

ICS 27.100

F 21

备案号: 13612-2004

**DL**

# 中华人民共和国电力行业标准

DL/T 866 — 2004

---

## 电流互感器和电压互感器选择 及 计 算 导 则

**The guide for selection and calculation of  
current transformers and voltage transformers**

2004-03-09 发布

2004-06-01 实施

---

中华人民共和国国家发展和改革委员会 发布

## 目 次

前言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语、定义和符号 .....	1
3.1 电流互感器术语和定义 .....	1
3.2 电压互感器术语和定义 .....	6
3.3 符号 .....	8
4 电流互感器应用的一般问题 .....	10
4.1 基本特性及应用 .....	10
4.2 电流互感器的配置 .....	10
4.3 一次参数选择 .....	11
4.4 二次参数选择 .....	11
5 测量用电流互感器 .....	12
5.1 类型及额定参数选择 .....	12
5.2 准确级选择 .....	12
5.3 二次负荷选择及计算 .....	13
6 保护用电流互感器 .....	14
6.1 性能要求 .....	14
6.2 类型选择 .....	15
6.3 额定参数选择 .....	16
6.4 准确级及误差限值 .....	16
6.5 稳态性能验算 .....	17
6.6 二次负荷计算 .....	19
7 TP类保护用电流互感器 .....	19
7.1 电流互感器暂态特性基本计算式 .....	19
7.2 TP类电流互感器参数 .....	20
7.3 TP类电流互感器的误差限值和规范 .....	21
7.4 TP类电流互感器的应用 .....	22
7.5 TP类电流互感器的性能计算 .....	23
8 电压互感器 .....	25
8.1 分类及应用 .....	25
8.2 配置和接线 .....	26
8.3 一次电压选择 .....	27
8.4 二次绕组和电压选择 .....	27
8.5 准确等级和误差限值 .....	27
8.6 二次绕组容量选择及计算 .....	28
8.7 电压互感器的特殊问题 .....	30
附录 A (资料性附录) TP类电流互感器的暂态特性 .....	32

**DL/T 866 — 2004**

附录 B (资料性附录)	测量仪表和保护装置电流回路功耗 .....	38
附录 C (资料性附录)	P 类或 PR 类电流互感器应用示例 .....	40
附录 D (资料性附录)	TP 类电流互感器应用示例 .....	45
附录 E (资料性附录)	电子式互感器简介 .....	50

## 前 言

随着超高压系统的发展和电力体制的改革，继电保护系统和测量计费系统对电流互感器和电压互感器提出了许多新的和更严格的要求，现有的选择和计算方法已不能适应。为了规范电流互感器和电压互感器的选择和计算方法，统一对产品开发的技术要求，解决设计应用存在的问题，特制定此标准。

有关电流互感器和电压互感器的国家标准和行业标准对互感器的技术规范和订货技术条件作了规定，本标准是对电力工程中如何选定这些规范和需要进行的相应计算方法作出规定，并对新产品开发提出要求。

本标准主要适用于工程广泛使用的常规电流互感器和电压互感器。对于新开发的尚未普遍应用的新型电子式互感器，仅在附录中给出简要介绍。

本标准的附录均为资料性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业电力规划设计标准化技术委员会归口。

本标准起草单位：国电华北电力设计院工程有限公司、中国电力建设工程咨询公司。

本标准起草人：袁季修、卓乐友、盛和乐、吴聚业、李 京。

本标准由电力行业电力规划设计标准化技术委员会负责解释。

# 电流互感器和电压互感器选择及计算导则

## 1 范围

本标准给出了电力工程用的电流互感器和电压互感器选择及计算方法，包括：保护及测量用互感器的性能要求，互感器类型和参数选择，以及相关的计算方法等。本标准主要规定电流互感器和电压互感器二次方面的有关内容。

本标准适用于常规的交流电流互感器、电磁式电压互感器、电容式电压互感器、辅助电流互感器和辅助电压互感器。不适用于低电平输出的电子式互感器、测量和保护装置内部专用的变换器、直流电流互感器、交流操作专用互感器和试验室用互感器。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修改版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

- GB 1207 电压互感器 (eqv IEC 60186:1987)
- GB 1208 电流互感器 (eqv IEC 60185:1987)
- GB/T 4703 电容式电压互感器 (eqv IEC 60186:1987)
- GB 16847 保护用电流互感器暂态特性技术要求 (idt IEC 60044-6:1992)
- DL/T 725 电力用电流互感器订货技术条件
- DL/T 726 电力用电压互感器订货技术条件
- IEC 60044-1 Amendment 1:2000 互感器 第一部分 电流互感器 第一号修改单
- IEEE Std C37.110—1996 保护继电器用电流互感器的应用导则

## 3 术语、定义和符号

### 3.1 电流互感器术语和定义

对于电流互感器，本标准采用 GB 1208 及 GB 16847 的有关术语和定义，并补充了 IEC 60044—1 的有关术语。

#### 3.1.1 电流互感器通用术语和定义

##### 3.1.1.1

**额定一次电流** **rated primary current** ( $I_{pn}$ )  
作为电流互感器性能基准的一次电流值。

##### 3.1.1.2

**额定二次电流** **rated secondary current** ( $I_{sn}$ )  
作为电流互感器性能基准的二次电流值。

##### 3.1.1.3

**电流误差** (比误差) **current error (ratio error)** ( $\epsilon_1$ )

互感器在测量电流时所出现的误差，它是由于实际电流比与额定电流比不相等造成的。电流误差的百分值用式 (1) 表示：

$$\varepsilon_1 = \frac{K_n I_s - I_p}{I_p} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

$K_n$ ——额定电流比；

$I_p$ ——实际一次电流方均根植，A；

$I_s$ ——测量条件下通过一次电流  $I_p$  时的二次电流方均根植，A。

#### 3.1.1.4

**相位差 phase displacement ( $\phi_e$ )**

一次电流与二次电流相量的相位之差。相量方向是以理想互感器中的相位差为零来决定的。若二次电流相量超前一次电流相量时，相位差作为正值。相位差通常用 min（分）或 crad（厘弧度）表示。

#### 3.1.1.5

**复合误差 composite error ( $\varepsilon_c$ )**

在稳态条件下，一次电流瞬时值与二次电流瞬时值乘以  $K_n$  两者之差的方均根植。通常复合误差的百分值按式（2）表示：

$$\varepsilon_c = \frac{1}{I_p} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_n i_s - i_p)^2 dt} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

$K_n$ ——额定电流比；

$I_p$ ——一次电流方均根植，A；

$i_p$ ——一次电流瞬时值，A；

$i_s$ ——二次电流瞬时值，A；

$T$ ——一个周波的时间，A。

#### 3.1.1.6

**准确级 accuracy class**

对电流互感器所给定的等级。互感器在规定使用条件下的误差应在规定限度内。

#### 3.1.1.7

**负荷 burden ( $Z_b$  或  $S_b$ )**

电流互感器二次回路所接的阻抗  $Z_b$ 。用欧姆和功率因数表示。负荷可用视在功率的伏安值表示，它是在额定电流和规定功率因数下所吸取的视在功率  $S_b$ 。

#### 3.1.1.8

**额定负荷 rated burden ( $Z_{bn}$  或  $S_{bn}$ )**

确定互感器准确级所依据的负荷值。电阻性负荷  $R_b$  的额定值为额定负荷电阻  $R_{bn}$ 。

#### 3.1.1.9

**二次绕组电阻 secondary winding resistance ( $R_{ct}$ )**

以欧姆值表示的二次绕组直流电阻，校正至 75℃ 或其他规定温度。

#### 3.1.1.10

**额定连续热电流 rated continuous thermal current ( $I_{cth}$ )**

在二次绕组接有额定负荷下，一次绕组允许连续流过的一次电流。此时，电流互感器的温升不超过规定的限值。

#### 3.1.1.11

**额定短时热电流 rated short-time thermal current ( $I_{th}$ )**

在二次绕组短路的情况下，电流互感器在 1s 内能承受住且无损伤的最大的一次电流方均根植。

## 3.1.1.12

**额定动稳定电流 rated dynamic current ( $I_{dyn}$ )**

在二次绕组短路的情况下，电流互感器能承受其电磁力的作用而无电气或机械损伤的最大的一次电流峰值。

## 3.1.2 测量用电流互感器补充术语和定义

## 3.1.2.1

**仪表保安系数 instrument security factor (FS)**

测量用电流互感器在二次负荷等于额定值，且复合误差等于或大于 10% 时的最小一次电流值为额定仪表限值一次电流 ( $I_{PL}$ )。  $I_{PL}$  与额定一次电流 ( $I_{pn}$ ) 之比为仪表保安系数 FS。

注：在系统故障电流超出  $I_{PL}$  时，复合误差应大于 10% 以限制二次电流，防止由其供电的仪表损坏。

## 3.1.3 保护用电流互感器稳态下的补充术语和定义

## 3.1.3.1

**P 类保护用电流互感器 protection current transformer class P**

准确限值规定为稳态对称一次电流下的复合误差 ( $\epsilon_c$ ) 的电流互感器，它对剩磁无限制。

## 3.1.3.2

**PR 类保护用电流互感器 protection current transformer class PR**

剩磁系数有规定限值的电流互感器。某些情况下，也可规定二次回路时间常数数值和/或二次绕组电阻的限值。

## 3.1.3.3

**PX 类保护用电流互感器 protection current transformer class PX**

PX 类保护用电流互感器是一种低漏磁的电流互感器，当已知互感器二次励磁特性、二次绕组电阻、二次负荷电阻和匝数比时，就足以确定其与所接保护系统有关的性能。

## 3.1.3.4

**额定准确限值一次电流 rated accuracy limit primary current ( $I_{pal}$ )**

在稳态情况下，电流互感器能满足复合误差要求的最大一次电流值。

## 3.1.3.5

**准确限值系数 accuracy limit factor ( $K_{alf}$  或 ALF)**

额定准确限值一次电流 ( $I_{pal}$ ) 与额定一次电流 ( $I_{pn}$ ) 之比，即：

$$K_{alf} = I_{pal} / I_{pn} \quad (3)$$

## 3.1.3.6

**额定二次极限电动势 rated secondary limiting e.m.f ( $E_{sl}$ )**

在稳态情况下，准确限值系数 ( $K_{alf}$ )、额定二次电流 ( $I_{sn}$ )、额定负荷 ( $Z_{bn}$ ) 与二次绕组阻抗 ( $Z_{ct}$ ) 的相量和三者的乘积，即：

$$E_{sl} = K_{alf} I_{sn} | \dot{Z}_{bn} + \dot{Z}_{ct} | \quad (4)$$

实际计算时， $Z_{bn}$  和  $Z_{ct}$  可近似采用  $R_{bn}$  和  $R_{ct}$  值。

## 3.1.3.7

**励磁特性 excitation characteristic**

当一次绕组和其他绕组开路时，施加于电流互感器二次端子上的正弦波电动势方均根值与励磁电流方均根值之间的关系，用曲线图或表格表示。这些数值的整个范围，应足以确定从低励磁值至额定拐点电动势的特性。

## 3.1.3.8

**额定拐点电动势 rated knee point e.m.f ( $E_k$ )**

作用于互感器二次端子的额定频率正弦波电动势最小方均根值，当此值增加 10% 时，励磁电流方均根值增加不大于 50%。此时互感器所有其他端子开路。

注：实际拐点电动势应不小于额定拐点电动势。

### 3.1.3.9

**计算系数 dimensioning factor ( $K_x$ )**

计算系数是由用户给定的一个系数，表示互感器在电力系统故障情况下出现的额定二次电流 ( $I_{sn}$ ) 的倍数，包括安全因数在内，要求互感器在该值下满足要求的性能。

### 3.1.3.10

**饱和磁通 saturation flux ( $\Psi_s$ )**

铁芯中由非饱和状态向全饱和状态转变时的磁通峰值，并认为它是在铁芯的  $B-H$  特性曲线上  $B$  值上升 10% 而使  $H$  值上升 50% 的那一点。

注：TPS 级电流互感器饱和磁通的定义略有不同，参见 7.3.1。

### 3.1.3.11

**剩磁通 remanent flux ( $\Psi_r$ )**

铁芯在切断励磁电流 3min 后剩余的磁通，该励磁电流的幅值足以产生按 3.1.3.10 条定义的饱和磁通 ( $\Psi_s$ )。

### 3.1.3.12

**剩磁系数 remanence factor ( $K_r$ )**

剩磁通 ( $\Psi_r$ ) 与饱和磁通 ( $\Psi_s$ ) 之比，即：

$$K_r = \Psi_r / \Psi_s \quad (5)$$

### 3.1.3.13

**二次回路时间常数 secondary loop time constant ( $T_s$ )**

电流互感器二次回路的时间常数值，由励磁电感 ( $L_e$ ) 和漏电感 ( $L_{cl}$ ) 之和 ( $L_s$ ) 与二次回路电阻 ( $R_s$ ) 之比得出：

$$T_s = (L_e + L_{cl}) / R_s = L_s / R_s \quad (6)$$

式中：

$R_s$ ——电流互感器二次绕组电阻 ( $R_{ct}$ ) 与外接电阻性负荷 ( $R_b$ ) 之和。

当外接电阻性负荷为额定值 ( $R_{bn}$ ) 时，求得的  $T_s$  值为额定二次回路时间常数  $T_{sn}$ 。

### 3.1.3.14

**低漏磁电流互感器 low leakage flux current transformer**

这种电流互感器，当已知其二次励磁特性和二次绕组电阻时，便可估算其暂态性能，它对应于额定值或较低值的一次对称短路电流下的负荷与工作循环任何组合，但不超过由二次励磁特性确定的电流互感器能力的理论限值。

注：一次导体为单匝、二次绕组均匀分布和返回导体影响可忽略的电流互感器一般为低漏磁电流互感器。

### 3.1.3.15

**高漏磁电流互感器 high leakage flux current transformer**

不符合 3.1.3.14 条要求的电流互感器为高漏磁电流互感器。对于 TP 类电流互感器，如不符合该要求时，制造厂要考虑加大裕度，以计及漏磁增加的影响作用，使这种电流互感器能满足规定的工作循环。

### 3.1.3.16

**保护校验故障电流 protective checking fault current ( $I_{pcf}$ )<sup>1)</sup>**

校验电流互感器特性时，为保证保护装置正确动作而合理选用的一次故障电流。

1) 为本标准制定的定义。



## 3.1.3.17

保护校验系数 **protective checking factor** ( $K_{pcf}$ )<sup>1)</sup>

保护校验故障电流 ( $I_{pcf}$ ) 与电流互感器额定一次电流 ( $I_{pn}$ ) 之比, 即:

$$K_{pcf} = I_{pcf} / I_{pn} \quad (7)$$

## 3.1.3.18

给定暂态系数 **specified transient factor** ( $K$ )<sup>1)</sup>

为考虑电流互感器暂态饱和和影响由用户给定的暂态系数。 $K$  为所选用互感器的额定准确限值一次电流  $I_{pal}$  与保护校验故障电流  $I_{pcf}$  之比, 即:

$$K = I_{pal} / I_{pcf} = K_{alt} / K_{pcf} \quad (8)$$

## 3.1.4 保护用电流互感器暂态下的补充术语和定义

## 3.1.4.1

**TP 类保护用电流互感器 protection current transformer class TP**

能满足短路电流具有非周期分量的暂态过程性能要求的保护用电流互感器为 TP 类保护用电流互感器。分为以下级别并定义如下:

**TPS 级:** 低漏磁电流互感器, 其性能由二次励磁特性和匝数比误差限值规定。对剩磁无限制。

**TPX 级:** 准确限值规定为在指定的暂态工作循环中的峰值瞬时误差 ( $\hat{\epsilon}$ )。对剩磁无限制。

**TPY 级:** 准确限值规定为在指定的暂态工作循环中的峰值瞬时误差 ( $\hat{\epsilon}$ )。剩磁不超过饱和磁通的 10%。

**TPZ 级:** 准确限值规定为在指定的二次回路时间常数下, 具有最大直流偏移的单次通电时的峰值瞬时交流分量误差 ( $\hat{\epsilon}_{ac}$ )。无直流分量误差限值要求。剩磁实际上可以忽略。

## 3.1.4.2

额定一次短路电流 **rated primary short-circuit current** ( $I_{psc}$ )

在暂态情况下, 电流互感器额定准确度性能所依据的对称一次短路电流分量方均根值。

## 3.1.4.3

额定对称短路电流倍数 **rated symmetrical short-circuit current factor** ( $K_{ssc}$ )

暂态条件下额定一次短路电流 ( $I_{psc}$ ) 与额定一次电流 ( $I_{pn}$ ) 之比, 即:

$$K_{ssc} = I_{psc} / I_{pn} \quad (9)$$

## 3.1.4.4

瞬时误差电流 **instantaneous error current** ( $i_e$ )

二次电流瞬时值 ( $i_s$ ) 与额定电流比 ( $K_n$ ) 的乘积和一次电流瞬时值 ( $i_p$ ) 的差值, 即:

$$i_e = K_n i_s - i_p \quad (10)$$

在同时具有交流误差分量 ( $i_{\epsilon ac}$ ) 和直流误差分量 ( $i_{\epsilon dc}$ ) 时, 所含各分量分别表示如下:

$$i_e = i_{\epsilon ac} + i_{\epsilon dc} = (K_n i_{sac} - i_{pac}) + (K_n i_{sdc} - i_{pdc}) \quad (11)$$

## 3.1.4.5

峰值瞬时(总)误差 **peak instantaneous (total) error** ( $\hat{\epsilon}$ )

峰值瞬时(总)误差指在规定的工作循环中的最大瞬时误差电流, 表示为额定一次短路电流峰值的百分数:

$$\hat{\epsilon} = 100 \hat{i}_e / (\sqrt{2} I_{psc}) (\%) \quad (12)$$

其中峰值瞬时交流分量误差为交流分量最大瞬时误差电流, 表示为额定一次短路电流峰值的百分数:

$$\hat{\epsilon}_{ac} = 100 \hat{i}_{\epsilon ac} / (\sqrt{2} I_{psc}) (\%) \quad (13)$$

## 3.1.4.6

规定的一次时间常数 **specified primary time constant** ( $T_p$ )

暂态情况下, 电流互感器性能所依据的一次电流非周期分量的时间常数规定值。对 TPX、TPY 和 TPZ 级电流互感器, 此值也可有额定值, 并标在铭牌上。

## 3.1.4.7

保持准确限值的时间 **permissible time to accuracy limit** ( $t_{al}$ )

在给定工作循环的任何指定通电期间内, 不超出规定准确度的允许时间。

注: 这个时间通常根据保护系统的临界测量时间确定, 但当保护稳定性(不误动)是限制条件时, 还需计入断路器切断电流的时间。

## 3.1.4.8

达到最大磁通的时间 **time to maximum flux** ( $t_{max}$ )

假定在规定的通电时间铁芯不饱和, 电流互感器铁芯中的暂态磁通达到最大值所经历的时间。

## 3.1.4.9

规定的工作循环 **specified duty cycle** (C-O 和/或 C-O-C-O)

在工作循环的各通电期间中, 设一次电流为“全偏移”(见下注), 并具有规定的衰减时间常数 ( $T_p$ ) 和额定幅值 ( $I_{psc}$ )。

工作循环如下: 单次通电: C- $t'$ -O。

两次通电: C- $t'$ -O- $t_{fr}$ -C- $t''$ -O (两次通电时的磁通极性相同)。

其中:  $t'$  是第一次电流通过时间;

$t''$  是第二次电流通过时间。

$t_{fr}$  为自动重合闸时无电流时间, 即在断路器自动重合闸工作循环中, 一次短路电流从切断起到其重复出现时的时间间隔。

注: 若电流为部分偏移, 则所需的暂态系数便降低, 降低值约正比于偏移量的减小值。因此建议一般计算采用全偏移参数, 必要时可按适当的部分偏移进行修正。

## 3.1.4.10

暂态系数 **transient factor** ( $K_{tr}$ )

电流互感器经受单次通电且假设二次回路时间常数 ( $T_s$ ) 在整个通电期间保持不变时, 理论上的二次匝链总磁通与该磁通交流分量的峰值之比。

## 3.1.4.11

暂态面积系数 **transient dimensioning factor** ( $K_{td}$ )

TP 类电流互感器在暂态情况下, 满足规定的工作循环所需的暂态面积增大倍数的理论值。

## 3.1.4.12

额定等效二次极限电动势 **rated equivalent limiting secondary e.m.f** ( $E_{al}$ )

在暂态情况下, 满足规定工作循环所需的额定频率下的二次电路等效电动势方均根值。

$$E_{al} = K_{ssc} K_{td} I_{sn} (R_{ct} + R_{bn}) \quad (\text{V.r.m.s}) \quad (14)$$

注: 在暂态情况下, 电流互感器的极限条件严格说只能用二次绕组感应电动势对时间积分来定义(即只能用磁通来定义), 这个电动势在规定的通电条件下产生二次负荷电流。但为了数学上的方便, 采用等效正弦波电动势来定义此极限条件。与 3.1.3.6 的  $E_{s1}$  有区别,  $E_{s1}$  是真正的正弦波感应电动势,  $E_{al}$  只是一个等效的正弦电动势。

## 3.2 电压互感器术语和定义

对于电压互感器, 本导则采用 GB 1207 和 GB 4703 的有关术语和定义。

## 3.2.1 电压互感器通用术语和定义

## 3.2.1.1

额定一次电压 **rated primary voltage** ( $U_{pn}$ )

作为电压互感器性能基准的一次电压值。

### 3.2.1.2

**额定二次电压 rated secondary voltage ( $U_{sn}$ )**

作为电压互感器性能基准的二次电压值。

### 3.2.1.3

**电压误差 (比误差) voltage error (ratio error) ( $\epsilon_v$ )**

互感器在测量电压时出现的误差。它是由实际电压比不等于额定电压比而造成的。电压误差以百分数表示如下：

$$\epsilon_v = \frac{K_n U_s - U_p}{U_p} \times 100\% \quad (15)$$

式中：

$U_p$ ——实际一次电压，V；

$U_s$ ——在测量条件下，施加  $U_p$  时的实际二次电压，V；

$K_n$ ——额定一次电压与额定二次电压之比。

### 3.2.1.4

**相位差 phase displacement ( $\phi_e$ )**

电压互感器一次电压相量与二次电压相量的相位之差。相量方向是以理想互感器中的相位差为零来确定的。若二次电压相量超前一次电压相量，则相位差为正值。相位差通常用 min (分) 或 crad (厘弧度) 表示。

### 3.2.1.5

**准确级 accuracy class**

对电压互感器所给定的等级，互感器在规定使用条件下的误差应在规定的限值内。

### 3.2.1.6

**负荷 burden ( $S_b$ )**

电压互感器二次回路所汲取的视在功率，用伏安值表示。确定电压互感器准确级所依据的负荷值为额定负荷  $S_{bn}$ 。

### 3.2.1.7

**热极限输出 thermal limiting output**

在额定一次电压下的温升不超过规定限值时，二次绕组所能供给的以额定电压为基准的视在功率值。在这种情况下，误差限值可能超过。一般不允许两个或更多二次绕组同时供给热极限输出。

### 3.2.1.8

**额定电压因数 rated voltage factor ( $K_U$ )**

满足规定时间内的有关热性能要求并满足准确级要求的最高电压与额定一次电压的比值。

## 3.2.2 保护用电压互感器补充术语和定义

### 3.2.2.1

**剩余电压绕组 residual voltage winding**

电压互感器的附加二次绕组，用以在三相时接成开口角形，在接地故障时产生剩余电压。

## 3.2.3 电容式电压互感器补充术语和定义

### 3.2.3.1

**电容式电压互感器 capacitor voltage transformer**

一种由电容分压器和电磁单元组成的电压互感器。

### 3.2.3.2

**电容分压器 capacitor divider**

由电容器组成的分压器。

## 3.2.3.3

高压电容器 **high-voltage capacitor** ( $C_1$ )

电容分压器中接于高压端子与中压端子之间的电容器。

## 3.2.3.4

中压电容器 **intermediate-voltage capacitor** ( $C_2$ )

电容分压器中接于中压端子与低压或接地端子之间的电容器。

## 3.2.3.5

电磁单元 **electromagnetic unit**

一种接在电容分压器的中压端子和接地端子或地之间，以电磁感应方式产生二次电压的电容式电压互感器的部件。

注：电磁单元通常由中间变压器、电抗器及其他附件组成。

## 3.2.3.6

分压比 **voltage ratio (of a capacitor divider)**

中压电容器上未并联阻抗时，施加于电容分压器高压端子与低压端子之间的电压与中间电压的比值。其数值上等于  $(C_1 + C_2) / C_1$ 。

## 3.3 符号

本导则采用的符号如表 1 所示：

表 1 电流互感器和电压互感器有关参数的符号

符 号	参 数 名 称
$E$	拐点电动势
$E$	二次感应电动势（稳态）
$E_{ul}$	额定二次极限电动势（稳态）
$E_{ul}$	额定等效二次极限电动势（暂态）
$FS$	仪表保安系数
$IPL$	额定仪表限值一次电流
$I_p$	一次电流
$I_{pn}$	额定一次电流
$I_{pal}$	额定准确限值一次电流（稳态）
$I_{psc}$	额定一次短路电流（暂态）
$I_{pcf}$	保护校验故障电流
$I_s$	二次电流
$I_{sn}$	额定二次电流
$I_e$	二次励磁电流
$I_{semax}$	最大短路电流
$I_{th}$	额定短时热电流（方均根值）
$I_{dyn}$	额定动稳定电流（峰值）
$i_e$	二次励磁电流瞬时值
$i_p$	一次电流瞬时值
$i_s$	二次电流瞬时值
$K$	给定暂态系数（适用于 P, PR, TPS）

表 1 (续)

	符 号	参 数 名 称
(1) 电 流 互 感 器	$K_{alf}$ (ALF)	准确限值系数 (稳态)
	$K_n$	额定电流比
	$K_{pcf}$	保护校验系数
	$K_r$	剩磁系数
	$K_{ssc}$	额定对称短路电流倍数 (暂态)
	$K_{if}$	暂态系数 (适用于 TPX, TPY, TPZ)
	$K_{id}$	暂态面积系数
	$K_x$	计算系数 (适用于 PX)
	$L_b$	二次负荷电感
	$L_{ct}$	互感器二次绕组漏电感
	$L_e$	励磁回路电感
	$R_b$	二次负荷电阻
	$R_{bn}$	额定二次负荷电阻
	$R_{ct}$	互感器二次绕组电阻
	$S_b$	二次负荷视在功率
	$S_{bn}$	额定二次负荷视在功率
	$T_p$	规定的一次时间常数
	$T_s$	互感器二次时间常数
	$T_{sn}$	互感器额定二次时间常数
	$t_{al}$	保持准确限值的时间
	$t_{fr}$	自动重合闸时无电流时间
	$t_{max}$	达到最大磁通的时间
	$Z_b$	二次负荷阻抗
	$Z_e$	励磁阻抗
	$Z_{ct}$	二次绕组阻抗
	$\varepsilon_1$	电流误差 (比误差)
	$\phi_e$	角度误差 (相位差)
	$\varepsilon_c$	复合误差
$\hat{\varepsilon}$	峰值瞬时误差	
$\psi_s$	饱和磁通	
$\psi_r$	剩磁通	
(2) 电 压 互 感 器	$C_n$	额定电容
	$C_1$	高压电容器
	$C_2$	中压电容器
	$K_n$	额定电压比
	$K_u$	额定电压因数
	$S_b$	二次负荷

表 1 (续)

	符 号	参 数 名 称
(2)	$S_{bn}$	额定二次负荷
电	$U_p$	一次电压
压	$U_{pn}$	额定一次电压
互	$U_{res}$	剩余电压
感	$U_s$	二次电压
器	$U_{sn}$	额定二次电压
	$\epsilon_v$	电压误差 (比误差)
	$\phi_e$	角度误差 (相位差)

#### 4 电流互感器应用的一般问题

##### 4.1 基本特性及应用

4.1.1 电流互感器的简化等值电路见图 1 (a), 相量图参见图 1 (b)。

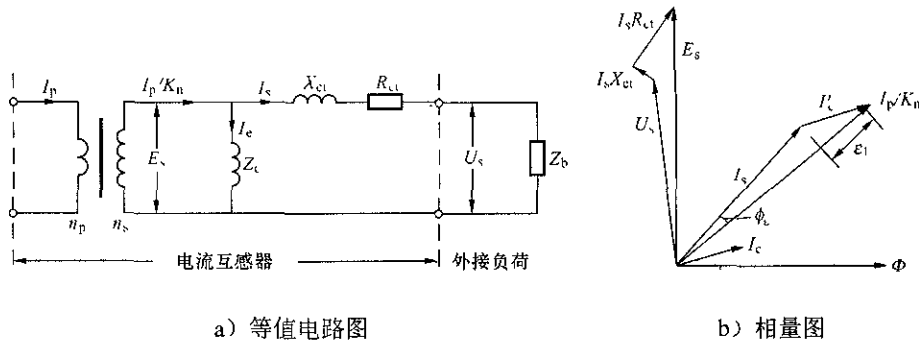


图 1 电流互感器等值电路及相量图

4.1.2 电流互感器按其功能分为测量用电流互感器和保护用电流互感器两类：测量用电流互感器分为一般用途和特殊用途 (S 类) 两类；保护用电流互感器分为 P 类、PR 类、PX 类和 TP 类，TP 类适用于短路电流具有非周期分量时的暂态情况。

4.1.3 一组电流互感器一般具有多个二次绕组 (铁芯) 用于供给不同的仪表或继电保护。各个二次绕组的变比通常是相同的。电流互感器可通过改变一次绕组串并联实现不同变比。某些特殊情况下，各二次绕组也可采用不同变比，这种互感器称为复式变比电流互感器。某些情况下，也可采用二次绕组抽头实现不同变比。

4.1.4 某些情况下，电流互感器经过两次变换才将正比于一次电流的信号传送到二次回路。第二次变换所用互感器称为辅助互感器，电流互感器及其辅助互感器的综合性能应符合各种用途提出的性能要求，如准确级、二次负荷等。辅助互感器宜采用降流型。

4.1.5 工程项目中选用电流互感器时应根据电力系统测量仪表和继电保护的要求，按照 GB 1208 的有关内容，结合工程的实际情况，提出订货技术规范，包括使用环境条件、额定参数、技术性能、绝缘要求及一般结构要求等。参见 DL/T 725。某些特殊性能要求可由订货方和供货方协商确定。

#### 4.2 电流互感器的配置

4.2.1 电流互感器的类型、二次绕组的数量和准确级应满足继电保护自动装置和测量仪表的要求。

4.2.2 保护用电流互感器的配置应避免出现主保护的死区。接入保护的互感器二次绕组的分配，应注意避免当一套保护停用时，出现被保护区内故障时的保护动作死区。

4.2.3 对中性点有效接地系统，电流互感器可按三相配置；对中性点非有效接地系统，依具体要求可按两相或三相配置。

4.2.4 当配电装置采用一个半断路器接线时，对独立式电流互感器每串宜配置三组，每组的二次绕组数量按工程需要确定。

4.2.5 继电保护和测量仪表宜用不同二次绕组供电，若受条件限制须共用一个二次绕组时，其性能应同时满足测量和保护的要求，且接线方式应避免仪表校验时影响继电保护工作。

4.2.6 在使用微机保护的条件下，各类保护宜共用二次绕组，以减少互感器二次绕组数量。但一个元件的两套互为备用的主保护应使用不同的二次绕组。

4.2.7 电流互感器的二次回路不宜进行切换，当需要时，应采取防止开路的措施。

### 4.3 一次参数选择

4.3.1 电流互感器应根据其所属一次设备的额定电流或最大工作电流选择适当的额定一次电流。额定一次电流 ( $I_{pn}$ ) 的标准值为：10、12.5、15、20、25、30、40、50、60、75A 以及它们的十进位倍数或小数。

4.3.2 电流互感器的额定连续热电流 ( $I_{cth}$ )、额定短时热电流 ( $I_{th}$ ) 和额定动稳定电流 ( $I_{dyn}$ ) 应能满足所在一次回路的最大负荷电流和短路电流的要求，并应适当考虑系统的发展情况。当互感器一次绕组可串、并联切换时，应按其接线状态下实际短路电流进行  $I_{th}$  及  $I_{dyn}$  校验。

4.3.3 选择额定一次电流时，应使得在额定电流比条件下的二次电流满足该回路测量仪表和保护装置的准确性要求。详见第 5 章和第 6 章。

4.3.4 为适应不同要求，某些情况下在同一组电流互感器中，保护用二次绕组与测量用二次绕组可采用不同变比。

### 4.4 二次参数选择

#### 4.4.1 二次电流选择

电流互感器额定二次电流 ( $I_{sn}$ ) 有 1A 和 5A 两类。

a) 对于新建发电厂和变电所，有条件时电流互感器额定二次电流宜选用 1A。

b) 如有利于互感器安装或扩建工程原有电流互感器采用 5A 时，以及某些情况下为降低电流互感器二次开路电压，额定二次电流可选用 5A。

c) 一个厂站内的互感器额定二次电流允许同时采用 1A 和 5A。

#### 4.4.2 二次负荷选择及计算

a) 电流互感器的二次负荷可用阻抗  $Z_b$  ( $\Omega$ ) 或容量  $S_b$  (VA) 表示。两者之间的关系为：

$$Z_b = \frac{S_b}{I_{sn}^2} \quad (16)$$

电流互感器的二次负荷额定值 ( $S_{bn}$ ) 可根据实际负荷需要选用 2.5、5、7.5、10、15、20、30VA。在某些特殊情况，也可选用更大的额定值。对保护用 TP 类电流互感器，其二次负荷用负荷电阻  $R_b$  表示。

b) 电流互感器的负荷通常由两部分组成：一部分是所连接的测量仪表或保护装置，另一部分是连接导线。计算电流互感器负荷时应注意在不同接线方式和故障形态下的阻抗换算系数，详见 5.3 和 6.6。

c) 计算连接导线的负荷时，一般情况下可忽略导线电感，而仅计及其电阻  $R_l$ ：

$$R_l = \frac{L}{\gamma A} \quad (17)$$

式中：

$L$ ——电缆长度，m；

$A$ ——导线截面，电流回路采用 2.5mm<sup>2</sup> 及以上截面积的铜导线，mm<sup>2</sup>；

$\gamma$ ——电导系数，铜取 57，m/( $\Omega \times \text{mm}^2$ )。

## 5 测量用电流互感器

### 5.1 类型及额定参数选择

#### 5.1.1 类型选择

测量用电流互感器有一般用途和特殊用途（S类）两类。

工程应用中应根据电力系统测量和计量系统的实际需要合理选择互感器的类型。要求在工作电流变化范围较大情况下作准确计量时可选用 S 类电流互感器。为保证二次电流在合适的范围内，可采用复式变比或二次绕组带抽头的电流互感器。

电能计量用仪表与一般测量仪表在满足准确级条件下，可共用一个二次绕组。

#### 5.1.2 额定参数选择

测量用电流互感器的额定参数选择除满足第 4 章的要求外，还要考虑以下情况：

- 测量用电流互感器的二次负荷不应超出规定的保证准确级的负荷范围。
- 测量用的电流互感器的额定一次电流应接近但不低于一次回路正常最大负荷电流。对于某些指示仪表，为使仪表在正常运行时指示在刻度标尺的 3/4 左右，并且过负荷运行时能有适当指示，可选用  $I_{pn} \geq 1.25I_b$ ，其中  $I_b$  为一次设备的额定电流或线路最大负荷电流。对于直接启动电动机的测量仪表用的电流互感器可选用  $I_{pn} > 1.5I_b$ 。
- 为在故障时一次回路短时通过大短路电流不致损坏测量仪表，测量用电流互感器可选用具有仪表保安限值的互感器，仪表保安系数（FS）宜选择 10，必要时也可选择 5。对于电子式仪表，可不考虑保安系数的要求。
- 必要时可采用具有电流扩大值特性的电流互感器，其连续热电流可选用额定一次电流的 120%，特殊情况可选用 150% 或 200%。

注：对于 0.1~1 级电流互感器，可以规定电流的扩大值。此时要求：①额定连续热电流应是额定扩大一次电流值（表示为额定一次电流的百分数）；②额定扩大一次电流下的电流误差和相位差不超过表 2 所列对 120% 额定一次电流下所规定的限值。

## 5.2 准确级选择

### 5.2.1 测量用电流互感器的准确级

- 测量用电流互感器的准确级，以该准确级在额定电流下所规定的最大允许电流误差的百分数来标称。标准的准确级为 0.1、0.2、0.5、1、3 和 5 级；供特殊用途的为 0.2S 及 0.5S 级。
- 对于 0.1、0.2、0.5 级和 1 级测量用电流互感器，在二次负荷欧姆值为额定负荷值的 25%~100% 之间的任一值时，其额定频率下的电流误差和相位误差不超过表 2 所列限值。

表 2 测量用电流互感器误差限值（一）

准确级	电流误差（±%） 在下列额定电流（%）时				相位差，在下列额定电流（%）时							
					± min				± crad			
	5	20	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
0.1	0.4	0.2	0.1	0.1	15	8	5	5	0.45	0.24	0.15	0.15
0.2	0.75	0.35	0.2	0.2	30	15	10	10	0.9	0.45	0.3	0.3
0.5	1.5	0.75	0.5	0.5	90	45	30	30	2.7	1.35	0.9	0.9
1	3.0	1.5	1.0	1.0	180	90	60	60	5.4	2.7	1.8	1.8

- 对于 0.2S 和 0.5S 级测量用电流互感器，在二次负荷欧姆值为额定负荷值的 25%~100% 之间任一值时，其额定频率下的电流误差和相位误差不应超过表 3 所列限值。



表3 特殊用途电流互感器的误差限值(二)

准确级	电流误差(±%) 在下列额定电流(%)时				相位差, 在下列额定电流(%)时											
					±min						±crad					
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120	120	1	5	20	100	120
0.2S	0.75	0.35	0.2	0.2	0.2	30	15	10	10	10	10	0.9	0.45	0.3	0.3	0.3
0.5S	1.5	0.75	0.5	0.5	0.5	90	45	30	30	30	30	2.7	1.35	0.9	0.9	0.9

d) 对于3级和5级, 在二次负荷欧姆值为额定负荷值的50%~100%之间任一值时, 其额定频率下的电流误差和相位误差不应超过表4所列限值。

表4 测量用电流互感器误差限值(二)

准确级	电流误差(±%), 在下列额定电流(%)时	
	50	120
3	3	3
5	5	5

注: 3级和5级的相位差不予规定。

### 5.2.2 与测量仪表配套的电流互感器准确级选择

测量用电流互感器在实际二次负荷下的准确等级应与配套使用的测量仪表的准确等级相适应。测量仪表包括: 指示仪表, 如电流、功率等电气量测量仪表; 积分仪表, 如电能计量仪表(含计费用计量仪表); 其他类似电器等。不同用途测量仪表要求的准确等级不同, 对配套的互感器的准确级也要求不同。表5为直接接于互感器的测量仪表要求的电流互感器准确等级。

电能计量用的电流互感器, 工作电流宜在其额定电流的2/3以上。对于工作电流变化范围较大的计费电能计量仪表应采用S类电流互感器。

当一个电流互感器的回路接有几种不同型式的仪表时, 应按准确级最高的仪表进行选择。

表5 仪表与配套的电流互感器准确等级

指示仪表			计量仪表		
仪表准确级	互感器准确级	辅助互感器准确级	仪表准确等级		互感器准确等级
			有功电能表	无功电能表 <sup>a</sup>	
0.5	0.5	0.2	0.2	1.0	0.1
1.0	0.5	0.2	0.5	2.0	0.2或0.2S
1.5	1.0	0.2	1.0	2.0	0.5或0.5S
2.5	1.0	0.5	2.0	3.0	0.5或0.5S

a 无功电能表一般与同回路的有功电能表采用同一等级的电流互感器。

### 5.2.3 小变比套管式电流互感器的准确级选择

SF<sub>6</sub>绝缘电器(GIS)、落地罐式断路器及变压器套管式电流互感器由于结构上的特点(一次绕组只有一匝), 当额定电流在300A以下时, 不易满足较高准确级(如0.2, 0.5, 0.2S, 0.5S)的要求, 选择准确级时可与制造厂协商确定。

## 5.3 二次负荷选择及计算

### 5.3.1 二次负荷的选定

a) 为保证测量用电流互感器的准确级, 其实际连接二次负荷值( $Z_b$ 或 $S_b$ )不应超出表6规定的范

围。

- b) 测量用电流互感器二次负荷不宜过小, 以便一次短路电流超过 IPL 时, 使二次感应电动势计算值等于或超过额定二次极限电动势, 能导致电流互感器饱和, 以保证仪表安全。

表 6 测量用电流互感器二次负荷范围

仪表准确级	二次负荷范围
0.1、0.2、0.5、1	25%~100%额定负荷
0.2S、0.5S	25%~100%额定负荷
3、5	50%~100%额定负荷

### 5.3.2 二次负荷计算方法

- a) 一般工程验算可忽略负荷阻抗之间的相位差, 二次负荷  $Z_b$  可按下式计算:

$$Z_b = \sum K_{mc} Z_m + K_{lc} Z_l + R_c \quad (18)$$

式中:

$Z_m$ ——仪表电流线圈的阻抗,  $\Omega$ ;

$Z_l$ ——连接导线单程的阻抗, 一般可忽略电抗, 仅计及电阻,  $\Omega$ ;

$R_c$ ——接触电阻, 一般为  $0.05\Omega \sim 0.1\Omega$ ;

$K_{mc}$ ——仪表接线的阻抗换算系数;

$K_{lc}$ ——连接线的阻抗换算系数。

- b) 测量用电流互感器各种接线方式的阻抗换算系数见表 7。

表 7 测量用电流互感器各种接线方式的阻抗换算系数

电流互感器接线方式	阻抗换算系数		备注
	$K_{lc}$	$K_{mc}$	
单相	2	1	
三相星形	1	1	
两相星形	$Z_{m0}=Z_m$	$\sqrt{3}$	$Z_{m0}$ 为零线回路中的负荷电阻
	$Z_{m0}=0$	$\sqrt{3}$	
两相差接	$2\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	
三角形	3	3	

- c) 测量及计量电流回路功耗应根据实际应用情况确定, 其功耗值与装置实现原理和构成元件有关, 差别很大。附录 B 的 B.1 列出一些典型仪表的功耗供使用参考。

## 6 保护用电流互感器

### 6.1 性能要求

#### 6.1.1 影响电流互感器性能的因素

保护用电流互感器性能应满足系统或设备故障工况的要求, 即在短路时, 将互感器所在回路的一次电流传变到二次回路, 且误差不超过规定值。电流互感器的铁芯饱和是影响其性能的最重要因素。

在稳态对称短路电流(无非周期分量)下, 影响互感器饱和的主要因素是: 短路电流幅值、二次回路(包括互感器二次绕组)的阻抗、电流互感器的工频励磁阻抗、电流互感器匝数比和剩磁等。

在实际的短路暂态过程中, 短路电流可能存在非周期分量而严重偏移。这可能导致电流互感器严重暂态饱和, 参见图 2。为保证准确传变暂态短路电流, 电流互感器在暂态过程中所需磁链可能是传变

等值稳态对称短路电流磁链的几倍至几十倍。详细推导及分析见第 7 章和附录 A。

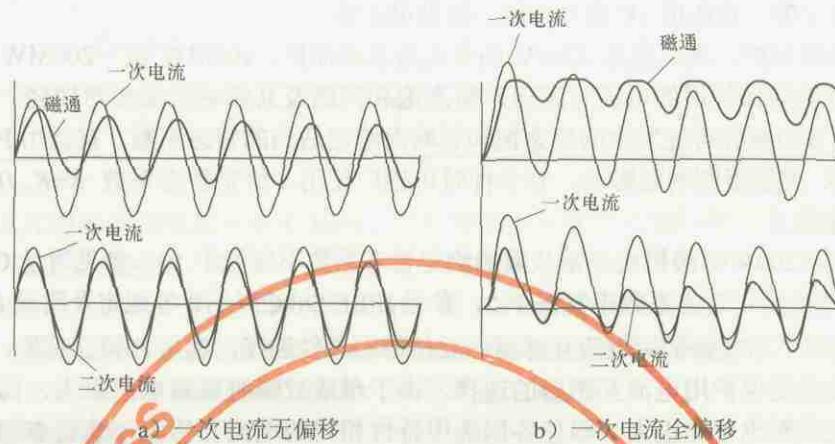


图 2 电流互感器一次电流与磁通及二次电流的关系

## 6.1.2 对保护用电流互感器的性能要求

### 6.1.2.1 保护装置对电流互感器的性能要求如下：

- 保证保护的可靠性。要求保护区内故障时电流互感器误差不致影响保护可靠动作。
- 保证保护的安全性。要求保护区外最严重故障时电流互感器误差不会导致保护误动作或无选择性动作。

### 6.1.2.2 解决电流互感器饱和和对保护动作性能的影响，可采用下述两类措施：

- 选择适当类型和参数的互感器，保证互感器饱和特性不致影响保护动作性能。对电流互感器的基本要求是保证在稳态短路电流下的误差不超过规定值。对短路电流非周期分量和互感器剩磁等引起的暂态饱和影响，则应根据具体情况和运行经验，妥当处理。
- 保护装置采取减轻饱和影响的措施，保证互感器在特定饱和条件下不致影响保护性能。保护装置采取措施减缓电流互感器饱和影响，特别是暂态饱和影响，对降低电流互感器造价及提高保护动作的安全性和可靠性具有重要意义，应成为保护装置的发展方向。特别是微机保护具有较大的潜力可资利用。当前母线差动保护装置一般都采取了抗饱和措施，取得了良好效果。对其他保护装置也应提出适当的抗饱和要求。

## 6.2 类型选择

### 6.2.1 保护用电流互感器的类型

保护用电流互感器分为两大类：

- P 类（P 意为保护）电流互感器。包括 PR 和 PX 类。该类电流互感器的准确限值是由一次电流为稳态对称电流时的复合误差或励磁特性拐点来确定的。
- TP 类（TP 意为暂态保护）电流互感器。该类电流互感器的准确限值是考虑一次电流中同时具有周期分量和非周期分量，并按某种规定的暂态工作循环时的峰值误差来确定的。该类电流互感器适用于考虑短路电流中非周期分量暂态影响的情况。

### 6.2.2 电流互感器类型选择原则

6.2.2.1 保护用电流互感器的性能应满足继电保护正确动作的要求。首先应保证在稳态对称短路电流下的误差不超过规定值。对于短路电流非周期分量和互感器剩磁等的暂态影响，应根据互感器所在系统暂态问题的严重程度，所接保护装置的特性、暂态饱和和可能引起的后果和运行经验等因素，予以合理考虑。如保护装置具有减缓电流互感器饱和影响的功能，则可按保护装置的要求选用适当的互感器。

6.2.2.2 330kV~500kV 系统保护、高压侧为 330kV~500kV 的变压器保护和 300MW 级及以上发电机变压器组保护用的电流互感器，由于系统一次时间常数较大，电流互感器暂态饱和较严重，由此导致

保护误动或拒动的后果严重。因此，所选电流互感器应保证在实际短路工作循环中不致暂态饱和，即暂态误差不超过规定值。宜选用 TP 类互感器。详见第 7 章。

6.2.2.3 220kV 系统保护、高压侧为 220kV 的变压器差动保护、100MW 级~200MW 级发电机变压器组及大容量电动机差动保护用的电流互感器，暂态饱和问题及其影响后果相对较轻，可按稳态短路条件进行计算选择，并为减轻可能发生的暂态饱和影响而给定适当的暂态系数。宜选用 P 类、PR 类或 PX 类电流互感器。PR 类能限制剩磁影响，有条件时可推广使用。给定暂态系数  $K=K_{atf}/K_{pcf}$ ，应根据应用情况和运行经验确定：

- a) 100MW 级~200MW 级机组外部故障的给定暂态系数不宜低于 10。参见附录 C 的 C.1。
- b) 220kV 系统的给定暂态系数不宜低于 2，参见 IEEE Std C37.110 等规定及附录 C 的 C.2。

6.2.2.4 110kV 及以下系统保护用电流互感器一般按稳态条件选择，选用 P 类互感器。

6.2.2.5 高压母线差动保护用电流互感器的选择，由于母线故障时短路电流很大，而且外部短路时流过各互感器的电流差别也可能很大。即使各侧选用特性相同的电流互感器，其暂态饱和程度也可能很不一致。为此，母线差动保护应具有抗互感器暂态饱和的能力。在工程应用中可按稳态短路电流或保护装置的要求选用适当的互感器，参见附录 C 的 C.3。

6.2.2.6 非直接接地系统的接地保护用互感器，可根据具体情况采用由三相电流互感器组成的零序滤过器、专用的电缆式或母线式零序电流互感器。

### 6.3 额定参数选择

保护用电流互感器的额定参数除按照第 4 章的一般规定进行选择外，还要考虑以下情况：

- a) 变压器差动回路电流互感器额定一次电流的选择，应尽量使两侧互感器的二次电流进入差动继电器时基本平衡。当采用微机保护时，可由保护装置实现两侧变比差和相角差的校正。在选择额定一次电流及二次绕组接线方式时，应注意使变压器两侧互感器的二次负荷尽量平衡，以减少可能出现的差电流。
- b) 自耦变压器公共绕组回路过负荷保护用的电流互感器，应按公共绕组的允许负荷电流选择。此电流通常发生在低压侧断开，而高一中压侧传输自耦变压器的额定容量的情况。此时，公共绕组上的电流为中压侧与高压侧额定电流之差。
- c) 大型发电机变压器组厂用分支的额定电流远小于主变压器额定电流，厂用分支的电流互感器一般可以厂用分支额定工作电流为基础进行选择，但应注意满足该回路的动稳定要求。例外的是厂用分支侧用于发一变组或主变压器差动保护的电流互感器，原则上应与主回路互感器变比一致，如因额定一次电流过大装有困难时，可根据具体情况采取适当措施，如由保护装置或增设辅助电流互感器以改变变比，或者采用二次额定电流为 1A 的互感器（当其他侧互感器额定二次电流为 5A 时），以便在保持变比一致条件下降低互感器额定一次电流等。
- d) 中性点有效接地系统或中阻抗接地系统变压器中性点接地回路的电流互感器、大型发电机零序电流型横差保护用电流互感器等，在正常情况下一次电流为零，应根据实际应用情况，不平衡电流的实测值或经验数据，并考虑接地保护灵敏系数和互感器的误差限值以及动、热稳定等因素，选用适当的额定一次电流。
- e) 对中性点非有效接地系统的电缆式或母线式零序电流互感器，因接地故障电流很小，需要按保证保护装置动作灵敏系数来选择变比及有关参数。

### 6.4 准确级及误差限值

#### 6.4.1 P 类及 PR 类电流互感器

- a) P 类及 PR 类电流互感器的准确级以在额定准确限值一次电流下的最大允许复合误差的百分数标称，标准准确级为：5P、10P、5PR 和 10PR。
- b) P 类及 PR 类电流互感器在额定频率及额定负荷下，电流误差、相位误差和复合误差应不超过表 8 所列限值。

表 8 P 类及 PR 类电流互感器误差限值

准确级	额定一次电流下的 电流误差 %	额定一次电流下的相位差		额定准确限值一次电流下的 复合误差 %
		± min	± crad	
5P,5PR 10P,10PR	±1 ±3	60 —	1.8 —	5 10

- c) PR 类电流互感器剩磁系数应小于 10%，有些情况下应规定  $T_r$  值以限制复合误差。
- d) 发电机和变压器主回路、220kV 及以上电压线路宜采用复合误差较小（波形畸变较小）的 5P 或 5PR 级电流互感器。其他回路可采用 10P 或 10PR 级电流互感器。
- e) P 类及 PR 类保护用电流互感器能满足复合误差要求的准确限值系数  $K_{alf}$  一般可取 5、10、15、20 和 30。必要时，可与制造部门协商，采用更大的  $K_{alf}$  值。

#### 6.4.2 PX 电流互感器的特性

PX 电流互感器的性能由以下参数确定：

- 额定一次电流 ( $I_{pn}$ )；
- 额定二次电流 ( $I_{cn}$ )；
- 额定匝数比，匝数比误差不应超过  $\pm 0.25\%$ ；
- 额定拐点电动势 ( $E_k$ )；
- 额定拐点电动势的最大励磁电流 ( $I_e$ )；
- 在温度为  $75^\circ\text{C}$  时二次绕组最大电阻 ( $R_{ct}$ )；
- 额定负荷电阻 ( $R_{bn}$ )；
- 计算系数 ( $K_x$ )。

#### 6.4.3 TP 类电流互感器的特性

TP 类电流互感器的准确级及误差限值详见 7.3。

#### 6.5 稳态性能验算

本节叙述 P 类、PR 类和 PX 类电流互感器的性能验算。对于 TP 类电流互感器的性能验算方法详见第 7 章。

##### 6.5.1 保护校验故障电流

为保证保护动作的可信赖性和安全性，电流互感器通过规定的保护校验故障电流  $I_{pcf}$  时，其误差应在规定范围内。 $I_{pcf}$  按下述原则确定：

- 按可信赖性要求校验保护动作性能时， $I_{pcf}$  应按区内最严重故障短路电流确定。对于过电流和距离等保护，应同时考虑下述两种情况：
  - 在保护区末端故障时， $I_{pcf}$  应为流过互感器最大短路电流  $I_{scmax}$ 。
  - 在保护安装点近处故障时，允许互感器误差超出规定值，但必须保证保护装置动作的可靠性和快速性。 $I_{pcf}$  应根据流过互感器最大短路电流  $I_{scmax}$  和保护装置的类型、性能及动作速度等因素确定。
- 按安全性要求校验保护动作性能时， $I_{pcf}$  应按区外最严重故障短路电流确定。如电流差动保护的  $I_{pcf}$  应为保护区外短路时流过互感器的最大短路电流  $I_{scmax}$ ；方向保护的  $I_{pcf}$  应为可能使方向元件误动的保护反方向故障流过互感器的最大短路电流  $I_{scmax}$ 。同时还需要注意防止逐级配合的过电流或阻抗等保护因相邻两处互感器饱和不同而失去选择性。
- 保护校验故障电流  $I_{pcf}$  宜按系统规划容量确定。

##### 6.5.2 P 类及 PR 类电流互感器性能验算

###### 6.5.2.1 一般选择验算。一般选择验算可按下列条件进行：

- 电流互感器的额定准确限值一次电流  $I_{pal}$  应大于保护校验故障电流  $I_{pcf}$ ，必要时，还应考虑互感

器暂态饱和影响。即准确限值系数  $K_{\text{alf}}$  应大于  $K K_{\text{pcf}}$ 。（ $K$  为用户规定的暂态系数， $K_{\text{pcf}}$  为故障校验系数）。

b) 电流互感器额定二次负荷  $R_{\text{bn}}$  应大于实际二次负荷  $R_{\text{b}}$ 。

按上述条件选择的电流互感器可能尚有潜力未得到合理利用。在系统容量很大，而额定二次电流选用 1A，以及采用电子式仪表和微机保护时，经常遇到  $K_{\text{alf}}$  不够但二次输出容量有裕度的情况。因此，必要时可进行较精确验算，如按额定二次极限电动势或实际准确限值系数曲线验算，以便更合理的选用电流互感器。

6.5.2.2 按额定二次极限电动势验算。对于低漏磁电流互感器可按额定二次极限电动势进行验算：

a) P 类电流互感器的额定二次极限电动势 ( $E_{\text{sl}}$ ) 为（二次负荷仅计及电阻）：

$$E_{\text{sl}} = K_{\text{alf}} I_{\text{sn}} (R_{\text{ct}} + R_{\text{bn}}) \quad (19)$$

式中：

$K_{\text{alf}}$ ——准确限值系数；

$I_{\text{sn}}$ ——额定二次电流；

$R_{\text{ct}}$ ——电流互感器二次绕组电阻；

$R_{\text{bn}}$ ——电流互感器额定负荷。

上述各参数制造部门应在产品说明书中标明。

b) 继电保护动作性能校验要求的二次感应电动势 ( $E_{\text{s}}$ ) 为：

$$E_{\text{s}} = K K_{\text{pcf}} I_{\text{sn}} (R_{\text{ct}} + R_{\text{b}}) \quad (20)$$

式中：

$K_{\text{pcf}}$ ——保护校验系数，与继电保护动作原理有关，参见 6.5.1；

$K$ ——给定暂态系数，参见第 6.2.2 节；

$R_{\text{b}}$ ——电流互感器实际二次负荷；

其他同式 (19)。

c) 电流互感器的额定二次极限电动势应大于保护校验要求的二次感应电动势，即：

$$E_{\text{sl}} \geq E_{\text{s}} \quad (21)$$

d) 或所选电流互感器的准确限值系数  $K_{\text{alf}}$  应符合下式要求：

$$K_{\text{alf}} \geq \frac{K K_{\text{pcf}} (R_{\text{ct}} + R_{\text{b}})}{(R_{\text{ct}} + R_{\text{bn}})} \quad (22)$$

为此，要求制造部门确认所提供电流互感器为低漏磁特性，提供的互感器技术规范中应包括二次绕组的电阻值。

6.5.2.3 按实际准确限值系数曲线验算。如果制造厂提供的电流互感器不满足低漏磁特性要求，当提高准确限值一次电流时，互感器可能出现局部饱和，不能采用上述额定二次极限电动势法进行验算。此时，如用户需要提高所选互感器的准确限值系数  $K_{\text{alf}}$ ，则应由制造厂提供由直接法试验求得的或经过误差修正后实际可用的准确限值系数  $K_{\text{alf}}'$  与  $R_{\text{b}}$  的关系曲线。根据实际的  $R_{\text{b}}$ ，从曲线上查出电流互感器的准确限值系数  $K_{\text{alf}}'$ ，参见图 3。要求  $K_{\text{alf}}' > K K_{\text{pcf}}$ 。其中  $K_{\text{pcf}}$  为保护校验系数， $K$  为给定暂态系数。

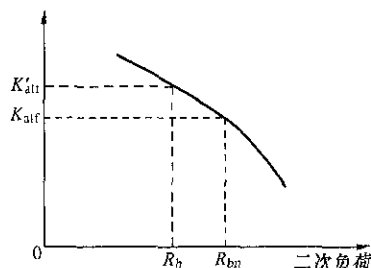


图 3 按符合实际的误差曲线选择电流互感器

### 6.5.3 PX 电流互感器的性能验算

PX 电流互感器为低漏磁电流互感器，其准确性能由其励磁特性确定，励磁特性的额定拐点电动势  $E_k$  可由下式计算：

$$E_k = K_x (R_{ct} + R_{bn}) I_{sn} \quad (23)$$

式中各量参见 6.4.2。

要求额定拐点电动势 ( $E_k$ ) 大于继电保护动作性能要求的电流互感器二次感应电动势 ( $E_s$ )，即  $E_k > E_s$ 。求  $E_s$  的方法参见式 (20)。

### 6.6 二次负荷计算

a) 保护用电流互感器二次负荷为：

$$Z_b = \sum K_{rc} Z_r + K_{lc} R_l + R_c \quad (24)$$

式中：

$Z_r$ ——继电器电流线圈阻抗，对于数字继电器可忽略电抗，仅计及电阻  $R_r$ ， $\Omega$ ；

$R_l$ ——连接导线电阻，参见式 (17)， $\Omega$ ；

$R_c$ ——接触电阻，一般为  $0.05\Omega \sim 0.1\Omega$ ， $\Omega$ ；

$K_{rc}$ ——继电器阻抗换算系数，参见表 9；

$K_{lc}$ ——连接导线阻抗换算系数，参见表 9。

b) 保护用电流互感器在各种接线方式时不同的短路类型下的阻抗换算系数见表 9。

表 9 继电器及连接导线阻抗换算系数表

电流互感器接线方式	阻抗换算系数								
	三相短路		两相短路		单相短路接地		经 Y,d 变压器 两相短路		
	$K_{lc}$	$K_{rc}$	$K_{lc}$	$K_{rc}$	$K_{lc}$	$K_{rc}$	$K_{lc}$	$K_{rc}$	
单相	2	1	2	1	2	1			
三相星形	1	1	1	1	2	1	1	1	
两要 星形	$Z_{r0}=Z_r$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	2	2	2	2	3	3
	$Z_{r0}=0$	$\sqrt{3}$	1	2	1	2	1	3	1
两相差接	$2\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	4	2					
三角形	3	3	3	3	2	2	3	3	

c) 保护和自动装置电流回路功耗应根据实际应用情况确定，其功耗值与装置实现原理和构成元件有关，差别很大。附录 B 的 B.2 及 B.3 列出一些典型情况的功耗供使用参考。

d) 工程应用中应尽量降低保护用电流互感器所接二次负荷，以减小二次感应电动势，避免互感器饱和。必要时，可选择额定负荷显著大于实际负荷的互感器，以提高互感器抗饱和能力。

## 7 TP 类保护用电流互感器

### 7.1 电流互感器暂态特性基本计算式

由于电流互感器的励磁特性为非线性的磁滞回线，在暂态过程中特性的解析计算是很复杂的。继电保护要求在其工作过程中电流互感器不饱和，在互感器未饱和时可假定其工作于励磁的线性部分，采用下述近似的基本理论公式进行计算（参见 GB16847）。

a) 具有对称分量的短路电流瞬时值的一般表达式为：

$$i(t) = \sqrt{2} I_{psc} \left[ e^{-t/T_p} \cos \theta - \cos(\omega t + \theta) \right] \quad (25)$$

电流为全偏移时， $\theta=0$ ，则：

$$i(t) = \sqrt{2}I_{\text{psc}} \left( e^{-t/T_p} - \cos \omega t \right) \quad (26)$$

b) 全偏移短路电流式 (26) 经  $t$  秒后的暂态系数为:

$$K_{\text{if}} = \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left( e^{-t/T_p} - e^{-t/T_s} \right) - \sin \omega t \quad (27)$$

c) 为确定互感器铁芯面积而计算暂态系数, 则式 (27) 以  $\sin \omega t = -1$  代入, 在  $t = t_{\text{max}}$  时具有最大值,  $t_{\text{max}}$  值为:

$$t_{\text{max}} = \frac{T_p T_s}{T_p - T_s} \ln \frac{T_p}{T_s} \quad (28)$$

相应的  $K_{\text{ifmax}}$  值为:

$$K_{\text{ifmax}} = \omega T_p \left( \frac{T_p}{T_s} \right)^{T_p/(T_s - T_p)} + 1 \quad (29)$$

d) 对于 C-t-O 工作循环, 所需暂态面积系数为:

$$K_{\text{id}} = \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left( e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_s}} \right) + 1 \quad (30)$$

对于 C-t'-O-t''-C-t''-O 工作循环, 所需暂态面积系数为:

$$K_{\text{id}} = \left[ \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left( e^{-\frac{t'}{T_p}} - e^{-\frac{t'}{T_s}} \right) - \sin \omega t' \right] \times e^{-\frac{t''+t'}{T_s}} + \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left( e^{-\frac{t'}{T_p}} - e^{-\frac{t'}{T_s}} \right) + 1 \quad (31)$$

电流互感器暂态特性计算公式的推导参见附录 A 的 A.1。

## 7.2 TP 类电流互感器参数

### 7.2.1 对称短路电流额定值

TP 类电流互感器的特性要考虑短路电流中具有非周期分量的暂态情况。一般将暂态短路电流分为对称电流分量 (周期分量) 和非对称电流分量 (非周期分量) 两部分, 对称短路电流有关标准值如下:

- 额定对称短路电流倍数 ( $K_{\text{ssc}}$ ) 一般选用: 10、15、20、25、30、40、50。
- 额定短时热电流 ( $I_{\text{th}}$ ) 以 kA 方均根值表示的标准值为: 6.3、8、10、12.5、16、20、25、31.5、40、50、63、80、100。
- 额定一次短路电流 ( $I_{\text{psc}}$ ) 由  $I_{\text{pn}}$  和  $K_{\text{ssc}}$  两者的乘积得出, 此乘积不必与  $I_{\text{th}}$  值完全相等。

### 7.2.2 一次时间常数 ( $T_p$ )

- 额定一次时间常数 ( $T_p$ ) 以 ms 表示的标准值为 40、60、80、100、120。
- 工程应用校验采用的一次时间常数应根据电力系统实际情况确定。一般可按母线三相对称短路, 由各分支的电感与电阻之比分别确定各分支的一次时间常数。如缺乏实际资料, 可采用以下参考数据:
  - 500kV 系统: 约 100ms;
  - 220kV 系统: 约 60ms;
  - 国产 300MW~600MW 发电机变压器组: 约 240ms~280ms;
  - 国产 100MW~210MW 发电机变压器组: 约 140ms~220ms。
- 当短路电流由几个不同一次时间常数的支路供给时, 计算方法参见 7.5.4.1。

### 7.2.3 二次回路时间常数 ( $T_s$ )

- 二次回路时间常数一般根据互感器特性要求由制造厂优化确定, 其值约在以下范围:
  - TPS 级及 TPX 级: 几秒到十余秒;



- 2) TPY 级: 数百毫秒至一两秒;  
 3) TPZ 级:  $60\text{ms} \pm 6\text{ms}$ 。  
 b) 二次回路时间常数 ( $T_s$ ) 与回路总电阻成反比, 当实际二次负荷 ( $R_b$ ) 不同于额定二次负荷 ( $R_{bn}$ ) 时, 实际的二次时间常数  $T_s$  应由额定二次时间常数 ( $T_{sn}$ ) 按式 (32) 求得。

$$T_s = \frac{R_{ct} + R_{bn}}{R_{ct} + R_b} \times T_{sn} \quad (32)$$

式中:

$R_{ct}$ ——电流互感器二次绕组的电阻。

### 7.3 TP 类电流互感器的误差限值和规范

#### 7.3.1 TP 类电流互感器的误差限值

##### 7.3.1.1 TPS 级电流互感器的误差限值

TPS 级电流互感器的匝数比应等于  $1/K_n$ , 匝数比误差应不超过  $\pm 0.25\%$ 。

准确限值条件由励磁特性确定, 且励磁二次极限电动势  $E_{al}$  不低于规定值, 此电动势应使其幅值增大 10% 时致使相应励磁电流增大不超过 100%。

当客户有规定时, 在励磁极限二次电动势下测得的励磁电流峰值应不超过规定值。如果未指定限值, 则励磁电流应不超过折算到二次侧的  $I_{th}$  的 10%, 参见表 10 中的 TPX 级电流互感器误差特性。

对于 TPS, 一般由用户规定额定等效二次极限电动势, 通常如下表示:

$$E_{al} \geq KK_{ssc} (R_{ct} + R_b) I_{sn} \quad (33)$$

其中  $K$  为用户给定的暂态系数, 电流互感器二次绕组电阻  $R_{ct}$  由制造厂的设计确定, 但在有些使用条件下, 为了与其他设备相配合, 可由用户提出其限值。

##### 7.3.1.2 TPX 级、TPY 级、TPZ 级电流互感器的误差限值

在二次回路电阻值为  $R_{sn} = R_{ct} + R_{bn}$  时, 误差应不超过表 10 所列值。

表 10 TP 类电流互感器误差限值

级别	在额定一次电流下			在准确限值条件下最大峰值瞬时误差 %
	比值差 %	相位差		
		min	crad	
TPX	$\pm 0.5$	$\pm 30$	$\pm 0.9$	$\epsilon = 10$
TPY	$\pm 1$	$\pm 60$	$\pm 1.8$	$\epsilon = 10$
TPZ	$\pm 1$	$180 \pm 18$	$5.3 \pm 0.6$	$\epsilon_{gc} = 10$

### 7.3.2 TP 类电流互感器的规范

各级电流互感器的规范内容如表 11 所示。

表 11 TP 类电流互感器规范内容

电流互感器的级别	TPS	TPX	TPY	TPZ	说明
额定一次电流 $I_{pn}$	×	×	×	×	由用户提出的规范
额定二次电流 $I_{sn}$	×	×	×	×	
额定频率 $f$	×	×	×	×	
设备最高电压和额定绝缘水平	×	×	×	×	
额定短时热电流 $I_{th}$	×	×	×	×	
额定动稳定电流 $I_{dyn}$	×	×	×	×	
规范采用的电流比 $K_n$	×	×	×	×	

表 11 (续)

电流互感器的级别	TPS	TPX	TPY	TPZ	说明
额定对称短路电流倍数 $K_{ssc}$	×	×	×	×	由用户提出的规范
规定的一次时间常数 $T_p$	—	×	×	×	
工作循环 单: C-t-O 双: C-t'-O-t''-C-t''-O	—	×	×	—	
额定二次负荷电阻 $R_{bn}$	×	×	×	×	
用户规定的暂态系数 $K$	×	—	—	—	由制造部门提供的补充规范
互感器二次绕组电阻 $R_{ct}$ (校正至...°C)	×	×	×	×	
额定暂态面积系数 $K_{td}$	—	×	×	×	
额定二次时间常数 $T_{sn}$	—	—	×	—	
注 1: ×适用; —不适用 注 2: 当客户希望获得新技术与现有设备兼容时, 在相配合的技术规范中可规定某些参数的限值, 例如 $T_s$ 或 $R_{ct}$ , 但必须承认不同设计之间可能有些差别。 注 3: 技术规范包括由制造部门提供的补充规范, 应标明在产品铭牌和产品型录上, 以使用户进行性能校验。					

#### 7.4 TP类电流互感器的应用

##### 7.4.1 TP类电流互感器的性能特点

###### 7.4.1.1 TPS级电流互感器

TPS级电流互感器是低漏磁互感器, 并要求严格控制匝数比。适用于根据简单环流原理和采用高阻抗继电器的差动保护。由于对剩磁无限制, 保护继电器对互感器的励磁使用极限, 通常由试验和现场经验得出的经验公式确定。若在电流互感器已严重饱和时切断一次电流, 将使得二次回路中的电流随同磁通由饱和状态快速降低到剩磁水平, 保护继电器的复归时间, 通常不明显受 TPS 电流互感器衰减特性的影响。适用于对复归时间要求严格的断路器失灵保护电流检测元件。

###### 7.4.1.2 TPX级电流互感器

TPX级电流互感器的基本特性一般与 TPS 级相似, 只是对误差限值的规定不同。

###### 7.4.1.3 TPY级电流互感器

TPY级电流互感器控制剩磁不大于饱和磁通的 10%。有利于 C-O-C-O 工作循环的准确限值, 适用于采用重合闸的线路保护。在从饱和到剩磁状态的转换期间, 与相同尺寸和相同二次外接负荷的 TPS 级或 TPX 级电流互感器相比, 由于磁阻、储能以及磁通变化量的不同, 二次回路的电流值较高且持续时间较长。故不宜用于断路器失灵保护。

由于铁芯带气隙, 励磁电感  $L$  相对较低, 即  $T_s$  相对较低, 要求在未达饱和状态时误差不应超过限值 (10%)。由式 (A.19), 暂态面积系数  $K_{td}$  与二次回路时间常数  $T_s$  有式 (34) 所示关系:

$$\hat{\epsilon} = \frac{K_{td}}{2\pi T_s} \cdot 100\% \leq 10\% \quad (34)$$

###### 7.4.1.4 TPZ级电流互感器

TPZ级电流互感器剩磁可忽略不计。严重饱和后衰减的二次电流在最初阶段 (继电器返回时) 比相应的 TPY 级保持更高数值。这类互感器适用于仅反应交流分量的保护。许多继电器采用输入电流/电压传感器转换被测量然后处理, 因此, 仅二次电流的交流分量有意义。由于不保证低频分量误差及励磁阻抗低, 一般不推荐该类互感器用于主设备保护和断路器失灵保护。

#### 7.4.2 TP类电流互感器的应用范围

7.4.2.1 330kV~500kV 线路保护宜选用 TPY 级电流互感器, 按考虑重合闸的两次工作循环进行暂态

特性验算。

7.4.2.2 高压侧为 330kV~500kV 的降压变压器的差动保护回路各侧均宜选用 TPY 级电流互感器。高、中压侧宜按外部线路故障 C-O-C-O 工作循环校验暂态特性。低压侧为三角接线时，可按外部三相短路 C-O 工作循环校验。

7.4.2.3 容量为 300MW 级及以上的发电机和发电机变压器组的差动保护回路，宜选用 TPY 级电流互感器。发电机电压侧互感器暂态性能可按外部三相短路 C-O 工作循环或外部线路单相接地 C-O-C-O 工作循环验算。单相接地重合闸时将承受两次故障电流，暂态面积系数  $K_{td}$  值较大。但在高压侧单相接地时，在 Y,d 接线变压器低压侧（三角接线）二相的故障电流仅为高压侧故障相电流的  $1/\sqrt{3}$ ，即相应的  $K_{ssc}$  值较低，其  $K_{td}K_{ssc}$  乘积值一般不超过三相短路 C-O 工作循环的相应值。电流互感器的二次时间常数  $T_s$  应保证在重合闸情况下暂态误差不超出允许值。

7.4.2.4 500kV 母线差动保护一般应由保护装置采取必要的减轻互感器暂态饱和影响的措施，参见 6.2.2.5。工程应用中可根据保护装置的特定要求采用适当的电流互感器。如高阻抗保护采用 TPS 级电流互感器。

## 7.5 TP 类电流互感器的性能计算

### 7.5.1 TP 类电流互感器暂态系数计算

7.5.1.1 对于 TPS 级和 TPX 级电流互感器，在  $t < t_{max}$  和  $T_p \ll T_s$  情况下的 C-t-O 工作循环中，暂态面积系数计算公式 (30) 可简化为：

$$K_{td} = 2\pi f T_p \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_s}} \right) + 1 \quad (35)$$

TPS 和 TPX 级电流互感器一般不用于 C-t'-O-t''-C-t''-O 工作循环。

7.5.1.2 对于 TPY 级电流互感器，额定暂态面积系数  $K_{td}$  可按式 (30) 或式 (31) 进行计算，工作循环有关参数可根据电力系统实际情况确定。但由式 (34) 确定的二次回路时间常数  $T_s$  变化范围较大，通常是由制造设计优化确定的。制造厂应按表 11 提供额定二次负荷下的  $T_s$  值。应用时可根据实际二次负荷进行修正。

7.5.1.3 对于 TPZ 级电流互感器，因  $K_r=0$ ，铁芯气隙较大，其导磁系数在规定工作循环中是恒定的。可以用解析式导出电流互感器的交流分量相位差为  $\delta=1/\omega T_s$ 。当 TPZ 的  $\delta$  规定范围为  $180\text{min} \pm 18\text{min}$  时，可求得  $T_s=60\text{ms} \pm 6\text{ms}$ 。参见附录 A 的 A.2。已知  $T_s$ ，可由式 (30) 或式 (31) 直接计算  $K_{td}$ 。

### 7.5.2 TP 类电流互感器的实际性能验算

#### 7.5.2.1 按系统要求确定互感器参数

工程订货由用户提出 TP 电流互感器有关规范，包括  $K_{ssc}$ 、 $T_p$ 、 $R_b$  及工作循环参数，由制造部门进行互感器设计并优化参数，提供能满足用户要求的互感器及有关参数，如  $K_{td}$ 、 $R_{ct}$ 、 $R_{bn}$  及  $T_s$  等。示例见 GB 16847—1997 的附录 D 的 D.4。本标准不再详述。

#### 7.5.2.2 校验互感器参数能否满足系统要求

已知电流互感器（包括定型产品）的有关参数，如  $T_p$ 、 $T_s$ 、 $K_{ssc}$ 、 $K_{td}$ 、 $R_{ct}$  和  $R_{bn}$  等，校验互感器性能是否满足实际对称短路电流倍数及规定工作循环的要求。电流互感器的额定等效二次极限电动势  $E_{al}$  应大于保护要求的等效二次感应电动势  $E_{al}'$ 。

a) 额定等效二次极限电动势  $E_{al}$  为：

$$E_{al} \approx K_{ssc} K_{td} (R_{ct} + R_{bn}) I_{sn} \approx K_{ssc} K_{td} (P_f + P_e) / I_{sn} \quad (36)$$

式中各参数，如  $K_{ssc}$ 、 $K_{td}$ 、 $R_{bn}$  及  $R_{ct}$  等可由制造部门提供的规范（或铭牌）中查出。上式中  $P_f$ 、 $P_e$  分别为二次绕组内部功率和外接负荷。

保护要求的等效二次感应电动势  $E_{al}'$  为：

$$E_{al}' = K_{td}' K_{pcf} (R_{ct} + R_b) I_{sn} \quad (37)$$

式中:

$K_{id}'$ ——实际要求互感器的暂态面积系数, 根据系统的实际参数  $T_p$ 、按实际负荷修正过的  $T_s$  及实际工作循环, 由式 (30)、式 (31) 或其简化公式计算:

$K_{pcf}$ ——保护校验系数, 参见 6.5.1;

$R_b$ ——互感器实际外接负荷。

如  $E_{a1} \geq E_{a1}'$  则电流互感器满足要求。

b) 对于 TPY 电流互感器应按式 (34) 校验在实际应用情况下的误差不超出 10%。

### 7.5.3 暂态饱和时间计算

已知电流互感器的额定暂态面积系数  $K_{id}$ 、二次时间常数  $T_s$  和系统一次时间常数  $T_p$ , 原则上可根据式 (30) 求解互感器达到饱和的时间。由于计算较复杂, 实用上可参见附录 A 的 A.3 的图中查出相应时间。对于闭合铁芯互感器, 因  $T_s$  值较大, 可由简化公式式 (35) 求得相应时间的计算式为:

$$t = -T_p \ln \left( 1 - \frac{K_{id} - 1}{2\pi f T_p} \right) \quad (38)$$

在  $K_{id}$  较小时, 例如 5 以下, 宜按较准确的计算式 (27) 进行计算, 即应准确计入交流励磁分量, 而以 -1 代替  $\sin \omega t$  可能导致较大误差。

### 7.5.4 其他暂态特性计算

#### 7.5.4.1 多个电源的一次时间常数 ( $T_p$ ) 计算

当电网母线具有多个不同时间常数  $T_p$  的电源时, 可假定各电源供给独立的、具有各自直流偏移量和衰减时间常数的短路电流。对规定的工作循环, 在电流互感器中, 由各单独电流产生的磁通可用其相应的感应电动势  $E_i$  值表示。这些值的总和代表对电流互感器总磁通的要求。为了简化, 假设各正弦电流相位相同。初步计算时, 也可将各支路的  $T_p$  值按各支路短路电流加权平均, 作为等效  $T_{p(eq)}$  用于计算。

#### 7.5.4.2 一次短路电流偏移程度的修正计算

式 (26) ~ 式 (38) 各式考虑的是短路初始角  $\theta=0$ 、 $\cos \theta=1$ 、短路电流全偏移的情况。实际故障中短路电流出现全偏移的概率是很低的, 因此, 计算结果偏于严重。实际运行经验表明, 短路故障容易发生在电压的峰值附近。根据大量的故障录波图统计, 有 95% 的短路故障是在电压峰值之前  $40^\circ$  之内发生, 而在 100kV 以上的电网中, 线路短路故障则都是发生在电压峰值之前  $40^\circ$  之内。因此, 一般情况下,  $\theta \geq (90^\circ - 40^\circ)$ ,  $\cos \theta \leq \cos (90^\circ - 40^\circ) = 0.64$ 。考虑偏移系数  $\cos \theta$  不等于 1 时的暂态系数计算式如下 [参见附录 A 的式 (A.12)]:

$$K_{st} = \frac{\omega T_p T_s}{(T_p - T_s)} \left( e^{-t/T_p} - e^{-t/T_s} \right) \cos \theta + \sin \theta e^{-\frac{t}{T_s}} - \sin(\omega t + \theta) \quad (39)$$

为确定电流互感器暂态面积系数, 以  $\sin \theta e^{-\frac{t}{T_s}} - \sin(\omega t + \theta) = 1$  代入上式, 可得:

$$K_{id} = \frac{\omega T_p T_s}{(T_p - T_s)} \left( e^{-t/T_p} - e^{-t/T_s} \right) \cos \theta + 1 \quad (40)$$

#### 7.5.4.3 剩磁影响的计算

电流互感器在严重饱和后可能有相当大的剩磁, 剩磁在正常运行时不容易消除, 除非采取专门的消磁措施。剩磁将严重影响下次短路时互感器的暂态特性。参见附录 A 的 A.4。剩磁系数  $K_r = \psi_r / \psi_s$ , 其中  $\psi_r$  为剩磁通,  $\psi_s$  为饱和磁通。考虑剩磁时电流互感器暂态面积系数为:

$$K'_{td} = K_{td} / (1 - K_t) \quad (41)$$

式中：

$K_{td}$ ——不考虑剩磁时的暂态面积系数。

## 8 电压互感器

### 8.1 分类及应用

#### 8.1.1 电压互感器分类

电压互感器按构成原理可分为电磁式和电容式两类。

电磁式电压互感器的原理与一般变压器类似，参数折算到二次侧，其等值电路见图 4。

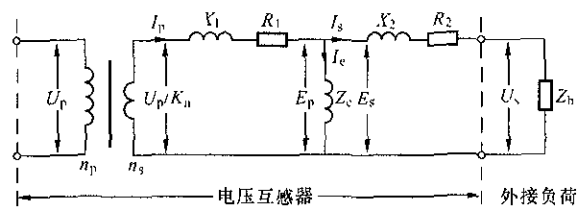


图 4 电磁式电压互感器等值电路图

电容式电压互感器由  $C_1$  和  $C_2$  构成的电容分压器及电磁单元组成。电磁单元由中压变压器和电抗器组成。其接地回路通常还接有电力线载波耦合装置，对于工频电流，载波耦合装置阻抗很小，但对于载波电流则呈现较高的阻抗。电容式电压互感器接线图见图 5。

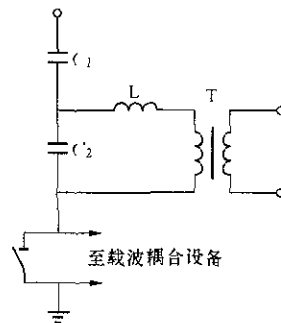
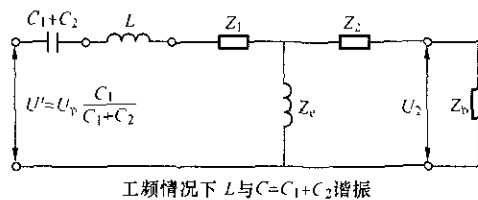


图 5 电容式电压互感器接线图

电容式电压互感器的等值电路见图 6。



工频情况下  $L$  与  $C=C_1+C_2$  谐振

图 6 电容式电压互感器的等值电路图

#### 8.1.2 电压互感器相量图

电压互感器的相量图见图 7。

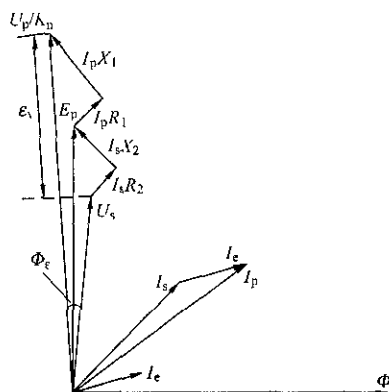


图7 电压互感器相量图

### 8.1.3 电压互感器的应用

选用电压互感器时应根据测量仪表和继电保护的要求，按照 GB 1207 和 GB 4703 的有关内容，结合工程的实际情况，提出订货技术规范，包括使用环境条件、额定参数、技术性能、绝缘要求及一般结构要求等。电容式电压互感器订货技术规范见 DL/T 726。某些特殊性能要求可由订货方和供货方协商确定。

## 8.2 配置和接线

### 8.2.1 电压互感器的配置

电压互感器的配置与系统电压等级、主接线方式及所实现的功能有关。

- 电压互感器及其二次绕组数量、准确等级等应满足测量、保护、同步和自动装置的要求。电压互感器的配置应能保证在运行方式改变时，保护装置不得失去电压，同步点的两侧都能提取到电压。
- 对 220kV 及以下电压的双母线接线，宜在主母线三相上装设电压互感器。旁路母线是否装设电压互感器应视具体情况和需要确定。当需要监视和检测线路侧有无电压时，可在出线侧的一相上装设电压互感器。对于 220kV 大型发变电工程的双母线，通过技术经济比较，也可按线路或变压器单元配置三相电压互感器。
- 对 500kV 电压的双母线接线，宜在每回出线和每组母线的三相上装设电压互感器。对一个半断路器接线，应在每回出线（包括主变压器进线回路）的三相上装设电压互感器；对母线可根据母线保护和测量装置的要求在一相或三相上装设电压互感器。
- 发电机出口可装设两组或三组电压互感器，供测量、保护和自动电压调整装置使用。

### 8.2.2 电压互感器的接线

电压互感器的接线及接地方式与电力系统的电压等级和接地方式有关。

- 35kV 及以上系统一般采用单相式电压互感器。20kV 及以下系统可采用单相式或三相式（三柱或五柱）电压互感器。
- 对于系统高压侧为非有效接地系统，可用单相互感器接于相间电压或 V-V 接线，供电给接于相间电压的仪表和继电器。
- 三个单相互感器接成一星型。当互感器一次侧中性点不接地时，可用于供电给接于相间电压和相电压的仪表及继电器，但不能供电给绝缘检查电压表。当互感器一次侧中性点接地时，可用于供电给接于相间电压的仪表和继电器以及绝缘检查电压表。如系统高压侧为中性点有效接地系统，则可用于测量相电压的仪表；如系统高压侧为非有效接地系统，则不允许接入测量相电压的仪表。
- 三相式互感器有三柱式或五柱式两种，采用星型接线。三柱式互感器一次侧中性点不能接地，五柱式互感器一次侧中性点可以接地。接地或不接地时的适用范围同上。

### 8.3 一次电压选择

#### 8.3.1 额定一次电压 ( $U_{pn}$ )

电压互感器的额定一次电压应根据所接系统的标称电压确定。

#### 8.3.2 额定电压因数 ( $K_u$ )

电压互感器的额定电压因数  $K_u$  应根据系统最高运行电压决定，而后者又与系统及电压互感器一次绕组的接地条件有关。表 12 列出与各种接地条件相对应的额定电压标准值及在最高运行电压下的允许持续时间（即额定时间）。

表 12 额定电压因数标准值

额定电压因数	额定时间	一次绕组连接方式和系统接地方式
1.2	连续	任一电网的相间 任一电网中的变压器中性点与地之间
1.2	连续	中性点有效接地系统中的相与地之间
1.5	30s	
1.2	连续	带有自动切除对地故障装置的中性点非有效接地系统中的相与地之间
1.9	30s	
1.2	连续	无自动切除对地故障装置的中性点绝缘系统或无自动切除对地故障装置的共振接地系统中的相与地之间
1.9	8h	

注：按制造厂与用户协议、表中所列的额定时间允许缩短。

### 8.4 二次绕组和电压选择

#### 8.4.1 二次绕组选择

电压互感器二次绕组数量按所供给仪表和继电器的要求确定。

- 对于超高压输电线路和大型主设备，要求装设两套独立的主保护或保护按双重化配置，因而可能要求电压互感器具有两个独立二次绕组分别对两套保护供电。此外，对某些计费用计量仪表，为提高可靠性和精确度，必要时可从二次绕组单独引出二次电缆回路供电或采用具有两个独立二次绕组分别为测量和保护供电的电压互感器。
- 保护用电压互感器一般设有剩余电压绕组，供接地故障产生剩余电压用。对于微机保护，推荐由保护装置内三相电压自动形成剩余（零序）电压，此时可不设剩余电压绕组。

#### 8.4.2 额定二次电压 ( $U_{sn}$ )

额定二次电压按互感器使用场合选定。

- 接于三相系统线间的单相互感器，其额定二次电压为 100V。
- 接于三相系统相与地之间的单相互感器，当其额定一次电压为所接系统的相电压时，额定二次电压应为  $100/\sqrt{3}$ 。
- 电压互感器剩余电压绕组的额定二次电压：当系统中性点有效接地时应为 100V；当系统中性点为非有效接地时应为  $100\sqrt{3}$  V。

### 8.5 准确等级和误差限值

#### 8.5.1 电压互感器的准确级

电压互感器除剩余电压绕组外，应给出相应的测量准确级和保护准确级。

- 测量用电压互感器的准确级，以该准确级规定的电压和负荷范围内的最大允许电压误差百分数来标称。标准准确级为 0.1、0.2、0.5、1.0、3.0。
- 保护用电压互感器的准确级，是以该准确级在 5% 额定电压到额定电压因数（参见 8.3.2）相对应的电压范围内最大允许电压误差的百分数标称，其后标以字母“P”。标准准确级为 3P 和 6P。

c) 保护用电压互感器剩余电压绕组的准确级为 6P。

### 8.5.2 电压误差和相位差的限值

各种准确等级的测量用电压互感器和保护用电压互感器，其电压误差和相位差不应超过表 13 所列限值。

表 13 电压误差和相位差限值

用途	准确级	误差限值			适用运行条件			
		电压误差 ±%	相位差		电压 %	频率范围 %	负荷 %	负荷功率 因数
			±min	±crad				
测量	0.1	0.1	5	0.15	80~120	99~101	25~100	0.8 (滞后)
	0.2	0.2	10	0.3				
	0.5	0.5	20	0.6				
	1.0	1.0	40	1.2				
	3.0	3.0	未规定	未规定				
保护	3P	3.0	120	3.5	5~150 或 (5~190)	96~102		
	6P	6.0	240	7.0				
剩余绕组	6P	6.0	240	7.0				

注 1: 括号内数值适用于中性点非有效接地系统用电压互感器。  
注 2: 当二次绕组同时用于测量和保护时, 应对该绕组标出其测量和保护等级及额定输出。

### 8.5.3 测量用互感器准确等级选择

测量用电压互感器的准确等级应与测量仪表的准确等级相适应, 参见表 14。

表 14 仪表与配套的电压互感器准确等级

指示仪表		计量仪表		
仪表准确级	互感器准确级	仪表准确级		互感器准确级
		有功电能表	无功电能表 <sup>a</sup>	
0.5	0.5	0.5	2.0	0.2
1.0	0.5	1.0	2.0	0.5
1.5	1.0	2.0	3.0	0.5
2.5	1.0			

a 无功电能表一般与同回路有功电能表共用同一等级的互感器

## 8.6 二次绕组容量选择及计算

### 8.6.1 二次绕组额定输出

选择二次绕组额定输出时, 应保证二次实接负荷在额定输出的 25%~100% 范围内, 以保证互感器的准确度。

在功率因数为 0.8 (滞后) 时, 额定输出标准值为 10、15、25、30、50、75、100、150、200、250、300、400、500VA。对三相互感器而言, 其额定输出值是指每相的额定输出。



## 8.6.2 热极限输出

在电压互感器可能作为电源使用时，可规定其额定热极限输出。在这种情况下，误差限值可能超过，但温升不能超过规定限值。对于多个二次绕组的互感器，应分别规定各二次绕组的热极限输出，但使用时，只能有一个达到极限值。

剩余绕组接成开口三角，仅在故障情况下承受负荷。额定热极限输出以持续时间 8h 为基准。

额定热极限输出以 VA 表示，在额定二次电压及功率因数为 1.0 时，数值应为 15、25、50、75、100VA 及其十进位倍数。

## 8.6.3 二次负荷计算

电压互感器的二次负荷不应超过其准确级所允许的负荷范围，一般按负荷最重的一相进行验算。必要时可按表 15 和表 16 列出的接线方式和计算公式进行每相负荷的计算。

表 15 电压互感器接成星形时每相负荷的计算公式

负荷接线方式及相量图		电压互感器	负荷	电压互感器	负荷	电压互感器	负荷
电压互感器每相的负荷	A	有功	$P_U = W_U \cos \varphi$	$P_U = \frac{1}{\sqrt{3}} (W_{UV} \cos(\varphi_{UV} - 30^\circ) + W_{WU} \cos(\varphi_{WU} + 30^\circ))$	$P_U = \frac{1}{\sqrt{3}} W_{UV} \cos(\varphi_{UV} - 30^\circ)$		
		无功	$Q_U = W_U \sin \varphi$	$Q_U = \frac{1}{\sqrt{3}} (W_{UV} \sin(\varphi_{UV} - 30^\circ) + W_{WU} \sin(\varphi_{WU} + 30^\circ))$	$Q_U = \frac{1}{\sqrt{3}} W_{UV} \sin(\varphi_{UV} - 30^\circ)$		
	B	有功	$P_V = W_V \cos \varphi$	$P_V = \frac{1}{\sqrt{3}} (W_{UV} \cos(\varphi_{UV} + 30^\circ) + W_{VW} \cos(\varphi_{VW} - 30^\circ))$	$P_V = \frac{1}{\sqrt{3}} (W_{UV} \cos(\varphi_{UV} + 30^\circ) + W_{VW} \cos(\varphi_{VW} - 30^\circ))$		
		无功	$Q_V = W_V \sin \varphi$	$Q_V = \frac{1}{\sqrt{3}} (W_{UV} \sin(\varphi_{UV} + 30^\circ) + W_{VW} \sin(\varphi_{VW} - 30^\circ))$	$Q_V = \frac{1}{\sqrt{3}} (W_{UV} \sin(\varphi_{UV} + 30^\circ) + W_{VW} \sin(\varphi_{VW} - 30^\circ))$		
	C	有功	$P_W = W_W \cos \varphi$	$P_W = \frac{1}{\sqrt{3}} (W_{VW} \cos(\varphi_{VW} + 30^\circ) + W_{WU} \cos(\varphi_{WU} - 30^\circ))$	$P_W = \frac{1}{\sqrt{3}} W_{VW} \cos(\varphi_{VW} + 30^\circ)$		
		无功	$Q_W = W_W \sin \varphi$	$Q_W = \frac{1}{\sqrt{3}} (W_{VW} \sin(\varphi_{VW} + 30^\circ) + W_{WU} \sin(\varphi_{WU} - 30^\circ))$	$Q_W = \frac{1}{\sqrt{3}} W_{VW} \sin(\varphi_{VW} + 30^\circ)$		
注：W——表计的负荷（VA）； $\varphi$ ——相角差； $P_U$ 、 $P_V$ 、 $P_W$ ——电压互感器每相的有功负荷（W）； $Q_U$ 、 $Q_V$ 、 $Q_W$ ——电压互感器每相的无功负荷（var）； 电压互感器的全负荷（VA）： $W_U = \sqrt{P_U^2 + Q_U^2}$ 。							

表 16 电压互感器接成不完全星形时每相负荷的计算公式

电压互感器每相的负荷		负荷接线方式及相量图		电压互感器	负荷	电压互感器	负荷	电压互感器	负荷	
		有功	无功	U	V	W	U	V	W	U
AB	有功	$P_{UV} = W_{uv} \cos \varphi_{uv}$	$Q_{UV} = W_{uv} \sin \varphi_{uv}$	$P_{UV} = \sqrt{3} W \cos(\varphi + 30^\circ)$	$Q_{UV} = \sqrt{3} W \sin(\varphi + 30^\circ)$	$P_{UV} = W_{uv} \cos \varphi_{uv} + W_{wu} \cos(\varphi_{wu} + 60^\circ)$	$Q_{UV} = W_{uv} \sin \varphi_{uv} + W_{wu} \sin(\varphi_{wu} + 60^\circ)$			
	无功									
BC	有功	$P_{VW} = W_{vw} \cos \varphi_{vw}$	$Q_{VW} = W_{vw} \sin \varphi_{vw}$	$P_{VW} = \sqrt{3} W \cos(\varphi - 30^\circ)$	$Q_{VW} = \sqrt{3} W \sin(\varphi - 30^\circ)$	$P_{VW} = W_{vw} \cos \varphi_{vw} + W_{wu} \cos(\varphi_{wu} - 60^\circ)$	$Q_{VW} = W_{vw} \sin \varphi_{vw} + W_{wu} \sin(\varphi_{wu} - 60^\circ)$			
	无功									

注： $W$ ——表计的负荷（VA）； $\varphi$ ——相角差；  
 $P_{UV}$ 、 $P_{VW}$ ——电压互感器每相的有功负荷（W）；  
 $Q_{UV}$ 、 $Q_{VW}$ ——电压互感器每相的无功负荷（var）；  
 电压互感器的全负荷（VA）： $W_{UV} = \sqrt{P_{UV}^2 + Q_{UV}^2}$ ； $W_{VW} = \sqrt{P_{VW}^2 + Q_{VW}^2}$ 。

8.6.4 二次回路电压降

8.6.4.1 测量用电压互感器二次回路允许电压降不应超过以下值：

- a) 指示仪表：不大于额定电压的 1~3%。
- b) 用户计费用 0.5 级电能表：不大于额定电压的 0.25%。
- c) 电力系统内部的 0.5 级电能表：不大于额定电压的 0.5%。

8.6.4.2 保护用电压互感器二次回路允许压降应在互感器负荷最大时不大于额定电压的 3%。

8.7 电压互感器的特殊问题

8.7.1 电容式电压互感器的暂态响应

在额定电压下电容式电压互感器的高压端子对接地端子短路后，二次输出电压应在额定频率的一个周期之内降低到短路前电压峰值的 10% 以下。

注：电容式电压互感器的暂态响应对电网保护的影响是一个很复杂的问题。并且也不可能给出对每一种情况都有效的数值。暂态响应对于继电保护的影响不仅和暂态过程的幅值有关，而且和其频率有关。上述给定值可以使普通的机电型继电器在一般的线路长度和短路电流情况下得以准确动作。对于快速继电器（例如静态继电器）或非常短线路，或短路电流很小情况，暂态响应应由用户、保护继电器和互感器的制造厂协商，可以提出更严格要求（例如 5% 以下）。

8.7.2 电容式电压互感器的铁磁谐振

电容式电压互感器包括电容分压器和电磁单元。电磁单元中的电抗线圈在额定频率下的电抗值约等于分压器两个电容并联的电容值。在电磁单元二次短路又突然清除时，一次侧电压突然变化的暂态过程可能使铁芯饱和，与并联的两部分分压电容发生铁磁谐振。制造部门应保证电容式电压互感器的

性能满足以下要求：

- a) 在电压为  $0.8U_{pn}$ 、 $1.0U_{pn}$ 、 $1.2U_{pn}$  而负荷实际为零的情况下，互感器二次端子短路后又突然消除短路，其二次电压峰值应在  $0.5s$  之内恢复到与短路前正常值相差不大于  $10\%$ 。
- b) 在电压为  $1.5U_{pn}$ （用于中性点有效接地系统）或  $1.9U_{pn}$ （用于中性点非有效接地系统）且负荷实际为零的情况下，互感器二次端子短路后又突然消除短路，其铁磁谐振持续的时间不应超过  $2s$ 。

### 8.7.3 电磁式电压互感器的铁磁谐振及防谐措施

电磁式电压互感器的励磁特性为非线性特性，与电力网中的分布电容或杂散电容在一定条件下可能形成铁磁谐振。通常是电压互感器的感性电抗大于电容的容性电抗，当电力系统操作或其他暂态过程引起互感器暂态饱和而感抗降低就可能出现铁磁谐振。这种谐振可能发生于不接地系统，也可能发生于直接接地系统。随着电容值的不同，谐振频率可以是工频和较高或较低的谐波。铁磁谐振产生的过电流和/或高电压可能造成互感器损坏，特别是低频谐振时，互感器相应的励磁阻抗大为降低而导致铁芯深度饱和，励磁电流急剧增大，高达额定值的数十倍至百倍以上，从而严重损坏互感器。

在中性点不接地系统中，电磁式电压互感器与母线或线路对地电容形成的回路，在一定激发条件下可能发生铁磁谐振而产生过电压及过电流，使电压互感器损坏，因此应采取消谐措施。这些措施有：在电压互感器开口三角或互感器中性点与地之间接专用的消谐器，选用三相防谐振电压互感器，增加对地电容破坏谐振条件等。

在中性点直接接地系统中，电磁式电压互感器在断路器分闸或隔离开关合闸时可能与断路器并联均压电容或杂散电容形成铁磁谐振。由于电源系统和互感器中性点均接地，各相的谐振回路基本上是独立的，谐振可能在一相发生，也可能在两相或三相内同时发生。抑制这种谐振的方法不宜在零序回路（包括开口三角形回路）采取措施。可采用人为破坏谐振条件的措施。

附录 A  
(资料性附录)  
TP 类电流互感器的暂态特性

### A.1 电流互感器暂态特性计算公式

电流互感器的暂态特性不仅与饱和程度有关,而且取决于铁芯的磁滞回线特性。因此,解析计算是很复杂的。在实用上,为了简化,通常是假定互感器工作于励磁特性的线性部分,求取电流互感器在不同时刻的工作特性。这种特性在互感器铁芯未饱和前是近似可用的。

以下求上述假定下的电流互感器暂态特性,并分析各种因素的影响。短路一次电流瞬时值可用下式表示:

$$\begin{aligned} i_p(t) &= \sqrt{2}I_{psc} \left[ e^{-t/T_p} \cos\theta - \cos(\omega t + \theta) \right] \\ &= \sqrt{2}I_{psc} \left[ e^{-t/T_p} \cos\theta - \cos\omega t \cos\theta + \sin\omega t \sin\theta \right] \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

式中:

$\theta$ ——短路初始时电流与电压的夹角;

$\cos\theta$ ——短路电流的偏移度。

设励磁阻抗为纯电感  $L_e$ , 电流互感器的基本关系式为:

$$\frac{i_p}{K_n} = i_c + i_s \quad (\text{A.2})$$

$$L_e \frac{di_c}{dt} = L_2 \frac{di_s}{dt} + R_s i_s \quad (\text{A.3})$$

$$R_s = R_{ct} + R_b$$

式中:

$i_c$ ——励磁电流;

$i_s$ ——二次电流;

$L_2$ ——其值为  $L_{ct}$ 、 $L_b$  之和,对低漏磁电流互感器,漏电感  $L_{ct}$  可忽略。

设  $L_s = L_c + L_2$ ,  $L_s/R_s = T_s$ ,  $L_2/R_s = L_b/R_s = T_b$ , 由式 (A.2) 及式 (A.3) 消去  $i_s$ , 可得:

$$T_s \frac{di_c}{dt} + i_c = T_b \frac{d}{dt} \frac{i_p}{K_n} + \frac{i_p}{K_n} \quad (\text{A.4})$$

在铁芯未饱和前,有关参数为常数,故可用拉式变换将式 (A.4) 变为:

$$I_c(s) = \frac{1}{K_n} \times \frac{sT_b + 1}{sT_s + 1} I_p(s) \quad (\text{A.5})$$

将式 (A.1) 变为象函数代入式 (A.5), 得:

$$I_c(s) = \frac{\sqrt{2}I_{psc}}{K_n} \times \frac{sT_b + 1}{sT_s + 1} \left( \frac{T_p \cos\theta}{sT_p + 1} - \frac{s \cos\theta}{s^2 + \omega^2} + \frac{\omega \sin\theta}{s^2 + \omega^2} \right) \quad (\text{A.6})$$

将式 (A.6) 展开,按拉式反变换运算求解,可求出结果为:

$$i_e = \frac{\sqrt{2}I_{psc}}{K_n} \left[ \frac{T_p - T_b}{T_p - T_s} \left( e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_s}} \right) \cos\theta + \frac{\sqrt{1 + \omega^2 T_b^2}}{\sqrt{1 + \omega^2 T_s^2}} \cos(\theta + \varphi - \delta) e^{-\frac{t}{T_s}} - \frac{\sqrt{1 + \omega^2 T_b^2}}{\sqrt{1 + \omega^2 T_s^2}} \cos(\omega t + \theta + \varphi - \delta) \right] \quad (\text{A.7})$$

式中:

$$\delta = \tan^{-1} \omega T_s, \quad \varphi = \tan^{-1} \omega T_b.$$

考虑到  $\omega^2 T_s^2 \gg 1$ ,  $\sqrt{1 + \omega^2 T_s^2} \approx \omega T_s$ ,  $\delta \approx \pi/2$ 。设二次负荷为纯电阻负荷并忽略电流互感器二次绕组漏抗, 则  $T_b \approx 0$ ,  $\varphi \approx 0$ ,  $\cos\varphi \approx 1$ , 式 (A.7) 可近似为:

$$i_e = \frac{\sqrt{2}I_{psc}}{K_n} \left[ \frac{T_p}{T_p - T_s} \left( e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_s}} \right) \cos\theta + \frac{\sin\theta e^{-\frac{t}{T_s}}}{\omega T_s} - \frac{\sin(\omega t + \theta)}{\omega T_s} \right] \quad (\text{A.8})$$

由式 (A.2) 求得二次电流为:

$$i_s = \frac{i_p}{K_n} - i_e = \frac{\sqrt{2}I_{psc}}{K_n} \left[ \frac{1}{T_p - T_s} \left( T_p e^{-\frac{t}{T_s}} - T_s e^{-\frac{t}{T_p}} \right) \cos\theta - \frac{\sin\theta e^{-\frac{t}{T_s}}}{\omega T_s} - \cos(\omega t + \theta) + \frac{\sin(\omega t + \theta)}{\omega T_s} \right] \quad (\text{A.9})$$

如短路电流无偏移, 即  $\theta = 90^\circ$ ,  $\cos\theta = 0$ , 则相应的励磁电流和二次电流分别为:

$$i_e = \frac{\sqrt{2}I_{psc}}{\omega T_s K_n} \left( e^{-\frac{t}{T_s}} - \cos\omega t \right) \quad (\text{A.10})$$

$$i_s = \frac{\sqrt{2}I_{psc}}{K_n} \left( -\frac{e^{-\frac{t}{T_s}}}{\omega T_s} + \sin\omega t + \frac{\cos\omega t}{\omega T_s} \right) \quad (\text{A.11})$$

励磁电流最大值约为交流分量励磁电流的 2 倍。

如考虑短路电流全偏移, 即  $\theta = 0$ ,  $\sin\theta = 0$ , 则相应的励磁电流和二次电流分别为:

$$i_e = \frac{\sqrt{2}I_{psc}}{\omega T_s K_n} \left[ \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left( e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_s}} \right) - \sin\omega t \right] \quad (\text{A.12})$$

$$i_s = \frac{\sqrt{2}I_{psc}}{\omega T_s K_n} \left[ \frac{\omega T_s}{T_p - T_s} \left( T_p e^{-\frac{t}{T_s}} - T_s e^{-\frac{t}{T_p}} \right) - \omega T_s \cos\omega t + \sin\omega t \right] \quad (\text{A.13})$$

由励磁电流  $i_e$  可求出磁通  $\Phi$ , 其公式为:

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{L_c i_e}{N_s} \\ &= \frac{\sqrt{2}I_{psc} R_b}{\omega K_n N_s} \left[ \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left( e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_s}} \right) - \sin\omega t \right] \end{aligned}$$

$$= \Phi_m \left[ \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left( e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_s}} \right) - \sin \omega t \right] \quad (\text{A.14})$$

其中  $\Phi_m$  为交流磁通幅值，交流磁通  $\Phi_{ac}$  和直流磁通  $\Phi_{dc}$  分别为：

$$\Phi_{ac} = -\Phi_m \sin \omega t$$

$$\Phi_{dc} = \Phi_m \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left( e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_s}} \right)$$

由式 (A.12) 可得全偏移短路电流经  $t$  秒后铁芯中的磁通  $\Phi$  与交流磁通幅值  $\Phi_m$  之比，即暂态系数为：

$$K_{if} = \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left( e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_s}} \right) - \sin \omega t \quad (\text{A.15})$$

为确定互感器尺寸，设  $\sin \omega t = -1$  代入式 (A.12)，求得互感器在 C-t-O 循环的额定暂态面积系数为：

$$K_{id} = \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left( e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_s}} \right) + 1 \quad (\text{A.16})$$

铁芯中磁通密度随时间变化曲线参见图 A.1。

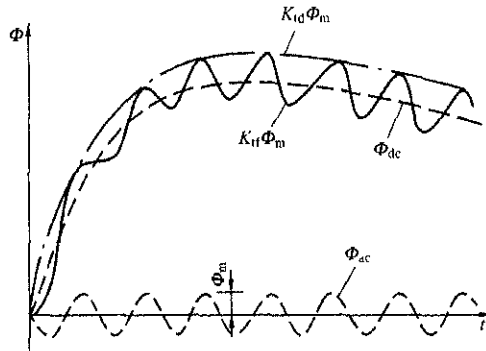


图 A.1 磁通密度随时间变化曲线

对于 C-t'-O-t''-C-t''-O 工作循环，第一个 C-O 循环的暂态系数  $K_{if}'$  可参照式 (A.15)，随后该系数  $K_{if}'$  按指数衰减（时间常数为  $T_s$ ），第二个 C-O 循环中， $K_{if}'$  继续衰减，重合于故障线路产生的暂态面积系数  $K_{id}''$  可由式 (A.16) 求得，所需的总暂态面积系数  $K_{id}$  为：

$$K_{id} = K_{if}' e^{-\frac{t_h + t'}{T_s}} + K_{id}'' \quad (\text{A.17})$$

以分别求出的  $K_{if}'$  和  $K_{id}''$  代入式 (A.17)，求出总暂态面积系数为：

$$K_{id} = \left[ \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left( e^{-\frac{t'}{T_p}} - e^{-\frac{t'}{T_s}} \right) - \sin \omega t' \right] \times e^{-\frac{t_h + t'}{T_s}} + \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left( e^{-\frac{t'}{T_p}} - e^{-\frac{t'}{T_s}} \right) + 1 \quad (\text{A.18})$$

C-O-C-O 工作循环的磁通变化如图 A.2 所示。

由式 (A.12) 及式 (A.16)、式 (A.18)，在工作循环中由励磁电流  $i_c$  引起的峰值误差为：

$$\hat{\varepsilon} = \frac{\hat{i}_c K_p}{\sqrt{2} I_{psc}} = \frac{100 K_{td}}{\omega T_s} \% \quad (\text{A.19})$$

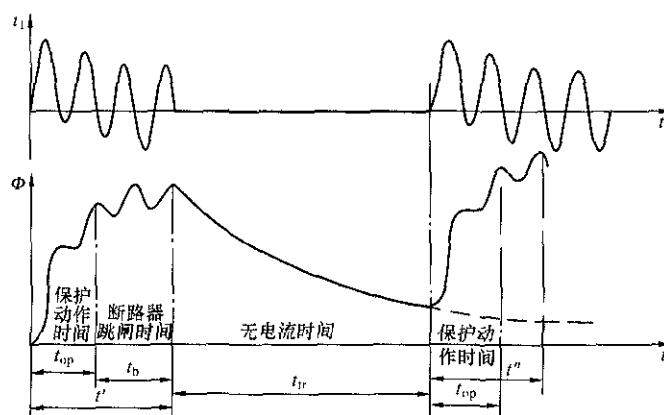


图 A.2 C-O-C-O 工作循环磁通变化图

## A.2 TPZ 电流互感器的交流分量误差计算

TPZ 电流互感器仅保证交流分量的误差，不保证非周期分量的误差。由于其铁芯有较大气隙，铁芯的导磁率基本是恒定的，可称之为线性互感器。TPZ 电流互感器的交流分量误差计算式可直接推导如下：

由图 1 电流互感器的等值电路，设忽略励磁电阻，励磁电抗为  $j\omega L_c$ 。由：

$$I_c = (I_p - I_s)$$

$$I_c \times j\omega L_c = I_s [R_{ct} + R_b + j\omega(L_{ct} + L_b)] = I_s (R_s + j\omega L_2)$$

可得：

$$\begin{aligned} \dot{I}_s &= \dot{I}_p \frac{j\omega L_c}{j\omega L_c + R_s + j\omega L_2} = \dot{I}_p \frac{j\omega L_c}{R_s + j\omega(L_c + L_2)} \\ &= \dot{I}_p \frac{\omega L_c e^{j\frac{\pi}{2}}}{\sqrt{R_s^2 + (\omega L_c)^2} e^{j\alpha}} = \dot{I}_p \frac{\omega L_c}{R_s \sqrt{1 + \left(\frac{\omega L_c}{R_s}\right)^2}} e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)} \\ &= \dot{I}_p \frac{\omega T_c}{\sqrt{1 + (\omega T_s)^2}} e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)} \end{aligned} \quad (\text{A.20})$$

式中：

$$\alpha = \text{tg}^{-1} \omega T_s$$

$$T_s = \frac{L_s}{R_s} = \frac{L_c + L_2}{R_s}$$

$$T_c = \frac{L_c}{R_s}$$

按误差定义：

$$\varepsilon_1 = \frac{I_s - I_p}{I_p} \times 100\% = \left[ \frac{\omega T_e}{\sqrt{1 + (\omega T_s)^2}} - 1 \right] \times 100\% \quad (\text{A.21})$$

相位误差即  $I_s$  与  $I_p$  的相位差  $\delta = (\pi/2) - \alpha$ ，即：

$$\delta \approx \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = \cos \alpha = \frac{R_s}{\sqrt{R_s^2 + (\omega L_s)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega T_s)^2}} \quad (\text{A.22})$$

当  $\omega T_s \gg 1$ ，则：

$$\delta = 1/(\omega T_s) \quad (\text{A.23})$$

按表 10，在额定一次电流下的角误差为  $180\text{min} \pm 18\text{min}$  或  $5.3\text{crad} \pm 0.6\text{crad}$ ，可由：

$$T_s = \frac{1}{\omega \delta} = \frac{1}{314 \times 0.053} = 0.06\text{s}$$

算出相应的二次时间常数  $T_s$  为  $60\text{ms} \pm 6\text{ms}$ 。

### A.3 暂态面积系数与电流时间常数的关系

电流互感器暂态面积系数  $K_{td}$  与一次时间常数  $T_p$  有密切关系，超高压系统和发电厂内  $T_p$  较大，因而也较大。 $K_{td}$  与二次时间常数也有关系。图 A.3 为具有不同  $T_p$  和  $T_s$  的电流互感器，在短路电流为全偏移情况下，短路后不同时刻  $t$  时的  $K_{td}$  值示例。需要指出，在  $K_{td}$  达到最大值  $K_{td \max}$  后，将随时间增大而降低。故虚线部分是该  $T_p$  和  $T_s$  情况下可能达到的最大值。图 A.3a) 中  $T_s=1\text{s}$ ，接近带气隙的电流互感器特性，图 A.3b) 中  $T_s=10\text{s}$ ，接近无气隙的电流互感器特性。

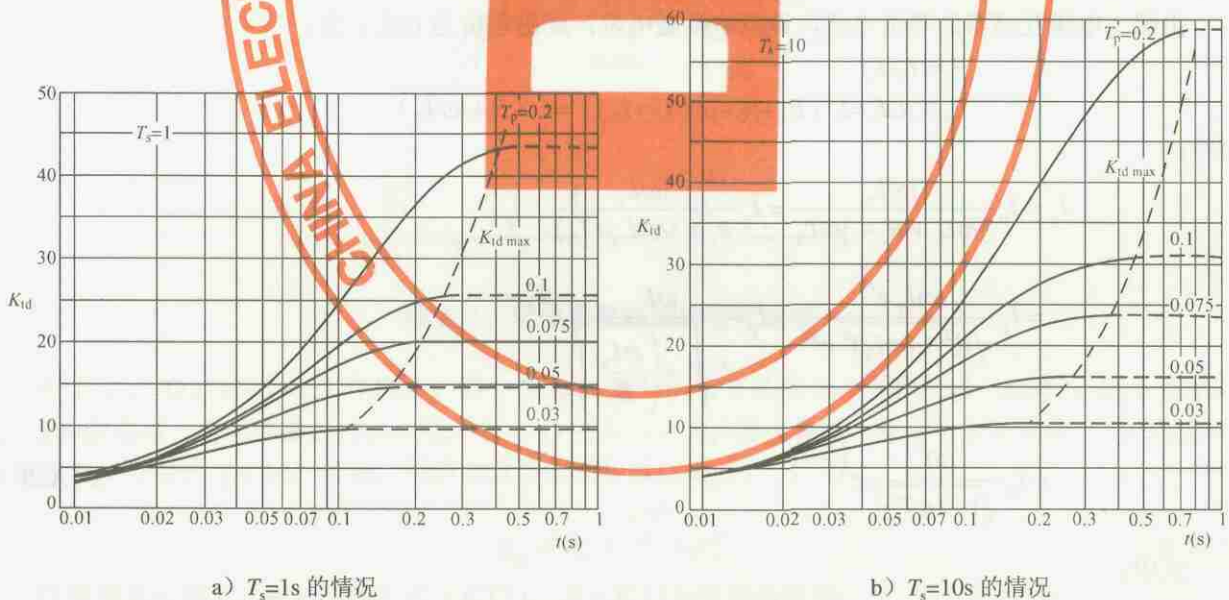


图 A.3 暂态面积系数  $K_{td}$  与一次时间常数  $T_p$  的关系

### A.4 电流互感器剩磁系数的影响

电流互感器在严重饱和后可能有相当大的剩磁，剩磁在正常运行时不容易消除，在再次短路时，将严重影响互感器的暂态特性。根据 IEEE Std C37.110 导则列举 230kV 系统 141 组电流互感器的调查



结果如表 A.1 所示，一般可取剩磁系数为 50%~70%。

表 A.1 调查结果

剩磁占饱和磁通的比例 %	互感器百分数 %
0~20	39
21~40	18
41~60	16
61~80	27

剩磁对电流互感器传变性能的影响示例见图 A.4。

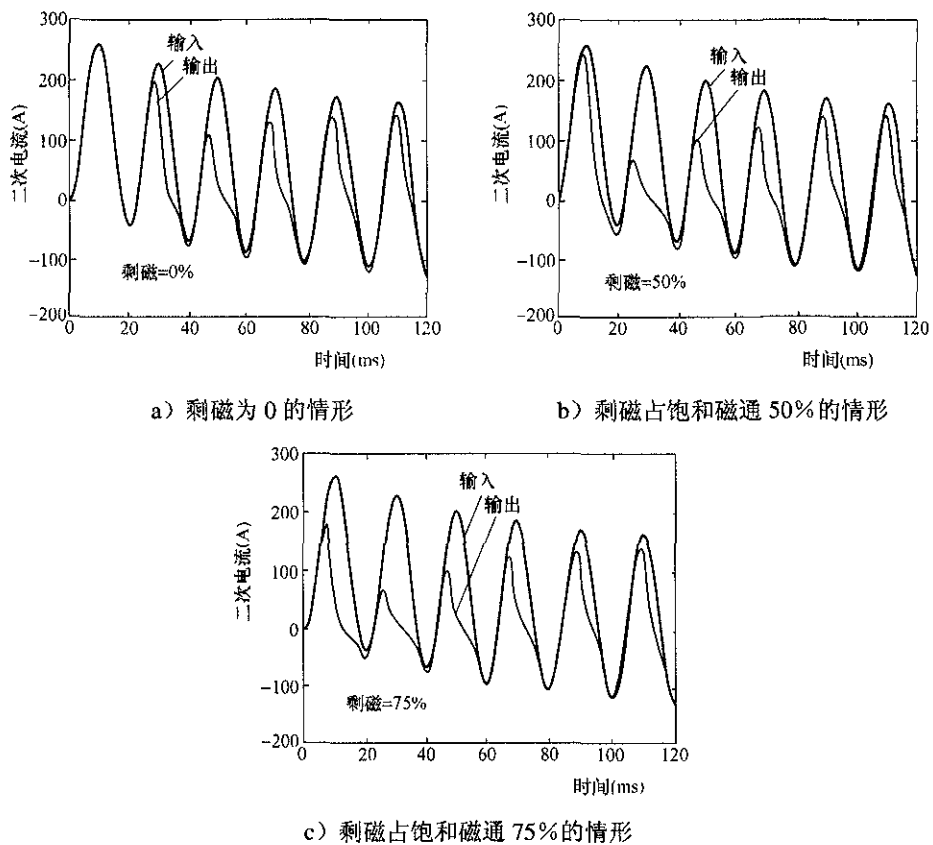


图 A.4 剩磁对电流互感器传变性能的影响示例

## 附录 B

(资料性附录)

## 测量仪表和保护装置电流回路功耗

B.1 常用测量仪表电流回路功耗参考值见表 B.1。

表 B.1 常用测量仪表电流回路功耗参考值

仪表类型			负荷值 VA	
机电式仪表	电 流 表		~0.7	
	功率表	有功功率表	0.5~1	
		无功功率表	0.5~1	
	电能表	有功电能表	0.5 级	6
			1.0 级	4
			2.0 级	2.5
无功电能表		直通式	5	
	经互感器接通式	2.5		
电 子 式 仪 表			0.2~1	

B.2 保护和自动装置电流回路功耗参考值见表 B.2。

表 B.2 保护和自动装置电流回路功耗参考值

保护或自动装置类型		电流回路功耗 VA
电磁型 (EM)	电流元件	1~15
	功率元件	6~10/相
	阻抗元件	4~10/相
	负序电流元件	15
整流型 (RT)	电流元件	~1
	功率元件	2/相
	阻抗元件	5/相
	负序电流元件	2~5
集成电路型 (IC)	全套	≤1.0/相
微机型 (DP)	全套	≤1.0/相

B.3 各类设备的保护和自动装置电流回路最大功耗参考值。

表 B.3 各类设备的保护和自动装置电流回路最大功耗参考值

设备及其保护和自动装置类型		回路最大功耗 VA
500kV 线路	主保护	10 (RT), 1 (IC), 1 (DP)
	后备保护	20 (RT), 2 (IC), 2 (DP)
220kV 线路	主保护	10 (EM), 5 (RT), 1 (IC), 1 (DP)
	后备保护	30 (EM), 15 (RT), 2 (IC), 2 (DP)

表 B.3 (续)

设备及其保护和自动装置类型		回路最大功耗 VA
(60~110) kV 线路	主保护	10 (EM), 5 (RT), 1 (IC), 1 (DP)
	后备保护	20 (EM), 10 (RT), 2 (IC), 2 (DP)
(10~35) kV 线路	主保护	10 (EM), 5 (RT), 0.5 (IC), 0.5 (DP)
	后备保护	20 (EM), 10 (RT), 1 (IC), 1 (DP)
(300~600) MW 发电机	主保护	5 (RT), 1 (IC), 1 (DP)
	后备保护	60 (RT), 2 (IC), 3 (DP)
(100~200) MW 发电机	主保护	20 (EM), 5 (RT), 1 (IC), 1 (DP)
	后备保护	30 (EM), 50 (RT), 3 (IC), 3 (DP)
50MW 及以下发电机	主保护	10 (EM), 5 (RT), 1 (IC), 1 (DP)
	后备保护	15 (EM), 10 (RT), 2 (IC), 2 (DP)
注: EM—电磁型保护, RT—整流型保护, IC—集成电路型保护, DP—微机型保护。		

## 附录 C

(资料性附录)

## P 类或 PR 类电流互感器应用示例

## C.1 发电机差动保护用电流互感器选择

发电机回路一次时间常数很大, 电流互感器暂态饱和可能较严重。但除了容量为 300MW 及以上的发电机和发电机变压器组的电流互感器规定应完全满足暂态特性要求外, 其他容量发电机通常可采用 P 类或 PR 类电流互感器。为了减轻暂态饱和影响, 100MW~200MW 发电机变压器组宜考虑裕度系数  $K=10$ 。PR 类电流互感器可以减小剩磁的影响。在发电机出线侧和中性点侧应选用励磁特性(包括饱和部分)相同的电流互感器, 并尽量使两侧负荷相等, 以最大限度减小差动回路暂态误差电流。现举例如下。

设发电机为 100MW,  $\cos\varphi=0.85$ ,  $S=100/0.85=117.65\text{MVA}$ , 额定电压为 10.5kV,  $X_d''=15\%$ , 定子电阻  $R_{st}=3.0\times 10^{-3}\Omega$  (75°C)。发电机额定电流为:

$$I_{gn} = \frac{117.65\text{MVA}}{\sqrt{3}\times 10.5\text{kV}} = 6475\text{A}$$

电流互感器一次电流可选择为连续负荷电流的 120% 至 150% 之间, 选定变比为 8000/5。

发电机出口无断路器时, 发电机及发电机变压器组的差动保护用互感器可按外部高压侧短路进行校验。设配套的升压变压器为 120MVA,  $X_t=14\%$ , 负载损耗 376kW。则发电机变压器组总电抗和总电阻(以发电机阻抗为基准的标么值)分别为:

$$X = X_d'' + X_t = 0.15 + 0.14 \times 117.65/120 = 0.287$$

$$R = R_{st} + R_t = 0.003 \times 10.5^2 / 117.65 + (376/120000) \times 117.65/120 = 0.00588$$

高压侧短路, 流过发电机的短路电流为  $I_{sc}=I_{gn}/X=6475/0.287=22560$  (A)

短路电流是电流互感器一次电流的  $22560/8000=2.82$  倍。

如考虑暂态, 机组时间常数  $T_p=X/(2\pi fR)=0.287/(314\times 0.00588)=0.155\text{s}$ , 按 C-100ms-O 循环, 则电流互感器的暂态面积系数按简化公式(35)计算为:

$$K_{td} \approx 2\pi f T_p \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_p}} \right) + 1 = 314 \times 0.155 \left( 1 - e^{-\frac{0.1}{0.155}} \right) + 1 = 24.1$$

要求所选电流互感器的准确限值系数  $K_{alf} > K_{td} K_{ssc} = 24.1 \times 2.82 = 68$ 。互感器体积和质量较大。

如按给定暂态系数  $K=10$  考虑, 则要求准确限值系数  $K_{alf} > K K_{ssc} = 10 \times 2.82 = 28.2$ 。选用 5P30 或 5PR30, 取互感器二次额定负荷大于实际二次负荷, 即可符合要求。但由式(38)或图 A.3 可求出在  $K=10$  时电流互感器约 30ms~40ms 即开始饱和。

$$t = -T_p \ln \left( 1 - \frac{K-1}{2\pi f T_p} \right) \quad (\text{C.1})$$

为保证在外部故障清除前, 不致因电流互感器饱和引起的差流导致差动保护误动, 要求两侧互感器的饱和特性和两侧的二次负荷应尽量匹配以减少差流, 保护装置应具有必要的制动特性。

图 C.1 是一个发电机差动保护回路不平衡电流的例子。外部故障短路电流全偏移, 当两侧电流互感器特性和负荷不完全匹配时, 差动回路在 30ms 左右出现差流, 见图 C.1 a)。经过精细的负荷补偿后, 可将差流消除, 见图 C.1 b)。

以上分析是在两侧互感器都没有剩磁的情况进行的，实际上由于电流互感器剩磁正常运行不易消除，两侧互感器剩磁可能不一致而造成严重不平衡电流。所以，发电机差动保护回路的互感器宜选用有剩磁限值的 PR 型电流互感器。

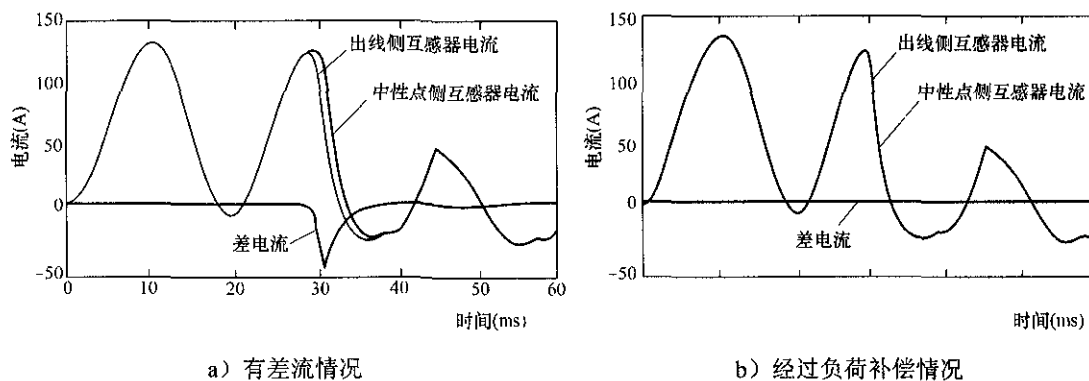


图 C.1 差动回路的电流情况

## C.2 220kV 线路保护用电流互感器的选择

220kV 线路一般可采用 5P 或 5PR 级电流互感器，但考虑到其一次时间常数较大，暂态饱和和影响较大，选择电流互感器时宜给定适当的暂态系数，设  $K=2$ 。为降低剩磁影响，宜选用 PR 类电流互感器。

设线路使用距离保护，需要分别按保护出口短路和第一段末端短路校验电流互感器的性能。在第一段末端短路时互感器应保证误差小于规定值。在保护出口短路时，应保证保护可靠动作。

a) 按距离保护第一段末端短路校验：

设距离保护第一段末端短路电流为 35kA，保护校验系数  $K_{pcf}=35/1.25=28$ 。设所选互感器参数为：变比 1250/1， $K_{alf}=30$ ， $R_{bn}=20\Omega$ ， $R_{ct}=6\Omega$ 。额定二次极限电动势为：

$$E_{s1}=K_{alf}(R_{ct}+R_{bn})\times 1=30\times(6+20)\times 1=780\text{V}$$

设互感器二次实际二次负荷  $R_s=10\Omega$ ，再考虑裕度系数  $K=2$ 。要求的二次感应电动势为：

$$E_s=KK_{pcf}(R_{ct}+R_{bn})\times 1=2\times 28(6+10)\times 1=896\text{V}$$

由  $E_{s1}<E_s$ ，所选电流互感器不满足要求。需要加大  $K_{alf}$  或 VA 值，或降低实际二次负荷。

如果电流互感器的  $K_{alf}$  改选用 40（其他参数同前）， $E_{s1}$  增大为 1040V，则互感器可满足要求。

如果采用降低二次实际负荷的办法，负荷由  $10\Omega$  降低为  $8\Omega$ ， $E_s$  降低为  $2\times 28\times(6+8)=784\text{V}$ 。采用 5P30、20VA 的互感器即勉强满足要求。

如果增大电流互感器额定二次负荷，选用 5P30、30VA 互感器， $R_{ct}=9\Omega$ 。则  $E_{s1}=30\times(9+30)=1170\text{V}$ ， $E_s=2\times 28\times(9+10)=1064\text{V}$ 。互感器亦可满足要求。

b) 按保护出口短路校验：

保护出口短路时，如果电流互感器误差较大，即二次电流减小，距离保护测量的故障点将比实际故障点远，但只要测量值仍在第一段范围内，保护即可正确动作。

设本距离保护按出口短路选择电流互感器可保证保护可靠动作。保护出口短路为 50kA，保护校验系数  $K_{pcf}=50/1.25=40$ 。要求的二次感应电动势为：

$$E_s=K_{pcf}(R_{ct}+R_{bn})\times 1=40(6+10)\times 1=640\text{V}$$

按 b) 条件要求的  $E_s$  小于按 a) 条件选择的  $E_s$ ，故按 a) 选择的电流互感器可以满足 b) 的要求。

## C.3 母线差动保护用电流互感器选择

母线差动保护由于外部故障时各支路流过的电流不等，饱和程度也可能不同，容易形成差电流而

导致保护误动。这种情况很难靠改善电流互感器特性来消除。一般是由保护装置采取专门措施来解决。

### C.3.1 高阻抗母线保护

克服电流互感器饱和对母线保护影响的方法之一是采用高阻抗差动继电器。此时应采用励磁阻抗较高的低漏磁电流互感器，各支路电流互感器的变比和励磁特性应相同。

保护的等值电路和动作原理见图 C.2。当内部故障和外部故障时，施加于母线差动继电器上的电压是不同的。

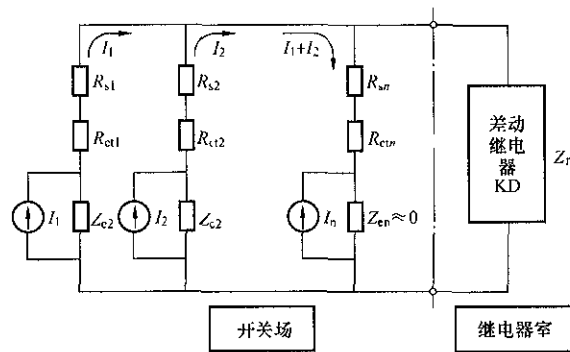


图 C.2 高阻抗母线差动保护外部故障电流分布图

对于外部故障，假设故障支路 N 的电流互感器完全饱和 ( $Z_{en} \approx 0$ ，最不利情况)，继电器感受电压等于外部故障二次电流  $I_f$  (即  $I_n$ ) 乘以引接线电阻  $R_{sn}$  和饱和互感器二次绕组电阻  $R_{ctn}$  之和。如果该电压小于继电器 KD 的电压整定值，则继电器不动作。

继电器应保证最严重外部故障时不动作，整定值由式 (C.2) 确定：

$$U_{set} > I_{Umax} (R_{ct} + K_{cr} R_s) \quad (C.2)$$

式中：

$U_{set}$ ——继电器电压整定值；

$I_{Umax}$ ——最大外部故障电流；

$R_{ct}$ ——电流互感器二次绕组电阻；

$K_{cr}$ ——接线系数，三相短路为 1，相对地短路为 2；

$R_s$ ——从电流互感器端子至二次电流汇总端子箱的最大距离电缆电阻。

对于内部故障，各支路 (包括支路 N) 电流互感器的二次电流方向相同，迫使其通过高阻抗差动继电器 KD，因而形成较高电压使其动作。为保证最小故障电流时保护动作的灵敏度，继电器整定电压应小于继电器端子可能出现的最低电压。由于励磁阻抗  $Z_e$  和继电器阻抗  $Z_r$  较大，互感器绕组电阻  $R_{ct}$  和二次回路电阻  $R_s$  可以忽略。继电器整定值由式 (C.3) 确定：

$$U_{set} < I_{Umin} \frac{Z_r \cdot Z_e / n}{Z_r + Z_e / n} = I_{Umin} \frac{Z_r Z_e}{n Z_r + Z_e} \quad (C.3)$$

式中：

$I_{Umin}$ ——最小内部故障电流；

$n$ ——引出线数目。

继电器整定值由上述两式确定。电流互感器引接线汇总点宜位于开关场，以减小外部故障及互感器饱和时加于继电器的电压。

### C.3.2 中阻抗母线保护

中阻抗母线保护是一种利用提高差动回路电阻克服电流互感器饱和影响的比例差动保护 (带制动特性的差动保护)。一般环流法带制动差动保护，在故障回路互感器饱和情况下，可能失去最大的一支制动电流，如提高差动回路电阻，将迫使其他回路二次电流流经饱和互感器回路，则不致失去制动。

由于保护带有制动特性，故差动回路电阻不需要很高，一般称为中阻抗保护。

图 C.3 示出保护的原理图。图中每个支路的二次电流  $I_2$  通过中间电流互感器 TA 变换为  $I_3$ ，设其中  $x$  支路为故障回路。每个支路电流都引向两个二极管，这些二极管按多相全波整流桥接线。整流桥输出端 PM 之间接有制动电阻  $R_r$ 。  $R_r$  上的压降形成制动电压  $U_r$ 。差动回路是由  $R_r$  的中点引出，经  $R_{d3}$  和差动电流互感器 TD 的一次绕组回到中间电流互感器的公共点 N。差动电流互感器二次电流  $I_{d2}$  经全波整流后在  $R_{op}$  上形成动作电压  $U_{op}$ 。由于 V1 和 V2 的作用，干簧继电器 KR 在  $U_{op} > U_r$  时动作，在  $U_{op} < U_r$  时不动作。即保护具有制动特性。

外部故障时，除故障支路电流  $I_{x1}$  流出母线外，其他电流  $I_{A1}$ 、 $I_{B1}$  等均流入母线，设在半周内电流方向如图所示， $I_{A1}$ 、 $I_{B1}$  等由整流桥的 P 点流出，经半个制动电阻  $R_r/2$ ，然后分两路，一路电流为  $I_{d1}$  经差动回路、公共点 N 流回；另一路电流为  $I_{x3}$ ，经另外半个  $R_r/2$ 、整流桥 M 点和  $TA_x$  的二次绕组流回。增大  $R_r$  就可减少  $I_{d1}$  和增加  $I_{x3}$ ，从而使  $|U_{op}| < |U_r|$ ，继电器不动作。

内部短路时，所有出线电流均流入母线，所有中间电流互感器的二次电流方向相同。每半个周期内所有这些电流都是流经半个制动电阻  $R_r/2$ 、 $R_{d3}$  和 TD 的一次绕组形成回路，此时只有  $R_r/2$  上有电流流过，故  $|U_{op}| > |U_r|$ ，继电器动作。由于内部故障时各电流互感器都是电流源， $R_{d3}$  之值稍大一些，继电器灵敏度不受影响。且干簧继电器动作速度快，动作时间仅 (1ms~3ms)，可以在电流互感器饱和前动作。

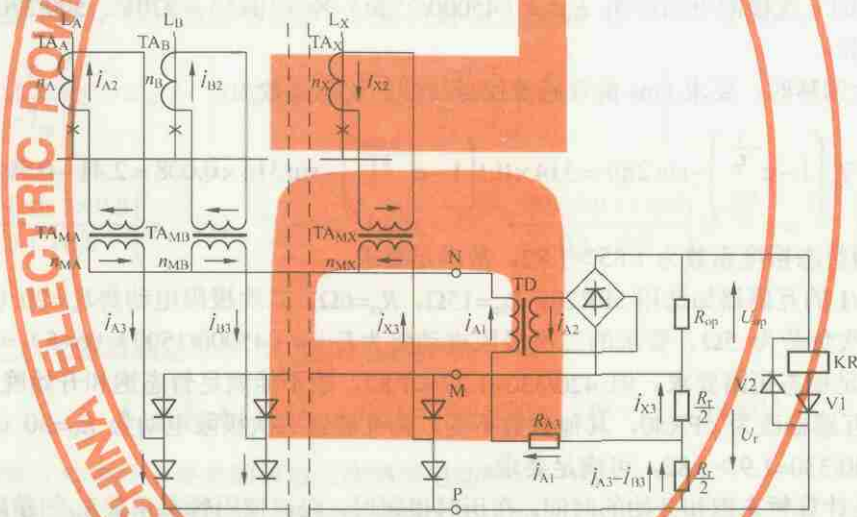


图 C.3 中阻抗有制动特性母线差动保护原理图

### C.3.3 数字式（微机）母线保护

以微机为基础的数字式母线保护一般是采用比例制动差动保护（电流差动或工频变化量差动）。保护区外故障由于个别电流互感器饱和，可能在差动保护中出现较大差流而导致误动。我国的微机母线保护规范要求保护装置能克服电流互感器暂态饱和和影响，通常是利用软件实现。实现的原理一般是利用电流互感器饱和时电流的特征来判别是保护区内故障还是区外故障互感器饱和。电流互感器饱和的电流输出有以下特点：

- 电流互感器进入饱和有一定延时，在短路发生的开始阶段，电流互感器可以正确传变一次电流，保护装置可正确判别故障情况。
- 当铁芯开始饱和后，互感器二次电流的波形即出现缺损现象而影响保护动作性能。
- 当一次电流的瞬时值由正半波趋向负半波时，即一次电流过零点后，电流互感器一般有一个可正确传变电流的线性区。
- 互感器饱和后的二次电流将出现某些特定的谐波。

母线保护可利用上述特点实现减缓互感器饱和的影响。例如：对于母线区内故障，在电流互感器未饱和前，保护的故障启动元件和差动元件将同时动作。如果是外部故障电流互感器饱和，故障启动元件可在故障开始时动作，但差动电流仅在互感器饱和后才能出现，这需要经一定延时。由差动元件与启动元件动作时间不同来识别电流互感器饱和。

我国生产的微机母线差动保护普遍使用了上述各种原理克服电流互感器饱和对保护的影响，因而对电流互感器的暂态饱和特性可降低要求。当然，以上所述只是解决互感器饱和影响的基本原理，实际上各制造厂生产的保护装置采取的具体措施是不同的，因而效果也有差别。故母线差动保护制造厂应给出选择电流互感器的具体要求和计算方法，以使用户或成套承包商应用。

现举一例说明母线保护电流互感器的选择计算方法。设 500kV 母线各支路出口故障通过该支路断路器和互感器的短路电流最大值为 45kA。所选母线保护允许各支路电流互感器变比不同，要求互感器在稳态短路条件下不饱和，对暂态饱和采取了防止外部故障误动的措施，但要求暂态饱和出现的时间晚于故障 8ms。

考虑到电流互感器的剩磁对其饱和特性影响严重，剩磁系数最大可达 80%。为减少剩磁影响，现选用 5PR 互感器，按支路的负荷电流选用 2500/1 和 1500/1 两种变比的互感器。

- a) 变比 2500/1 的互感器为 5PR20，额定二次负荷  $R_{bn}=15\Omega$ ，互感器二次绕组电阻  $R_{ct}=10\Omega$ 。互感器二次极限电动势  $E_{s1}=20 \times (10+15)=500V$ 。实际的二次负荷（包括保护装置和连接导线）为  $5\Omega$ 。要求的二次极限电动势为  $E_{s1}' = (45000/2500) \times (10+5) = 270V$ 。  $500/270=1.85$ 。满足稳态饱和要求。

在短路电流全偏移时，要求 8ms 前互感器保持线性的暂态系数为：

$$K_{tr} = 2\pi f T_p \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_p}} \right) - \sin 2\pi f t = 314 \times 0.1 \left( 1 - e^{-\frac{0.008}{0.1}} \right) - \sin 314 \times 0.008 = 2.41 - 0.59 = 1.82$$

电流互感器具有的暂态裕度系数为  $1.85 > 1.82$ ，故满足要求。

- b) 变比 1500/1 的互感器如选用 5PR20， $R_{bn}=15\Omega$ ， $R_{ct}=6\Omega$ 。二次极限电动势  $E_{s1}=20(6+15)=420V$ 。实际的二次负荷为  $5\Omega$ 。要求的二次极限电动势为  $E_{s1}' = (45000/1500)(6+5) = 330V$ 。  $420V > 330V$ ，满足稳态短路要求。但  $420/330=1.27 < 1.82$ ，故不能满足暂态饱和开始晚于故障 8ms 的要求。如互感器改为 5PR30，其他参数不变。则互感器二次极限电动势  $E_{s1}=30(6+15)=630V$ 。  $E_{s1}/E_{s1}' = 630/330 = 1.9 > 1.82$ ，可满足要求。

需要指出的是计算暂态饱和开始的时间，在历时很短时，应该使用暂态系数  $K_{tr}$  的精确计算式 (27)，而不应使用  $\sin \alpha x = -1$  的近似计算式 (30)。因为在短路初始的 10ms 内，传变交流分量的磁通  $\Phi_{ac}$  与传变非周期分量的磁通  $\Phi_{dc}$  方向相反，可以部分抵消。如按式 (30) 计算，则需要  $K_{td} > 3.41$ ，才能使饱和开始时间晚于故障 8ms。



**附录 D**  
(资料性附录)  
**TP 类电流互感器应用示例**

**D.1 超高压输电线路保护用电流互感器选择**

设 500kV 输电网有关数据如后。断路器额定值：50Hz，额定电流 2500A，额定短路开断电流 50kA。线路距离保护校验电流：当地发电厂输入  $I_{p1}=10\text{kA}$ ， $T_p'=240\text{ms}$ ；电网输入  $I_{p2}=35\text{kA}$ ， $T_p''=100\text{ms}$ 。

电流互感器的电流比为 2500/1；外接负荷为  $R_b=7\Omega$ 。保护校验系数  $K_{\text{pcf}}=(10+35)/2.5=18$ 。

工作循环时间的选取：C-O， $t$  取 100ms（一般保护故障切除时间）或 250ms（断路器失灵保护切除故障时间）；C-O-C-O， $t'=100\text{ms}$ ， $t_{\text{fr}}=800\text{ms}$ ， $t''$  取 40ms（保护动作时间）或 100ms（包括断路器动作的故障切除时间）。

a) 现选用如下规范的 TPY 电流互感器，验算其是否满足系统要求。

2500/1A； $K_{\text{ssc}}=20$ ； $T_p=100\text{ms}$ ； $R_{\text{ct}}=9\Omega$ ； $R_{\text{bn}}=15\Omega$ ； $T_{\text{sn}}=0.8\text{s}$ ；互感器额定工作循环为 C-100ms-O-500ms-C-40ms-O。

$K_{\text{id}}$  可根据式 (31)，按电流互感器给定的两次通电工作循环代入有关参数求得：

$$K_{\text{id}} = \left[ \frac{\omega T_p T_{\text{sn}}}{T_p - T_{\text{sn}}} \left( e^{-\frac{t'}{T_p}} - e^{-\frac{t'}{T_{\text{sn}}}} \right) - \sin \omega t' \right] \times e^{-\frac{t_0+t'}{T_{\text{sn}}}} + \frac{\omega T_p T_{\text{sn}}}{T_p - T_{\text{sn}}} \left( e^{-\frac{t'}{T_p}} - e^{-\frac{t'}{T_{\text{sn}}}} \right) + 1$$

$$= \left[ \frac{314 \times 0.1 \times 0.8}{0.1 - 0.8} \left( e^{-\frac{0.1}{0.1}} - e^{-\frac{0.1}{0.8}} \right) - \sin 31.4 \right] e^{-\frac{0.5+0.04}{0.8}} + \frac{314 \times 0.1 \times 0.8}{0.1 - 0.8} \left( e^{-\frac{0.04}{0.1}} - e^{-\frac{0.04}{0.8}} \right) + 1$$

$$= 20.5$$

由此求出电流互感器额定等效二次极限电动势为：

$$E_{\text{al}} = K_{\text{id}} K_{\text{ssc}} I_{\text{sn}} (R_{\text{ct}} + R_{\text{bn}}) = 20.5 \times 20 \times 1 \times (9 + 15) = 9840 \text{ V}$$

b) 现求实际工作循环下要求的等效二次感应电动势。

由实际二次负荷  $7\Omega$ ，求得实际二次时间常数  $T_s$  为 1.2s：

$$T_s = \frac{T_{\text{sn}} (R_{\text{ct}} + R_{\text{bn}})}{R_{\text{ct}} + R_b} = \frac{0.8(9 + 15)}{9 + 7} = 1.2$$

1) C-O 工作循环：按  $t=100\text{ms}$ ，求暂态面积系数及等效二次感应电动势。

当地电源： $T_p=240\text{ms}$ ，求出：

$$K'_{\text{id1}} = \frac{314 \times 0.24 \times 1.2}{0.24 - 1.2} \left( e^{-\frac{0.1}{0.24}} - e^{-\frac{0.1}{1.2}} \right) + 1 = 25.6$$

网络电源： $T_p=100\text{ms}$ ，求得：

$$K'_{\text{id2}} = \frac{314 \times 0.1 \times 1.2}{0.1 - 1.2} \left( e^{-\frac{0.1}{0.1}} - e^{-\frac{0.1}{1.2}} \right) + 1 = 19.9$$

要求的总的暂态面积系数为：

$$K'_{\text{id}} = K'_{\text{id1}} \frac{I_{p1}}{I_{p1} + I_{p2}} + K'_{\text{id2}} \frac{I_{p2}}{I_{p1} + I_{p2}} = 25.6 \times \frac{10000}{45000} + 19.9 \times \frac{35000}{45000} = 21.2$$

要求互感器的等效二次极限电动势  $E_{al}'$  为:

$$E_{al}' = K_{td}' K_{pcf} (R_{ct} + R_b) = 21.2 \times 18 \times (9+7) = 6106V$$

2) C-O 工作循环: 按  $t=250ms$ , 求暂态面积系数及等效二次感应电动势。

当地电源:  $T_p=240ms$ , 求出:

$$K'_{td1} = \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} (e^{-t/T_p} - e^{-t/T_s}) + 1 = \frac{314 \times 0.24 \times 1.2}{0.24 - 1.2} \left( e^{-\frac{0.25}{0.24}} - e^{-\frac{0.25}{1.2}} \right) + 1 = 44.2$$

网络电源:  $T_p=100ms$ , 求得:

$$K'_{td2} = \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} (e^{-t/T_p} - e^{-t/T_s}) + 1 = \frac{314 \times 0.1 \times 1.2}{0.1 - 1.2} \left( e^{-\frac{0.25}{0.1}} - e^{-\frac{0.25}{1.2}} \right) + 1 = 26.0$$

要求的总的暂态面积系数  $K_{td}'$  为:

$$K'_{td} = 44.2 \frac{10000}{45000} + 26.0 \frac{35000}{45000} = 30$$

要求电流互感器的等效二次极限电动势  $E_{al}'$  为:

$$E_{al}' = K_{td}' K_{pcf} (R_{ct} + R_b) = 30 \times 18 \times (9+7) = 8640V$$

3) C-O-C-O 工作循环:  $t'=100ms$ ,  $t''=800ms$ ,  $t'''=100ms$ , 求暂态面积系数:

$$K'_{td} = \left[ \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left( e^{-\frac{t'}{T_p}} - e^{-\frac{t'}{T_s}} \right) - \sin \omega t' \right] \times e^{-\frac{t''+t'}{T_s}} + \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left( e^{-\frac{t'}{T_p}} - e^{-\frac{t'}{T_s}} \right) + 1$$

当地电源:  $T_p=240ms$ , 可求得:

$$K'_{td1} = \left[ \frac{314 \times 0.24 \times 1.2}{0.24 - 1.2} \left( e^{-\frac{0.1}{0.24}} - e^{-\frac{0.1}{1.2}} \right) - \sin 314 \times 0.1 \right] e^{-\frac{0.8+0.1}{1.2}} + \frac{314 \times 0.24 \times 1.2}{0.24 - 1.2} \left( e^{-\frac{0.1}{0.24}} - e^{-\frac{0.1}{1.2}} \right) + 1 = 37.2$$

网络电源:  $T_p=100ms$ , 可求得:

$$K'_{td2} = \left[ \frac{314 \times 0.1 \times 1.2}{0.1 - 1.2} \left( e^{-\frac{0.1}{0.1}} - e^{-\frac{0.1}{1.2}} \right) - \sin 314 \times 0.1 \right] e^{-\frac{0.8+0.1}{1.2}} + \frac{314 \times 0.1 \times 1.2}{0.1 - 1.2} \left( e^{-\frac{0.1}{0.1}} - e^{-\frac{0.1}{1.2}} \right) + 1 = 28.8$$

要求的总的暂态面积系数  $K_{td}'$  为:

$$K'_{td} = K'_{td1} \frac{I_{p1}}{I_{p1} + I_{p2}} + K'_{td2} \frac{I_{p2}}{I_{p1} + I_{p2}} = 37.2 \times \frac{10000}{45000} + 28.8 \times \frac{35000}{45000} = 30.7$$

要求电流互感器的等效二次极限电动势  $E_{al}'$  为:

$$E_{al}' = K_{td}' K_{pcf} (R_{ct} + R_b) = 30.7 \times 18 \times (9+7) = 8841.6V$$

4) 上述各种情况要求的电流互感器等效二次极限电动势  $E_{al}'$  均小于其额定等效二次极限电动势  $E_{al}=9840V$ , 即能满足工作循环中不会饱和的要求。

c) 对于 TPY 互感器, 还应校验实际工作的暂态误差。取上述最大的  $K_{td}'=30.7$ , 实际二次时间常数  $T_s=1.2s$ , 按式 (34),  $100K_{td}'/2\pi f T_s (\%) = 8.14\%$ , 符合不超出 10% 的要求。

## D.2 超高压电网降压变压器差动保护用电流互感器选择

设变压器为 500/220/35kV 自耦变压器组, 容量为 750MVA。高压侧短路电流 40kA, 系统一次时间常数  $T_p=0.1s$ , 变压器差动保护各侧均选用 TPY 电流互感器, 校验条件是高、中压侧按外部线路故障并重合闸时差动保护不误动, 即要求保证 C-0.1s-O-0.8s-C-0.1s-O 工作循环电流互感器不致暂态饱和。低压侧按外

部三相短路 C-0.1s-O 工作循环进行校验。

- a) 变压器 500kV 侧额定电流为 867A。500kV 侧母线采用一个半断路器接线。电流互感器选用 TPY 级, 考虑系统穿越电流大, 变比选为 2500/1,  $K_{ssc}=20$ ,  $T_p=0.1s$ ,  $R_{ct}=9\Omega$ ,  $R_{bn}=15\Omega$ ,  $T_{sn}=0.8s$ , 保证的工作循环为 C-0.1s-O-0.5s-C-0.04s-O。由 D.1 的计算结果, 可知电流互感器的额定暂态面积系数  $K_{td}$  为 20.5。额定等效二次极限电动势  $E_{al}=9840V$ 。

现校验电流互感器是否满足要求。设实际二次负荷  $R_b=10\Omega$ , 则实际二次时间常数  $T_s$  为:

$$T_s = \frac{T_{sn}(R_{ct} + R_{bn})}{R_{ct} + R_b} = \frac{0.8(9+15)}{9+10} = 1.01s$$

按校验条件 C-0.1s-O-0.8s-C-0.1s-O 工作循环, 求出要求的暂态面积系数为:

$$K'_{td} = \left[ \frac{314 \times 0.1 \times 1.01}{0.1 - 1.01} \left( e^{-\frac{0.1}{0.1}} - e^{-\frac{0.1}{1.01}} \right) - \sin 314 \times 0.1 \right] e^{-\frac{0.8+0.1}{1.01}} + \frac{314 \times 0.1 \times 1.01}{0.1 - 1.01} \left( e^{-\frac{0.1}{0.1}} - e^{-\frac{0.1}{1.01}} \right) + 1 = 27.4$$

考虑最严重条件下穿越电流为最大短路电流即  $K_{pcf}=I_{scmax}/I_{pn}=40000/2500=16$ , 实际的  $R_b=10$ , 要求所选用电流互感器的等效二次极限电动势  $E_{al}'$  为:

$$E_{al}' = K'_{td} K_{pcf} (R_{ct} + R_b) = 27.4 \times 16 \times (9+10) = 8330.6V$$

$E_{al}'$  小于电流互感器额定等效二次极限电动势  $E_{al}=9840V$ , 符合要求。

TPY 电流互感器实际工作的暂态误差  $\varepsilon=100 K'_{td} / \omega T_s \% = 100 \times 27.4 / 314 \times 1.01 \% = 8.6\%$ , 符合不超出 10% 的要求。

- b) 变压器 220kV 侧额定电流为 1970A。220kV 侧短路穿越变压器电流为 12kA。选用 TPY 级电流互感器, 变比 2500/1,  $K_{ssc}=15$ ,  $T_p=0.06s$ ,  $R_{ct}=9\Omega$ ,  $R_{bn}=15\Omega$ ,  $T_{sn}=0.6s$ , 工作循环为 C-100ms-O。电流互感器的额定暂态面积系数  $K_{td}$  为:

$$K_{td} = \frac{314 \times 0.06 \times 0.6}{0.06 - 0.6} \left( e^{-\frac{0.1}{0.06}} - e^{-\frac{0.1}{0.6}} \right) + 1 = 14.8$$

由此求出电流互感器额定等效二次极限电动势为:

$$E_{al} = K_{td} K_{ssc} I_{sn} (R_{ct} + R_{bn}) = 14.8 \times 15 \times 1 \times (9+15) = 5328V$$

设实际二次负荷  $R_b=7\Omega$ , 则实际二次时间常数  $T_s$  为:

$$T_s = \frac{T_{sn}(R_{ct} + R_{bn})}{R_{ct} + R_b} = \frac{0.6(9+15)}{9+7} = 0.9s$$

按 220kV 短路并进行重合闸为校验条件, 鉴于 500kV 侧  $T_p$  约为 0.1s, 变压器高中压间 X/R 一般大于 3, 即  $T_p$  在 0.1s 以上, 故 220kV 侧一次时间常数也取 0.1s。则要求的暂态面积系数  $K'_{td}$  为:

$$K'_{td} = \left[ \frac{314 \times 0.1 \times 0.9}{0.1 - 0.9} \left( e^{-\frac{0.1}{0.1}} - e^{-\frac{0.1}{0.9}} \right) - \sin 314 \times 0.1 \right] e^{-\frac{0.8+0.1}{0.9}} + \frac{314 \times 0.1 \times 0.9}{0.1 - 0.9} \left( e^{-\frac{0.1}{0.1}} - e^{-\frac{0.1}{0.9}} \right) + 1 = 26.5$$

中压侧短路穿越电流为 12kA,  $K_{pcf}=12000/2500=4.8$ , 实际的  $R_b=7$ , 要求所选用电流互感器的等效二次极限电动势  $E_{al}'$  为:

$$E_{al}' = K'_{td} K_{pcf} (R_{ct} + R_b) = 26.5 \times 4.8 \times (9+7) = 2035.2V$$

$E_{al}'$  小于电流互感器额定等效二次极限电动势  $E_{al}=5328V$ , 符合要求。

TPY 电流互感器实际工作的暂态误差  $\varepsilon=100 K'_{td} / \omega T_s (\%) = 100 \times 26.5 / 314 \times 0.9 \% = 9.4\%$ , 接近允许误差极限, 宜适当提高 220kV 的 TPY 互感器额定二次时间常数, 例如提高到 0.8s。

- c) 低压侧为了与高、中压侧互感器匹配, 宜选用 TPY 级电流互感器, 用类似上述的方法校验暂态特性。

## D.3 大型发电机变压器组差动保护用电流互感器选择

设发电机组容量为 600MW，机端电压为 20kV， $\cos\phi=0.9$ ， $X_d''=0.21$ ， $T_p=0.264s$ 。升压变压器组容量为 720MVA， $X_T=0.14$ ，高压侧为 500kV，母线为一个半断路器接线。高压侧短路时，通过机组的短路电流为 2.15kA，系统供给的短路电流为 38kA， $T_p=0.1s$ 。

- a) 高压侧机组额定电流为 734A，电流互感器采用 TPY 级，选择与 D.1 中相同的参数。考虑系统穿越电流大，变比选为 2500/1， $K_{ssc}=20$ ， $T_p=0.1s$ ， $R_{cl}=9\Omega$ ， $R_{bn}=15\Omega$ ， $T_{sn}=0.8s$ 。保证的工作循环为 C-0.1s-O-0.5s-C-0.04s-O。可求出其额定暂态面积系数为 20.5，额定二次等效极限电动势为 9840V。（参见 D.1）。保护校验系数  $K_{pcf}=(38000+2100)/2500=16.04$ 。在实际二次负荷  $R_b=10\Omega$  时，可求出实际二次时间常数  $T_s$  为 1.01s。（参见 D.2）。

1) 求电流互感器要求的暂态面积系数及二次极限电动势

系统供给短路电流要求的暂态面积系数为  $K_{td2}'=27.4$ 。（参见 D.2）。

机组供给的短路电流， $T_p=0.25s$ ，需要的暂态面积系数  $K_{td1}'$  为：

$$K_{td1}' = \left[ \frac{314 \times 0.25 \times 1.01}{0.25 - 1.01} \left( e^{-\frac{0.1}{0.25}} - e^{-\frac{0.1}{1.01}} \right) - \sin 314 \times 0.1 \right] e^{-\frac{0.8+0.1}{1.01}} + \frac{314 \times 0.25 \times 1.01}{0.25 - 1.01} \left( e^{-\frac{0.1}{0.25}} - e^{-\frac{0.1}{1.01}} \right) + 1 = 35.6$$

要求的总等效暂态面积系数为：

$$K_{td}' = K_{td1}' \frac{I_{p1}}{I_{p1} + I_{p2}} + K_{td2}' \frac{I_{p2}}{I_{p1} + I_{p2}} = 35.6 \times \frac{2100}{40100} + 27.4 \times \frac{38000}{40100} = 27.8$$

要求所选用电流互感器的等效二次极限电动势  $E_{al}'$  为：

$$E_{al}' = K_{td}' K_{pcf} (R_{cl} + R_b) = 27.8 \times 16.04 \times (9 + 10) = 8472.3V$$

$E_{al}'$  小于电流互感器额定等效二次极限电动势  $E_{al}=9840V$ ，符合要求。

- 2) TPY 电流互感器实际工作的暂态误差  $\varepsilon=100K_{td}'/\omega T_s\%=100 \times 27.8/314 \times 1.01\%=8.8\%$ ，符合不超过 10% 的要求。

- b) 发电机变压器组低压回路电流互感器的选择。低压侧额定电压为 20kV，发电机额定电流为 19.3kA，取低压侧互感器为 25000/1，高压侧短路时流过低压侧的短路电流为  $2150 \times 525/20=56500A$ 。高压侧外部短路的  $K_{pcf}=56500/25000=2.26$ ，设高低压侧变比误差由差动继电器抽头或软件实现补偿。发电机变压器组一次时间常数较大，暂态饱和问题严重，宜采用 TPY 电流互感器，由于无定型产品可供选用，需要根据有关参数进行开发设计。按外部三相短路 C-O 工作循环或外部线路单相重合闸 C-O-C-O 工作循环求电流互感器应具有的性能。

- 1) 按工作循环 C-100ms-O，考虑到发电机保护的复杂性，要求暂态误差不超过 5%。设计时试取  $T_{sn}=2.0s$ ，可求出电流互感器所需额定暂态面积系数  $K_{td}$  为：

$$K_{td} = \frac{314 \times 0.264 \times 2}{0.264 - 2} \left( e^{-\frac{0.1}{0.264}} - e^{-\frac{0.1}{2}} \right) + 1 = 26.5$$

要求 TPY 互感器磁通总倍数  $K_{td}K_{ssc} > 26.5 \times 2.26 = 59.9$ 。

暂态误差  $\varepsilon=100K_{td}'/2\pi f T_s(\%)=100 \times 26.5/(314 \times 2)\%=4.22\%$ 。符合要求。

- 2) 按工作循环 C-100ms-O-800ms-C-100ms-O， $T_{sn}=2.0s$ ，要求暂态误差不超过 10%。可求出电流互感器所需额定暂态面积系数  $K_{td}$  为：

$$K_{td} = \left[ \frac{314 \times 0.264 \times 2}{0.264 - 2} \left( e^{-\frac{0.1}{0.264}} - e^{-\frac{0.1}{2}} \right) - \sin 314 \times 0.1 \right] e^{-\frac{0.8+0.1}{2}} + \frac{314 \times 0.264 \times 2}{0.264 - 2} \left( e^{-\frac{0.1}{0.264}} - e^{-\frac{0.1}{2}} \right) + 1 = 427$$

由于高压侧单相接地低压侧相电流仅为高压故障电流的  $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ，故要求 TPY 互感器磁通总倍数  $K_{td}K_{ssc} > 42.7 \times \frac{1}{\sqrt{3}} \times 2.26 = 56.0$ ，小于上述按三相故障 C-O 循环的计算值。

暂态误差  $\varepsilon = 100K_{td}' / 2\pi f T_s (\%) = 100 \times 42.7 / (314 \times 2) \% = 6.74\%$ 。不超过 10%。

- 3) 以上计算使用的  $T_s = 2s$ ，实际产品可能有少许差异，二次负荷不同时，也可能造成某些差异。这些差异对  $K_{td}$  的计算结果影响不大。
- 4) 发电机中性点及出线侧通常安装空间较紧张。但由于穿越电流小，计算求出要求 TPY 互感器的  $K_{td}K_{ssc}$  值不超出 60，体积不是很大，一般可以满足安装要求。
- 5) 为保证内部故障时互感器的热稳定性，互感器短时热电流  $I_{th}$  不宜小于 10 倍额定电流  $I_{pn}$ 。

## 附录 E

(资料性附录)

## 电子式互感器简介

## E.1 概述

随着超高压技术的发展,特别是 GIS 的普遍应用,对电力设备要求高可靠性、自动化、小型化。城乡电网建设和改造及电厂、大型工矿企业大量要求体积紧凑、绝缘性能好、自动化程度高的中压开关柜。而常规的电流及电压互感器暴露出一系列缺点:如互感器的绝缘结构复杂、体积大、造价也高,电磁感应式互感器所固有的磁饱和、铁磁谐振、动态范围小以及绝缘油或 SF<sub>6</sub> 气体易爆、易燃、腐蚀等,已难于满足目前电力系统对设备小型化和在线检测、高精度故障诊断、数字传输等发展要求。

因此,国内外都在研制新型电子式互感器。经过多年的研究及试运行,已取得重大进展。如适用于超高压系统的采用电-光变换或磁-光变换原理的光传感器。它具有抗电磁干扰、不饱和、测量范围大、体积小、质量小及便于数字传输等优点。现已开始进入商业运行。适合于 GIS 和开关柜用的新型互感器,如无铁芯的空心线圈(罗戈夫斯基线圈)电流传感器,带铁芯的低功率电流互感器,电阻分压或阻容分压的电压传感器等。这些互感器与常规互感器近似,亦称为半常规互感器。它们体积小、质量小、暂态响应和运行性能良好,可靠性高,已开始在新中、低压开关柜或 GIS 中使用。

目前,继电保护、测量和计量装置已普遍采用微机型,消耗功率很小,一般不超过 1VA,但要求很高的抗干扰能力和便于数字变换和传输。上述各种新型电子式互感器正好适应这种要求,因而大大促进了这类互感器的发展。

IEC 已制订了这类电子式互感器的标准。IEC 60044—7《互感器 第 7 部分:电子式电压互感器》和 IEC 60044—8《互感器 第 8 部分:电子式电流互感器》已分别于 1999 年及 2002 年正式颁布。

《电流互感器和电压互感器选择及计算导则》主要针对常规的电流互感器和电压互感器,对于上述电子式互感器,因运行经验还不多,没有为此作出专门规定。但导则中的一些设计基本原则还是可参照使用的。本附录对一些大家关注的新型互感器的特点,作简要介绍,供了解和应用参考。

## E.2 电子式互感器的结构和参数

IEC 60044-8 提出了电子式互感器的一般结构,如图 E.1 所示,其中包括一次传感器及变换器、传输系统、二次变换器及合并单元。图中所有单元并不都是必须的,如光传感器即不需要一次电源。数字输出一一般是经合并单元将多个传感器的采样量合并变为数字量输出。一个合并单元最多可输入 7 个电流传感器和 5 个电压传感器的采样量。供给测量仪表和继电保护的数字量一般分别输出。

电子式互感器的使用环境条件、绝缘耐压要求和一次回路参数等特性与常规互感器基本相同,但二次输出技术参数却有很大差异。二次输出分模拟量和数字量两类。

电子式电流互感器模拟量输出为二次电压,其额定值的标准值以方均根值  $U$  表示为:22.5mV、150mV、200mV、225mV、4V。其中,额定二次电压 4V 仅用于测量目的。额定负荷的标准值以电阻表示为:2k $\Omega$ 、20k $\Omega$ 、2M $\Omega$ 。

电子式电压互感器模拟量输出二次电压额定值以方均根值  $U$  表示为:1.625V、3.25V、6.5V、100V。输出容量当二次电压小于 10V 时,以 VA 表示的标准值为 0.001-0.01-0.1-0.5。当二次电压大于 10V 时,以 VA 表示的标准值为 1-2.5-5-10-15-25-30。

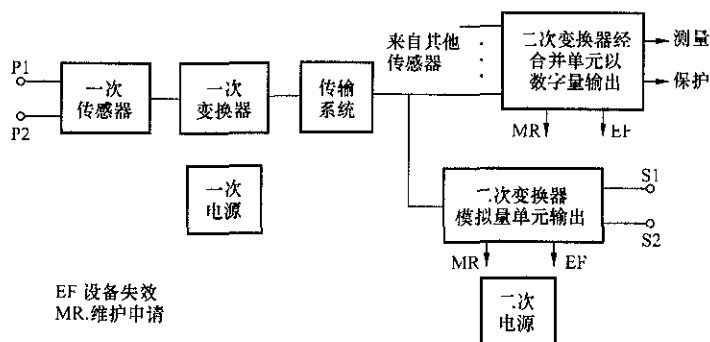


图 E.1 单相电子式互感器通用框图

电子式互感器的数字量输出：IEC 60044-8 规定由串行、单向、一发多收、点对点链路（serial unidirectional multdrop point-to-point link）送出。发信的是合并单元，收信的可能有保护、测量仪表、监控单元及过程总线等。通信接口基本技术与 IEC 60870-5-103 相似。物理层为铜线或光纤，链路层采用 IEC 60870-5 的 FT-3 帧格式。另外，IEC C57 正在进行 IEC 61850 《变电站通信网络及系统》的编制工作，其中 IEC 61850-9 为过程层（包括互感器及断路器等）至间隔层的规定，IEC 61850-9 包括两部分：IEC 61850-9-1 为点对点链路；IEC 61850-9-2 为过程总线。

### E.3 传感器

电子式互感器组成部分中的传感器有两类：一类是利用磁-光或电-光效应的光互感器；另一类是在常规传感器基础上发展起来的非常规传感器，如独立式空心线圈（罗戈夫斯基线圈）传感器、低功率电流互感器、电阻或阻容分压传感器等。下面对几种重要传感器作简要介绍。

#### E.3.1 光电流传感器

光电流传感器通常采用法拉第效应（Faraday effect）原理，该效应为描述磁场对透明光介质影响的磁-光效应。当一束线偏振光穿过介质时，若在沿光波传播方向加一外磁场，则其偏振面将旋转角  $\theta$ ，如图 E.2 所示， $\theta$  的计算式为：

$$\theta = VHL \quad (\text{E.1})$$

式中：

$V$ ——维而德（Verdet）常数，由介质和光波的波长决定，它表征介质的磁光特性；

$H$ ——磁场强度；

$L$ ——光路径长度。

利用法拉第磁光效应实现电流传感器可能有多种方式，如全光纤式、光电混合式和块状玻璃式。现介绍一种已投入商业运行的块状玻璃式光电流传感器，参见图 E.3。玻璃中心有孔通过带电导体，发光二极管的光束经起偏器形成线偏振光射入玻璃，在玻璃中经内部折射围绕被测导体形成环路，由出口的检偏器将线偏振光的偏振面角度变化信息转化为光强度变化信息，再由光电探测器将光强度信号转化为电信号。如  $P_0$  为光输入功率而  $P_s$  为输出功率，则：

$$P_s(t) = \frac{P_0}{2} [1 + \sin(2V \cdot i(t))] \quad (\text{E.2})$$

光信号可以直接从高压区经光纤送至低压区的二次变换器进行处理，不需要在高压区另加电源，即实现所谓无源（passive）传感器。故特别适合用于超高压空气绝缘开关装置（AIS）。

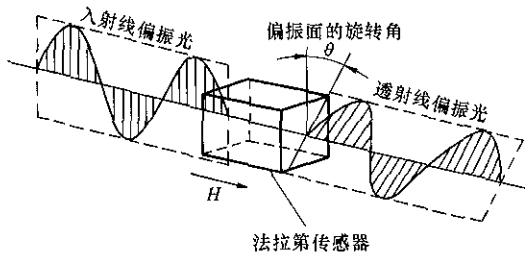


图 E.2 法拉第效应示意图

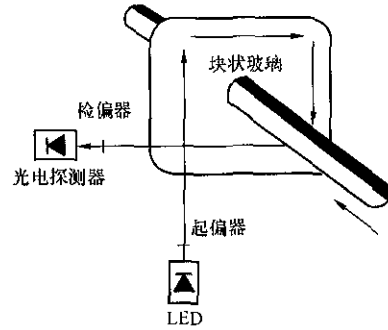


图 E.3 光电流传感器示意图

E.3.2 光电压传感器

光电压传感器通常采用普克尔斯效应 (pockels effect) 原理, 该效应为描述电场对透明晶体影响的电-光效应。一个实用的光电压传感器的示意图见图 E.4。

检测原理类似上述光电流传感器, 由一个 1/4 波长板和两个偏振器组成的偏振检测系统将普克尔斯偏振调制转化为光强度调制。普克尔斯晶体纵向外加电压  $u(t)$ , 离开晶体的偏振光强度可用下式表示:

$$P_s(t) = \frac{P_0}{2} [1 + \sin(K \cdot u(t))] \tag{E.3}$$

式中:

$P_0$ ——输入光强度;

$K$ ——普克尔斯灵敏度常数。

光电压传感器同样是无源传感器, 适合用于超高压空气绝缘开关设备。

光电压传感器可与光电流传感器组合在一起, 成为电流-电压复合变送器。

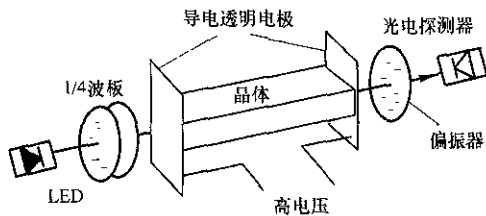


图 E.4 光电压传感器示意图

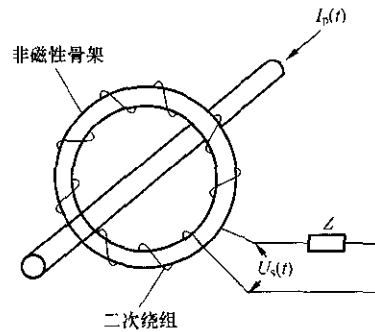


图 E.5 独立式空心线圈

E.3.3 独立式空心线圈 (罗戈夫斯基线圈) 传感器

空心线圈的二次绕在非磁性骨架上, 如图 E.5 所示, 无磁性材料使这种传感器线性度极好, 不会饱和也无磁滞现象。因此, 空心线圈具有良好的稳定性和暂态响应。在负荷为高阻抗  $Z$  时, 线圈的输出电压是穿过线圈的一次电流  $I_p(t)$  的函数。

对于圆环任意形状截面的输出电压, 近似公式为:

$$e(t) \approx \mu_0 NA \frac{\partial i_p(t)}{\partial t} = M \frac{\partial i_p(t)}{\partial t} \tag{E.4}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \left[ \frac{Vs}{Am} \right] \quad M = \mu_0 NA$$



式中:

$\mu_0$ ——真空导磁率;

$N$ ——匝数密度, 匝/m<sup>2</sup>;

$A$ ——单匝截面, m<sup>2</sup>;

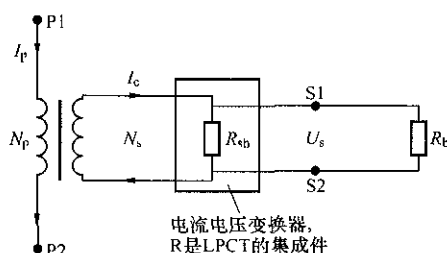
稳态正弦电流下的电压  $\vec{E} = Mj\omega I_p$

由以上公式可知, 空心线圈输出电压与输入一次电流的微分成正比。通常再经过一次积分使输出电压正比于输入电流。

空心线圈的输出使用常规铜导线, 也可变换为光信号输出, 但在高压端的一次变换需要电源, 即所谓有源 (active) 传感器。对于 AIS 设备, 取得电源较困难。因此, 空心线圈一般用于中压开关柜或 GIS 设备。

### E.3.4 带铁芯的低功率电流互感器

采用铁芯线圈的低功率电流互感器 (LPCT) 是常规感应式电流互感器的发展。由于现代电子设备要求的输入功率很低, LPCT 可以为此实现体积很小但测量范围却很广的设计。如图 E.6 所示。



$$U_s = R_{sh} \frac{N_p}{N_s} I_p$$

$$I_p = K_t U_s$$

$$K_t = \frac{1}{R_{sh}} \frac{N_s}{N_p}$$

图 E.6 低功率铁芯线圈变换器

LPCT 包含一次绕组、较小的铁芯和损耗极小的二次绕组, 后者连接分流电阻  $R_{sh}$ 。二次电流  $I_s$  在分流电阻上产生的电压  $U_s$ , 在幅值和相位上正比于一次电流。分流电阻集成于 LPCT 中,  $R_{sh}$  选取得使其对互感器的功耗近于零。因而极大地扩大了测量范围, 电流互感器在极高 (或偏移) 一次电流下会饱和的特性将得到极大改善, 测量和保护也可能使用同一互感器。

### E.3.5 电阻或阻容分压电压传感器

这类传感器的原理与常规互感器基本相同, 不再详述。在中压或 GIS 中, 使用电阻分压或阻容分压在某些情况下可能获得更好的稳定性和经济性。其二次输出电压较低, 适用于微机保护和电子测量仪表。

## E.4 开发应用情况

对基于光传感器的互感器, 国内外许多单位曾进行了长期的大量的研究工作。我国有多个高等学校、研究所和制造厂在积极进行开发研制, 但目前一般尚处于研究试用阶段。国外有个别制造厂的产品在近期投入了商业运行。

对基于半常规传感器的互感器, 由于技术比较成熟, 运行经验较多, 国内外已开始推广应用。我国曾引进这类产品在国内工程使用。我国有多家开关厂生产的开关柜中已开始使用空心线圈电流互感器和电阻分压的电压互感器, 配合微机保护和电子仪表的应用, 对于减小开关柜体积, 提高其性能, 起了重要作用。