

# 电流互感器饱和对母线保护的影响

何奔腾 马永生 浙江大学电机系 杭州 (310027)

**【摘要】** 电流互感器饱和问题多年来一直是影响母线保护正确动作的关键问题,采用 EMTP 仿真技术对 CT 饱和问题进行了深入地研究,并在此基础上总结出了 CT 饱和的若干行为特征。根据仿真结果,着重阐述了低短路电流水平下的 CT 饱和及对母线保护的影响。

**【关键词】** CT 饱和 母线保护 仿真研究

## 引言

电力系统中的母线广泛采用电流差动式保护,采用对电流互感器二次侧电流瞬时值差动的原理,可方便地实现母线快速保护。然而在母线区外短路时,一般 CT 会出现饱和现象,CT 饱和后不能正确地传变一次侧电流,使二次侧电流差动原理的基础遭到破坏,从而导致保护的误动作。多年来 CT 饱和问题一直是影响母线保护性能的关键难题,在 1996 年召开的中国电机工程学会继电保护专委会学术年会的纪要中,已将该问题列为今后继电保护研究的重点课题之一。另外,在保护的新原理、新方法的探索研究中,也需要对 CT 饱和后的电流波形有更细致、更深入的理解。因此有必要对电流互感器的饱和行为进行深入的研究。由于 CT 饱和是非线性过程,采用解析法分析存在一定的困难,利用计算机数字仿真技术,通过大量的仿真计算是寻找 CT 饱和特征的有效方法。

本文以国产 LCLWD<sub>3</sub>-220 型 1200/5A 电流互感器为例,采用 EMTP 计算机数字仿真计算,对 CT 的饱和行为作了较细致的仿真研究,并给出 CT 饱和后一、二次侧电流波形,用以分析各种导致 CT 饱和的因素,进而找出 CT 饱和后各电流波形的特征。为新型母线差动保护原理的研究,提供有关 CT 饱和行为的仿真试验基础。

1997-12-15 收稿

## 1 影响饱和的因素

电流互感器的等效电路如图 1 所示,图中各参数均折算到二次侧,其中有关电路及磁路参数由参考文献<sup>[1]</sup>提供。考虑到一次线圈电阻和电感的值很小,可以略去不计;励磁回路的有功损耗很小,可以简化为一个非线性电感。令二次侧  $r = r_2 + r_L$ ,  $L = L_2 + L_L$ 。根据电路电压、电流关系可以列出相应的微分方程:

$$(L_m + L) \frac{di_m}{dt} + ri_m = L \frac{di_1}{dt} + ri_1 \quad (1)$$

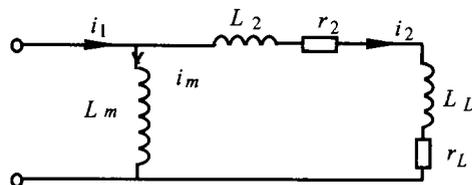


图 1 电流互感器等值电路

### 1.1 考虑一次侧电流不包含非周期分量

若一次侧电流不包含非周期分量,可表示为:

$$i_1 = I_{1m} \sin \omega t \quad (2)$$

其中  $I_{1m}$  为一次侧电流幅值。

将(2)代入(1)式,并且令  $T_2 = \frac{r}{L_m + L}$ ,

$K = \frac{L}{L_m + L}$ , 则:

$$i_m = \frac{(1-k)\omega T_2}{1 + \omega^2 T_2^2} I_{1m} e^{-\frac{t}{T_2}} + \frac{1 + k\omega^2 T_2^2}{1 + \omega^2 T_2^2} I_{1m} \sin \omega t - \frac{(1-k)\omega T_2}{1 + \omega^2 T_2^2} I_{1m} \cos \omega t \quad (3)$$

由于励磁回路电感  $L_m \gg L$ , 则  $k \ll 1$  可不

计。另外,在电流互感器额定二次负荷情况下,时间常数  $T_2$  大约为  $1 \sim 15\text{s}$ ,故  $\omega^2 T_2^2 \gg 1$ 。式(3)简化为:

$$i_m = \frac{I_{1m}}{\omega T_2} [e^{\frac{-t}{T_2}} - \cos\omega t] \quad (4)$$

式(4)中第一项为励磁电流中的非周期分量,第二项为稳态励磁电流。可以看出暂态情况下的最大励磁电流值约为稳态励磁电流的2倍。稳态励磁电流的幅值是一次侧  $\frac{1}{\omega T_2}$  倍,由于  $\omega T_2$  值很大,暂态励磁电流不大,电流互感器的铁心不会饱和。

### 1.2 考虑一次侧电流包含非周期分量的情况

在电压波形过零发生短路时,一次侧暂态电流包含最大的非周期分量,此时情况最严重,一次侧电流表达式为:

$$i_1 = I_{1m} [e^{\frac{-t}{T}} - \cos\omega t] \quad (5)$$

式中  $T$ :为一次侧系统的时间常数;

将式(5)代入式(1),同理可得:

$$i_m = I_{1m} \left[ \frac{T - kT_2}{T - T_2} (e^{\frac{-t}{T}} - e^{\frac{-t}{T_2}}) + k e^{\frac{-t}{T_2}} - \frac{1}{\omega T_2 \cos\varphi_L} \sin(\omega t + \varphi_L) \right] \quad (6)$$

式中  $\varphi_L = \text{tg}^{-1} \frac{\omega L}{r}$ ,为计及二次侧漏抗的负载阻抗角。

由式(6)可知,第一项,  $\frac{T - kT_2}{T - T_2} (e^{\frac{-t}{T}} - e^{\frac{-t}{T_2}})$ ,是由一次侧电流中的非周期分量引起的励磁电流非周期分量,这一项的幅值很大,是引起电流互感器铁芯饱和的主要原因;并且此项在  $t_{\max} = \frac{TT_2}{T - T_2} \ln \frac{T}{T_2}$  处出现最大值。

因此,根据以上分析,影响电流互感器饱和的因素主要有以下几点:

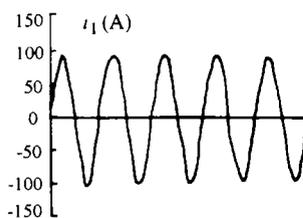
- (1) 一次侧暂态短路电流中非周期分量的大小;这与短路电流水平和短路时刻有关。
- (2) 一次侧系统的时间常数。
- (3) 二次侧负荷的大小及性质。
- (4) 电流互感器铁芯中的剩磁。由于在正常运行情况下,电流互感器铁芯工作在低密条

件下,发生短路后剩磁对电流互感器饱和影响不大,但当短路切除后,铁芯中的磁通将沿着磁滞回线下降到剩磁值,如果剩磁的极性与故障时短路电流所产生的极性相同,铁芯将更快地趋于饱和。

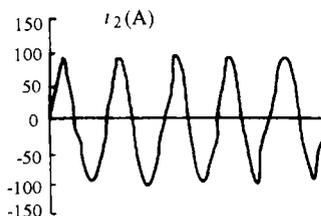
以上的分析虽然把励磁电感  $L_m$  看成线性元件来进行的,但足以说明影响电流互感器的各种因素;对于电流互感器饱和的具体情况,下面将进行进一步的仿真分析。

## 2 CT饱和的仿真研究

在电力系统设计时,考虑到母线外部发生短路时,故障元件的电流互感器流过很大的短路电流,使电流互感器的铁芯趋于饱和,励磁电流大大增加,CT电流值误差迅速增加。为了保证电流互感器及保护装置在允许的稳态短路电流下能正常工作,电流互感器被设计为在最大稳态短路电流下电流值误差不超过10%。实践中根据电流互感器10%倍数特性曲线,由最大允许的稳态短路电流确定CT二次侧负载阻抗  $Z_L$ 。从而确保CT的正常工作。我们正是以此原则来确定仿真时的短路电流水平。



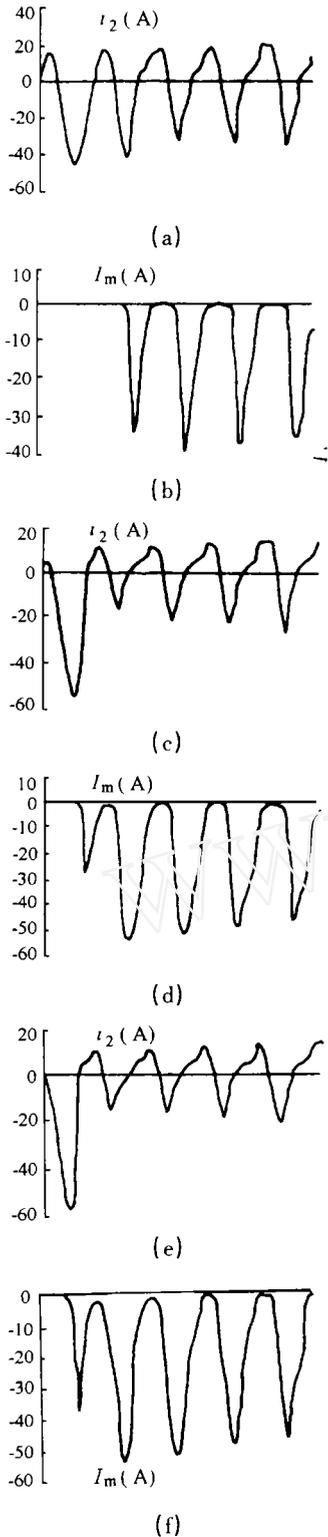
(a) 一次侧电流  $i_1$



(b) 二次侧电流  $i_2$

图2 仿真结果之一

由LCLWD<sub>3</sub>-200型1200/5A电流互感器10%倍数特性曲线可知。当二次侧负载阻抗  $Z_L = 2.8\Omega$  时,电流值误差并不超过10%的稳



(a)、(b)  $\Phi = 30^\circ$  (c)、(d)  $\Phi = 60^\circ$  (e)、(f)  $\Phi = 90^\circ$

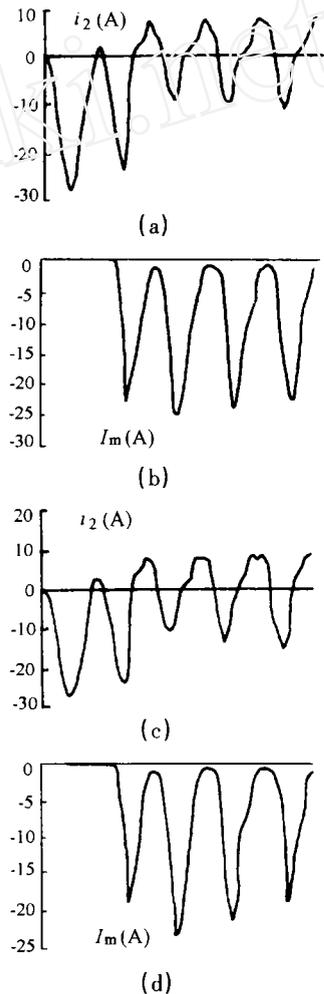
图3 仿真结果之二

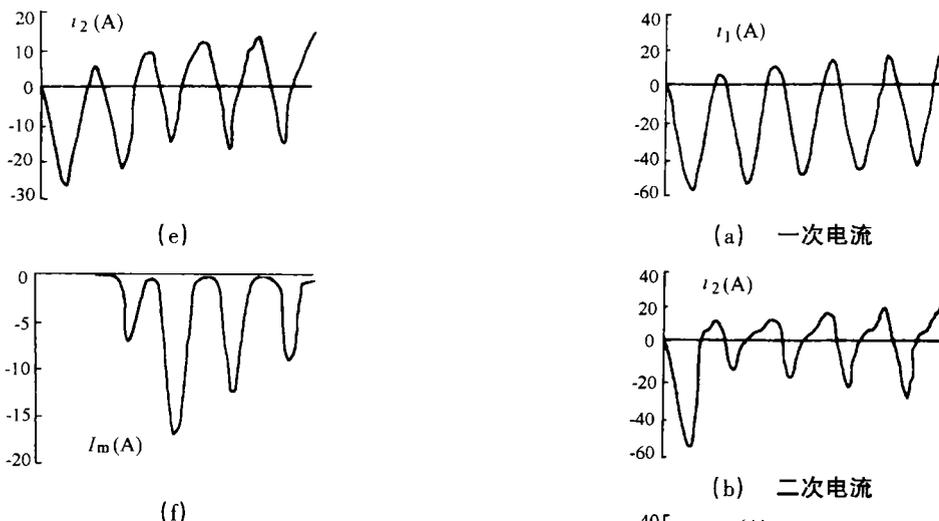
态短路电流  $I_d$  可达 16000A。这与 EMTP 的仿真结果是一致的,也与前述理论分析相吻合。其一、二次侧波形如图 2 所示,图中  $Z_L = 2.8\Omega$ 、 $I_d = 16000A$ 、 $\Phi = 0^\circ$ 。由此可见,仅由稳态短路电流并不能造成 CT 严重饱和,只有暂态短路电流中含有一定的非周期分量时,才能导致 CT 饱和。

### 2.1 非周期分量的大小对 CT 饱和的影响

当短路电流一定时,暂态电流中非周期分量的大小由短路时电流相位决定。图 3 为  $Z_L = 2.8\Omega$ 、 $I_d = 4800A$ 、 $\Phi$  分别为  $30^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $90^\circ$  时 CT 二次侧电流及励磁电流波形。

图中  $i_2$  为 CT 二次电流,  $I_m$  为励磁电流,由仿真结果可以看出,随着非周期分量的增大,饱和和发生的时刻提前,并且激磁电流增大,即饱和程度加深。





(a)、(b)  $T = 200\text{ms}$  (c)、(d)  $T = 100\text{ms}$  (e)、(f)  $T = 50\text{ms}$

图4 仿真结果之三

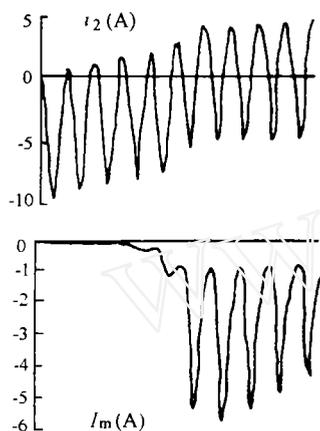
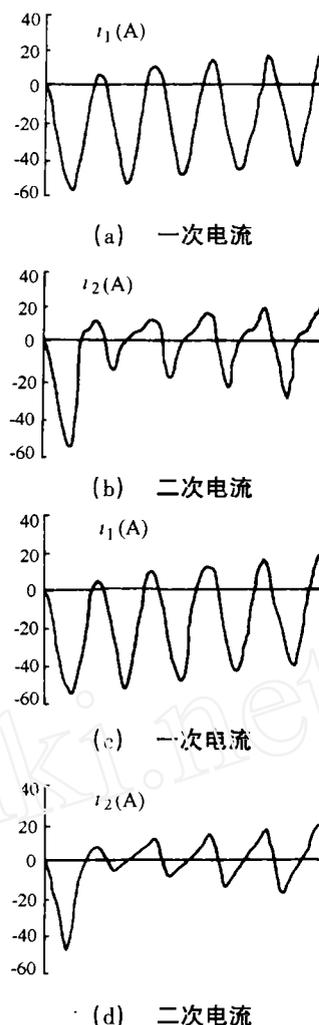


图5 仿真结果之四

### 2.2 一次系统时间常数 $T$ 对 CT 饱和的影响

由于 CT 饱和主要是由非周期分量在励磁回路逐渐建立起饱和和磁通而产生,所以一次回路时间常数的大小也是影响 CT 饱和的重要因素。图 4 是  $I_d = 4800\text{A}$ 、一次回路时间常数  $T$  分别为  $200\text{ms}$ 、 $100\text{ms}$ 、 $50\text{ms}$  时 CT 饱和情况。

由仿真结果可以看到,当  $T$  较大时 CT 的饱和持续时间较长,而且饱和也较严重。可以想象,当一次系统的  $T$  较大时,由于非周期分量电流在 CT 的励磁线圈内有足够长的增长时间,即便短路电流不大,也可使 CT 产生较为严重的饱和,如图 5 所示,对于  $1200/5\text{A}$  的电流互感器,  $I_d = 800\text{A}$  时仍能产生严重饱和,饱和现象大约出现在短路后  $100\text{ms}$  以后,并且持续时间很长。



(a)、(b)  $R_L = 5\Omega$  (c)、(d)  $R_L = 3 + j4\Omega$

图6 仿真结果之五

### 2.3 CT 二次侧负载对 CT 饱和的影响

较大的二次侧负载阻抗更易使 CT 进入饱和,这是很明显的,可以很方便地从 CT 的 10% 倍数曲线或等值电路中分析得出。另外,CT 二次侧负载性质的不同也会对二次电流波形产生一定的影响。图 6 是  $I_d = 9600\text{A}$ ,二次侧负载阻抗分别为  $5\Omega$  和  $3 + j4\Omega$  的仿真结果。可以看到 CT 饱和后二次侧电流不能跟随一次侧电流的变化,若  $Z_L$  为纯电阻,在饱和点后  $i_2$  迅速从瞬时值下降到零,并且在过零后很快跟随  $i_1$  的变化;若为感性负载,则  $i_2$  从瞬时值逐渐下降到零,并且在过零后不能很快跟随  $i_1$  的变化。也就是说 CT 饱和时二次侧电流的变化率受二次

侧负荷性质的影响。

### 3 特征分析

根据以上的仿真分析,对 CT 饱和现象可以初步归纳出以下几点基本特征,并对一些特征进行进一步的说明:

(1) 短路发生后,暂态短路电流并不能立即使 CT 产生饱和,这段时间的长短与非周期分量的大小有关,从仿真结果观察,无论短路条件如何在短路发生的最初 1/4 周期内 CT 并不会饱和,如果母线保护动作足够快,便可作出正确判断。

(2) CT 饱和时,励磁电流  $i_m$  迅速增大,而  $i_m$  的变化会反映在二次侧的差动不平衡电流中。由于 CT 饱和总是在短路发生后延迟一段时间产生,所以利用检查差动电流的突增滞后于短路时刻,可判定 CT 发生饱和,这一点已有报道<sup>[2]</sup>。

(3) 在一次侧时间常数  $T$  较大,即便短路电流较小,CT 也会发生较严重的饱和,而且此时饱和发生的时刻滞后很多,大约出现在短路后 10ms 以外。我们认为这一现象对母线保护会产生严重影响,应引起足够的重视。例如某些母线保护的原理是当判定为区外故障后,采用闭锁一段时间再开放保护。若闭锁时间不恰当,则有可能发生误动。因此,应考虑相应的解决方法。

(4) CT 饱和后,二次侧电流波形出现缺损,在饱和点附近二次侧电流的变化率突增。这一点可以用于判定 CT 的饱和点,详细报道见文献<sup>[3]</sup>,但要注意 CT 二次负荷性质对二次电流变化率的影响。

(5) 非周期分量引起的 CT 饱和,使得 CT 励磁电流中包含大量的非周期分量,励磁电流总是偏在时间轴的一边。同样,母线区外故障时母差保护的差动电流也有相同的特征。因此,该特征可以用来区分母线区内、区外故障。

(6) CT 饱和后,二次侧电流波形发生严重畸变,一周波内波形的对称性被破坏,采用

分析波形的对称性可以判定 CT 是否饱和。

### 4 结论

本文通过对 CT 饱和的仿真计算可以看出,引起 CT 饱和的因素是多方面的,如短路电流非周期分量的大小、一次系统的时间常数的大小、二次侧负荷大小及铁芯剩磁等;而且 CT 饱和发生的时刻及饱和持续的时间等,受短路发生的随机因素影响很大,从仿真结果看,CT 饱和可能出现在短路后 6~150ms 范围内,其持续时间从几十到几百毫秒之间。这些都使得母线保护在设计和整定时面临许多困难,必须认真研究保护闭锁时刻和开放时刻,避开 CT 饱和对保护的不利影响。由于传统的母线保护在区外故障时闭锁保护一段时间,当区外故障转入区内时,不能快速切除故障。在计算机母线保护中,充分利用计算机强大的计算功能,在充分研究 CT 饱和特征的基础上可望实现新的保护原理,从根本上解决 CT 饱和影响母线保护性能的问题。

#### 参考文献

- 1 王春生,卓乐友,艾素兰编著. 母线保护. 水利电力出版社.
- 2 唐平,陈亚强,夏俊,马天皓,陈德树等. 基于 STD 总线工控机的新一代微机型母线保护. 全国高等学校电力系统及其自动化专业第十二届学术年会论文集, 1996.
- 3 罗姗姗,贺家李,王荣琴等. 母线保护中电流互感器饱和检测和检测新判据. 电力系统及其自动化学报, 1996, (3).
- 4 朱声石著. 高压电网继电保护原理与技术(第二版). 中国电力出版社.
- 5 王维俭,候柄蕴著. 大型机组继电保护理论基础(第二版). 水利电力出版社.
- 6 Sanderson J V H and Pereira P S. A device for the detection of CT saturation. IEE Development of Power System Protection, 1980.
- 7 McLaren P G, March G. A saturation detector and its application to current protection. IEE Development of Power System Protection, 1980. (下转 26 页)

波,测量结果应能反应基波分量及含有各次谐波的原始信号值。为此我们选择了两种数学模型进行计算。

#### (1) 反应基波分量的算法

设:  $U(t) = \sum U_m \sin(m\omega t + \varphi_m) + A_0$

将  $U(t)$  分别乘以  $\sin\omega t$  和  $\cos\omega t$ , 然后各在一个基波周期  $T$  内积分, 即可消去各次谐波, 得到基波分量  $U_1$ :

$$d_1 = \frac{2}{T} \int_0^T U(t) \sin\omega t dt = U_1 \sin\varphi_1$$

$$q_1 = \frac{2}{T} \int_0^T U(t) \cos\omega t dt = U_1 \cos\varphi_1$$

从而得

$$u_1 = \sqrt{d_1^2 + q_1^2}$$

如果在一个周期  $T$  内采样  $N$  次, 则:

$$d_1 = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N U(k) \sin \frac{2\pi k}{N}$$

$$q_1 = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N U(k) \cos \frac{2\pi k}{N}$$

其中,  $U_k$  为周期  $T$  内的第  $k$  次采样值 ( $k = 1, 2, \dots, N$ )。

由此计算出的值只含基波分量, 而不含直流分量和各次谐波, 且运算速度较快。

#### (2) 反应各次谐波的算法

对  $U(t)$ , 按有效值定义:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}$$

可采用直矩形法或辛普森算法求此积分。显然, 上式计算出的值反应了包含各次谐波和直流分量的原始信号值, 但运算速度较慢。

## 4 结论

本系统已运行于某 220kV 变电所一年多, 实际使用表明:

(1) 基于 Windows 的软件设计, 使用户界面非常友好。

(2) 分布式的硬件结构使系统具备较高的实时性, 可扩展性和可靠性。

(3) 磁平衡式电压、电流传感器的使用, 减轻了电网侧 PT、CT 的负担, 以及锁相倍频同步采样方式的采用, 使测量具有较高的精度。

(4) 集 RTU、事故录波、电网谐波分析于一体, 是一个多功能电网状态参数监测系统。

#### 参考文献

- 1 徐会明, 佟为明. LEM 电流电压传感器模块及其应用. 电测与仪表, 1992, (10): 41~44.
- 2 徐会明, 佟为明. 频率微变的工频信号不同采样方法的比较研究. 微处理机, 1991, (3): 57~63.

## A SYSTEM FOR POWER NETWORK PARAMETER MONITORING WHICH BASED ON WINDOWS

Chen Xiangyang, Tong Weiming, Zhang Rongling, Xu Huiming (Harbin Institute of Technology, 150001, China)

**Abstract** This paper introduces a system which is based on windows for power network parameter monitoring. The Software design is based on MS - windows and the hardware design is based on distributive structure, used magnetic - balance type currente, voltage sensor, AC sample. The system preface seems friendly and have high real - time precise and easy enlargement.

**Keywords** Windows distributive structure power network parameter

(上接 20 页)

## THE INFLUENCE OF CURRENT TRANSFORMER SATURATION ON BUS PROTECTION

HeBenteng, MaYongsheng (Electrical Engineering Department of Zhejiang University, 310027)

**Abstract** Until now, C.T. (Current transformer) saturation is a important problem that affects accurate action of Bus Protection. This paper studies the C.T. saturation in detail by EMTP simulation, and based on this draws some conclusion of C.T. saturation feature. The saturation feature of low short circuit current were discussed mainly.

**Keywords** C.T. saturation Bus Protection Simulation