

特高压GIS避雷器对压敏电阻电压梯度的要求

何金良^{①*}, 胡军^①, 孟博文^①, 张波^①, 朱斌^②, 陈水明^①, 曾嵘^①

① 清华大学电机工程与应用电子技术系, 电力系统国家重点实验室, 北京 100084;

② 西安电瓷研究所, 西安 710077

* E-mail: hejl@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2008-03-16; 接受日期: 2008-06-13

国家杰出青年基金(批准号: 50425721)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 50737001)和国家十一五科技支撑计划(批准号: 2006BAA02A16)项目资助

摘要 采用三维有限元与电路相结合的“场路结合”数值计算方法来分析特高压GIS避雷器电位分布特性. 通过对多种方案的比较分析表明, 最有效的改善电位分布的方法是提高ZnO压敏电阻的电压梯度. 综合多方面因素, 合适的压敏电阻电压梯度为426 V/mm, 此时1000 kV GIS的电位分布不均匀度可控制在10%以内. 研究结果为高梯度压敏电阻的研制提供了基本的技术指标.

关键词

特高压

GIS 避雷器

ZnO 压敏电阻

电压梯度

电位分布

场路耦合

三维有限元方法

电力系统设备的过电压水平是建立在过电压的保护水平之上. 目前制约我国特高压交流输电技术发展的重要因素是过高的雷电过电压及操作过电压导致特高压设备的研制存在技术瓶颈、造价过高. 电力系统设备的绝缘水平建立在金属氧化物避雷器(MOA)的过电压保护水平基础之上, 优良保护性能的避雷器将降低作用在设备上的雷电过电压和操作过电压水平, 从而降低设备的绝缘水平以降低特高压设备制造的技术瓶颈和造价, 节省电力建设投资.

目前, 我国正在建设的1000 kV特高压交流输电系统采用气体绝缘变电站(GIS)和半气体绝缘变电站(HGIS), GIS和HGIS的避雷器采用罐式结构, 如何改善避雷器内部压敏电阻芯体的电位分布均匀性是特高压GIS避雷器设计中的关键问题.

为了缩短避雷器的长度和改善其电位分布, 需要采用高电压梯度的ZnO压敏电阻. 近年来, 一般添

加稀土金属氧化物来提高ZnO压敏电阻的电压梯度, 但非线性特性变差^[1]. 文献[2]在稀土氧化物掺杂提高ZnO压敏电阻的电压梯度的基础上, 通过添加Co和Mn的氧化物, 能有效降低ZnO压敏电阻的泄露电流和增加其非线性系数. 试制的压敏电阻样品的电压梯度达492 V/mm, 非线性系数达76, 而泄露电流只有1 μ A. 目前, 商用ZnO压敏电阻的最高电压梯度达到了400 V/mm^[3].

对于避雷器来说, 高电压梯度的压敏电阻的电压梯度到底取多少合适, 目前文献中还没有涉及. 本文从特高压GIS避雷器的设计出发, 讨论了特高压GIS交流避雷器对ZnO压敏电阻电压梯度的要求.

1 特高压GIS避雷器电位分布计算方法

1.1 特高压GIS避雷器的结构

1000 kV罐式避雷器主体由罐体、绝缘支架、电

阻片、均压罩和均压环组成。罐体外套采用卧式圆筒形结构, 内充有 SF6, 因而具有良好的绝缘和防污性能。绝缘支架起到支撑电阻片的作用。压敏电阻片采用穿入其内孔的环氧玻璃钢芯棒来固定为电阻片芯体。电阻片芯体分为 4 节, 节间采用法兰连接, 共有 5 个连接法兰, 高压端法兰 F_4 与高压相连, 另一末端法兰 F_0 与 GIS 罐体相连。每节电阻片分为四柱, 每柱由一定数量的电阻片串联构成。均压罩和均压环起到均压作用。其外形结构见图 1。初步设计时, 电阻片电压梯度按 300 V/mm 计算, 单柱电阻片数量为 192 片, 四柱并联的电阻片最大总数为 768 片, 环状电阻片的外径为 136 mm, 内径为 54 mm, 高度为 20 mm。电阻片芯体高度为 5100 mm, 均压环外径 960 mm, 均压环罩入深度 1600 mm, GIS 罐体直径达 1 m。

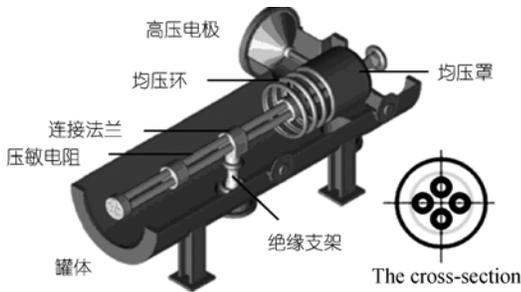


图 1 1000 kV GIS 避雷器结构

根据电阻片的老化特性, 1000 kV GIS 避雷器内压敏电阻片的电位分布不均匀系数应小于 15%。

1.2 三维有限元与电路相结合的数值计算方法

1.2.1 三维有限元求解电位分布 根据 1000 kV MOA 结构特点, 直接采用三维有限元方法进行分析, 1000 kV MOA 的边值问题如下

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, & \text{在所有求解区域内,} \\ \varphi|_{S_0} = \varphi_0, & S_0 \text{ 为已知电位边界,} \\ \varphi_1 = \varphi_2, \varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \varepsilon_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n}, & \text{在介质分界面上,} \\ \oiint_{S_i} \varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial n} dS = 0, \varphi|_{S_i} = \varphi_i, & S_i \text{ 为电位悬浮导体表面,} \end{cases} \quad (1)$$

将(1)式转化为相应泛函问题

$$F(u) = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} (\varepsilon |\nabla \varphi|^2 - 2\rho\varphi) ds = \min. \quad (2)$$

(2)式的边界为金属罐体, 其电位为 0, 对于罐体的内部区域 Ω , ρ , ε 分别为内部媒质的电阻率和介电常数。将罐体内区域离散可得到(2)式对应的有限元矩阵方程, 求解可以得到 MOA 的电位分布以及杂散电容参数。

1.2.2 场路结合分析集中元件对电位分布的影响 在压敏电阻芯体上并联集中电容器是改善避雷器内部压敏电阻电位分布的一种非常有效的方法。加入集中元件后无法直接采用三维有限元方法来进行分析, 但可借鉴分析加入集中元件的高电压设备电压分布的场路结合方法^[4-7]。采用场路结合思想分析 1000 kV GIS MOA 电压分布不均匀性的原理如下。

- 1) 利用电磁场数值计算方法计算 MOA 的电压分布, 并提取杂散电容参数。
- 2) 建立 MOA 的等效电路模型。
- 3) 在等效电路中加入集中元件, 求解不同均压方案下的 MOA 电压分布。

提取得到 MOA 的杂散电容参数后, 就可以通过场路等效的概念, 将 MOA 等效为集中参数电路模型。图 2 所示为利用三维有限元分析得到的 1000 kV MOA 的等效电路模型, 其中, $Z_1 \sim Z_4$ 表示 MOA 各节元件的总阻抗, 一般 MOA 元件用等值电容来表示; C_{ii} 和 C_{ij} 表示各个法兰(或均压环)的自电容和互电容; U_s 表示加在 MOA 上的电压。

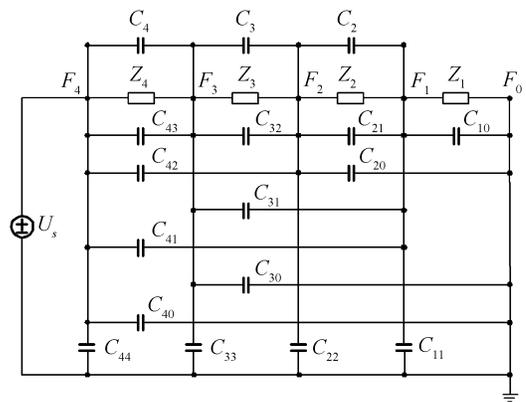


图 2 1000 kV MOA 等效电路模型

在连接法兰之间接入集中电容器来改善电位分布, 如图 2 所示, 在 MOA 等效电路模型中的 F_4 和 F_3 之间、 F_3 和 F_2 之间、 F_2 和 F_1 之间分别接入集中电容 C_4 , C_3 和 C_2 , 可以得到节点电压方程

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^4 C_{i4} + C_4 & -(C_{34} + C_4) & -C_{24} \\ -(C_{34} + C_4) & \sum_{i=1}^4 C_{i3} + (C_3 + C_2) & -(C_{23} + C_3) \\ -C_{24} & -(C_{23} + C_3) & \sum_{i=1}^4 C_{i2} + (C_3 + C_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_4 \\ U_3 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{14}U_1 \\ C_{24}U_1 \\ (C_{21} + C_2)U_1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中, $U_1 \sim U_4$ 表示法兰 $F_1 \sim F_4$ 的电位。

2 不同设计时 GIS 避雷器的电位分布

2.1 初步设计对应的电位分布

采用三维有限元方法分析得到的 1000 kV GIS 罐式避雷器初步设计方案对应的 GIS 避雷器内部 ZnO 压敏电阻的电位分布如图 3 中均压环直径为 960 mm 对应的曲线所示(最下端电阻片电阻片对应图中第 1 片), 最大耐压偏差为 21.56%, 最小耐压偏差为 -17.00%。从结果可以看出, 由于其中的电位分布很不均匀, 最大耐压偏差难以达到压敏电阻片的电位分布不均匀系数小于 15% 的要求, 需要对其结构进行改造, 使其均压性能达到要求。

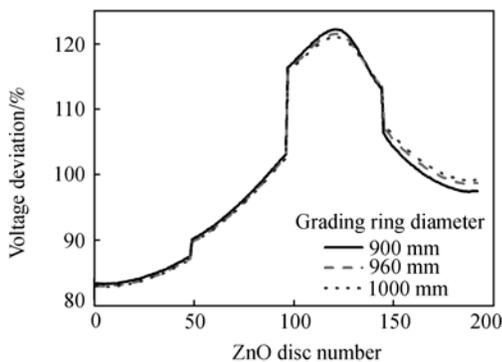


图 3 均压环直径对电位分布的影响

2.2 均压环直径对电位分布的影响

在均压环的罩入深度一定时(取罩入深度为 1600 mm), 均压环直径对电位分布的影响如图 3 所示, 均压环外径为 1000, 960 和 900 mm 时, 对应的最大耐压偏差分别为 21.09%, 21.56% 和 22.02%, 对应的最小耐压偏差分别为 -17.11%, -17.00% 和 -16.94%。随着均压环的半径的增加, 电位分布的均匀度逐渐上升,

但影响不大。

2.3 均压环的罩入深度对电位分布的影响

在均压环外径一定(均压环外径为 1000 mm)的情况下, 调整均压环的罩入深度, 也能改变各个电阻片上的电位分布。均压环的罩入深度为 1500, 1600 和 1800 mm 时对应的电位分布如图 4 所示, 对应的最大耐压偏差分别为 21.61%, 21.09% 和 20.48%, 对应的最小耐压偏差分别为 -18.50%, -17.11% 和 -14.16%。均压环的罩入深度越深, 电阻片上的电压分布越均匀。

可见, 均压环的外径越大, 罩入深度越深, 能够使电阻片的电压分布越均匀。但由于工程实际的要求, 对均压环的外径和罩入深度有一定的范围要求, 在所给的范围内, 还不能达到实际均压的要求。最终均压环外径取 1000 mm、罩入深度取 1800 mm。

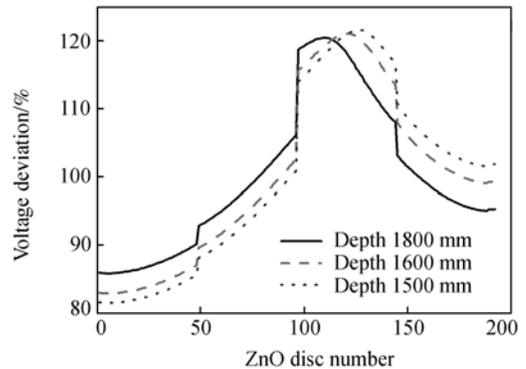


图 4 均压环的罩入深度对电位分布的影响

2.4 安装并联电容对电位分布的影响

改善 1000 kV MOA 电压分布不均匀性, 通常采用调整均压环和安装并联集中电容器 2 种方法。采用调整均压环对改善 MOA 电压分布作用有限, 特别是对高度很高的 1000 kV MOA 来说, 单靠调整均压环无法使电压分布满足要求, 而并联集中电容器则是一种非常有效的方法。

配置不同的集中电容器可得到对应的 ZnO 压敏电阻芯体的电位分布。调整并联电容器的电容值就能达到满足设定的电压分布系数的要求。

分析表明, 在电阻片柱的第 2 节、第 3 节和第 4 节上并联的电容 C_2 , C_3 和 C_4 分别为 41.8, 161.5 和 285.1 pF 时, 电阻片上的电压分布如图 5 所示, 最大不均匀度可控制在 15% 以内。但在 GIS 避雷器内部安

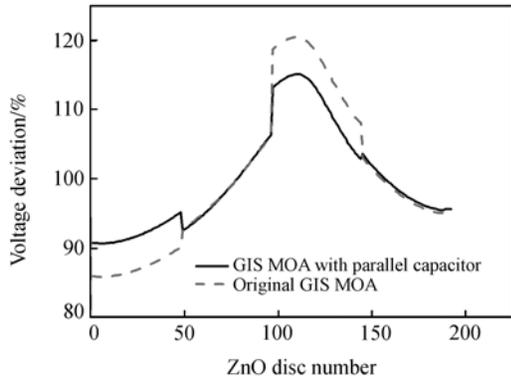


图 5 安装并联电容对电位分布的影响

装电容一是比较困难, 二是由于并联电容的长期耐压特性无法保证, 导致其成为避雷器内部的薄弱环节, 我国 500 kV 避雷器曾因并联电容器击穿而发生内部爆炸。

3 GIS 避雷器对压敏电阻电压梯度的要求

分析表明要有效改善 GIS 避雷器的电位分布, 同时又不致避雷器的结构复杂的最有效的措施是提高避雷器内部的 ZnO 压敏电阻的电压梯度. 对于一定的均压环设计方案, 如果能够提高电阻片的耐压水平, 就可以减少电阻片的片数, 从而降低芯体的高度, 使得均压环罩入深度与芯体高度的比增大, 其实质上就是提高了均压环的相对罩入深度, 可以改善电阻片上的电压分布情况, 以下计算时均取均压环的外径为 1000 mm, 均压环的罩入深度为 1800 mm.

图 6 所示为不同芯体高度对应的 ZnO 压敏电阻上的电位分布, 随着芯体高度的减小, 即电阻片的电压梯度的增加, 电压分布的均匀程度大大改善, 可以确保结构简单的同时, 使电压分布更为均匀。

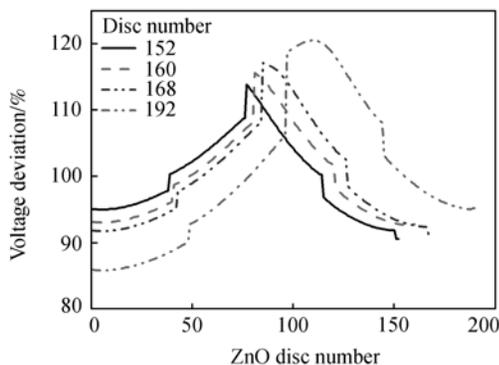


图 6 不同芯体高度时对应 ZnO 压敏电阻上电位分布

图 7 所示为不同电压梯度时对应的 ZnO 压敏电阻上的最大耐压偏差, 芯体高度为 4300 mm(每节去掉 10 片电阻片)时, 对应的电压梯度为 367 V/mm 时, 对应的最大耐压偏差为 13.83%, 已符合 ZnO 压敏电阻的安全运行电压梯度的要求. 如果能够将电压梯度提高到 400 V/mm, 则可以将 ZnO 压敏电阻的最大耐压偏差控制在 10% 左右, 对改善避雷器长期运行的老化特性有利。

如图 8 所示, 最大耐压偏差控制在 10% 左右时对应的芯体高度只有 4000 mm(分节芯体连接件高度约为 1250 mm). 当芯体过短时, 电阻片芯体中部的支撑绝缘子与均压环非常接近, 支撑绝缘子的安装比较困难. 其次, 沿电阻片柱的电位分布和沿固定压敏电阻片的环氧树脂玻璃钢芯棒的电位分布不同, 当 ZnO 电阻片的电压梯度过高时, 导致环氧树脂玻璃钢芯棒和

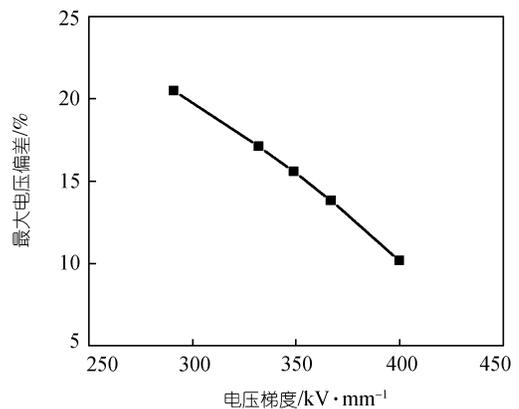


图 7 不同电压梯度时对应的 ZnO 压敏电阻上的最大耐压偏差

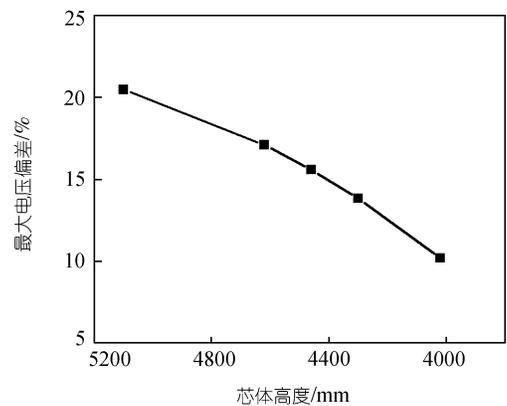


图 8 不同芯体高度时对应的 ZnO 压敏电阻上的最大耐压偏差

压敏电阻片在径向存在较高的电位差,二者之间的缝隙出现径向的放电现象.另一方面,压敏电阻的梯度过高,容易发生沿电阻片侧面的闪络,为了防止侧闪的发生,需要增加 GIS 内部气体的压强,导致罐体机械特性要求更高.从这 3 方面的要求,最短的芯体高度要在 4000 mm 以上.因此,所要求的压敏电阻的合适电压梯度为 405 V/mm.以上分析结果是针对母线型避雷器,其直流 4 mA 参考电压为 1114 kV.如果为线路型避雷器(直流 4 mA 参考电压为 1195 kV),则所要求的压敏电阻的合适电压梯度为 426 V/mm.

4 结论

电力系统设备的绝缘水平建立在避雷器的过电压保护水平基础之上,优良保护性能的避雷器将降低作用在设备上的雷电过电压和操作过电压水平,从而降低设备的绝缘水平以降低特高压设备制造的技术瓶颈,以降低电力设备造价.

目前,我国正在建设的 1000 kV 特高压交流输电系统采用气体绝缘变电站(GIS)和半气体绝缘变电站(HGIS),GIS 和 HGIS 的避雷器采用罐式结构,本文

采用三维有限元方法计算其电位分布,提出采用三维有限元与电路相结合的“场路结合”数值计算方法来考虑集中参数的元件对电位分布的影响,将复杂的三维场求解问题转化为电路分析问题,实现结构的优化设计.

改变 1000 kV 罐式避雷器均压环的结构能使电阻片上的电压分布变均匀,均压环的外径越大,罩入深度越深,电阻片上的电压分布越均匀.但在目前的均压环可取参数范围内不能使电压分布达到要求.安装并联电容可很大程度地改善电压分布.但并联电容会带来避雷器性能的不稳定性,应用中需权衡利弊.

研究表明,为了缩短避雷器的长度和改善其电位分布,最有效的方法是提高 ZnO 压敏电阻的电压梯度.随着压敏电阻电压梯度的增加,压敏电阻承受的最大电压偏差呈线性降低.综合多方面的因素,最短的芯体高度要控制在 4000 mm 以上.因此,对应的压敏电阻的合适的电压梯度为 426 V/mm,此时 1000 kV GIS 避雷器内压敏电阻的电位分布不均匀度可控制在 10% 以内.

参考文献

- Slavko B, Sreco M, Bui A. Microstructural and electrical characteristics of Y_2O_3 -doped ZnO- Bi_2O_3 -based varistor ceramics. *J Eur Ceram Soc*, 2001, 21(10-11): 1875—1878
- 何金良, 胡军, 林元华. 稀土掺杂的高电压梯度 ZnO 压敏电阻. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2009, 39(1): 109—114
- Imai T, Udagawa T, Ando H, et al. Development of high gradient Zinc-oxide nonlinear resistors and their application to surge arresters. *IEEE Trans Power Del*, 1998, 13(4): 1182—1187 [\[DOI\]](#)
- Han S J, Zou J, Gu S Q, et al. Calculation of the potential distribution of high voltage metal oxide arrester by using an improved semi-analytic finite element method. *IEEE Trans Magn*, 2005, 41(5): 1392—1395 [\[DOI\]](#)
- He J L, Zeng R, Chen S M, et al. Potential distribution analysis of suspended-type metal-oxide surge arresters. *IEEE Trans Power Del*, 2003, 18(4): 1214—1220 [\[DOI\]](#)
- Haddad A, Naylor P. Finite-element computation of capacitance networks in multiple-electrode systems: Application to ZnO surge arresters. *IEE Proc Sci Meas Technol*, 1998, 145(4): 129—135 [\[DOI\]](#)
- He J L, Gu S Q, Han S J, et al. Voltage distribution analysis of 500-kV DC transmission line voltage divider under impulse voltages: Stray parameter extraction. *IEEE Trans Power Del*, 2006, 21(2): 577—583 [\[DOI\]](#)