

# 电力变压器励磁涌流和故障电流仿真研究

许超英<sup>1</sup>, 李海锋<sup>2</sup>, 赵建仓<sup>2</sup>, 王钢<sup>2</sup>

(1. 广东省广电集团有限公司, 广东 广州 510000; 2. 华南理工大学电力工程系, 广东 广州 510640)

**摘要:** 在研究电力变压器励磁涌流和故障电流特性的基础上, 应用电磁暂态程序 (EMTP), 采用不同的模型和方法对变压器励磁涌流和故障电流进行了全面系统的仿真计算和分析。结果表明, EMTP 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。

**关键词:** 电力变压器; 电磁暂态; 励磁涌流; 故障电流

**中图分类号:** TM74; TM41

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1003-4897(2002)06-0029-04

## 1 引言

电气主设备故障诊断与继电保护技术的发展有赖于对故障机理认识水平的不断提高。对于大型变压器继电保护来说, 只有对变压器故障运行的暂态和稳态过程中各物理量的变化规律进行定性和定量的精确分析, 揭示故障后变压器各处的电流、电压等电气量的分布及其规律, 才能实现对现有保护方案的改进和提出新的保护原理。因此对变压器的暂态过程进行计算机仿真是十分必要的。

在变压器保护中, 有效地区分励磁涌流和故障电流是其重点和难点。对励磁涌流和故障电流的精确数字仿真有助于对变压器保护的研究和分析。

EMTP 是目前国际上使用最广泛的电磁暂态程序, 它是由 Hermann Dommel 教授在 60 年代末发展起来的, 此后得到了不断的改进。对于大多数的电力系统仿真问题它都能很好地解决<sup>[1]</sup>。基于此, 本文在研究了电力变压器励磁涌流和故障电流特性的基础上, 应用电磁暂态程序 (EMTP), 采用不同的模型和方法对变压器励磁涌流和故障电流进行了仿真计算和分析。

## 2 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<sup>[2]</sup>。

### 2.1 空载合闸

变压器空载投入时, 其励磁涌流的波形不仅跟空载合闸的时刻以及变压器的剩磁有很大的关系,

还跟三相变压器的接法有关。

### 2.1.1 简化模型的仿真

变压器空载时, 由于二次侧的电流为零, 其等效电路可以从 T 形电路简化为一个等值电感。因此, 变压器空载合闸时由于磁心饱和所产生的励磁涌流可以仅利用一个非线性电感简单地实现仿真。图 1 为单相变压器励磁涌流的 EMTP 仿真电路。

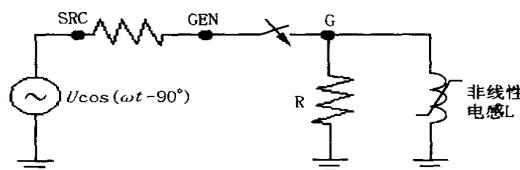


图 1 EMTP 仿真电路图

图中非线性电感 L 为 EMTP 的 93 型非线性电感元件。它通过分段线性电感模拟变压器磁心的饱和特性。其输入的  $i$  特性可以根据厂家提供的变压器励磁试验的  $V-i$  特性曲线通过 EMTP 子程序 HYS DAT 计算获得。R 则用于仿真变压器的磁滞效应。此外也可以采用 96 型准非线性磁滞电感元件来模拟变压器的磁滞曲线。

不同的合闸时刻和剩磁所对应的励磁涌流幅值和间断角都有所不同。合闸时刻可通过开关合时刻或电源相角的改变进行调节。UBC 版本的 EMTP 其分段线性电感模型则可以从剩磁不为零开始模拟。图 2、图 3 为空载合闸时刻为 0s 时仿真得到的励磁涌流波形。其中图 2 的剩磁为  $B_r = 0$ ; 而图 3 则取  $B_r = 0.9 B_m$ 。

对于由三个单相变压器组成的三相变压器组, 由于各磁路完全独立, 也能采用上述的方法进行仿真。Y<sub>0</sub>/ 接线时, 差动保护继电器接受的是两相励磁涌流的差流。因此, 当合闸角和三相磁心的剩磁

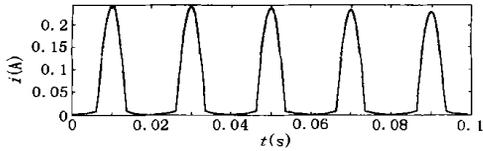


图2  $B_r = 0$  时的励磁涌流

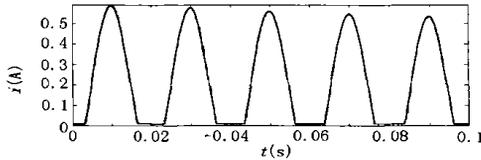


图3  $B_r = 0.9 B_m$  时的励磁涌流

满足一定的条件时,就会出现对称涌流<sup>[3]</sup>。图4为一对称涌流的波形。

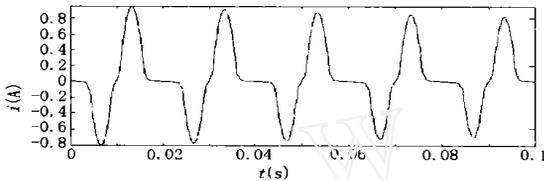


图4 变压器的对称励磁涌流

2.1.2 饱和变压器元件

BPA 版本的 EMTP 中含有饱和变压器元件这一内部模型。它采用图5所示的星形接线。一次侧  $R_1$ 、 $L_1$  支路被当作节点  $BUS1_1$  和星节点  $S$  之间无耦合  $R-L$  支路处理的,而其余绕组则作为双绕组变压器(第一支路从  $S$  到  $BUS2_1$ ,第  $k$  支路从  $BUS1_k$  到  $BUS2_k, k = 2, \dots, N$ )。每个双绕组变压器的方程都是按与  $R-L$  支路串联的理想变压器推导而得到的<sup>[4]</sup>。

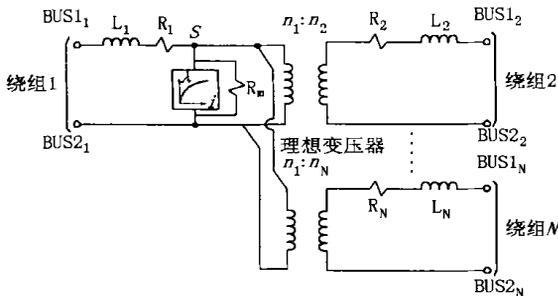


图5 N绕组变压器的星形电路模拟

由于饱和变压器元件内部已经包含了一个用于模拟变压器磁心饱和的非线性电感,因此它也可用于变压器励磁涌流的仿真。该元件有单相、三相两种模型,因此对于三相变压器在各种接法下的励磁涌流都能方便地仿真。图6就是采用这一元件仿真得到的三相变压器空载合闸时三相的励磁涌流波形。这一模型的缺点在于不容易考虑变压器剩磁的影响。此外,当变压器是三绕组时,采用这种模型可能会出现数值不稳定。其原因是由于在变压器等效

电路中引入了负阻抗。对此也有文献提出了一些解决方案<sup>[5]</sup>。

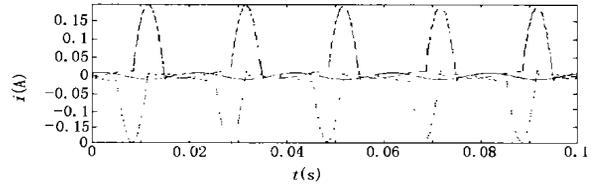


图6 饱和变压器元件仿真的三相励磁涌流

2.1.3 由 BCTRAN 生成的线性阻抗矩阵

EMTP 中的第一个变压器模型就是用支路电阻矩阵  $R$  和电感矩阵  $L$  表示的。其子程序 BCTRAN 能根据变压器励磁试验和短路试验的数据,计算出用于模拟变压器的基于耦合支路的  $R、L$  矩阵,它适用于任意多个绕组的单相和三相变压器。以一个三相双绕组变压器为例(如图7),BCTRAN 将生成两个  $6 \times 6$  的矩阵,如式(1)、(2)所示。根据这两个矩阵,应用 EMTP 中的线性耦合型支路 (type1, 2, ...) 就可以对一台实际的变压器进行仿真。

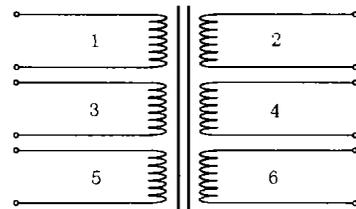


图7 三相变压器示意图

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{66} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} \\ M_{21} & L_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ M_{31} & M_{32} & L_{33} & M_{34} & M_{35} & M_{36} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & L_{44} & M_{45} & M_{46} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & L_{55} & M_{56} \\ M_{61} & M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & L_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

这样一个  $R、L$  变压器线性模型本身是没有考虑磁心饱和影响的。因此需要在模型某一侧的端点(通常为最接近铁芯的第三绕组端点<sup>[4]</sup>)上加一非线性电感支路来模拟磁心饱和的影响,由2.1.1的讨论知它也能考虑剩磁的影响。图8就是采用这一模型仿真得到的一台三相三绕组自耦变压器空载合闸时的三相励磁涌流波形。该变压器采用  $Y_{y0} d_{11}$  的接法,仿真中采用了96型非线性电感仿真变压器的磁滞回线。

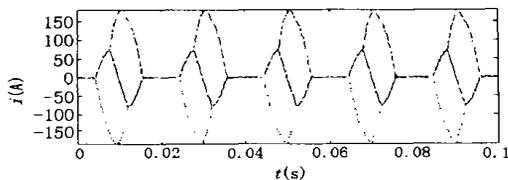


图8 变压器三相励磁涌流波形

### 2.2 外部故障切除

当变压器附近发生外部故障,故障切除时,变压器上的电压将从故障时较低的值恢复到正常值。变压器上的这一电压跃变跟空载合闸时的情况相似,也会导致铁芯饱和,从而出现励磁涌流。图9为其仿真示意图。图中的变压器模型T可以应用上面所介绍的后面两种。在仿真中,先合上 $K_2$ ,模拟故障的发生,经过一段时延后打开模拟故障切除。要注意的是 $K_1$ 打开时会出现数值振荡,解决的办法是在开关处加上适当的杂散电容<sup>[4]</sup>。图10为三相变压器A相故障切除时两侧的电流波形。图a为变压器高压侧的电流波形,由图可见故障切除后出现了励磁涌流;而图b所示的低压侧电流,在故障切除后则变为0。

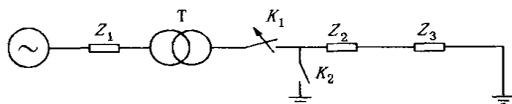
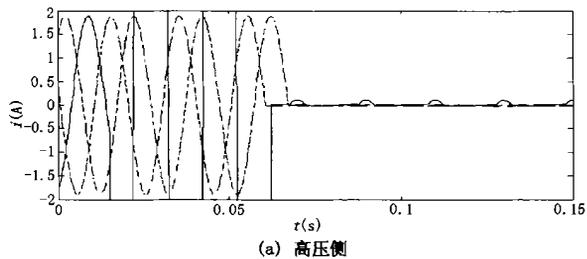
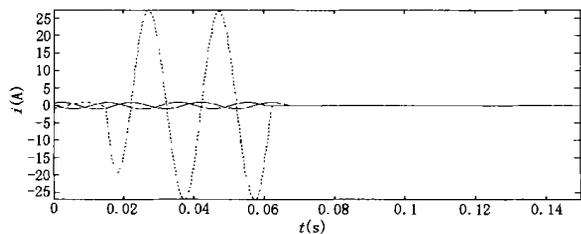


图9 变压器故障切除时的仿真示意图



(a) 高压侧



(b) 低压侧

图10 变压器外部故障切除情况的三相电流波形

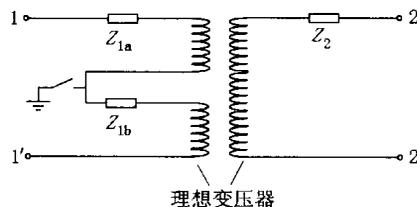
### 3 内部故障电流的仿真

变压器内部故障主要是指发生在线圈绕组上的匝地短路和匝间短路。由于故障是发生在变压器内部,不能直接采用2.1.2中所提到的饱和变压器元件对其进行仿真。但采用理想变压器模型(源18)

则可以对匝地短路进行简单的仿真。而目前文献中采用较多的还是由BCTRAN生成的 $[R]$ 、 $[L]$ 线性耦合模型。它可以实现对任意匝地短路和匝间短路的仿真计算。

#### 3.1 理想变压器

采用理想变压器模型可以实现对变压器匝地故障的仿真<sup>[6]</sup>,其EMTP电路如图11所示。通过两个理想变压器模型来模拟变压器发生故障的线圈,理论上可以仿真线圈任意位置的匝地短路。但这种方法没有考虑发生短路后线圈间漏磁的变化,而故障电流的大小很大程度上依赖于漏磁,因此该方法只能实现对匝地故障的简单仿真。图12是采用这种方法仿真得到的变压器高压侧A相发生匝地短路时原边的三相电流波形。



理想变压器

图11 变压器匝地短路时故障线圈的EMTP电路

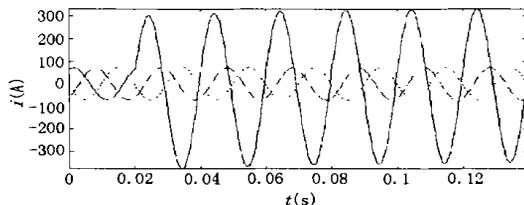


图12 变压器匝地短路时的三相电流波形

#### 3.2 R、L的线性模型

##### 3.2.1 匝地短路

图13所示的两个模型可分别用于变压器匝地短路和匝间短路的研究<sup>[7]</sup>。由图13a可见,对于匝地短路,由于故障发生后,第5绕组上的f点将接地,变压器将被分成7个绕组,因此变压器需要由 $7 \times 7$ 的R、L线性矩阵描述。由BCTRAN所得到的 $6 \times 6$ 矩阵,根据匝地故障理论分析确定所对应的 $7 \times 7$ 矩阵的参数是仿真的关键。其中的难点在于故障线圈漏磁的确定,文献<sup>[7]</sup>对此作了详细的描述。图14是一变压器在高压侧C相发生匝地短路时原边的三相电流波形。

##### 3.2.2 匝间短路

由图13b可见,变压器发生匝间短路时,相当于把第5绕组的b部分短路起来。因此对于这种情况变压器需要由 $8 \times 8$ 的R、L线性矩阵描述,而不是匝地时的 $7 \times 7$ 矩阵。同样这两个 $8 \times 8$ 矩阵参数的确定也是仿真的关键,且比起匝地短路来更为复杂。

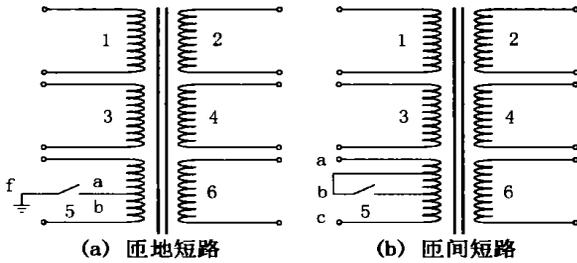


图 13 变压器内部故障示意图

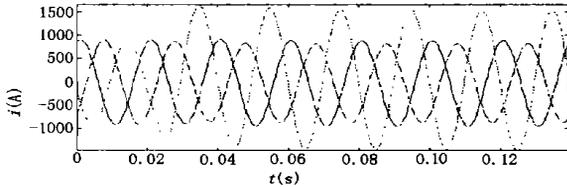


图 14 变压器匝地短路时的三相电流波形

文献[7]对此也作了详细的描述。图 15 是变压器发生匝间短路时原边的三相电流波形。

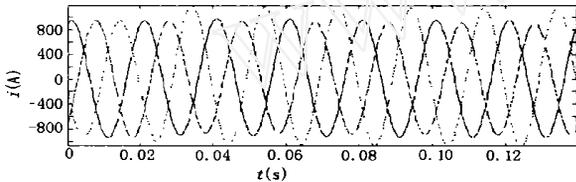


图 15 变压器匝间短路时的三相电流波形

#### 4 结束语

变压器励磁涌流和故障电流的精确仿真,对变压器保护的研究分析都具有重要的作用。采用 EMTP 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。同时也应该指出,在仿真过程中还是作了不同程度的近似和假设。相信随着对变压器暂态过程更为深入的认识和 EMTP 自身模型的发展,仿真将更为精确。

#### 参考文献:

- [1] Willis Long, David Gotcher, Dan Ruiue, Philippe Adam, Sang Lee, Rambuba Adapa. EMTP - a powerful tool for analyzing power system transients[J]. IEEE Computer Applications in Power, 1990, 36 - 41.
- [2] C B 瓦修京斯基. 变压器的理论与计算[M]. 北京:机械工业出版社, 1983.
- [3] 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, 1996.
- [4] Dommel H W. EMTP Theory Book[M]. Portland, OR: Bonneville Power Administration, Aug. 1986.
- [5] Xusheng Chen. Negative inductance and numerical instability of the saturable transformer component in EMTP[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(4): 1199 - 1204.
- [6] Denis Vinicius Coury, Paulo Guidetti Campos, Maria Cristina Tavares. Modeling a power transformer for investigation of digital protection schemes[C]. The 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power ICHQP '98, Athens, Greece, October 14 - 16, 1998.
- [7] Patrick BASTRARD, Pierre BERTRAND, Michel MEUNIER. A transformer model for winding fault studies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(3): 738 - 744.
- [8] LEUVEN EMTP CENTER. ATP Rule Book, July 1987.
- [9] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京:中国电力出版社, 1994.

收稿日期: 2002-04-30

作者简介: 许超英(1958-),男,高级工程师,广东省广电集团有限公司副总经理; 李海锋(1976-),男,博士研究生,研究方向为电力系统继电保护; 赵建仓(1974-),男,助理工程师,从事电力系统继电保护的研究工作; 王钢(1966-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统继电保护及自动化、电力电子。

#### Research on simulation of magnetic inrush and fault current for power transformers

XU Chao-ying<sup>1</sup>, LI Hai-feng<sup>2</sup>, ZHAO Jian-cang<sup>2</sup>, WANG Gang<sup>2</sup>

(1. Guangdong Guang - Dian Grid (Group) Co., Ltd. Guangzhou 510000, China;

2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Based on the study on magnetic inrush and fault current of electrical transformers, EMTP is applied to realize the simulations of these currents in the paper. And various models and methods are used in the simulations. The results show that EMTP can effectively simulate the magnetic inrush and fault current of transformers under different conditions.

**Keyword:** power transformer; EMTP; magnetic inrush; fault currents