

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2021.02.008

1 200 kV 高压可控点火装置的电场仿真计算与分析

姜宇航¹, 刘思逸², 傅正财¹, 刘亚坤¹

(1. 上海交通大学电气工程系电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074)

摘要: 为满足特高压开关设备大容量合成试验的要求,需研制1 200 kV 高压可控点火装置。采用三球体、双间隙结构有望大幅降低制造难度,缩减生产周期和成本。为论证这种三球体、双间隙结构点火装置的可行性,现对其电场分布进行了建模仿真分析。仿真及分析结果表明,1 200 kV 高压可控点火装置采用三球体、双间隙的结构能有效起到分压作用,使电场的分布更为均匀。在额定工况下,当球径为1 500 mm的点火球的球隙间距为500 mm时,球隙间的最大场强为1.747 kV/mm,符合绝缘要求,且静态安全系数达到1.5倍以上。球隙间距对电场分布的影响反映在分布电容变化上,高压侧球隙间距对电位分布的影响更加显著。

关键词: 高压可控点火装置; 电场分布; 分布电容; 电位分布

Electrical Field Simulation and Analysis of 1 200 kV High-voltage Controllable Ignition Device

JIANG Yuhang¹, LIU Siyi², FU Zhengcai¹, LIU Yakun¹

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion Ministry of Education, Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Wuhan NARI Limited Liability Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: To meet the requirements of large capacity synthesis test for EHV switching equipment, it is necessary to develop a 1 200 kV high-voltage controllable ignition device. The manufacturing difficulty, production period and cost will be greatly reduced if the ignition device adopts the three-ball and double-gap structure. In order to verify the feasibility of the structure, the electrical field distribution in the device is simulated and analyzed. Simulation results show that the three-ball and double-gap structure is beneficial to more uniform distribution of the electrical field. In the rated working condition, the maximum electrical field strength in the gaps is 1.747 kV/mm when the ball diameter is 1 500 mm and the gap distance is 500 mm, which meets the insulation requirement, and the safety factor is higher than 1.5. In addition, the influence of gap distance on the electrical field distribution is reflected in the variation of distributed capacitance, and the gap distance on high voltage side plays a more significant role in the potential distribution.

Key words: high-voltage controllable ignition device; electrical field distribution; distributed capacitance; potential distribution

0 引言

近年来,随着特高压输电技术的不断发展,对特高压电气设备的试验设备需求不断增加,对试验技术的要求也不断提高^[1-5]。其中,对于特高压开关设备而言,为满足其大容量合成试验需求,需研发

百万伏电压等级的高压可控点火装置^[6]。与较低电压等级的点火装置相比,如果这类特高压可控点火装置采用单间隙触发方式,则触发球的尺寸就需要做的非常大,这不仅实现起来困难,生产成本低,而且触发控制的稳定性也难以保障。因此,考虑采用三球体、双间隙结构研制1 200 kV 高压可控点火装

收稿日期:2020-08-06; 修回日期:2020-10-14

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC1501506);国家自然科学基金(51977129)。

Project Supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFC1501506), National Natural Science Foundation of China(51977129).

置。施加电压由两个球间隙承担,降低了单个间隙上所需分担的电压,有效减小球距和球径,降低设计和制造难度,提高触发控制的稳定性。目前,国内已有的研究主要是针对1 000 kV高压点火装置的初步选型设计^[7],尚未有过对于更高电压等级装置的设计分析。为论证这种三球体、双间隙结构1 200 kV高压可控点火装置的可行性和设计优化,需对其电场分布进行仿真。电场仿真分析有助于缩短研发周期,降低研发费用,对产品日后的完善也具有指导意义^[8]。

有限元电场仿真分析方法适用于解决含有多种电介质的复杂边界问题,具有计算过程方便灵活、计算结果精确的优点,得到了广泛的认可和应用^[9-13],尤其是在高压电气设备的电场优化研究方面^[14-25]。文中针对三球体、双间隙结构1 200 kV高压可控点火装置的初步设计,采用有限元仿真分析软件Infolytica对其进行建模和电场仿真,论证设计方案的可行性,同时对装置的电场分布规律进行分析和总结。

1 电场分布仿真

1.1 高压可控点火装置的结构模型

1 200 kV 高压可控点火装置由点火球本体、石

墨电极、绝缘支柱、球距调节机构、底座和置于空心触发球内的点火装置等部分组成,整套可控点火装置的结构图见图1。按照图1中标注的尺寸建立对应的三维仿真模型见图2,其中参数的选取主要是参照现有低电压等级单球隙结构的设计方案,点火球本体的直径为1 500 mm,端部石墨电极的直径为600 mm,外侧较小均压环的直径和内径分别为1 300 mm和200 mm,内侧较大均压环的直径和内径分别为2 000 mm和400 mm,可调节球隙间距的变化范围为100~500 mm,绝缘支柱上的绝缘子共有6层,每层单个绝缘子的高度为1 400 mm,且每个绝缘支柱上都装有上、下两个均压环。建模时,为了节省计算时间,提高计算效率,对模型进行了适当的简化处理。对部分支撑部件的微小结构作了平滑化处理,同时为观察方便起见,在图2中对外围空气包作了隐藏处理。模型中,静力球和动力球都是铜质的,支柱绝缘子为陶瓷材质,法兰和各部分金属连接件为铝合金所制,均压环为铝制,底座的材料是槽钢,装置周围是相对介电常数为1的空气域。

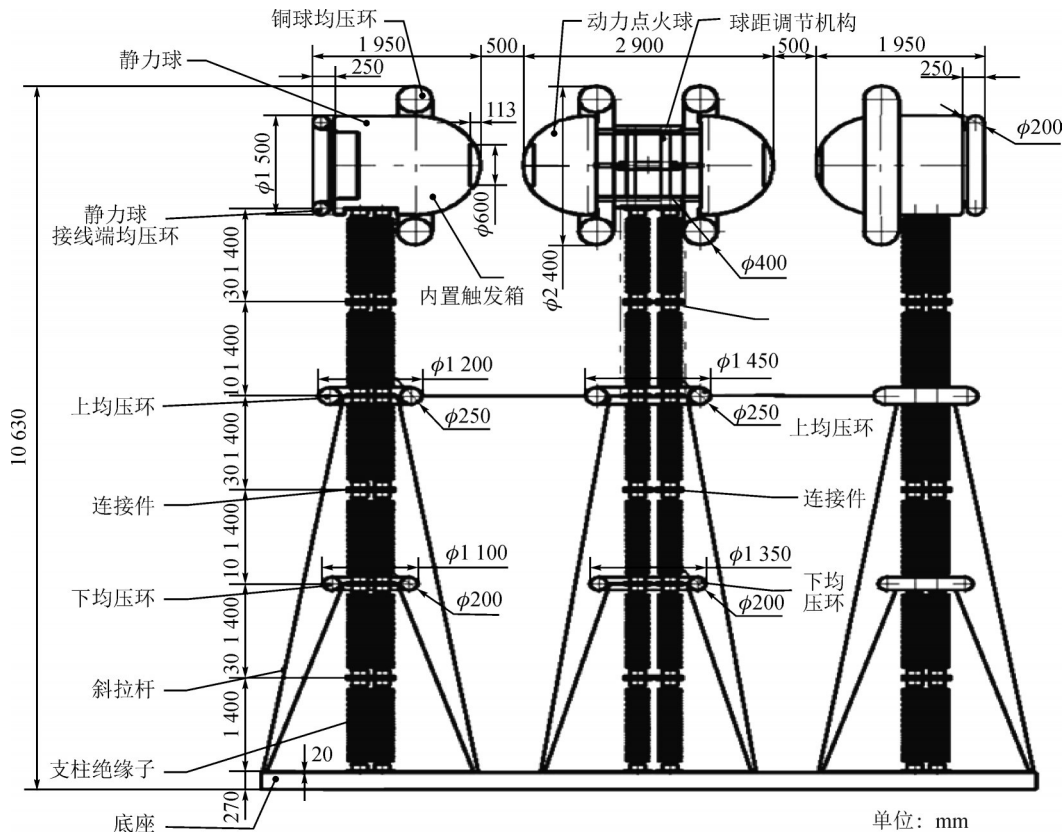


图1 1 200 kV 高压可控点火装置结构图

Fig. 1 Structure diagram of 1 200 kV controllable high-voltage ignition device

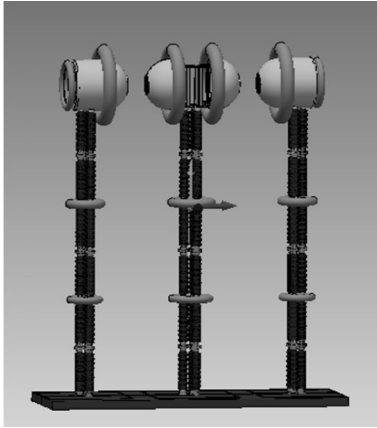


图2 1 200 kV 高压可控点火装置三维仿真模型

Fig. 2 3D simulation model of 1 200 kV controllable high-voltage ignition device

1.2 三维电场计算的有限元模型

利用有限元法求解场域内的电场分布时,必须要保证场域严格有界,因此在建模时需要人为地添加求解边界,并设定边界上的电位为0。在静态场中,模型各部件的沿面电场强度应满足:

$$E = -\nabla\varphi \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon_r \frac{\partial \varphi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon_r \frac{\partial \varphi}{\partial x}) = 0 \quad (2)$$

式(1)、(2)中: φ 为电位 $\varphi(x, y)$; ε_r 为相对介电常数。

在电极边界和人工边界 Γ_1 上

$$\varphi|_{\Gamma_1} = u_c(s) \quad (3)$$

式(3)中: u_c 是边界上给定的函数分布; s 为位置矢量。

在介质分界面 Γ_2 上

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_2 \\ \varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \varepsilon_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, n 为边界的外法向量。

有限元计算是通过将求解区域 Ω 离散化实现对实际连续物理量的近似。设节点数为 m , 则由节点电位变量 φ_i 和形状函数 N_i 表示的电位 φ 为

$$\varphi = \sum_{i=1}^m N_i \varphi_i \quad (5)$$

利用迦辽金加权余量法求解待定形状函数 N_i

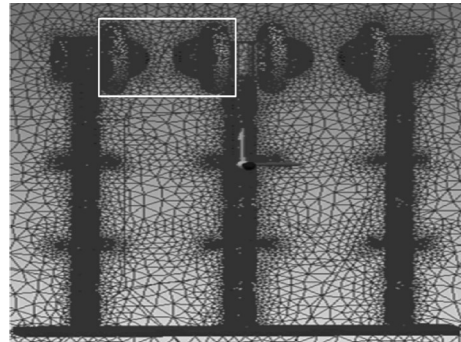
$$(R(\varphi), N_i) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

式(6)中, $R(\varphi)$ 为 φ 的近似解在控制方程中产生的误差余量^[26-27]。

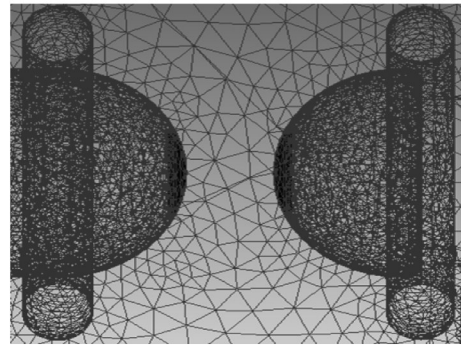
1.3 仿真模型的网格剖分

应用上述理论对所建模型进行网格剖分,为保证计算精度,同时又节约计算时间,采用自适应剖分和手动剖分相结合的方式对模型中不同区域按曲率半径的大小和计算要求进行不同程度的剖

分。1 200 kV 高压可控点火装置的整体剖分图见图 3(a), 球体附近的局部(方框内)剖分图见图 3(b), 此处的电场分布是分析的重点, 在此区域网格剖分更为细密。



(a) 模型整体的网格剖分



(b) 球隙局部的网格剖分

图3 1 200 kV 高压可控点火装置的网格剖分图

Fig. 3 Mesh generation of 1 200 kV controllable high-voltage ignition device

计算采用 Newton-Rapson 法求解节点电位的非线性代数方程组, 设 Newton-Rapson 方程的收敛次数为 20, 误差范围为 1%, 电位函数采用二阶近似多项式, 收敛梯度为 10^{-8} 。

1.4 施加载荷求解电场分布

仿真时, 将激励电压加载到左、右两侧固定着的静力球上, 动力球为浮置电极, 球隙间距可通过控制球距调节机构进行改变, 球隙间距的变化范围为 100~500 mm。模型上施加的激励电压按实际运行工况要求。激励条件设置完成后调用 Infolytica 内置的求解器即可开始仿真计算。

2 电场仿真计算结果分析

仿真主要研究的是 1 200 kV 高压可控点火装置的静态电场分布, 从不同的角度对设备的静态电场分布进行仿真计算与分析。

2.1 高压可控点火装置在不同静态安全系数下的电场分布

对于额定工作电压为 1 200 kV 的高压可控点火

装置来说,按 1.3~1.5 倍的静态安全系数取值,测试电压为 1 500 kV 和 1 800 kV,分别计算有限元仿真模型在 3 种激励电压作用下的电场分布。

1)左侧静力球上施加 1 200 kV 的额定工作电压,右侧静力球上的电位置零,中间动力球设为浮置电极,两侧球隙间距同为 500 mm,此时的电场分布情况见图 4。

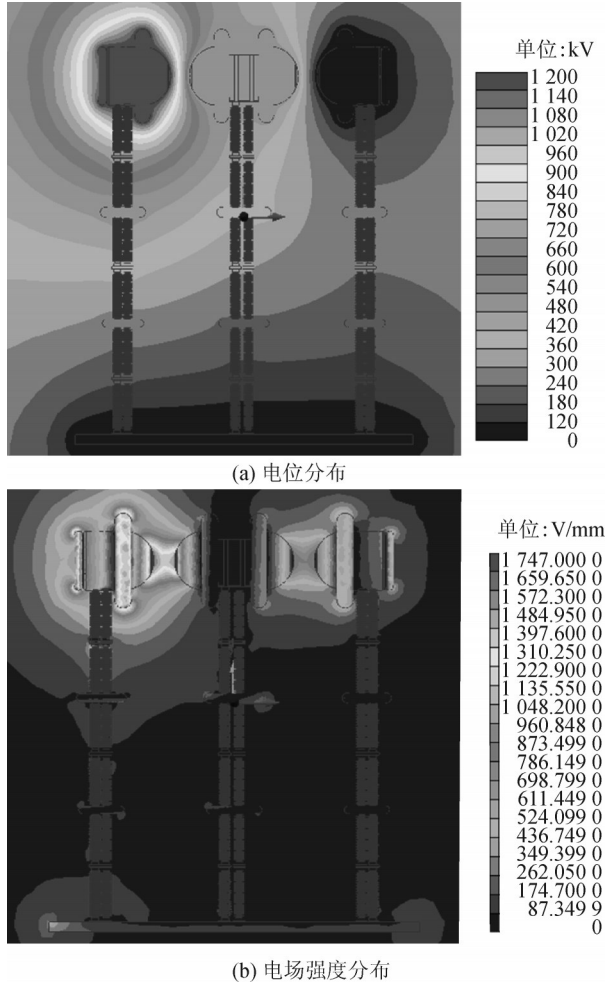


图4 额定工作电压下高压可控点火装置的电场分布

Fig. 4 Electric field distribution of controllable high-voltage ignition device under the rated voltage

2)左侧静力球上施加 1 500 kV 的激励电压,右侧静力球上的电位置零,中间动力球设为浮置电极,两侧球隙间距同为 500 mm,此时的电场分布情况见图 5。

3)左侧静力球上施加 1 800 kV 的激励电压,右侧静力球上的电位置零,中间动力球设为浮置电极,两侧球隙间距同为 500 mm,此时的电场分布情况见图 6。

已知在该装置结构中:球形电极的半径 r 为 750 mm,球隙间距 d 为 500 mm,空气的静态击穿场强 E_0 为 3 kV/mm,由式(7)可计算得到球隙间电场的均匀度 f 为 1.333,代入到式(8)中计算得到间隙击

穿电压 U_b 为 1 250 kV。

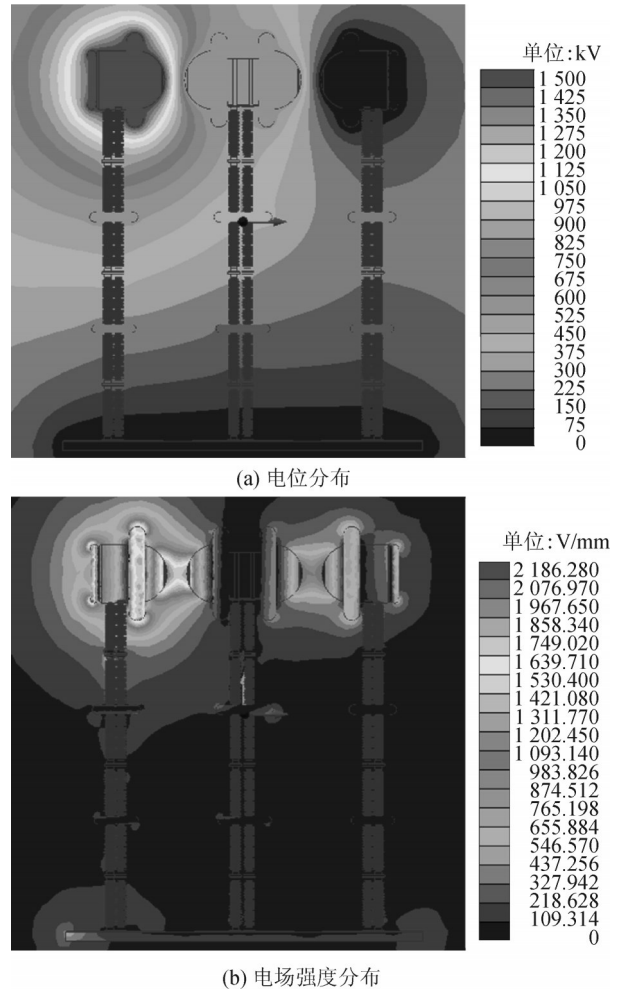


图5 安全系数为 1.3 时高压可控点火装置的电场分布

Fig. 5 Electric field distribution of controllable high-voltage ignition device when the safety factor is 1.3

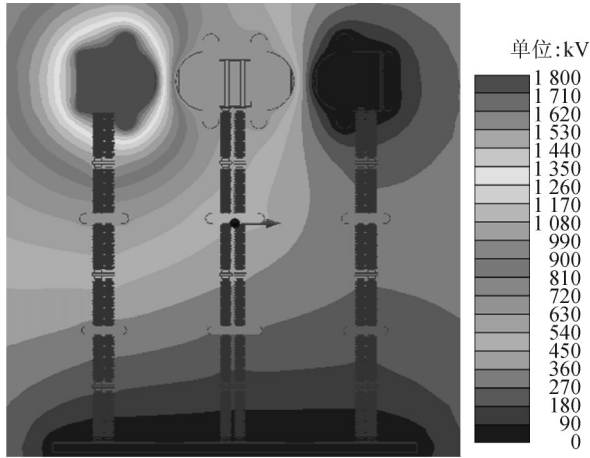
$$f = 0.9 \frac{r + 0.5d}{r} \quad (7)$$

$$E_b = E_0 \frac{d}{f} \quad (8)$$

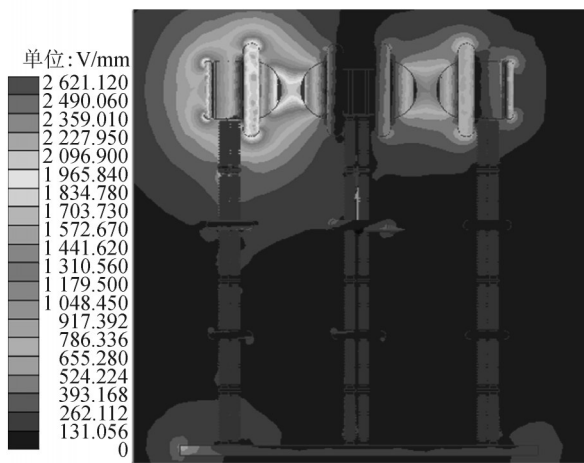
如图 4 所示,在正常的静态工作状态下,测得中间球电极上的电位为 655 kV,因此左侧球隙电压为 545 kV,远低于 U_b ,且装置周围的最大场强为 1.747 kV/mm,远小于空气的静态击穿场强 3 kV/mm,所以不存在发生击穿的可能。同理,如图 5、6 所示,当激励电压达到 1 500 kV 和 1 800 kV 时,也不会发生击穿,静态安全系数达到 1.3~1.5 倍以上,符合绝缘要求。这充分说明高压可控点火装置的三球体、双间隙结构有效地起到了分压的作用。

2.2 电场分布最均匀的球隙间距

对于球形电极而言,球隙间距越小,两个电极的位置关系越接近于两个“无穷大平面”,电场的均匀度也就越低。因此,在一定的激励电压组合下,满足场强绝缘要求的球隙间距最小值即为电场分布最均匀的距离。



(a) 电位分布



(b) 电场强度分布

图6 安全系数为1.5时高压可控点火装置的电场分布

Fig. 6 Electric field distribution of controllable high-voltage ignition device when the safety factor is 1.5

当左侧静力球上加载1 000 kV,右侧静力球上加载60 kV,中间动力球浮置时,将两侧球隙间距由500 mm开始,以10 mm为一个步长逐渐减小,装置周围的最大场强逐渐增加,在球隙间距为210 mm时,左侧球隙内的最大场强超过了预先设定的安全值2.5 kV/mm(考虑安全裕度,略低于3 kV/mm)。在这种情况下,电场分布最均匀的球隙间距为220 mm,此时的电场强度分布见图7。

同理可以计算得到其他激励电压组合下电场分布最均匀时的球隙间距,但是受机械部件的限制,球隙间距不能小于100 mm。

2.3 球隙间距对电场分布的影响

考虑到1 200 kV高压可控点火装置采用的是三球体、双间隙的结构,因此在分析球隙距离对电场分布的影响时需要分别对左、右球隙进行讨论。仿真时,保持3个球体上所施加的激励电压始终不变,分别为:左侧静力球上加载1 800 kV,右侧静力球上电位置零,中间动力球设为浮置电极,改变球隙间

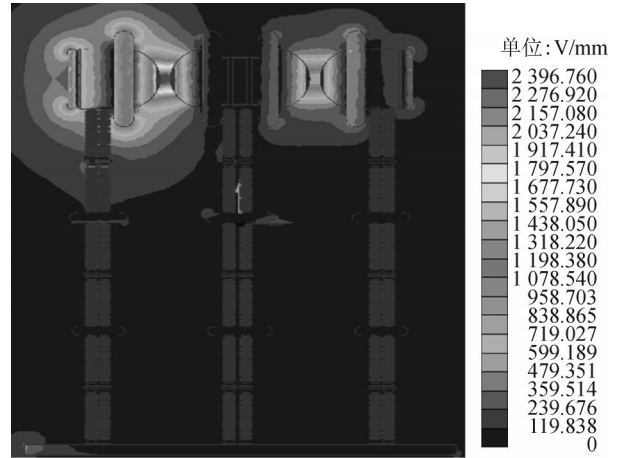


图7 激励电压组合为1 000 kV和60 kV且两侧球隙间距为220 mm时的电场强度分布

Fig. 7 Electric field intensity distribution of controllable high-voltage ignition device when the voltage excitations are 1 000 kV and 60 kV

距,分为以下3种情况:

1)固定左侧球隙的间距为500 mm,改变右侧球隙间距,计算得到的两侧球隙分压情况见表1,相应的左、右球隙分压比的变化趋势见图8。

表1 左侧球隙间距固定,改变右侧球隙间距时,左、右球隙上的分压情况

Table 1 Voltage distribution on the gaps when the left gap is invariable and the right gap is variable

模型编号	左球隙 d_1/mm	右球隙 d_2/mm	动力球电位 U/kV	左右球隙分压比 R
1	500	500	655.01	1.748
2	500	400	639.03	1.818
3	500	300	620.99	1.899
4	500	200	595.56	2.022
5	500	100	560.58	2.211

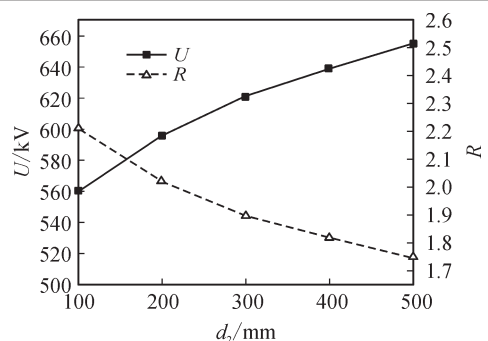


图8 左侧球隙间距不变,改变右侧球隙间距时,左、右球隙的分压变化趋势

Fig. 8 Trend of the voltage ratio on the gaps when the left gap is invariable and the right gap is variable

2)固定右侧球隙的间距为500 mm,改变左侧球隙间距,计算得到的左、右两侧球隙分压情况见表2,相应的球隙分压比变化趋势见图9。

表2 右侧球隙间距固定, 改变左侧球隙间距时, 左、右球隙上的分压情况

Table 2 Voltage distribution on the gaps when the right gap is invariable and the left gap is variable

模型编号	左球隙 d_1/mm	右球隙 d_2/mm	动力球电位 U/kV	左右球隙分压比 R
1	500	500	655.01	1.748
2	400	500	683.79	1.632
3	300	500	717.48	1.509
4	200	500	762.19	1.362
5	100	500	826.23	1.179

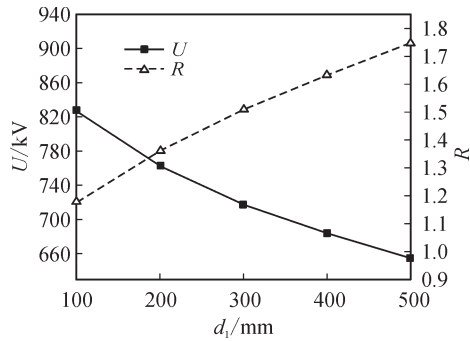


图9 右侧球隙间距不变, 改变左侧球隙间距时, 左、右球隙的分压变化趋势

Fig. 9 Trend of the voltage ratio on the gaps when the right gap is invariable and the left gap is variable

3) 同时改变两侧球隙间距且保持两侧距离相等, 计算得到的两侧球隙分压情况见表3, 相应的左、右球隙分压比变化趋势见图10。

表3 同时改变两侧球隙间距时, 左、右球隙上的分压情况

Table 3 Voltage distribution on the gaps when the two gaps are variable and equal

模型编号	左球隙 d_1/mm	右球隙 d_2/mm	动力球电位 U/kV	左右球隙分压比 R
1	500	500	655.01	1.748
2	400	400	668.35	1.693
3	300	300	682.06	1.639
4	200	200	697.43	1.581
5	100	100	721.60	1.494

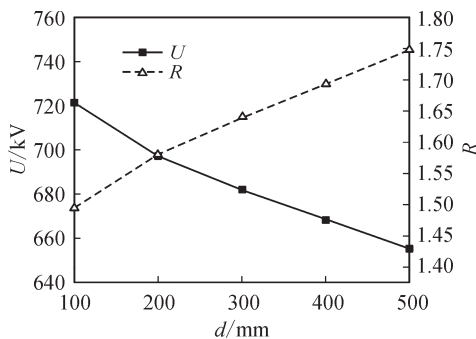


图10 同时改变两侧球隙间距时, 左、右球隙的分压变化趋势

Fig. 10 Trend of the voltage ratio on the gaps when the right and the left gap are variable and equal

综合上述3种情况可以看到: 在左、右两侧静力球上加载固定的激励电压, 中间动力球上的电位会随着右侧球隙间距的减小而降低, 随着左侧球隙间距的减小而升高。而当同时减小两侧的球隙间距时, 左侧球隙间距对动力球上电位的影响更加明显。相应地, 左右两侧球隙的分压比 $R=(1\ 800-U)/U \times 100\%$ 也会出现与之对应的变化规律, 随着右侧球隙间距的减小而升高, 随着左侧球隙间距的减小而降低, 而且左侧球隙间距对分压比的影响也更加突出。

2.4 分布电容对电场分布的影响

球隙间距对电场分布的影响是通过改变整个装置的分布电容来实现的。1 200 kV 高压可控点火装置计算模型的等效电容分布见图11, C_1 、 C_2 、 C_6 分别为三球体之间的等效分布电容, C_3 、 C_4 、 C_5 分别为3个球体到地之间的等效分布电容。

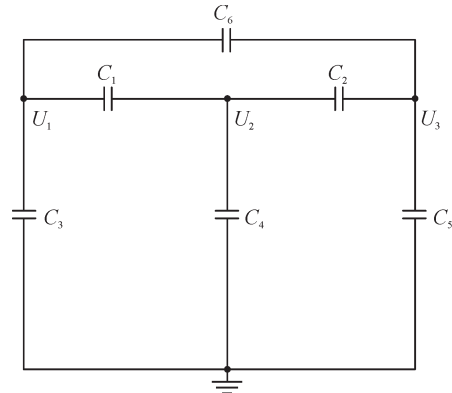


图11 1 200 kV 高压可控点火装置的等效分布电容模型

Fig. 11 Equivalent distributed capacitance model of 1 200 kV controllable high-voltage ignition device

左侧静力球上施加 U_1 的电压激励, 右侧静力球上的电位 U_3 置零, 则中间动力球上的电位 U_2 为

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_4} \quad (9)$$

当保持左侧球隙间距不变, 减小右侧球隙间距, 即 C_1 不变, 提高 C_2 , 则 U_2 将会下降, R 随之上升; 当保持右侧球隙间距不变, 减小左侧球隙间距, 即 C_2 不变, 提高 C_1 , 则 U_2 将会升高, R 随之下降; 当同时减小两侧球隙间距, 即同时提高 C_1 、 C_2 , 则 C_1 的变化将会在 U_2 的变化趋势上起主导作用, R 随之下降, 但相比于只改变左侧球隙间距, 此时 U_2 和 R 的变化略有“缓和”。

分布电容参数也可用 Infolytica 软件计算。考虑到模型内含有大量金属元件, 其完整的分布电容矩阵十分庞大, 在计算模型中忽略了绝缘支柱上的金属部件的影响。简化之后的三球体电极模型见图12, 当左、右两侧球隙间距同为 500 mm 时, 仿真计算得到的分布电容矩阵见表4。

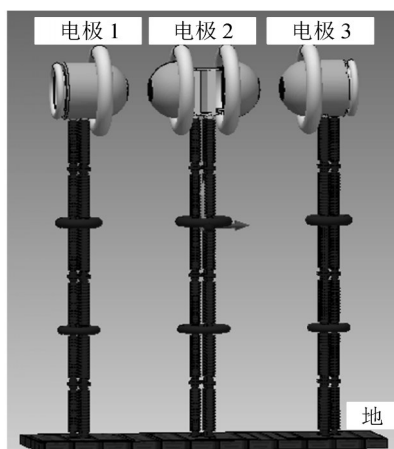


图12 三球体电极模型

Fig. 12 Three-ball electrode model

表4 三球体电极模型分布电容矩阵

Table 4 Distributed capacitance matrix of three-ball electrode model

电极	电极1	电极2	电极3
电极1	7.48×10^{-11}	1.15×10^{-10}	8.20×10^{-11}
电极2	1.15×10^{-10}	8.90×10^{-11}	1.15×10^{-10}
电极3	8.20×10^{-11}	1.15×10^{-10}	7.46×10^{-11}

表4中的数据是简化后模型仿真计算的结果,代入式(9)计算得到相应的 U'_2 为648.91 kV,与完整模型仿真计算得到的 U_2 实际值655.01 kV相比非常接近,这也从一个侧面验证了这种简化的可行性和有效性。

对比上述结果可以看到,三球体高压可控点火装置的电压分布主要取决于点火球本体之间以及各自对地的分布电容,而受绝缘支柱上金属连接件、支撑件和均压装置的影响较小,因此在1 200 kV高压可控点火装置的电场分布优化中主要调整的是点火球本体的结构尺寸和相互之间的位置关系。同时,在整套装置电场分布的定量分析中采用三球体电极模型可以在保证一定计算精度的前提下大幅减少运算量,提高运算效率。

3 结论

文中采用有限元仿真方法计算了1 200 kV高压可控点火装置的电场分布,从电场分布的角度论证了设计方案的可行性,总结分析了其电场分布规律。得到以下主要结论:

1)1 200 kV高压可控点火装置采用三球体、双间隙结构能有效地起到分压作用,使电场的分布更为均匀。

2)在额定工况下,球隙间的最大场强为1.747 kV/mm,静态安全系数达到1.5倍以上,符合绝缘要求。

3)在一定的激励电压组合下,球隙间距越小,电场分布就越均匀,但需保证球隙间的最大场强不能超过安全裕度。

4)球隙间距对电场分布的影响主要体现在分布电容的变化,高、低压两侧球隙的分压比会随着高压侧球隙间距的减小而增大,随着低压侧球隙间距的减小而减小,且高压侧球隙间距对电位分布的影响更加显著。

参考文献:

- [1] 张文亮,张国兵. 特高压交流试验电源特点探讨及比较[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 1-4.
ZHANG Wenliang, ZHANG Guobing. Discussion and comparison of characteristics of AC-testing supply used for UHVAC[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 1-4.
- [2] 周浩,余宇红. 我国发展特高压输电中一些重要问题的讨论[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 1-9.
ZHOU Hao, YU Yuhong. Discussion on several important problems of developing UHV AC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 1-9.
- [3] 李光范,王晓宁,李鹏,等. 1 000 kV特高压电力变压器绝缘水平及试验研究[J]. 电网技术, 2008, 32(3): 1-6.
LI Guangfan, WANG Xiaoning, LI Peng, et al. Insulation level and test technology of 1 000 kV power transformers[J]. Power System Technology, 2008, 32(3): 1-6.
- [4] 吴维宁,吴光亚,张勤,等. 1 000 kV特高压交流绝缘子的使用及运行特性[J]. 高电压技术, 2011, 37(1): 15-20.
WU Weining, WU Guangya, ZHANG Qin, et al. Characteristics of application and operation on 1 000 kV UHVAC insulators[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 15-20.
- [5] 李前,章述汉,李登云,等. ± 500 kV直流电压互感器现场校准技术试验分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2856-2862.
LI Qian, ZHANG Shuhan, LI Dengyun, et al. Experimental analysis of the on-site calibration technology for ± 500 kV DCPTs[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(11): 2856-2862.
- [6] 张建新,赵建沛,吴盛刚,等. 百万伏级高压可控点火球装置的设计及其放电特性探讨[J]. 高压电器, 2015, 51(12): 184-189.
ZHANG Jianxin, ZHAO Jianpei, WU Shenggang, et al. Design and discharge characteristic discussion of 1 000 kV controllable high-voltage ignition ball[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(12): 184-189.
- [7] 吴盛刚,王学军,李炜,等. 2×500 kV高压可控点火球装置的设计及其放电特性探讨[C]//输变电年会. 常州, 中国: [s. n.], 2009: 102-110.

- WU Shenggang, WANG Xuejun, LI Wei, et al. Design of 2×500 kV controllable high-voltage ignition ball device and discharge characteristics studies[C]//Annual Conference on Power Transmission and Transformation. Changzhou, China:[s. n.], 2009:102-110.
- [8] 王巧红, 王占杰, 孙玉洲, 等. 基于 Ansys 的 1 200 kV 直流隔离开关的电场仿真[J]. 高压电器, 2017, 53(6):36-41. WANG Qiaohong, WANG Zhanjie, SUN Yuzhou, et al. Electric field simulation of the 1 200 kV DC disconnecter based on Ansys[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(6):36-41.
- [9] 黄道春, 阮江军, 吴高波, 等. 模块化多断口真空断路器电位和电场分布研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(1):124-130. HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, WU Gaobo, et al. Potential and electric field distributions of modular multi-break vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1):124-130.
- [10] 王晓燕, 赵建国, 邬雄, 等. 交流输电线路交叉跨越区域空间电场计算方法[J]. 高电压技术, 2011, 37(2):411-416. WANG Xiaoyan, ZHAO Jianguo, WU Xiong, et al. Calculation method of electric field intensity for AC crossing transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2):411-416.
- [11] 徐志钮, 律方成, 李和明, 等. 绝缘子电场有限元分析法的影响因素及其优化[J]. 高电压技术, 2011, 37(4):944-951. XU Zhiniu, LYU Fangcheng, LI Heming, et al. Influencing factors of insulator electric field analysis by finite element method and its optimization[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4):944-951.
- [12] BEASLEY R, PICKLES J, GALLET G, et al. Comparative study of three methods for computing electric fields[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1979, 126(126):126-134.
- [13] JAMALI S, ARDEBILI M, ABBASZADEH K. Calculation of short circuit reactance and electromagnetic forces in three phase transformer by finite element method[C]//Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems. Nanjing, China: IEEE, 2005:1725-1730.
- [14] 田冀焕, 沙彦超, 周远翔, 等. 800 kV 等级高压隔离开关的交、直流电场仿真计算[J]. 高电压技术, 2011, 37(5):1216-1223. TIAN Jihuan, SHA Yanchao, ZHOU Yuanxiang, et al. Simulation of AC and DC electric field for 800 kV grade high voltage disconnecter[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5):1216-1223.
- [15] KHALIGH A, VAKILIAN M. Power transformers internal insulation design improvements using electric field analysis through finite-element methods[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(2):273-278.
- [16] LIU Yanju, CAO Yundong, LI Yanbin, et al. Design for new type of main insulation of 35 kV electric power transformer based on electric field analysis[C]//World Automation Congress. Hawaii, USA: IEEE, 2008:1-4.
- [17] 周峰, 郑汉军, 雷民, 等. UHV 串联式 TV 高压隔离部分的有限元分析及优化[J]. 高电压技术, 2007, 33(12):5-8. ZHOU Feng, ZHENG Hanjun, LEI Min, et al. FEA and optimization design of high voltage isolation transformer in UHV series TV[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(12):5-8.
- [18] 王泽忠, 刘士利, 孙静. 特高压交流变电站设备附近工频电场计算[J]. 高电压技术, 2010, 36(1):81-85. WANG Zezhong, LIU Shili, SUN Jing. Calculation of power frequency electric field near equipments in UHV AC substations[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1):81-85.
- [19] 张福轩, 陈东, 余军, 等. ±1 100 kV 户内直流场全域均压电极设计、仿真及优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(0):1-8. ZHANG Fuxuan, CHEN Dong, YU Jun, et al. 3D simulation and optimization design of the electrode system of ±1 100 kV indoor DC yard[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(0):1-8.
- [20] 齐磊, 李超, 王星星, 等. 柔性高压直流输电系统换流阀塔交流电场仿真计算[J]. 高电压技术, 2014, 40(11):3537-3543. QI Lei, LI Chao, WANG Xingxing, et al. Simulation calculation of AC electric field for valve tower of flexible HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11):3537-3543.
- [21] ZHANG Zongxi, GAN Degang, LI Yawei. Simulation analysis of UHV ±1 600 kV DC generator electric field distribution[C]//IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. Chengdu, China: IEEE, 2016:1-4.
- [22] KONTARGYRI V, GONOS I, STATHOPOULOS I, et al. Simulation of the electric field on high voltage insulators using the finite element method[C]//IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation. Miami, USA: IEEE, 2005:1725-1730.
- [23] KAANA-NKUSI S, ALEXANDER P, HACKAM R. Potential and electric field distributions at a high voltage insulator shed[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 2002, 23(2):307-318.
- [24] MARKUSHIN M A, KOLPAKOV V A, KRICHEVSKII S V, et al. Simulation of the electric field distribution in the electrode system of a device forming a high-voltage gas discharge[J]. Technical Physics, 2015, 60(3):376-380.
- [25] CHEN L, LAI W, WANG J, et al. Study on surface electric

- 程学报, 2011, 31(7): 56-63.
ZHENG Ruirui, ZHAO Jiyin, ZHAO Tingting, et al. Power transformer fault diagnosis based on genetic support vector machine and gray artificial immune algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 56-63.
- [13] 袁海满, 雷帆, 陈宇, 等. 基于DGA的粒子群相关向量机变压器故障诊断[J]. 高压电器, 2017, 53(2): 108-112.
YUAN Haiman, LEI Fan, CHEN Yu, et al. Fault diagnosis of transformer using relevance vector machine with particle swarm optimization based on DGA[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(2): 108-112.
- [14] 贾嵘, 徐其惠, 李辉, 等. 最小二乘支持向量机多分类法的变压器故障诊断[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 110-113.
JIA Rong, XU Qihui, LI Hui, et al. Fault diagnosis of transformer using multi-class least squares support vector machine[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6): 110-113.
- [15] GHUNEM R A, ASSALEH K, EL-HAG A H. Artificial neural networks with stepwise regression for predicting transformer oil furan content[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(2): 414-420.
- [16] SHAO H. Delay - dependent stability for recurrent neural networks with time-varying delays[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2008, 19(9): 1647-1651.
- [17] WANG J C, LIAN L X, LIN Y Y, et al. VLSI design for SVM-Based speaker verification system[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2015, 23(7): 1355-1359.
- [18] 吴立增, 朱永利, 苑津莎. 基于贝叶斯网络分类器的变压器综合故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2005, 20(4): 45-51.
WU Lizeng, ZHU Yongli, YUAN Jinsha. Novel method for transformer faults integrated diagnosis based on bayesian network classifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(4): 45-51.
- [19] 龙霞飞, 杨苹, 郭红霞, 等. 大型风力发电机组故障诊断方法综述[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3480-3491.
LONG Xiafei, YANG Ping, GUO Hongxia, et al. Review of fault diagnosis methods for large wind turbines[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3480-3491.
- [20] 党东升, 张树永, 葛鹏江, 等. 基于改进量子粒子群优化支持向量机的变压器故障诊断方法[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 108-113.
DANG Dongsheng, ZHANG Shuyong, GE Pengjiang, et al. Transformer fault diagnosis method based on support vector machine optimized by improved quantum-behaved particle swarm optimization[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 108-113.
- [21] 王德文, 雷倩. 基于贝叶斯正则化深度信念网络的电力变压器故障诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 129-135.
WANG Dewen, LEI Qian. Fault diagnosis of power transformer based on BR-DBN[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 129-135.
- [22] 梁智, 孙国强, 李虎成, 等. 基于VMD与PSO优化深度信念网络的短期负荷预测[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 598-606.
LIANG Zhi, SUN Guoqiang, LI Hucheng, et al. Short-term load forecasting based on VMD and PSO optimized deep belief network[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 598-606.
- [23] 张秦桢, 宋辉, 姜勇, 等. 基于OS-ELM的变压器局放电模态识别[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1122-1130.
ZHANG Qinbin, SONG Hui, JIANG Yong, et al. Partial discharge pattern recognition of transformer based on OS-ELM[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1122-1130.
- 苏磊(1981—), 男, 硕士, 长期从事电力设备状态监测和评估工作(E-mail: 13917214842@139.com)。

(上接第55页)

- field simulation of high voltage transmission line assembly[J]. Journal of Power & Energy Engineering, 2016, 2(4): 554-563.
- [26] 颜楠楠, 傅正财, 王国利, 等. 特高压工频无局放试验变压器外电场模拟计算分析及试验布置优化[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 368-375.
YAN Nannan, FU Zhengcai, WANG Guoli, et al. Electric field simulate calculation and experimental layout optimization of ultra high voltage power frequency test transformer without partial discharge[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 368-375.
- [27] 程志光, 高桥则雄, 博扎德·弗甘尼, 等. 电气工程电磁热场模拟与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
CHENG Zhiguang, TAKAHASHI N, FORGHANI B, et al. Electromagnetic and thermal field modeling and application in electrical engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- 姜宇航(1992—), 男, 电气工程师, 硕士研究生, 主要从事高压试验设备的电场仿真分析与优化工作(E-mail: 24answer@163.com)。
- 刘亚坤(1992—), 男, 助理教授, 研究方向为高压大电流试验设备研发、雷电防护与智能电网电磁兼容(通信作者)(E-mail: lysky00@sjtu.edu.cn)。