

# 电力变压器操作冲击试验电压波形的计算

陈昌渔

(清华大学电机工程系, 北京 100084)

**摘要:**文中讨论了有关电力变压器感应法进行操作冲击试验时的两项计算,重点是提供一种计算操作冲击电压波前的方法。借助于计算机,采用了拉普拉斯变换来计算5阶电路,从而可以计算出产生操作冲击时,变压器原边起始时尖脉冲的高度,变压器原边和副边波前的形状和幅度,以及高压操作冲击试验波的视在波前时间。

**关键词:**电力变压器;操作冲击电压试验;等效电容;电磁感应;拉普拉斯变换

## Calculations of Switching Impulse Voltage Test Waveform for Power Transformers

CHEN Changyu

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Calculations for power transformers during high voltage switching impulse tests by electromagnetic induction are discussed. The objective of this paper is to introduce a calculating method for the front wave of switching impulse. 5-order equations for the electric circuit are developed using Laplace transform by means of computers. These equations can calculate the voltage waves and amplitudes both on primary and secondary sides. Therefore, the original short impulse on the primary wave and the virtual front time of the high voltage testing wave can be obtained.

**Key words:** power transformer; switching impulse voltage test; equivalent capacitance; electromagnetic induction; Laplace transform

## 0 引言

标称电压 220 kV 及以上的电力变压器都规定需要进行操作冲击耐压试验。随着中国超高压和特高压系统的大力发展,电力变压器类电器的操作冲击耐压试验越发显示出了它的重要性。现在规定作为电力变压器操作冲击电压试验的波形有两类:一类是 IEC 60076-3-2000 规定的指数波形;另一类为 IEC 60060-3-2006 规定的适用于现场试验的振荡型波形<sup>[1]</sup>。文中涉及的波形计算主要是前一种波形。不过所提出的方法对后一种波形的计算也有借鉴作用。在笔者参与编写的文[2-3]中讲述到了有关操作冲击耐压试验的两项计算,一为等效电容的计算,另一为操作冲击波形(波前)的计算。文中对这两项计算方法再作一些深入的讨论。重点讲述用

电磁感应法产生操作冲击电压时,变压器原边(低压侧)和副边(高压侧)波形(波前部分)的计算。

## 1 绕组等效电容的计算

变压器的绕组对地和绕组间的分布电容,以及绕组的纵向电容可以用一个处于绕组端部对地的集中电容等效地代表,当然这只是近似地代表。这个电容称为等效电容。在多个文献<sup>[2-3]</sup>中都讲到等效电容的计算方法。笔者认为文[2]中讲述的电容按电压变比平方倍进行折合的方法是一种较方便的计算方法,它根据的是变压器的基本定则,计算过程中不必引入诸如  $\omega$  等的参数,思路比较清晰。计算方法的重点已经在文[2]中叙述了,文中补充讲述比较有用的高压绕组为中间出线时,高低压绕组间的分布电容,直接折合到原边低压侧端部等效电容的计算方法。

假定原边绕组输入幅值为 1 的等效频率不高

的脉冲电压,两个绕组的电压分布情况见图1。图1中  $K$  为高压绕组2对低压绕组1的电压比值。

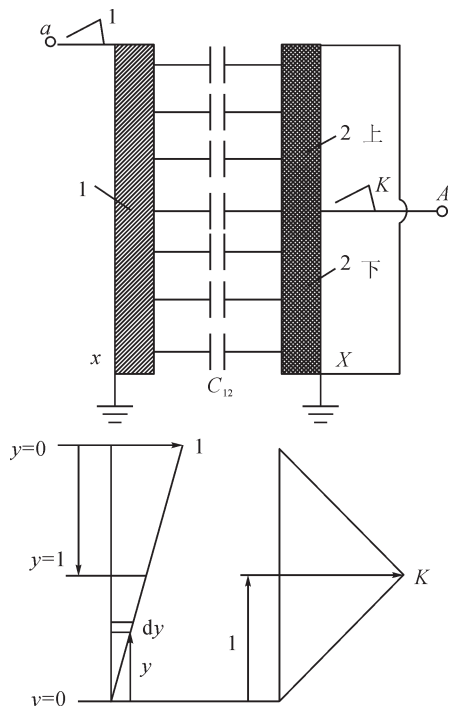


图1 高压绕组中间出线时绕组的电压分布

Fig. 1 Voltage distribution of winding in the middle of high voltage winding

对高压绕组的下半部: $y=0$ 处, $U_2=0$ ; $y=1$ 处, $U_2=K$ ; $y=y$ 处, $U_2=Ky$ 。对低压绕组下半部: $y=0$ 处, $U_1=0$ ; $y=1$ 处, $U_1=1/2$ ; $y=y$ 处, $U_1=0.5y$ 。对高压绕组的上半部接地处: $y=0$ , $U_2=0$ ; $y=1$ 处, $U_2=K$ ; $y=y$ 处, $U_2=Ky$ 。对低压绕组上半部: $y=0$ 处, $U_1=1$ ; $y=1$ 处, $U_1=1/2$ ; $y=y$ 处, $U_1=1-0.5y$ 。

假设两绕组间的电容是均匀分布的,绕组间的总电容为  $C_{12}$ 。 $dy$  间隔具有电容  $dC$ ,考虑上半部或下半部时  $dC=0.5C_{12}dy$ 。

若要把绕组间的所有电容归算到低压侧两端,可按电压比平方关系直接折合到原边的两端。由于原边两端间的电压是1,所以电压比的分子为1,此分母数在式中就不必出现。

下半段的等效电容折合值为

$$C_{e\text{-下}} = \int_0^1 0.5C_{12}(Ky-0.5y)^2 dy。$$

上半段的等效电容折合值为

$$C_{e\text{-上}} = \int_0^1 0.5C_{12}[Ky-(1-0.5y)]^2 dy。$$

总的等效电容为

$$C_e = C_{e\text{-上}} + C_{e\text{-下}} = (K^2/3 - K/2 + 1/3)C_{12}。$$

这项计算结果,与吉林电力大学骆济寿教授首先提出的磁势平衡算法<sup>[2]</sup>的演算结果完全一致。

## 2 高低压绕组端部操作波形的计算

在文[3]中,已经示明了一种4阶回路的计算方法。现在拟改用图2的5阶回路进行计算。在文[3]中的4阶回路中,由于没有考虑变压器的激磁阻抗,所以求得的输出电压波,不会出现波尾部分的衰减。电压波的幅值  $U_m$  相对值应当为  $C_0/(C_0+C_f+C_2)$ 。这样会使所计算出的幅值  $U_m$  偏于过高。为此文中的计算中纳入了激磁阻抗。由于激磁电阻的作用相对较小,所以只考虑激磁电抗  $L$  的作用。为了方便于计算,把原边和副边的漏抗合并成为一个  $L_1$ 。图2中  $C_2$  代表变压器高压绕组的等效电容,它包括高压套管的电容、电容分压器的电容、高压绕组的纵向电容、高压绕组的对地电容及如第1节中计算过的高压绕组对低压绕组间的电容等,它们都已经归算到端部对地,并已折合成原边值。 $R_1$ 和 $R_2$ 的电阻,同时起阻尼和调波的作用。 $C_f$ 是和 $R_1$ 、 $R_2$ 相配合对原边电压  $u_1(t)$  起滤波作用的电容。可以采用多种数值计算法或经典的拉普拉斯变换法来解高阶的回路。文中讲述的是用后者计算5阶回路的方法。

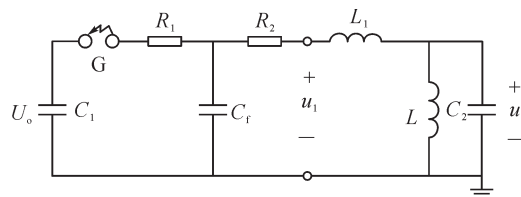


图2 5阶的操作冲击试验电路图

Fig. 2 Operation impulse test circuit diagram of 5 order loop

假定主电容  $C_0$  上的初始电压  $U_0$  为1。球隙  $G$  击穿后,通过拉普拉斯变换运算,可获得原边电压象函数的表达式为

$$U_1(s) = C_0[LL_1C_2s^2 + (L+L_1)]s/[A_0(s^5 + A_1s^4 + A_2s^3 + A_3s^2 + A_4s + A_5)]。 (1)$$

式(1)中: $A_0 = R_1L_1LC_0C_2C_f$ ; $A_1 = (R_1R_2LC_0C_2C_f + LL_1C_2C_f + L_1LC_0C_2)/A_0$ ; $A_2 = [R_1C_0C_f(L_1+L) + LR_1C_0C_2 + LR_2C_2(C_0+C_f)]/A_0$ ; $A_3 = [R_1R_2C_0C_f + (L_1+L)(C_0+C_f) + LC_2]/A_0$ ; $A_4 = [(R_1+R_2)C_0 + R_2C_f]/A_0$ ; $A_5 = 1.0/A_0$ 。

副边输出电压象函数  $U_2(s)$  的方程为

$$U_2(s) = sC_0L/[A_0(s^5 + A_1s^4 + A_2s^3 + A_3s^2 + A_4s + A_5)]。 (2)$$

$U_2(s)$  表达式右侧的分母与  $U_1(s)$  完全一样。

进行计算时,合适使用的单位,时间  $t$  是 ms,与此相适应,电容  $C$  的单位为 mF,电感为 mH,电阻为  $\Omega$ 。

把笔者参加过的 DFL-40000/220 三相电力变压器试验中的参数代入后,套用现成的冲击电压回

路计算程序(参考文[4]中附录 C), 较容易使用分解定理求出拉普拉斯反变化后的  $u_1(t)$  和  $u_2(t)$  的表达式。但要注意时间数值应根据操作冲击的特点对上述程序进行一些修改, 求 5 次方程根的子程序也需要根据现在的条件重新编排。求 5 次方程的实根时, 可以采用牛顿迭代法<sup>[5]</sup>。然后用综合除法, 求出 4 次方程的各项系数, 再用解 4 次方程式的经典公式(如盛京公式)求出其他 4 个根的数值。在笔者计算的参数下, 是具有两对复数根。计算所得到的部分结果可用图 3 中的波形表达出来。图 3 中, 具有起始小尖脉冲的是低压侧波形。在小脉冲之后, 低压侧波形就基本上与高压侧波形相重叠了。

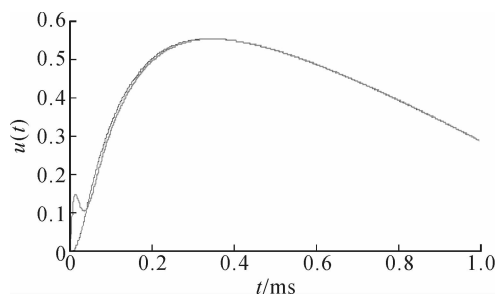


图 3 变压器高压和低压侧的操作冲击波形

Fig. 3 Operation impulse waveforms of high and low voltage side of transformer

其他的计算结果是: ①在  $C_0$  的初始电压  $U_0$  假定为 1 时(下同), 低压侧电压  $u_1(t)$  的最大值  $U_{1m}$ (相对值)为 0.552 57, 波的初始尖脉冲的幅值为 0.149 4, 它出现在 12  $\mu\text{s}$  之时, 此脉冲峰值与操作冲击波的最大值之比为 0.270; ②高压侧电压  $u_2(t)$  的最大值  $U_{2m}$ (相对值)为 0.553 36, 此数实际上是电压效率值, 它与  $U_{1m}$ (相对值)很接近, 这就提供了一种可能性, 可测量低压侧电压, 乘以变比  $K$  来获得高压侧的电压值  $U_{2m}$ ; ③电压  $u_2(t)$  的最大值出现时间  $T_m=341 \mu\text{s}$ ; ④电压  $u_2(t)$  的视在波前时间  $T_f=241 \mu\text{s}$ ; ⑤电压  $u_2(t)$  的 90% 间隔时间  $T_{90\%}=373 \mu\text{s}$ 。

计算结果与实验结果值的比较: ①低压侧电压波的初始尖脉冲值与操作冲击波最大之比为 0.27, 实验值为 0.29 大约偏低了 6.8%, 但比之于用文[3]中 4 阶回路的计算值, 更接近实验所得到的结果; ②高压侧电压  $u_2(t)$  的最大值  $U_{2m}$ (相对值)的多次实验平均值  $U_{2m}=0.500$ , 计算值偏高 10.7%, 文[3]中在不考虑激磁电抗  $L$  作用时, 计算得  $U_{2m}=C_0/(C_0+C_1+C_2)$ , 在所用的参数下, 此值为 0.626, 所以文中的计算结果比之于用文[3]中 4 阶回路的计算值, 也更接近实验所得到的结果; ③计算所得的最大幅值  $U_{2m}$  出现的时间  $T_m$  为 340  $\mu\text{s}$ , 它比实验的多次  $T_m$  数值(处于 350~400  $\mu\text{s}$  之间)小了一些。

早期的试验, 没有采用 IEC 60076-3—2000 规定的视在波前时间等的参数值。计算结果中④、⑤两项没有记录下实验数据未能进行比较。90% 间隔时间的计算结果也较合理。实测到的波长时间大约为 1 020  $\mu\text{s}$ , 计算值更长约为 1 300  $\mu\text{s}$  是因为没有考虑铁心剩磁的缘故。

实验所得到的  $u_2(t)$  波形, 在峰值上叠加了小于 5% 峰值的高频波, 而通过计算得到的  $u_2(t)$  波形是平滑的。这是因为实际的被试变压器是一个分布参数的电网络, 现在只用图 2 中的  $L, L_1, C_2$  来代表, 是不可能全面表达出它的电气特性的。但所用简单的集中参数代表的变压器电路, 已能反映主要的电气特性, 则计算结果还是能起一定的参考作用的。由于激磁电抗  $L$  是一个非线性参数, 试验中它会趋于饱和, 所以不能用图 2 的电路图来计算操作冲击波的波长时间。如果试验前用直流源对被试变压器进行反向励磁, 激磁电抗  $L$  的数值宜于做完反励磁工作之后, 通过空载试验求得。

### 3 结论

1) 使用变压器基本原理中阻抗按电压比平方倍折合的步骤进行等效电容的计算, 思路清楚, 计算过程较简单;

2) 采用文中提出的 5 阶电路, 进行感应式操作冲击试验的原边和副边的波形波前部分波形计算, 其计算结果与实验结果相比比较接近, 具有参考价值。这项计算有利于在试验前进行参数的选择和对波形作出估计。

志谢:

感谢谈克雄教授对文章提出了宝贵的修改意见。

### 参考文献:

- [1] 梁建锋, 李军浩, 侯欣宇, 等. 基于 IEC 60060-3 标准的变压器感应式操作冲击电压产生方法研究[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(6): 75-80.  
LIANG Jianfeng, LI Junhao, HOU Xinyu, et al. Study of transformer inductive oscillating switching impulse voltage generation method based on IEC 60060-3 standard[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014, 33(6): 75-80.
- [2] 唐山供电局修试所联合试验组. 三相电力变压器的操作波试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1978, 18(1): 18-32.  
Tangshan Power Supply Bureau Service and Testing Institute United Testing Team. Three phase power transformer

(下转第 35 页)

- GU Yu,HAO Yanpeng,ZHANG Fuzeng,et al. Comparison of DC flashover performances of polluted composite post insulators in coastal areas and inland areas[J]. Power System Technology,2014,38(5):1373-1378.
- [9] 孙廷玺,张振旗. 湿沉降对珠海地区输电线路外绝缘的影响[J]. 电瓷避雷器,2010(6):1-5.  
SUN Tingxi,ZHANG Zhenqi. The influence of wet precipitation to the external insulation of transmission line in Zhuhai[J]. Insulators and Surge Arresters,2010 (6): 1-5.
- [10] 宿志一. 雾霾天气对输变电设备外绝缘的影响[J]. 电网技术,2013,37(8):2284-2290.  
SU Zhiyi. Influences of fog-haze on external insulation of transmission and distribution equipments[J]. Power System Technology,2013,37(8):2284-2290.
- [11] 俞燮根. 绝缘子模拟固体涂层叠加湿沉降试验研究[J]. 华东电力,1997,25(4):3-6.  
YU Xiegen. Moisture settling test on the insulator analog solid coating in the similitude of fog sedimentation[J]. East China Electric Power,1997,25(4):3-6.
- [12] 马德英,刘 动,卢 明,等. 雾霾中的雾对盐密的影响[J]. 陕西电力,2014,42(12):56-59.  
MA Deying,LIU Dong,LU Ming,et al. Influence of fog-haze environment on ESDD[J]. Shaanxi Electric Power,2014,42(12):56-59.
- [13] 张楚岩,张福增,李锐海,等. 绝缘子人工污秽试验加压方式的比较[J]. 高电压技术,2013,39(1):44-53.  
ZHANG Chuyan,ZHANG Fuzeng,LI Ruihai,et al. Comparison of on-load voltage methods in artificial contamination test for insulators[J]. High Voltage Engineering,2013,39(1):44-53.
- [14] 魏 旭,周志成,戴罕奇,等. 高温硫化硅橡胶试品表面染污方法研究[J]. 高压电器,2015,51(2):51-56.  
WEI Xu,ZHOU Zhicheng,DAI Hanqi,et al. Discussion on contaminating method for high temperature vulcanizing silicone rubber samples[J]. High Voltage Apparatus,2015,51(2):51-56.
- [15] 薛恒嵩. 利用泄漏电流递归分析法研究绝缘子雾凇闪络[J]. 江苏电机工程,2013(6):47-50.  
XUE Hengsong. Research on insulator rime flashover through leakage current regression analysis[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2013(6):47-50.
- [16] 蒋兴良,黄 俊,董冰冰,等. 雾水电导率对输电线路交流电晕特性的影响[J]. 高电压技术,2013,39(3):636-641.  
JIANG Xingliang,HUANG Jun,DONG Bingbing,et al. Influence of fog water conductivity on AC corona characteristics of transmission line[J]. High Voltage Engineering,2013,39(3):636-641.
- [17] 李源军. 雾中输电线路绝缘子交流放电特性及闪络过程研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.  
LI Yuanjun. Study on the AC flashover performance of transmission line insulator in fog environment[D]. Chongqing :Chongqing University,2014.
- [18] 彭 波,汤美云,周卫华,等. 污秽绝缘子在不同脉冲电压条件下的闪络特性研究[J]. 高压电器,2014,50(5):51-55.  
PENG Bo,TANG Meiyun,ZHOU Weihua,et al. Flashover characteristics of polluted insulators under different impulse voltage waveforms[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(5):51-55.
- [19] 蒋兴良,刘 洋,孟志高,等. 雾霾对绝缘子交流闪络特性的影响[J]. 高电压技术,2014,40(11):3311-3317.  
JIANG Xingliang,LIU Yang,MENG Zhigao,et al. Effect of fog-haze on AC flashover performance of insulator[J]. High Voltage Engineering,2014,40(11):3311-3317.
- [20] 关志成,刘瑛岩,周远翔,等. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京:清华大学出版社,2006.  
GUAN Zhicheng,LIU Yingyan,ZHOU Yuanxiang,et al. Insulators and power transmission equipment external insulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2006.
- 王铭民(1974—),男,高级工程师,长期从事高电压技术、电网设备运维技术研究及管理工作。

(上接第 29 页)

- switching sure testing[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology),1978,18(1):18-32.
- [3] 陈昌渔,杨学昌. 有关变压器操作波感耐压试验若干技术问题的论述[J]. 电工电能新技术,1992(1):1-4.  
CHEN Changyu,YANG Xuechang. Some comments on switching sure field test of power transformer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,1992(1): 1-4.
- [4] 张仁豫,陈昌渔,王昌长. 高电压试验技术[M]. 第 3 版.北京:清华大学出版社,2009.  
ZHANG Renyu,CHEN Changyu,WANG Changchang.High voltage testing technology[M]. The Third Edition.Beijing: Tsinghua University Press,2009.
- [5] 谭浩强,田淑清. FORTRAN 语言[M]. 北京:清华大学出版社,1984.  
TAN Haoqiang,TIAN Shuqing. FORTRAN language[M]. Beijing: Tsinghua University Press,1984.