

800 kV MOA 电位分布数值分析和测量

岳亚丽¹, 江少成², 张源斌³

(1. 湛江供电局, 广东 湛江 524005; 2. 温州供电局, 浙江 温州 325000; 3. 西安交通大学电气学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 针对 800 kV 氧化锌避雷器 (MOA) 的电位分布, 笔者从数值仿真和试验两个方面进行分析。首先, 采用有限元法及 ANSYS 分析了无并联电容时 800 kV MOA 的电位分布, 得到了所有氧化锌组件 (MOR) 的电压偏差和每单元内 MOR 所占电压的百分比, 并同时求出各法兰之间的部分电容和对地电容。并联电容后将 MOA 的“静电场”问题转化为“电路”问题, 用节点电压法求出并联电容后的电位分布和 MOR 的电压偏差。接下来, 采用自行研制的光纤测量系统对 800 kV MOA 的电位分布进行了实测, 得出了流过 MOR 的电流分布曲线, 从而求得实测电位分布曲线。二者的结果表明, 测量结果能较准确的反映 MOA 的电位分布趋势, 而计算方法则能准确的得出各 MOR 的电压偏差。二者在反映电位分布趋势上取得了一致性。

关键词: 氧化锌避雷器; 电压偏差; 有限元; 部分电容; 电位分布

中图分类号: TM835

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)04-0063-04

Numerical Analysis and Measuring for the Potential Distribution of 800 kV MOA

YUE Ya-li¹, JIANG Shao-cheng², ZHANG Yuan-bin³

(1. Zhanjiang Power Supply Bureau, Zhanjiang 524005, China; 2. Wenzhou Power Supply Bureau, Wenzhou, 325000, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Numerical analysis and measuring for The potential distribution of 800 kV MOA are introduced in the paper. Firstly, the potential distribution of 800 kV MOA with no parallel connection of capacitors, is studied with the finite element method (FEM) and ANSYS software. All of MOR voltage deviation and MOR voltage share ratios in each unit are obtained. The partial capacitance between every flange and the capacitance to the earth of each flange are also calculated at the same time. After connecting parallel capacitor, MOA “electrostatic field” issue will be transformed into “circuit” problem. We can get the partial capacitance by ANSYS, and then calculate the potential distribution of MOA and the voltage deviations of MOR using node potential method (NPM), when there is parallel connection of capacitors. Then, the potential distribution test of 800 kV MOA has been done by using the designed optic-electric measuring system. The current distribution curve of MOR is gotten, and then the potential distribution is obtained. The results show that the measuring results relative accurately reflect the potential distribution of MOA, and the calculating results accurately obtain the voltage deviations of MOR. Both trends reflect the potential distribution achieve consistency.

Key words: MOA; voltage deviation; finite element; partial capacitance; potential distribution

0 引言

对无间隙氧化锌避雷器 (MOA) 而言, 由于长期承受工频电压的作用, 杂散电容的存在使得靠近高压端的 MOA 单元的氧化锌组件 (MOR) 承担的电压比远离高压端的承担的电压高^[1], 并且这一情况随着 MOA 高度的增加、元件数的增多以及 MOA 的安装高度的减小而愈加严重。若不采取均压措施来改善其电位分布, 靠近高压端的 MOR 将会因承担的电压过高而加速老化, 从而最终导致整台 MOA 损坏。因

此, MOA 电位分布的仿真和试验分析在其设计制造中具有重要意义。

要精确计算 MOA 沿 MOR 的电位分布是不可能的。这主要是由于: 所计算的电场是一个延伸到无穷远的开域场; 在场域内又包含有多种介质 (如 MOR、压板、法兰、瓷套、填充气体、空气等); 除 MOA 顶部和均压环为高电位电极外, 还有许多电位悬浮导体, 如压板、法兰、弹簧等。这些都给计算带了不少困难, 因此, 只能采用数值计算的方法求解。常用的方法有模拟电荷法^[2-4]和有限元法^[5,6]。

模拟电荷法因其形成的矩阵为满阵, 很容易带

收稿日期: 2009-01-30; 修回日期: 2009-04-21

作者简介: 岳亚丽 (1980), 女, 硕士, 研究方向为高电压测量技术, 现从事变电试验工作。

来较大的误差。而有限元法(FEM)非常适合于含有
多介质电场问题的数值分析,但对于形状和分布复
杂的三维问题,特别是对于包含开域自由空间的电
磁问题,其建模和求解还存在困难。近年来,以有限
元法与解析法^[7]相结合求解 MOA 电位分布的新方
法,较好地解决了有限元法应用于静电场无法处理
开域边界的问题。

笔者采用有限元-解析结合法对 800kV MOA
的电场和电位分布进行了仿真计算,并采用自行研
制的光纤测量系统对其电位分布进行了实测,二者
在反映电位分布趋势上取得了一致性。

1 MOA 电位分布仿真分析

1.1 静电场模型

在工频工作状态下,无并联电容的 MOA 可看
作是由等效电容 C 组成的网络,因此可将无并联电
容 MOA 的电位分布问题转化为静电场的求解问
题。通过简化得到该 MOA 静电场结构见图 1。

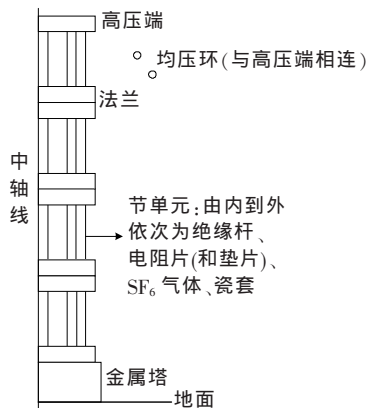


图 1 无并联电容时 MOA 静电场模型

对应的边值问题为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\epsilon \frac{\partial \phi}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\epsilon \frac{\partial \phi}{\partial z}) = 0 \quad (1)$$

$$\phi|_{r_1} = 462 \quad (2)$$

$$\phi|_{r_2} = 0 \quad (3)$$

$$\phi|_{r=\infty} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial r} |_{r=0} = 0 \quad (5)$$

$$\phi_1 = \phi_2, \epsilon_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial n} = \epsilon_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial n} \quad (6)$$

$$\phi_i = C_i, \int_S N \epsilon \frac{\partial \phi}{\partial n} ds = 0 \quad (i=1, 2, 3 \dots) \quad (7)$$

式(1)表示场域内的电位函数满足轴对称条件,包括
具有五种介质的 MOA 本体、有限空气区域和无限
空气区域;式(2)表示 MOA 高压端施加工频持续运
行电压, kV;式(3)表示地和最下部法兰的电位为

零;式(4)表示在无穷远处电位为零;式(5)表示在对
称轴线上电位函数对垂直于轴线方向的偏导数为
零;式(6)表示两种不同的介质分界面应满足的条
件;式(7)表示 MOA 本体的金属垫片和法兰为各具
有一定电位的浮动电极,浮动电极表面同时满足净
电荷为零, S 表示每个金属电极面。

1.2 有限元求解无并联电容 MOA 电位分布

为了快速、准确地进行电位分布的计算,选择
ANSYS 求解无并联电容 MOA 电位分布。其 ANSYS
模型见图 2。

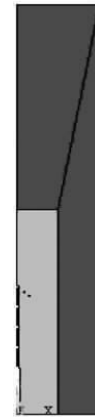


图 2 MOA 有限元模型

建立了 ANSYS 模型以后,可以很方便地计算出
MOA 的电位分布,见图 3。

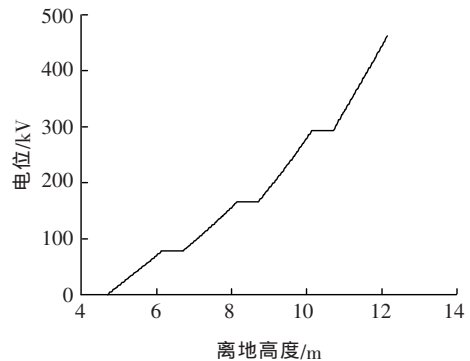


图 3 无并联电容 MOA 柱向电位分布图

从图 3 中可以看出,每一个单独的 MOA 单元
内部电阻片电位随高度成线性分布,在两个单元连
接的法兰处电位不变,但是随着离地越高,即离高
压端越近,电位在单位高度上的增量越大。与理论
分析结果一致。

1.3 电路求解并联电容后的 MOA 电位分布

MOA 并联电容的示意图见图 4。在 MOA 单元
B、C、D 内(法兰 3 和 4 之间、法兰 2 和 3 之间、法
兰 1 和 2 之间)分别并联由集中电容器组成的电容,
分别为: $C_1=8.511 \text{ pF}$, $C_2=45.83 \text{ pF}$, $C_3=86.146 \text{ pF}$ 。

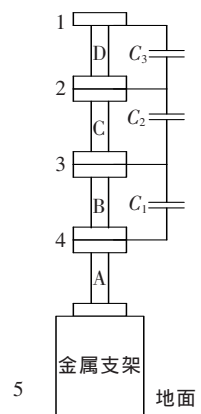


图4 MOA 并联电容示意图

笔者在将并联电容作为一个集中参数处理而忽略其他效应时，并联电容器的目的就是强制改变法兰1、2、3的电位，从而改变A~D MOA单元承受的电压，而在这一过程中各电阻片占本段单元的电压比例不变。首先计算这一比例。高压端与地之间施加462 kV的电压，则利用有限元法计算单元A~D段各电阻片的电压比例见表1。

表1 各电阻片电压比例

单元序号	电压/kV	电阻片电压范围/kV	电阻片占用本单元百分比范围
A	77.409	1.414~1.465	1.826 7%~1.892 5%
B	88.241	1.54~1.79	1.745 2%~2.028 5%
C	127.99	2.17~2.67	1.695 4%~2.086 1%
D	168.36	3.05~3.24	1.811 6%~1.924 4%

先利用ANSYS计算部分电容。由图4可知，除“地”（包括下法兰和金属支架）之外，另外4个导体（法兰及均压环）共有 $5 \times 4 / 2 = 10$ 个部分电容，即

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{23} \\ & & C_{33} & C_{34} \\ & & & C_{44} \end{bmatrix} \quad (8)$$

每个导体表面电荷为

$$\begin{cases} q_1 = C_{11}U_{15} + C_{12}U_{12} + C_{13}U_{13} + C_{14}U_{14} \\ q_2 = C_{21}U_{21} + C_{22}U_{25} + C_{23}U_{23} + C_{24}U_{24} \\ q_3 = C_{31}U_{31} + C_{32}U_{32} + C_{33}U_{35} + C_{34}U_{34} \\ q_4 = C_{41}U_{41} + C_{42}U_{42} + C_{43}U_{43} + C_{44}U_{45} \end{cases} \quad (9)$$

式(8)、(9)中， $C_{ii} (i=1, 2, 3, 4)$ 表示各导体的对地电容，而 $C_{ij} (i \neq j) = C_{ji}$ 表示导体之间的互有电容。若令 $U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = 1 \text{ V}, U_5 = 0$ ，则式(9)成为

$$q_i = C_{ii}U_{i5} \quad (10)$$

则 $C_{ii} = q_i / U_{i5}$ ，即各导体表面的电荷总量与对地电位差的比值为其对地电容。

ANSYS自带的自动计算电容指令Cmatrix可以

方便得到式(8)的对应的电容矩阵为

$$C = \begin{bmatrix} 84.63 & 82.472 & 7.159 2 & 3.585 2 \\ & 17.066 & 64.371 & 1.439 2 \\ & & 25.586 & 65.043 \\ & & & 92.078 \end{bmatrix} \quad (11)$$

考虑并联电容器 C_1, C_2, C_3 后，节点电压方程为

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^4 C_{2i} + (C_2 + C_3) & -(C_{23} + C_2) & -C_{24} \\ -(C_{32} + C_2) & \sum_{i=1}^4 C_{3i} + (C_1 + C_2) & -(C_{34} + C_1) \\ -C_{42} & -(C_{43} + C_1) & \sum_{i=1}^4 C_{4i} + C_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (C_{12} + C_3)U_1 \\ C_{13}U_1 \\ C_{14}U_1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

并联电容后电压的计算就可以根据式(12)求解。

通过求解可以得到并联电容后的MOA电位分布，见图5(MOA实际运行条件下，支架为4 m)。从图5中可以看出，与并联电容前的电位分布相比，并联电容后MOA柱向的电位分布更加趋于均匀。

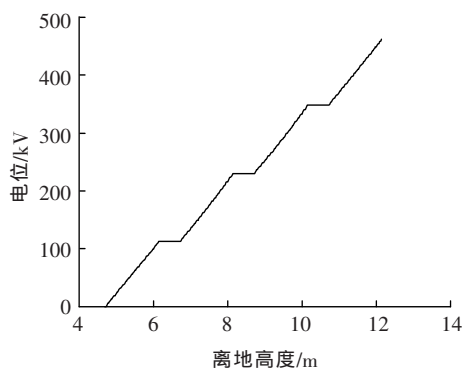


图5 并联电容器后MOA的电位分布图

2 800 kV MOA 电位分布试验

2.1 MOA 电位分布测量系统

文中试验所用的测量系统是自行研制的，由电流传感器、光纤、信号处理单元和计算机4部分组成，结构框图见图6。

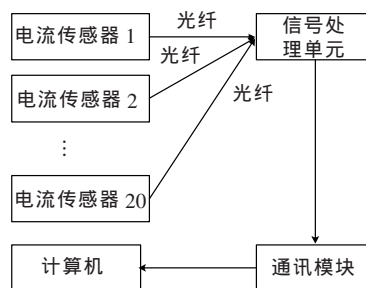


图6 测量系统结构框图

该系统采用无源的方法，用流过每片电阻片中电流的能量驱动一个低功耗发光器件 ($P=40 \mu W$) 并经光纤将脉冲信号传递给接收器，显示出脉冲频率或脉冲个数。由于流过电流传感器的电流 I_i 正比于传感器球壳上的电压 U_i ，而脉冲频率 f 或者脉冲个数 n 又是 U_i 的函数，所以 f 和 n 也是 I_i 的函数，流过电阻片的电流可以用光脉冲的频率 f 或脉冲个数 n 来标定。

2.2 800 kV MOA 电位分布试验

由于试验条件的限制，将 MOA 安装支架的高度降低到 2 m。MOA 试验电压为工频持续运行电压 $U_c=462 \text{ kV}$ ，传感器的安装位置为每 9 片电阻片安装一个，每个 MOA 单元里面安装 5 个传感器。通过试验可以直接得到 MOA 本体的电流分布曲线，结果见图 7。

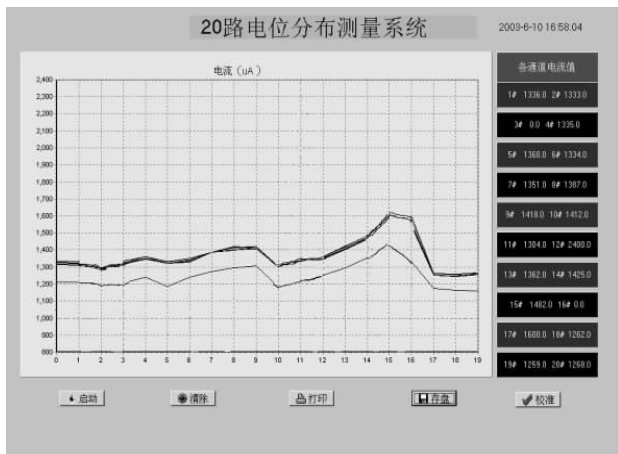


图 7 电流分布测量曲线图

3 仿真与试验结果分析

3.1 试验条件下的 MOA 电位分布仿真结果

应用 1 中介绍的计算方法可以计算出试验条件下支架为 2 m MOA 的电位分布，见图 8。从图 8 中可以看出，每一单元内电阻片柱向的电位分布已经是明显的曲线分布。因为电位分布主要与 MOA 的几何位置有关，由于 MOA 的支架高度降低，导致 MOA 内部电阻片对地的杂散电容增大，从而改变了 MOA 柱向的电位分布。

3.2 结果分析

试验所用的测量系统是在假设 MOA 电阻片的阻抗是相等的条件下设计的。因此，假设电阻片的阻抗相等为 Z ，则由图 8 的电流分布，通过简单的 $U=ZI$ 变换得到电位分布。在计算数据中取传感器安装位置处电阻片对应的电位值，得出与实测对应的计算电位分布。实测结果与计算结果对比见图 9，图 9 中取测量系统传感器安装处的电位并转换为标么

值，施加在 MOA 上的总电压为 1。

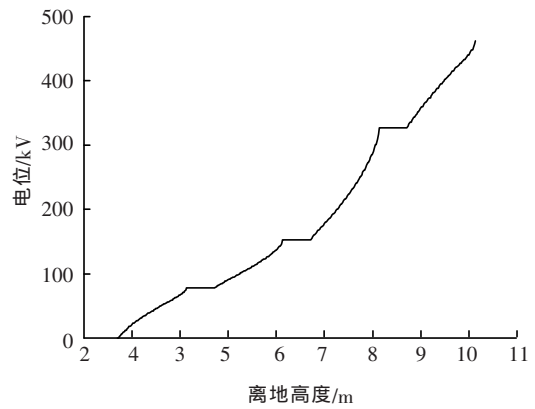


图 8 支架为 2 m 的 MOA 电位分布图

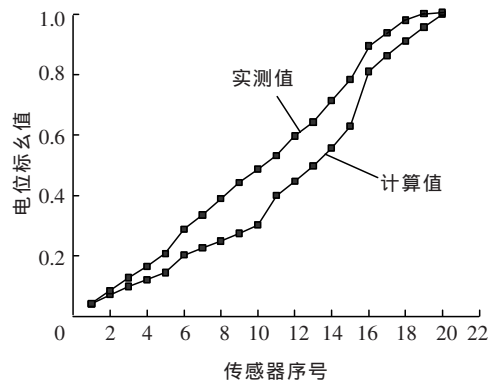


图 9 计算与实测得到电位标么值的分布曲线

图 9 中的计算值是由计算数据得出的传感器安装位置处的电位分布曲线。该 MOA 正常的工作高度为距离地面 4 m，内部的并联电容也是根据支架为 4 m 设计的。当支架为 2 m 时，MOA 内部电阻片对地的杂散电容增大，并联电容就不能完全补偿杂散的影响，造成了此时的电位分布较支架为 4 m 时的 MOA 的电位分布(图 5)更加不均匀。

由图 9 可以看出，沿 MOA 柱向的电位是由小到大的。实测值中每个 MOA 单元所串的 5 个传感器(1~5 号、6~10 号、11~15 号、16~20 号)的电位基本成直线增加。由于法兰的影响，6 号、11 号、16 号传感器的电位都有了较明显的增加。每个 MOA 单元内部的电位成直线分布，而单元间法兰的影响使得连接处的电位有了突增，这与理论分析一致。而 18 号、19 号、20 号传感器处于高压端均压环的包围中，由于均压环的作用，该处的电阻片承担的电压相对减小，因此，曲线斜率逐渐减小。图中显示，计算与实测的电位具有相同的分布趋势，以实验方法证实了有限元计算方法的准确性和实用性，也以理论

(下转第 70 页)

和端部圆弧半径来减小屏蔽罩端部的场强分布,均匀灭弧室内部的电场。真空灭弧室外表面的电场强度相对较小,真空灭弧室外表面的瓷外壳两端与灭弧室两端盖板相接近的附近区域,相对于沿表面的其他位置的电场强度值较大。

真空断路器触头关合时,整体的电位云图和电压等位线见图 11、12。真空断路器触头闭合时,中心导体加高压 125 kV,取无穷远边界为零电位,加载后计算结果表明,断路器的内部、外部的电场强度都很小,其中最大电场强度为 0.08 kV/mm。电场强度分布均匀,由触头为中心,周围的电压呈梯度分布趋势。

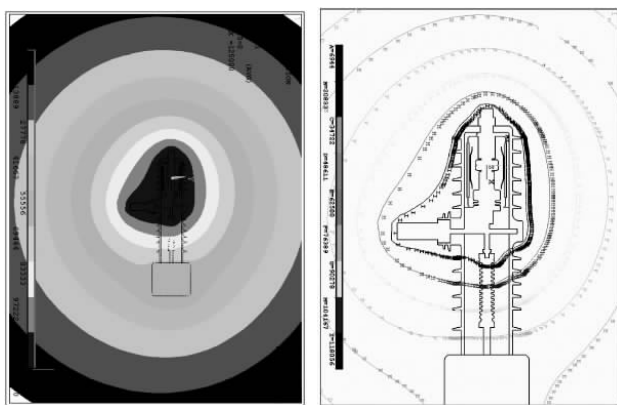


图 11 关合时的电位分布 图 12 关合时的电压等位线分布

笔者对断路器的触头单相断口对地的绝缘校核,如需要考查其相间的绝缘能力,可以根据静电场的计算公式,在电介质均匀的条件下,电场分布情况与所加的电压呈线性关系,即用所得的各个电场强度的最大值乘以相应系数(95/125=0.76),所得值就

是加雷电冲击耐受电压 95 kV 下的断路器的相间场强最大值。同理可以得到施加短时 1 min 工频电压 50/65 kV 下的各处场强最大值。笔者参照判断依据的击穿值与闪络值,比较文中的计算结果,所得的最大击穿场强和绝缘件的沿面闪络均小于判断值。

通过上述理论计算和绝缘分析,设计了 24 kV 户外高压交流真空断路器的绝缘结构,包括相间距离和爬距等,设计的产品其绝缘性能一次性通过了全部型式试验。

4 结语

针对江苏省 20 kV 电压等级供电的试点工程以及全国配电工作的发展趋势,笔者研制开发出了 24 kV 户外高压交流真空断路器,对整体结构、操作机构和绝缘性能等做了设计和研究,提高了产品的可靠性。该断路器依据国家标准,完全满足并在部分参数上超过了江苏省电力公司 20 kV 户外柱上真空断路器的技术规范,具有广阔的发展前景。

参考文献:

[1] 林 莘.现代高压电器技术[M].北京:机械工业出版社,2005.
 [2] 夏勇涛.城市电网改造和中压配电电压选择[J].云南水力发电,2007(1):110-112.
 [3] 潭 蓉.高压真空断路器弹簧操动机构的设计[J].甘肃工业大学学报,2000(1):36-40.
 [4] 盛剑霓.工程电磁场数值分析[M].北京:机械工业出版社,2003.
 [5] 冯亚清,马志瀛,刘 韬,等.真空断路器外表面绝缘及其电场计算 [J].高电压技术,2003,29(3):18-20.

(上接第 66 页)

证实了该测量系统的实用价值。

参考文献:

[1] 韩教社,戴 栋,马西奎,等.应用有限元法计算氧化锌避雷器电位分布[J].中国电机工程学报,2001,21(12):105-114.
 [2] HE Jin-liang,ZENG Rong,CHEN Shui-ming,et al.Potential Distribution Analysis of Suspended-type Metal-oxide Surge Arresters [J].IEEE Trans. on Power Delivery,2003,18(4):1 214-1 220.
 [3] 曾冬松,何金良,吴维韩.安装高度对 ZnO 避雷器电位分布的影响[J].电瓷避雷器,1993(5):39-42.
 [4] KUMAR U,MOGAVEERA V.Voltage Distribution Studies on

ZnO Arresters[J].IEE Proc.-Gener.Transm.Distrib,2002,149(4):457-462.
 [5] KOJIMA S,OYAMA M,YAMASHITA M.Potential Distribution of Metal Oxide Surge Arresters under Various Environmental Conditions [J].IEEE Trans. on Power Delivery,1988,3(3):984-989.
 [6] LIU Xue-zhong,LIU Fu-yi.The Influence of Varistor Disk Capacitance of MOA Arrester on Its Voltage Distribution[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials,2000:761-764.
 [7] 韩教社,马西奎,戴 栋.有限元-解析结合解法在无解轴对称静电场问题数值解中的应用 [J].电工技术学报,2001,16(5):1-5.