

高电压试验技术

张仁豫 陈昌渔 编 著
王昌长 陈秉中

清华大学出版社

1982

内 容 提 要

本书是我校高电压技术及设备专业的一本专业课教材。

本书共分十一章，前八章叙述五种高电压试验设备(交流高电压、直流高电压、雷电冲击电压、操作冲击电压及冲击电流)及相应的测量装置。第九、十两章叙述介质损耗和介质内部局部放电的测量。最后一章讨论高电压实验室设计中的一些技术问题。因为是教材，着重于讲清试验设备和测量装置的工作原理，同时也尽可能提供设计或选择这些设备或装置的方法，力图在本书中阐明高电压实验室中可能遇到的一些重要问题。

本书在选材时既考虑到要适应教学时数，避免繁杂，同时也考虑到生产实际中有关人员的要求而在内容上稍有扩充。因此，本书除作为高电压技术专业学生的教科书外，也可供有关工程技术人员参考。

高 电 压 试 验 技 术

张仁豫 陈昌渔 编 著
王昌长 陈秉中

☆

清华大学出版社出版

北京 海淀 清华园

岳各庄印刷厂印刷

北京 丰台

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本：787×1092 1/16 印张：16³/₄ 字数：429千字

1982年4月第一版 1982年11月第一次印刷

印数：1—25,000

统一书号：15235·45 定价：1.90 元

目 录

前言	V
第一章 交流高电压试验设备	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	4
§ 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	10
§ 1-3-3 降低试验变压器短路电抗的内部结构措施	11
§ 1-3-4 几种自耦式串级试验变压器的外形及结构	13
§ 1-3-5 串级试验变压器的优缺点	15
§ 1—4 高电压试验变压器的调压装置	15
§ 1-4-1 自耦调压器	15
§ 1-4-2 移卷式调压器	16
§ 1-4-3 电动发电机组	17
§ 1—5 试验变压器输出电压的升高及波形畸变	18
§ 1-5-1 容性试品上的电压升高及引起的测量误差	18
§ 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	19
§ 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	23
§ 1—6 工频高压串联谐振试验设备	25
§ 1—7 用高压试验变压器产生操作冲击波的方法	28
§ 1-7-1 电容器对变压器原边放电产生操作波	28
§ 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	31
第二章 交流高电压的测量	35
§ 2—1 概述	35
§ 2—2 测量球隙	35
§ 2—3 静电电压表	40
§ 2—4 高压交流分压器及充气标准电容器	44
§ 2—5 峰值电压表	53
第三章 直流高电压试验设备	57
§ 3—1 概述	57
§ 3—2 整流元件(高压硅堆)	60
§ 3—3 硅堆的电压分布和均压措施	62
§ 3—4 整流电路	64

§ 3—5 倍压电路的工作原理·····	65
§ 3—6 直流高压串级发生器的工作原理·····	69
§ 3—7 直流高压串级发生器减小脉振的途径·····	78
§ 3—8 串级发生器的固有脉振和电压效率·····	79
§ 3—9 直流高压串级发生器元件参数和结构的设计计算·····	85
§ 3—10 特殊的直流高压串级发生器·····	92
§ 3—11 使用绝缘芯变压器的直流高压设备·····	96
第四章 直流高电压的测量·····	99
§ 4—1 概述·····	99
§ 4—2 电阻分压器·····	99
§ 4—3 桥式直流电阻分压器·····	102
§ 4—4 核反应法测量直流高压·····	107
§ 4—5 脉动幅值的测量·····	108
第五章 冲击电压发生器·····	110
§ 5—1 冲击电压发生器的功用和要求·····	110
§ 5—2 冲击电压发生器的基本原理·····	112
§ 5—3 冲击电压发生器放电回路的数学分析·····	114
§ 5—4 冲击电压发生器的充电回路·····	120
§ 5—5 冲击电压发生器的同步·····	125
§ 5—6 冲击电压发生器的波形振荡·····	130
§ 5—7 冲击电压发生器的结构·····	136
§ 5—8 冲击电压发生器设计计算举例·····	139
§ 5—9 产生截断波的方法·····	142
§ 5—10 产生操作波的方法·····	144
§ 5—11 陡波前冲击电压的产生·····	146
第六章 冲击电压的测定·····	149
§ 6—1 概述·····	149
§ 6—2 用球隙测量冲击电压的特点·····	149
§ 6—3 冲击峰值电压表·····	151
§ 6—4 冲击电压分压器·····	153
§ 6-4-1 电阻分压器·····	154
§ 6-4-2 电容分压器·····	166
§ 6-4-3 阻容混合分压器·····	170
§ 6-4-4 冲击电压分压器的误差及其校核方法·····	175
§ 6-4-5 冲击电压测量系统的方波响应·····	177
§ 6-4-6 测定方波响应的方法·····	180
§ 6-4-7 测量系统方波响应的评价·····	184
§ 6-4-8 冲击测量示波图可信性的分析·····	185
§ 6—5 高压示波器·····	188
§ 6-5-1 示波管内电子射线的形成, 加速和聚焦·····	189

§ 6-5-2 电子射线的偏转和静态灵敏度	190
§ 6-5-3 波形的显示, 最大记录速度和记忆示波器	192
§ 6-5-4 示波器的工作频率范围和行波示波管	193
§ 6-5-5 国产高压示波器性能及线路举例	195
第七章 冲击电流发生器	199
§ 7-1 概述	199
§ 7-2 冲击电流发生器的工作原理	199
§ 7-3 冲击电流发生器的结构	201
§ 7-4 冲击电流发生器的电流幅值和波形的调节	203
§ 7-5 冲击电流方波发生器	205
第八章 冲击电流的测量	207
§ 8-1 概述	207
§ 8-2 分流器	208
§ 8-3 分流器的响应特性	210
§ 8-4 罗哥夫斯基线圈	212
第九章 在高电压下测量介质损耗	214
§ 9-1 概述	214
§ 9-2 西林电桥	215
§ 9-3 充电电流较大时的西林电桥回路	216
§ 9-4 被试品接地时的西林电桥回路	218
§ 9-5 杂散电容和电桥屏蔽	218
§ 9-6 外界电磁场的干扰	220
§ 9-7 检流计和电桥灵敏度	222
第十章 局部放电测量	225
§ 10-1 概述	225
§ 10-2 局部放电的检测回路	228
§ 10-3 测量阻抗和输出电压	229
§ 10-4 测量仪器	231
§ 10-5 局部放电测量的校订	232
§ 10-6 抗干扰措施	233
第十一章 高电压试验室	235
§ 11-1 高电压试验室的主要设备及其参数	235
§ 11-2 高电压试验室的净空距离	239
§ 11-3 高电压试验室的接地	241
§ 11-4 高电压试验室的屏蔽	244
§ 11-5 高电压试验室的建筑	246
§ 11-6 高电压试验室的基本安全规则	247
附表	249
附表 1 球隙放电标准表	249
附表 2 常用移卷调压器型号规格	253

附表 3	脉冲电容器·····	253
附表 4	高压硅堆技术参数·····	254
附表 5	同轴电缆参数表·····	256
附表 6	电阻合金材料的性能和特点·····	257
附表 7	常用电阻合金线规格·····	258
附表 8	高压脉冲示波器·····	259
主要参考资料 ·····		260

第一章 交流高电压试验设备

§ 1-1 概 述

交流高电压试验设备主要是指高电压试验变压器，但本章中也介绍了高电压串联谐振试验设备。

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，由于超高电压及特高电压输电的发展，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还可以产生“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。譬如进行电气设备的

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、风冷甚至强迫油循环冷却装置。而试验变压器则没有各种附加的散热装置。

上述情况表明，试验变压器在运行条件方面比电力变压器有利，而在重要性方面则不如电力变压器，所以设计时采用较小的安全系数。如 50 KV~250 KV 试验变压器本身的试验电压比其额定电压仅高 25 KV；更高电压 (≥ 300 KV) 的试验变压器的试验电压比额定电压仅高 10%。例如 500 KV 试验变压器的 5 分钟 100 Hz 自感应试验电压为 550 KV，国产 YDC-1500/1500 (额定电压为 1500 KV，额定容量为 1500 KVA) 二级串级试验变压器，单台 750 KV 变压器的 5 分钟 100 Hz 自感应试验电压为额定电压的 110%；两台串级时所取的感应试验电压仅为额定电压的 105%。而电力变压器的试验电压常比额定电压高得多，例如 220 KV 电力变压器的一分钟工频试验电压为 325~400 KV；330 KV 变压器的出厂一分钟相对地工频试验电压为 510 KV (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 500 KV 试验变压器，在额定电压下只能连续工作 30 分钟，在 330 KV 电压及 330 KVA 容量下才能持续运行。有的特高电压的试验变压器，在额定电压及额定容量下，只能运行 5 分钟。

试验变压器在进行试验时的接线为下：

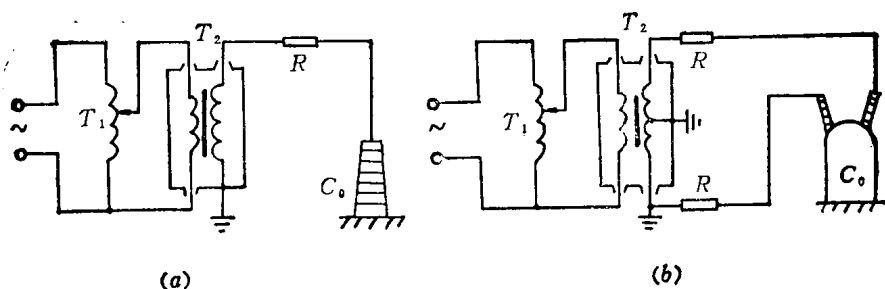


图 1-1 试验变压器试验接线图

(a) 试验相绝缘线路

(b) 试验相间绝缘线路

T_1 调压器 T_2 —试验变压器 R —保护电阻 C_0 —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，环境温度高于 0°C 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），这样高压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 为高压的输出电压额定值）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 1-6 所示。

各种变压器的外形见图 1-2、图 1-3、图 1-4、图 1-5。

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。

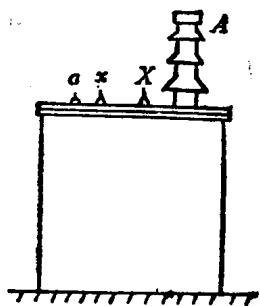


图 1-2 油浸式单套管试验变压器外形

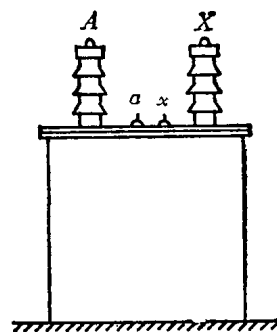


图 1-3 油浸式双套管试验变压器外形

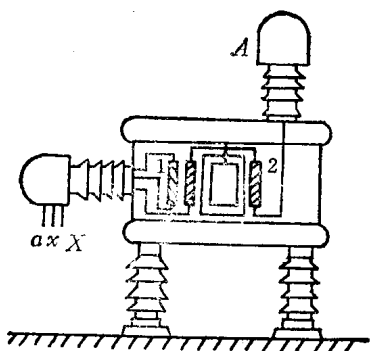


图 1-4 外铁壳需对地绝缘的双套管试验变压器
1—低压绕组，2—高压绕组

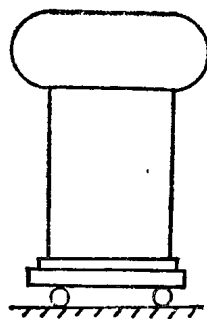
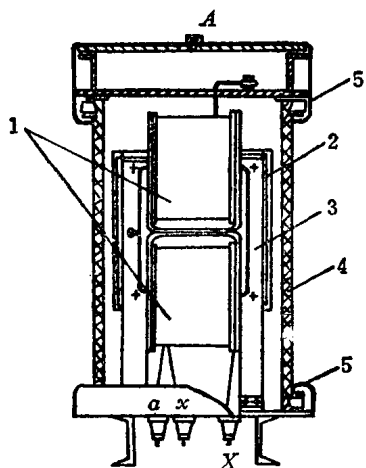


图 1-5 胶木筒外壳油浸式试验变压器



- 1—绕组
- 2—铁心
- 3—绝缘支架
- 4—绝缘筒
- 5—屏蔽罩

图 1-6 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。故单个变压器的电压都限制在 1000 千伏以下，目前国产的则限制在 750 千伏。国产试验变压器的额定电压和容量

表 1-1 国产试验变压器的额定电压和额定容量

额 定 电 压 KV	2.5	5	10	25	35	50	100	150	250	300	500	750	1000	1500	2250
额 定 容 量 KVA	3	3	3	3	3	5	10	25	250	300	300	750	1000	750	2250
	5	5	5	5	5	10	25	50	500	1200	500	1500		1500	9000
	10	10	10	10	10	25	50	100	1000		1000	3000			
	25		25	25	25	50	100	150			2000				
				50	50	100	200	300							
					100	250	250								
					150	500	400								
					200	750									

量如表 1-1 所示, 单台式和串级式分别叫作 YD 型和 YDC 型。

因为试品大多为电容性的。当知道试品的电容量(参见表 1-2)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变压器容量:

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

$$\text{所需变压器容量} \quad P_s = \omega C U^2 \times 10^{-9} \text{ KVA} \quad (1-2)$$

式中 U ——所加的试验电压 KV (有效值)

C ——试品的电容量 pF

ω ——所加电压的角频率

表 1-2 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

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 ≥ 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式计算:

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

式中 U ——试验电压值 KV

C ——试品电容 pF

L ——补偿线圈电感 H

ω ——试验电压频率

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导电性负载,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,此外对于运输与安装亦有困难。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。

根据变压器原边绕组供电方式之不同,串级变压器可有两种类型的串级方式。

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,

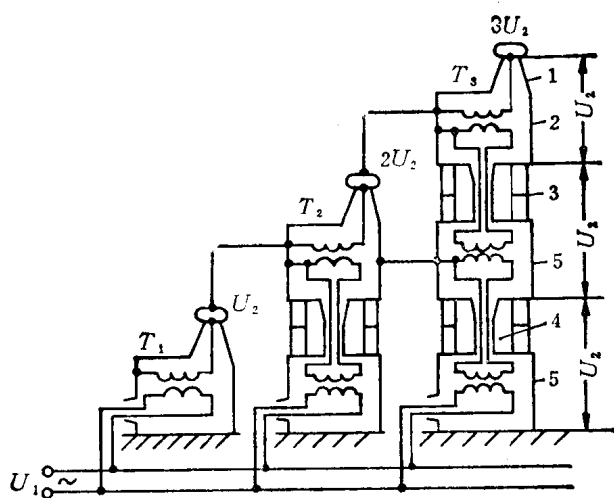


图 1-7 通过绝缘变压器供给励磁电流的串级变压器

1—高压套管 2—高压变压器 3—支持绝缘 4—套管 5—绝缘变压器 T_1 T_2 T_3 —串级变压器

除第一级外，要通过绝缘变压器才接到共同的低压电源。图 1-7 是具有三个变压器的串级装置。绝缘变压器原付边绕组匝数相同，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低压侧电源母线。这样，每台变压器所需要的内绝缘和引出套管的绝缘只要 U_2 的水平就可以了，而串接产生的电压则可达 $3 U_2$ 值。变压器的外壳和铁心带有同样的电位，试验变压器外壳和绝缘变压器外壳之间有 U_2 的电位差，所以要用支持绝缘子相隔离。由图 1-7 可见串级数为 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。可见，这种串接方式当级数增多时就需要很多变压器，因而增加了投资费，而且占据很大的面积。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，前一级的变压器容量将包括后一级的容量。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。

第二种串级方式是称为自耦式串级变压器，这是目前最常用的串级方式。在此法中高一级的变压器的励磁电流由前面一级的变压器来供给。图 1-8 为由 3 个变压器所组成的串级装置

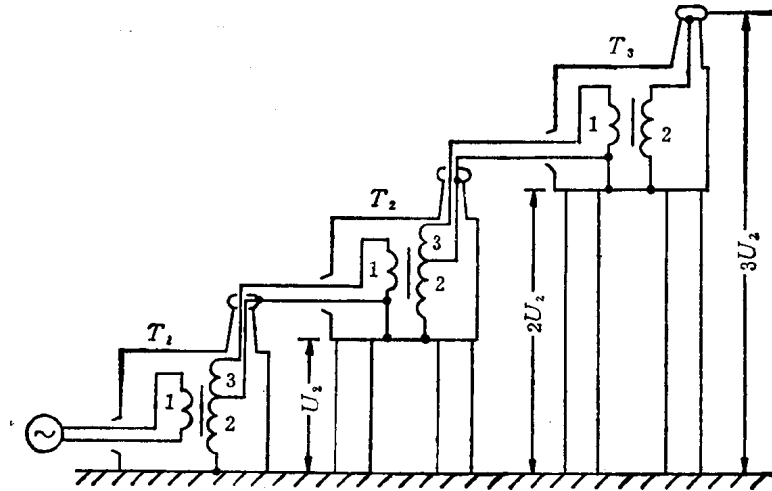


图 1-8 由单（高压）套管变压器元件组成的串级变压器示意图

置，图中绕组 1 为低压绕组，2 为高压绕组，3 为供给下一级励磁用的串级励磁绕组。设该装置输出的额定试验容量为 $3 U_2 I_2$ 千伏安，则最高一级变压器 T_3 的高压侧绕组额定电压为 U_2 千伏，额定电流为 I_2 ，装置的额定容量为 $U_2 I_2$ 千伏安。中间一台变压器 T_2 的装置额定容量为 $2 U_2 I_2$ 千伏安。这是因为这台变压器除了要直接供应负荷 $U_2 I_2$ 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 $U_2 I_2$ 。同理，最下面一台变压器 T_1 应具有的装置额定容量为 $3 U_2 I_2$ 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，当串级数为 3，则串级变压器之输出额定容量为 $W_{\text{试}} = 3 U_2 I_2 = 3 W$ ，而串级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，即

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

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 $W_{\text{试}} = n U_2 I_2 = n W$ ，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 $\frac{W_{\text{装}}}{W_{\text{试}}} =$

$\frac{n+1}{2}$ 。换言之，试验装置的利用率 $\eta = \frac{W_{\text{试}}}{W_{\text{装}}} = \frac{2}{n+1}$ 。所以随串级级数的增加，装置的利

用率显著降低。这是这类串级试验变压器的一个缺点。一般串级的级数 $n \leq 3 \sim 4$ 。

由图 1-8 中可见串级变压器在稳态工作时各级变压器的电位分布情况。各级变压器的铁芯和它的外壳接在一起，它们具有同一个电位。如图所示，最终的输出电压为 $3 U_2$ ，则第 3 级变压器的外壳对地有 $2 U_2$ 的电位差；第 2 级变压器的外壳对地有 U_2 的电位差，所以需分别用相应的支持绝缘子把它们对地绝缘起来。各级变压器的高压绕组 2 以及激磁绕组 3 对低压绕组 1 和外壳、铁芯之间的主绝缘，只需要耐受 U_2 水平的电压。同样，每级变压器的套管也只需耐受 U_2 等级的电压。

国产 $3 \times 250 \text{ KV}$ 的 YDC 型串级试验变压器就是采用图 1-8 状的结构和接线。它的特点是每级变压器的高压绕组末端接外(铁)壳，每级变压器只有一个高压套管。图 1-9 为类似结构及接线的一套三级串接的 1500 KV 试验变压器简略图形。

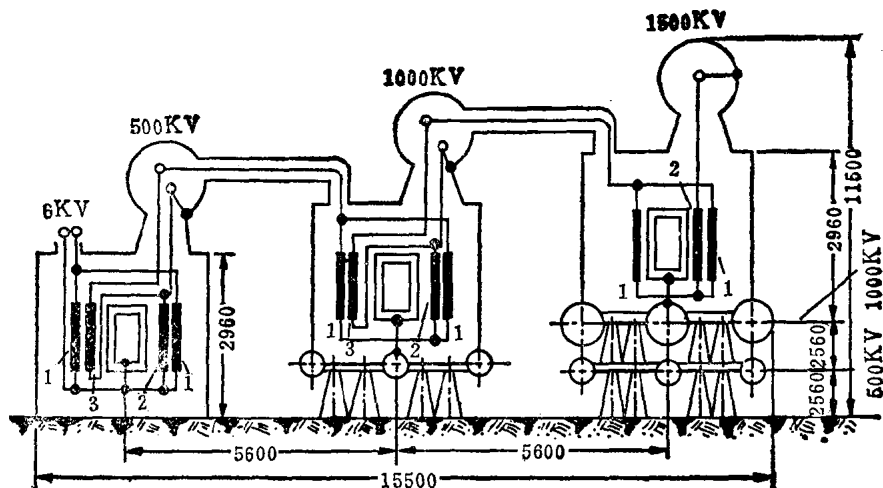


图 1-9 1500 KV 三级串级变压器结构简图

注：该变压器输出试验额定容量为 1500 KVA，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(如图 1-10)。其优点显然是可以降低绝缘水平。每个高压套管引出端对铁壳和铁芯的压差是高压绕组总电压的一半。因此高压套管以及内部主绝缘的绝缘水平只要能耐受每级电压的一半就可以了。每一级变压器的外壳都带有一定的电位，如图中所示，

所以每一级变压器都需要支持绝缘子把它们对地绝缘起来。平衡绕组的作用是为了减少变压器的短路电抗，在下一节中将予以说明。若暂且不管平衡绕组的作用，那么这类变压器的自耦串级的方式如图 1-11 所示。

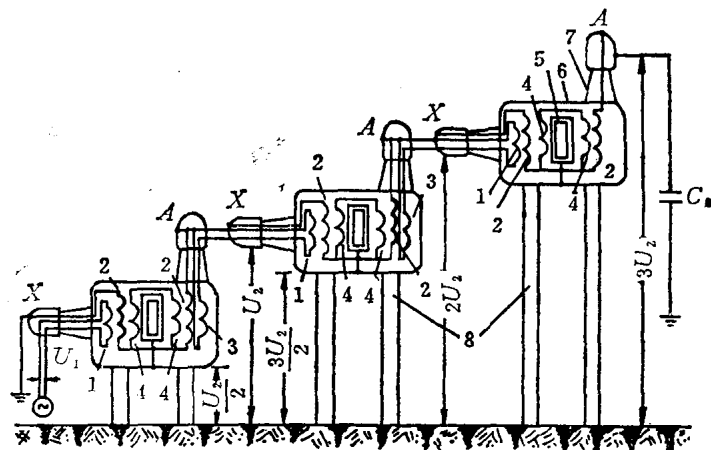


图 1-10 由双（高压）套管变压器元件组合的串接变压器示意图
1—低压绕组 2—高压绕组 3—串级激磁绕组 4—平衡绕组 5—铁芯 6—外铁壳
7—高压套管 8—支持绝缘子

图 1-12 中所示的变压器的额定试验容量为 1000 KVA。整个装置由三台 2.3/333 KV 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 166 KV，每台变压器的外壳（由低到高）的对地电压分别为 166, 500 及 833 KV。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。每级变压器的平衡绕组 $c-d$ 接点处可予解开，供给励磁或接 $L-C$ 调波回路。

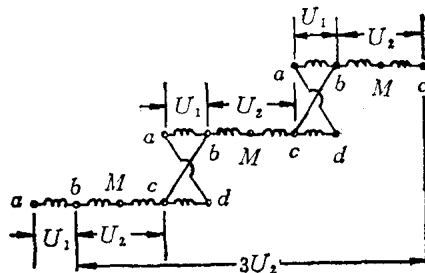


图 1-11 自耦串级接线图

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

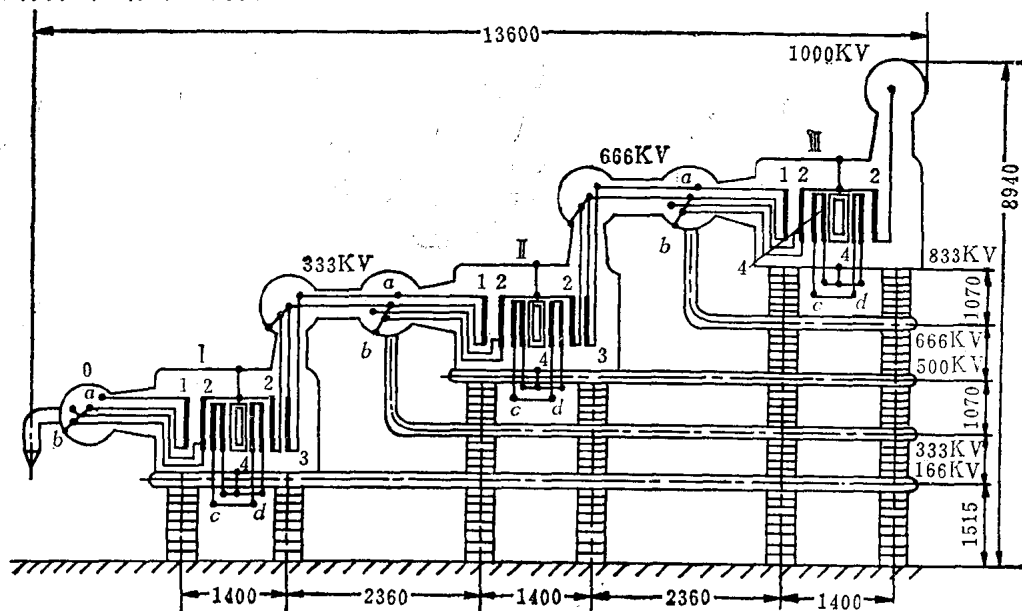


图 1-12 1000 KV 三级串级变压器结构简图

1-3-2 自耦式串级变压器的短路电抗计算

试验变压器的短路电抗如果过大, 会严重降低试验设备的短路容量, 从而会影响绝缘子湿闪或污闪电压的测试结果。另外, 试验变压器经常接有电容性负载, 当电容性电流流过试验变压器以及调压器的短路电抗时, 将使输出电压超过由变压器原付边电压比所确定的数值。因此试验变压器的短路电抗值不宜过大。单台试验变压器的阻抗电压一般为 4.5~9%, 但三台串级时则可高达 22~40% 左右。

为了分析串级变压器总的等值短路阻抗与每级变压器的短路阻抗的关系, 现计算三台变压器串级的情况如下。按前述原理可知, 前面的两台变压器实际为三绕组变压器, 最高电位的一台变压器则为双绕组变压器。以符号 L 表示低压侧; H 表示高压侧; K 表示串级激磁侧。根据图 1-13 所示三绕组变压器短路试验的方法, 可以分别测得每侧的短路阻抗值。忽略电阻效果, 认为短路阻抗近似地即为短路电抗。

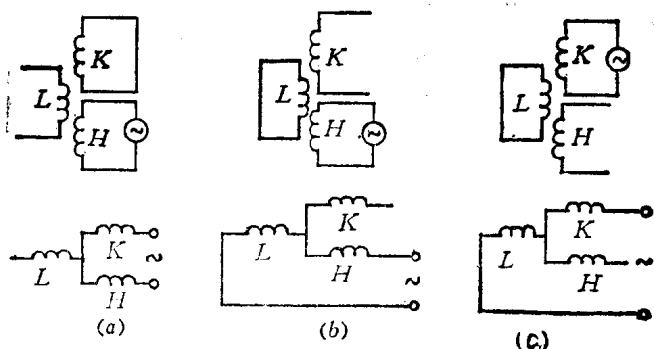


图 1-13 三绕组变压器的短路试验

由图 1-13 (a) 的接线可知 $x_{HK} = x_H + x'_K$

由图 1-13 (b) 的接线可知 $x_{HL} = x_H + x'_L$

由图 1-13 (c) 的接线可知 $x'_{LK} = x'_L + x'_K$

上述符号已表明, 各短路电抗值是归算到 H 侧的。

$$\text{于是得} \left\{ \begin{array}{l} x_H = \frac{1}{2} (x_{HL} + x_{HK} - x'_{KL}) \\ x'_L = \frac{1}{2} (x_{HL} + x'_{KL} - x_{HK}) \\ x'_K = \frac{1}{2} (x_{HK} + x'_{KL} - x_{HL}) \end{array} \right. \quad (1-4)$$

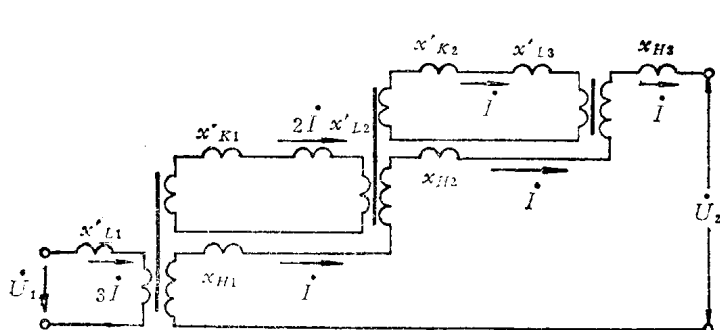


图 1-14 一个三级自耦串级的变压器等值回路图

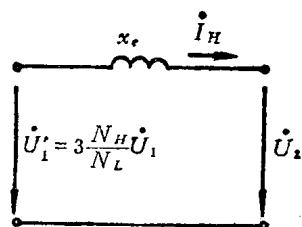


图 1-15 简化了的等值回路
 x_e —等效短路电抗之总值
 N_H —高压绕组匝数 N_L —低压绕组匝数
 U'_1 —低压侧电压归算到串级变压器高压侧值

如图 1-14 所示, 在略去励磁电流的条件下, 把变压器看为是理想的三绕组或双绕组变压器与各侧相应的短路电抗的迭加。图中各绕组中的电抗及电流均已归算到各台变压器的高压侧。因串级激磁侧的绕组匝数 N_K 与低压侧绕组的匝数 N_L 相等, 故 $N_H/N_L = N_H/N_K$ 。图 1-14 可以简化为图 1-15 的等值电路图, 其中 x_e 为归算到高压侧的总等值短路电抗值。根据等值前后的短路电抗上的无功功率值应相等的关系, 可以得到:

$$I_H^2 x_e = I_H^2 (x_{H1} + x_{H2} + x_{H3}) + I_{K1}'^2 \cdot x_{K1}' + I_{K2}'^2 \cdot x_{K2}' + I_{L1}'^2 \cdot x_{L1}' + I_{L2}'^2 \cdot x_{L2}' + I_{L3}'^2 \cdot x_{L3}' \quad (1-5)$$

图 1-14 中已标出: $I_H = I$ 以及

$$I_{L1}' = 3I \quad I_{K1}' = I_{L2}' = 2I \quad I_{K2}' = I_{L3}' = I$$

$I_{K1}', I_{K2}', I_{L1}', \dots$ 分别表示流过 $K_1, K_2, L_1, \dots$ 绕组电流的高压侧折合值。(1-5)式整理后可得归算到高压侧的总等值短路电抗值为:

$$x_e = x_{H1} + x_{H2} + x_{H3} + x_{K2}' + x_{L3}' + 4(x_{K1}' + x_{L2}') + 9x_{L1}' \quad (1-6)$$

利用(1-4)式的关系, 可以把(1-6)式改写为

$$x_e = 3x_{HL1} + 6x_{KL1}' - 2x_{HK1} + 2x_{HL2} + 2x_{LK2}' - x_{HK2} + x_{HL3} \quad (1-7)$$

由相同的计算方法, 可得 n 级串联的变压器归算到高压侧的总等值短路电抗值为

$$x_e = \sum_{N=1}^n [x_{HN} + N^2(x_{L(n+1-N)}' + x_{K(n-N)}')] \quad (1-8)$$

在代此式时, 当出现 x_{K0}' , 则令 $x_{K0}' = 0$

从(1-7)式及(1-8)式可见, 串级变压器的总等值短路电抗随级数 n 之增大而显著地增大。

§ 1-3-3 降低试验变压器短路电抗的内部结构措施

变压器的短路电抗值与变压器原付边绕组的相互布置有关。原付绕组套在变压器同一个铁心柱上的变压器, 与原付绕组分别套在两个铁心柱上的变压器相比, 前者的短路电抗容易做得小一些, 因为前者的漏磁通相对较小; 而后者则较大(见图 1-16 及图 1-17, 图 1-16 及 1-17 中符号 $\odot$ 表示电流方向为出纸面; $\otimes$ 则为入纸面)。

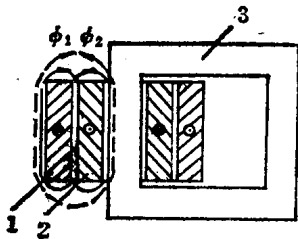


图 1-16 原付绕组绕在同一个铁心上
的漏磁通示意图

1—原绕组 2—付绕组 3—铁心 ϕ_1 及 ϕ_2 —原付绕组产生的漏磁通

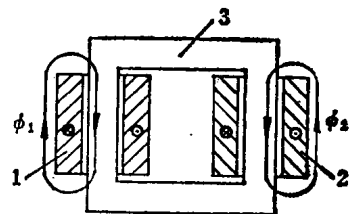


图 1-17 原付绕组绕在两个铁心柱上
的漏磁通示意图

1—原绕组 2—付绕组 3—铁心 ϕ_1 及 ϕ_2 —原付绕组产生的漏磁通

双高压套管的试验变压器, 由于绝缘的原因, 付边高压绕组不完全与原边低压绕组套装在同一个铁心柱上。如不采取一定的措施的话, 变压器的漏抗就会太大。为了减小漏抗, 常在变压器两个铁心柱上套装平衡绕组。关于平衡绕组我们首先说明下述几点: (1) 左右两柱的平衡绕组的匝数各为 N_{P1} 及 N_{P2} , 而且两者的匝数是相同的, 即 $N_{P1} = N_{P2} = N_1$ (2) 左右