$ 。
- (3) 当短路点远离发电厂，短路电路的总电阻较小，总电抗较大 ($R_z \leq \frac{1}{3} X_z$) 时， $T_f \approx 0.05s$ ，取 $K_p = 1.8$ ， $i_p = 2.55 I_k''$ ， $I_p = 1.51 I_k''$ 。
- (4) 在电阻较大 ($R_z > \frac{1}{3} X_z$) 的电路中，发生短路时，短路电流非周期分量衰减较快，可取 $K_p = 1.3$ ， $i_p = 1.84 I_k''$ ， $I_p = 1.09 I_k''$ 。

冲击系数 K_p 的选择----《工业与民用配电手册》

系数 $k \times \sqrt{2}$ 的值

X/R	1	1.5	2	3	4	5	6	8	10	14
$k \times \sqrt{2}$	1.51	1.64	1.76	1.95	2.09	2.19	2.27	2.38	2.46	2.55

注：若 X/R 为 1~14 之间的其他值，则 $k \times \sqrt{2}$ 可用线性插值法求得。

算例：

某10kV/0.4kV配电变压器参数如下，试计算其短路试验电流？

额定容量：630kVA

额定电压：10/0.4kV

额定电流：36.37/909.3A

短路阻抗 $U_k\% = 4.4$ ，负载损耗 $P_{kt} = 5.65$ kW。

解：

$$\textcircled{1} \text{ 系统阻抗 } Z_s = \frac{U_s^2}{S} = \frac{10^2}{500} = 0.2 \Omega$$

$$\textcircled{2} Z_t = \frac{U_k\% U_r^2}{100 S_r} = \frac{4.4 \times 10^2}{100 \times 0.63} = 6.984 \Omega \quad \text{则} \quad \frac{Z_s}{Z_t} \times 100 = 2.86\% < 5\%, \quad \text{所以系统短路阻抗可忽略不计。}$$

对称短路电流的方均根值 $I = \frac{U}{\sqrt{3} \times Z_t} = \frac{10}{\sqrt{3} \times 6.984} = 827 \text{ A}。$

参考温度下 z_t 的电阻分量 $r_t = \frac{P_{kt}}{100 S_r} = \frac{5650}{10 \times 630} = 0.8968$

$$X_t = \sqrt{U_k^2 - r_t^2} = 4.3076$$

所以 $X/R = 4.3076 / 0.8968 = 4.80$ ，由线性插值法求得系数 $k \times \sqrt{2}$ 为 2.17，

所以 $i = I \times k \times \sqrt{2} = 1794.6 \text{ A}。$

4.动稳定短路耐受试验后的判断标准(对 I 、 II 类变压器):

- a. 短路试验的结果及短路试验期间的测量和检查没有发现任何故障迹象; b. 重复的 100% 绝缘试验和其他例行试验合格, 雷电冲击试验(如果有)也合格;
- c. 吊心检查未发现诸如位移、铁心片移动、绕组及连接线和支撑结构变形等缺陷或即使发现缺陷, 但不明显, 对产品正常运行无有害影响;
- d. 未发现内部放电痕迹; e. 测试每相短路电抗值与原测试值差不大于:

同心式圆形线圈-----2% (如低压为箔绕, 且容量小于 10000kVA、短路阻抗大于 3%, 偏差允许不大于 4%);

同心式非圆形线圈---7.5%。

动稳定短路耐受试验后的判断标准(对III类变压器):

①应将变压器吊心，检查铁芯和绕组，并与试验前的状态相比较，以便发现可能的表面缺陷，如引线位置的变化、位移等。尽管这些变化不妨碍通过例行试验，但可能会危及变压器的安全允许。

②重复全部的例行试验，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。

③如果满足下述条件，则认为变压器短路试验合格。

a)短路试验的结果及短路试验期间的测量和检查没有发现任何故障痕迹； b)重复的例行试验合格，雷电冲击试验（如果有）也合格； c)吊心检查没有发现诸如位移、铁芯片移动、绕组及连接线和支撑结构变形等缺陷或虽发现有缺陷，但不明显，不会危及变压器的安全运行； d)没有发现内部放电的痕迹； e)试验完了后，以欧姆表示的每相短路阻抗值与原始值之差不大于 1%。

5. IEC60076-11:2004 和 GB1094.11-2007 规定的三项特殊试验（干变）

在变配电领域，变压器是电力系统的关键设备。为保证设备和人员的安全，变压器在其运行状态中，应对各种情况下的电网异常、负荷剧烈变化及环境的侵蚀有足够的抵抗能力。

1. 气候试验（C1、C2）Climatic Class

C1=最低允许运行温度-5℃，运输和存储最低温度-25℃，用于户内设备；

C2=运行、运输和存储最低温度-25℃，用于户外设备；

2. 环境试验（E0、E1、E2）Environmental Class

E0=干燥清洁环境，无凝露和污染； E1=偶尔有凝露，少量污染； E2=经常有凝露，高污染或不利条件同时存在；

3. 燃烧试验（F0、F1、F2）Fire behavior class

F0=无防火考虑；

F1=考虑火灾可能，要求最低可燃性，试验开始 60min 后变压器燃烧应自动熄灭；
变压器材料中不应含有卤族元素和有毒气体，燃烟排放应被限制在最低限度；

F2=应满足 F1 的所有要求，同时变压器可以在外部火焰中运行一段时间；

KEMA %C. E. F?;±.”《Z》J1

试验 C2a
(根据标准附录ZB.3.2.a进行)

荷兰KEMA实验室
试验报告n° 31813.00-HSL 94-1258
630KVA n° 601896.01

Trihal变压器放入预先在8小时内降至-25°C(±3°C)的温控室内12小时。

测试结果
变压器经过目测检查后,然后进行介电试验(试验电压为额定电压的75%)和局部放电测试。

寿命。NF C52-115规定的水平为50pC。
Trihal的测试结果为≤2pC(1)
未出现闪络或击穿。

试验C2b(附加)
(根据标准附录ZB.2.2.b)

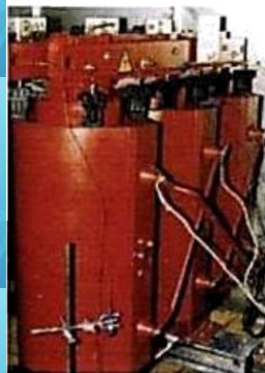
荷兰KEMA实验室
试验报告n° 31882.00-HSL-94-1259

Trihal变压器在室温下放入盐水中浸泡24小时。

测试结果
出盐水后5分钟之内,对变压器进行1.1倍额定电压的感应电压试验15分钟。
未出现任何闪络或击穿。
然后在变压器干燥以后,再进行介电试验(试验电压为额定电压的75%)和感应电压的测试。
未出现任何闪络或击穿。



KEMA 图片



KEMA 图片



KEMA 图片

(根据附录ZA.2.2.a)

Sansion
技术支持: 13006120547

1 KEMA' 50"
kt8 JBEfn 31813.00-HSL 94-1258
830KVA n•601896.01

1. 凝露试验

Trihal变压器放在温控室中6小时,温度控制在变压器上能产生凝露的温度,并持续蒸发水蒸气,使温控室内的湿度保持在93%以上。

测试结果

在蒸发停止后5分钟,将变压器放在原温控室内进行介电试验,试验电压为1.5倍额定电压。
未出现任何闪络或击穿。

2. 湿度渗透试验

试验方法

Trihal变压器放在温度为50°C(±3°C)湿度90%(±5%)的持续蒸发水蒸气温控室中,试验电压为1.5倍额定电压。
未出现任何闪络或击穿。

未出现任何闪络或击穿。

Sansion
技术支持: 13006120547

(根据标准附录ZA.2.2.b)

Sansion
技术支持: 13006120547

荷兰KEMA实验室
试验报告n° 31882.00-HSL 94-1259

Trihal变压器在室温下放入盐水中浸泡24小时。

测试结果

出盐水电后5分钟之内,对变压器进行1.1倍额定电压的感应电压试验15分钟。
未出现任何闪络或击穿。
电试验(试验电压为额定电压的75%)和感应电压的测试。
未出现任何闪络或击穿。



KEMA 图片

(根据标准ZC.3)

Sansion
技术支持: 13006120547

CNPP(法国国家预防与保护中心)
试验报告n° PN94 4636
630KVA n•601896.01

变压器的一个完整线圈放在按IEC 332-3(用于测试输电电缆)规定的试验中。
对24KW加热器加热,按照标准,试验时间为60分钟。

测试结果

试验中不断进行温度测量,按照标准规定,应低于或等于420°C。
t=45分钟时:温度为85°C,见图2(标准规定≤140°C)。
t=60分钟时:温度为54°C,见图2(标准规定≤80°C)。
没有检测到任何有毒气体产生,如:盐酸(HCl),氢氰酸(HCN),氢溴酸(HBr),氢氟酸(HF),二氧化硫(SO2),脱氢蚁酸(HCOH)等。

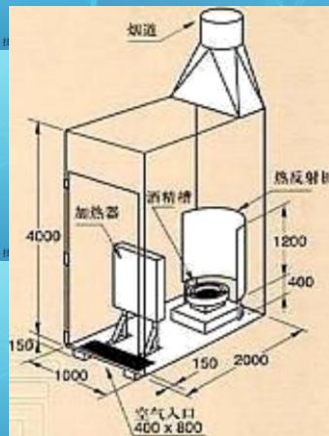


图1: IEC 332-3 试验小室



KEMA 图片

Sansion
技术支持: 13006120547

Sansion
技术支持: 13006120547

Sansion
技术支持: 13006120547

Sansion
技术支持: 13006120547

四、变压器冲击试验简介

0.变压器冲击试验的目的：

变压器在运行中可能遭受大气雷电过电压、操作冲击过电压，为模拟冲击过电压下变压器绝缘的耐受能力。

1.变压器冲击试验的发展

20 世纪 20 年代末美国已出现 110~220kV 电力系统，变压器容量已经达到几万千伏安。西屋与 GE 公司注意到雷电作用在输电系统架空线上并传入变压器绕组中，于是考虑到如何施行工厂内的变压器冲击试验。正因为要进行雷电冲击，马克斯威尔（Maxwell）发现了电容器并联充电用球系串联放电，提高了冲击电压获得了冲击发生器，于是才能施行变压器冲击试验。

当时的冲击试验不太明白探伤。变压器冲击试验之后，再做感应试验以希望冲击故障转化为感应击穿，不再击穿则为冲击试验通过。其中绝大多数不能再次击穿，原因是冲击波分布首端区域高，而末端区域低，而感应分布是均匀的，冲击击穿处与其后的感应位置不重合，这样就导致冲击后靠感应耐压验证失效。那时仅有分压器而示波器尚缺，记录入波波波形仍有困难。

大约 20 世纪 30 年代初发明了示波器，配上分压器逐步可以观察和记录波形。变压器低压侧的波形畸变则可以指示变压器冲击试验中有损坏，但是入波示熵（伤）灵敏度极低，一般 10%以上段、匝间故障才会显示，而 10%以上的故障不多，所以这种方法也不太有效。

到了 20 世纪 30 年代末，当美国、英国等国都苦于无法解决变压器冲击试验显示故障方法（示熵）时，1939 年苏联莫斯科变压器厂别尔林工程师提出在变压器油箱中加一个临时电极，认为入波在高压绕组发生损坏后波形发生变化，传到临时电极上则波形也会随之而变，这样从原理上可以判断故障。

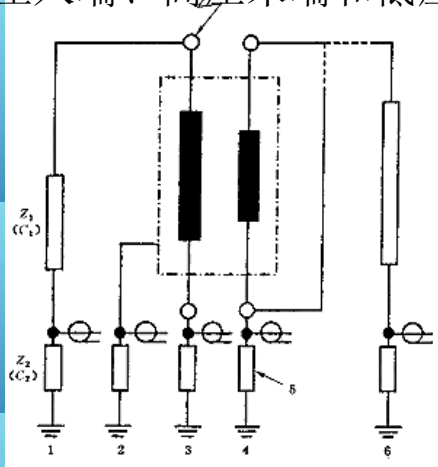
这种方法试验了一段时间以后被证明是有效的，初步解决了示熵方法，但是太麻烦，于是他们联想到中低压绕组短路后作为一个电极引出，也能起到同样的效果，就是低压电容电流示伤法。1944 年美国哈古斯发展了高压中性点示伤，它有更高的灵敏度，这就是目前普遍采用的中性点示熵方法。

2. 变压器冲击试验示熵（伤）原理

当一个冲击波作用于高压绕组首端后，入端分压器记录入端波形，其后按变压器绕组内部电感电容链和对地电容分布链传播。在中性点为传导波形，在低压侧为电容耦合（传递）波，这两种波形为低频振荡叠加高频振荡无规律可言，对每台变压器均不一样，于是人们认为变压器示伤的基本原理有两条：

- ①**变压器为线性元件。**即在冲击电压下，频率达 $1\sim 10\text{MHz}$ ，铁心未饱和，为线性网络。
- ②**50%电压与 100%电压下波形比较。**认为 50%电压下绕组不会损坏，而 100%电压下波形不一样，则认为变压器发生了故障，即有匝、段间击穿或主绝缘放电击穿。

20 世纪 50 年代初德国人在 ETZ 电工杂志上发表文章，认为变压器冲击试验 3KO（示波）法最好，即高压入端、高压末端和低压端分别用三台示波器记录波形以发现畸变来联合判断故障。



- 1——电压测量电路；
- 2——油箱电流；
- 3——中性点或绕组电流；
- 4——电容传递电流；
- 5——分流器；
- 6——电压测量电路和传递电压；
- $Z_1(C_1), Z_2(C_2)$ ——分压器阻抗(电容)(也可见图 1)。

3.波形的定义

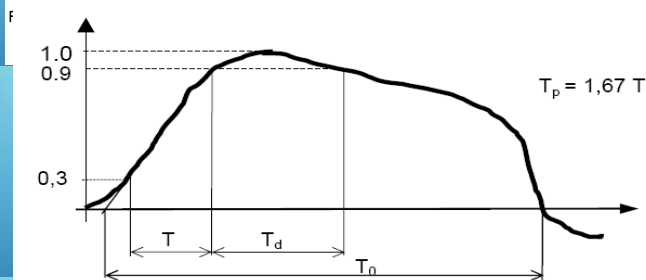
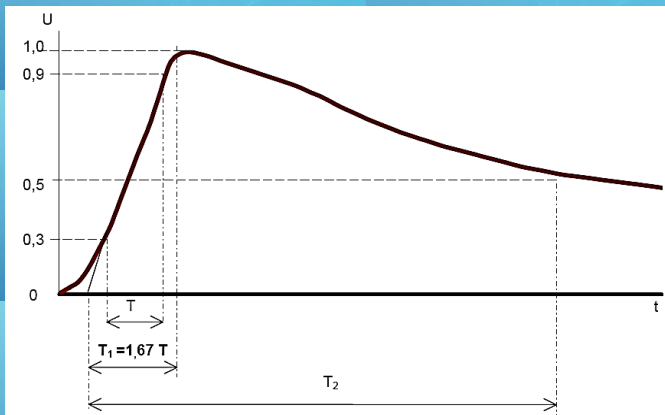


Fig. 17-2 Switching impulse

Front time $T_p > 100 \mu s$
 Time above 90% $T_d > 200 \mu s$
 Time to the first zero passage $T_0 > 500 \mu s$ (preferably 1000 μs)

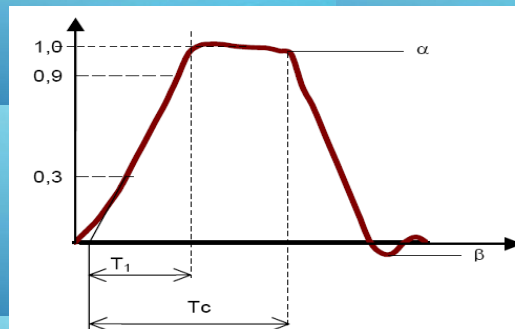


Fig 16-1 Chopped lightning impulse

Front time $T_1 = 1.2 \mu s \pm 30\%$
 Time to chopping $T_c = 2 \dots 6 \mu s$

$$Y_c = \frac{\beta}{\alpha} 100\% < 30\%$$

对于截波试验时反极性峰值 $> 30\%$ 的情况，可在截断回路中传入阻尼电阻来解决，由于截断时的电流无法控制，所以阻尼电阻 Z 不能过大，一般约为 $15 \sim 30 \Omega$ 。

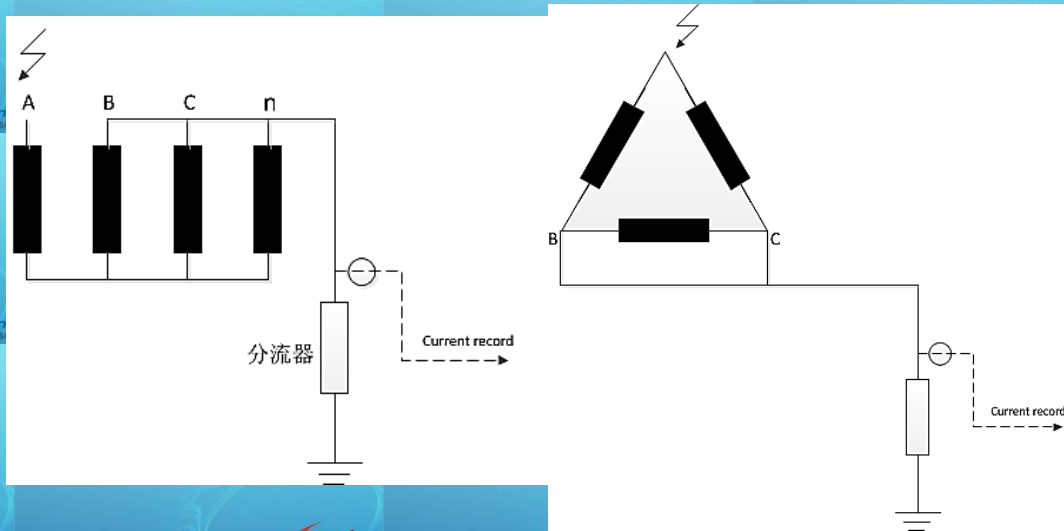
冲击电压波形的视在波前时间至少为 $100 \mu s$ ，超过 90% 规定峰值的时间至少为 $200 \mu s$ ，从视在原点到第一个过零点的全部时间至少为 $500 \mu s$ ，最好为 $1000 \mu s$ 。

注：这个冲击波形是有意选择的，它与 GB/T16927.1-2012 所推荐的 $250 \mu s / 2500 \mu s$ 标准波形不同，因为 GB/T16927.1 适用于具有不饱和磁路的设备。



ansion
支持: 1300612654

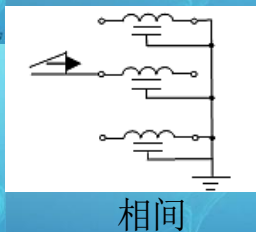
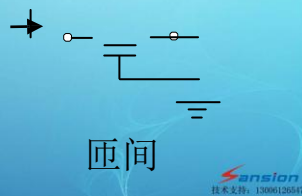




高压绕组为Y接时入波方式

高压绕组为△接时入波方式

a. 变压器的入波方式



b. 串联电抗器的入波方式
JB/T5346-2014



4.雷电冲击试验程序及其判断准则

a.雷电冲击波形极性：负极性 b.雷电

全波每个绕组线端冲击顺序为：

①干式电力变压器：1次 50~70%的全波

3次 100%全波

②油浸式电力变压器：1次 50~70%的全波

1次 100%全波 至少 1次

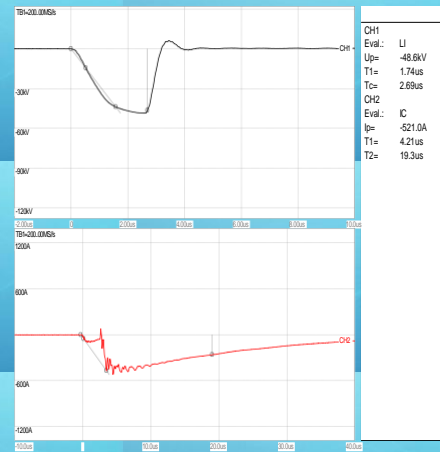
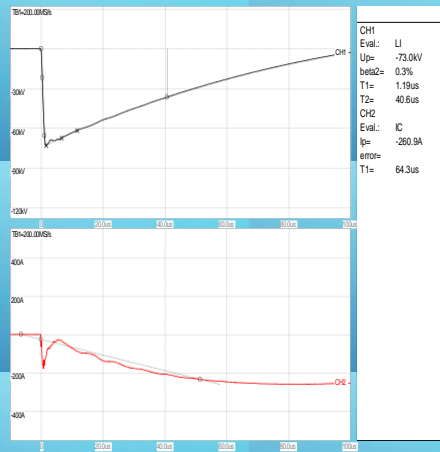
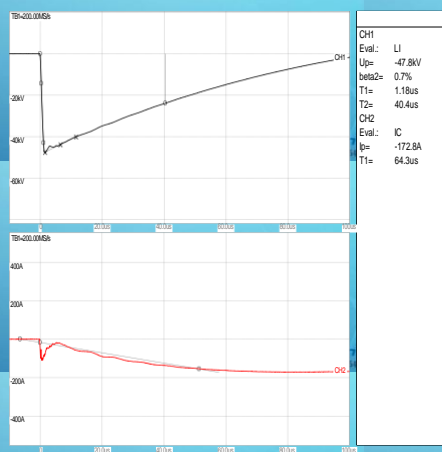
50~70%的截波 2次 100%的

截波

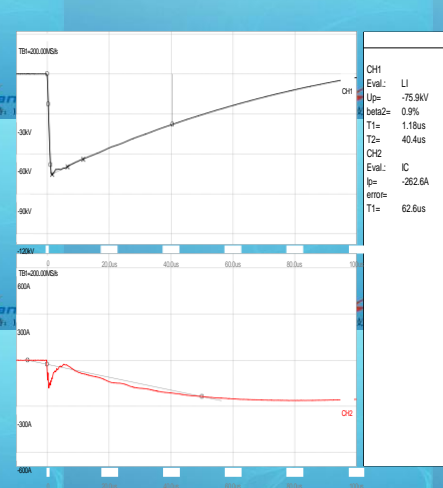
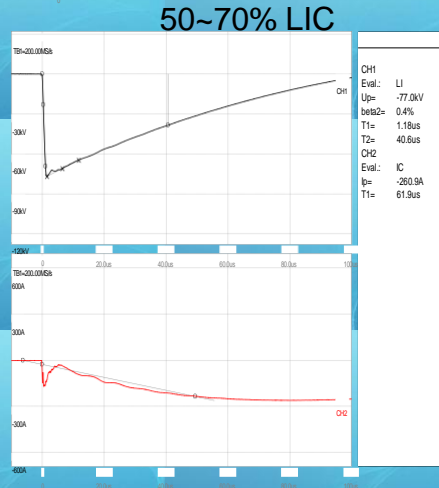
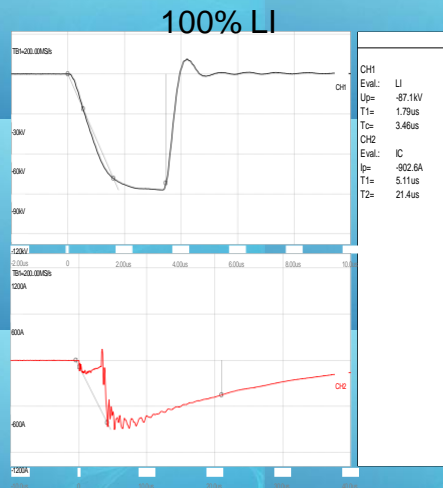
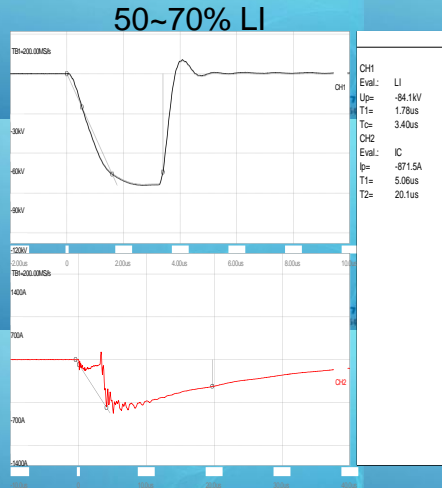
2次 100%的全波 c.试验判断准则：降低的试验电压下所记录的电压、电流瞬变波形图

与在全电压下所记录的瞬变 波形图无明显差异，雷电冲击试验合格。

d.分接范围问题：分接范围在 5%以内时，雷电冲击试验在主分接进行，如分接范围大于 5%，三相变压器应分别选择为最大、最小和主分接三个位置进行试验，每相进行一个分接位置的试验。



LI 雷电全波
LIC 雷电截断波



100% LIC

100% LIC

100% LI

100% LI

油浸式变压器雷电冲击试验序列(完整试验序列)

五、变压器、电抗器感应耐压试验

1.试验目的:

验证变压器绕组相间、绕组纵绝缘(匝间、层间、段间)的耐受电压强度。



变压器匝间绝缘损坏放电痕迹

变压器、电抗器是非常重要的电力设备，它们的产品质量一直以来是电力运行部门所关心的问题。大量现场统计数据表明，由变压器、电抗器纵绝缘损坏导致的绝缘击穿事故几率较高。纵绝缘是指变压器、电抗器绕组具有不同电位的不同点和不同部位之间的绝缘，主要包括绕组匝间、层间和段间的绝缘性能。IEC60076-3:2013 和 GB1094.3-2003 标准中规定的“感应耐压试验”则是专门用于考核纵绝缘性能的试验方法之一。



干式空心电抗器绕组匝间短路故障情况

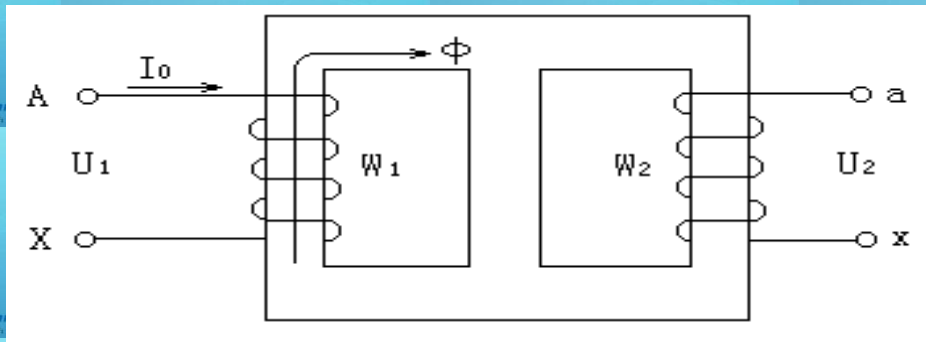
变压器、电抗器的纵绝缘性能主要依赖于绕组内的绝缘介质。由于目前变压器、电抗器的绕制仍以非真空绕制工艺为主，其绝缘介质很难保证100%纯度，其间难免混杂固体杂质、气泡以及微量水份。在长时工频电压以及暂态过电压作用下，变压器、电抗器纵绝缘的某些缺陷处就有可能发生局部放电、甚至击穿事故；而且带负载运行时绕组的温升又降低了绝缘介质的击穿电压，导致局部放电加重；此外，由于上述情况造成的绕组匝间短路故障将产生局部环流，使得设备的介质损耗显著增加，加剧绕组发热，如此长期工作下去，最终会导致绕组的热击穿和整台变压器、电抗器的毁坏。这一故障的早期表现就是变压器、电抗器的空载电流和空载功耗显著增加，绕组伴随有局部灼热、振动及啸叫等不良现象。

2.为什么要采用倍频电源进行感应耐压试验？

由于进行感应试验的电压为变压器额定电压的两倍，如不提高试验电源的频率，变压器铁心将严重饱和，并可能不能施加到 2 倍额定电压，因此，感应耐压试验和局部放电试验时，施加的电源的频率一般为 2 倍~4 倍工频。

$$E_1 = 4.44f W_1 \phi \times 10^{-8}$$

$$E_2 = 4.44f W_2 \phi \times 10^{-8}$$



当试验频率等于或小于 2 倍额定频率时，试验时间为 60s，如试验频率超过 2 倍额定频率，试验持续时间如下：

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

← 额定频率

← 试验频率

如果试验频率超过 400Hz，持续时间应不小于 15s。

100Hz-----60s

150Hz-----40s

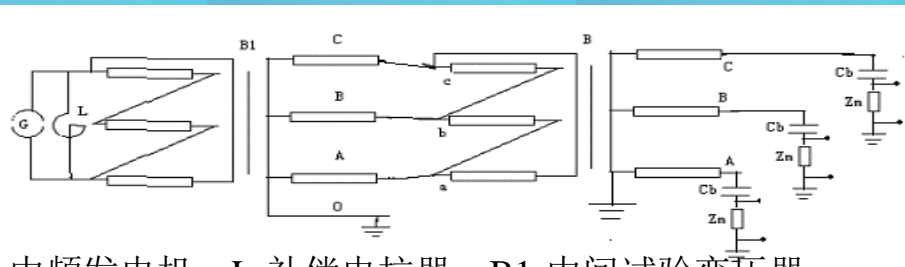
200Hz-----30s

合格判定准则：试验过程中，电压不突然下降、电流指示不摆动、没有放电声，试验合格。

3.变压器的感应耐压试验方法:

传统方法:

- 1.中频发电机组+励磁变压器、
- 2.三倍频发生器
- 3.操作冲击试验替代



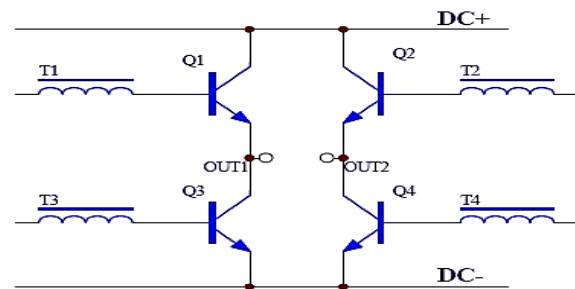
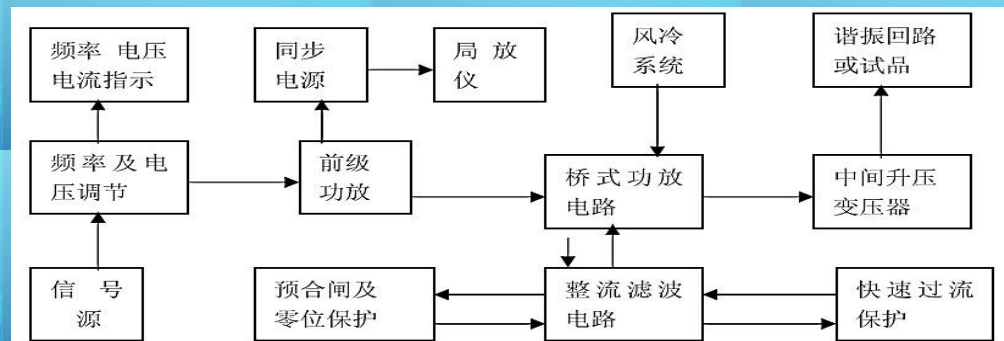
G-中频发电机; L-补偿电抗器; B1-中间试验变压器;
B-试品; C_b -变压器套管电容; Z_m -测量阻抗;
全绝缘变压器感应耐压试验回路图

中频发电机组+励磁变压器的缺点:

- ①对于分级绝缘的变压器来说, 感应耐压试验只能采取单相感应的方法来进行试验, 而一般的 中频发电机组又多是三三相的。感应试验时, 由于电枢反应使负载相与空载相得输出电压严重不平衡, 为了避免这种现象的发生, 一般要将三相发电机改接成单相输出。
- ②某些大型变压器在进行此项试验时所产生的容性无功功率较大, 为了防止试验时机组发生自激, 一般要用电抗器进行补偿, 使总的无功功率略呈感性, 这样在试验前就必须对试验时产生的无 功进行初步估算, 对试验人员的经验和水平提出了很高要求。
- ③受发电机组重量、运输条件的限制, 这种方法很难满足某些大型变压器的现场感应耐压试验需要。
- ④发电机组为旋转机械, 频率调节较为困难, 而且输出中常含有 5 次、7 次等高次谐波, 若不进行有效滤波, 很难作为带局放测量的感应耐压试验电源。

新方法:

近年来，以三极管线性功放技术及脉宽调制技术为基础的变频电源试验装置，经过十几年的发展应用，在大型变压器现场局部放电和感应耐压试验中解决了许多技术难题，逐步确立了技术优势，主要代表厂家有长沙海沃、武汉泛科及武汉三新电力设备制造有限。



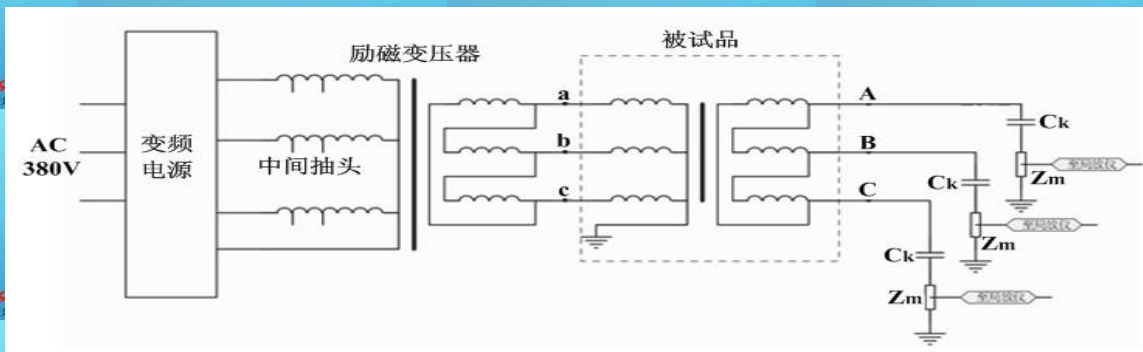
HVFS 型变频电源装置桥式放大电路原理图

变频电源装置和中频发电机组的比较

项目	变频电源装置	中频发电机组
输出频率范围	20~300Hz	频率固定，调频相对困难
工作电源	380V 电源	需要复杂的专用电源
补偿量	容量足够，220kV 及以下变压器无需补偿，330kV 以上变压器只需要很少的补偿电抗器	需要大量的电抗器补偿负载电容量，以免发生谐振和发电机自激
输出电压	试验电压能平稳地调节	一般在感性负载下运行，电压才能平稳。不宜在电容性负载下工作
便携性	体积小，便于现场试验	整套设备笨重，体积庞大
操作性	因频率联系可调，且具备自动调谐功能，操作简便	因频率固定，为寻找谐振点，试验之前要做较为精确的计算，对操作人员要求较高。
运行维护	简单、基本上免维护	发电机系统复杂，出现故障时的维护工作量大
噪音	噪声小	噪声大，需要有专门的发电机房

三极管线性功放技术和脉宽调制技术的比较

	三极管线性功放	脉宽调制调频
电压波形	标准正弦波	调制（近似）正弦波
干扰信号	模拟放大，晶体管工作在线性状态，不产生高次谐波且采用深度负反馈后能保证输出电源不失真。	IGBT工作在开关状态，需要调节导通角，因此产生复杂得高次谐波，干扰信号强且不易完全滤掉。
配套局放仪	通用、无特殊要求	只能采用带消影技术处理的专用局放仪。
自身局放量	自身干扰小，对供电电源滤波后，其自局放量可控制在10.0pC以内	自身干扰信号较大，必须以限波方式分段测试并经过专门的消影技术才能测量局放量，且难以达到局放试验要求。
自身功耗	较大	较小
体积重量	较大	较小
所需电源	较大	较小
价格	较高	较低
维护成本	更换晶体管等分散元件成本低	更换大功率模块成本高



采用变频电源装置的全绝缘变压器感应耐压试验回路图



500kV 分级绝缘变压器感应耐压现场试验

4. 试验程序—短时感应耐压试验（长时感应耐压试验程序见 GB1094.3-2003 第 11 章）



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

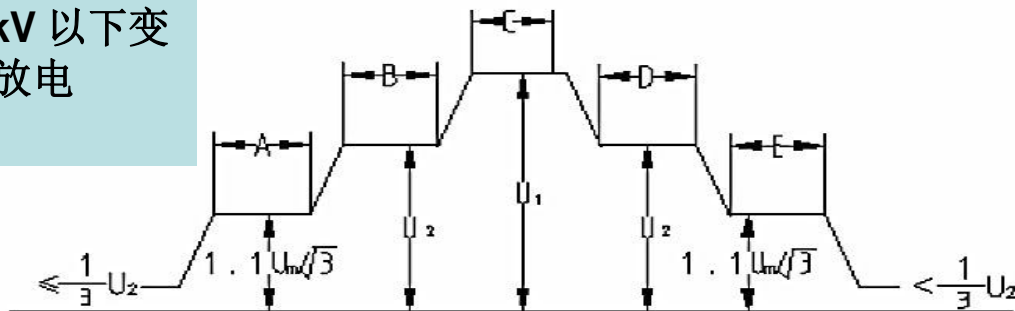
ACSD 试验中一般不进行局部放电测量；试验应从不大于规定试验电压值的 $1/3$ 电压开始，并与测量相配合尽快地增加到试验值。试验完应将电压迅速降低到试验电压的 $1/3$ 以下，然后切断电源。

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。

注： a. 适用于绝大数 35kV 以下变压器； b. 干变必测局部放电



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

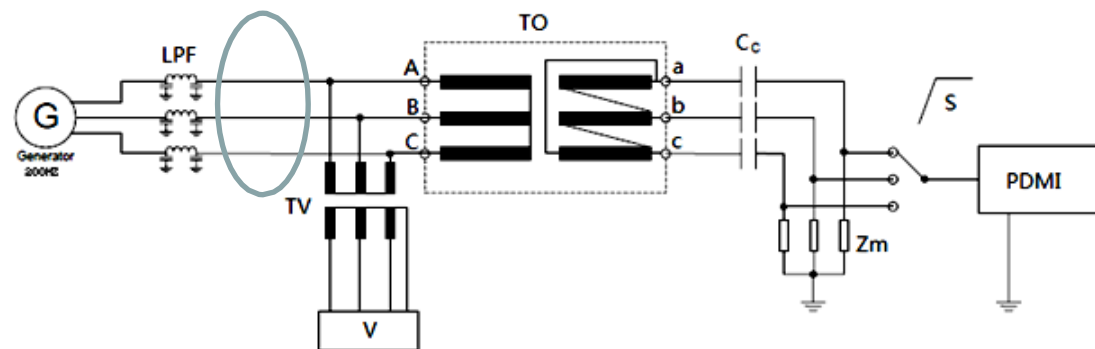
图 5 施加对地试验电压的时间顺序

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。

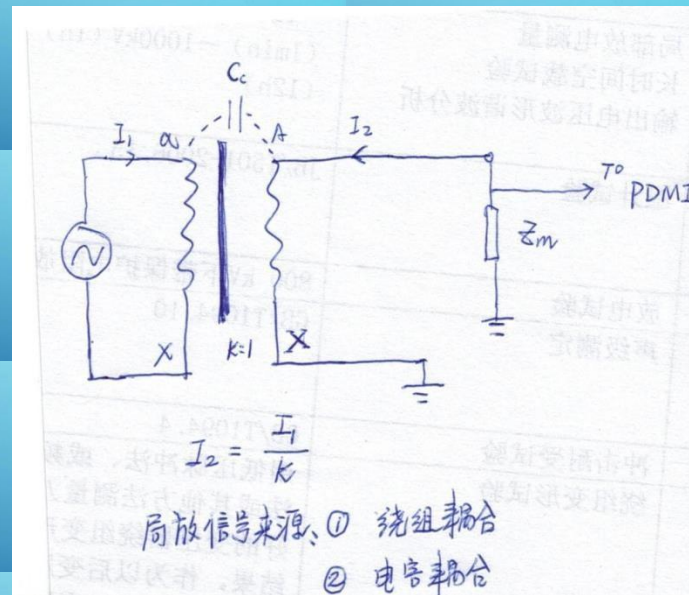
如果符合以下情况，则试验合格：

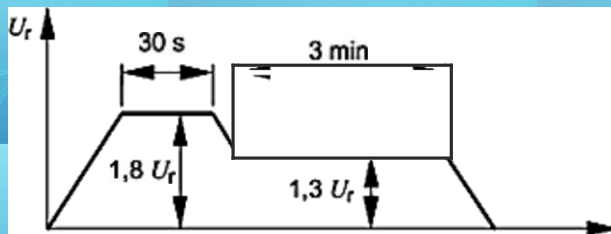
- a) 试验电压不出现突然下降；
- b) 在 U_2 下的第二个 5min 期间，所有测量端子的“视在电荷量” q 的连续水平不超过 300pC；
- c) 局部放电特性无持续上升趋势；
- d) 在 $1.1U_m / \sqrt{3}$ 下的视在电荷量的连续水平不超过 100pC。

如果发电机出口电压不够，还需要增加中间变压器



G	中频发电机	Generator	LPF	低通滤波器	Low-pass filter
TV	电压互感器	Voltage transformer	V	电压表	Voltmeter
TO	试品	Test object	Cc	耦合电容	Coupling capacitor
Zm	检测阻抗	Impedance	S	转换开关	Switch
PDMI	局放测量仪	Partial discharge Measuring instrument			





X'iltage application for partial discharge test

试验部位 testing position	加压部位 voltage applied to	被试端子 terminal	pre-stressing voltage (t-30s)		test voltage (t-190s)		实测值 value (pC)	要求值 required value (pC)
			应施电压 $1.8U_r(kV_{rms})$	实测电压 $U_r(kV_{rms})$	应施电压 $1.3U_r(kV_{rms})$	实测电压 $U_r(kV_{rms})$	实测值 value (pC)	要求值 required value (pC)
///	abc	A	3	6.	260	26	40	
		B		6.		26	40	
		C		35.9		260	40	
LV winding	ABC	a	180	18.0	130	29	10	
		b		17.9		30	20	
		c		18.0		30	40	

试验结果(Result): 通过(Passed).

注(Notes):

a) 试验频率(frequency): 200Hz;

b) 试验前采用 10pC 校准源对回路进行校准, 背景噪音为 $\leq 1.2pC$ (Step voltage generator: 10pC, background noise $\leq 1.2pC$).

5.电抗器的感应耐压试验

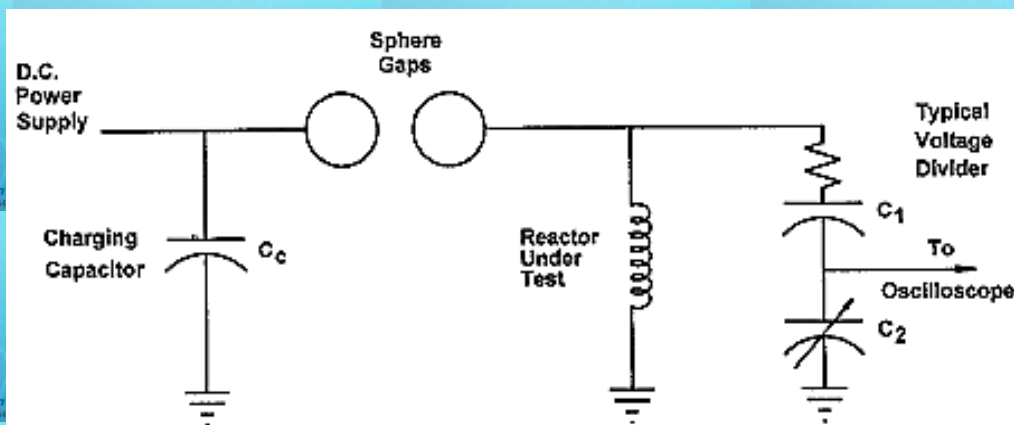
a.直接试验法

根据 GB1094.3-2003 和 GB/T1094.6-2011 的要求,对于 $U_m \geq 300\text{kV}$ 的电抗器产品,其感应耐压试验为特殊试验。目前,国内外的许多用户都要求进行这项试验。

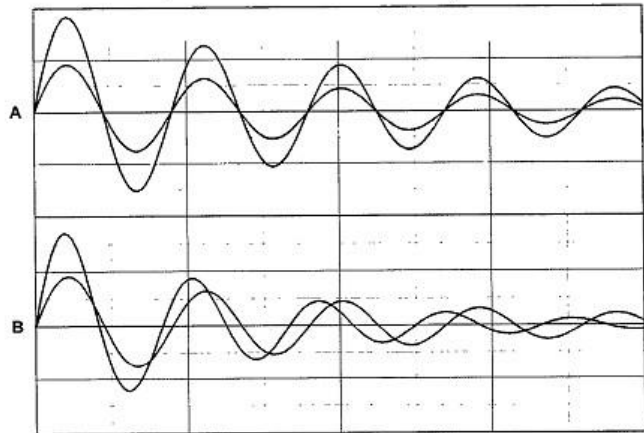
电抗器,特别是并联电抗器的感应耐压试验一直以来被认为是难以进行的,它需要比所示电抗器至少高一个电压等级的大容量试验变压器。瑞典 ABB 公司曾为了进行该项试验而制作了一台 $468\text{MVA}/900\text{kV}$ 的试验变压器;西门子的试验变压器为 $360\text{MVA}/1000\text{kV}$;原沈阳变压器厂为了进行该项试验于 1998 年制作了一台 $120\text{MVA}/1000/\sqrt{3}\text{kV}$ 的单相试验变压器。显而易见,各厂为了进行该项试验,均花费了大量资金来增大试验变压器的容量和电压等级,可见其试验难度和所需设备是不能和变压器的感应耐压试验相提并论的。

b.利用脉冲振荡试验装置进行感应耐压试验--（主要用于干式空心电抗器）

IEEE Std C57.16-1996 和 GB/T1094.6-2011 附录 G 推荐方法

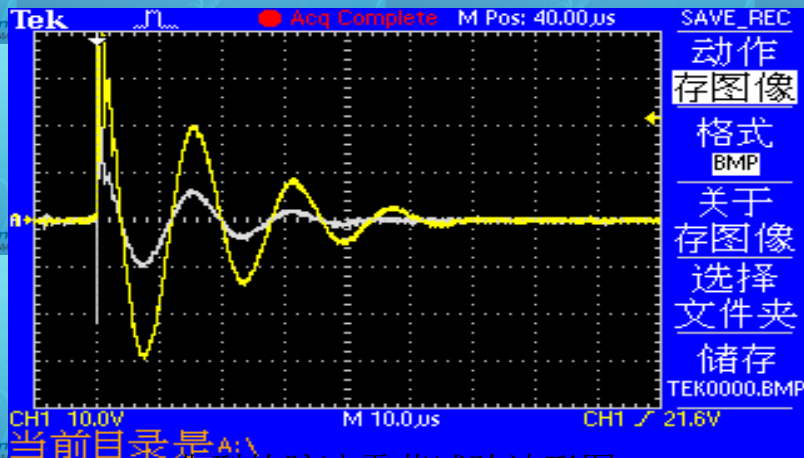


脉冲振荡试验装置



A: Oscilloscope showing a reactor that passed the turn-to-turn test.
B: Oscilloscope showing a reactor of the same rating as in Oscilloscope A, but having a turn-to-turn fault.
Note the shift in frequency and the increased damping.

施加一分钟较高幅值的电压，并录取波形。比较上述两个波形的震荡周期，如在全电压下出现匝间短路现象，两个波形的震荡周期和频率会发生变化，在一个周期内相位差往往不是很大，但震荡若干周期后，两个波形的相位将产生明显的差异，显现出前后两种试验电压下震荡频率和试品电感量的变化。



典型的脉冲震荡试验波形图

A change in period or rate of envelope decay, between the reduced and full wave, would indicate a change in coil impedance and thus an inter-turn failure.

c.雷电冲击试验替代法



雷电冲击试验时匝间绝缘击穿



匝间绝缘试验 串联

电抗器的入波方式
JB/T5346-2014

当试品无故障时，在降低电压和全试验电压下，两种波形形状基本相同，波形没有突变；若匝间绝缘存在故障，将使电压波形过零时间变短，短路匝数越多越明显。另外使电流波形的最大值时间和电压波形的过零时间产生差异，电流波形的最大值时间提前，短路匝数越多越明显。


冲击试验的主要缺点：


在冲击电压作用下，电抗器是一个复杂的具有分布参数的电路，由于雷电冲击电压的波头很陡，作用于上述分布参数电路时，电抗器绕组中起始电压分布是不均匀的，其不均匀程度与邻近线圈及对地电容 C_0 和邻近线匝之间的电容 K_0 的比值 α 有关， α 越大，绕组端部电位梯度越大，对这部分匝间绝缘的危害就越大，电位梯度较小的部位，其匝间就达不到所要求的试验电压。因此冲击起始电压分布的不均匀性，影响了匝间绝缘试验的有效性。

六、温升试验

1. 试验目的:

验证变压器在标称工作状态下, 主体所产生的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, 发现产品是否存在局部过热现象。

 变压器分接范围在 $\pm 5\%$ 内, 只需在额定分接进行温升试验, 超出 $\pm 5\%$ 的变压器一般应在最大电流分接进行试验。

 温升试验标准的制订与变压器产品所使用的绝缘材料直接相关, 温升水平也由产中所使用的耐热等级最低的绝缘材料决定。

不同耐热等级绝缘的参考温度和允许温升

绝缘耐热等级	绝缘系统温度($^{\circ}\text{C}$)	允许的温升(K)
A	105	60
E	120	75
B	130	80
F	155	100
H	180	125
C	220	150

2.温升试验方法

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。

■ **直接负载法** ——→ 在变压器的绕组一侧供给额定励磁，另一侧绕组连接额定负载，这是最真实的温升情况，但由于真正的额定负载要求很难满足，在实验室实际上很难实施。

■ **相互负载法** ——→ 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。

■ **短路法**



温升试验稳定判断依据：

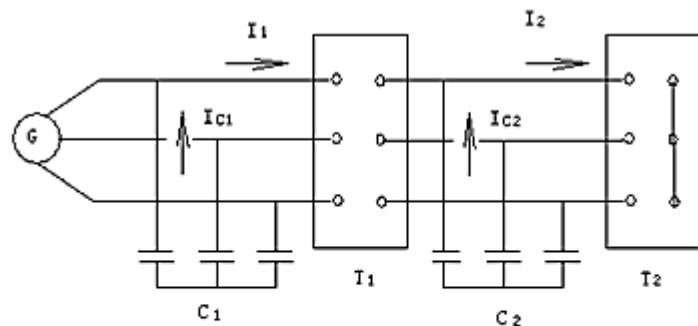
按 GB1094.2-2013：当温升变化值在 3 个小时内每小时不大于 1K 时，即认为温升已经稳定。



温升试验时，环境温度应保持在 5℃ ~40℃，环境温度至少布置 4 个点。

3. 补偿容量的估算

变压器的温升试验通常采用短路法。短路法就是将变压器的一侧短路，从另一侧送电，试验回路与负载试验相同。试验电源可以从电网直接取电或自备试验发电机组。当被试变压器容量较大时，通常需要较大容量的试验电源，由于变压器的短路阻抗以电抗为主，较大容量的被试变压器实际上是一个较大的感性负载，所以在做温升试验时可采用电容器组补偿的方法，即用电容器组的无功电流来补偿被试变压器的感性无功电流，试验电源的容量可按被试变压器的有功损耗容量来确定，这样就大大减小了所需电源容量。

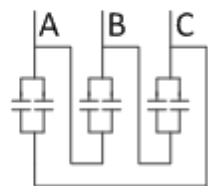


G-发电机 T₁-中间变压器 T₂-试验变压器 I_{C1, 2}-补偿回路电流

C_{1, 2}- 补偿回路电容 I₁-中变低压侧电流 I₂-试验电流

负载损耗和温升试验原理图

变压器参数							所需电 源容量 kVA	端电压 U (V)	补偿电容器接法	
变压器类型	变压器容 量 kVA	联结 组 标号	空载损耗 (P ₀) kW	负载损耗 (P _k) kW	空载 电流%	短路 阻抗%			补偿容量 kvar	
10000kVA-31500kVA 三相双绕组无励磁调 压电力变压器	3150	YNd11	3.51	24.3	0.7	5.5	198.28	588.38	163.06	(2并*3相) Δ
	4000		4.32	28.8	0.7	5.5	253.00	589.81	163.85	(2并*3相) Δ
	5000		5.13	33.03	0.7	5.5	317.71	591.17	246.91	(3并*3相) Δ
	6300		6.12	36.9	0.6	5.5	403.97	593.86	332.21	(4并*3相) Δ



2并*3相

1050V, 250uF

$$Q = \omega c U^2 = 3 \times 314 \times 500 \times 10^{-6} \times 589.81^2 \times 10^{-3} = 163.849 \text{ kVar}$$

补偿电容器 2并*3相 Δ

温升试验所需电源容量与变压器的阻抗电压成正比，其计算公式如下。

$$S = S_r U_k \times \frac{P_k + P_0}{P_k}$$

S_r ---变压器额定容量 kVA U_k ---阻抗电压器百分数

P_k ---负载损耗 kW P_0 ---空载损耗 kW



温升试验

技术支持: 13006126547

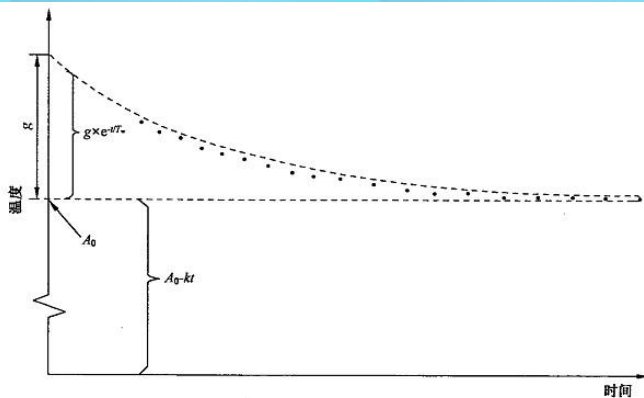
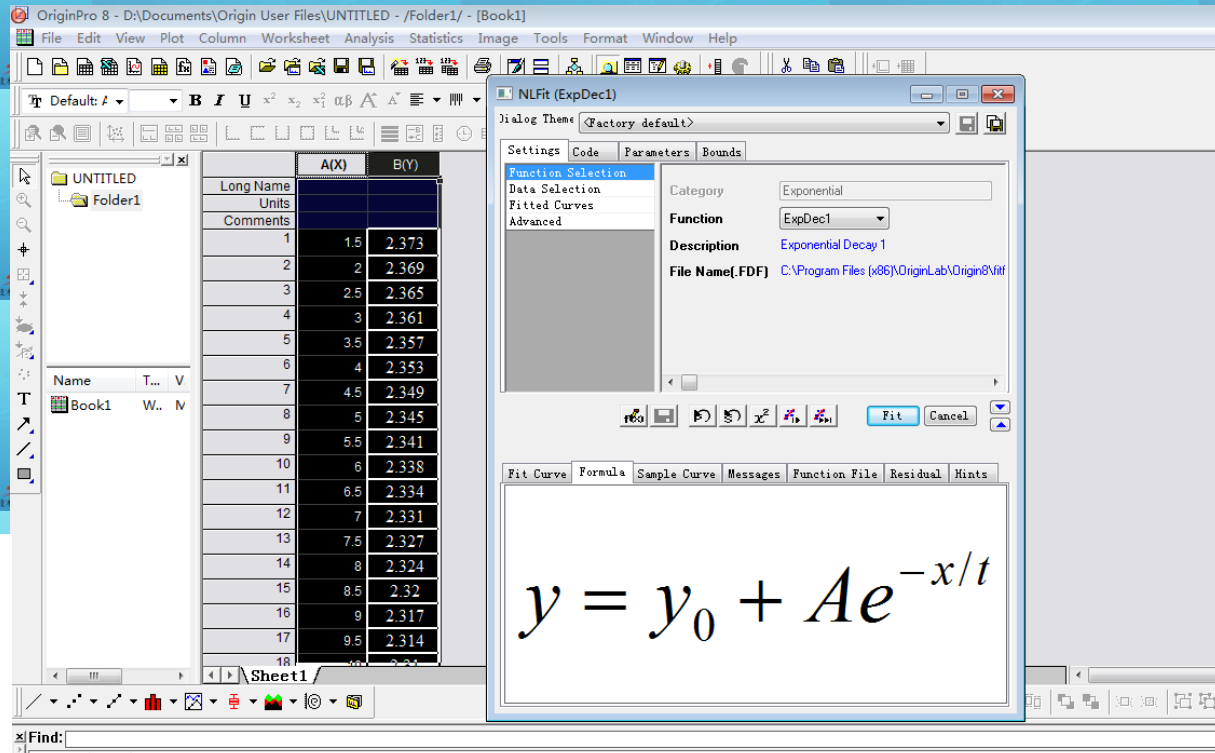
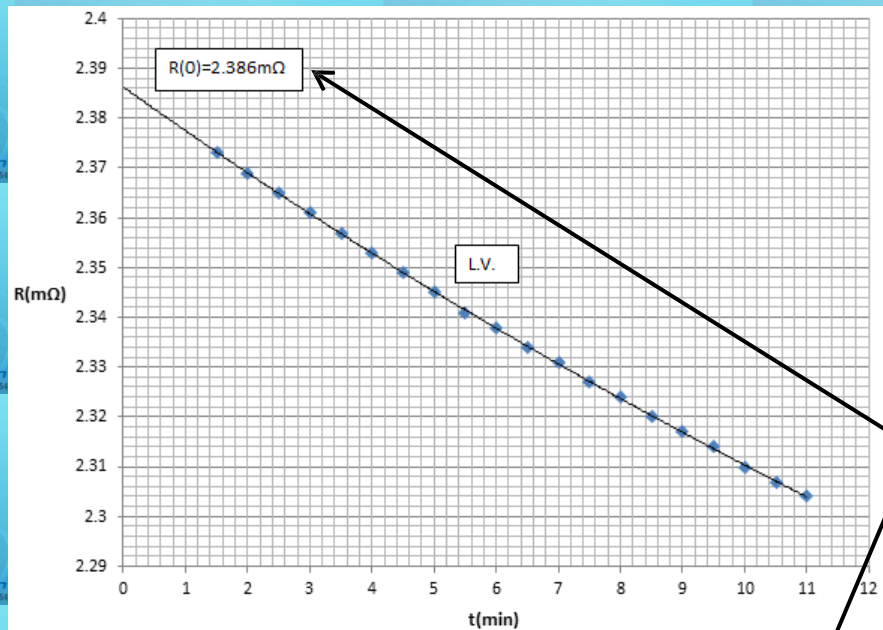


图 B.3 断开电源后的绕组平均温度变化



Origin8.2 用于拟合温升试验数据



Notes

Input Data

Parameters

	Value	Standard Error
y0	2.10342	0.01617
A1	0.28266	0.01591
t1	32.05407	2.22141

Iterations Performed = 7
Total Iterations in Session = 7
Fit converged - tolerance criterion satisfied.

Statistics

	B
Number of Points	20
Degrees of Freedom	17
Reduced Chi-Sqr	6.76304E-8
Residual Sum of Squares	1.14972E-6
Adj. R-Square	0.99985
Fit Status	Succeeded(100)

Fit Status Code :
100 - Fit converged

Summary

	y0		A1		t1		Statistics	
	Value	Error	Value	Error	Value	Error	Reduced Chi-Sqr	Adj. R-Square
B	2.10342	0.01617	0.28266	0.01591	32.05407	2.22141	6.76304E-8	0.99985

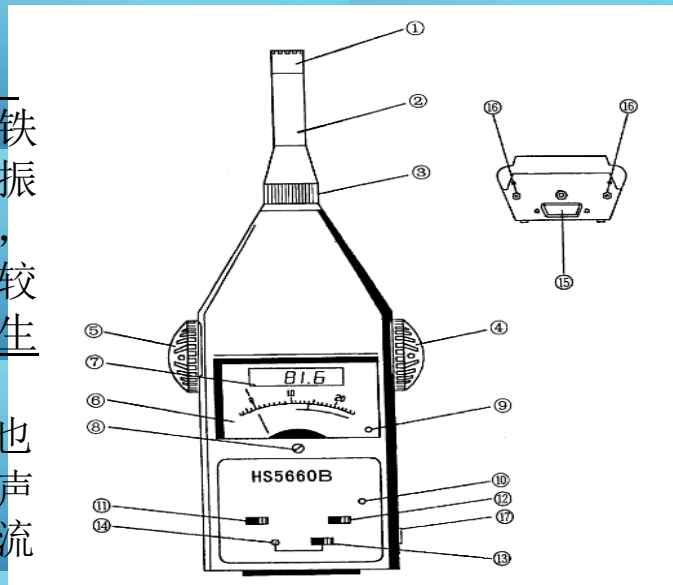
$$y = y_0 + Ae^{-x/t}$$

$t=0$ 时, $y_0 = 2.10342 + 0.28266 \times e^0 = 2.3861$

七、变压器、电抗器的声级测量

变压器所发出的可听噪声是由铁心的磁滞伸缩变形和绕组、油箱及磁屏蔽内的电磁力引起的。历史上一直认为磁场诱发铁心叠片沿纵向振动所产生的噪声是变压器噪声的主要成分。振动的幅值与铁心叠片中的磁通密度及铁心材质的磁性能有关，而与负载电流关系不大。但随着目前铁心设计的进步及采用较低的磁通密度，铁心中的噪声已有所降低，于是电磁力所产生的噪声便成为变压器噪声不可忽视的成分。

电流在绕组中通过会在绕组中产生电磁力，此外漏磁场也能使结构件产生振动。电磁力与电流平方成正比，而发射的声功率与振动复制的平方成正比。因此发射的声功率与负载电流有很明显的关系。



声级计

4.测量轮廓线

a.由于变压器产品表面并不规则，在测试前需确定基准发射面，认为声音是从基准发射面发出的。

b.测试要在与基准发射面相距一定距离的规定轮廓线上进行，测试点均匀分布，一般间隔不大于 1m。

一般规定的轮廓线与基准发射面相距 0.3m，但对无保护外壳的干式变压器，由于安全原因，距离应选为 1m 或 2m。

注：

测试点不能少于 6 个 当测试点大于

10 个时，允许只在
试品周围均匀分布的 10 个测量点 上
测量背景噪音

c.测试的高度与变压器产品的高度有关，变压器高度低于 2.5m，规定轮廓线位于高度一半处；高于 2.5m，应规定两条轮廓线，分别位于产品高度 1/3 处和 2/3 处。

5.测量表面积 S 的计算

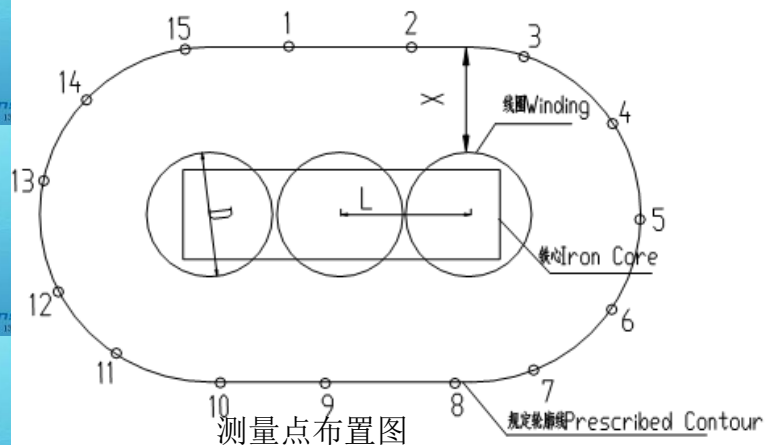
①距基准发射面 0.3 m 处的测量

以平方米 (m^2) 表示的测量表面面积 S , $S = 1.25hl_m$
式中: h —高度, m 。对于无保护外壳的干式变压器, 指铁心及其框架高度 l_m —规定轮廓线的周长, m ; 1.25—考虑试品上部发射声能的经验系数

②距基准发射面 2m 处的测量 以平方米(m^2)表示的测量表面面积 S , $S = (h + 2)L_m$ 式中: h —变压器高度或包括风扇在内的冷却设备高度, m ; L_m —规定轮廓线的周长, m ;
2—测量距离, m

③距基准发射面 l_m 处的测量

以平方米 (m^2) 表示的测量表面面积 S , $S = (h+1)L_m$ h —连同框架在内的铁心高度 m ; L_m —规定轮廓线的周长, m ;
1—测量距离, m ,



声级测定数据 { Data of sound level determination (dB) }

测量点 measuring point	位置 position	背景噪音 background noise	
	1/2 h	试验前 before test	试验后 after test
01	57.9	44.0	44.2
02	58.0	44.2	44.1
03	57.2	43.9	43.2
04	57.9	43.5	43.3
05	55.5	43.8	44.0
06	55.7	44.2	44.2
07	58.9	44.1	44.3
08	58.2	43.5	44.3
09	58.4	43.5	43.6
10	57.0	44.6	43.5
11	57.3	44.6	43.5
12	57.0	43.2	44.0
13	58.4	43.5	44.0
14	57.6	43.5	43.9
15	57.9	44.5	44.5

声级测定结果

Result of sound level determination

规定轮廓线周长 l_m prescribed contour(m)	14.0
线圈中心距 L Distance between the center of two H.V. windings(m)	1.1
线圈直径 D Diameter of the H.V. winding(m)	1.04
测量表面积 S measurement surface(m ²)	48.02
环境修正值 K environment Correction value(dB)	0.40
修正的平均 A 计权声压级 corrected average A-weighted sound pressure level(dB)	57.0
声功率级 sound power level(dB)	73.8

试验结果(Result): 通过(Passed)。

注(Notes):

a)分接位置(tapping position): 额定分接(rated tapping);

b)额定端电压(Rated terminal voltage): 高压绕组 20kV/低压绕组 10kV;

c)距离基准发射面 1.0m 进行声级测定(Measurements made at 1.0m from the principal radiating surface);

d)测量时声级计位于试样高度一半的水平面上(The microphone were placed on a horizontal plane at half the height of the tested object)。

声级测量环境修正值 K、A 计权声压级和声功率级的计算详见 GB/T1094.10-2003 第 11 章, 在此不作深入讲解。



Thanks !