

文章编号:1001-1609(2003)02-0029-03

技术讨论

# ANSYS软件在电力传感器设计中的应用研究

张庆伟, 张曦, 张源斌

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

## APPLICATION OF ANSYS SOFTWARE TO DESIGNING ELECTRIC TRANSDUCER

ZHANG Qing-wei, ZHANG Xi, ZHANG Yuan-bin

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**摘要:** 集中式高压电容分压器电极上的电荷分布易受周围接地物体的影响,导致电容值的改变。笔者介绍一种近年来广泛应用的有限元软件——ANSYS,并利用其对集中式电容分压器电容值的稳定性进行了量化分析。

**关键词:** ANSYS 软件; 电容分压器; 数值计算

**中图分类号:** TM153

**文献标识码:** A

**Abstract:** The distribution of electric charge on the electrode of lumped capacitive divider is easily affected by surrounding objects. Hence the value of capacitance might be variable. The ANSYS software—being used widely in recent years—was employed to calculate the stability of capacitance of the lumped capacitive divider, which shows to be a practical tool.

**Key words:** ANSYS; capacitive divider; numerical calculation

## 1 引言

ANSYS 软件是国际上流行的大型通用有限元软件包,它主要应用于结构、热、流体等领域,而用于解决电磁场问题的较少。笔者通过应用 ANSYS 软件解决高压电容器的电场计算问题,给大家在电场分析中使用 ANSYS 提供一点借鉴。

用高压电容分压器配合低压仪表来测量交流高压,是目前交流高压测量中一种主要的方法。对于电容分压器,关键是提高高压电容的稳定性。图 1 所示是一种集中式电容分压器,它受环境的影响较小,但是体积很大。随着固体绝缘电容器技术的发展,这种集中式高压电容分压器日渐小型化,较目前常用的

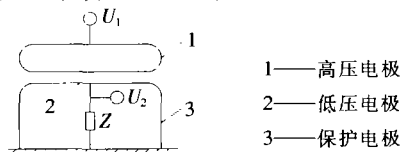


图 1 集中式电容分压器示意图

电阻或阻容式分压器有很大优越性<sup>[1]</sup>。

由于分压器上的电荷分布易受周围接地体的影响,由此引起电容值的改变。笔者应用 ANSYS 找出这种集中式电容器受周围接地物体的影响程度,其高低压电极间的等值电容与低压电极直径、极间距离以及接地物体和电容本体之间的距离关系,为其在设计中提供理论基础。

## 2 ANSYS 软件简介

较其他有限元分析软件,如 SAP 或 NASTRAN 等,ANSYS 软件有以下特点:①ANSYS 是完全的 Windows 程序,用户使用方便;②强大的处理功能,高效方便的绘图功能,灵活多样的剖分网格形状、疏密程度,多种可选择的迭代求解器,还能进行各类线性及非线性分析;③它是一个多物理场耦合分析软件,用户不但可用它单独进行诸如结构、热、流体流动、电磁等研究,还可以进行这些分析的相互影响研究,如热-电耦合场,电磁-流体耦合场等。

ANSYS 软件可用于分析电场多方面的问题,如电场分布、电容、电感、电力线等,ANSYS 电场分析的有限元公式是由电场的 Maxwell 方程组导出,用户可开发出适合于有限元分析的方程组,并可方便地选择 PCG,ICCG, JCG 迭代等非常适合于求解电磁场问题的求解器<sup>[2]</sup>。

## 3 在电容分压器电场计算中的应用

### 3.1 建立计算模型

图 1 所示结构的电容分压器在工作时,考虑到周围接地物的体积较小型分压器大,一般可以将其作为接地平面处理。为了计算简便,不妨放大这种影响,将接地平面处理为等半径环绕分压器的接地柱面的极端情况,见图 2,具体参数如图 3 所示。

根据分压器结构和电气上的对称性,先取如图 3

收稿日期:2002-10-05; 修回日期:2002-12-09

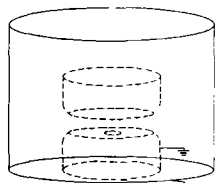


图2 计算模型

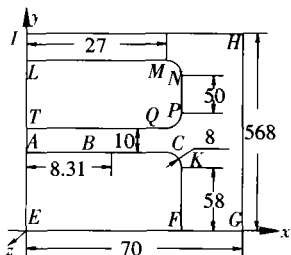


图3 计算模型 1/2 剖面图

旋转所成的体为求解对象(以  $y$  轴为对称轴)。于是该电场的三维拉普拉斯方程边值问题可描述为<sup>[3,4]</sup>:

$$\Omega: \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0$$

式中:  $\varphi$  为矢量电位。

边界条件  $\Gamma_1$ : 在图3中  $EFGHI$  旋转所成的面上  $\varphi=0$ ; 边界条件  $\Gamma_2$ :  $LMNPQT$  旋转所成的面上  $\varphi=U$ ; 边界条件  $\Gamma_3$ :  $ABCKFE$  旋转所成的面上  $\varphi=0$ 。

然后利用 ANSYS 强大的前处理功能很方便地生成如图3的有限元剖面求解模型, 并采用 ANSYS 的 PLANE121 电磁平面单元进行剖分, 如图4。

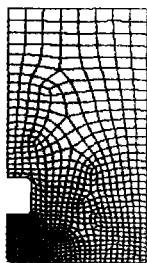


图4 二维有限元网格剖分图

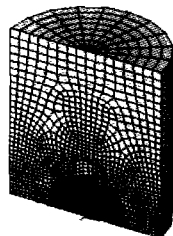


图5 计算模型 1/2 体积剖面  
三维有限元网格剖分图

高压电极与低压电极之间的部分是计算它们之间电容的关键部分, 故而在网格划分时, 该场域网格密度约为其他区域的5倍, 平面单元的总划分数目约为481个。接着, 将分压器各部分所用材料, 如有机玻璃, 空气介质等, 分别定义材料特性。由于该计算模型的轴对称性, 将图4所示剖分好的 ANSYS 模型围绕  $y$  轴旋转  $360^\circ$ , 将由 PLANE121 电磁平面单元旋转延伸成的单元定义为 Solid122 六面体砖形20节点三维电磁单元。旋转时, 在周向上每  $90^\circ$  划分为5个单元, 从而得到最终 ANSYS 求解模型, 如图5所示。由此, 共划分 Solid122 三维单元 10 101 个, 节点共计 40 022 个。

### 3.2 施加载荷及求解

施加各边界条件, 在各旋转面的节点上加上电压后, 进入求解程序, 选择 ANSYS 雅可比迭代求解器(JCG)进行求解。

### 3.3 结果分析

笔者使用的 ANSYS 版本是 5.7, 在该版本中增

添的新功能有一项是“Cmatrix”命令。在求解程序中使用该命令可以直接计算出求解模型中各导体之间的相对电容值。改变接地面与分压器轴线的距离  $D$ , 计算不同距离时3种低压电极半径  $R$  在极间距离  $d$  取为 10 mm 时对应的等效电容  $C$  (参数  $d, D, R$  的示意图见图6)。计算结果如表1所示。

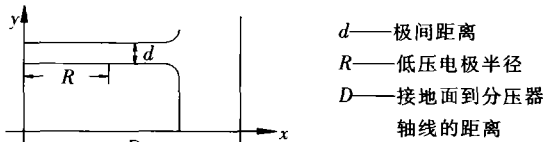


图6 参数  $d, R, D$  的示意图

表1 改变  $R$  与  $D$  时  $C$  的计算结果 pF

$D/mm$	$R/mm$		
	8.31	16.62	26.0
70	0.210 0	0.807 8	1.902
105	0.210 0	0.808 0	1.906
140	0.210 0	0.808 0	1.907
175	0.210 0	0.808 0	1.908
210	0.210 0	0.808 0	1.908
$\infty$	0.210 0	0.808 0	1.908

注:  $D=\infty$  表示不考虑垂直接地影响,  $d=10$  mm。

从表1可以看出, 随着距离  $D$  的减小, 高低压电极间等效电容  $C$  增大。这种趋势随着  $R$  的减小, 面逐渐减缓。相对于无接地面时,  $C$  的改变量在  $D=70$  mm 时不会超过 0.5%, 当  $D$  增大到约 210 mm 时,  $C$  改变量小于 0.05%。

重新建立计算模型。改变极间距离  $d$ , 取  $D=130$  mm, 则不同  $R$  时等效电容  $C$  与  $d$  的关系见图7。

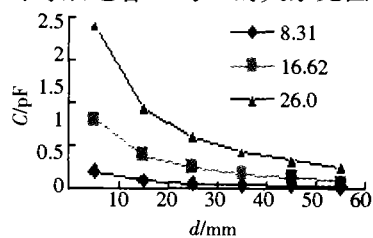


图7  $R$  不同时等效电容  $C$  与  $d$  的关系曲线

从图7可见, 随着  $d$  的增加,  $C$  呈非线性规律递减, 但  $R$  较小时, 这种减小的程度也较小。不考虑垂直接地平面的影响, 不同极间距离  $d$  时  $C$  的计算结果如表2所示。

表2 不考虑接地面时不同  $d$  下  $C$  的计算结果 pF

$d/mm$	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0
$C/pF$	0.210 0	0.104 4	0.068 0	0.049 2	0.037 6	0.029 9

注:  $R=8.31$  mm。

比较图7与表2数据可以看出, 相同极间距离  $d$  时, 垂直接地的影响将使  $C$  增大, 这同表1的计算结果一致。上述计算结果的  $C$  相对改变量见表3。

表3  $d$  相同时垂直地面作用下  $C$  的相对改变量

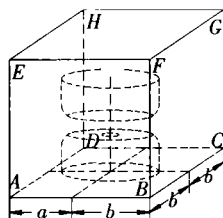
$d/\text{mm}$	10	20	30	40	50	60
$(\Delta C/C)/\%$	0.00	-0.11	-0.78	-2.49	-4.99	-8.20

注:  $R=8.31 \text{ mm}$ 

## 4 问题与讨论

尽管 ANSYS 是一种功能强大的软件,但在实际应用中还是有一些缺陷的。

为了进一步更真实地模拟接地物体对分压器的影响,用一接地平面代替,所以有限元求解模型如图 8 所示。图中  $A_1$  表示接地平面,其他面均表示无限远面。但是由于在 ANSYS 电磁场计算软件中三维无限远场单元均为六面体砖形单元,又由于该算例场域及边界条件的不对称性,故无法像上例那样进行剖分,所以只有使用三维 20 节点砖形单元 Solid122 进行直接剖分,这时矛盾显现出来。Solid122 砖形单元对某些体,由于其软件自身的缺陷,而无法进行剖分。据笔者的经验,这些大都是一些没有棱的体,如圆柱体等。这样只能用四面体三棱锥形单元剖分,而三棱锥形单元和砖形的远场单元是无法配合的,但三维远场单元只有六面体砖形,这就无法应用三维无限远场单元来更真实地模拟无限远边界条件,从而剖分失败。那么,对该算例,只有用经验性的试探法。取图 8 中接地面和分压器中心轴线的距离  $a$  等于非接地面和分压器中心轴线的距离  $b$ ,则分压器的边界条件为正方形,令  $A_1, A_2, A_3, A_4$  均为接地面,先把各面到分压器轴线的距离取得足够大(可参考表 1),如对等效电容  $C$  的影响不到 0.1%,就把非接地面和分压器中心轴线的距离  $b$  固定,作为无限远面,从而改变接地面和分压器中心轴线的距离  $a$  的值,就可以得出单一垂直地面对分压器的影响。



面  $ADHE$  为  $A_1$ ,  
面  $ABFE$  为  $A_2$ ,  
面  $BCGF$  为  $A_3$ ,  
面  $CDHG$  为  $A_4$ .

图8 考虑接地平面时的计算模型( $A_1$ 为接地平面)

该算例也曾使用模拟电荷法计算<sup>[5,6]</sup>,在建立计算模型时,为计算方便,可将图 1 中低压电极与保护电极视为一体,这样计算结果与实际的电荷分布差异不会太大。当低压电极半径取为  $8.31 \text{ mm}$ ,极间距离  $d=10 \text{ mm}$  时,计算出不考虑接地面影响的  $C=0.2036 \text{ pF}$ ,而使用 ANSYS 在相同参数条件下,计算

得  $0.2100 \text{ pF}$ ,误差相对后者约为 3%。

可以看出,两者的计算结果稍有差异,但考虑到两种方法在对待低压电极问题上的不同,模拟电荷法把低压电极与保护电极视为一体,ANSYS 软件可以更真实地模拟高压电器结构上的特点,低压电极是悬浮的。用与上述电极尺寸相近的罗哥夫斯基电极构成的电容分压器进行试验, $R$  约为  $9.0 \text{ mm}$ 。通过实测,由垂直地面影响造成的低压侧电压改变量(相对量)如表 4 所示。比较表 3 和表 4 可见,实测电压减小量与计算电容减小量有相同的规律。所以,ANSYS 的计算结果是可以信赖的,并且随着新版本的推出,其电磁场功能会日益完善和提高。

表4 有垂直地面影响时造成的电压相对改变量实测值表( $R=9 \text{ mm}$ )

$d/\text{mm}$	20	30	40	50	60
$(\Delta u/u)/\%$	-0.25	-0.33	-1.86	-2.98	-6.21

比较两种计算方法,对较复杂结构的模型,模拟电荷的数量,模拟电荷和匹配点的位置关系都有一个最优值。优化的过程就是反复调整的过程。但就一个三维结构来说,这样的优化通过计算机编程来完成还很困难。而对 ANSYS 软件,只要保证剖分单元有令人满意的质量、密度、分布情况,计算结果就是有保证的。

## 5 结语

利用 ANSYS 的分析结果,可以发现高压电容极间距离愈大,等效电容  $C$  受周围接地物体的影响愈大。为了保证分压器分压比的稳定性,必须合理选择极间距离与低压电极半径的配比,一般小于 2:1,并且低压电极半径与保护电极半径之比小于 1:3 即可。

## 参考文献:

- [1] 华北工学院. 高电压实验技术 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [2] 王国强. 使用工程模拟技术及其在 ANSYS 上的实践 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999.
- [3] M V K 查理(美), P P 席尔凡斯特(加). 电磁场问题的有限元解法 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [4] 盛剑霓. 工程电磁场数值分析 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
- [5] 谈克雄. 高压静电场数值计算 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1989.
- [6] 赵海翔. 集中式电容分压器分压比稳定性的研究 [J]. 高电压技术, 1998, 24(2): 66-69.

作者简介:张庆伟(1977-),男,硕士研究生,从事数字式电力互感器方面的研究。