

基于 EMTDC 的三相变压器励磁涌流和内部故障仿真

黄咏容, 李群湛, 郝文斌, 智慧

(西南交通大学电气学院, 四川 成都 610031)

摘要: 变压器保护的核心问题是励磁涌流和内部故障电流的鉴别, 而对变压器励磁涌流和内部故障电流的有效仿真是进行正确鉴别的基础。在分析电磁暂态仿真软件 EMTDC (Electro-Magnetic Transient in DC System) 里变压器模型的基础上, 构建模型对变压器励磁涌流和内部故障电流进行了仿真, 并对仿真结果进行了间断角和二次谐波含量分析。结果表明, 利用 EMTDC 能够根据不同的条件和要求有效地实现变压器励磁涌流和内部故障电流的仿真。

关键词: 变压器; EMTDC; 励磁涌流; 内部故障电流

Simulation for magnetic inrush and fault current of three-phase transformer based on EMTDC

HUANG Yong-rong, LI Qun-zhan, HAO Wen-bin, ZHI Hui

(Department of Electric Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The key of transformer protection is to distinguish magnetic inrush from fault current. Effective simulations for magnetic inrush and fault current of transformer are the foundation of right division. In this paper, based on the study on the model of electrical transformer in EMTDC (Electro-Magnetic Transient in DC System), the simulations for magnetic inrush and fault current of three-phase transformer are done. And analysis are given to the simulation. The results show that EMTDC can effectively simulate the magnetic inrush and fault current of transformers under different conditions.

Key words: transformer; EMTDC; magnetic inrush; fault current

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)01-0026-05

0 引言

变压器是电力系统中的主要设备, 在电力系统安全运行中起着重要作用。差动保护原理简单, 动作灵敏, 几十年来一直用于变压器主保护, 而如何鉴别励磁涌流和内部故障电流是变压器差动保护的核心问题^[1]。国内外学者在经过长期的研究后提出了不少识别励磁涌流和内部故障的原理和方法, 传统识别方法有间断角原理^[2]、二次谐波电流^[3]、谐波电压^[4]、磁通特性识别^[5]等, 近年来又提出了很多智能识别方法, 如小波识别^[6]、神经网络识别^[7]、模糊识别^[8]、集成人工智能的方法^[9]等。无论是传统的还是智能识别方法都以有效的数据为基础, 上面这些识别方法中用到的数据基本上都是通过仿真获得。这是因为变压器非常昂贵, 无法通过实验的方法获得故障的数据; 若依靠动模试验, 不仅成本高, 而且也不能包括所有的故障情况。鉴于此, 国内外一些专家、学者都致力于变压器保护的仿真研究。

目前常用的一些仿真分析软件有 NETOMAC,

EMTP, Matlab 等, 但这些都无法直接建立电源—变压器—互感器的系统电路模型。EMTDC (Electro-Magnetic Transient in DC System) 是目前世界上被广泛使用的一种电力系统仿真分析软件, 该软件能结合某一具体的变压器差动保护建立电源—变压器—互感器的系统仿真模型。本文由 PSCAD 生成仿真模型对变压器在空载合闸和外部故障切除时产生的励磁涌流以及内部短路故障电流进行了仿真, 分析了电流互感器二次侧的波形变化。

1 EMTDC 中变压器模型

EMTDC 中变压器的模型是建立在电磁耦合的基础上的, 本文以单相双绕组为例来说明建模及参数的求解方法, 如图 1 所示。

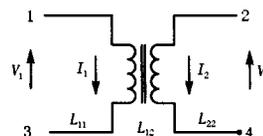


图 1 单相双绕组变压器

Fig.1 Two mutually coupled windings

图中: L_{11} 为绕组 1 的自感; L_{22} 为绕组 2 的自感; L_{12} 为绕组 1、2 的互感。

原边绕组的电压为 V_1 , 副边绕组的电压为 V_2 , 铁心中电压电流的关系用以下方程描述:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{12} & L_{22} \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

为了计算绕组电流, 作电感矩阵的转置:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} L_{22} & -L_{12} \\ -L_{12} & L_{11} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

方程中: $\Delta = L_{11} \cdot L_{22} - L_{12}^2 = L_{11} \cdot L_{22} - (1 - K_{12}^2)$

$$K_{12} = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{11} \cdot L_{22}}} \text{ 为耦合系数}$$

对于线圈缠绕在一个铁心柱上的紧密型变压器, 匝数比定义为铁心上绕组的线圈匝数之比; 在理想变压器中, 这个比值也是原边和次边的电压比。两边的电压分别记为 E_1 和 E_2 , 则有:

$$\frac{E_1}{E_2} = a \quad (3)$$

和
$$\frac{I_2}{I_1} = a \quad (4)$$

若用绕组匝数比 a 表示电压电流关系, 则方程 (1) 可以写为:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ a \cdot V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \cdot \begin{bmatrix} L_{11} & a \cdot L_{12} \\ a \cdot L_{12} & a^2 \cdot L_{22} \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2/a \end{bmatrix} \quad (5)$$

则变压器等效电路如图 2 所示。

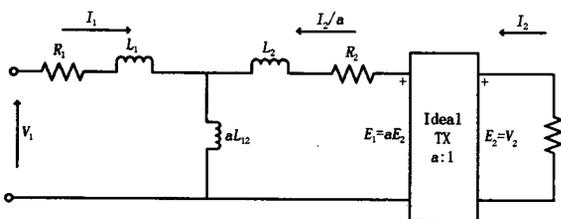


图 2 单相双绕组变压器等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of two mutually coupled windings

图中: $L_1 = L_{11} - a \cdot L_{12}$

$$L_2 = a^2 \cdot L_{22} - a \cdot L_{12}$$

方程 (1) 的电感矩阵参数可由标准变压器试验得到, 电源假设为正弦电流源。任意绕组 ‘x’ 的自感通过加一个额定电压 V_x 到绕组, 测量到有效电流 I_x (其他绕组开路), 这也就是所谓的开路试

验, 测量得到的电流 I_x 即为励磁电流, 自感 L_{xx} 由下式给出:

$$L_{xx} = \frac{V_x}{\omega \cdot I_x} \quad (6)$$

式中: $\omega = 2\pi f$ (f 为电源频率)

同样地, 绕组 ‘X’ 和绕组 ‘Y’ 之间的互感由励磁线圈 ‘Y’ 决定, 其他线圈仍然开路, 互感 L_{XY} 为

$$L_{XY} = \frac{V_X}{\omega \cdot I_Y} \quad (7)$$

对于多绕组的情况原理相同。

2 内部故障仿真

变压器仿真模型如图 3 所示, 为电源—变压器—互感器的系统模型。

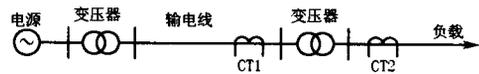


图 3 变压器仿真模型

Fig.3 Simulative module of the transformer

变压器内部故障包括了变压器内部绕组的匝间短路、匝地短路及变压器引出线的短路故障。对于变压器内部绕组的匝间、匝地短路仿真, 由于对于同一短路匝数, 其平均位置不同, 一次电流和短路匝电流均随之改变, 短路匝位于绕组两端时, 电流较小, 短路匝位于绕组之中部时, 电流较大, 这是因为当在绕组中部发生匝间短路时, 短路匝与一次绕组的耦合最好, 漏抗最小, 因而短路电流最大。所以本文考虑短路匝位于绕组两端的情况。一台双绕组变压器发生匝间短路时, 我们可以把短路部分看作第三绕组 S, 这就相当于一台三绕组变压器在第三绕组发生短路^[10]。它的等效电路如图 4 所示, 图中略去了一、二次绕组的电阻 R_1 和 R_2 , 对于短路部分则仍记及电阻 R_s , 这是考虑当短路发生在高压绕组, 而且短路匝数很少时, 其电阻 R_s 将与其等效电抗 x_s 可以比拟了。

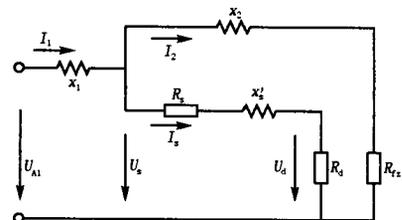


图 4 单相双绕组变压器的匝间短路等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of turn-to-turn fault of the single-phase transformer

图 4 中的电抗 x_1 、 x_2 、 x_s 可由一般的方法求出, 即

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{1}{2}(x_{12} + x_{1S} - x_{2S}) \\ x_2 &= \frac{1}{2}(x_{12} + x_{2S} - x_{1S}) \\ x_s &= \frac{1}{2}(x_{1S} + x_{2S} - x_{12}) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: x_{12} 、 x_{1S} 、 x_{2S} 为绕组 1、2 和短路部分 S 彼此之间的短路电抗。

本文就是在此思想上对匝间短路和匝地短路进行了仿真。而变压器引出线的短路故障则考虑了各种故障类型: 单相接地短路、两相短路、两相接地短路、三相接地短路^[11]。

内部故障仿真接线图如图 5 所示。

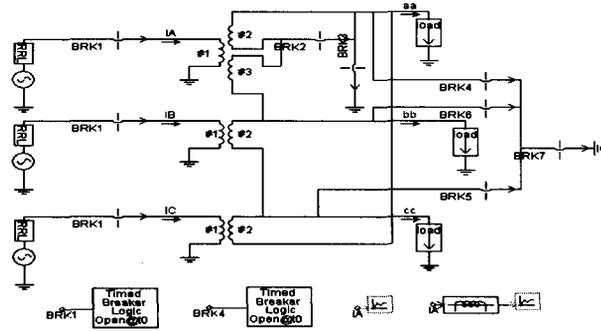


图 5 内部故障仿真接线图

Fig.5 Simulating wiring diagram of internal fault

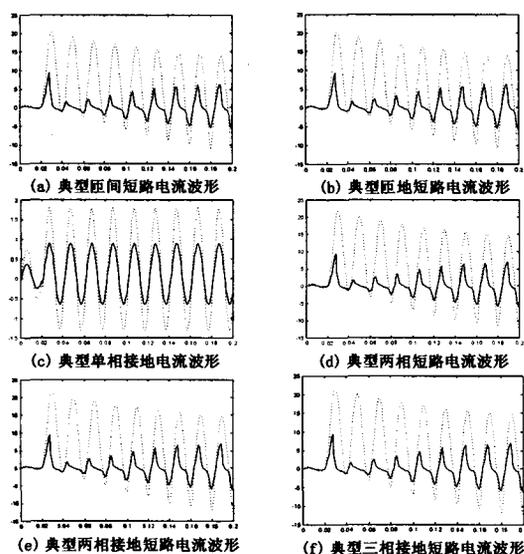


图 6 内部故障时电流互感器二次侧的典型波形

Fig.6 Typical CT's secondary current waveforms in internal fault

图中 BRK1~BRK7 为控制开关, 不同的故障情况通过合闸不同的开关来实现。对于匝间及匝地短路的情况, 只考虑发生在 A 相, 其他两相没有故障。电流互感器采用 JA 型^[12]。

图 6 (a)~6 (f) 所示为各种内部故障时 A 相电流互感器一次、二次侧的典型电流波形。虚线为一次电流 (kA), 实线为二次电流 (A)。

下面对各种内部故障情况下故障电流的间断角和二次谐波含量作了分析。结果如表 1 (a)、1 (b)、1 (c) 所示。表 1 (a) 的分析结果为匝间短路时电流互感器一次和二次侧电流间断角和谐波含量; 表 1 (b) 的分析结果为匝地短路时电流互感器一次和二次侧电流间断角和谐波含量; 表 1 (c) 中为引出线出口接地短路时电流互感器一次、二次侧电流间断角和谐波含量。

表 1 内部故障时电流互感器二次侧电流间断角和谐波含量分析

Tab.1 Gap angles and harmonics analysis of CT's secondary currents in internal fault

(a) 匝间短路					
	合闸角/ (°)	间断角/(°)		二次谐波含量/(%)	
		一次	二次	一次	二次
短路 5%	0	0	54	3.23	41.07
	30	0	45	3.13	38.43
	90	0	0	0.12	0.13
	135	0	26	2.18	24.98
短路 50%	0	0	63	2.07	42.85
	30	0	56	1.8	42.11
	90	0	0	0.13	0.17
	135	0	22	1.49	24.39
(b) 匝地短路					
	合闸角/ (°)	间断角/(°)		二次谐波含量/(%)	
		一次	二次	一次	二次
短路 5%	0	0	30	4.17	40.21
	30	0	27	3.39	39.54
	90	0	0	0.09	0.14
	135	0	9	2.83	24.07
短路 50%	0	0	54	2.09	43.22
	30	0	36	1.79	42.48
	90	0	0	0.13	0.23
	135	0	18	1.4	24.05
(c) 引出线出口接地短路					
	合闸角/ (°)	间断角/(°)		二次谐波含量/(%)	
		一次	二次	一次	二次
单相接地 短路	0	0	0	4.38	4.37
	30	0	0	0.77	0.76
	90	0	0	4.67	4.67
	135	0	0	8.7	8.7
两相(接 地)短路	0	0	45	2.29	46.81
	30	0	36	1.99	47.47
	90	0	0	0.14	2.06
	135	0	4.5	1.54	31.82

由图 6 可以看出仿真的短路波形特征非常明

显, 短路电流经电流互感器后发生畸变。结合表 1 (a)、1 (b) 和 1 (c) 的间断角和二次谐波含量分析, 一次电流经电流互感器传变, 由于互感器的饱和引起短路电流的间断角和二次谐波含量较大, 与励磁涌流的特征非常相似, 这也是目前继电保护中采用间断角原理和二次谐波制动原理保护拒动的原因之一。

3 励磁涌流的仿真

大容量变压器在稳态时的空载励磁电流不超过额定电流的 1%~2%, 但是当变压器空载投入或外部故障切除后电压恢复时, 由于铁心的饱和作用, 其励磁电流的瞬时值可超过稳态空载电流的几百倍, 即会出现涌流^[13]。

励磁涌流仿真接线图如图 7 所示。本文对空载合闸于匝间短路的情况也作了仿真。

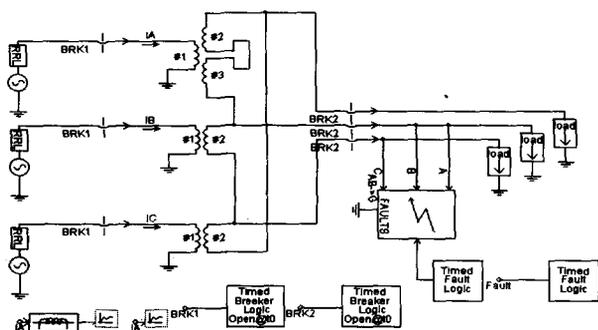


图 7 励磁涌流仿真接线图

Fig.7 Simulative wiring diagram of magnetic inrush

图中直流电流源用来模拟剩磁。LOAD 为负载, 三相对称, FAULTS 为故障设置模块, 此处设置为 A、B 相接地短路。当 BRK2 断开为变压器空载, BRK2 合闸时带负载。

以下图 8 (a)、8 (b) 所示为励磁涌流时互感器一次、二次侧的典型波形。

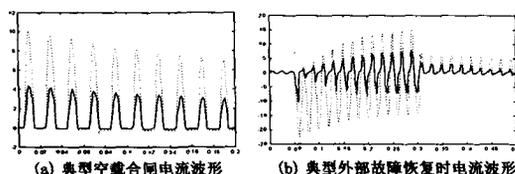


图 8 励磁涌流典型波形

Fig.8 Typical magnetic inrush current waveforms

由图 8 可以看出两种情况合闸涌流波形非常明显, 涌流经互感器后波形没有发生明显畸变, 间断角和二次谐波没有发生明显变化, 所以在表 2 中没

有列出一二次电流的间断角和二次谐波。根据表 2 的分析, 对于不同的剩磁和不同的合闸角, 空载涌流间断角和二次谐波含量都有规律的变化, 对于外部故障恢复时也产生明显的励磁涌流。

表 2 励磁涌流二次电流间断角和谐波含量分析

Tab.2 Gap angles and harmonics analysis of inrush currents

(a) 空载合闸

剩磁	合闸角/(°)	间断角/(°)	二次谐波含量/(%)
0Bm	0	136	45.08
	30	129	42.49
	90	81	28.68
	135	72	20.41
0.3Bm	0	126	47.05
	30	108	44.46
	90	90	30.95
	135	1.8	30.54
0.7Bm	0	108	50.48
	30	126	27.93
	90	9	26.97
	135	27	27.93

(b) 外部故障恢复时涌流

	合闸角/(°)	间断角/(°)	二次谐波含量/(%)
合闸于 内部故障时 涌流	0	126	48.18
	30	90	30.1
	90	27	21.27
	135	30	26.66

4 结束语

变压器励磁涌流和故障电流的仿真, 对变压器保护的研究分析具有重要的作用。采用 EMTDC/PSCAD 能较好地实现这一仿真研究, 它能够根据不同的条件和要求有效地实现对变压器励磁涌流和故障电流的仿真。

参考文献

- [1] 张雪松, 何奔腾. 变压器励磁涌流的相移比较鉴别方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (19): 43-47. ZHANG Xue-song, HE Ben-teng. A New Method to Identify Inrush Current by Phase Comparison[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (19): 43-47.
- [2] 朱亚明, 郑玉平, 叶锋, 等. 间断角原理的变压器差动保护的性能特点及微机实现[J]. 电力系统自动化, 1996, 20 (11): 36-40. ZHU Ya-ming, ZHENG Yu-ping, YE Feng, et al. Performance and Digital Realization of Transformer Difference Relay Based on Dead Angle Philosophy[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20 (11): 36-40.
- [3] Thorp J S, Phadke A G. A Microprocessor Based Three-phase Transformer Differential Relay[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101(2):426-432.

- [4] Thorp J S, Phadke A G. A Microprocessor Based Voltage Restrained Three Phase Transformer Differential Relay[A]. In: Proceeding of the South Eastern Symposium on System Theory[C]. 1982.312-316.
- [5] Phadke A G, Thorp J S. A New Computer-based Flux-restrained Current-differential Relay for Power Transformer Protection[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(11):3624-3629.
- [6] 杨钟皓, 董新洲. 基于小波变换的变压器励磁涌流识别方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(9): 1184-1187.
YANG Zhong-hao, DONG Xin-zhou. Method for Exciting Inrush Detection in Transformers Using Wavelet Transformer[J]. Journal of Tsinghua University (Sci&Tech), 2002, 42(9):1184-1187.
- [7] 李永丽, 顾福海, 刘志华, 等. 神经网络理论在变压器故障诊断中的应用[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(24): 20-22, 27.
LI Yong-li, GU Fu-hai, LIU Zhi-hua, et al. The Application of Neural Network in the Fault Identification of Transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(24):20-22,27.
- [8] 王增平, 高中德, 张举, 等. 模糊理论在变压器保护中的应用[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(20): 13-16, 45.
WANG Zeng-ping, GAO Zhong-de, ZHANG Ju, et al. Application of Fuzzy Set Theory in Transformer Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(20):13-16,45.
- [9] 臧宏志, 徐建政. 集成人工智能技术诊断电力变压器故障. 高电压技术, 2002, 28(5): 8-9, 12.
ZANG Hong-zhi, XU Jian-zheng. Integrated Artificial Intelligence Applied in Transformer Fault Diagnosis[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(5): 8-9,12.
- [10] 王维俭, 侯炳蕴. 大型机组继电保护理论基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982.
WANG Wei-jian, HOU Bing-yun. The Theory of Large Generator Protection[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1982.
- [11] 李海锋, 王钢, 李晓华, 等. 电力变压器励磁涌流判别的自适应小波神经网络方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 144-150.
LI Hai-feng, WANG Gang, LI Xiao-hua, et al. Distinguish Between Inrush and Internal Fault of Transformer Based on Adaptive Wavelet Neural Network[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 144-150.
- [12] 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.
- [13] 瓦修京斯基. B C. 变压器的理论与计算[M]. 崔立君, 杜恩田, 等译. 北京: 机械工业出版社, 1983.

收稿日期: 2006-07-25; 修回日期: 2006-10-27

作者简介:

黄咏容(1979-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护、电力系统分析; E-mail: wuyong@sc.cei.gov.cn

李群湛(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析、牵引供电系统供电理论、电能质量与控制等;

郝文斌(1976-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护。

许继集团跻身输配电及控制设备制造业十强

日前, 国家统计局公布了“全国创新能力行业十强”名单, 许继集团有限公司入选输配电及控制设备制造业十强, 排名第4位。

2005年度“全国创新能力行业十强”共500家, 是我国把建设创新型国家定为国策以来, 首次集中发布企业创新能力的权威信息。据了解, “创新能力十强”企业的研发投入强度是全部大中型工业企业平均水平的3.6倍; 新产品销售收入占主营业务收入的比重是全部大中型工业企业平均水平的3倍; 从业人员人均利润是全部大中型工业企业平均水平的1.7倍。河南省共有18个行业25家企业入选“全国创新能力行业十强”, 占中部地区入选企业的三分之一。

许继国际工程公司自营出口突破百万美元

许继国际工程公司自2003年成立以来, 根据“依托集团实力, 全力开拓国际市场”的战略方针, 全面开展了与各大进出口公司的配套工程, 国外大型工程的承包以及许继产品的自营出口等工作。特别是在许继产品的自营出口方面, 近年来形成稳步增长态势, 取得了可喜成绩。

近三年来, 公司领导将自营出口方面作为发展的突破口之一, 投入大量人力物力。通过坚持参加广交会, 广泛联络世界各地客商, 加大市场宣传和推广, 同时吸收和培养外贸人才, 出口额实现稳步提高。2006年以来, 随着人民币的大幅升值, 产品出口工作的难度也随之加大, 出口形势面临严峻考验。公司领导及时调整策略, 一方面要控制成本, 加强服务, 增加出口产品品种和系列; 一方面要拓宽思路, 不能把目光只放在一些老客户身上, 加强联系欧洲, 东南亚, 南美等地客户, 做到全力满足客户要求, 及时回复客户的咨询, 详细周到地介绍公司产品。由于欧洲, 美洲等地与我们有几小时甚至十几小时的时差, 公司的业务人员经常加班加点, 不辞辛苦。收获总是与付出成正比的, 截至2006年11月底, 许继国际工程公司已签订出口自营出口合同达111万美元, 首次突破百万美元大关, 比去年增长40%。