

非周期分量对电流互感器饱和特性的影响的仿真

任先文, 徐宏雷, 孙楷淇, 黄加祺, 赵珣

(东北电力大学, 吉林 吉林 132012)

摘要: 电流互感器是将系统一次侧的电流信号传变到二次回路的重要测量设备, 绝大部分继电保护依赖于电流互感器传变过来的电流信号而动作。电流互感器是否能够将一次电流准确的传变到二次侧是继电保护能否正确动作的关键。因此, 电流互感器模型在电力系统仿真中有着重要的作用。着重介绍了电力系统暂态仿真中常用的 Jiles-Atherton 电流互感器的数学模型。并利用该电流互感器模型, 仿真了变压器空载合闸产生的励磁涌流的过程, 并分析了非周期分量对电流互感器饱和特性的影响。

关键词: 电流互感器模型; 非周期分量; 饱和特性; 变压器; 和应涌流

Simulation of influence of current transformer saturation characteristic by aperiodic current

REN Xian-wen, XU Hong-lei, SUN Kai-qi, HUANG Jia-qi, ZHAO Xun

(Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: The current transformer is the important measuring element which transfers primary current to secondary circuit. Most relay protection operating depends on the current transformer signal. It is very important that whether the current transformer could accurately transfer the primary current waveform to secondary circuit. Therefore, current transformer model plays an important role in power system simulation. This paper introduces the Jiles-Atherton current transformer model which is commonly used in transient electromagnetism simulation. The process of transformer operating with no load by Jiles-Atherton current transformer model is simulated, and the influence of current transformer saturation characteristic by aperiodic component current is analyzed.

Key words: current transformer model; aperiodic component; saturation characteristic; transformer; sympathetic inrush

中图分类号: TM76; TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)05-0006-04

0 引言

电流互感器的饱和问题一直以来是学者研究的热点^[1,2]。对于电力系统中以并联电气联接形式的变压器组, 空载合闸其中一台变压器, 合闸变压器将会产生励磁涌流。突变的励磁涌流会引起变电站系统侧电流的突变, 进而引起运行变压器磁链的突变, 从而发生和应涌流。和应涌流中的非周期分量经过几个周波后, 将不再通过系统侧电阻衰减, 而是通过两台变压器的内阻衰减^[3]。在两台变压器间缓慢衰减的非周期分量很可能造成并联联接变压器组中运行变压器的电源侧电流互感器饱和, 从而在运行变压器差动保护回路中产生差流, 使运行变压器差动保护误动^[4]。所以, 研究非周期分量对电流互感器饱和特性的影响就显得十分重要。

1 电流互感器的 Jiles-Atherton 模型

目前国际上广泛用于电磁暂态仿真有两种电流互感器模型: Jiles-Atherton 模型^[5,6]和 Lucas 模型。

这两种电流互感器的数学模型相对简单, 易于在仿真软件中实现。并且这两种电流互感器的数学模型都具有电流互感器的暂态饱和特性, 其二次仿真波形与实际电流互感器实测二次波形非常相似。笔者分别用这两种电流互感器搭建了变压器合闸产生励磁涌流的模型, 进行了仿真。发现利用这两种电流互感器仿真出的波形非常接近(差值小于 0.02%)。因为 Lucas 模型不能够仿真具有较大截面积的铁心的电流互感器, 且较小截面积铁心的电流互感器容量较小, 容易发生饱和, 不能适应于电力系统中发生故障时需要测量较大电流的要求。因此, 笔者以 Jiles-Atherton 电流互感器为例, 介绍 Jiles-Atherton 电流互感器的数学模型, 并应用此模型研究非周期分量对电流互感器饱和特性的影响。

Jiles-Atherton 模型是利用改进朗之万函数得到的具有饱和特性的数学模型。它通过建立磁通密度和磁场强度以及磁化强度之间的函数关系式, 用以替代 B-H 磁滞回环。

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (1)$$

定义有效磁场强度为:

$$H_c = H + \alpha M \quad (2)$$

α 是磁化耦合系数。将有效磁场强度 H_c 代入 S 形的改进朗之万函数曲线, 就可以得到此时有效磁场强度所对应的非滞后磁化强度 M_{an} 。

$$M_{an} = M_s \frac{a_1 H_c + H_c^b}{a_3 + a_2 H_c + H_c^b} = M_s f(H_c) \quad (3)$$

M_s 为饱和磁化强度; a_1, a_2, a_3 为波形系数, 用以决定 S 形磁化曲线的形状特征, 且波形系数必须满足条件: $a_2 > a_1; b > 1; a_1, a_2, a_3 > 0$ 。

将磁化强度对磁场强度求偏导。

$$\frac{dM}{dH} = \frac{\mu_0}{1 - \alpha c} \frac{1 - c}{1 - \alpha c \frac{dM_{an}}{dH_c}} \quad (4)$$

通过对不同的导磁材料的测量, 可得到 α, M_s, c, k 的参数值。 δ 可根据 dH/dt 的值为正负分别取 1 或 -1。

假若 $(M_{an} - M)\delta < 0$, 则式(4)可简化为:

$$\frac{dM}{dH} = \frac{c \frac{dM_{an}}{dH_c}}{1 - \alpha c \frac{dM_{an}}{dH_c}} \quad (5)$$

在 Jiles-Atherton 电流互感器模型中, 电流互感器二次侧电流值是由一次侧电流和电流互感器的多个性能参数在积分步长为 Δt 的时间段内进行迭代计算而得到的。

每次迭代磁场强度的变化量为:

$$\Delta H = \frac{N_1}{l} \Delta I_1 - \frac{N_2}{l} \Delta I_2 \quad (6)$$

其中: N_1 为一次侧的匝数, N_2 为二次侧的匝数, l 为磁通路径的长度, ΔI_1 为一次侧电流每次迭代的变化量, ΔI_2 为二次侧电流每次迭代的变化量。

对二次侧磁链的变化量列写出电压方程:

$$\frac{N_2 S_{core}}{\Delta t} \Delta B = R_2 \left(I_2' + \frac{\Delta I_2}{2} \right) + \frac{L_2}{\Delta t} \Delta I_2 \quad (7)$$

S_{core} 为电流互感器铁心的横截面面积, Δt 为积分步长时间, ΔB 为铁心中磁通密度的变化量, R_2 为电流互感器二次绕组电阻 (由绕组线圈电阻, 负载电阻, 连接电阻组成), L_2 为电流互感器二次绕组电抗 (由绕组线圈漏电抗, 负载电抗, 连接电抗组

成), I_2' 为二次电流进行本次迭代前的值。

每次迭代磁通密度的变化量为:

$$\Delta B = \mu_0 (\Delta H + \Delta M) \quad (8)$$

由式(4)、(6)、(7)、(8)可建立由四个方程构成的迭代关系方程组, 通过迭代计算可求出 $\Delta I_2, \Delta H, \Delta B, \Delta M$ 四个未知量。

这样, 就得到了二次侧电流的变化量和进行下一次迭代所需的变量, 也就得到了二次侧电流的波形。

2 非周期分量对电流互感器特性的影响

为研究非周期分量对电流互感器饱和特性的影响, 笔者以单台变压器空载合闸产生的非周期分量对电流互感器的影响为例进行研究。单台双绕组变压器与无穷大电网联接, 对其进行空载合闸操作。其电气联接图如图 1 所示。



图 1 变压器励磁涌流电气联接图

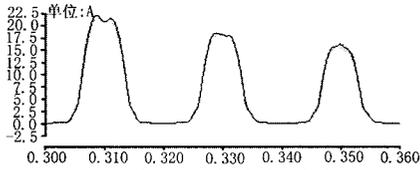
Fig.1 Electrical connection of transformer magnetizing inrush

变压器性能参数为: 容量 40 MVA, 频率为 50 Hz, 接线组别为 YD-11, 额定电压 66 kV/11 kV, 额定电流 350/2100 A, 空载电流 0.1%, 空载损耗 24 kW, 短路损耗 138 kW, 阻抗电压 10.5%。两侧电流互感器的变比分别为 400/5 和 2400/5。电流互感器二次侧差动回路中的负载电阻为 0.5 Ω , 负载电抗为 0.8e-3H。

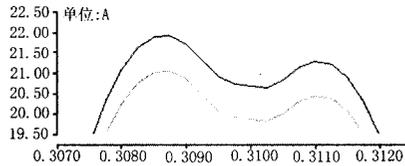
利用电磁暂态分析软件 PSCAD-EMTDC, 根据图 1 所示的电气联接, 搭建仿真模型。对变压器空载合闸过程进行仿真, 得到励磁涌流波形。将一次侧电流值除以变比系数, 折算到二次侧电流基准, 以便与二次电流波形进行对比。以 A 相电流波形, 合闸角 0° 时为例。

变压器在 0.3 s 空载合闸。变压器磁链不能突变, 从而产生偏磁。由于偏磁及剩磁等因素影响, 励磁电流中将会含有非周期分量。由图 2 可以看出, A 相发生的是不对称涌流, 含有较大的非周期分量。非周期分量的存在会使励磁涌流偏于时间轴的一侧。

合闸初时电流互感器的一次侧电流大大地超过了其额定值, 而且电流互感器的励磁曲线是非线性的, 所以经过折算后的一次侧电流与二次电流之间存在差值, 如图 2(b)所示。



(a) 变压器 A 相励磁涌流波形



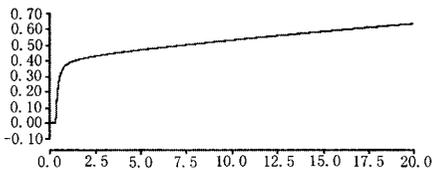
(b) 变压器 A 相励磁涌流波形 (局部放大)

—— 一次侧励磁涌流折算波形;

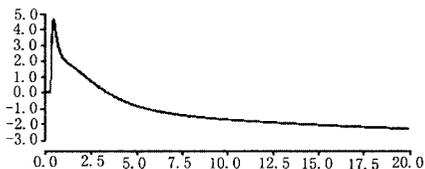
—— 利用 JA 模型得到的二次电流波形

图 2 变压器 A 相励磁涌流波形

Fig.2 Waveform of inrush current of phase A



(a) A 相电流互感器的磁通密度



(b) A 相电流互感器的磁场强度

图 3 A 相电流互感器的磁通密度和磁场强度

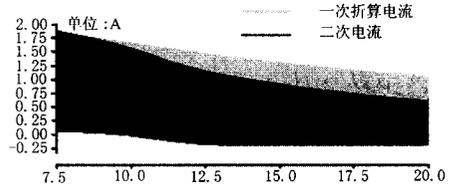
Fig.3 Magnetomotive force and flux density of current transformer of phase A

由图 3 可以看到,在变压器于 0.3 s 空载合闸后,高压侧电流互感器的磁通密度迅速增加到转折点,然后缓慢增加,逐渐达到稳定值。磁场强度也在迅速增大到最大值后逐渐减小,然后趋于稳定。两者都未达到饱和值。

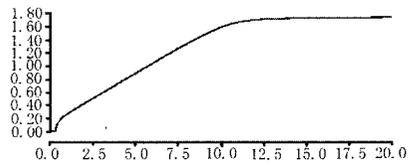
为研究非周期分量对电流互感器饱和特性的影响,笔者改变了变压器高压侧一次电流中的非周期分量的含量。在变压器 A 相电源侧加一个正方向的恒直流源,对变压器空载合闸操作进行仿真。所加直流电流幅值为电流互感器额定电流的四分之一(对本文而言为 100 A)。变压器高压侧电流互感器在改变了的非周期分量的作用下,将会逐渐饱和。电流互感器的一次侧折算电流波形与二次侧电流波形产生较大差值。

由图 4 可以看到,变压器空载合闸后,高压侧电流互感器的磁通密度在变压器合闸后缓慢增加,在 12.5 s 时发生转折,之后处于饱和状态,其值趋

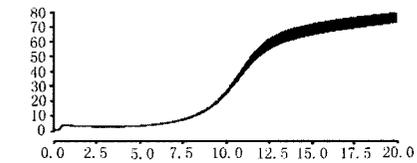
于稳定。磁场强度在 8.5 s 时发生转折,一次电流的折算值开始与二次电流产生差值,说明电流互感器正在进入饱和状态。磁场强度在 12.5 s 处再次发生转折,并且振幅增大,增加趋势变缓,说明电流互感器正在进入完全饱和状态,一次电流的折算值与二次电流之间的差值增速变缓。



(a) 一次电流折算到二次与二次电流的对比



(b) A 相电流互感器的磁通密度



(c) A 相电流互感器的磁场强度

图 4 在非周期分量作用下电流互感器发生饱和

Fig.4 Saturation of current transformer by aperiodic component current

电力系统发生励磁涌流现象中的非周期分量是不断进行衰减的。在合闸初始时,励磁涌流中含有较大的非周期分量。而后,非周期分量将通过系统内阻和变压器内阻进行衰减(在和应涌流中,几个周波后非周期分量只通过两变压器内阻衰减)。为了研究非周期分量使电流互感器饱和的现象,本仿真使用了幅值为电流互感器额定电流四分之一的直流分量作为非周期分量,用以加快电流互感器的饱和速度,使电流互感器达到饱和的时间较短。实际电力系统运行中,非周期分量的作用时间可能长达几分钟甚至十几分钟^[7]。就研究电流互感器饱和的特性来说,较大幅值的非周期分量在较短时间内作用于电流互感器和较小幅值的非周期分量在较长时间内作用于电流互感器的效果基本相同。

通常情况下,变电站中的变压器都是以并联形式联接的。当空载合闸其中一台变压器时,会在运行变压器中产生和应涌流。和应涌流中含有的衰减缓慢的非周期分量可能引起运行变压器电源侧电流

互感器的饱和,从而引起运行变压器差动保护误动^[8]。实际上,变压器差动保护中广泛利用二次谐波含量来闭锁差动保护中的不平衡电流。由图5可以看出,若存在一个衰减缓慢的非周期分量(相当于发生和应涌流情况下),二次谐波含量衰减的速度将大大减缓。但当二次谐波含量低于差动保护的闭锁值时,结合图4(a)可以看出,此时恰恰是变压器差动保护回路中因电流互感器饱和而造成的差流最大的时刻,极易引起并联连接的变压器组中运行变压器差动保护误动。

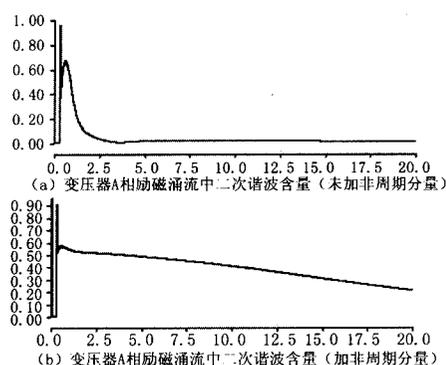


图5 变压器A相励磁涌流中二次谐波含量
Fig.5 The amplitude of 2nd harmonic in inrush

3 结束语

本文利用电力系统常用的电磁暂态仿真软件PSCAD-EMTDC仿真了变压器空载过程,并利用Jiles-Atherton电流互感器模型得到二次电流波形。通过注入直流电流用以模拟和应涌流中缓慢衰减的非周期分量对电流互感器饱和特性的影响。分析和应涌流发生时,并联变压器组中运行变压器差动保护误动的原因。

参考文献

- [1] 郑小敏, 刘会金, 刘霞忠, 等. CT饱和引起变压器差动保护误动的分析与对策[J]. 继电器, 2005, 33(8): 61-63.
ZHENG Xiao-min, LIU Hui-jin, LIU Xia-zhong, et al. Analysis and Counter Measure of Transformer Differential Protection Malfunction Due to CT Saturation [J]. Relay, 2005, 33(8): 61-63.
- [2] 黄莉, 何奔腾. 电流互感器饱和对距离保护的影响[J]. 继电器, 2004, 32(12): 16-20.
HUANG Li, HE Ben-teng. Influence of Current Transformer Saturation on the Distance Protection[J]. Relay, 2004, 32(12): 16-20.
- [3] 张雪松, 何奔腾, 张建松. 变压器和应涌流的产生机理及其影响因素研究[J]. 电力系统及其自动化, 2005, 29(6): 15-19.
ZHANG Xue-song, HE Ben-teng, ZHANG Jian-song. Principle and Influencing Factors of the Transformer Sympathetic Inrush[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 15-19.
- [4] 毕大强, 王祥珩, 李德佳, 等. 变压器和应涌流的理论探讨[J]. 电力系统及其自动化, 2005, 29(6): 1-8.
BI Da-qiang, WANG Xiang-heng, LI De-jia, et al. Theory Analysis of the Sympathetic Inrush in Operating Transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 1-8.
- [5] Annakkage U D, McLaren P G, Dirks E, et al. A Current Transformer Model Based on the Jiles-Atherton Theory of Ferromagnetic Hysteresis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(1): 57-61.
- [6] Leite J V, Avila S L, Batistela N J, et al. Real Coded Genetic Algorithm for Jiles-Atherton Model Parameters Identification[J]. IEEE Trans on Magnetics, 2004, 40(2): 888-891.
- [7] 袁宇波, 李德佳, 陆于平, 等. 变压器和应涌流的物理机理及其对差动保护的影响[J]. 电力系统及其自动化, 2005, 29(6): 9-14.
YUAN Yu-bo, LI De-jia, LU Yu-ping, et al. Physical Mechanism of Sympathetic Inrush of Transformer and its Influence on Differential Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 9-14.
- [8] 余高旺, 毕大强, 王志广, 等. 变压器和应涌流现象及实例分析[J]. 电力系统及其自动化, 2005, 29(6): 20-23.
YU Gao-wang, BI Da-qiang, WANG Zhi-guang, et al. Phenomenon of Sympathetic Inrush and Analysis of an Example[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 20-23.

收稿日期: 2008-04-18

作者简介:

任先文(1954-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事电力系统继电保护、微机在电力系统中的应用等方面的研究;

徐宏雷(1979-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护方面的研究。E-mail: angle_xhl@126.com