

# 高电压试验技术

清华大学电力工程系高电压技术教研组

1979.

## 前 言

按现行“高电压技术及设备”专业的教学计划本专业学生在毕业前应修完四门专业课：高电压绝缘，高电压实验技术，电力系统过电压及高压开关电器。这是一本专业课的教材。这门课是在学生已学完基础课及技术基础课以后才进行的。在学本课前，学生应掌握高等数学，普通物理，电工基础，电机学及电子学方面的知识，并最好已对放电理论有初步了解。在文化大革命前，为讲这门课，曾编有“高电压测量及试验室设备”讲义，此次新编教材，在原有讲义的基础上，增添了新章节和新内容，在深度和广度两方面，都比原讲义有所提高，所以在近几年内，此书不仅作为大学本科教材，亦将兼作本专业研究生在这方面的自修读物。

本书内容包括试验设备及测量技术两方面。主要阐明高压试验室内主要的试验设备和测量仪器的原理，操作和部分设计方法。高电压试验方法常因试品不同而有异。要一个一个地来解释各种试品的具体试验方法，非本书篇幅所能包括，而且只有在学生已学习高电压绝缘结构以后才有可能。本书只对一般试验程序有所阐述，大致以我国高电压试验技术国家标准（GB311—64）和国际电工委员会的高电压试验技术规程为选材范围。学完本课及教学实验后，应能掌握一般高电压的试验方法。至于产品试验的特殊要求，在工作需要时，可通过学习产品试验规程来解决。本书内容包括电力系统中予防性试验所用主要设备，仪器和试验方法，至于予防性试验的具体要求和结果分析，由高电压绝缘课中讲解。

本书内容主要适合于在电力运行部门和电工制造部门从事高电压测试工作的工程技术人员。鉴于高电压测试技术的应用范围已远远超过上述两个部门，尤其近年来在技术物理部门得到大量应用和迅速发展，在取材时已作了适当照顾。

建国三十年来，我国在高电压技术方面有较大发展。目前电力系统的最高运行电压为 330 千伏，500 千伏的线路马上就要出现。制造部门对 110—330 千伏级的设备已能成套供应，对 500—750 千伏级的设备正在积极研制之中。随着运行电压的提高和制造业的发展，国家投资建立了许多高电压试验室，其中比较突出者，如西安高压电器研究所和沈阳变压器研究所的高电压试验室，都规模较大，参数较高，有可能进行 500—750 千伏级绝缘试验。至于电力科学研究所属北京高电压研究所和武昌高电压研究所已建和在建的露天试验设备参数，目标已针对 1000 千伏级以上的绝缘试验。国内有关高电压试验技术的书，目前还比较少。去年机械出版社出版的电机工程手册，其中有高电压技术专册，是目前全面介绍高电压试验技术的仅有读物。在编纂此书时，除了参考国内的有关书刊外，还借助于较多国外书刊，其中主要者有：

- (1) J·D·Craggs and J·M·Meek: High Voltage Laboratory Technique 1953
- (2) A. A. Воробьев: Высоковольтное Испыгательное Оборудование и Изме-

рения 1960

(3) 电气学会: 绝缘试验法 ハンドブック 1971

(4) Adolf J. Schwab: High-Voltage Measurement Techniques 1971

(5) G. W. Bowdler: Measurements in High Voltage Test Circuits 1973

至于引用期刊文章, 在此就不一一列举了。

由于我们水平有限, 对不少知识, 还不能充分消化吸收。又加以时间仓促, 在编写过程中不可能多方取经求教。不妥, 甚至讹误之处, 在所难免, 只可在教学实践过程中逐步加以改正, 在此予致歉意。

# 目 录

第一章 交流试验变压器	1
§ 1-1 概述	1
§ 1-2 高电压试验变压器的结构型式及主要参数	3
§ 1-2-1 试验变压器的结构型式	3
§ 1-2-2 试验变压器的电压及容量	5
§ 1-3 串级高压试验变压器	6
§ 1-3-1 串级变压器的基本原理及几种串级方式	6
§ 1-3-2 自耦式串级变压器的短路电抗计算	11
§ 1-3-3 降低试验变压器短路电抗的内部结构措施	13
§ 1-3-4 几种自耦式串级试验变压器的外形及结构	15
§ 1-3-5 串级试验变压器的优缺点	17
§ 1-4 高电压试验变压器的调压装置	18
§ 1-4-1 自耦调压器	18
§ 1-4-2 移卷式调压器	18
§ 1-4-3 电动发电机组	20
§ 1-5 试验变压器输出电压的升高及波形畸变	22
§ 1-5-1 容性试品上的电压升高及引起的测量误差	22
§ 1-5-2 由于试品闪络所引起的恢复过电压及防止这种过电压的方法	23
§ 1-5-3 高电压试验变压器输出电压的波形失真及改善措施	26
§ 1-6 工频高压串联谐振试验设备	28
§ 1-7 用高压试验变压器产生操作冲击波的方法	32
§ 1-7-1 电容器对变压器原边放电产生操作波	32
§ 1-7-2 用闸流管使变压器原边瞬间接通工频电源产生操作波	35
附录: § 1-5 及 § 1-7 中几个关系式的推导	38
第二章 交流高电压的测量	42
§ 2-1 概述	42
§ 2-2 测量球隙	42
§ 2-3 静电电压表	48
§ 2-4 高压交流分压器及充气标准电容器	53
§ 2-5 峰值电压表	61
第三章 直流高电压试验设备	66
§ 3-1 概述	66

§ 3-2	整流元件 (高压硅堆)	69
§ 3-3	硅堆的电压分布和均压措施	72
§ 3-4	整流电路	77
§ 3-5	倍压电路的工作原理	78
§ 3-6	直流高压串级发生器的工作原理	81
§ 3-7	直流高压串级发生器减小脉振的途径	86
§ 3-8	串级发生器的固有脉振和电压效率	88
§ 3-9	直流高压串级发生器元件参数和结构的设计计算	94
§ 3-10	特殊的直流高压串级发生器	104
§ 3-11	使用绝缘芯变压器的直流高压设备	107
<b>第四章 直流高压的测量</b>		111
§ 4-1	概述	111
§ 4-2	电阻分压器	111
§ 4-3	桥式直流电阻分压器	115
§ 4-4	核反应法测量直流高压	120
§ 4-5	脉动幅值的测量	122
<b>第五章 冲击电压发生器</b>		124
§ 5-1	冲击电压发生器的功用和要求	124
§ 5-2	冲击电压发生器的基本原理	127
§ 5-3	冲击电压发生器放电回路的数学分析	129
§ 5-4	冲击电压发生器的充电回路	136
§ 5-5	冲击电压发生器的同步	141
§ 5-6	冲击电压发生器的波形振荡	146
§ 5-7	冲击电压发生器的结构	153
§ 5-8	冲击电压发生器设计计算举例	157
§ 5-9	产生截断波的方法	160
§ 5-10	产生操作波的方法	163
§ 5-11	陡波前冲击电压的产生	166
<b>第六章 冲击电压的测定</b>		168
§ 6-1	概述	168
§ 6-2	用球隙测量冲击电压的特点	168
§ 6-3	冲击峰值电压表	171
§ 6-4	冲击电压分压器	173
§ 6-4-1	电阻分压器	174
§ 6-4-2	电容分压器	188
§ 6-4-3	阻容混合分压器	194
§ 6-4-4	冲击电压分压器的误差及其校核方法	199

§ 6-4-5 冲击电压测量系统的方波响应	201
§ 6-4-6 测定方波响应的方法	205
§ 6-4-7 测量系统方波响应的评价	209
§ 6-4-8 冲击测量示波图可信性的分析	211
§ 6-5 高压示波器	212
§ 6-5-1 示波管内电子射线的形成, 加速和聚焦	214
§ 6-5-2 电子射线的偏转和静态灵敏度	216
§ 6-5-3 波形的显示, 最大记录速度和记忆示波器	219
§ 6-5-5 示波器的工作频率范围和行波示波管	220
§ 6-5-6 国产高压示波器性能及线路举例	222
<b>第七章 冲击电流发生器</b>	<b>226</b>
§ 7-1 概述	226
§ 7-2 冲击电流发生器的工作原理	227
§ 7-3 冲击电流发生器的结构	228
§ 7-4 冲击电流发生器的电流幅值和波形的调节	232
§ 7-5 冲击电流方波发生器	233
<b>第八章 冲击电流的测量</b>	<b>236</b>
§ 8-1 概述	236
§ 8-2 分流器	237
§ 8-3 分流器的响应特性	240
§ 8-4 罗哥夫斯基线圈	242
<b>第九章 在高电压下测量介质损耗</b>	<b>245</b>
§ 9-1 概述	245
§ 9-2 西林电桥	246
§ 9-3 充电电流较大时的西林电桥回路	248
§ 9-4 被试品接地时的西林电桥回路	250
§ 9-5 杂散电容和电桥屏蔽	250
§ 9-6 外界电磁场的干扰	253
§ 9-7 检流计和电桥灵敏度	255
<b>第十章 局部放电测量</b>	<b>258</b>
§ 10-1 概述	258
§ 10-2 局部放电的检测回路	262
§ 10-3 测量阻抗和输出电压	262
§ 10-4 测量仪器	264
§ 10-5 局部放电测量的校订	266
§ 10-6 抗干扰措施	269
<b>第十一章 高电压实验室</b>	<b>270</b>

§ 11—1 高电压实验室的主要设备及其参数	270
§ 11—2 高电压实验室的净空距离	274
§ 11—3 高电压实验室的接地	278
§ 11—4 高电压实验室的屏蔽	280
§ 11—5 高电压实验室的建筑	283
§ 11—6 高电压实验室的基本安全规则	284
附表 1 至附表 12	286

# 第一章 交流试验变压器

## § 1-1 概 述

电力系统中的电气设备，其绝缘不仅经常受到工作电压的作用，而且还会受到例如大气过电压和内部过电压的侵袭。高电压试验变压器的功用在于产生工频高电压，使之作用于被试电气设备的绝缘上，以考验其在长时的工作电压及瞬时的内过电压下是否能可靠工作。另外，它也是试验研究高压输电线路的气体绝缘间隙、电晕损耗、静电感应、长串绝缘子的闪络电压以及带电作业等项目的必需的高压电源设备。近年来，由于超高压及特高压输电的发展，必需研究内绝缘或外绝缘在操作波作用下的击穿规律及击穿数值。利用高压试验变压器可以产生“长波头”类型的操作波。因此工频试验变压器除了固有的产生工频试验电压，以及作为直流高压和冲击高压设备的电源变压器的功用外，还可以用它来产生操作波试验电压。所以，工频试验变压器是高电压实验室内不可缺少的主要设备之一。由于它的电压值需要满足内过电压的要求，故试验变压器的工频输出电压将大大超过电力变压器的标称电压值，常达几百千伏或至几千千伏的数值。目前我国和世界上多数工业发达国家都具有 2250 千伏的试验变压器，个别国家的试验变压器的电压已达到 3000 千伏。

试验变压器在原理上与电力变压器并无区别，只是前者电压较高，变比较大。由于电压值高，所以要采用较厚的绝缘及较宽的间隙距离，也因此试验变压器的漏磁通较大，短路电抗值也较大，而电压高的串级试验变压器的总短路电抗值则更大。在大的电容负载下试验变压器原付边的电压关系与线卷匝数比有较大差异，因此试验变压器常常有特殊的测量电压用的线卷。当变压器的额定电压升高时，它的体积和重量的增加趋势超过按额定电压的三次方 ( $U^3$ ) 的上增速度。为了限制单台试验变压器的体积和重量，有必要在接线上和结构上来采取一些特殊措施，例如目前所采用的串级装置等。这样，使试验变压器在某些情况下，具有特殊形式。

试验变压器的运行条件与电力变压器是不同的，例如：

(1) 试验变压器在大多数情况下，工作在电容性负荷下；而电力变压器一般工作在电感性负荷下。

(2) 试验变压器所需试验功率不大，所以变压器的容量不很大；而高压电力变压器的容量都很大。

(3) 试验变压器在工作时，经常要放电；电力变压器在正常运行时，发生事故短路的机会是不多的，而且即使发生，继电保护装置会立即将电源跳开。

(4) 电力变压器在运行中可能受到大气压过电压及操作过电压的侵袭；而试验变压器并不受到大气过电压的作用，但由于试品放电的缘故，它在工作时，也可能在绕组上



产生梯度过电压。

(5) 试验变压器工作时间短，在额定电压下满载运行的时间更短。比如进行电气设备的耐压试验常常是一分钟工频耐压。而电力变压器则几乎终年或多年在额定电压下满载运行。

(6) 由于上述原因，试验变压器工作温度低，而电力变压器温升较高。也因此电力变压器都带有散热管、风冷甚至强油循环冷却装置。而试验变压器则没有各种附加的散热装置。

由于上述的一些情况，试验变压器在运行条件方面比电力变压器有利，而在重要性方面不如电力变压器，所以设计时采用了较小的安全系数。如 $\leq 150KV$  试验变压器本身的试验电压比其额定电压仅高  $25KV$ ； $50KV$  的试验变压器有时取比额定电压高  $30\%$  的试验电压；更高电压 ( $\geq 250KV$ ) 的试验变压器的试验电压比额定电压仅高  $10\sim 15\%$ ，例如有的  $500KV$  试验变压器的 5 分钟试验电压为  $575KV$ ，仅为铭牌额定电压的  $115\%$ 。国产  $YDJC-1500/1500$  (额定电压为  $1500KV$ ，额定容量为  $1500KVA$ ) 二级串级试验变压器，单台  $750KV$  变压器的 50 赫芝感应试验电压为  $110\%$  额定电压，耐压 5 分钟；两台串级时，所取的感应试验电压值仅为  $105\%$  的额定电压。而一般电力变压器的试验电压常比额定电压高得多，例如  $220KV$  变压器的出厂一分钟工频试验电压为  $325-400KV$ ； $330KV$  变压器的出厂一分钟相对地工频试验电压为  $510KV$  (注：均有效值)。正因为高压试验变压器的试验电压较低，设计温升较低，故在额定功率下只能作短时运行。例如上述  $500KV$  试验变压器，在额定电压下只能连续工作 30 分钟，在  $330KV$  时才能持续运行。国产额定试验电压为  $2250KV$ ，额定试验容量为  $2250KVA$  的试验变压器 (它由三台  $750KV$ ，额定容量分别为  $750, 1500, 2250KVA$  的单相工频试验变压器串接组成)，在额定电压及额定容量下，只能运行 5 分钟，若要继续工作，中间必需给予 2 小时的休息时间，只有在  $\leq 1125KV$  及  $\leq 562.5KVA$  下才能连续运行。

试验变压器试验时的接线如下：

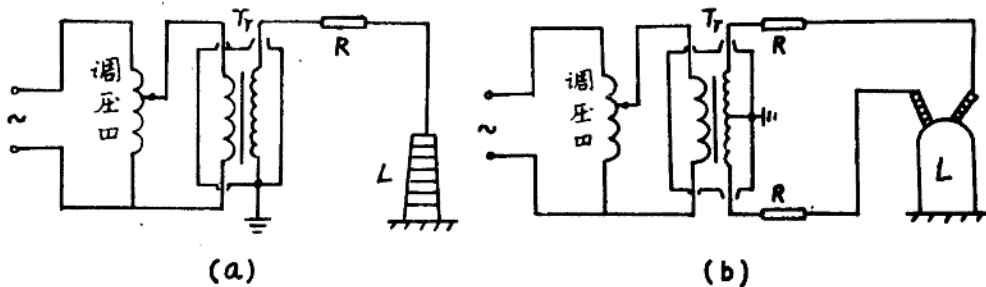


图 1-1 试验变压器试验接线图

(a) 试验相绝缘线路

(b) 试验相间绝缘线路

图中  $T_r$ ——试验变压器  $R$ ——保护电阻  $L$ ——试品

图 1-1 (a) 适用于试验相绝缘(对地绝缘); 图 1-1 (b) 适用于试验相间绝缘。两种接法要求变压器的结构不同。图 (a) 中, 高压绕组只要求一端对地具有高压绝缘水平; 而图 (b) 的高压绕组的两端都对地具有高压绝缘水平。当然若两端间的电压相同的话, 后者的对地绝缘水平为前者之一半值。同样, 图 (a) 的变压器只需要一只高压套管; 而图 (b) 的变压器则要有两只高压套管。

图中的电阻  $R$  称为保护电阻, 是防止试品放电时所发生的电压截波对变压器绕组绝缘的损伤; 也用它来限制过电流。同时它也起着抑止试品闪络时所造成的恢复过电压的作用(见 § 1-5)。回路中保护电阻总值可按 0.1 欧/伏选取。它可由金属电阻丝绕成, 室内使用时也可以采用水电阻, 它的长度可按每米 150~200 千伏(有效值)选取。

## § 1-2 高电压试验变压器的结构型式及主要参数

### § 1-2-1 试验变压器的结构型式

高电压试验变压器大多采用油浸式变压器(空气式 干式变压器现已较少采用), 该种变压器有金属壳及绝缘壳两类。

金属壳变压器可分为单套管和双套管两种。单套管变压器的高压绕组一端可与外壳相连, 但为了测量上的方便常把此端不直接与外壳相连, 而经一几千伏的小套管引到外面来再与外壳一起接地, 如有必要时可经过仪表再与外壳一起接地。双套管式变压器的高压绕组的中点与外壳相联, 有一种双套管式的变压器外壳是接地的, 那么此变压器高压绕组的对地电压仅为极间电压的一半如图 1-1 (b) 及图 1-3 所示。另一种双套管式的变压器外壳对地绝缘起来。其中的高压绕组分成匝数相等的两部分, 分别绕在铁心的左右两柱上, 高压绕组的中点与铁心和外壳相联, 低压绕组绕在具有  $X$  出线端的高压绕组的外面(作为单台变压器应用时, 高压绕组的  $X$  点接地), 这样绕组与铁心及外壳之间的最大电位差为最高输出电压的一半即受  $\frac{u}{2}$  ( $u$  为高压的输出电压值) 的电压。铁心及外壳也带有  $\frac{u}{2}$  的电位, 所以外壳需用支柱绝缘子对地绝缘起来。图 1-4 为其结构示意图。采用这种结构使高压绕组与铁心、外壳间以及高低压绕组间的电位差降低, 绝缘利用比较合理, 因此能减小尺寸, 减轻重量。

绝缘壳式的高压变压器是以绝缘壳(通常为酚醛纸筒、环氧玻璃布筒或瓷套)来作为容器, 同时又用它作为外绝缘, 以省去引出套管。其铁心与绕组和双套管金属壳变压器相同, 只是铁心的两柱常常是上下排列的(也有左右排列的), 铁心需要用绝缘支持起来, 使之悬空。高压绕组的高压端  $A$  与金属上盖连在一起, 接地端  $X$  以及低压绕组的  $a$ 、 $x$  两端从底座引出。这种结构体积小, 重量轻, 优点显著。以酚醛纸筒作外壳的变压器比瓷外壳的重量较轻, 不会碰碎, 但怕水易受潮。此种变压器的内部结构见图 1-7 所示。

各种变压器的外形见图 1-2、图 1-3、图 1-4、图 1-5 及图 1-6。

关于更高电压下所使用的串级变压器的结构, 在后面另作叙述。

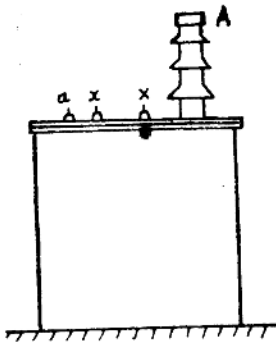


图 1-2 油浸式单套管试验变压器外形

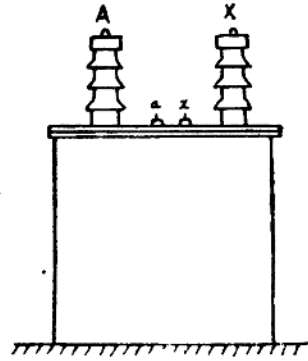


图 1-3 油浸式双套管试验变压器外形

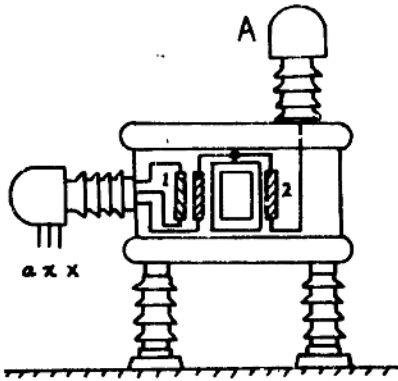


图 1-4 外铁壳需对地绝缘的双套管试验变压器  
1—低压绕组, 2—高压绕组

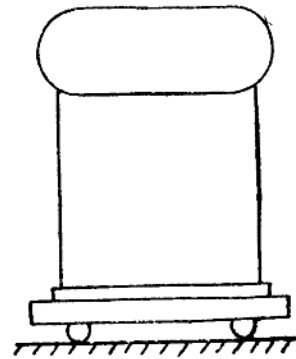


图 1-5 胶木筒外壳油浸式试验变压器

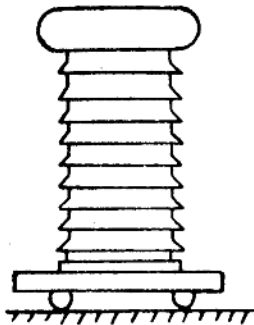


图 1-6 瓷外壳油浸式试验变压器

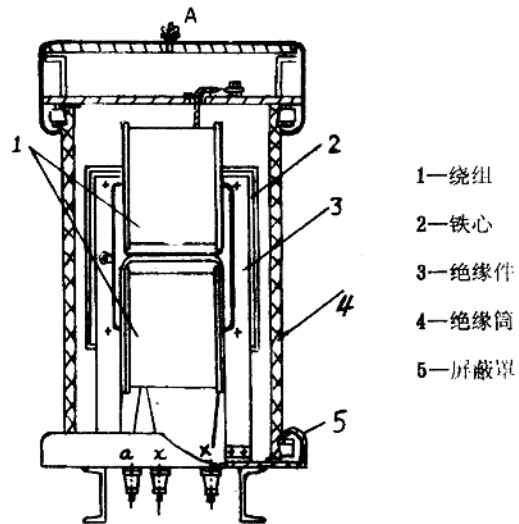


图 1-7 绝缘筒式试验变压器的内部概貌图

### § 1-2-2 试验变压器的电压及容量

由于试验变压器的体积和重量随其额定电压值的增加而急剧增加。故目前单个变压器的电压都限制在 1000 千伏以下。国产试验变压器的高压侧额定电压为：

50, 100, 150, 250, 500, 750, 1500 (3×500), 2250 (3×750) 千伏

国外还有 1000 千伏等级的试验变压器,它可由三台 330 千伏的变压器串联组成,也可以由两台 500 千伏的变压器串联组成。

因为试品大多为容性的,常见的试品电容量如表 1-1 所示。当知道试品的电容量及所加的试验电压值时,便可按下式计算出试验电流及试验所需的功率:

表 1-1 常见的试品电容量

试品名称	电容值微微法
线路绝缘子	<50
高压套管	50~600
高压断路器,电流互感器,电磁式电压互感器	100~1000
电容式电压互感器	3000~5000
电力变压器	1000~15000
电力电缆(每米)	150~400

$$\text{试验电流} \quad I_s = \omega C U \times 10^{-9} \text{ A (有效值)} \quad (1-1) \text{ 式}$$

$$\text{试验功率} \quad P_s = \omega C U^2 \times 10^{-9} \text{ KV A} \quad (1-2) \text{ 式}$$

式中  $U$ ——所加的试验电压 KV (有效值)

$\omega$ ——电压的角频率 ( $\omega = 2\pi f$   $f = 50\text{HZ}$ )

$C$ ——试品电容和其它附加电容之和。这里所指附加电容是指测量装置(如电容分压器)、高压引线及试验变压器自身的寄生电容。单位为  $\mu\text{f}$ 。

可按上两式来选择试验变压器所需的容量。假如设  $C$  值为 6000 微微法,试验电压  $U$  为 500 千伏,那末试验时流过变压器高压绕组的电流约为 0.95A。故一般 250 千伏以上的试验变压器的高压绕组额定电流值取为 1 安培,在大多数情况下是可以满足试验要求的。这叫做 1 安培制的容量取法,就是说高压绕组额定电压是多少千伏,变压器的额定容量就取为多少千伏安数。

在附表 2 中列出了国产试验变压器的额定电压和容量等参数。(见本教材最后面的附表)

除了一般试品外,有时也有电容量较大的试品。在有试验线路的高压实验室中,往往需要考虑供应较大的电容电流及电晕电流。当然试验线路的电容值与线路的长短有关。架设试验线路的目的之一是研究电晕损耗,为了测量准确起见,线路较长是有利的,但

又由于经济上的考虑，有时超高压试验线路选取 500 米左右。根据运行经验 330 千伏的试验线路、选取 1 安培制的试验变压器是有可能满足试验要求的；而对于  $\geq 500$  千伏的试验线路，1 安培制的试验变压器就难以满足要求了，例如为了研究 750 千伏线路的电晕损耗，需要变压器供给 3 安培左右的电流。

对于特大的电容的试品，如电缆厂中的成卷高压电缆的耐压试验，以及特大容量发电机的耐压试验等，往往要特制试验变压器来适应试验功率的要求，目前常用串联谐振装置（见 § 1—6）来满足试验的要求。此外也正在发展采用低频（2 周/秒）和超低频（0.1 周/秒）的耐压试验方法。

有时在试验大电容值的试品时，可采用补偿的方法来减小流经变压器高压绕组中的电流。假如在高压侧进行补偿，可和电容性试品并联一电感线圈，如不计负荷中的有效电流分量，则所要求的试验变压器的容量可按下列式计算：

$$P_s = \left( \omega c 10^{-12} - \frac{1}{\omega L} \right) U^2 \times 10^7 \text{ 千伏安} \quad (1-3)$$

式中  $U$ ——试验电压值 千伏  
 $C$ ——试品电容 微微法  
 $L$ ——补偿线圈电感 亨  
 $\omega$ ——试验电压角频率

从上式可看出，采用补偿后可使试验变压器的容量大大减小，不过采用补偿时要注意到经济和技术两方面，首先是高压补偿线圈比较贵，其次采用补偿后可能使输出电压波形畸变。因此在对波形要求较高的试验中，例如在测介质损耗及测电晕损耗时，一般宁愿采用大容量试验变压器而不愿采用补偿法。

试验变压器有时也可碰到电导性负载，例如做绝缘子湿闪试验及染污放电试验，由于沿介质表面的湿放电及染污放电都属于电弧放电过程，如试验电流不够大，不能形成电弧，此试验便将失去意义。而且在容量较小阻抗较大时试验电流之增加将引起压降的增加，而真正作用在试品上的电压并未增加，在试验时根本无法判断何时发生闪络。一般湿闪试验的泄漏电流可达几十毫安，所以一般 1 安培制的试验变压器是可以满足要求的，不过变压器及其调压器的短路压降要小。为了保证有较准确的击穿电压值，对试验装置的短路容量或短路电流有一定的要求。国家标准规定，干燥状态下进行外绝缘试验时，工频电压试验设备高压侧的稳态短路电流，不得小于 0.1 安（有效值）；淋雨状态下试验时，不得小于 0.7 安（峰值）；对于人工污秽试验，要求试验设备的短路电流为 4—10 安（有效值）。

## § 1-3 串级高压试验变压器

### § 1-3-1 串级变压器的基本原理及几种串级方式

单个变压器的电压超过 500KV 时，费用随电压的上升而迅速增加。同时在机械结构上和绝缘上都有困难，此外对于运输与按装亦有困难。所以目前单个变压器的额定

电压很少超过 750KV。一般需要 500KV~750KV 以上的电压时常采用几个变压器串接的方法。几台试验变压器串接的意思，就是使几台变压器绕组的电压相叠加，从而使单台变压器的绝缘结构大为简化。

组成串级变压器的各台变压器的付边高压绕组是相互串联的，各台变压器的电位是逐级升高的。因此绝不能像图 1-8 那样简单地把两台变压器的原边绕组联结于共同的低压电源上。图中第一台变压器原、付边间电位差为  $U_2$ ，第二台变压器原、付边间电位差为  $2U_2$ 。如两台变压器原、付边间绝缘允许电位差都是  $U_2$ ，第二台变压器原、付边间势必被击穿，如把第二台变压器原、付边间绝缘做成能耐受  $2U_2$ ，那就体现不出串级变压器的好处，所以必须妥善处理原边绕组的供电方式。根据各台变压器原边绕组供电方式之不同，可有两种串级方式。

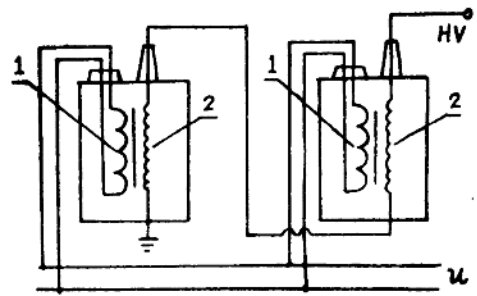


图 1-8 两台变压器错误的串联方式  
1——低压绕组 2——高压绕组 u——低压电源

第一种串级方式是把数台相同变压器的高压绕组串接起来，而各台变压器的原边绕组，除第一级外，要通过绝缘变压器才接到共同的低压电源。图 1-9 是具有三个变压器的串级装置。绝缘变压器付边绕组匝数相同，变比为 1:1，它不起改变电压作用，只起绝缘作用。它的原、付边绕组间的绝缘能支持  $U_2$  的电压，第二级高压变压器，只经过一个绝缘变压器接到低压侧电源母线，第三级高压变压器经过两个绝缘变压器接到

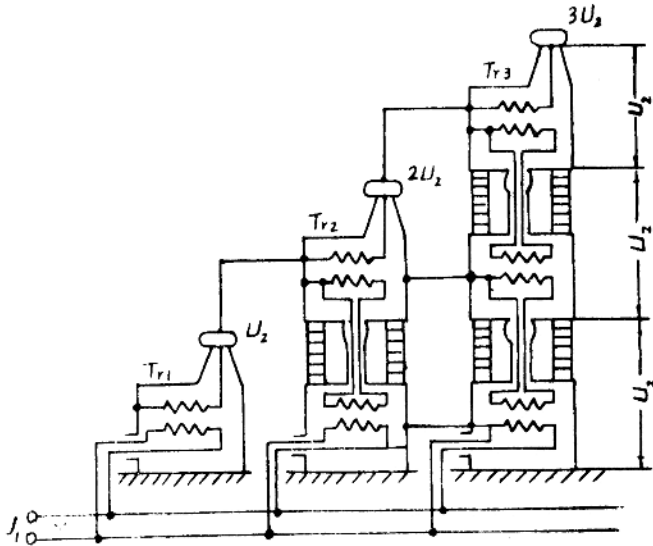


图 1-9 通过绝缘变压器供给励磁电流的串接变压器

低压侧电源母线。这样，每台变压器所需的绝缘只要  $U_2$  的水平就可以了，而串联产生的电压则可达  $3U_2$  值。由图 1—9 可见串联数为 3，而需要的变压器总数（包括试验变压器和绝缘变压器）则为 6 台；若设想串联变压器的串联数为  $n$ ，则需要的变压器的总台数为  $1+2+3+\dots+n = \frac{n(n+1)}{2}$ 。而需要的中间绝缘变压器的台数为  $\frac{n(n+1)}{2} - n = \frac{n(n-1)}{2}$ 。这种串联方式当级数增多时就需要很多变压器，因而也就占据很大的面积。所以这种接法目前很少采用。但这种接法中三台试验变压器的电压和容量都相同，不像下面将介绍的一种接法中，前一级变压器的容量要包括后一级的容量。故当高压绕组要流过几个安培的电流时，采用这种接法是有利的。

第二种串接方式是称为自耦式串接变压器，这是目前最常用的串接方式。在此法中高一级变压器的励磁电流由前面一级的变压器来供给。图 1—10 为由 3 个变压器所

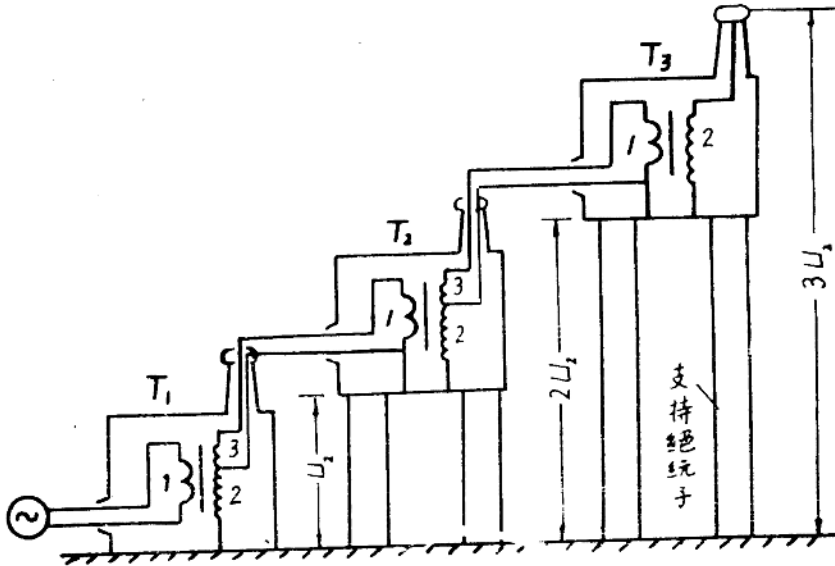


图 1—10 由单（高压）套管变压器元件组成的串联变压器示意图

组成的串联装置，图中绕组 1 为低压绕组，2 为高压绕组，3 为供给下一级激磁用的串联激磁绕组。设该装置输出的额定试验容量为  $3U_2I_2$  千伏安，则最高一级变压器  $T_3$  的高压侧额定电压为  $U_2$  千伏，装置的额定容量为  $U_2I_2$  千伏安。中间一台变压器  $T_2$  的高压侧额定电压为  $U_2$  千伏，装置的额定容量必须为  $2U_2I_2$  千伏安，这是因为这台变压器除了要直接供应负荷  $U_2I_2$  千伏安的容量外，还得供给最高一级变压器  $T_3$  的励磁容量  $U_2I_2$ 。同理最下面一台变压器  $T_1$  应具有的装置额定容量为  $3U_2I_2$  千伏安。所以每级变压器的装置容量是不相同的。如上例所述，当串联数为 3，则串联变压器之输出额定容量为  $W_{试} = 3U_2I_2 = 3W$ ，而串联变压器整套设备的装置总容量应为各变压器装置容量之和，如

$$W_{\text{装}} = U_2 I_2 + 2U_2 I_2 + 3U_2 I_2 = W(1 + 2 + 3) = 6W$$

所以装置总容量  $W_{\text{装}}$  与可用的试验容量  $W_{\text{试}}$  之比为

$$\frac{W_{\text{装}}}{W_{\text{试}}} = \frac{6W}{3W} = 2$$

如果串级数为  $n$ ，则  $W_{\text{试}} = nU_2 I_2 = nW$ ，而装置总容量

$$W_{\text{装}} = W(1 + 2 + 3 + \dots + n) = W \frac{n(n+1)}{2}$$

这样，在  $n$  级时的串级装置的容量之和等于它的有用的输出容量的  $\frac{n+1}{2}$  倍

(即  $\frac{W_{\text{装}}}{W_{\text{试}}} = \frac{n+1}{2}$ )。所以当  $n$  较大时，就显著地降低了试验装置的利用率，因

为利用率  $\eta = \frac{W_{\text{试}}}{W_{\text{装}}} = \frac{2}{n+1}$ 。这是串级试验变压器的一个缺点。由于串级变压器的

利用率  $\eta$  随串级数  $n$  的增大而显著降低；同时也因为串级试验变压器的总短路阻抗随串级  $n$  数的增大而显著增大，所以必须限制串级数  $n$ ，一般  $n \leq 3 \sim 4$ 。

图 1-10 中所示的变压器是高压绕组末端接外（铁）壳的情况，国产  $3 \times 250KV$  的串级试验变压器就是采用的这种结构。图 1-11 为类似接线及结构的一套三级串接的  $1500KV$  试验变压器简略图形。

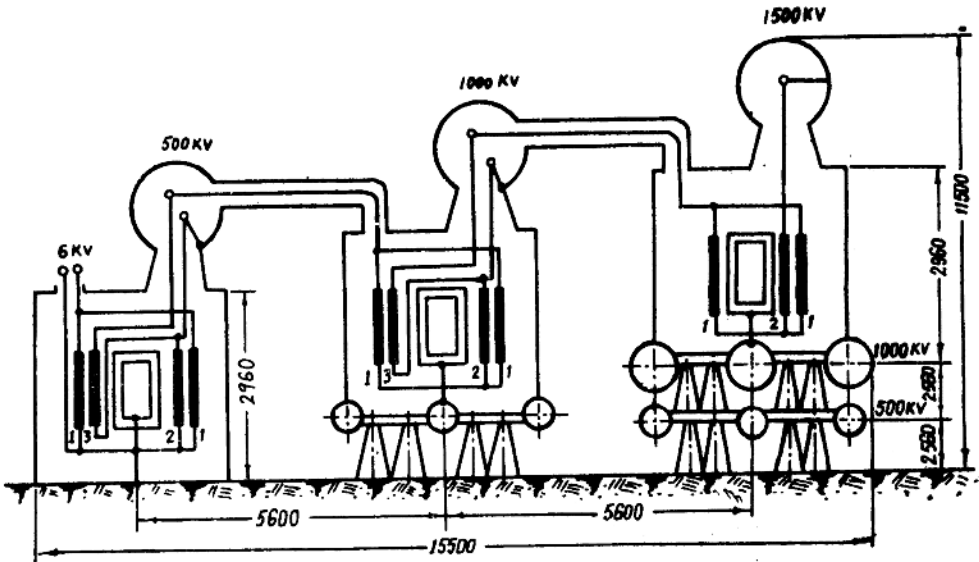


图 1-11 1500KV 三级串级变压器结构简图

注：该变压器输出试验额定容量为  $1500KV \cdot A$ ，图中 1——原边低压绕组 2——付边高压绕组  
3——供给高一级变压器励磁用绕组



在试验电压水平较高时，还常采用双高压套管引出的试验变压器，每级变压器的高压绕组的中点接外（铁）壳，其优点显然是可以降低绝缘的电压水平。这一种三个变压器串级的试验装置的原理接线图如图 1—12 所示。图中绕组 1 为低压绕组，2 为高压绕组，3 为串级激磁绕组，4 为平衡绕组。若暂且不管平衡绕组的作用，那么可以看

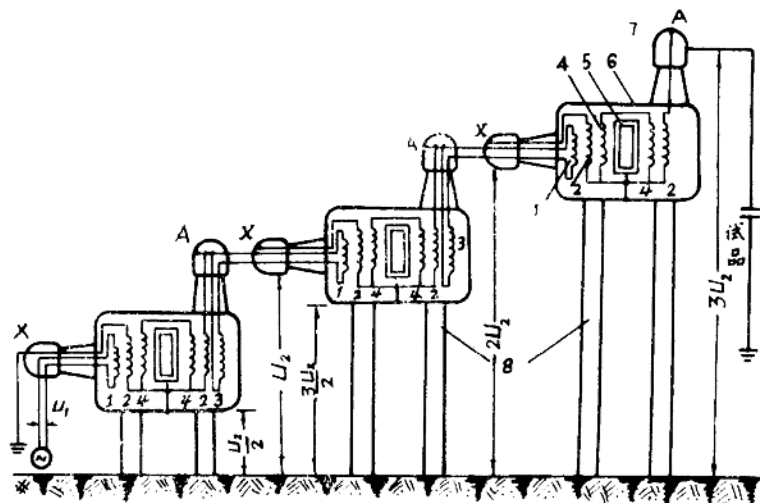


图 1—12 由双（高压）套管变压器元件组合的串接变压器示意图

到，自耦串级的方式如图 1—13 所示。与单（高压）套管引出的串级变压器不同之处在于每级变压器的高压绕组中点  $M$  点接铁芯及外壳，而单（高压）套管引出的串级变压器则是  $B$  点接铁心及外壳。

图 1—14 中所示的变压器的额定试验容量为  $1000KV A$ 。整个装置由三台  $2.3/333KV$  变压器组成。每台变压器的外壳及铁心与高压绕组的中点相联接，所以每个高压瓷套管的额定工作电压为  $166KV$ ，每台变压器的外壳（由低到高）的对地电压分别为  $166, 500$  及  $833KV$ 。图中绕组 1 为原边绕组，2 为付边绕组，3 为第一级及第二级分别向下一级供电用的串级激磁绕组，4 为平衡绕组。其中绕组 2 及 4 分别布置在两个铁心柱上。

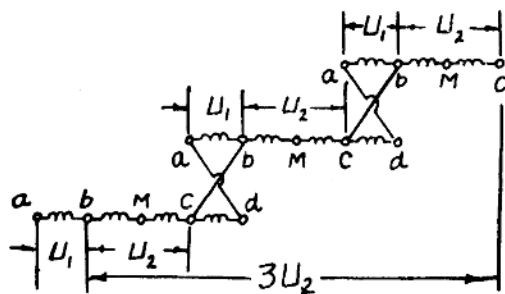


图 1—13 自耦串级接线图

图中  $ab$  绕组——低压绕组  $bc$  绕组——高压绕组  
 $cd$  绕组——串级激磁绕组