

# 不同变压器绕组模型对计算快速暂态过电压的影响分析

李六零, 胡攀峰, 邱毓昌

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 选取了等值入口电容模型、带损耗的高频模型以及以线饼为单元的等值回路模型, 就快速暂态过电压 (VFTO) 对变压器内部绕组的影响进行了研究, 同时研究了这 3 种不同模型对气体绝缘开关装置 (GIS) 内部元件处 VFTO 数值的影响, 以及变压器绕组间 VFTO 的分布. 计算结果表明, 3 种模型对 GIS 内 VFTO 的计算数值基本相同, 影响 VFTO 数值的关键因素是变压器的等值入口电容值.

关键词: 变压器绕组模型; 快速暂态过电压; 气体绝缘; 线饼

中图分类号: TM56 文献标识码: A 文章编号: 0253 987X(2005)10 1160 02

## Analysis of Very Fast Transient Overvoltage Calculation Affected by Different Transformer Winding Models

Li Liuling, Hu Panfeng, Qiu Yuchang

(State Key Laboratory of Electrical Insulation for Power Equipment, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

研究快速暂态过电压 (VFTO) 下变压器绕组内的电压分布对变压器的绝缘设计有着重要的意义. 要分析 VFTO 对变压器的影响, 其关键问题是确定变压器绕组的暂态电路模型以及该模型中各个元件的参数值. 目前, 分析变压器绕组中暂态电压分布所用的模型可分为以单饼或双饼为单元的等值电路模型<sup>[1-3]</sup>、变压器绕组的传输线模型<sup>[4,5]</sup>、混合模型<sup>[6,7]</sup>等.

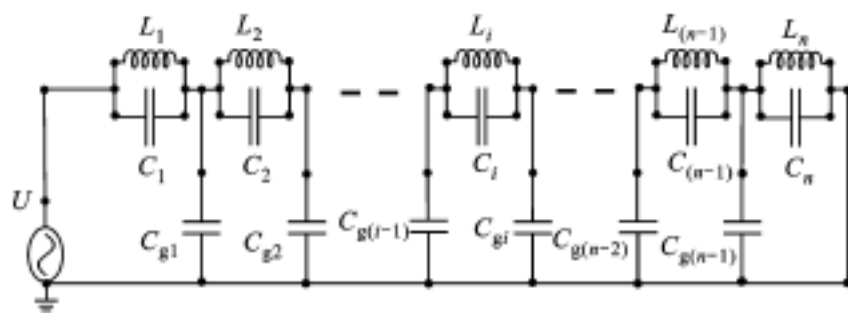
本文采用电磁暂态程序 (EMTP) 实现了等值电容模型、带损耗的高频模型以及以线饼为单元的等值回路模型, 并对 GIS 内 VFTO 的数值及变压器内部的 VFTO 幅值进行了计算. 比较了采用不同模型时 VFTO 计算值之间的相对偏差, 指出了各模型的适用范围.

### 1 变压器模型

#### 1.1 以线饼为单元的等值回路模型及参数

图 1 为以线饼为单元的变压器等值回路模型. 对一 500 kV 三相 5 柱变压器, 容量为 360 MV · A, 变比为 525 kV / 18 kV, 每相共有 10 个线饼, 其等值

参数见表 1. 图 1 中对地电容  $C_{gi}$  在本模型中相同, 均为 40 pF, 套管的对地电容为 330 pF.



$L_i$  为第  $i$  个线饼的等效电感;  $C_i$  为第  $i$  个线饼与  $i-1$  和  $i+1$  线饼间电容之和的  $1/2$ , 加上第  $i$  个线饼内部每匝线圈间电容之和;

$C_{gi}$  为第  $i$  个线饼与地间的等效电容

图 1 变压器绕组的等值电路

#### 1.2 带损耗的高频变压器模型

对上述的同一个变压器, ABB 变压器制造厂通过试验结果给出了一个典型的高频变压器模型, 如图 2 所示. 对 550 kV 变压器, 若套管为 SF<sub>6</sub>/油套管 (此种套管用于 GIS 与变压器直接相连), 变压器高压套管的电容  $G$  为 330 pF; 若套管为空气/油套管 (此种套管通过架空线与 GIS 套管相连),  $G$  为 550 pF. 变

表 1 变压器的等值参数

$L_1/$ mH	$L_2/$ mH	$L_3/$ mH	$L_4/$ mH	$L_5/$ mH	$L_6/$ mH	$L_7/$ mH	$L_8/$ mH	$L_9/$ mH	$L_{10}/$ mH
0.282 4	0.299 6	0.318 0	0.318 0	0.744 7	1.722 7	3.948 0	5.486 5	7.845 3	11.138 7
$C_1/$ pF	$C_2/$ pF	$C_3/$ pF	$C_4/$ pF	$C_5/$ pF	$C_6/$ pF	$C_7/$ pF	$C_8/$ pF	$C_9/$ pF	$C_{10}/$ pF
8 265	8 265	3 397	1 454	985	300	300	300	300	300

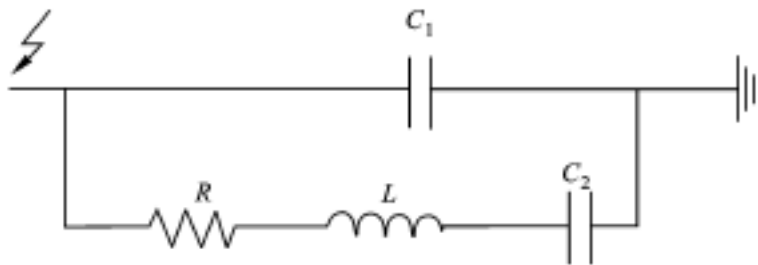


图 2 带损耗的高频变压器模型

压器绕组考虑漏磁及电晕损耗后,变为一个  $RLC$  串联电路,  $R$  为 4.5  $\Omega$ ,  $L$  为 11  $\mu\text{H}$ ,  $C_2$  为 1 040 pF.

### 1.3 把变压器等效为入口电容的模型

在计算 GIS 的 VFTO 时,为了计算简化,常把变压器等效为入口电容.对 500 kV 的变压器,电容值选为 4 000 ~ 6 000 pF.

## 2 用 3 种模型计算 VFTO 结果的比较

GIS 的模型是根据某 500 kV GIS 的实际长度参数而定,隔离开关与断开状态的断路器相距 5 m,隔离开关与变压器和 GIS 的连接套管处相距 20 m.

根据以前的研究成果,要使 GIS 中出现最大的 VFTO 幅值,隔离开关两侧的电位差最大,即隔离开关合闸时,电源侧为 449 kV,而线路侧则有 -449 kV 的残余电位.为了考察变压器模型对 VFTO 计算值的影响,计算时取消了避雷器等限制 VFTO 的元件.

以相电压峰值 449 kV 为基准,采用 3 种变压器计算模型计算出的 GIS 中断路器处、隔离开关处和变压器套管处的 VFTO 数值与基准值相比,比值见表 2.为了更加清楚地比较 3 种模型对计算结果的影响,现以常规的等值入口电容模型所计算出的 VFTO 数值为基准,分别求出其他两种模型的计算结果与相对偏差,见表 3.对该台 500 kV 变压器,它的单相等效入口电容值取 4 500 pF.

从表 3 可以看出,3 种模型所计算出的偏差在变压器套管处小于 7.1%,在断路器处的偏差最大,达到 15.8%,并且用带损耗的高频模型计算出的结果偏差最大,VFTO 的幅值最小.这是因为带损耗的高频模型考虑了电阻损耗,故 VFTO 的振荡被削弱了许多,因此该模型算出的 VFTO 数值最低.

表 2 VFTO 数值(比值)

	以线饼为单元的模型	带损耗的高频模型	等值入口电容模型
变压器套管处	3.216	3.225	3.46
断路器处	2.686	2.573	2.58
隔离开关处	2.365	2.103	2.31

表 3 VFTO 数值的计算偏差 %

	以线饼为单元的模型	带损耗的高频模型	等值入口电容模型
变压器套管处	-7.1	-6.8	0
断路器处	-4.1	-15.8	0
隔离开关处	2.4	-9.0	0

以前,人们计算 VFTO 对变压器内部绕组的影响时分两步:先把变压器等效为入口电容,用 EMTP 程序计算出电容上的 VFTO 幅值;然后,用单脉冲波加在变压器绕组的计算模型上,从而求出各个绕组上的响应.这个单脉冲的峰值就是前面计算出的电容上的 VFTO 峰值.从图 3 可以看出,电容上的 VFTO 波形非常复杂,仅用单脉冲来模拟误差太大.如果将这个波形作为电压源,在 EMTP 程序中要实现这个电压源比较困难,并且程序常常会出现错误,使第 2 步的计算无法进行.前面介绍的以线饼为单元的模型可以一次算出 GIS 内部和变压器绕组上的 VFTO 情况,且以线饼为单元的模型对地的入口电容选择为套管的对地电容 730 pF.这样,与仅用等效入口电容为 4 500 pF 的模型相比有 7% 的偏差.为了更好地说明绕组对 VFTO 的影响,本文选择了两个电路:一个是有变压器绕组的;另一个无绕组,仅有对地的等效电容.两种变压器计算模型中的对地电容均为 1 000 pF,其他条件均相同.用这两种变压器模型计算出的变压器套管处的 VFTO 数值见图 3.

从图 3 可以看出,用两种电路算出的 VFTO 第 1 个波的峰值相同,在随后的波形中,带变压器绕组的模型算出的结果峰值出现的时间有所推迟,且峰值也略有降低,小于 4%.这是因为变压器绕组对 GIS 内部的振荡有一定的阻尼作用.

(下转第 1164 页)

表 2 采用不同分类器的分类正确率

通道	分类正确率/ %			
	SVM 方法(不同核函数)			BP ANN
	多项式	径向基	神经网络	
F3	81.6	82.2	80.5	78.8
F4	80.7	81.7	76.7	80.1
Fz	80.2	80.2	78.3	74.8
C3	79.4	80.2	76.5	78.8
C4	78.2	79.7	76.7	80.1
Cz	78.2	80.2	75.9	78.8

## 参考文献:

[1] 魏景汉,罗跃嘉.认知事件相关脑电位教程[M].北京:经济日报出版社,2002.

- [2] 薛建中,和卫星,闫相国,等.基于小波包分析的意识任务特征提取与分类[J].生物医学工程学杂志,2004,21(3):397-400.
- [3] Keerthi S S, Shevade S K. A fast iterative nearest point algorithm for support vector machine classifier design[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2000, 11(1): 124-136.
- [4] Daubechies I. Wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis[A]. IEEE 1988 International Symposium on Information Theory, New York, 1988.
- [5] 韩崇昭.信息融合理论与应用[J].中国基础科学,2000(7):14-18.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 1161 页)

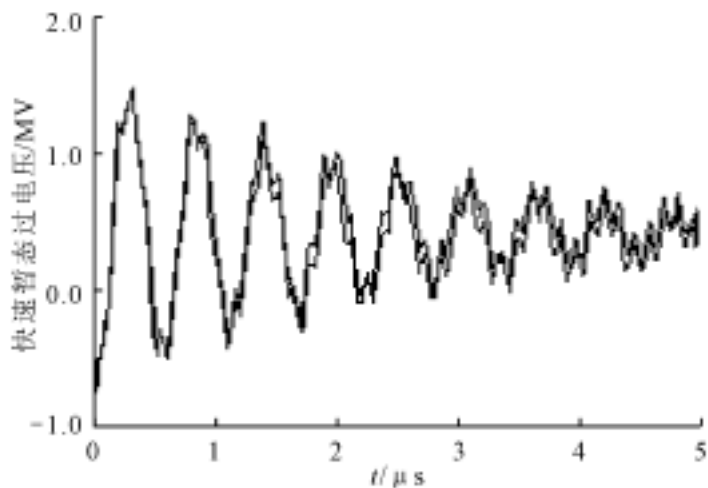


图 3 变压器套管处的 VFTO

## 3 结 论

(1)用等值入口电容模型、带损耗的高频模型和以线饼为单元的变压器等值回路模型来计算 VFTO 时, GIS 内部各点的 VFTO 数值相差不多.从计算方法上看,难易程度相差很大,故在计算 GIS 内各点的 VFTO 时,建议用等值入口电容模型即可.

(2)决定 VFTO 幅值的主要因素是变压器的入口对地电容值,变压器绕组的等效回路对变压器外部 VFTO 幅值的影响不大.

## 参考文献:

[1] Ojima K, Ogawa S. Measurement of surge current

- and voltage waveforms using optical-transmission techniques[J]. IEE Proceedings, 1987, 134(6):415-422.
- [2] Fujita S, Hosokawa N, Shibuya Y. Experimental investigation of high frequency voltage oscillations in transformer winding[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4):1201-1207.
- [3] Kumar V, Thomas M J, Naidu M S. VFTO computation in a 420 kV GIS[A]. Conference Record of International Symposium on High Voltage Engineering, London, 1999.
- [4] 王赞基.大型变压器线圈暂态分析的一个模型[J].清华大学学报(自然科学版),1993,33(2):25-30.
- [5] Popov M, van der Sluis L, Paap G C, et al. Computation of very fast transient overvoltages in transformer windings[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(4):1268-1274.
- [6] 王赞基.变压器线圈中特快速暂态仿真的建模[J].中国电机工程学报,1996,16(5):299-305.
- [7] Gharehpetian G B, Mohseni H, Moller K. Hybrid modeling of inhomogeneous transformer windings for very fast transient overvoltage studies [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(1):157-163.

(编辑 杜秀杰)