

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

高等学校教材



互感器电抗器的 理论与计算

HUGANQI DIAN KANG QI DE LI LUN YU JI SUAN

陈乔夫 李湘生

华中理工大学出版社

封面设计：俞缓丽

ISBN 7-5609-0684-2/TM·45

定价：3.00元

互感器电抗器的理论与计算

陈乔夫 李湘生

华中理工大学出版社

互感器电抗器的理论与计算

陈乔夫 李湘生

责任编辑 邹献华

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

武汉大学出版社印刷总厂印刷

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 11.5 字数: 254 000

1992年10月第1版 1992年10月第1次印刷

印数: 1—1 000

ISBN 7-5609-0684-2/TM·45

定价: 3.00 元

(鄂) 新登字第 10 号

前 言

随着电力系统的发展,作为测量、保护和调节装置的主要设备——互感器和电抗器,其应用范围越来越广,电压和容量也不断提高,由此而出现了一些新的理论和实际问题。然而,许多年来还未曾出版过系统而详尽论述互感器、电抗器的理论与设计计算的书籍。本书编写的特点和目的是以理论分析为基础,直接推演到实际工程设计,在理论与实际结合的过程中,使该领域的读者可以比较容易地理解和掌握有关互感器、电抗器的理论与设计计算。

本书内容的主要部分是华中理工大学变压器研究小组多年来从事该领域研究工作的理论总结,它也反映了国内外有关最新研究和发展情况。

全书共分十四章,主要内容如下:

第一章介绍各种类型的电压、电流互感器的技术性能要求。

第二章研究电磁式电压互感器的原理和特性。包括双绕组和具有两个或三个输出电压绕组的多绕组电压互感器的电磁理论、误差计算及其补偿,还研究了串级式电压互感器的电磁理论和电压互感器的过励磁问题。

第三章介绍电压互感器设计计算的原理与方法,包括铁心及其励磁特性,绕组与绝缘以及串级与非串级电压互感器阻抗电压的计算。本章末还给出一个完整的设计计算实例。

第四章阐述电容式电压互感器的电磁原理、误差及其影响因素,还研究了电容式电压互感器的铁磁谐振与阻尼装置的参数计算。

第五章介绍电流互感器的稳态电磁原理。阐述了稳态误差

的计算方法与误差补偿。

第六章研究了电流互感器的暂态特性，包括一次和二次暂态电流，暂态磁通与面积系数，暂态误差的解析计算与数值计算方法。

第七章给出一个具有测量、保护(P)和暂态特性(TP)的电流互感器的设计计算实例。

第八章着重介绍铁心电抗器、空心电抗器的基本结构与工作原理。

第九章阐述带气隙铁心电抗器的电抗计算，其主电抗和漏电抗计算都采用了磁场方程法和等效磁路法两种方法。

第十章主要介绍空心电抗器的自感及互感计算方法。在自感计算中讲述了平均电密法，曲线图表法及向量磁位叠加法。在互感计算中介绍了四矩形定理方法及叠加法等。

第十一章主要讨论电抗器在突发短路时暂态短路电流的计算以及过电压的产生及保护。

第十二章研究突发短路时电抗器所承受的电力及其在线圈中引起的机械应力。

第十三章介绍限流铁心电抗器的设计与计算。

第十四章阐述饱和电抗器的原理，对于双三柱、九柱等饱和电抗器抑制谐波的机理进行了较详细的分析。

本书第一到第七章由李湘生撰写，第八到第十四章由陈乔夫撰写，李湘生对全书进行了仔细修改。

在编著过程中，曾参阅了有关单位提供的资料，在此谨向提供资料的有关单位、技术人员表示感谢。由于我们水平有限，书中难免有错误或不当之处，欢迎批评指正。

编者

目 录

第一章 互感器的分类及其技术要求.....	(1)
§ 1-1 电压互感器	(2)
§ 1-2 电流互感器	(6)
第二章 电磁式电压互感器的原理和特性	(11)
§ 2-1 双绕组电压互感器的等效电路、方程式及相量 图	(11)
§ 2-2 多绕组电压互感器的基本原理	(12)
§ 2-3 电压互感器的误差及误差补偿	(16)
§ 2-4 串级电压互感器	(27)
§ 2-5 电压互感器的过励磁	(36)
第三章 电压互感器的设计计算	(42)
§ 3-1 电压互感器的铁心及励磁特性计算	(42)
§ 3-2 电压互感器的绕组与绝缘	(48)
§ 3-3 阻抗电压计算	(51)
§ 3-4 串级电压互感器的阻抗电压计算	(54)
§ 3-5 电压互感器计算例题	(64)
第四章 电容式电压互感器	(89)
§ 4-1 电容式电压互感器的工作原理	(89)
§ 4-2 电容式电压互感器的误差及影响误差的主要 因素	(94)
§ 4-3 电容式电压互感器的若干特殊问题	(99)
第五章 电流互感器的稳态特性	(105)
§ 5-1 基本电磁关系	(105)
§ 5-2 稳态误差	(106)

§ 5-3	电流互感器的误差补偿	(111)
第六章	电流互感器的暂态特性	(116)
§ 6-1	电流互感器的暂态电流	(116)
§ 6-2	电流互感器的暂态磁通与面积系数	(121)
§ 6-3	电流互感器的暂态误差	(124)
§ 6-4	带气隙环形铁心的等效电感	(127)
§ 6-5	暂态误差的数值计算概述	(129)
第七章	电流互感器的设计计算	(132)
§ 7-1	铁心设计	(132)
§ 7-2	绕组设计计算	(135)
§ 7-3	误差计算	(147)
§ 7-4	电流互感器的动、热稳定核算	(151)
§ 7-5	电流互感器计算例题	(159)
第八章	电抗器的基本结构与工作原理	(175)
§ 8-1	电抗器的基本结构	(176)
§ 8-2	铁心式电抗器和空心式电抗器的比较	(180)
§ 8-3	并联电抗器的工作原理	(182)
§ 8-4	消弧线圈的工作原理	(186)
§ 8-5	限流电抗器的工作原理	(191)
第九章	铁心电抗器的电抗计算	(195)
§ 9-1	主电抗计算(磁路法)	(196)
§ 9-2	主电抗计算(轴对称磁场法)	(199)
§ 9-3	漏电抗计算(磁路法)	(207)
§ 9-4	漏磁场分析与漏电抗计算(平面磁场法) ...	(217)
第十章	空心电抗器的电感计算	(224)
§ 10-1	空心电抗器的自感计算(平均电密法)	(224)

§ 10-2	空心电抗器的自感计算 (查曲线图表法)	(229)
§ 10-3	绝缘修正值计算	(232)
§ 10-4	空心电抗器的磁场与自感计算 (向量磁位叠加法)	(244)
§ 10-5	空心电抗器的互感计算 (向量磁位叠加法)	(251)
§ 10-6	空心电抗器的互感计算 (基于四矩形定理的方法)	(256)
§ 10-7	空心电抗器的互感计算 (泰勒级数法)	(262)
§ 10-8	带磁屏蔽的空心电抗器的磁场	(263)
第十一章	电抗器的过渡过程	(270)
§ 11-1	空心限流电抗器的突然短路	(270)
§ 11-2	铁心限流电抗器的突然短路	(272)
§ 11-3	分裂电抗器一臂串联阻抗的突然短路	(276)
§ 11-4	切除电抗器时的过电压	(282)
§ 11-5	电抗器的过电压保护	(288)
第十二章	电抗器的电动力	(292)
§ 12-1	铁心电抗器线圈上作用力的方向	(292)
§ 12-2	铁心电抗器线圈上作用力的计算	(293)
§ 12-3	铁心电抗器线圈的机械应力计算	(297)
§ 12-4	空心电抗器线圈上作用力的方向	(303)
§ 12-5	空心电抗器线圈上作用力的计算	(304)
§ 12-6	空心电抗器线圈的机械应力	(306)
第十三章	限流铁心电抗器的设计计算	(309)
§ 13-1	限流铁心电抗器的设计计算	(309)

§ 13-2 630kVA/10kV 铁心电抗器计算实例.....	(325)
第十四章 饱和电抗器的原理与分析.....	(340)
§ 14-1 饱和电抗器的原理	(340)
§ 14-2 双三柱曲折星形连接饱和电抗器的谐波分析	(345)
§ 14-3 九柱饱和电抗器的谐波分析	(348)
参考文献.....	(357)

第一章 互感器的分类及其技术要求

互感器是一种电量传变装置，是特殊用途变压器的一种类型。通过互感器将电压或电流按规定比例变换而频率保持不变，用以给测量仪器、仪表或保护和控制设备供电。互感器分为电压互感器（PT）与电流互感器（CT）两大类，前者将高电压系统的电压变为标准的低电压（100V 或 $100/\sqrt{3}$ V），后者将高电压系统的电流或低电压系统的大电流变成低电压的标准小电流（5A 或 1A）。它们的主要用途是：

（1）与测量仪器、仪表配合，测量线路的电压、电流和功率（或电能）；

（2）与继电器或其它控制、保护设备配合，对系统的重要电力设备进行过电压、过电流和接地故障保护。

互感器在电力系统中的应用原理图如图 1-1 所示。

应用互感器，使测量仪表及保护装置得以与系统的高电压隔离，保证操作人员和设备的安全；同时使仪表和保护装置的结构大为简化。通过互感器将电压或电流变成小量程的标准值以后，也有利于测量仪表和保护装置的标准化。

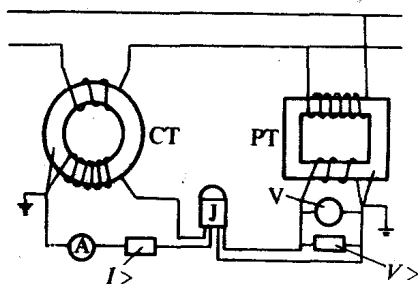


图 1-1 互感器原理接线图

§ 1-1 电压互感器

电压互感器在正常使用情况下，二次电压与一次电压实质上成正比，而其相位差在连接方法正确时接近于零。

一、电压互感器的分类

1. 按用途分有测量用电压互感器与保护用电压互感器两类

测量用电压互感器是传递电压信息给指示仪表、积算仪表或其它类似的仪器仪表；保护用电压互感器是传递电压信息给保护和控制装置。

2. 按工作原理分为电磁式电压互感器与电容式电压互感器两类

电磁式电压互感器的原理与基本结构和变压器完全相似；而电容式电压互感器是由电容分压器、补偿电抗器、中间变压器、阻尼器及载波装置保护间隙等组成（详见第四章），常在中性点接地系统中作电压测量、功率测量、继电保护及载波通讯用。

3. 按相数分有单相和三相两种

绝大多数产品是单相的，因为电压互感器容量小，器身体积不大，三相高压套管间的内外绝缘要求难以满足，所以只有3—15kV的产品有时采用三相结构。

4. 按绝缘介质分有干式、浇注式和油浸式三种

通常专供测量用的低电压互感器是干式，高压或超高压密封式气体绝缘（如六氟化硫）互感器也属于干式。浇注式适用于35kV及以下的电压互感器，35kV以上的产品一般均为油浸式。

5. 按绕组数分有两绕组与多绕组两种

专供测量用的电压互感器除一次绕组外，只有一个二次绕组给测量仪表供电。应用于电力系统中的电压互感器，除要求有一个或两个二次绕组输出信号给测量或过电压保护装置外，还需要提供接地故障保护所需要的零序电压信号，这就要求互感器做成三绕组或四绕组互感器。

二、额定值和性能要求^[6]

1. 额定一次和二次电压标准值

供三相系统相间连接的单相电压互感器，其额定一次电压为 0.3, 3, 6, 10, 15, 20, 35, 60, 110, 220, 330, 500kV 之一；对于接在三相系统相与地间的单相电压互感器，其额定一次电压应为上述额定电压的 $1/\sqrt{3}$ 。

供相间连接的单相互感器的二次额定电压标准值为 100V，而接在相与地间的单相电压互感器的二次额定电压标准值为 $100/\sqrt{3}$ V。

2. 额定输出标准值

额定输出是指在额定二次电压及接有额定负荷条件下，互感器所供给二次回路的视在功率，也就是二次回路在规定的功率因数和额定二次电压下所汲取的视在功率，以伏安表示。额定输出标准值为 10, 15, 25, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 1000VA。

3. 额定电压因数

额定电压因数是指互感器在规定时间内仍能满足热性能和准确级要求的最高一次电压与额定一次电压的比值。它主要决定于一次绕组接法和系统的接地方式。当系统发生单相接地故障时，二次线圈电压将升高；对于中性点直接接地系统一般不超过额定电压的 1.5 倍；对中性点不直接接地系统一般不超过

额定电压的 1.9 倍。随着电压的增高，铁心磁通密度也将相应增加，铁心损耗和温度将随着增加，同时零序电压线圈开始工作，互感器的容量增大，总损耗与温升将迅速上升。额定电压因数标准值如表 1-1 所示。

表 1-1 额定电压因数标准值

额定电压因数	额定时间	一次绕组接法、系统接地方式
1.2	连续	任一网路相与相间
1.2 1.5	连续 30s	中性点有效接地系统中相与地间
1.2 1.9	连续 30s	中性点非有效接地系统（带自动切除）中相与地间
1.2 1.9	连续 8h	中性点非有效接地系统中相与地间

4. 温升限值

在最高气温为 $+40^{\circ}\text{C}$ 、日平均气温不超过 $+30^{\circ}\text{C}$ 、海拔不超过 1000m 条件下，在规定电压、额定频率和规定负荷下 [功率因数为 0.8（滞后）到 1 范围内]，电压互感器各部分温升不应超过表 1-2 所列规定值。

表 1-2 温升限值

绕组	油浸式	55
	全密封油浸式	60
	干式、耐热等级	
	A	55
	E	75
	B	85
	F	110
	H	135
顶层油	一般情况	50
	全密封式或充有惰性气体	55
铁心及其它金属结构件表面		不超过所接触或邻近的绝缘材料的温升限值

此外，对所有的电压互感器都要求绝缘可靠，各绕组应能

承受规定的试验电压考核，同时在额定电压励磁时，应能承受1秒钟外部短路的机械效应和热效应而无损伤。

三、准确级与误差限值

测量用电压互感器的准确级是以在额定电压及规定的额定负荷下的最大允许电压误差百分值标称的。标准准确级有0.1, 0.2, 0.5, 1和3, 其相应的电压误差(比值差)和相位差最大允许值如表1-3所示。表中所列数值是指互感器在额定频率下, 电压为80%~120%额定电压的任一值, 负荷为25%~100%额定负荷的任一值[功率因数为0.8(滞后)]时, 最大的允许误差值。

保护用电压互感器的准确级是以在5%额定电压到与额定电压因数相对应的电压范围内的最大电压误差百分值标称的。标准准确级有3P和6P, 其误差限值如表1-4。表中所列数值是指在额定频率下, 电压为5%额定电压和与额定电压因数相对应的电压值间任一电压, 负荷为25%~100%额定负荷的任一值(功率因数0.8, 滞后)下的最大误差值; 其它条件不变, 仅电压变为2%额定电压, 最大允许误差不应超过表1-4规定值的两倍。

表 1-3 测量级误差限值

准确级	电压误差 ± %	相位差 ± 分
0.1	0.1	5
0.2	0.2	10
0.5	0.5	20
1	1.0	40
3	3.0	不规定

表 1-4 保护级误差限值

准确级	电压误差 ± %	相位差 ± 分
3P	3.0	120
6P	6.0	240

电容式电压互感器的误差限值如表 1-5。

表 1-5 电容式电压互感器误差限值

准确级		0.2	0.5	1	3P	6P
电压误差 (±%)		0.2	0.5	1	3.0	6.0
相位差 (±分)		10	20	40	120	240
工 作 条 件	频率 (%)	99~101			96~102	
	电压 (%)	80~120			5~150	
	负荷 (%)	25~100				
	功率因数	0.8 (滞后)				

§ 1-2 电流互感器

电流互感器是变换电流大小的互感器,在正常使用情况下,其二次电流与一次电流实质上成正比,而其相位差在连接方法正确时接近于零。

一、用途和分类

1. 测量用电流互感器

测量用电流互感器的作用是传递电流信息给指示仪表、积算仪表或其它类似仪器仪表,以测量线路正常工作时的电流和电能。对测量用电流互感器的主要要求是,在规定的负荷下有

足够的准确度；同时为保护测量仪表，其最大二次电流应有一定的限制，它是用一个仪表保安系数来规定。仪表保安系数是指负荷为额定值时，电流互感器复合误差不小于10%时的最小一次电流与额定一次电流之比。可见系统故障电流通过互感器的一次绕组时，仪表保安系数愈小，则由互感器供电的仪器愈安全。

2. 保护用电流互感器

保护用电流互感器分为稳态保护用(P)与暂态保护用(TP)两种。稳态保护用电流互感器的准确级是由规定的一次对称稳定短路电流下的复合误差规定的(见§5-2)。常用于系统的过负荷、发电机的接地保护，以及发电机、变压器的差动保护，等等。在电力系统继电保护装置中，要求能够对发生在指定区域内的故障发生响应并适时动作，而对保护区域外的故障则不应响应。但是电力系统和互感器本身的暂态过程，往往破坏了电流的正常变换关系，可能导致继电保护装置动作延缓或失调。此外，电力系统容量的扩大，要求缩短保护装置的动作时间，以减轻故障电流的危害。又由于电力系统的时间常数较大，短路电流的非周期分量持续时间较长，保护装置有可能在暂态过程中动作。因此，具有良好暂态性能的电流互感器(TP)，即能够在要求的时间内，不失真地将一次故障电流传变为二次电流，是现代电力系统运行要求的电力设备之一。暂态电流互感器按暂态性能分为四个级别：

TPS：一种低漏磁电流互感器，其暂态性能由二次励磁特性和匝比误差确定，对剩磁不作限制。

TPX：准确级是由在规定的单次或重复励磁时间内的最大瞬时电流误差确定，对剩磁不作限制。

TPY：准确级的规定与TPX相同，但其剩磁要求低于饱和