

电流互感器的暂态饱和及应用计算

袁季修, 盛和乐

(华北电力设计院, 北京 100011)

摘要: 讨论保护用电流互感器的暂态饱和及工程应用中的问题。互感器暂态饱和对保护装置性能有严重影响, 为保证继电保护在暂态饱和条件下正确动作, 工程应用中应合理选用电流互感器的类型和参数, 保护装置必要时应采取减缓互感器饱和影响的措施。文中还列举大型发电机变压器组差动保护用电流互感器的选择计算示例。

关键词: 电流互感器; 饱和; 短路电流偏移; 暂态特性; 准确限值; 继电保护

中图分类号: TM452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2002)02-0001-05

1 前言

保护用电流互感器要求在规定的二次电流范围内, 二次电流的综合误差不超出规定值。对于有铁心的电流互感器, 形成误差的最主要因素是铁心的非线性励磁特性及饱和。电流互感器的饱和可分为两类: 一类是大容量短路稳态对称电流引起的饱和(以下称为稳态饱和); 另一类是短路电流中含有非周期分量和铁心存在剩磁而引起的暂态饱和(以下称为暂态饱和)。这两类饱和的特性有很大不同, 引起的误差也差别很大。在同样的允许误差条件下, 考虑暂态饱和和要求的互感器铁心截面可能是仅考虑稳态饱和的数倍至数十倍。因而对互感器造价及安装条件提出了严峻的要求。以往在中低压系统和发电机容量较小的情况下, 互感器暂态饱和的影响较轻, 一般未采取专门对策。而对当前的超高压系统和大容量机组, 为保证继电保护的准确动作, 暂态饱和已成为必须考虑的因素。由于互感器暂态饱和的机理和计算较复杂, 要求互感器暂态不饱和和所需代价很高, 因而在实际工程中应用情况较混乱。本文根据国内外的标准和应用经验, 提出较规范的考虑暂态饱和的互感器选择和计算方法, 供工程应用参考。作为示例, 本文给出大型发电机变压器组差动保护用电流互感器的选择计算及参数选择的建议。

2 电流互感器的稳态饱和特性及对策

当电流互感器通过的稳态对称短路电流产生的二次电动势超过一定值时, 互感器铁心将开始出现饱和。这种饱和情况下的二次电流如图1所示, 其特点是: 畸变的二次电流呈脉冲形, 正负半波大体对称, 畸变开始时间小于5ms(1/4周波), 二次电流有效值将低于未饱和和情况。对于反应电流值的保护, 如过电流保护和阻

抗保护等, 饱和将使保护灵敏度降低。对于差动保护, 差电流取决于两侧互感器饱和特性的差异。

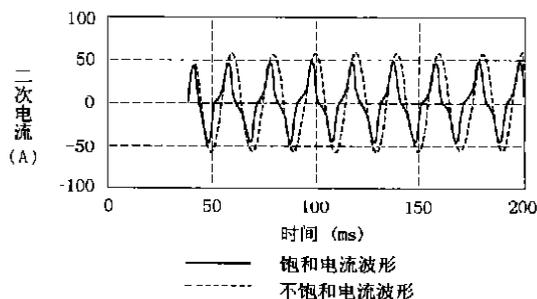


图1 电流互感器稳态饱和二次电流下的波形

例如某一1200/5的电流互感器, 制造部门提供的规范为^[1]: 5P20, 30VA。其中5P为准确等级, 30VA为二次负荷额定值, 20为准确限值系数(ALF)。电流互感器在额定负荷下的二次极限电动势 $E_s = (ALF) \cdot I_{sn} \cdot (R_{ct} + R_{bn})$, 此时综合误差应不超过5%。综合误差也可选用10%。选择保护用电流互感器时, 一般要求ALF与额定一次电流乘积大于保护校验用短路电流, 二次负荷小于互感器额定负荷, 实际二次电动势不超过极限二次电动势。当前工程中经常遇到的问题是短路电流过大, ALF不满足要求, 但实际负荷比额定负荷小得多。对于低漏磁电流互感器^[2], 可以在实际负荷下的二次电动势不超过极限值的条件下, 适当提高ALF的可用值。但应指出, 对于某些不符合低漏磁要求的互感器, 如U型电流互感器、一次多匝的互感器等, 在一次短路电流倍数超过ALF时, 由于铁心局部饱和可能引起二次极限电动势降低, 不能在降低二次负荷时, 按反比提高ALF。有些制造厂提供的ALF与负荷的关系曲线, 未认真考虑上述局部饱和影响, 使用时应慎重。

3 电流互感器的暂态饱和

短路电流一般含有非周期分量,这将使电流互感器的传变特性严重恶化。原因是电流互感器的励磁特性是按工频设计的,在传变等效频率很低的非周期分量时,铁心磁通(即励磁电流)需要大大增加。图2表示电流互感器在完全偏移的故障电流(非周期分量幅值达100%)下铁心磁通的增长情况,互感器带电阻性负荷。图中 ϕ_{ac} 代表传变故障电流工频分量所需的磁通,而 ϕ_{dc} 则代表传变暂态(非周期)分量所需的磁通,其值远大于传变工频分量的 ϕ_{ac} 。磁通暂态分量 ϕ_{dc} 是系统一次回路时间常数 T_p 和电流互感器二次回路时间常数 T_s 的函数。 ϕ_{dc} 开始时是按 T_p 增长。磁通达到最大值的时间和数值与 T_p 、 T_s 等有关。

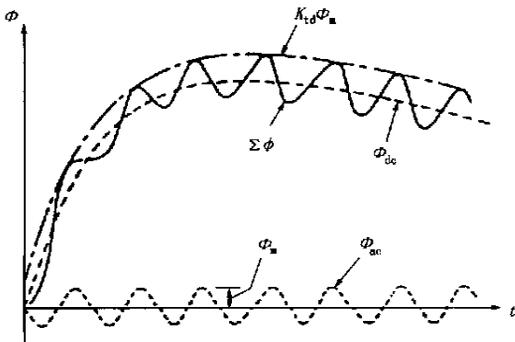


图2 电流互感器暂态饱和铁心中磁通变化情况

按是否考虑短路电流的暂态过程,电流互感器分为P和TP两大类。P类电流互感器要求在 ϕ_{ac} 情况下不饱和,而TP类电流互感器则要求在整个工作循环中的总磁通 $\Sigma = \phi_{ac} + \phi_{dc}$ 情况下不饱和。因此要求TP类电流互感器的铁心远大于P类电流互感器。要求增大的倍数即暂态面积增大系数 K_{td} 。

由标准^[2]可知,对于全偏移短路电流,在C-t-O工作循环时,所需暂态面积系数为:

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

在C-t-O-t_{tr}-C-t-O工作循环时,所需暂态面积系数为:

$$K_{td} = \left[\frac{T_p T_s}{T_p - T_s} \left(e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_s}} \right) - \sin t \right] \times e^{-\frac{t_{tr}+t}{T_s}} + \frac{T_p T_s}{T_p - T_s} \left(e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_s}} \right) + 1 \quad (2)$$

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,对于P级、TPS和TPX级电流互感器, $T_p \ll T_s$,短路电流为全偏移情况下,短路后不同时间 t 的 K_{td} 与 T_p 关系见图3(图中 $T_s = 10s$)。在 T_p 较大时, K_{td} 可达几十倍。

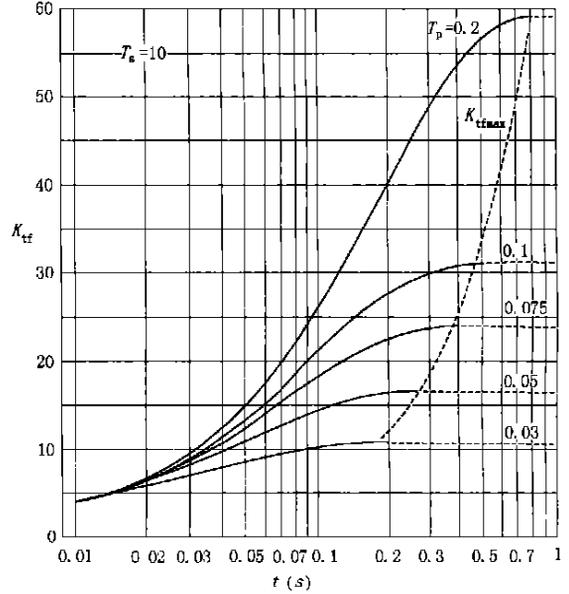
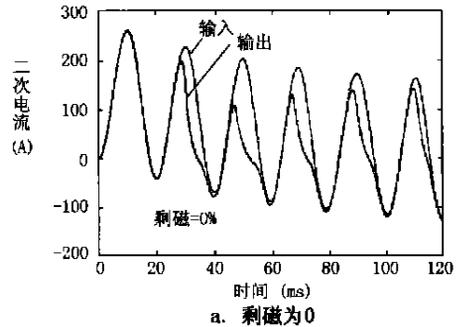
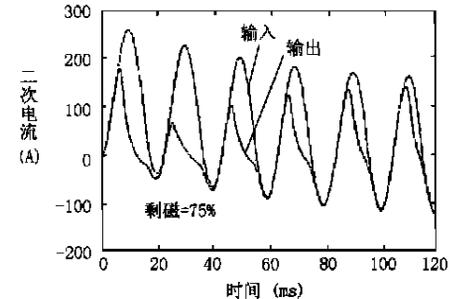


图3 暂态面积系数 K_{td} 与 T_p 的关系

当一次电流存在非周期分量导致互感器暂态饱和时,二次电流的波形示例如图4。图中 T_p 为50ms, R_{2n} 为4, R_2 为2。图4(a)为互感器无剩磁的情况,图4(b)为互感器有75%剩磁的情况。



a. 剩磁为0



b. 剩磁为75%

图4 电流互感器有剩磁时的暂态饱和和二次电流波形

由图4可知,非周期分量导致互感器暂态饱和时二次电流波形是不对称的,开始饱和的时间较长,如图4(a)为30ms。但铁心有剩磁时,将加重饱和程度和缩短开始饱和时间,如图4(b),饱和开始时间为6ms。

对铁心中剩磁的影响必须给予足够的注意,因为电流互感器由于短路电流引起暂态饱和形成剩磁后,在正常运行的电流情况下,剩磁很难消除。文献[3]列举了在一个230kV系统141组电流互感器的调查结果如表1,可见各种程度的剩磁存在概率都是很大的。

表1 剩磁调查结果

剩磁为饱和磁通的 %	互感器百分数 %
0-20	39
21-40	18
41-60	16
61-80	27

为了减缓暂态饱和对继电保护的影响,需要采取必要的措施。这种措施有两类:一类是保护装置具备减缓饱和影响的能力;另一类是选择适当的电流互感器类型和参数。

4 保护装置减缓互感器暂态饱和影响的措施

母线外部故障时,各支路的短路电流分布可能很不均匀,饱和情况可能很不一致。为保证母线差动保护的正确动作,要求母线差动保护装置必须采取措施减缓暂态饱和影响,并不对电流互感器提出特殊要求。这已成为定论并得到普遍执行。

对于其它保护,如发电机差动保护、变压器差动保护等,则未有明确规定。当前国内生产的保护装置一般未采取专门措施,而需要在选择电流互感器时,考虑暂态饱和的影响。某些国外产品已声明采取了相应措施,而不再对互感器提出特殊要求。

保护装置采取的措施,使用较广泛的有高阻抗母线保护,以提高差动继电器阻抗和利用饱和和互感器分流来防止区外故障误动。还有利用互感器暂态饱和有一定延时来区别差动保护中的差电流是由内部故障产生还是由饱和产生等等。本文不准备详细讨论保护装置防止互感器饱和引起误动的各种措施。只想着重指出,在当前普遍应用微机保护条件下,保护装置完全有可能采用多种有效措施来减缓暂态饱和的影响,因而可对互感器选择不提出特殊

要求。这样可产生重大经济效益。所以,希望继电保护开发制造部门能在这方面取得更积极有效的成果。

还需要指出的是互感器暂态饱和与稳态饱和的特性有很大差别,反映在二次电流的波形也很不相同,因而采取的措施也应注意区别对待。例如利用故障与饱和出现的时间差时,暂态饱和与故障时差可能较明显,而稳态饱和与故障时差则较小($< 5\text{ms}$)。

5 考虑暂态饱和的电流互感器选择原则

电流互感器暂态饱和问题是普遍存在的,但不同情况下严重程度有所差别,所导致的后果也不同。如普遍要求选用的电流互感器保证暂态过程中不致饱和,则将大大增加投资。实际上,许多工程中选用的一般电流互感器虽未能完全满足暂态特性要求,但也可能有一定暂态储备,运行经验表明,很多情况下采用一般互感器也是可接受的。因此,选择保护用电流互感器时,应根据互感器所在系统暂态问题的严重程度,所用保护装置的特性及暂态饱和可能引起的后果等因素,慎重确定。

(1) 500kV 系统电流互感器选择

500kV系统和高压侧为500kV的变压器或发电机变压器组,由于一次时间常数较大(100ms以上),电流互感器暂态饱和可能较严重,由此导致保护误动或拒动的后果严重。因此,除保护装置本身能保证不受互感器暂态饱和影响的情况外,所选电流互感器应能满足暂态性能要求。

500kV线路一般保护宜选用带小气隙的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。断路器失灵保护不宜使用TPY级电流互感器,可选用TPS级或5P等电流可较快衰减的互感器,但应注意防止互感器饱和时电流检测元件拒动。

高压侧为500kV的发电机变压器组,高压侧母线一般为一个半断路器接线,差动保护回路500kV侧宜选用TPY级电流互感器,低压侧发电机中性点及出线端空间较紧张,装设TP类电流互感器可能存在困难,但穿越故障电流较小,一般不超出3倍额定电流。因此,为与高压侧匹配,差动保护用电流互感器在满足暂态特性要求下可选用带小气隙的5PR级电流互感器^[4]。暂态性能可按外部三相短路C-O工作循环进行验算。

高压侧为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。

(2) 220kV 系统电流互感器选择

220kV 系统的暂态问题($T_p = 60\text{ms}$)及其影响后果比 500kV 系统相对较轻,适当降低保护用电流互感器的暂态特性要求是可以接受的。以往在 220kV 系统有大量按稳态特性选用的电流互感器运行经验,但通常这些互感器的短路电流倍数和二次负荷选择留有一定裕度。因此,220kV 系统一般可按稳态特性选用 P 类、PR 类和 PX 类电流互感器,但宜适当提高所用电流互感器的准确限值系数(ALF)以减少暂态饱和影响。根据运行经验,所选互感器的准确限值系数宜大于保护校验故障电流与互感器额定电流之比的两倍,即用户给定暂态系数 $K = 2$ 。参见 IEEE Std C37.110-1996 等规定。

高压侧为 220kV 的发电机变压器组或主变压器,虽然外部故障穿越短路电流倍数不大,但一次时间常数可能较大(发电机和发电机变压器组的 T_p 可能达 150 ~ 250ms),短路暂态可能较严重。其差动保护的各侧电流互感器除参照上述 220kV 重要线路,在按稳态特性选用电流互感器时,适当提高所选的 ALF 外。还应特别注意各侧电流互感器特性及二次负荷的协调匹配。

(3) 母线保护用电流互感器的选择

由于高压母线短路电流很大,而且外部故障时流过各互感器的电流差别也可能很大,母线差动保护用电流互感器的选择,很难满足各种外部故障下的暂态特性要求。一般需要保护装置采取必要的减轻互感器暂态饱和影响的措施。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。

(4) 110kV 及以下系统电流互感器选择

110kV 及以下系统由于暂态问题及其影响相对较轻,电流互感器一般按稳态条件选择,采用 P 类互感器。对于发电机或发电机变压器组,可参照上节的原则选用适当的电流互感器。

6 发电机变压器组差动保护电流互感器的选择示例

设发电机组容量为 600MW,机端电压为 20kV, $\cos = 0.9$ 。升压变压器组高压侧为 500kV,母线为一个半断路器接线。高压侧短路时,通过机组的高压侧短路电流为 2.1kA, $T_p = 0.2\text{s}$;系统供给的短路

电流为 38kA, $T_p = 0.1\text{s}$ 。

(1) 高压侧机组额定电流为 734A,电流互感器采用 TPY 级。考虑系统穿越电流大,变比选为 2500/1, $K_{ssc} = 20$, $T_p = 0.1\text{s}$, $R_{ct} = 9$, $R_{bn} = 15$, $T_s = 0.8\text{s}$ 。保证的工作循环为 C-0.1s-O-0.5s-C-0.04s-O。根据(2)式,可求出其额定暂态面积系数 K_{td} 如下:

$$K_{td} = \left[\frac{T_p T_s}{T_p - T_s} \left(e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_s}} \right) - \sin t \right] \times e^{-\frac{t_c + t_{al}}{T_s}} + \frac{T_p T_s}{T_p - T_s} \left(e^{-\frac{t_{al}}{T_p}} - e^{-\frac{t_{al}}{T_s}} \right) + 1 = \left[\frac{314 \times 0.1 \times 0.8}{0.1 - 0.8} \left(e^{-\frac{0.1}{0.1}} - e^{-\frac{0.1}{0.8}} \right) - \sin 31.4 \right] e^{-\frac{0.5+0.04}{0.8}} + \frac{314 \times 0.1 \times 0.8}{0.1 - 0.8} \left(e^{-\frac{0.04}{0.1}} - e^{-\frac{0.04}{0.8}} \right) + 1 = 20.5$$

由此求出电流互感器额定等效二次极限电动势为:

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

由于实际二次负荷为 10,求得实际二次时间常数 T_s 如下:

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

系统供给的短路电流, $T_p = 0.1\text{s}$, $T_s = 1.01\text{s}$,由(2)式求出要求的暂态系数 K_{td2} 为 27.4。

机组供给的短路电流, $T_p = 0.2\text{s}$, $T_s = 1.01\text{s}$,由(2)式求出要求的暂态系数 K_{td1} 为 34.9。

要求的总等效暂态面积系数为:

$$K_{td} = 34.9 \times \frac{2100}{40100} + 27.4 \times \frac{38000}{40100} = 27.8$$

要求所用电流互感器的等效二次极限电动势 E_{al} 为:

$$E_{al} = K_{td} K_{pcf} (R_{ct} + R_b) = 27.8 \times 16.4 \times (9 + 10) = 8662.5\text{V}$$

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

对于 TPY 电流互感器还应按下式校验暂态工作中励磁电流引起的误差,要求不超出 10%

$$= i_c / i_{psc} = 100 K_{td} / (T_s) \% = 100 \times 27.8 / (314 \times 1.01) \% = 8.8\%$$

(2) 发电机变压器组低压回路电流互感器的选择。低压侧额定电流为 19.3kA,取低压侧互感器为 2500/1,高压侧短路时流过低压侧的短路电流为

2100 × 525/20 = 55125A。设高低压侧变比误差由差动继电器抽头或软件实现补偿。电流互感器性能按外部三相短路 C-O 工作循环进行校验。如选用 P 类电流互感器,则其要求暂态面积系数 K_{td} 为:

$$K_{td} = 314 \times 0.2 e^{-0.1/0.2} + 1 = 25.7$$

设所选互感器参数为 $R_{ct} = 9$, $R_{bn} = 15$ 。实际负荷 $R_b = 10$,则电流互感器的 ALF 需要满足下式:

$$ALF = \frac{I_{ct} K_{td} (R_{ct} + R_b)}{I_{pn} (R_{ct} + R_{bn})} = \frac{55125 \times 25.7 \times (9 + 10)}{25000(9 + 15)} = 44.9$$

P 类互感器的 ALF 满足 44.9 是可能的。但如果考虑剩磁,由于 P 类互感器剩磁系数很难控制,要求保证电流互感器在暂态过程中不饱和则较困难了。较合理的方案是选用有剩磁限值的 5PR 电流互感器,ALF > 50。5PR 已纳入新的 IEC 标准^[4],规定其剩磁系数小于 10%,这样,低压侧互感器可以与高压侧 TPY 特性较好地匹配。但 PR 类互感器励磁阻抗较低,即 T_s 值较低,需按上述 TPY 的类似方法校验暂态工作中励磁电流引起的误差,不应超出 10%。

7 小结

电流互感器的暂态饱和严重影响其传变特性,为保持暂态综合误差于规定范围,互感器铁心可能需要增大几倍至几十倍。严重影响造价,不利于安装。

工程设计选择电流互感器时是否考虑暂态饱和,应根据系统中暂态饱和的出现条件和后果的严重程度,区别对待。一般 500kV 系统宜要求电流互

感器在短路暂态中不饱和;220kV 系统及某些重要回路可适当提高互感器饱和电压以减轻暂态饱和影响;其它系统允许不考虑暂态饱和问题。

电流互感器的剩磁严重影响其饱和特性,而且正常运行不易消磁。因此,对某些要求特性严格匹配的电流互感器(如差动保护),宜尽量选用有剩磁限值的互感器。除 TPY 外,P 类互感器中有剩磁限值的 PR 型已正式纳入 IEC 标准^[4],可以应用。

如保护装置本身采取了措施减缓互感器暂态饱和的影响,则电流互感器可不再考虑暂态饱和问题。在当前普遍使用微机保护的条件下,保护采取措施在很多情况下都是可行的。如母线保护已普遍设有防止互感器饱和导致误动的措施。国外有些发电机和变压器的差动保护也有防止互感器饱和和引起误动的措施。因此,这方面还有很大的改进潜力。

参考文献:

- [1] GB 1208—1997(eqv. IEC 185-1987),电流互感器[S].
- [2] GB 16847—1997(idt. IEC 44-6 1992),保护用电流互感器暂态特性技术要求[S].
- [3] IEEE Std C37.110-1996,IEEE Guide for the Application of Current Transformer Used for Protective Relaying purpose [S].
- [4] IEC 60044-1. 2000,仪用互感器,第一部分,电流互感器,附件 1[S].

收稿日期: 2001-07-24

作者简介: 袁季修(1929-),男,教授级高工,从事电力系统继电保护及自动化设计和科研工作; 盛和乐(1935-),男,教授级高工,从事发电厂、变电所电气及自动化设计和科研工作。

The transient saturation of current transformer and its application calculation

YUAN Ji-xiu, SHENG He-le

(North China Electric Power Design Institute, Beijing 100011, China)

Abstract: The transient saturation of protective CT and its application are discussed in this paper. The transient saturation of CT has great influence on the performance of the protection. To ensure the relaying protections operating correctly under transient saturation, the types and parameters of CTs should be selected properly and a way to decrease the effect of CT saturation on the protection can be taken if necessary. Some calculation cases of CTs for large generator - transformer set protections are given in this paper.

Key words: CT; saturation; short circuit current shift; transient character; accurate limit; relaying protection