

电力行业高技能人才培训系列教材

继电保护工

(适用于技师、高级技师)

河南电力技师学院 编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

电力行业高技能人才培养系列教材

继电保护工

(适用于技师、高级技师)

河南电力技师学院 编

常州大学图书馆
藏书章



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



本教材是配合劳动和社会保障部与中国电力企业联合会共同启动的“电力高技能人才培养项目”而组织编写的。本书共包括四个单元，十五个模块，六十九个课题，涉及电气设备、高电压技术、电气运行、电力通信、电力应用文、电工、电子、电力网与电力系统、电力系统故障分析、线路保护、电力变压器保护、母线保护、发电机保护、微机型自动装置等多方面的综合内容，有的模块后附有思考与练习。最后一单元为综合技能训练知识部分，突出了技能培训。

本书可作为继电保护高技能人才的培训教材，也适合于从事变电运行工作人员学习使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

继电保护工/河南电力技师学院编. —北京: 中国电力出版社, 2010

(电力行业高技能人才培养系列教材)

ISBN 978-7-5123-0047-7

I. ①继… II. ①河… III. ①继电保护-技术培训-教材 IV. ①TM77

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 016138 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 7 月第一版 2010 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21.5 印张 521 千字

印数 0001—4000 册 定价 36.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

《电力行业高技能人才培养系列教材》

编 委 会

主 任： 苏国政

副主任： 赵顺通 仝全利

委 员：（按姓氏笔画排序）

邓启民 吴 兵 吴 荻 沈世峰 宋素琴

陈 岳 陈建国 徐文忠 郭海云



前 言

2003 年底,劳动和社会保障部全面启动了国家高技能人才培养工程。为了加快电力行业高技能人才队伍建设,劳动和社会保障部与中国电力企业联合会共同启动了“电力高技能人才培训项目”,组织编写了《电力行业特有工种技师、高级技师培训规范》,以指导电力行业高技能人才培训工作的开展。

河南电力技师学院作为河南省电力公司生产技能人员培训中心,自 1997 年全面开展电力行业高技能人才培训工作,在电力行业高技能人才培训方面积累了丰富的经验。但在培训过程中深感电力高技能人才培训教材匮乏且针对性不强,无法满足《继电保护培训规范》的要求。为进一步规范高技能人才培训工作,提供适用的配套教材,河南省电力公司专门成立编写委员会,指导河南电力技师学院组织编写了《电力行业高技能人才培训系列教材》。

在本次编写过程中,各编写组在编写委员会的指导下,积极组织研讨,充分听取电力行业专家有关编写的意见和建议;认真进行职业能力分析,以国家职业标准及相关规程、规范为依据;结合各工种职业技能鉴定规范及新知识、新技术、新设备、新工艺的内容采用模块化结构进行编写。教材内容主要针对技师培训需求,兼顾高级工、高级技师培训,以适用为主、够用为度,突出了专业理论知识与实际操作内容相结合的职业培训特色。

全书共分四个单元,十五个模块,主要包括电气设备、高电压技术、电气运行、电力系统故障分析等内容。特别增加了综合技能训练知识部分,突出了技能培训。

本书由杜荣君主编,第一单元模块一由符贵编写,模块二由陈邓伟编写,模块三由付红艳编写,模块四由曹飞飞、杜荣君、周海涛编写,模块五由郑香云编写;第二单元模块一由张巍立编写,模块二由张建军编写,模块三、模块四由王跃辉编写;第三单元各模块由杜荣君编写;第四单元由张化平、刘红芹编写。

本套系列培训教材的编写得到了河南省电力公司、许继电气股份有限公司及电力行业有关专家的大力支持,在此表示衷心的感谢。由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者提出批评指正。

编 者

2009 年 12 月



目 录

前言

第一单元 相 关 知 识

模块一 电气设备	1
课题一 大型电力变压器的参数定义	1
课题二 大型变压器基本结构	4
课题三 电力互感器的结构	8
课题四 互感器运行和维护	15
课题五 新型电力互感器介绍	18
课题六 六氟化硫高压断路器	22
课题七 GIS	32
思考与练习	38
模块二 高电压技术	39
课题一 过电压及其防雷保护	39
课题二 电气设备预防性试验	47
思考与练习	56
模块三 电气运行	57
课题一 电气设备运行知识	57
课题二 电气运行事故处理	71
课题三 五防措施	93
模块四 电力通信	97
课题一 电力通信概念概述	97
课题二 光纤通信	107
课题三 载波通信	113
课题四 变电站综合自动化知识	116
课题五 计算机网络在继电保护中的应用	123
思考与练习	125
模块五 电力应用文	126
课题一 应用文概述	126
课题二 总结	127

课题三 电力安全生产类文书·····	130
课题四 电力专业技术论文·····	134
思考与练习·····	143

第二单元 专业基础知识

模块一 电工·····	144
课题一 过渡过程的基本概念及换路定理·····	144
课题二 求解一阶线性电路过渡过程的三要素法·····	145
课题三 不对称三相电路分析·····	148
课题四 三相电压和电流对称分量法·····	150
课题五 对称三相电路中的高次谐波·····	152
思考与练习·····	154
模块二 电子·····	155
课题一 脉冲数字电路基础·····	155
课题二 基本数字部件·····	159
思考与练习·····	167
模块三 电力网与电力系统·····	169
课题一 电力网元件的功率损耗和电压降落·····	169
课题二 开式网络的潮流计算·····	172
课题三 电力系统有功功率的平衡和频率调整·····	178
课题四 电力系统无功功率的平衡和电压调整·····	180
思考与练习·····	182
模块四 电力系统故障分析·····	184
课题一 电力系统故障分析基础知识·····	184
课题二 电力系统短路故障分析方法·····	192
课题三 变压器两侧电气量关系及其简单故障分析·····	195
思考与练习·····	205

第三单元 专业理论

模块一 线路保护·····	207
课题一 电流保护·····	207
课题二 距离保护·····	212
课题三 纵差动保护·····	214
课题四 高频保护·····	216
课题五 中低压线路保护程序逻辑·····	220
课题六 高压超高压线路保护程序逻辑·····	224

模块二 电力变压器保护	229
课题一 电力变压器的保护配置.....	229
课题二 电力变压器的瓦斯保护.....	230
课题三 电力变压器差动保护.....	231
课题四 电力变压器的后备保护.....	236
模块三 母线保护	245
课题一 母线故障及保护类型.....	245
课题二 母线的完全电流差动保护.....	246
课题三 比相式母线差动保护.....	248
课题四 比率制动式母线差动保护.....	249
课题五 母线微机保护程序逻辑.....	250
模块四 发电机保护	253
课题一 发电机保护概述.....	253
课题二 发电机相间短路的纵联差动保护.....	255
课题三 发电机定子绕组的匝间短路保护.....	257
课题四 发电机定子绕组的单相接地保护.....	260
课题五 发电机转子回路接地保护.....	261
课题六 发电机的失磁保护.....	262
课题七 发电机的过负荷保护.....	263
课题八 发电机的电流、电压保护.....	264
模块五 微机型自动装置	267
课题一 微机型备用电源自动投入装置 (AAT)	267
课题二 微机型自动重合闸装置.....	270
课题三 微机型同步发电机自动并列装置.....	282
课题四 微机型同步发电机自动调节励磁装置.....	285
课题五 微机型自动按频率减负荷装置.....	291
课题六 微机型故障录波装置.....	298

第四单元 综合技能训练

课题一 微机线路保护装置的调试.....	304
课题二 微机母线保护装置的调试.....	309
课题三 微机变压器保护装置的调试.....	314
课题四 高频通道的调试技能训练.....	319
参考文献	333

第一单元

相 关 知 识



模块一 电 气 设 备

课题一 大型电力变压器的参数定义

一、变压器的型号

变压器产品型号表示变压器参数和结构特点，其表示方法为：①②—③—④/⑤—⑥。其中：①为特殊使用环境；②为电压等级，kV；③为额定容量，kVA；④为特殊用途或特殊结构；⑤为性能水平；⑥为产品型号字母。型号中字母的含义见表 1-1-1。

表 1-1-1 电力变压器的产品型号中字母及含义

序号	分 类	含 义		代表字母
1	绕组耦合方式	独立		—
		自耦		O
2	相 数	单相		D
		三相		S
3	绕组外绝缘介质	变压器油		—
		空气（干）式		G
		气体		Q
		成型固体	浇注式	C
			包封式	CR
		难燃液体		N
4	冷却装置种类	自然循环冷却装置		—
		风冷却装置		F
		水冷却装置		S
5	油循环方式	自然循环		—
		强迫油循环		P
6	绕组数	双绕组		—
		三绕组		S
		双分裂绕组		F
7	调压方式	无励磁调压		—
		有载调压		Z
8	绕组导线材质	铜		—
		铜箔		B
		铝		L
		铝箔		LB

续表

序号	分类	含义	代表字母
9	特殊用途和特殊结构	密封式	M
		高阻抗	K
		低噪声	Z
		电缆引出	L
		现场组装式	X

例如，一台变压器型号为 SFPSZ—63000/110，表示的含义为：三相绕组，散热器风冷却，强迫油循环冷却方式，每相绕组三个电压等级，有载调压方式，容量为 63000kVA，高压侧额定电压为 110kV。

二、电力变压器相关技术参数

变压器的额定参数是指变压器正常运行时，对它的各项技术性能要求的规定。此参数是变压器设计、制造及出厂试验的依据。变压器额定参数下运行，可以保证长期可靠地工作并达到要求的性能，体现了变压器运行可靠性和经济性的统一。

额定参数亦称为额定值，通常标注在变压器的铭牌上，故也称为铭牌值。

1. 空载电流和空载损耗

变压器在空载运行时没有功率输出，故空载时变压器从电源吸取的功率全部转化为能量损耗，称为空载损耗，用 ΔP_0 表示，空载损耗主要是铁芯损耗。铁芯在交变磁通作用下，将产生铁芯损耗，简称铁损，用 ΔP_{Fe} 表示，铁损包括磁滞损耗和涡流损耗两部分。铁损的大小与硅钢片的种类、电源的频率 f 和磁通密度有关。若电压和频率不变，铁损总是不变的，故铁损又称为不变损耗。变压器的空载损耗通常只占变压器额定功率的 0.2%~1.5%。

2. 阻抗电压和负载损耗

将双绕组变压器二次绕组短路，使一次绕组电压慢慢增大，当二次绕组的短路电流达到额定电流时，一次绕组所施加的电压（短路电压）与额定电压的比值百分数为阻抗电压，且应折算到参考温度，即

$$u_k\% = \frac{U_K}{U_N} \times 100\%$$

油浸式变压器的参考温度见表 1-1-2。

表 1-1-2 油浸式变压器的参考温度

耐 热 等 级	参 考 温 度 (°C)
A、E、B	75*
其他等级	115

* 强迫导向油循环时为 80°C。

阻抗电压大小与变压器的成本、性能、系统稳定性和供电质量有关，电力变压器的标准阻抗电压见表 1-1-3 和表 1-1-4。

表 1-1-3 双绕组变压器的标准阻抗电压

电压等级 (kV)	6~10	35	63	110	220
阻抗电压 (%)	4~5.5	6.5~8	8~9	10.5	12~14

表 1-1-4

三绕组和自耦变压器的标准阻抗电压

电压等级		110kV 三绕组			220kV 三绕组			220kV 自耦		
绕组组合		高中	高低	中低	高中	高低	中低	高中	高低	中低
阻抗电压 (%)	升压结构	17~18	10.5	6.5	22~24	12~14	7~9	12~14	8~12	14~18
	降压结构	10.5	17~18	6.5	12~14	22~24	7~9	8~10	28~34	18~24

当变压器二次绕组短路，一次绕组流通额定电流时所消耗的有功功率称负载损耗。

负载损耗包括最大一对绕组的电阻损耗和附加损耗。负载损耗包括绕组涡流损耗、并绕导线的环流损耗、结构损耗和引线损耗，其中电阻损耗也称为铜耗。

3. 接线组别

变压器的接线组别就是指变压器一、二次侧线电压之间的相位关系。“接线”是指一、二次绕组的连接方式，“组别”则是指的一、二次电压之间的相位差，变压器的接线组别不同，其一、二次侧的线电压之间的相位差就不同。

我国电力变压器制造标准规定采用下列三种接线组别：

(1) Yyn0 接线组别用于配电变压器，其电压一般为低压 400/230V，即三相线电压 400V 向动力供电，而 230V 的相电压向照明及民用电器等单相设备供电。此时，星形接线的低压绕组中性点必须引出。

(2) Yd11 接线组别用于中、小容量变压器高压为 10~35kV，低压为 3~10kV 电压等级的变压器及较大容量的发电厂厂用变压器。

(3) YNd11 接线组别，用于大容量的 35kV 及电压为 110kV 及以上电压等级的变压器，当变压器的高压绕组的中性点，须经消弧电抗器（35kV 侧）接地或直接接地（110kV 及以上）时，必须将中性点引出。

4. 效率和电压变化率

变压器的效率为输出有功功率与输入有功功率之比的百分数。

变压器效率的计算公式为

$$\eta = \left(1 - \frac{p_0 + \beta^2 p_{KN}}{\beta S_N \cos \varphi_2 + p_0 + \beta^2 p_{KN}} \right) \times 100\%$$

根据计算，可求出最高效率时的负载系数

$$\beta_m = \sqrt{\frac{p_0}{p_{KN}}}$$

$$\eta_m = \left[1 - \frac{2p_0}{\sqrt{\frac{p_0}{p_{KN}}} S_N \cos \varphi_2 + 2p_0} \right] \times 100\%$$

即当铁耗等于铜耗时效率最大。由于变压器总是在额定电压下运行，但不可能长期满负载。为了提高运行的经济性，通常 β_m 设为 0.5~0.6，使铜耗较小。

电压变化率是当一次侧接在额定电压、额定频率的电网上时，二次侧的空载电压与额定负载下二次侧电压的算术差，用二次侧额定电压的百分数来表示的数值，即

$$\Delta U\% = \frac{(U_{20} - U_2)}{U_{2N}} \times 100\%$$

电压变化率的大小与变压器的阻抗电压、负载的性质有关。电压变化率是衡量变压器供

电质量好坏的数据。

5. 额定温升

变压器的上层油温与变压器周围空气温度的差值称为变压器的温升。根据国家有关标准的规定,当变压器安装地点的海拔高度低于 1000m 时,绕组的温升不能大于 65℃,变压器上层油面的温升限值为 55℃,此时若变压器周围空气的最高温度为 40℃,则变压器在运行时,上层油面的最高温度不能超过 95℃。

课题二 大型变压器基本结构

变压器是电力系统中重要的电气设备,主要由绕组、铁芯及绝缘系统组成。

一、铁芯

铁芯的作用主要是构成磁路,同时变压器又是机械支撑。铁芯结构由铁芯柱、铁轭和夹紧装置组成。铁芯柱上套装绕组,而上下铁轭配合铁芯柱构成闭合磁路。为了提高导磁性,同时减少磁滞损耗和涡流损耗,变压器的铁芯一般采用两面涂有绝缘漆的硅钢片,厚度为 0.3~0.5mm。铁芯可以采用叠铁芯和卷铁芯两种形式。

对于铁芯的夹件结构,目前仍为两种形式,一种为老式的穿芯螺栓夹紧结构,另一种为无螺栓的夹紧结构。前者适用于老式的小型变压器,后者适用于现代大型的变压器。目前夹件都采用高强度的环氧玻璃丝带缠绕,以使夹件具有一定的弹性,从而获得均匀的压力,减弱对声音和振动的传播。

为防止变压器在运行和试验时由于铁芯即金属结构件上产生的悬浮电位而引起的放电现象,铁芯和所有的金属结构件都必须可靠的接地。但如果有两点或两点以上的接地,则会产生循环电流而造成局部过热。所以,变压器的铁芯必须一点接地。

二、绕组

绕组是变压器进行电能交换的部件,通常采用绝缘铜线或绝缘铝线绕制而成。一般情况下,绕组应达到下列目的:

- (1) 适应各种电压应力,如雷电波和操作波,并有足够的绝缘强度。
- (2) 具有足够的绕组冷却能力,即具有足够的空间留给绝缘介质和冷却通道。
- (3) 具有足够的机械强度(如耐受短路的能力)。
- (4) 最低的造价。

(5) 合乎规定的损耗。电力变压器一般采用同心式绕组,呈圆筒形,套装在铁芯柱上。从绝缘距离和出线方便考虑,低压绕组放在内层,而高压绕组放在外层。高压绕组匝数多,导线低压绕组匝数少,导线截面粗。同心式绕组根据容量和电压等级不同,可以分为圆筒式、螺旋式、连续式、纠结式等形式。

变压器的绕组绝缘是由变压器油隙、隔板和纸筒等组成,耐热等级是 A 级,主要绝缘材料是变压器油、电缆纸、电话纸、绝缘纸板、酚醛压制品等。

三、变压器油箱和附件

1. 油箱

油浸式电力变压器油箱内充满了变压器油,油箱上安装着散热器、净油器等多个附属部件。根据变压器器身质量的不同,油箱可以选择分别采用桶式(平顶油箱)和钟罩式(拱顶

油箱)两种。桶式油箱适用于小容量电力变压器,器身质量轻,箱盖和器身固定在一起的,大修时一同吊出油箱检修。钟罩式油箱适用于大、中容量电力变压器,器身质量大,起吊困难,箱盖和器身是分开的,大修时需排油后吊起上节油箱,露出器身进行检修。

2. 变压器的附件

附件主要包括冷却装置、保护装置、调压装置、出线装置和测量装置五大部分。

(1) 冷却装置:包括冷却器、散热器及各种连管、阀门等。

(2) 保护装置:包括储油柜、吸湿器、净油器、气体继电器、安全气道、压力释放阀和放油阀门等。

(3) 调压装置:包括有载分接开关和无载分接开关等。

(4) 出线装置:包括各类瓷套管、绝缘子及电控系统等。

(5) 测量装置:包括套管型电流互感器、油位检测计、温度计、油流计和色谱检测仪等。

四、变压器的绝缘系统

变压器绝缘的性能(电气、耐热和机械性能)是决定其能否运行的基本条件之一。任何局部绝缘的损坏都有可能损坏整台变压器,甚至危及输配电系统的安全运行。变压器绝缘之所以重要,还在于变压器绕组、引线、分接开关等部件以及它们之间的整体——器身,均涉及绝缘问题。

变压器绝缘分为内绝缘和外绝缘两大类,而内绝缘又分为主绝缘和纵绝缘两类。主绝缘是指绕组对地之间、相间和同一相而不同电压等级的绕组之间的绝缘;纵向绝缘是指同一电压等级的一个绕组,其不同部位之间,层间、匝间、绕组对静电屏之间的绝缘。表 1-1-5 为油浸式变压器绝缘分类。

表 1-1-5 油浸式变压器的绝缘分类

变压器 绝缘	内绝缘 (油箱中)	套管主绝缘 (油中放电距离)		同柱各绕组绝缘	
		绕组绝缘	主绝缘	距铁芯柱和铁轭的绝缘	
				各相之间的绝缘	
				绕组与油箱的绝缘	
			纵绝缘	筒式绕组的层间绝缘	
				饼式绕组的层间绝缘	
				导线线匝的匝间绝缘	
		引线绝缘	主绝缘	距接地部分的绝缘	
				与其他绕组的绝缘	
		分接开关绝缘	主绝缘	距地或其他部分的绝缘	
纵绝缘	异相触头间的绝缘				
	纵绝缘	同相接头间的绝缘			
外绝缘 (油箱外)		套管本身的外绝缘			
	套管之间的外绝缘				

在叙述变压器绝缘结构之前,先了解一下变压器内部所采用的一些主要绝缘材料。

(一) 主绝缘结构

变压器内部的主绝缘形式主要为油—隔板绝缘,通常采用加覆盖层、包绝缘层和在油隙中放置隔板三种形式。主绝缘的部位很多,如图 1-1-1 所示。现分述如下。

(1) 绕组与铁芯之间。铁芯包括芯柱与铁轭,它们在运行中是处于接地状态的,靠近

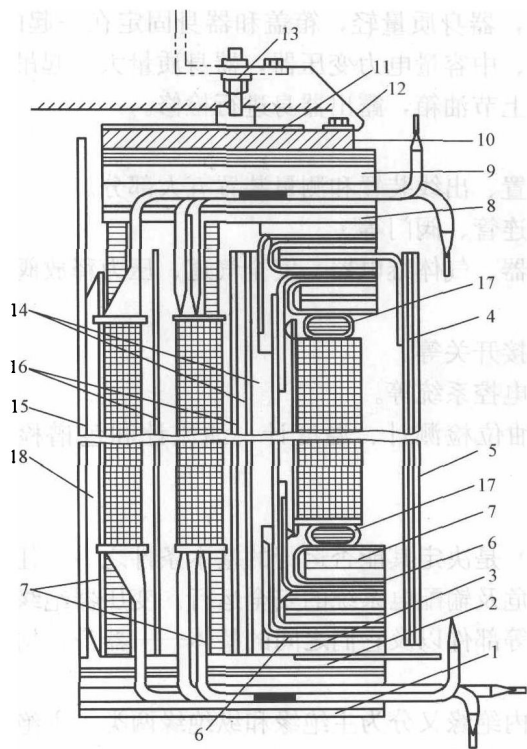


图 1-1-1 三绕组变压器的绝缘结构

- 1—铁轭绝缘垫块；2—下铁轭绝缘；3—绝缘纸圈；
4、6—角环；5—围屏；7—端圈；8—上铁轭绝缘；
9—绝缘纸圈；10—钢压板；11—压板绝缘；
12—接地钢片；13—压钉；14—油隙撑条；
15、16—绝缘纸筒；17—静电屏；18—撑条

芯柱的绕组与芯柱之间为绕组对地的主绝缘，图 1-1-1 中件 15 为绝缘纸筒，通常用每张厚度约 2.5~3mm 的绝缘纸板作成，围着圆柱形的铁芯。根据电压的高低，纸筒的总厚度可用纸板的张数多少来调节。纸筒的外径与绕组的内径之间用撑条垫开，如图 1-1-1 中元件 18 所示，以形成一定厚度的油隙绝缘。电压较高时可以用纸筒—撑条—纸筒—撑条重复使用的方法来构成，如图 1-1-1 中元件 14、16 所示。重复的次数应根据工作电压的需要来确定。油隙同时又是绕组与芯柱之间、不同电压等级的绕组与绕组之间的散热油道，当油对流时，将热量带到外部。

在每相绕组的上、下两端，绕组与上部的钢压板、下部的铁轭之间存在着绕组端部的主绝缘，或称作铁轭绝缘。绕组和铁轭绝缘之间还放置着端圈，也起端部绝缘作用。

绕组端部电场的分布是极不均匀的，为改善其分布，在 110kV 及以上变压器的端部，都放置有静电屏，如图 1-1-1 中元件 17 所示。静电屏除能改善端部电场分布使之均匀外，还能在冲击电压作用下改善起始电压分布。另外，端部还放置一定数量的正、反角环，把油隙分成几段，也起均匀电场分布的作用。

(2) 绕组与绕组之间。同一相中不同电压等级的绕组之间，或不同相的各电压绕组之间的绝缘，已广泛采用纸筒油隙绝缘，断面结构如图 1-1-2 所示。在大容量超高压变压器中，多采用薄纸筒小油隙结构。

在厚纸筒大油隙结构中，纸筒厚度 6mm，油隙宽度大于 20mm。按油隙被击穿后纸筒能承受试验电压来设计；在薄纸筒小油隙结构中，纸筒厚度小于 4mm，油隙宽度小于 15mm，按油隙击穿时纸筒也击穿的原则来设计。纸筒用来分割油隙，改善电场分布，提高油的耐电强度，所以纸筒厚度不宜过大。这种结构优点是：

- 1) 由于纸筒薄，可多分几层，油隙变小，击穿电压可提高。
- 2) 薄纸筒的介电常数比厚纸筒小，油中电场强度可降低；
- 3) 同一尺寸的油隙，纸筒数越多，则击穿场强就越高。

在 110kV 及以上变压器中，薄纸筒小油隙结构应用较多，厚纸筒大油隙结构则在 60kV 以下的电压等级中应用较多。

(3) 绕组与箱壳之间。最外层的绕组与油箱之间构成绕组对箱壳的主绝缘，电压在 110kV 及以下时依靠绝缘油的厚度为主绝缘；电压在 220kV 及以上时，增加纸板围屏来加强地对地之间的绝缘，使油中杂物在电场作用下搭起的“小桥”被隔断，围屏的层数可根据

需要而定。油隙宽度 9~10mm；纸筒厚度为 5~6mm。

绕组与箱壳内壁之间的距离，40kV 时为 60mm；60kV 时为 100mm；110kV 为 140mm；220kV 为 260mm，这些都是至少要保证的最小距离。

(4) 引出线的绝缘。电压等级不同，处理方法也不同。20kV 及以下的引出线，在绕组端头附近包以适当厚度的皱纹纸，离绕组稍远些，即用裸电缆线或金属硬母线，再焊接一段多层软铜皮线直接与瓷套管相连接；35~40kV 的引出线，则包以适当厚度（大于 5mm）的皱纹纸作为附加绝缘；60kV 及以上的引出线，都必须包以一定厚度的皱纹纸，60kV 为 10mm，110kV 为 20mm，220kV 为 35mm。

110kV 及以上的引出线，包缠时应先在绕组出线头与电缆线的焊接处用铝箔包绕数圈，这是因为焊接处的表面很粗糙且有许多尖角，电场不均匀，容易发生电晕和游离现象，对绝缘非常不利。用几层铝箔包绕后，表面趋于平滑。铝箔包绕时与引出导线相接触，处在同等电位，于是电场趋于均匀，然后再在铝箔的外表面开始包绕绝缘纸。经过这样处理后就不会发生电晕现象。皱纹纸的宽度有几种，根据电线引出线的外径粗细，选用宽度合适的皱纹纸进行包缠。

(5) 绕组中性点的绝缘。星形（即 Y）接线的绕组的中性点的电压与该变压器运行时在电网中的接线情况密切相关。例如 10kV 以下的高压电网，中性点是不直接接地的，因此当一相接地时，中性点电压就会发生偏移。而 110kV 及以上的超高压电网中，中性点是直接接地的，当发生一相接地时，中性点电压仍是地电位。但数台这种接线的变压器并列运行时，并不是所有的变压器中性点都是接地的，而是仅少数变压器中性点接地。当中性点接地的变压器因事故跳闸解列后，其他中性点不接地的运行变压器因一相接地而使中性点电压升高。

因此，对 Y 接线的绕组，其中性点绝缘水平有两种结构。一种为全绝缘，即中性点的绝缘水平与三相出线的绝缘水平相同，60kV 及以下的电压等级均是如此。另一种为分级绝缘，即中性点的绝缘水平低于三相出线的绝缘水平。110kV 的中性点的绝缘水平大多数为 35kV；220kV 的中性点绝缘水平为 110kV，称为半绝缘。在选择变压器中性点绝缘水平时必须要结合电网的运行方式而定。

(6) 分接开关的绝缘。为了工艺和制造上的方便，双绕组变压器的分接头总是放在高压绕组，而三绕组变压器则放在高、中压绕组。因此，分接开关的操动杆也成为高、中压绕组对地之间的主绝缘，因为操动杆的一端连接着高、中压导电部分，另一端则安装在箱壳上，而箱壳是接地的。操动杆大多数用酚醛绝缘纸管做成，也有用经过干燥处理的木料做成的，表面涂以保护漆。

根据三相变压器的三相分接开关的布置位置的不同，分接开关的导电部分构成相对相、相对地、或同一相首末端之间的绝缘。不同的电压等级对这些距离有不同的要求。分接开关安装在绝缘支架上，导电部分通过绝缘支架与地之间构成了主绝缘。主绝缘用木材或酚醛纸板做成。

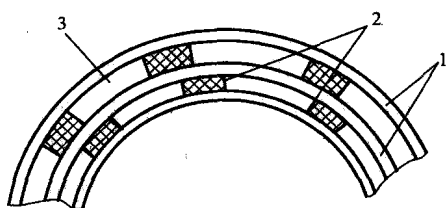


图 1-1-2 纸筒油隙的构造
1—纸圈；2—纸板垫块；3—引线孔

(7) 变压器的外部主绝缘。包括瓷套管对地绝缘和不同相瓷套管空间之间的距离。

1) 瓷套管的对地距离。瓷套管安装法兰以上的外部瓷套是瓷套管的引出线的对地绝缘, 不同电压等级有不同的外绝缘水平。衡量瓷套管的外绝缘水平可用泄漏比距来表示。为了抵抗不同程度环境污秽的需要, 出现了防尘型瓷套管, 有大小伞型和防尘伞型等品种。

2) 不同相瓷套管空间之间的距离。根据不同的电压等级规定了不同的数值, 见表 1-1-6。未列入的非标准电压可用插入法求之。

表 1-1-6

户外相间最小净距

额定电压 (kV)	1~10	35	110	220
相对相之间 (mm)	200	400	1000	2000

(二) 纵向绝缘

纵向绝缘是指同一绕组的匝间、匝间以及与静电屏之间的绝缘。在同一个线饼内, 绕有数匝线圈, 这时匝与匝之间需要有匝间绝缘。对于不同形式的绕组, 匝间电压数值亦不相同。若绕组的形式为纠结式, 其匝电压比一般连续式绕组时高。不同形式的纠结绕组, 其匝电压数值也不一样, 所以匝电压的具体数值要根据绕组的具体形式而定。

匝间绝缘由包在导线上的电缆纸构成, 不同的电压等级, 其匝间绝缘的厚度也不相同。层间绝缘是指一个线饼与另一个相邻线饼之间的绝缘, 也就是油道的宽度。

课题三 电力互感器的结构

电力系统中的互感器分为电压互感器和电流互感器两种。互感器的工作原理与变压器基本相同, 作用是将一次侧的高电压、大电流转变为二次侧的低电压和小电流。

电压互感器实质上是一种降压变压器, 将交流高压转变为一定数值的标准低电压, 以供给测量、继电保护及指示用。其特点为: 二次侧所带负载主要是仪表和继电器等的电压绕组, 阻抗较高, 电流不大, 容量较小, 相当于二次侧开路。电压互感器的二次回路在运行中不允许短路。

电流互感器是将线路上的大电流变为标准小电流。其一次绕组串接在交流线路上, 二次侧的匝数较多, 导线截面较小, 并与阻抗很小的仪表连接, 相当于二次侧短路。电流互感器的二次回路在运行中不允许开路。

运行中互感器铁芯和二次绕组的一端必须接地。如果发生一次、二次之间绝缘击穿, 一次侧高电压窜入二次侧, 由于二次侧已有一点接地, 从而可以保证人身和设备的安全。

互感器的用途是: ①与测量表计和保护装置配合, 测量电压、电流; ②将测量、保护和工作人员等与高电压隔离, 保障安全; ③有利于二次设备的标准化。

一、电压互感器结构

1. 分类

按绝缘结构分为干式 (包括浇注式、充气式)、充气式和油浸式三种类型。其中, 干式电压互感器结构简单, 防火防爆; 油浸式电压互感器绝缘性能较好, 可用于 10kV 室外装置; 充气式一般用于 SF₆ 全封闭组合电器。

按相数分为单相和三相两种类型, 35kV 及以上电压等级一般不采用三相结构。

按结构可分为普通型和串级型，一般串极式电压互感器用于 110kV 及以上电压等级。
按安装地点分为户内式和户外式。

2. 型号

电压互感器铭牌型号一般为：×××××-×其含义详见表 1-1-7。

表 1-1-7 电压互感器型号意义

第一字母	第二字母	第三字母	第四字母	第五数字	第六数字
类别	相数和组合方式	结构特征	结构特征和用途	设计序号	额定电压等级 (kV)
J—电压互感器	D—单相	J—油浸式	W—三相绕组 三相五柱铁芯		
Y—电压互感器	S—三相	C—瓷绝缘	J—接地保护用		
	C—串级式	Z—浇注式	B—带补偿绕组		
		G—干式			
		R—电容式			

例如：JDZJ/1-10 表示单相浇注绝缘，接地保护用，第一次设计，额定电压 10kV 的电压互感器。YDR-220 表示单相电容式，额定电压 220kV 的电压互感器。

3. 结构特点

(1) 串级式电压互感器。串级式电压互感器的主要特点是：绕组和铁芯采用分级绝缘结构；铁芯和绕组装在瓷箱中，瓷箱既是高压出线套管又是油箱。因此，瓷箱串级式电压互感器材料省、重量轻、制造成本低。

串级式电压互感器的一次绕组由几个相同的单元（铁芯绕组）串接在相与地之间组成，110kV 有两个单元，220kV 有四个单元，所有单元内通过相同的电流并与电网的相电压成正比，最末一个与地连接的单元具有二次绕组。当电网的相电压变动时，二次绕组两端的电压也随之变动。

串级式电压互感器有两个二次绕组，基本二次绕组的电压为 $100/\sqrt{3}\text{V}$ ，以便绕组作星形连接时能得到 100V 的电压；辅助二次绕组的电压为 100V。图 1-1-3 为 110kV 串级式电压互感器原理接线图和实物剖面图。

如果二次绕组与测量仪表连接，则二次绕组内有电流流过，产生去磁磁势，致使最末一个元件铁芯内的总磁通小于其他元件铁芯的总磁通。结果，每个元件上的电压分布不相同，最末一个元件的电压低，所接仪表越多，降低的数值越大，互感器准确度降低。为了改善这种情况，在所有元件的铁芯上加装匝数相同的平衡线圈并作反向连接，如图 1-1-3 (a) 所示。这样，当两个元件的一次侧电压不相同，平衡线圈的电势也不相同，如图 1-1-3 (b) 中上端元件平衡线电势高，末端元件平衡线电势低，引起图示方向的平衡电流（如箭头所示），由于平衡电流的作用，对上端元件起去磁作用，对末端元件起助磁作用，结果使各元件的电压分布趋于均匀，提高了测量准确度。

图 1-1-3 (b) 为 110kV 串级式电压互感器的实物剖面图，一个“口”字形铁芯采用悬空式而不接地的结构，用四根矩形截面的电木板或“L”型截面的绝缘纸板 7 作支撑，绝缘支架下端固定在底座上。基本二次绕组和辅助二次绕组都放置在下铁芯柱即最里层，向外是一次绕组、基本二次绕组、辅助二次绕组，瓷外壳装在钢板做成的圆形底座上。二次绕组的