

基于规化求解法的电流互感器仿真

俞国宾

(镇海炼化检安公司电修车间, 浙江 宁波 315207)

摘要: 电流互感器饱和问题一直是影响保护正确动作的关键问题, 所以需要对电流互感器饱和情况进行深入的研究, 分析二次电流波形。选用一种拟合直流磁化曲线的数学函数, 运用规化求解的方法建立电流互感器的仿真模型, 并据此比较不同性质的二次负荷、剩磁和磁滞效应对电流互感器传变的影响, 分析这些传变对继电保护的危害。所提出的规化求解法方便地解决了铁磁非线性仿真问题。

关键词: 数学仿真; 规化求解; 电流互感器; 饱和; 剩磁; 磁滞

Simulation of current transformer based on gauge solution

YU Guo-bin

(Sinopec Zhenhai Refining & Chemical Company, Ninbo 315207, China)

Abstract: The saturation of CT has great influence on the performance of the protection. To ensure the relaying protections operating correctly under transient saturation circumstance, it is necessary to make deep research on the saturation characteristics of CT and analyze the saturated current shape. By selecting a mathematical function of fitting cocurrent magnetization curve and using gauge solution, the paper establishes a simulation model of current transformer. Based on the model, the paper makes the comparison on transformer characteristics of current transformer with different load, residual flux and hysteresis, analyzes hazards to relay protection with these transformer characteristics. Gauge solution method the paper proposed is an easy way to solute ferromagnetic non-linearity circuit simulation.

Key words: mathematical simulation; gauge solution; current transformer; saturation; residual flux; hysteresis

中图分类号: TM77; TM452

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)15-0054-05

0 引言

电流互感器具有传变误差, 特别是在主磁路饱和时, 二次电流波形会严重失真。用电磁暂态分析程序 EMTP 等工具可以进行数学仿真, 但相对复杂, 且模拟非线性电路不是很理想, 其暂态波形与实际有出入。

本文选用合适的数学函数模仿直流磁化曲线, 以电路基本公式作为约束电气变量的条件, 采用 EXCEL 的加载宏“规化求解”功能, 避开复杂的编程、公式和求解, 比较简便地分析 CT 传变特性, 易于一般工程技术人员掌握, 仿真结果也较理想。本文描述了该模型的使用方法, 并对 CT 的各种饱和情形和磁滞影响进行仿真分析, 对 CT 的选用、二次回路阻抗的控制、制作故障波形来检验保护装置均有较强的工程实际意义。

1 磁化曲线拟合

选用合适的数学函数是使用规化求解法再现 CT 的传变特性的关键, 不仅要与真实相拟合, 而且

要使求解计算具有较好的收敛性。通常保护级的 CT 采用硬磁材料来制作铁芯, 现以武钢的 3406 型号冷轧钢板为例, 分析其钢板磁化曲线:

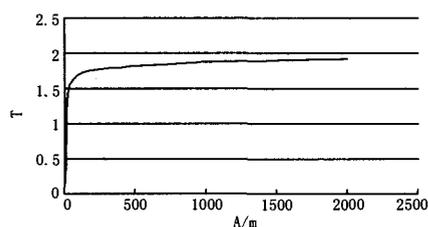


图 1 0.3 mm 钢板轧向直流磁化曲线

Fig.1 Cocurrent magnetization curve of 0.3mm steel plate in rolling direction

从图 1 中可看出此曲线具有类似阶跃函数的特点, 拟合这段曲线有多种办法, 考虑到此曲线只是直流磁化的中值曲线, 由于存在磁滞效应, 采用与上图极为逼近的复杂拟合曲线对更真实模拟 CT 工作特性帮助不大, 抓住钢板的磁化曲线两段折线特性的本质, 足可以分析 CT 的传变性能。

反正切函数和反双曲线正切函数都有类似上图

的曲线，由于一般铁芯设计的额定磁密通常是 1.7T，而在励磁电流极大时铁芯通常可以达到 2.2T，而这两种函数在自变量无穷增大时应变量分别被限制在 $\pi/2$ 和 1 之间，因此需要对大电流段叠加缓慢上升曲线才能更好地与图 1 拟合。本文用反正切函数拟合小励磁电流下的磁化特性，用幂函数模拟大励磁电流下的磁化特性，得到近似图 2 的拟合函数：

$$\Phi = \Phi_{\max} \left[0.95 \times \frac{\arctg(k_1 H)}{\frac{\pi}{2}} + k_2 H^{\frac{3}{7}} \right] \quad (1)$$

取 $\Phi_{\max} = 2$ ， $k_1 = 0.1$ ， $k_2 = 0.001$ 。所得曲线如图 2。

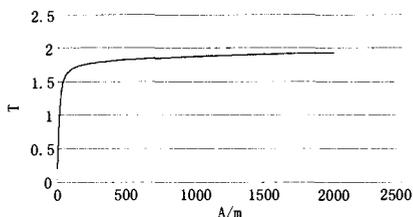


图 2 CT 直流磁化拟合曲线

Fig.2 Fitting curve of cocurrent magnetization

模拟某一特定 CT 时，需要调整式 (1) 的最大磁通量 Φ_{\max} 。可根据伏安特性的饱和电压确定 Φ_{\max} 。如某 CT 变比 1000/5，二次饱和电压为 50 V，则可

$$\text{取 } \Phi_{\max} = \frac{50\sqrt{2}}{100\pi N} \times \frac{2}{1.7} = 0.001325。$$

由于式 1 以磁路长度为 1 m 的铁芯模型，如某 CT 的磁路长度为 0.5 m，则应以 $\frac{H}{0.5}$ 代入式 (1) 中的 H 。

2 CT 电磁模型的建立

传统的 CT 二次等效电路一般建立在线性基础上，如果用式 (1) 来代替 CT 铁芯的作用，考虑二次负荷有电感、电阻和电容组成，可以将 CT 二次等效为如图 3 所示。

以典型的短路电流为例，列出图 3 电路中各电气量的等式如下（变量以二次电流 I_2 为正向）。

$$\text{故障电流 } I_1 = I_{1\max} [\sin(\omega t + \theta) - e^{-\frac{t}{\tau}} \sin \theta]$$

$$\text{电容电荷量 } Q = \int I_2 dt$$

$$\text{电容电压 } U_C = Q/C$$

$$\text{电感电压 } U_L = L_2 \frac{dI_2}{dt}$$

二次回路的电动势：

$$E_2 = -N \frac{d\Phi}{dt} = -I_2 R - U_L - U_C$$

$$\text{磁动势 } H = I_1 - NI_2$$

磁通量：

$$\Phi = \Phi_{\max} \left[0.95 \times \frac{\arctg(k_1 H)}{\frac{\pi}{2}} + k_2 H^{\frac{3}{7}} \right]$$

观察上面 7 个等式，可以看出它们既有微积分，又有超越函数，无法以符号系统运算求解。

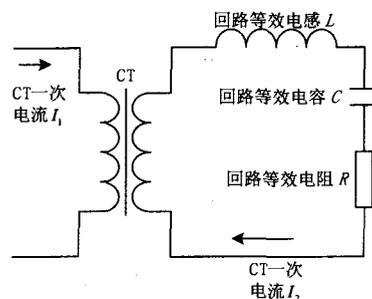


图 3 CT 二次等效电路图

Fig.3 Secondary equivalent circuit diagram of current transformer

3 规化求解法

电子表格软件 EXCEL 的加载宏“规化求解”提供了多变量多公式数据表的函数迭代求解手段。如果将第 3 节中的等式离散化表示，以磁动势 H 为变量，用 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 代替 $\frac{d\Phi}{dt}$ ，用 $\sum I_2 \Delta t$ 代替 Q ，用 $\frac{\Delta I_2}{\Delta t}$ 代替 $\frac{dI_2}{dt}$ ，利用 EXCEL 电子表格制作一张时间递增下各电气量变化的电子表格，用“规化求解”功能，以二次回路电压之和为零作为约束条件，可以迭代算出各电气量的时域值。下面以具体实例介绍规化求解的使用方法。

例 1：某 35 kV 线路发生单相故障，保护装置录得波形见图 4，其中最后一个波形是六氟化硫开关分闸灭弧过程引起的。

分析图故障波形，其暂态初始角 $\theta \approx -143^\circ$ ，时间常数 $\tau \approx 20$ ms，稳态电流峰值 $I_{1\max} \approx 6900$ A，最后一个周波电流减小到 60%。该线路的参数为：5P10 级，CT 变比 $N=1000/5$ ，估算 CT 的磁路长度为 0.6 m，实测二次交流阻抗为电阻 $R=1.2 \Omega$ ，线间分布容抗 $X_C=20 \Omega$ ，二次回路饱和电压约 50 V，电

感 L 近似为零, 求得串联等效电容量 $C=0.18 \text{ F}$ 。
定义单元格名称和各变量公式见表 1 和表 2。

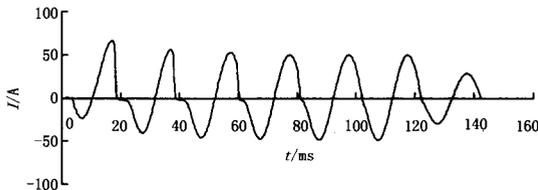


图 4 某 35kV 线路单相接地故障电流录波图
Fig.4 A recording current curve of 35kV line with single phase fault

表 1 EXCEL 中单元格名称定义

Tab.1 Cell names definition in EXCEL

单元格	名称	含义	数值
A1	I1MAX	一次电流幅值	=6900*SQRT(2)
A2	kt	角度转化为弧度	=PI()/180
A3	Δt	时间增量	0.0005
A4	θ	暂态角	-143
A5	τ	时间常数	0.02
A6	N	CT 变比	=1000/5
A7	RR	二次回路电阻 R	1.2
A8	Φ_{\max}	磁通最大值	0.001325
A9	KL1	式 1 中的系数 $K1$	0.1
A10	KL2	式 1 中的系数 $K2$	0.001
A11	LL	二次回路电感 L	0
A12	CC	二次回路电容 C	0.18
A13	KK	反正切函数修正	=PI()/2

表 2 EXCEL 中单元格公式定义 (以第 3 行为例)

Tab.2 Functions definition in EXCEL cells (by line 3 as the example)

单元格	含义	公式
B3	时间 t	=B2+ Δt
C3	一次电流 I_1	=I1MAX*(SIN(B3*kt*18000+ θ *kt)-EXP(-B3/ τ)*SIN(θ *kt))
D3	磁动势 H	0
E3	二次电流 I_2	=(C3-D3)/ N
F3	CT 磁通量 Φ	= Φ_{\max} *(0.95*ATAN(KL1*D3/0.6)/KK+KL2*((D3/0.6)^(1/7))^3)
G3	电容电荷 Q	=E3* Δt +G2
H3	电容电压 U_C	=G3/CC
I3	电感电压 U_L	=LL*(E3-E2)/ Δt
J3	电阻电压 U_R	=E3*RR
K3	CT 二次反电动势 E_2	=N*(F3-F2)/ Δt
L3	二次回路电压和	=K3-H3-I3-J3

注: 初始行中时间、电流、电荷量、磁通量的初值均取零。

以第 3 行为例的迭代方法: 点出规化求解窗口, 设置目标单元格为 $\$L\3 , 目标值为 0, 可变单元格为 $\$D\3 , 选项用二次方程、中心差分、牛顿法, 可以算出满足第 3 行约束条件的磁动势值, 其它电气量也同时算出。

实际上机操作可将多个时间点的回路电压的平

方之和等于零作为目标进行迭代计算, 如定义 M1 单元格公式 =SUMSQ(L2:L50), 则可变单元格为 $\$D\$2:\$D\50 。

用以上方法求得曲线如图 5。

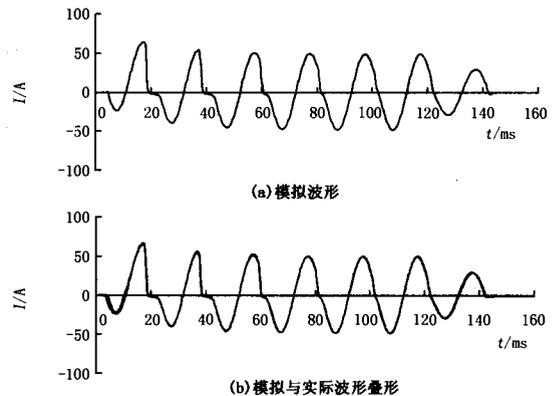


图 5 对某 35 kV 线路单相接地故障电流的模拟图
Fig.5 Simulating current curve of a 35 kV line with single phase fault

从图 5 中可以看出, 上述 CT 仿真方法来模拟的 CT 转变波形与实际非常吻合。

4 稳态不饱和下的冲击电流波形

下面以例 1 中的 CT 为模型进行仿真, 分析 CT 在短路电流达到稳态饱和和临界时的最大饱和特性。

例 2: 取 $I_{1\max} = 8200\sqrt{2}$, 此值可使二次回路电压稳态值接近 CT 临界饱和值:

$$E_2 = \frac{I_{1\max}}{\sqrt{2}N} R = \frac{8200\sqrt{2}}{\sqrt{2} \times 200} \times 1.2 = 49.2 \text{ V}.$$

$$\theta = -\frac{\pi}{4}, \quad \tau = 40 \text{ ms}.$$

模拟的二次电流及磁通变化见图 6。

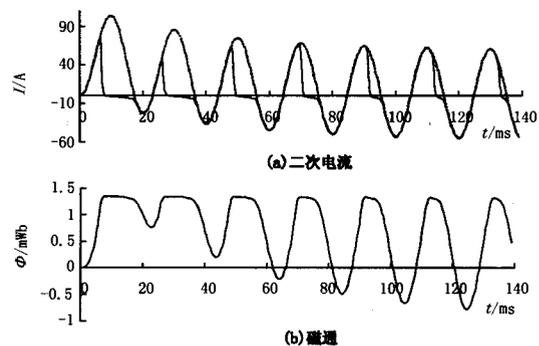


图 6 最大暂态分量下 CT 饱和波形

Fig.6 CT's saturated curve with maximum transient

从图 6 可以发现, 达到稳态极限的电流在暂态影响下其电流饱和是非常严重的。如果考虑剩磁影

响, 其饱和有可能更加严重。

5 负载性质不同的 CT 饱和特性

仍以例 1 中的 CT 为对象, 用迭代求解法来仿真分析其在二次不同性质负载下的饱和特性, (冲击电流取例 2 数据)。

设电阻 $R=1.2$, 分别取感抗 $X_L=0.5 \Omega$ 模拟感性负载, 电容 $C=0.05F$ 模拟串联小容性负载, 电流仿真波形见图 7。

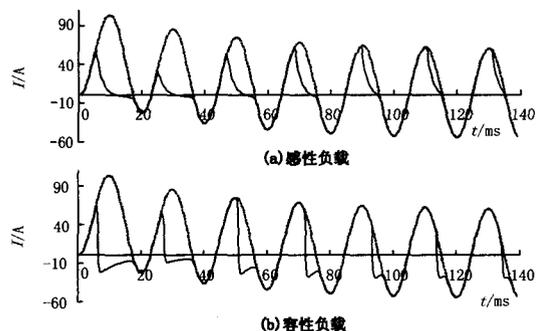


图 7 不同性质负载的 CT 二次电流图

Fig.7 CT's secondary current curves under different load

从图 7 中可看出, 感性负载会使饱和时电流下降变缓, 而容性负载会因为 CT 饱和和无电动势而反向放电, 放电时的反向电流大小取决于饱和前的最大电流。串联小容性负载的这一特点, 对距离保护和差动保护是极为有害的。

6 变压器激磁时的饱和曲线

CT 工作原理决定了它不能传递直流, 而变压器激磁波形有很强的直流分量, 用上述 CT 模型可以分析这种情况下的二次传变特点。下面用单相变压器的模拟激磁波形来做 CT 传变的假想测试。

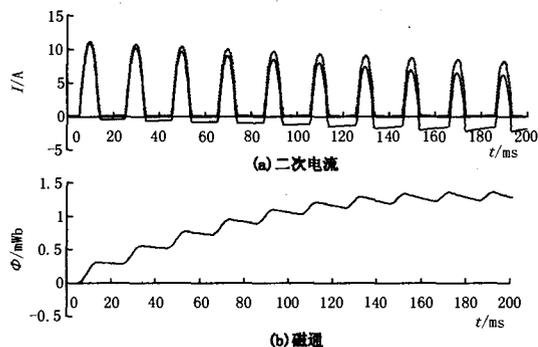


图 8 模拟单相激磁涌流的波形

Fig.8 Simulating curve of single phase current under magnetizing inrush

分析图 8 可以发现, 虽然激磁涌流并没有使 CT

饱和, 但是因激磁涌流的直流分量非常大, CT 的二次传变呈现两个特点: ①波形逐渐下移, 呈现直流分量衰减特性; ②一次电流的直流分量使 CT 的磁通逐步上升, 直到接近饱和, 波形的畸变因磁通接近最大值而增大。

模拟试验中还发现, 波形下移的速度随着 CT 二次回路电阻增大而加快。如果纵差保护两侧 CT 二次回路电阻差异大, 加上 CT 特性不一致, 当线路穿越激磁涌流时, 两侧可能出现假差电流而引起误动作。解决这一问题可采用正常电压闭锁线路纵差保护, 因为线路故障与变压器激磁过程最大的不同在于后者不会引起系统电压严重变化。

7 剩磁对 CT 传变的影响

110 kV 以下系统一般选用普通 P 级 CT, 铁芯无气隙, 可存在最高达 80% 的剩磁。将图 2 的 CT 拟合曲线横向偏移, 就可方便地引入铁芯的磁滞影响:

$$\Phi = \Phi_{\max} \times \left(0.9 \times \frac{\arctg(k_1(H + H_s))}{\pi} + k_2(H + H_s)^{\frac{3}{2}} \right)$$

剩磁初值取:

$$\Phi(0) = \Phi_{\max} \left(0.9 \frac{\arctg(k_1 H_s)}{\pi/2} + k_2(H_s)^{\frac{3}{2}} \right)$$

仍以例 1 中的 CT 和短路电流为例, 如果故障前剩磁为 80%, 且与故障后的磁通饱和和极性一致, 则可得图 9 的二次电流仿真波形。

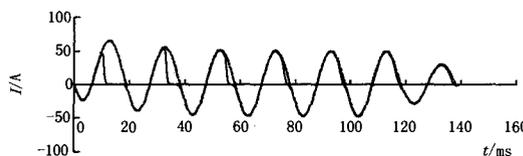


图 9 CT 剩磁为 80% 的故障电流仿真波形

Fig.9 Fault current simulating curve under influence of 80% level residual flux

对比图 5 和图 9, 可以看到剩磁可明显地增大二次电流第一次饱和的程度。

8 磁滞效应对 CT 传变的影响

本文借鉴文献[2]的方法模拟磁滞效应, 对其方法稍加改造, 用磁滞效应是对磁链滞后的观点建立动态励磁仿真如下 (用离散值表示):

第 n 点磁链滞后量:

$$H_{zn} = \begin{cases} H_{zn-1} + K_H(H_C - H_{zn-1}) & \text{如果 } \Delta H_n > 0 \\ H_{zn-1} + K_H(H_C + H_{zn-1}) & \text{如果 } \Delta H_n \leq 0 \end{cases}$$

其中磁滞效应系数:

$$K_H = \tanh\left(\frac{H_n}{2H_C}\right)$$

$$\text{第 } n \text{ 点磁通量: } \Phi_n = \Phi(H_n - H_{Zn}) \quad (2)$$

矫顽力 H_C 取 200 A, 式 1 中的 K_1 取 0.03, 这种方式仿真磁滞回环的效果见图 10。

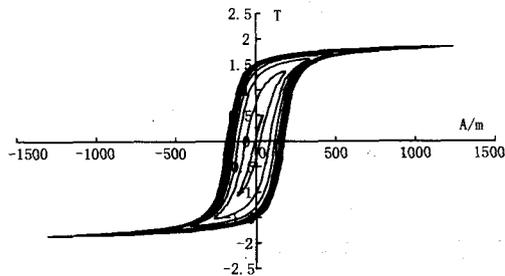


图 10 CT 磁滞仿真回环

Fig.10 Simulating figure of CT magnetic hysteresis loop

用纯电阻负载暂态中轻度饱和的 CT 二次波形做一个比较, 看看磁滞效应的影响:

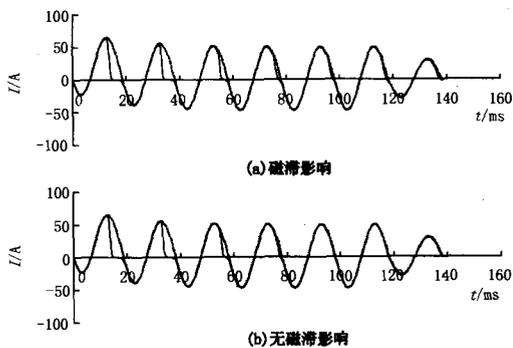


图 11 磁滞效应对 CT 传变影响比较

Fig.11 Comparison of CT transfer characteristics on hysteresis influence

从图 11 比较几乎看不出磁滞对 CT 传变的影响。放大图形, 可发现磁滞会减小二次电流的幅值 (本例中幅值缩小 3.8%), 轻微增大 CT 饱和程度。

通过仿真发现, 在没达到 CT 饱和的情况下, 磁滞效应是导致 CT 比差的主要因素, 而对于分析短路故障电流的传变, 可忽略磁滞影响。

用这种带磁滞的仿真模型, 还可以方便地分析剩磁的形成。以短路故障电流在不同周期切除为例, 做出如图 12 所示剩磁形成比较, 可以发现:

1) 当短路故障电流与饱和同方向的半周波切除, 则 CT 可形成最强的剩磁。(用例 1 中的数据仿真剩磁达到 83%)

2) 形成的剩磁与下一次故障电流饱和和方向一致时, 其故障电流首个半波饱和加深。

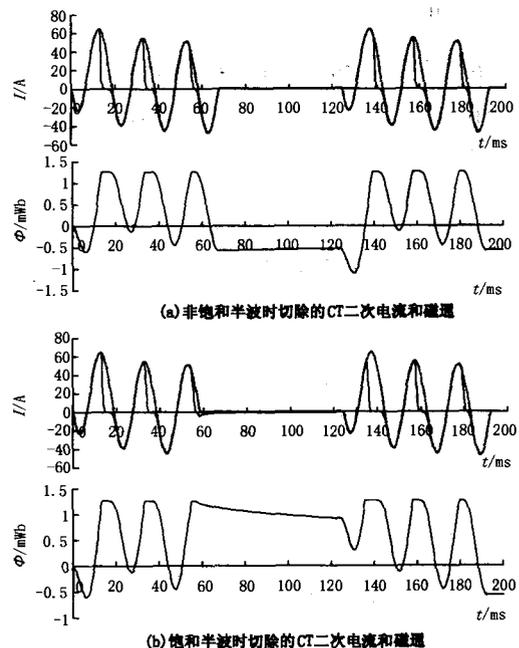


图 12 不同的故障切除时刻对 CT 剩磁形成的比较

Fig.12 Comparison of CT's residual flux after recovery from fault in different time

9 结语

CT 的传变受负载性质和一次电流的不同, 有着较大的差异。使用规化求解的方法仿真 CT 传变特性, 具有避开复杂计算、拟真性好的特点, 且一次电流的输入波形可以任意变化而对求解无任何附加困难, 便于分析和制作故障波形来检验继电保护。这种方法实质是微积分离散化与矩阵迭代求解相结合, 可用于较为复杂的三相变压器激磁波形分析, 甚至适用于研究其它非线性问题 (由于篇幅所限, 对激磁波形的仿真将在以后的文章中予以介绍)。

参考文献

- [1] 袁季修, 盛和乐, 吴聚业. 保护用电流互感器应用指南 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
YUAN Ji-xiu, SHENG He-le, WU Ju-ye. Current Transformer for Protection Application Guide [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [2] 陈季权, 王如玫. 动态磁化特性模拟 [J]. 变压器, 2000, 38 (5): 6-8.
CHEN Ji-quan, WANG Ru-mei. Dynamic Magnetizing Characteristic Simulation [J]. Transformer, 2000, 38 (5): 6-8.

收稿日期: 2006-12-15;

修回日期: 2007-05-24

作者简介:

俞国宾 (1970-), 男, 工程师, 从事企业电气设备检修、安装改造、电气调试管理等工作; E-mail: LHXLB@ZHEHU.NET.CN