

# CT饱和对继电保护动作的影响分析

张吕根

(望亭发电厂, 江苏 苏州 215155)

**摘要:** 电流互感器(CT)饱和时, 电流继电器能不能正确动作, 一直存在二种截然不同的观点。在实际运用和设计中, 也存在这种状况。电流互感器到底允许不允许饱和, 饱和倍数达到多大时, 电流继电器就不能正确动作, 事实上这个问题长期以来是没有解决。从正弦波电流面积积分这一角度出发, 通过计算推导出当 CT 的 -10% 误差倍数  $K$  和继电器定值  $A$  已知时, 能使继电器动作的最大 CT 电流倍数  $C$  与  $K$ 、 $A$  之间的数学关系式为:  $A \leq C \leq \frac{4A^2 + K^2}{4A}$ 。从而找到了这个问题的数学答案。

**关键词:** CT饱和; 电流型继电器; 电磁型保护; 微机型保护

**中图分类号:** TM77 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-4897(2003)S0-0021-05

## 1 问题的提出

图1是望亭发电厂一台30万机组6kV厂用系

统一段母线的的设计配置图。

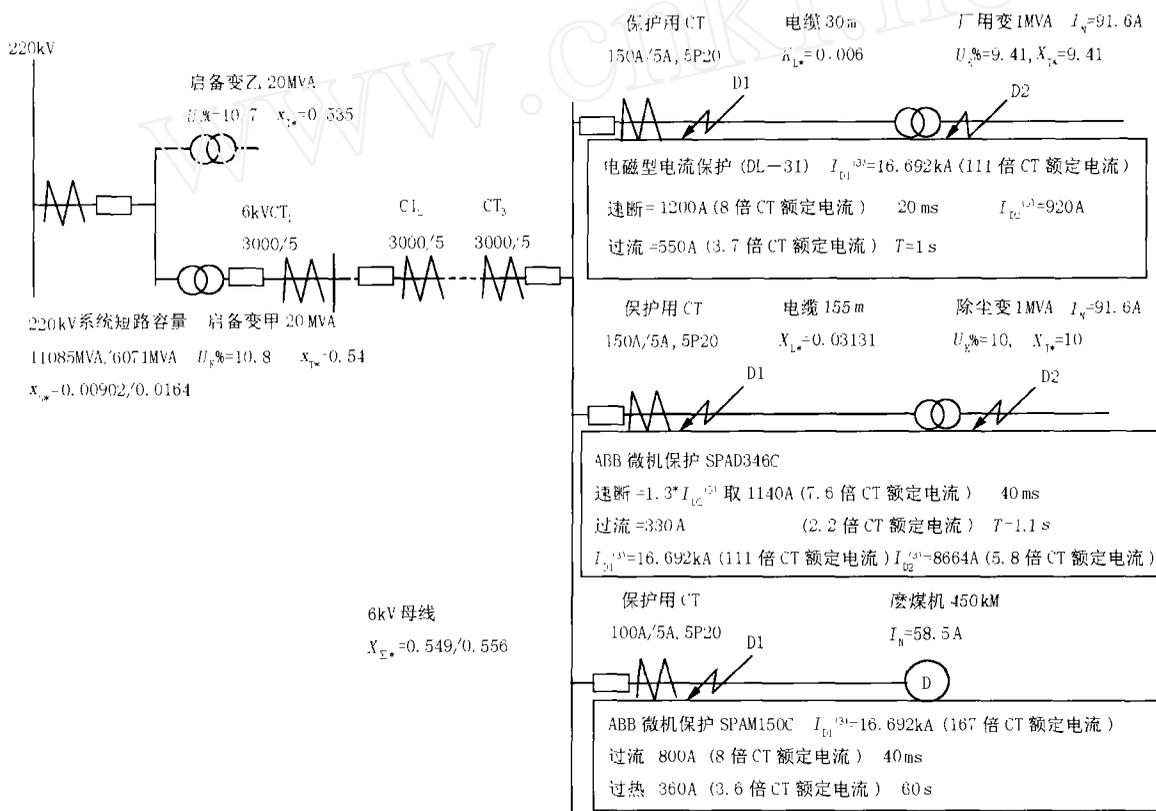


图1 6kV母线保护配置示意图

Fig.1 The protection configuration of one 6 kV busbar

在图1中:

(1) 6kV母线段上有近20个厂用负载设备,除

厂用变为电磁型电流保护外,其余均采用了ABB的微机保护。

(2) 6 kV 负载保护用电流互感器 CT 为 5P/20 规格,变比 100/5,150/5,400/5。现场 CT 的伏安数在 70~80 VA 之间,厂用变的二次负载 4.2 V/5 A。所以这批 CT 的 -10% 误差倍数  $K$  在 17 与 20 之间,与 5P/20 的订货指标基本相符。

(3) D1 处的三相短路电流  $I_{D1}^{(3)} = 16.692$  kA,分别是上述三种 CT 额定电流的 42、111、167 倍。D1 发生故障时,上述 CT 均处在深度饱和之中。

针对上述情况,提出几点质疑。

## 2 “CT 严重饱和时,电磁型电流继电器能可靠动作”吗?

“CT 严重饱和时,电磁型电流继电器能可靠动作吗”?笔者对此持否定态度,理由下述。

图 2 中,  $A$  为电磁型电流继电器定值线,  $B$  为 CT 饱和值线,曲线 1,2,3,4 分别代表 CT 在未饱和、轻度饱和、严重饱和、深度饱和时的一次电流。

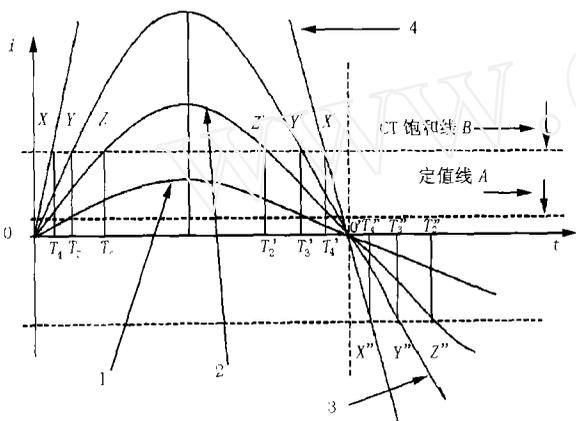


图 2 稳态饱和下 CT 的一、二次电流波形示意图

Fig.2 primary current and secondary current of CT static saturation

为了让电磁型电流继电器动作,电流必须做功,克服其最小动作力矩  $M_{DC} = KA^2$ 。  $A$  就是通入电磁型继电器电流的有效值,即图 2 中的定值线  $A$ 。

任何正弦波电流  $i = \sqrt{2}C\sin t$ ,其有效值  $C$  大于或等于  $A$  值,即  $C \geq A$ ,都可使该继电器动作。我们把  $C = A$  时的正半周面积用  $S_A$  表示,则有:

$$S_A = \int_0^{\pi} \sqrt{2}A\sin t dt = 2\sqrt{2}A$$

$$\text{即: } S_A = 2\sqrt{2}A \quad (1)$$

所以我们可以这样说,任何正弦波电流  $i = \sqrt{2}C\sin t$ ,其正半周面积大于或等于  $2\sqrt{2}A$ ,都可使该继电器动作。我们把式(1)称为最小动作面积,或

叫整定面积。

这样,我们是用电流波形的面积而不是用有效值来讨论电磁型继电器的动作问题了。

我们已假定  $A$  是定值线(这里  $A$  用整定电流对于 CT 额定电流的倍数来表示),对于任意正弦波电流波形  $i = \sqrt{2}C\sin t$ ,只要其时间轴以上的正半周面积大于  $2\sqrt{2}A$ ,都能使继电器动作。即:

$$\int_0^{\pi} \sqrt{2}C\sin t dt \geq 2\sqrt{2}A \quad (2)$$

我们把式(2)称作继电器最小动作面积判别式。我们用此式来讨论电磁型继电器能动作的 CT 饱和限值。

曲线 1 是 CT 未饱和状态。一次电流的最大值  $I_{max}$  小于 CT 饱和线  $B$ 。所以,一、二次电流呈线性传递状态。一、二次电流均是正弦波,二者重合。只要  $I_{max} \geq \sqrt{2}A$ ,且不饱和,其正半周面积用  $S_x$  表示,则必定有:  $S_x \geq 2\sqrt{2}A$ ,继电器动作。

反之,  $I_{max} < \sqrt{2}A$ ,  $S_x < S_A$ ,继电器不动作。或者说,  $\int_0^{\pi} \sqrt{2}C\sin t dt \geq 2\sqrt{2}A$ ,继电器动作;

$$\int_0^{\pi} \sqrt{2}C\sin t dt < 2\sqrt{2}A, \text{继电器不动作。}$$

现在我们来讨论曲线 2。

根据《CT 饱和的过程及电流特征》<sup>[2]</sup>等文章的分析,我们可以得到曲线 2 的二次电流波形。叙述如下:

### (1) OZ 段——不饱和段

一次电流 OZ 段处于 CT 饱和线  $B$  以下,二次电流跟随一次电流线性增长。所以, OZ 段一、二次电流曲线重合。

### (2) Z 点——饱和点

当一次电流接近 Z 点附近时,应当说二次电流的变化是非常复杂的。由于一次电流接近饱和线  $B$ , CT 铁芯磁通逐渐饱和,二次电流输出减少,弯曲向下,一、二次电流曲线脱离线性关系,进入 -10% 误差区。随着一次电流继续升高并快速越过 CT 饱和线  $B$ , CT 铁芯快速饱和,二次电流急剧衰变至零,沿  $ZT_2$  至  $T_2$  变为 0,形成一个圆顶三角波  $OZT_2$ 。

### (3) ZZ' 段

过 Z 点后,虽然一次电流还在增长,但在 Z 点时, CT 铁芯内的磁通已经处于饱和状态,所以一次电流的继续增加, CT 铁芯的磁通仍维持基本不变。

根据磁感应定理:  $e_2 = -\omega_2 \frac{d\Phi}{dt}$ , 因为  $d\Phi = 0$ , 所以

$e_2 = 0$ , 二次电流  $i_2$  也应为零。对应一次电流  $ZZ'$  段, 二次电流是直线  $T_2 T'_2$ 。

#### (4) $Z'$ 点

在  $Z'$  点, 一次电流瞬时值开始小于 CT 饱和线  $B$ 。但由于饱和剩磁的缘故, CT 不会立即退出饱和状态, 剩磁通  $\Phi$  仍基本维持饱和状态,  $d\Phi$  基本为零或很小。CT 的二次感应电流继续为零。

#### (5) $O'Z''$ ——转折段

一次电流过零点  $O'$  时, CT 磁滞回线的高度, 决定于 CT 饱和的深度。饱和深, 剩磁高。零点  $O'$  后, 反方向一次电流的增长, 产生一反向增长的磁通, 原剩磁逐渐被抵消。CT 内的总磁通变小、过零、变负。 $-d\Phi$  快速负增长。根据磁感应定理:  $e_2 = -\omega_2 \frac{d\Phi}{dt}$ , 二次电流  $i_2$  又一次产生, 从而形成负向的二次电流输出, 与一次电流成线性关系, 亦为正弦波状。

当一次电流达到反向饱和值  $-B$  时, CT 又一次进入饱和状态, 重复正半周的情况, 二次电流又从  $Z''$  趋于零  $T''_2$ , 出现负向三角波  $O'Z''T''_2$ 。

从上面的讨论中, 我们得到这样的结论: 使 CT 饱和的一次电流曲线 2, 其对应的二次电流输出是二个圆顶三角波:  $0ZT_2$  和  $O'Z''T''_2$ 。

曲线 3 的一次电流更大, 到达 CT 饱和线  $B$  的时间更快,  $0T_3$  更短。二个三角形  $0YT_3$ 、 $O'Y'T'_3$  底更窄, 三角形的面积更小。

所以, CT 深度饱和以后, 二次电流是以饱和线  $B$  为限点的圆顶三角波, 排列在一次电流的过零点上, 方向与一次电流正弦波相一致。饱和深度越深, 三角波的底边越窄, 如图 3 所示。

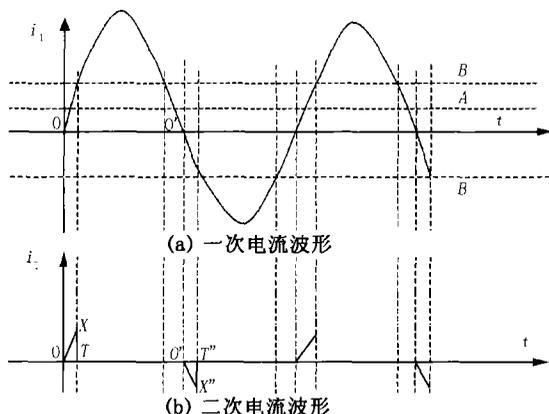


图 3 CT 深度饱和下的一次电流和二次电流波形

Fig. 3 Waveform of primary current and secondary current in very saturation of CT

我们用  $S_{\Delta}$  来代表一个三角波的面积。每个半

周中, 继电器所得到的全部动作能量应当是一个三角波的面积:  $S_{\Delta}$ 。

很显然, 对于已使 CT 饱和的正弦波电流  $i = \sqrt{2} C \sin x$ , 要推动电磁型电流继电器能动作, 从能量的角度看, 二次电流一定要满足:

$$S_{\Delta} \geq S_A, \quad \text{又因为 } S_A = 2\sqrt{2}A$$

$$\text{所以必须: } S_{\Delta} \geq 2\sqrt{2}A.$$

我们用  $\int_0^x \sqrt{2} C \sin t dt$  来近似  $S_{\Delta}$  的面积, 则有:

$$S_{\Delta} = \int_0^x \sqrt{2} C \sin t dt = \sqrt{2} C (1 - \cos x)$$

$$\sqrt{2} C (1 - \cos x) \geq 2\sqrt{2}A, \quad C(1 - \cos x) \geq 2A, \text{ 所以,} \\ (1 - \cos x) \geq 2A/C \quad (3)$$

因为  $i = \sqrt{2} C \sin x$  与  $B$  线相交,  $B = \sqrt{2} C \sin x$ , 所以有:  $\sin x = B/\sqrt{2}C$ ,

$$x = \arcsin = B/\sqrt{2}C \quad (4)$$

将式(4)代入式(3), 解得  $C$  值的最大值:

$$C \leq \frac{8A^2 + B^2}{8A} \quad (5)$$

因为 CT 的饱和值  $B$  应当是  $-10\%$  ( $-5\%$ ) 倍数  $K$  的  $\sqrt{2}$  倍, 即:

$$B = \sqrt{2}K, \text{ 代入式(5)得:}$$

$$C \leq \frac{4A^2 + K^2}{4A} \quad (6)$$

又因为  $C$  必须大于  $A$ , 继电器才能动作, 所以得到电磁型继电器的整个动作范围:

$$A \leq C \leq \frac{4A^2 + K^2}{4A} \quad (7)$$

式(5)说明, CT 最大允许电流倍数  $C$  受 CT 饱和和倍数  $B$  和继电器整定电流  $A$  的限制。

式(6)说明,  $C$  值的最大值受到 CT 的  $-10\%$  倍数  $K$  和继电器整定电流  $A$  值的限制。

式(7)是正弦波电流  $i = \sqrt{2} C \sin x$  能使电磁型继电器动作条件判别范围。

根据式(6), 可以得到厂用变电磁型电流保护最大允许电流倍数  $C$  如表 1 的数据 (150/5, 5P/20 的 CT)。

表 1  $C$  与  $K$ 、 $A$  的关系之一

Tab. 1 The relation of  $C$  with  $K$  and  $A$

		K = 20												
整定值 A		0.5	1	2	3	3.7	5	7	7.6	8	9	10	15	20
$C \leq \frac{4A^2 + K^2}{4A}$		200.5	101	52	36.3	30.7	25	21.3	20.8	20.5	20.1	20	20*	20*

从表 1 和式(6),我们可以得到以下几个结论:

(1) 以  $K$  为  $-10\%$  误差倍数的 CT,CT 所能输出的最大二次电流积分面积  $S_{\Delta\text{MAX}} = 2\sqrt{2}K$ ;

(2) 对于正弦波一次电流  $i = \sqrt{2}C\sin t$ ,若  $C > K$ ,CT 所能输出的最大二次电流积分面积就小于  $S_{\Delta\text{MAX}} = 2\sqrt{2}K$  的一半;

(3)  $A$  值由小变大, $C$  值则由大变小。当  $A = 1/2K$ ,则  $C = K$ 。这样,依  $A$  值的大小,CT 形成了二个工作区域:允许饱和工作区: $0 < A < 1/2K$ ;不允许饱和工作区: $1/2K \leq A \leq K$ ;

(4) 在不允许饱和工作区  $1/2K \leq A \leq K$ ,继电器的整定动作面积  $S_A > \sqrt{2}K$ 。对于正弦波电流  $i = \sqrt{2}C\sin t$ ,若  $C > K$ ,表明 CT 已进入饱和状态。这时,CT 所能提供的最大二次电流面积已不可能大于  $\sqrt{2}K$ 。所以继电器动作不了;

(5) 在允许饱和工作区  $0 < A < 1/2K$ ,CT 的饱和深度也不是无限制的。它受继电器定值  $A$  的限制。 $A$  越小,CT 允许饱和倍数就大; $A$  越接近  $1/2K$ ,CT 允许饱和倍数就小。

例如,图 1 中厂用变  $D_1$  处金属性故障时, $I_{D_1}^{(3)} = 16.692 \text{ kA}$ ,该电流是 CT 额定电流 150A 的 111 倍,即  $C_{\text{max}} = 111$ 。而速断定值 1200 A,是 CT 额定电流的 8 倍, $A = 8(1200 \text{ A}/150 \text{ A})$ 。要使速断继电器动作,根据式(6)和表 1, $C \leq 20.5$  的条件一定要满足;同样,过流  $A = 3.7$ , $C \leq 30.7$  的条件也要满足。而  $D_1$  处, $C_{\text{max}} = 111$ ,远大于这两个保护的  $C$  值范围。所以当  $D_1$  处发生稳态金属性故障时,过流和速断这两个保护均不能动作。

速断保护只保护了变压器低压侧算起的五分之一( $20.529/111 = 18.5\%$ )以下的故障,变压器的近高压侧的五分之四及 6 kV 电缆故障都不能动作;过流也只保护了变压器低压侧的不足三分之一( $29/111 = 26\%$ )及过负荷。变压器高压侧及 6 kV 电缆故障,过流保护无法动作。

结论很清楚,由于上述 CT 的不合理配置,其结果是:厂用变高压侧及 6 kV 电缆发生金属性稳态故障时,速断和延时过流保护均不能动作。

### 3 解决办法

#### 3.1 降低 $A$ 值

为了满足式(6)条件,使继电器动作,办法之一是降低  $A$  值。降低  $A$  值可以大大提高  $C$  值限额。

定值线  $A$  是整定电流对于 CT 额定电流的倍数,整定电流是计算值,是不能改变的。所以,降  $A$  就只能是增加 CT 的变化。比如,上例中,将 CT 变比改为 450/5,速断和过流的  $A$  值分别从  $A = 8$ 、 $A = 3.7$  降为  $A = 2.67(1200/450)$  和  $A = 1.22(550/450)$ ,二者的  $C_{\text{max}}$  值也分别从  $C \leq 20.5$ 、 $C \leq 30.7$  上升为  $C \leq 87$  和  $C \leq 40$ ,均大于  $D_1$  处  $C$  的新值  $C_{\text{new}} = 37(16692/450)$ 。这样,只要把 CT 的变比改为 450/5, $D_1$  处短路时,尽管 CT 仍有一定程度的饱和,但此时二次电流的积分面积  $S_x$ ,已经大于整定值  $S_A$ ,即  $S_x \geq S_A$ ,所以,29 号厂变电磁型电流继电器的速断和过流保护均能正确动作。

所以,降  $A$ :提高 CT 变比,这是办法之一。

#### 3.2 提高 $K$ 值

式(6)表明,提高  $K$  值也可以提高  $C$  值。例如,上例中,将  $C = 111$ 、 $A = 8$  代入式(6),解出  $K \geq 57.4$ 。也就是说,只要  $K \geq 57.4$ ,就能满足速断的动作条件,也就同时满足了过流的动作条件。取整后  $K = 60$ ,使得表 2:

表 2  $C$  与  $K$ 、 $A$  的关系之二  
Tab.2 Other relation of  $C$  with  $K$  and  $A$

整定值 $A$	$k = 60$											
	1	2	3	3.7	5	8	10	20	30	40	50	60
$C \leq \frac{4A^2 + K^2}{4A}$	901	452	303	248	185	120	100	65	60	60*	60*	60*

表 2 说明, $K = 60$ ,厂用变的速断保护  $A = 8$ , $C_{\text{max}} = 120$ ,过流保护  $A = 3.7$ , $C_{\text{max}} = 248$ ,均大于  $D_1$  处  $C = 111$ ,二者都能动作。所以,CT 的变比 150/5 保持不变,而仅将 CT 的型号调整为 5P/60,也能保证电磁型电流继电器在一定饱和范围内的正确动作。提高  $K$  值,这是办法之二。

### 4 CT 深度饱和的设计更不适合于微型保护

微机保护普遍采取对波形的采样原理,所以,CT 深度饱和的设计更不适合于简单的微型保护。这一点,我想用不着再进行什么讨论就会有共识的。试想,在深度饱和状态下,二次电流已经呈现间断的三角波,简单的微型电流保护怎么能正确采样、正确动作? 因此,图 1 的设计显然是不合理的。

对于  $i = \sqrt{2}C\sin t$ ,要使电磁型电流继电器正确动作,允许 CT 有适度的饱和, $C$  值可适度超过  $K$  值,但受下式规范:

$$A \leq C \leq \frac{4A^2 + K^2}{4A} \quad (7)$$

而简单微型电流保护,  $C$  值则不允许超  $K$ , 受下式规范:

$$A \leq C \leq K \quad (8)$$

## 5 结束语

(1) 上述算法的误差估算

上述算法中, 三角波的面积是以  $S_{\Delta} = \int_0^x \sqrt{2} C \sin t dt = \sqrt{2} C (1 - \cos x)$  近似的, 把  $S_{\Delta}$  的顶点当作尖顶而不是圆顶来处理的, 所以 CT 饱和后第一个  $S_{\Delta}$  的实际面积要小于  $\int_0^x \sqrt{2} C \sin t dt$  的积分面积; 而第二个三角波开始的前沿, 二次电流已略有输出, 二次电流数值与 CT 剩磁的大小有关, 这部分面积能弥补  $S_{\Delta}$  圆顶部分的损失, 所以用积分的面积  $S_{\Delta} = \int_0^x \sqrt{2} C \sin t dt = \sqrt{2} C (1 - \cos x)$  来近似实际电流的面积, 其误差范围应当不会很大。

(2) 从暂态角度看, 因为任何故障发展都有量的变化过程。故障开始时, 电流较小,  $C$  值还不大, 此时继电器可能动作。但一旦发展到金属性稳态阶段, 电流很大, CT 深度饱和,  $C$  值超过式(7)、(8)的范围, 本级保护拒动, 只有越级跳闸。备用电源自投后, 若此时弧光仍在, 结果只能是停发电机。

(3) CT 应作以下改进:

① 减小  $A$  值(提高 CT 变比)。

依照式(6),  $N \geq 450$  就能保证电磁型电流继电器动作; 依照式(8),  $N \geq 835 (16692/20 = 834.6)$  才能

保证微型保护正确采样。所以, 兼顾电磁型保护和微型保护二者均能正确工作, 统一取  $N = 1000$  是合适的。把 CT 的变比更换为 1000/5 (5P/20 标准不变), 电磁型和微型保护均能满足要求。

② 同时降  $A$  和升  $K$ 。

因为, 若改变  $K$  值, 依照式(7),  $K \geq 60$ , 就能保证厂用变电磁型继电器动作; 依照式(8),  $K \geq 111 (C_{\max})$  才能保证除尘变微型保护正确采样。CT 变比不同, 对于同一个  $I_{D1} (3) = 16.692 \text{KA}$ , 就有不同的  $C_{\max}$ , 因而就需要不同的  $K$  值, 如图 1 中, 对于 150/5, 400/5, 100/5 三种 CT,  $K$  分别大于或等于 111, 42, 167。  $K$  统一于最大值(167), 显然不经济。所以此法上策是先统一在一个较小的变比, 如 450/5, 再统一取  $K = 40$ 。即选取 450/5, 5P/40 的 CT。

这样改变后, 图 1 中的电磁型保护和微型保护, 都有了一个合适的 CT 环境。换言之, 从稳态角度看, 图 1 中的各设备在  $D_1$  处故障时, 其 CT 不会进入饱和状态。

## 参考文献

- [1] 杨干承. 电流互感器的饱和对继电保护动作的影响[J]. 水利电力部华东电力设计院院刊, 1987, (6): Y87 - D67.
- [2] 程利军, 龙翔, 杨奇逊. 基于采样值的 CT 饱和检测方案的研究[J]. 继电器, 2000, (8): 19 - 21.

## 作者简介:

张吕根(1945 - ), 男, 高级工程师, 从事继电保护工作。

## The influence of CT saturation on the operating of relay protection

ZHANG Lv-gen

(Wangting Power Plant, Suzhou 215155, China)

**Abstract:** There are two different points of view on whether current relay operates correctly or not, when CT saturates. Such kind of thing also exists in the practical application and design. Is CT saturation allowed? How many times of CT saturation does the current relay not operate at correctly? In fact the problem has never been solved. This article gets a formula:  $A \leq C \leq \frac{4A^2 + K^2}{4A}$ , basing on integral calculation of sine wave current area. The formula indicates a range in which current relay operates correctly, while  $K$  is the times of -10% error of CT,  $A$  is the set value of relay,  $C$  is the maximum current times of CT. And this is the math result of the problem.

**Key words:** CT saturation; current relay; electromagnetic relay protection; microprocessor based protection

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告