

文章编号: 1671-6833(2003)04-0028-04

# 变压器冲击电压分布计算在纵绝缘设计中的应用

李道明<sup>1</sup>, 曲 渝<sup>2</sup>

(1. 中南输变电设备成套有限公司, 河南 郑州 450004; 2. 河南省电影电视学校, 河南 郑州 450003)

**摘要:** 要使电力变压器能够安全、可靠地运行, 合理设计变压器内部绝缘结构至关重要, 特别是变压器线圈的绝缘必须能可靠地承受住大气过电压、长期工作电压、操作过电压和暂态过电压的作用。分析了变压器线圈在遭受到冲击电压时产生电磁振荡过电压和感应过电压的原因, 对电力变压器波过程进行计算与仿真, 运用波过程计算软件进行变压器绝缘结构设计, 最后指出波过程计算是变压器纵绝缘设计的重要依据。

**关键词:** 电力变压器; 纵绝缘; 冲击电压分布; 优化

**中图分类号:** TM 411.2 **文献标识码:** A

## 0 引言

随着发电机的单机容量和电网规模不断扩大, 变压器的单台容量和电压等级都在不断提高。我国现运行大型电力变压器的单台最大容量、最高电压等级分别为 840 MVA、500 kV。变压器的电压等级的提高对变压器的绝缘结构设计提出了更高的要求。

在工频电压和操作电压作用下, 电力变压器绕组匝间和饼间的电压差值近似按匝数平均分布。但在雷电冲击作用下, 由于电压波形的波前等值频率高达数百千赫兹, 绕组匝间和饼间的电容和绕组对地的电容影响已不能忽略。在冲击电压施加的起始时刻, 沿绕组的电压分布基本上由分布电容网络决定, 形成了沿绕组极不均匀的分布, 主要电压将降落在入波绕组的前半部分。由于线圈电感和分布电容是不同性质的两种储能元件, 因此在入波之后的一段时间内将出现绕组中储存的电场能量和磁场能量互相交换, 形成电磁振荡过程, 从而在入波绕组形成振荡过电压。同时, 由于变压器本身是磁耦合紧密的装置, 入波绕组的电磁振荡将感应到其它绕组, 可能产生感应过电压。这个过程使绕组的匝间、段间和绕组各线段的对地电位已不再是按匝数分布, 其匝间、饼间的电位差和绕组各饼的对地电位与工频电压分布相比

较, 要超过许多倍。所以, 变压器的纵绝缘结构主要应根据冲击电压作用时的电压分布来决定。为此, 在变压器绝缘结构设计中, 必须了解作用于线圈绝缘上的过电压, 了解在冲击波作用下变压器线圈内波过程及电压分布, 例如线圈中相邻两元件(线段间、匝间)的电位差, 即梯度电压; 线圈中关键部位的电位差, 例如首端到某一点的电位差, 即线梯度电压等。这对合理确定变压器绝缘结构, 保证变压器安全可靠运行具有非常重要意义。因此, 在设计阶段进行变压器的冲击电压分布的仿真计算(波过程计算)已经是国内外大中型变压器制造厂进行变压器绝缘结构设计中必不可少的过程。

## 1 冲击电压作用下变压器线圈的建模

变压器线圈特别是大型变压器线圈不仅有紧密的磁耦合, 而且由于线圈规模比较大, 导线绕制紧密, 因此线圈之间以及线圈对附近导体(铁心、油箱、金属紧固件等)之间有较大的分布电容。在具有陡波前的冲击电压作用下, 这些分布参数对绕组中的电磁过程起决定作用。国际电工委员会(IEC)和我国国家标准规定的标准雷电全波和截波的波形如图 1 和图 2 所示, 标准冲击全波用双指数波描述:

$$e(t) = E((e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2})),$$

收稿日期: 2003-06-06; 修订日期: 2003-09-11

作者简介: 李道明(1966-), 男, 河南省信阳市人, 中南输变电设备成套有限公司工程师, 主要从事电力工程现场安装工作。

标准全波  $1.2/50 \mu s$  是指视在波前时间  $t_1$  为  $1.2 \mu s$ , 视在半波峰值时间  $t_2$  为  $50 \mu s$ . 标准冲击全波与实际调试的冲击全波之间的允许偏差为: 峰值  $\pm 3\%$ , 波前时间为  $\pm 30\%$ , 半峰值时间为  $\pm 20\%$ . 截波是指上述全波在达到峰值 ( $U_s$ ) 开始截断<sup>[1]</sup>.

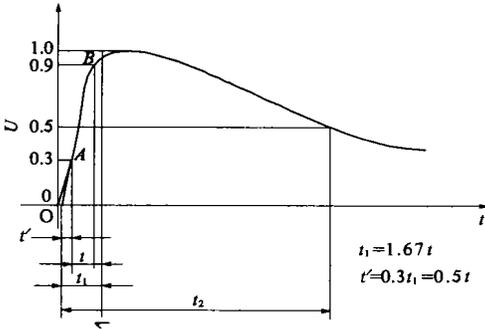


图1 标准雷电全波  
Fig. 1 Standard lightning full wave

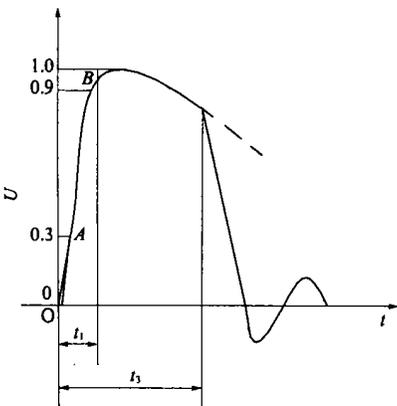


图2 标准雷电截波  
Fig. 2 Standard lightning chopped wave

在标准雷电全波和标准截波的波前起始时刻和截断时刻, 波形的等效频率都在数百千赫兹. 在这个频率范围内, 严格来讲, 对于电力变压器线圈中波过程的仿真, 应当以分布参数电路对变压器线圈进行建模. 但是, 由于电力变压器特别是大型电力变压器线圈结构十分复杂, 不同的线圈类型的组合(分区绝缘结构)、匝间和段间绝缘距离的变化、段间导线换位等, 使得分布参数沿绕组分布极不均匀, 或者说从一个线匝过渡到另一线匝时, 参数不连续. 此外, 各绕组线圈匝数之多, 若以线匝为单位进行分布参数建模, 其规模又大得无法实现求解. 因此, 实际上传统的方法是将分布参数电路转化为集中参数电路求解. 基于上述考虑, 计算变压器线圈中冲击电压分布的基本思路是:

等值电路.

(2) 针对变压器冲击电压试验接线和线圈内部电磁暂态过程的特点, 建立相应的场模型, 计算等值电路中的电感参数、电容参数等.

(3) 根据所建立电路方程, 采用一种适当的求解方程的方法求出冲击电压沿各绕组的电压分布.

(4) 根据纵绝缘结构设计需要, 将冲击电压分布通过后处理, 计算电位梯度以及线圈表面电场强度, 从而计算绝缘裕度. 如果需要的话, 还可以分析线圈自然频率的分布, 以避免严重的局部电磁振荡.

## 2 变压器线圈的冲击特性

变压器线圈的等值电路是由单元的等值电路连接而成的, 每一单元就是线圈的一个部分. 单元线圈等值电路包含一条电感支路和一条纵向电容支路并联在两个端点上, 还有若干分别连接在两个端点上的对地电容和对其它单元的电容. 本文仅提供单绕组变压器线圈的等值电路如图3所示<sup>[2,3]</sup>. 所有单元之间还有互感.

在图3所示等值电路中, 与电感并联的电容支路由匝间电容、段间(饼间)分布电容通过等值计算获得的纵向电容, 通常称为纵向等值电容; 接在电感两端的电容是由绕组间的分布电容、绕组对铁心的分布电容、绕组对油箱的分布电容等值的横向电容, 包括对地电容和绕组间的电容. 由于变压器绕组结构的特殊性, 所有电容支路是完全连通的. 这样, 当陡波前的冲击电压施加在处于静态中的变压器绕组的线端时, 在起始时刻, 由于电感支路电流不能突变, 因而电感支路相当于开路, 电压的分布主要由电容网络决定. 以均匀单绕组变压器为例, 沿绕组的起始电压分布完全由单位长度的横向电容对单位长度的纵向电容的比值来决定的. 比值越大, 电压分布越不均匀, 大部分电压主要降落在靠近入波端的一小部分线圈上(见图4).

但是当冲击波波尾足够长, 且波尾比较平缓时(典型波形为阶跃波), 最终电压分布将由电感电路来决定, 即基本上呈现线性分布. 起始分布和最终分布之差别, 必然引起振荡过程, 并可能产生振荡过电压. 绕组的每个位置上的振荡电压的幅值由起始电压分布与最终电压分布在该处的差值决定的. 显然, 从这个意义上讲, 在冲击电压的作用下, 起始电压分布越接近最终电压分布, 则振荡

(1) 将变压器线圈细分单元并建立集中参数

电压的幅值越小,出现过电压的可能性也越小.

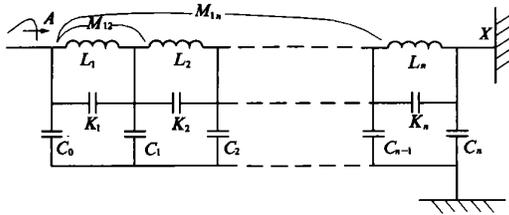


图3 单绕组变压器线圈等值电路

Fig. 3 Single-winding transformer winding equivalent circuit diagram

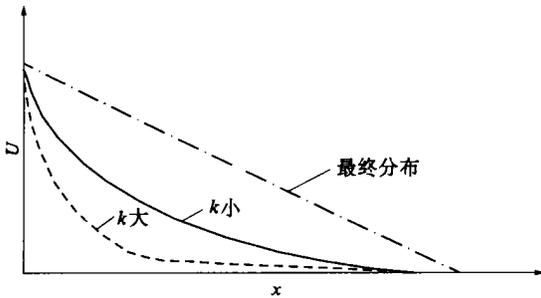


图4 均匀单绕组变压器起始分布和最终分布

Fig. 4 Original voltage distribution and final voltage distribution for uniform single winding transformer

变压器纵绝缘结构设计任务,就是通过适当的分区绝缘结构设计,使得尽可能提高绕组端部特别是首端一部分线饼的纵向等值电容,从而减少横向电容对纵向电容的比值,使起始分布尽量接近最终分布.可以想象,在横向电容不变的情况下,纵向电容从首端到末端应当逐渐减小,而且首端的纵向电容应当足够大.提高变压器纵向等值电容的办法主要有采用线圈端部屏蔽、纠结式或内屏蔽线圈等办法.由于工艺复杂性的原因,不可能做到纵向电容均匀变化,因此实际上采用的是分区绝缘结构.在分区绝缘结构的交界处,尤其是纠结式线圈与连续式线圈的交界处,纵向等值电容有较大的突变.在内屏蔽线圈与连续式线圈的交界处,纵向电容的突变要小得多.

### 3 波过程计算软件在产品改进设计中的应用

以SFPSZ 10-120000/220kV 产品为例.该产品线圈的排列如图5所示.

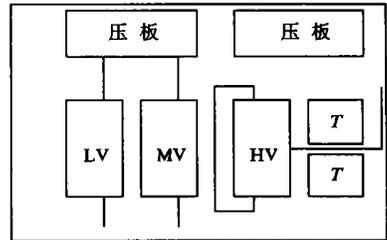


图5 线圈排列图

Fig. 5 Winding arrangement diagram

国内传统的结构,高压 220kV 级线圈一般采用插入电容连续式,首端为四段内屏蔽结构,屏蔽段数为 14 段左右,屏蔽匝数为 4 段屏屏 4 匝,4 段屏屏 3 匝,4 段屏屏 2 匝,4 段屏屏 1 匝,依次排列.中压 110kV 级线圈也采用插入电容连续式,首端几段一般为两段屏.为了提高线圈填充率,减少材料消耗,利用波过程计算软件对该产品进行反复计算,对线圈屏蔽匝数及纵绝缘做了较大改进.具体做法如下.

高压线圈:采用插入电容连续式结构,首端为四段内屏蔽式,共屏蔽 14 段,其中 8 段屏 2 匝,6 段屏 1 匝.中压线圈:仍采用插入电容连续式,首端为二段内屏蔽结构,共屏 8 段,其中 4 段屏 2 匝,4 段屏 1 匝.低压线圈为双半螺旋式,正常油道;旋间为 3mm,旋内为 1.5mm.

针对上述结构,利用波过程计算软件计算高压线圈首端入波、全波 950kV 及中压线圈首端入波、全波 480kV 时各线圈的电位分布及油道梯度电压.由此应用于变压器设计中,其技术经济分析如表 1 所示.

从表 1 可以清楚地看到,由于主纵绝缘的压缩,线圈排列紧凑,填充率高,使得改进后的产品,单台材料消耗比同类产品少了十几吨,而它的技

表 1 技术经济分析

Tab. 1 Analysis of technology and economy

变压器	铁心直径 /mm	窗高 /mm	中心距 /mm	电工钢带重 /10 <sup>3</sup> kg	铜线重 /10 <sup>3</sup> kg	器身重 /10 <sup>3</sup> kg	油重 /10 <sup>3</sup> kg	总重 /10 <sup>3</sup> kg
原产品	840	2 220	1 890/1 185	57.972	23.324	95.0	40.5	172.0
改进产品	810	1 990	1 790/1 135	51.881	20.50	83.5	35.5	158.5
变压器	运输重 /10 <sup>3</sup> kg	空载损耗 /kW	负载损耗 (高一中) /kW	短路阻抗 (高一中) /kV	短路阻抗 (高一低) /kV	短路阻抗 (中一低) /kV		
原产品	114.0	87.0	411.1	13.73	22.93	7.34		
改进产品	102.0	85.0	408.0	13.22	22.97	7.41		

术性能参数还要优于它的同类产品,从而大大提高了其在市场中的竞争力。

#### 4 结束语

主纵绝缘的设计改进给产品带来的经济效益是很大的,其利润是极其丰厚的,但这所有的一切必须以变压器安全可靠运行为前提。因此,准确地计算变压器在遭受各种过电压时各线圈的冲击电压分布、电场分布,合理选择纵绝缘结构非常重要。波过程计算软件已经成为电力变压器纵绝缘

结构设计的一种重要工具,其计算结果是确定变压器线圈纵绝缘结构的重要依据。

#### 参考文献:

- [1] 胡启凡,张喜乐. 变压器试验技术[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [2] 王赞基. 多绕组变压器线圈的波过程计算[D]. 北京:清华大学电机工程与应用电子技术系,1985.
- [3] 毛一之. 大型电力变压器线圈中波过程的数值分析[J]. 河北工业大学学报,1998,26(3):56~57.

## Impulse Voltage Distribution for Power Transformer Applied in the Optimal Design of Winding Insulation

LI Dao-ming<sup>1</sup>, QU Yu<sup>2</sup>

(1. Central-south China Transmission & Distribution Equipment Co. Ltd. Zhengzhou 450004, China; 2. Henan Film & Television School, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** In order to guarantee the safe and reliable operation of power transformers, the reasonable design of the insulation structure inside them is very important, especially the winding insulation of transformer coil should be able to bear various overvoltages such as lightning overvoltage, long-term operating voltage, switching overvoltage and transient overvoltage. The mechanism of oscillation overvoltage and induction overvoltage produced in transformer windings under impulse voltage conditions, the principle of the simulation of impulse voltage distribution in transformer windings, and the experience of winding insulation design using the simulation software are theoretically summarized. It is pointed out that the simulation of impulse voltage distribution plays an important role in the design of power transformer.

**Key words:** power transformer; winding insulation; impulse voltage distributions; optimization