

继电保护丛书

互感器与相序过滤器

刘从爱

水利电力出版社

继电保护丛书

互感器与相序滤过器

刘 从 爱

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是《继电保护丛书》的一个分册，共分十章，主要介绍电磁式和电容式电压互感器、电流互感器、电流电压变换器的工作原理、误差特性、电路计算与应用；互感器暂态响应特性与误差测量；负序、零序、复合等滤过器的原理、特性以及在继电保护和自动装置中的应用。

本书主要作为从事继电保护设计、制造、运行与调试的专业工人和技术人员的专业读物，也可作为大专院校的教学参考书。

继电保护丛书 互感器与相序滤过器 刘从爱

水利电力出版社出版、发行
(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 10.5印张 233千字 1插图

1991年3月第一版 1991年3月北京第一次印刷

印数 0001—4040册

ISBN7-120-01302-5/TM·364

定价6.90 元

前 言

电压互感器和电流互感器，是发电厂和变配电所的重要电气设备，担负着把高电压和大电流按比例缩小的任务，缩小后的电压和电流作为测量仪器仪表、继电保护和自动远动装置的输入信号。各种型式的相序滤过器是构成较复杂型继电保护和自动远动装置的重要器件，是测量回路形成的基础。因此，互感器和相序滤过器在继电保护和电力系统自动化设备中占有十分重要的地位。由于它们主要是由非线性的电磁元件构成的，其基本工作原理有很多类同之处，所以放在本书中一并讨论。

本书较全面地介绍了电压互感器和电流互感器的工作原理、接线方式、电气特性、误差测量原理与方法，对电容式电压互感器和电流互感器的暂态过程也作了较详细的分析，对各种型式相序滤过器的构成原理、电气性能、接线方式和国内应用情况也介绍的比较详细全面。本书是学习掌握继电保护和自动远动装置的理论基础，对该业务领域内从事研究、设计、开发、生产制造、安装调试、运行管理和教学培训工作的同志，都是有益的。

本书由能源部华北电力科学研究所彭时雄同志审阅，并提出了很多宝贵意见，在此特表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中一定会有不少缺点和错误，恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前 言

第一章 电磁式电压互感器	1
第一节 电压互感器的工作原理	1
第二节 电压互感器的误差	10
第三节 电压互感器的接线方式	17
第四节 电压互感器的二次回路	24
第五节 电压互感器的容量选择	29
第六节 电压互感器型式与变比的选择	43
第七节 电压互感器运行中的几个问题	47
第二章 电容式电压互感器	52
第一节 电容式电压互感器的工作原理	55
第二节 电容式电压互感器的暂态响应特性	61
第三节 电容式电压互感器的试验	69
第三章 电流互感器	73
第一节 电流互感器的工作原理	73
第二节 电流互感器的误差	77
第三节 电流互感器的接线方式	81
第四节 电流互感器的二次负载	85
第五节 电流互感器的10%误差曲线	99
第六节 电流互感器的几个有关问题	112
第四章 电流互感器的暂态响应特性	115
第一节 铁芯未饱和时电流互感器的暂态过程	116
第二节 铁芯饱和时电流互感器的暂态过程	133
第三节 改善电流互感器暂态特性的措施	140

第五章 电流电压变换器	145
第一节 电抗变压器的工作原理	145
第二节 电抗变压器的工作特性	150
第三节 电抗变压器的设计	158
第四节 用中间变流器构成的电流-电压变换器	163
第五节 电流电压变换器的电气试验	167
第六章 相序滤过器基础知识	170
第一节 对称分量法	171
第二节 相序滤过器的基本原理	175
第三节 相序滤过器的特性分析	178
第四节 移相电路	190
第五节 裂相电路	195
第七章 负序滤过器	201
第一节 单相负序电压滤过器	201
第二节 单相负序电流滤过器	210
第三节 三相式负序滤过器	228
第四节 负序滤过器的不平衡输出	237
第八章 零序滤过器	240
第一节 零序电压滤过器	240
第二节 零序电流滤过器	243
第九章 复合电流滤过器	247
第一节 正序与负序电流复合滤过器	247
第二节 正序与零序电流复合滤过器	254
第三节 负序与零序电流复合滤过器	258
第四节 综合器	260
第十章 互感器的误差测量	264
第一节 电位差式互感器校验仪	264
第二节 比较仪式互感器校验仪	271
第三节 数字式互感器校验仪	280

第四节 复合误差的测量	287
附录 I 电压互感器技术数据	290
附录 II 电流互感器技术数据	299
附录 III 部分国产电流互感器的10%误差曲线	321
主要参考书目	330

第一章 电磁式电压互感器

电磁式电压互感器，简称电压互感器（用文字符号 YH 表示），是电力系统中最常用的电气设备之一。我国 110kV 及以下的电力系统中，目前普遍采用它； 220kV 及以上电力系统中，很少采用，多选用电容式电压互感器。

第一节 电压互感器的工作原理

电磁式电压互感器的工作原理，与一般的变压器相同，仅在结构型式、所用材料、容量、误差范围等方面有所差别。为了深入讨论它的各种特性，先介绍变压器的几个基本问题。

一、空载变压器的电磁关系

电压互感器正常运行时，其二次负载基本不变，且二次电流很小，接近于空载状态，这与空载变压器十分相似。当变压器二次侧开路时，它的一次电流全部变为激磁电流 I_0 ，其激磁磁势为 $\dot{F}_0 = \dot{I}_0 W_1$ （ W_1 为其一次绕组匝数），由此而产生交变磁通 $\dot{\Phi}$ ，于是其二次绕组上产生感应电压（即空载电压） $\dot{U}_{20}$ 。本书对 $\dot{U}_{20}$ 正方向的标定，如图 1-1（a）所示。

激磁电流 $\dot{I}_0$ 可分为有功分量 $\dot{I}_{0y}$ （即铁芯损耗电流分量）和无功分量 $\dot{I}_{0w}$ （即产生磁通 ϕ 的磁化分量 $\dot{I}_{10}$ ），即 $\dot{I}_{0y} + \dot{I}_{0w} = \dot{I}_0$ 。

磁化电流 $\dot{I}_{10}$ 又称为励磁电流，当忽略铁芯损耗时，

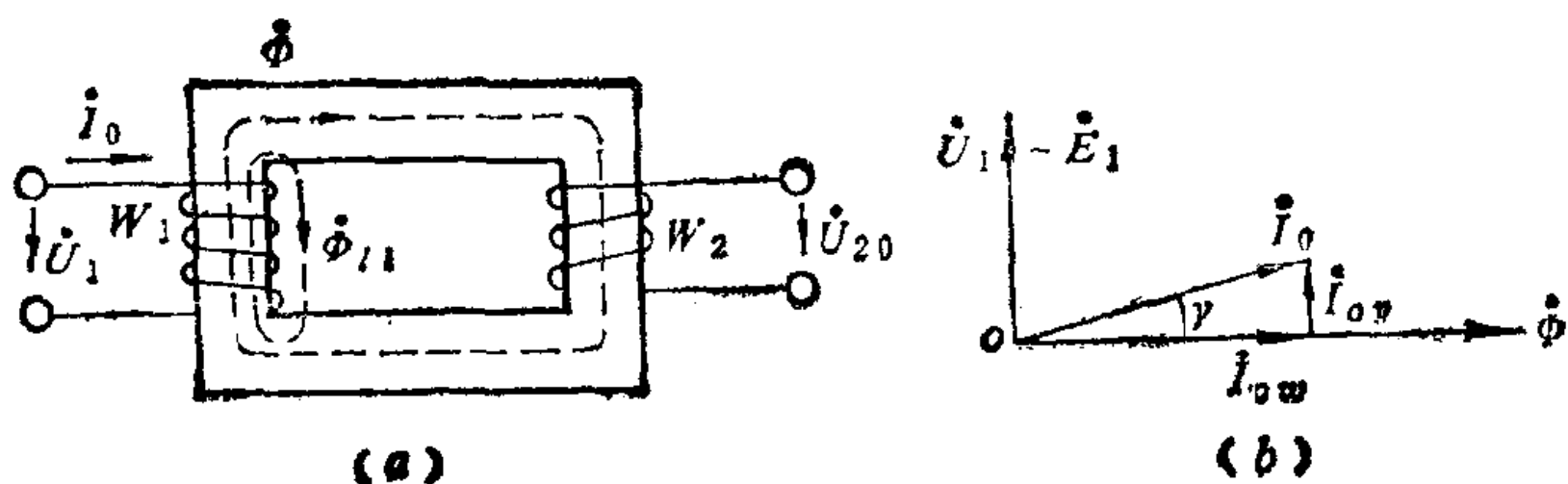


图 1-1 变压器原理相量图
(a) 原理图; (b) 相量图

$I_{10} = I_0$, 因此也常将磁化电流 I_{10} 称为激磁电流。磁化电流 I_{10} 与主磁通 Φ 同相位, 铁芯损耗电流 I_{0v} 与一次绕组自感电势 E_1 反相位, 因此 I_{0v} 比 I_{0w} 超前 90° , 如图 1-1 (b) 所示。

一次绕组产生的部分漏磁通 Φ_{11} 仅与一次绕组 W_1 匝链, Φ_{11} 产生的漏电势为

$$\dot{E}_{11} = -jI_0 X_{11} = -jI_0 \omega L_1 \quad (1-1)$$

式中 $X_{11} = \omega L_1$ 称为一次绕组漏电抗, 当电源频率不变时, X_{11} 为常数, 与 I_1 无关。

设一次绕组的电阻为 R_1 , 空载时产生电压降为 $I_0 R_1$ 。因此, 空载变压器电势平衡方程为

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_{11} - \dot{E}_1 + \dot{I}_0 R_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 (R_1 + jX_{11}) \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中 $Z_1 = R_1 + jX_{11}$, 称为一次绕组漏阻抗。

根据式 (1-2) 可画出空载变压器的相量图, 见图 1-2。图中 $I_0 R_1$ 和 $I_0 X_{11}$ 的相量均有所放大, 以便表示得更清楚些, 实际上 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$ 。

空载变压器的二次电压 U_{20} 为

$$U_{20} = E_2 = 4.44fW_2\Phi$$

又因为 $U_1 \approx E_1 = 4.44fW_1 \times \Phi$, 故

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = K_u$$

(1-3)

K_u 即为变压器变比, 它是变压器一次与二次绕组的匝数比, 基本上等于一次电压与二次空载电压之比,

但不等于一次电压与二次电压 (带负载时) 之比。

二、空载变压器的等值电路

空载变压器的等值电路可用图1-3表示。 R_{10} 和 X_{10} 为铁芯激磁回路的等值电阻和电抗, 其等值阻抗为

$$Z_{10} = R_{10} + jX_{10}$$

由于变压器铁芯是非线性铁磁元件, 因此 R_{10} 和 X_{10} 不是常数, 与铁芯的饱和程度密切相关。

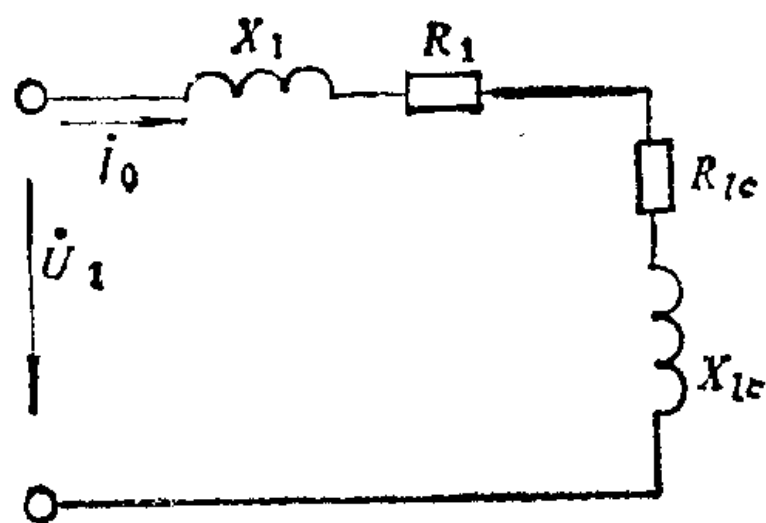


图 1-3 空载变压器等值电路

三、变压器的负载运行

变压器二次侧接入负载

Z_L 后, 两侧绕组产生的磁通分布情况, 如图1-4所示。此时的磁势平衡方程为

$$\dot{F}_1 - \dot{F}_2 = \dot{F}_{10} \quad (1-4)$$

$$\text{或} \quad \dot{I}_1 W_1 - \dot{I}_2 W_2 = \dot{I}_{10} W_1 \quad (1-5)$$

由于一次侧电流由 $\dot{I}_0$ 变为 $\dot{I}_1$, 故电势平衡方程变为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \quad (1-6)$$

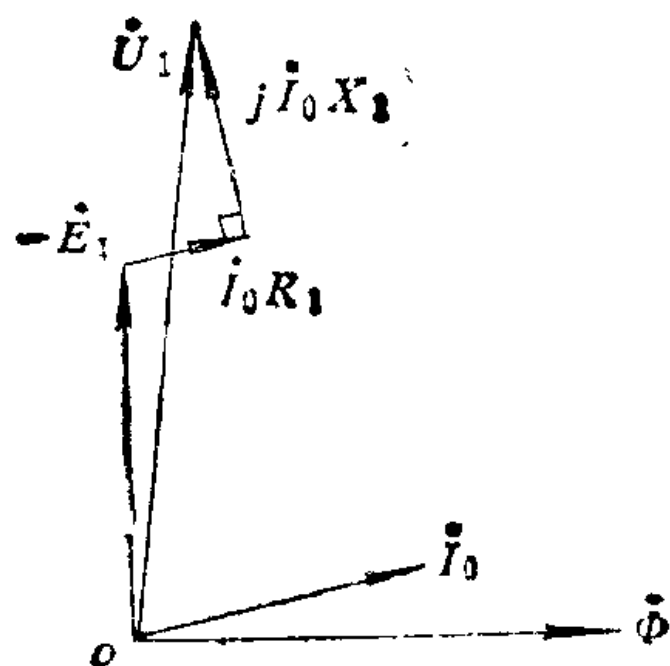


图 1-2 空载变压器相量图

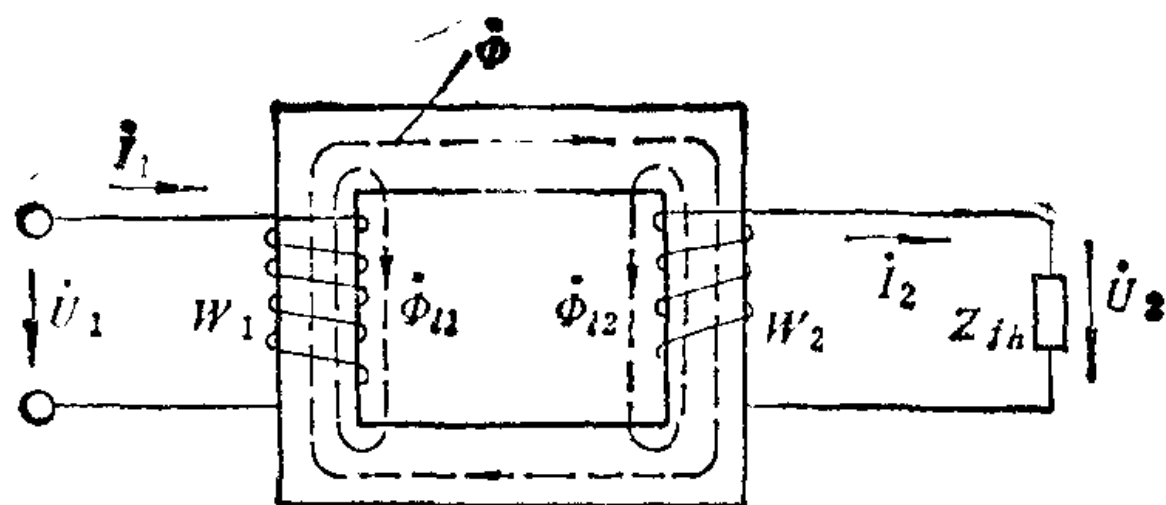


图 1-4 变压器带负载后磁通的分布图

将式 (1-5) 两边同除以 W_1 , 得

$$\dot{I}_1 - \frac{W_2}{W_1} \dot{I}_2 = \dot{I}_{10}$$

$$\text{即 } \dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + \frac{W_2}{W_1} \dot{I}_2 = \dot{I}_{10} + \frac{\dot{I}_2}{K_u} = \dot{I}_{10} + \dot{I}_{fh1} \quad (1-7)$$

式中 $\dot{I}_{fh1}$ ——一次电流的负载分量, $\dot{I}_{fh1} = \frac{\dot{I}_2}{K_u}$ 。

变压器二次侧的电势平衡方程为

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 = \dot{I}_2 Z_{fh} \quad (1-8)$$

式中 Z_2 ——二次侧 (绕组) 阻抗, $Z_2 = R_2 + jX_2$, R_2 为二次绕组的电阻, X_2 为二次绕组的漏电抗。

四、变压器两侧电参数的折合

为了便于分析与计算, 通常采用经过折合的等值变压器来代替实际变压器, 且多将二次侧折合到一次侧, 即等值变压器一次绕组匝数与实际变压器相等, 其二次绕组匝数折合为与一次绕组相等 ($W_1 = W_2$), 但产生的二次磁势却与实际变压器相等。这种折合关系不允许改变实际变压器的工作原理, 被折合过的量用原来的符号加一撇 (') 表示。

根据感应电势与绕组匝数成正比的关系可得

$$\frac{E'_2}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = K_u$$

即 $E'_2 = K_u E_2$ (1-9)

因为等值变压器与实际变压器产生的二次磁势相等, 故

$$I'_2 W_1 = I_2 W_2$$

即 $I'_2 = \frac{W_2}{W_1} I_2 = \frac{I_2}{K_u}$ (1-10)

因此 $Z'_2 + Z'_{fh} = \frac{\dot{E}_2''}{\dot{I}_2''} = K_u^2 \frac{\dot{E}_2}{\dot{I}_2} = K_u^2 (Z_2 + Z_{fh})$ (1-11)

所以

$$\left. \begin{aligned} R'_2 &= K_u^2 R_2 \\ X'_2 &= K_u^2 X_2 \\ Z'_{fh} &= K_u^2 Z_{fh} \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

式(1-12)即为折合过的变压器能够与实际变压器等值的条件, 此时

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2 = K_u (\dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2) = K_u \dot{U}_2 \quad (1-13)$$

由此可知, 只要把实际变压器二次侧的电阻、电抗和阻抗均乘以 K_u^2 , 将实际变压器二次侧电压或电势乘以 K_u , 将实际变压器二次侧电流除以 K_u , 则表明已将实际变压器折合为等值变压器了。

五、变压器带负载时的等值电路

由于等值变压器两侧绕组匝数相等, 因此以上方程式变为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{E}_1 &= \dot{E}'_2 \\ \dot{U}'_2 &= \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2 = \dot{I}'_2 Z'_{fh} \\ \dot{I}_{10} &= \dot{I}_1 - \dot{I}'_2 = -\frac{\dot{E}_1}{Z_{10}} \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

根据上式可绘出变压器的T型等值电路，如图1-5所示。

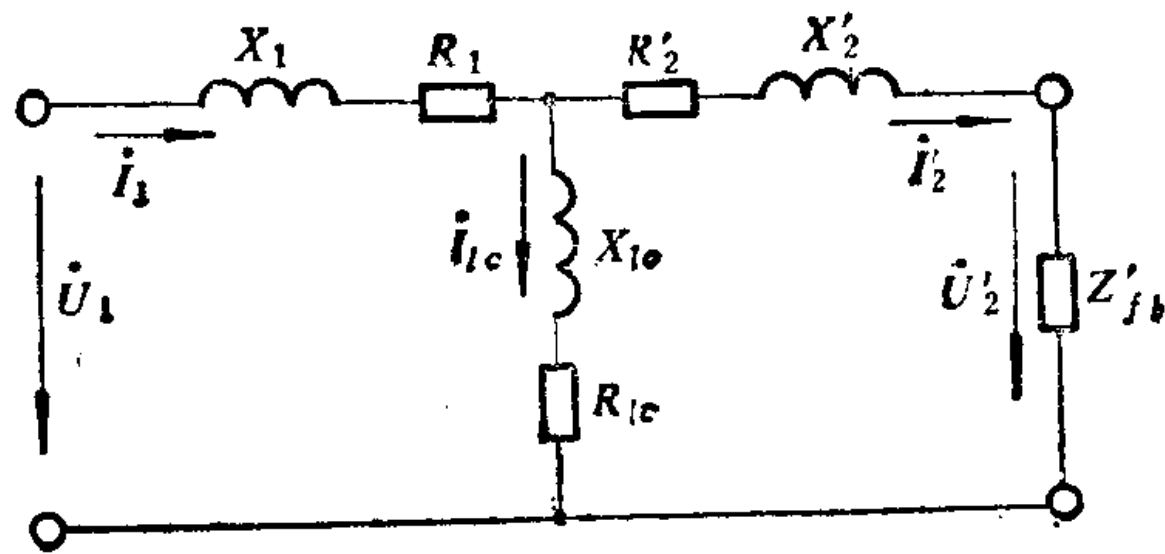


图 1-5 变压器T形等值电路

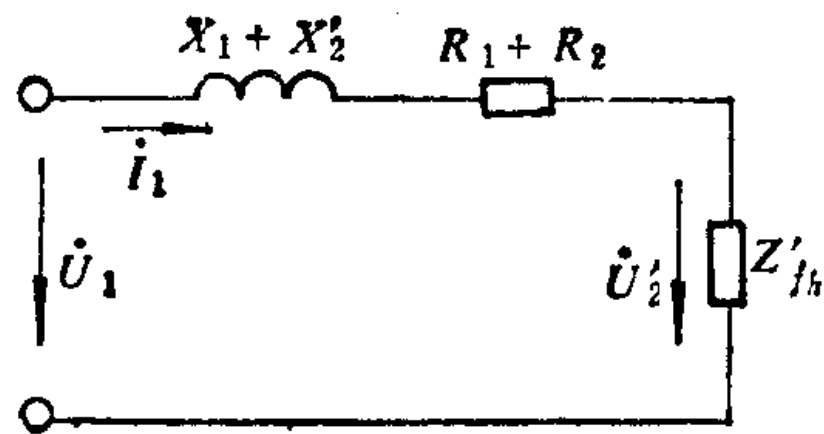


图 1-6 变压器简化等值电路

利用变压器T型等值电路进行分析计算比较复杂，工程计算时可进一步简化。一般变压器的励磁阻抗 Z_{10} 比漏阻抗 Z_{11} 大得多，故将 Z_{10} 拆除，即可得T型等值电路的简化电路，见图1-6，这给分析计算带来很大方便。

前面讨论的是将二次侧电参数折合到一次侧的情况，一次侧的电参数同样也可以折合到二次侧，折合后的T型等值电路，如图1-7所示。此时一次侧绕组匝数变为 W_1 ，各个电

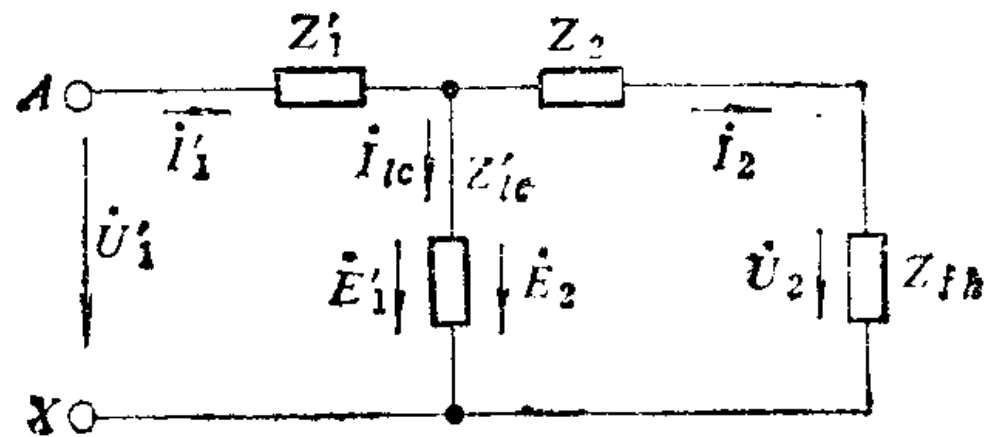


图 1-7 折合后的变压器T形等值电路

参数的折算公式则为

$$\left. \begin{aligned} R'_1 &= \frac{R_1}{K_u^2} & X'_1 &= \frac{X_1}{K_u^2} & Z'_1 &= \frac{Z_1}{K_u^2} \\ R'_{1o} &= \frac{R_{1o}}{K_u^2} & X'_{1o} &= \frac{X_{1o}}{K_u^2} & Z'_{1o} &= \frac{Z_{1o}}{K_u^2} \\ \dot{U}'_1 &= \frac{\dot{U}_1}{K_u} & \dot{I}'_1 &= K_u \dot{I}_1 & \dot{I}'_{1o} &= K_u \dot{I}_{1o} \end{aligned} \right\} (1-15)$$

六、电压互感器绕组的极性

电压互感器绕组的极性端,我国采用减极性原则确定。所谓减极性原则,就是在一次和二次绕组的同极性端同时通入同相位的电流时,两个绕组产生的磁通在铁芯闭合回路中的

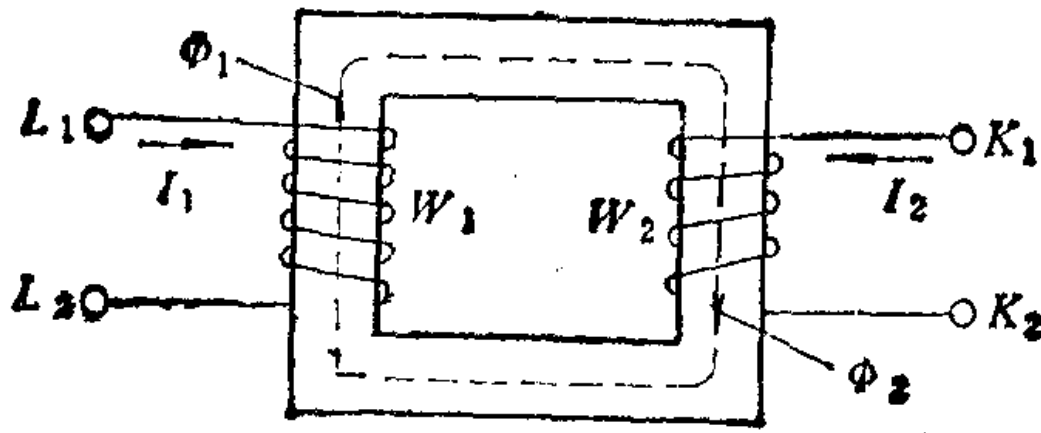


图 1-8 电压互感器绕组的极性端

方向相同。例如图 1-8 中,若从 \$L_1\$ 和 \$K_1\$ 两个端子同时通入直流电流 \$I_1\$ 和 \$I_2\$, 绕组 \$W_1\$ 和 \$W_2\$ 产生磁通 \$\dot{\Phi}_1\$ 和 \$\dot{\Phi}_2\$, 这两股磁通在

铁芯闭合回路中的方向相同,故铁芯中的合成磁通增大,因此 \$L_1\$ 和 \$K_1\$ 称为同极性端(在不标注文字符号 \$L_1\$、\$L_2\$、\$K_1\$、\$K_2\$ 时,用 \$\cdot\$ 表示)。同理, \$L_2\$ 和 \$K_2\$ 也是同极性端。

当电压互感器带上负载后,若一次侧电流 \$I_1\$ 是从端子 \$L_1\$ 流入的,则二次侧电流 \$I_2\$ 是自同极性端 \$K_1\$ 流出的。因为 \$I_2\$ 是感应电流,它在 \$W_2\$ 中产生的磁通是反抗一次侧磁通变化的。为便于记忆,可简记为电流是“头进头出”。即一次电流从原边的头(极性端)流进,二次电流则从副边的头(同极性端)流出,如图 1-9 所示。

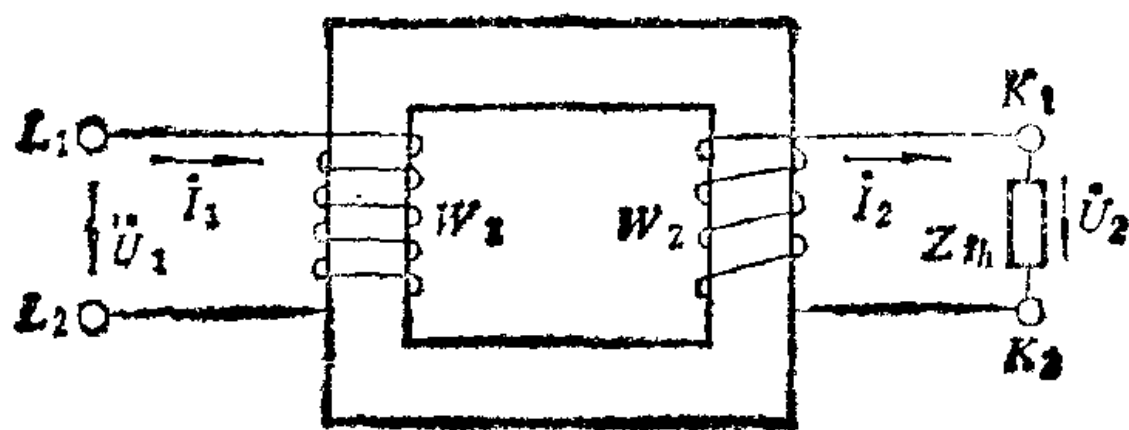


图 1-9 带负载后电压互感器绕组的极性关系

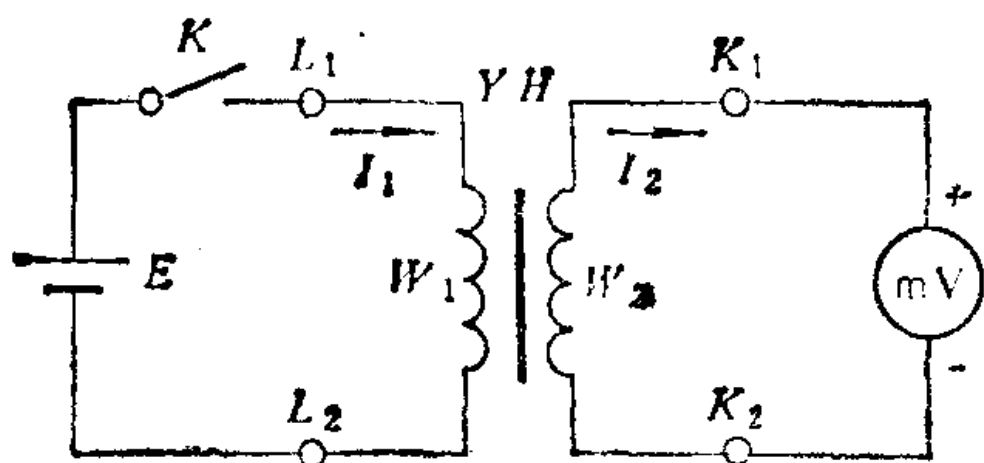


图 1-10 用直流法确定极性端的原理接线

电压互感器的极性端可通过测试确定，一般可采用直流法（或交流法）。用直流法测试极性端的原理接线如图1-10所示。图中毫伏表mV亦可换用电压表V，直流电源E可用一般的蓄电池或干电池。当闸刀K闭合瞬间，若毫伏表指针正向偏转，则说明二次电流 I_2 是从表头的“+”端流入的，故与该端连接的电压互感器端子为 K_1 ，与电池正极相连接的端子为 L_1 ， L_1 与 K_1 是同极性端。当拉开闸刀K的瞬间，毫伏表指针瞬时向反方向偏转，这是电压互感器二次绕组产生反电势所造成的。如果图1-10中的 L_1 和 K_1 是测试时人为地假设的，当闸刀K闭合瞬间毫伏表指针反向偏转，则说明与表头“—”端连接的端子 K_2 与 L_1 是同极性端，因为二次电流 I_2 是从表头的“—”端流入的。试验完毕时，应将电压互感器端子的标志改为 L_1 ，与 K_1 为同极性端。

用交流法测试极性端的原理接线如图1-11(a)所示，首先将一次和二次绕组的任一端（1、2）短接，以取得一个公共的等电位点。然后在一次绕组上外加一个较低的交流电

压 $\dot{U}_1$ ，并用交流电压表（或万用表）分别测量1—1'、2—2'

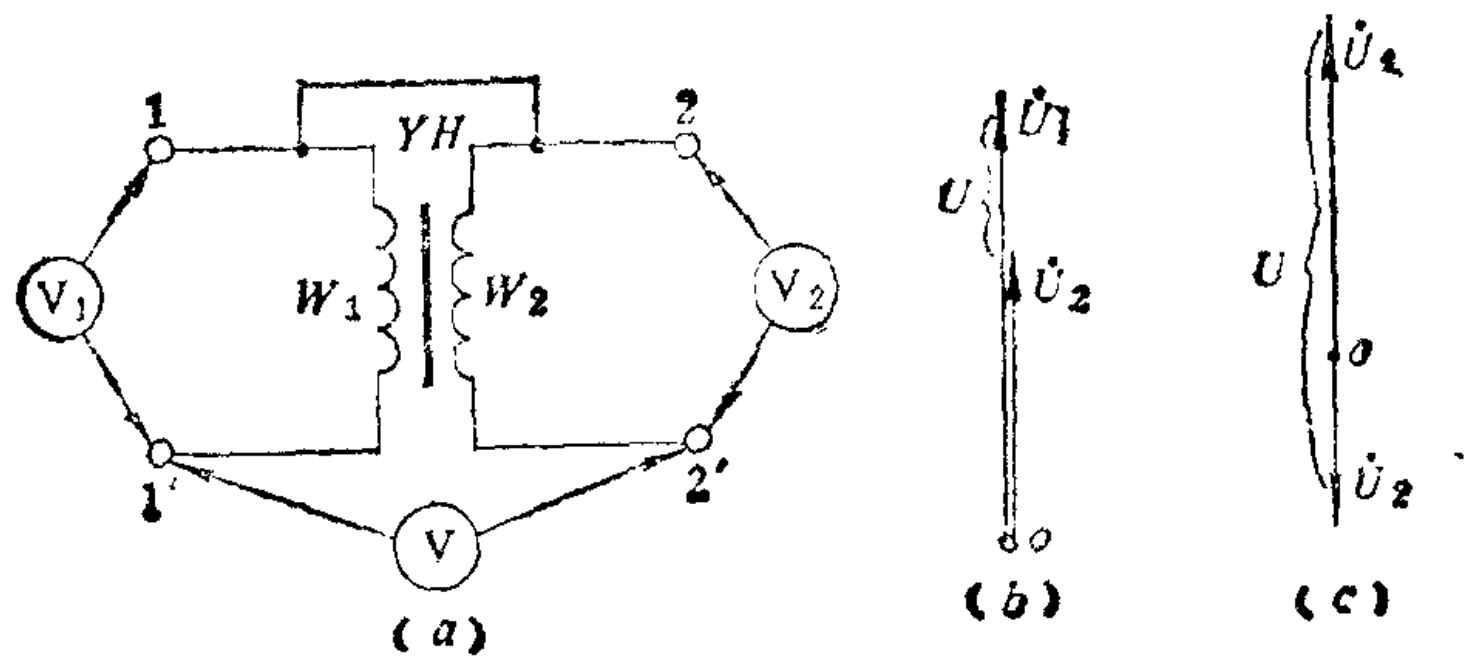


图 1-11 用交流法确定极性端
(a) 原理接线；(b)、(c) 相量图

和1'—2'三对端子间的电压。如果在数值上 $U \approx U_1 - U_2$ ，则表明 1、2 或1'、2'为同极性端；假如 $U \approx U_1 + U_2$ ，则表明 1、2'或1'、2为同极性端，其原因可用相量图1-11(b)和(c)说明。

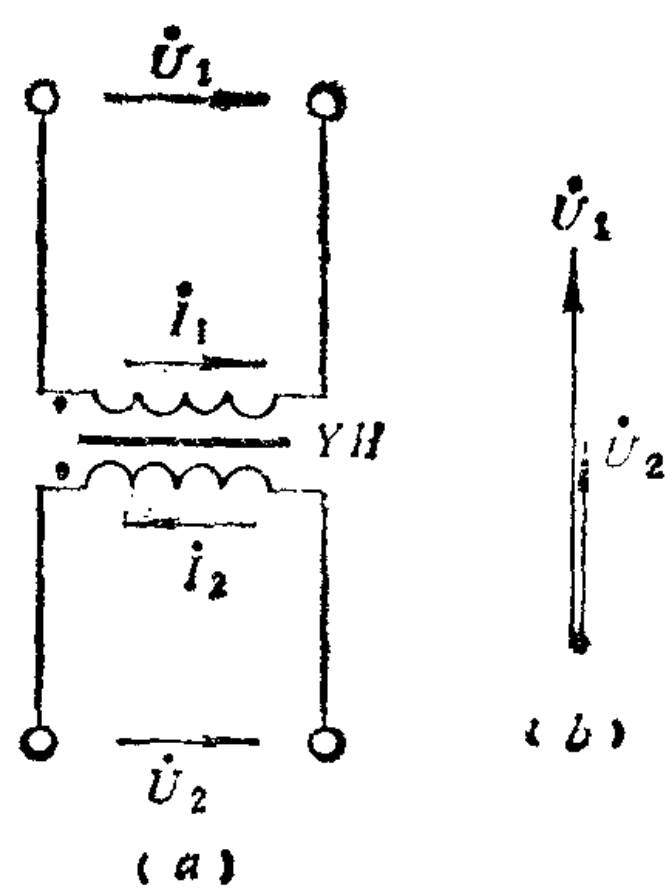


图 1-12 单相电压互感器的极性端
(a) 接线图；(b) 相量图

电压互感器两侧电压和电流的方向，不宜随便标注，一般有两种方法。其中一种方法是两侧电压的正方向均由极性端指向非极性端，如图1-12(a)所示。对于三相电压互感器，一次侧和二次侧的相电压也是由极性端指向非极性端，如图1-13(a)所示。这种标注方法的对应相电压之相量是同相位的，如图1-12(b)和图1-13(b)所示。

另外一种标注方法是一次电压的正方向由极性端指向非

极性端，二次电压的正方向由非极性端指向极性端，如图1-14(a)所示。此时 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$ 方向相反，如图1-14(b)所示。

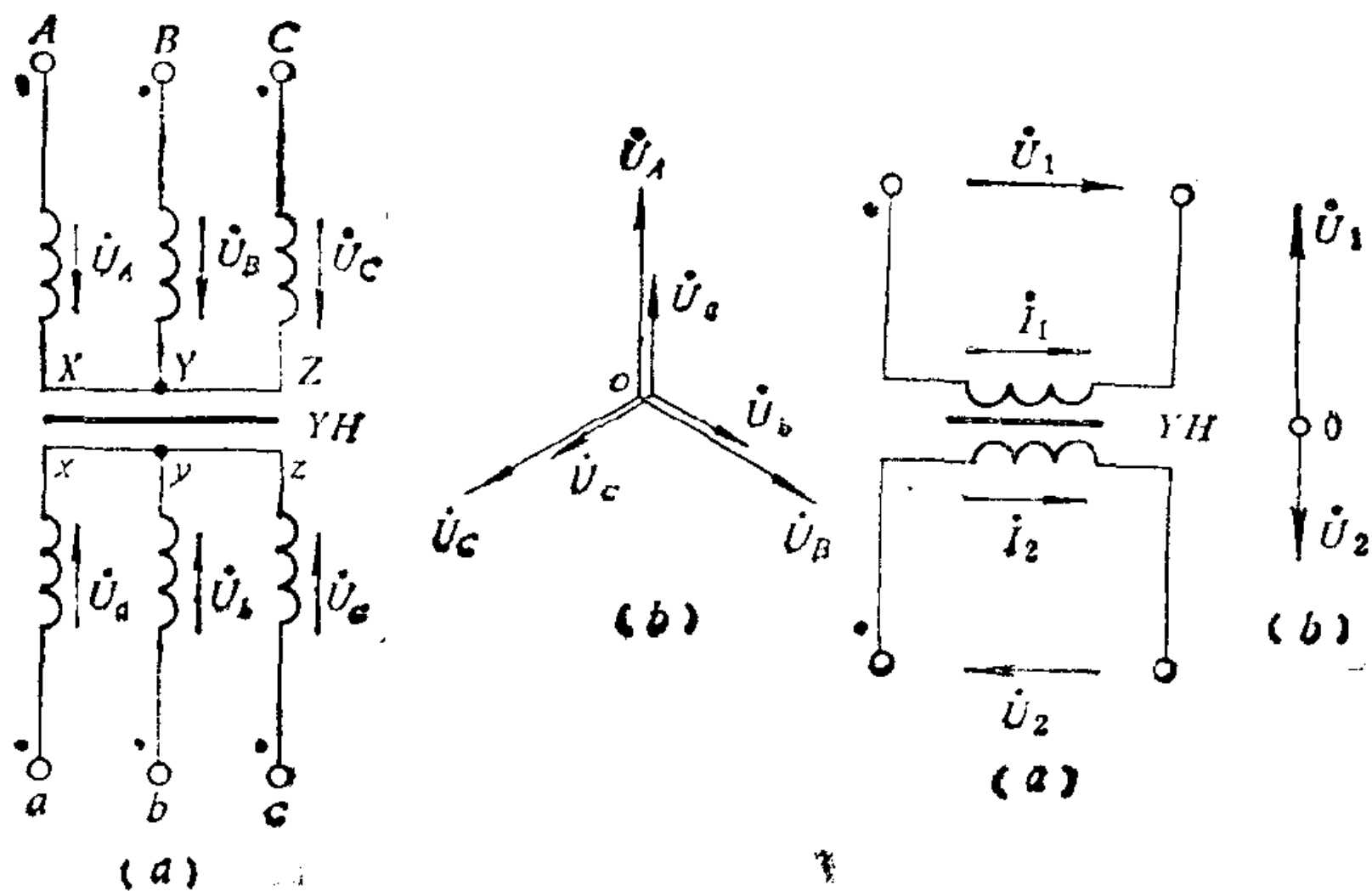


图 1-13 三相电压互感器的极性端
(a) 接线图，(b) 相量图

图 1-14 电压互感器极性端的另一种标注法
(a) 接线图，(b) 相量图

第二节 电压互感器的误差

电磁式电压互感器的铁芯是采用磁性材料（如硅钢片）做成的，需要激磁电流供给铁芯激磁与功率损耗，它的原边和副边绕组之电阻和漏抗不宜忽略。因此，折合过的一次电压在数值和相位上均与二次电压有差别，于是出现电压数值误差和相位误差。

一、电压互感器的相量图

绘制电压互感器相量图的依据是它的等值电路。为此，先将一次侧电参数折合到二次侧，即