特高压直流母线 MOA 的电位与电场分布计算

安翠翠[1]，刘 航[1]，王 琼[2]，窦小晶[3]，张源斌[1]

（1. 西安交通大学电气工程学院，陕西 西安 710049；2. 江西省电力设计院，江西 南昌 330000；
3. 西北西安输变电运行公司，陕西 西安 710048）

摘要：分析了恒定电场的计算方法；根据特高压直流母线避雷器的结构，建立三维有限元模型，计算了其在直流持续运行电压下的电位电场分布；结果表明，在直流电压下，避雷器电阻片上承担相同的电压，防晕环的主要作用是降低局部产生过高场强和防止电晕；同时对该避雷器的防晕环进行了结构优化。

关键词：特高压直流；母线避雷器；有限元

中图分类号：TM862 **文献标志码**：A **文章编号**：1001-1609(2009)05-0009-03

Calculation of Electric Potential and Field Distribution of UHVDC Bus Bar MOA

AN Cui-cui[1], LIU Hang[1], WANG Qiong[2], DOU Xiao-jing[3], ZHANG Yuan-bin[1]

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Jiangxi Electric Power Design Institute, Nanchang 330000, China; 3. North-west Xi'an Power Transmission Operation Company, Xi'an 710048, China)

Abstract: The calculation method of steady-state field was analyzed in the paper. Based on the structure of UHVDC bus bar MOA, a 3-D finite element model was established; the potential and electric filed distribution of the bus bar MOA under the continuous operating voltage was calculated. The result showed that under DC voltage, arrester valves withstand the same voltage; the main effects of anti-corona rings were reduce the partial high electric field strength, and prevent the corona. Meanwhile, the structure of the anti-corona rings was optimized in this paper.

Key words: UHVDC; bus bar MOA; FE

0 引言

随着我国经济的快速发展，电力需求迅速增长。而我国水力电力资源主要集中于中西部，需要通过远距离、大容量的“西电东送”、“南北互供”等工程进行调节，因此需要发展特高压输电工程。特高压输电工程包括特高压交流和特高压直流输电两种形式；特高压直流输电中间无落点、可将大量电力直送大负荷中心，具有输送容量大、送电距离远、节省输电架线走廊等优点[1,2]。

特高压直流输电系统的建设，离不开过电压保护装置，而避雷器是过电压保护的主要设备。图 1 给出了典型的直流换流站避雷器保护方案[3]。

装在直流极线的避雷器有 CB_2、DB、DL。CB_2 保护直流极母线设备，为可选择的避雷器；DB 和 DL 分别装于直流母线侧和平波电抗器线路侧，用于开关直流场的雷电和操作波保护。

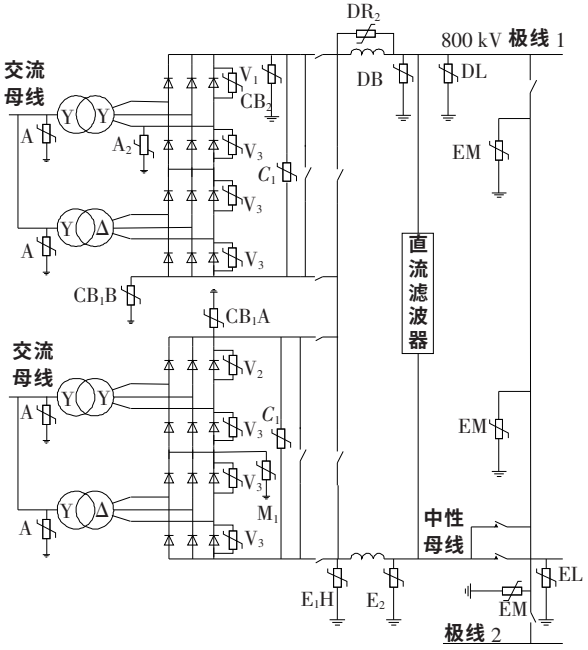


图 1 换流站典型避雷器保护方案

交流 MOA 电位电场分布的研究工作，国内外已经做了很多，而且技术也很成熟，概括来讲分为测

收稿日期：2009-03-26； 修回日期：2009-06-26

作者简介：安翠翠(1983)，女，硕士，从事高电压测量技术的研究。

量和计算两类方法[4,5]；而对于直流 MOA 则很少见到相关的研究报道。笔者通过建立恒定电场的有限元模型，对直流母线避雷器的电位电场分布进行了计算研究。

1 直流母线避雷器的计算模型

1.1 恒定电场的计算方法

在直流持续运行电压下，避雷器的电场分布满足恒定电场的条件，其边值问题满足式(1)。

$$\begin{cases}\Delta^2\varphi=0\\ \varphi|_{s1}=U_0\\ \dfrac{\partial\varphi}{\partial n}\Big|_{s2}=0\\ \varphi|_{si}=\varphi_i\\ \displaystyle\int_{si}\gamma\frac{\partial\varphi}{\partial n}=0\end{cases}\tag{1}$$

在不同介质的交界面上满足式(2)。

$$\begin{cases}\varphi_1=\varphi_2\\ \gamma_1\dfrac{\partial\varphi_1}{\partial n}=\gamma_2\dfrac{\partial\varphi_2}{\partial n}\end{cases}\tag{2}$$

式(1)中的第 1 式表示恒定电场介质中的电位函数，第 2 式表示第 1 类边界条件，第 3 式表示第 2 类边界条件，第 4 式表示浮动电极上的电位函数，第 5 式表示浮动电极表面净电荷为零。

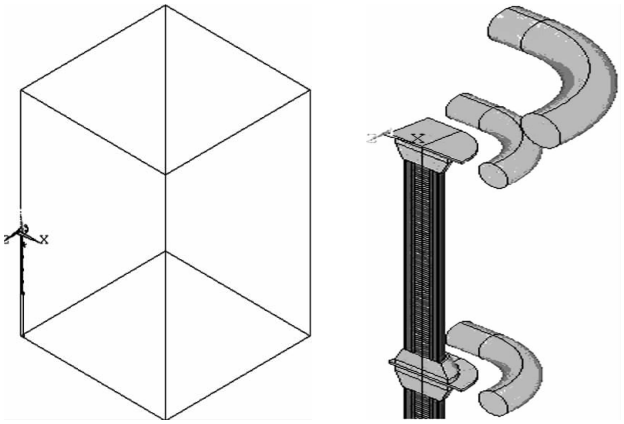
根据式(1)、(2)可以看出，介质的导电率决定了恒定电场分布；恒定电场和静电场的计算规律相类似，不同的是静电场的分布由介质的介电常数决定[6]。

1.2 计算模型的建立

根据某单位提供的直流母线双柱并联避雷器结构图，利用 ANSYS 分析软件，建立恒定电场中直流母线避雷器的三维有限元模型。避雷器由 10 个避雷器单元串并联组成，共 5 节，每节由 2 个串联组并联，每节单元高度 2 164 mm，每节串联单元间有 20 mm 厚的连接板。氧化锌电阻片的尺寸为 Φ115 mm×Φ38 mm×20 mm，两个电阻片为 1 组，每组之间用相同尺寸的铝垫块隔开，每节串联组有 30 组电阻片、31 个垫块；加装 3 个防晕环，其结构为跑道形，第 1 个和第 2 个防晕环与第 1 节单元上法兰相连接，第 3 个防晕环与第 1 节单元下法兰相连接。

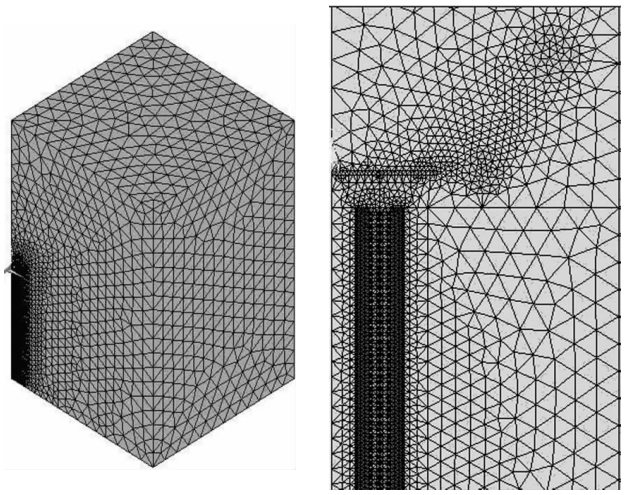
根据其结构的对称性建立 1/4 三维模型。为了方便计算，在满足工程精度的条件下，模型中忽略了绝缘拉杆、防晕环支撑以及伞裙等因素的影响。三维实体模型见图 2。人工截断边界的尺寸为 30 mm×44 mm×30 mm。

选择恒定电流场计算单元 solid231，网格剖分采用人工控制单元尺寸的自由剖分方式，过渡网格处采用局部细化方式。剖分网格后的有限元模型见图 3。



(a)整体模型 (b)防晕环处

图 2 避雷器的实体模型



(a)整体网格 (b)防晕环处网格

图 3 避雷器的有限元模型

2 电位电场的计算结果

2.1 电位计算

与交流避雷器中电阻片承担电压偏差率的定义相同，这里也定义直流系统避雷器的电阻片承担电压偏差率见式(3)。

$$\eta_i=\frac{u_i-u_0}{u_0}\times100\%\tag{3}$$

式(3)中，η_i 为第 i 个电阻片承担电压的偏差率；u_i 为第 i 个电阻片承担的电压；u_0 为每个电阻片承担的平均电压。

根据±800 kV 云广直流工程中极母线避雷器的主要运行参数[1]，高压端加载电压 824 kV。计算有防晕环和无防晕环两种情况下，避雷器电阻片承担电压偏差率曲线基本重合，见图 4。

氧化锌电阻片的电阻片率为 1 010～1 012 Ω·m，

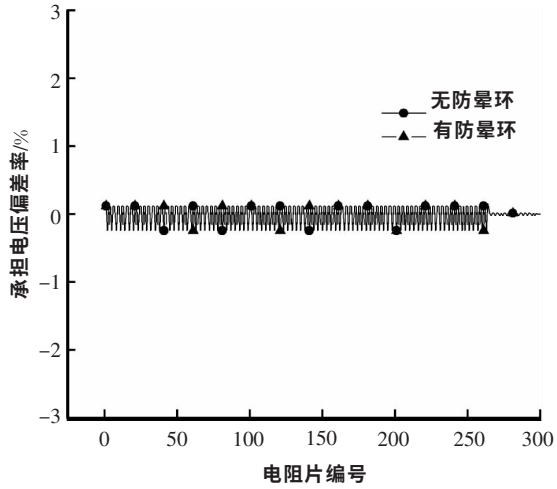
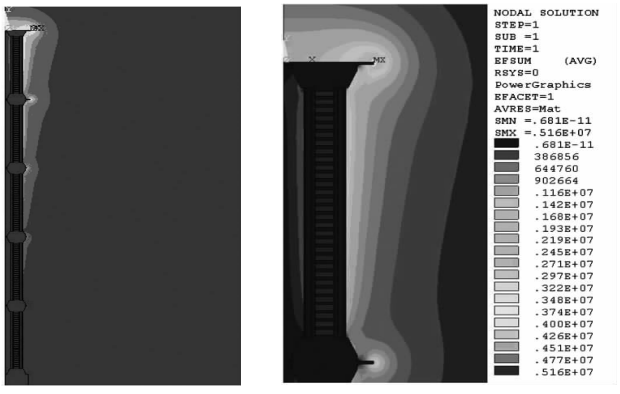


图 4　有、无防晕环时电阻片承担电压偏差率曲线

和其周围介质电阻片率的数量级相差比较大，直流持续运行电压下，两者之间不存在泄漏电流；因此电阻片承担电压只跟本身的电阻率有关系，即直流运行电压下避雷器电阻片承担电压偏差率为零。图 3 中两种情况下的偏差率均为−0.24%～0.12%，这个很小的偏差认为是由计算过程中的截断误差和舍入误差引起的。

2.2　电场计算

通过前面的电位计算可以看出，直流持续运行电压下避雷器中不存在电阻片承担电压不均的现象，所以不需要有均压措施改善其电压分布；但其高压端出现局部过高场强，未加装防晕环时的场强分布见图 5。

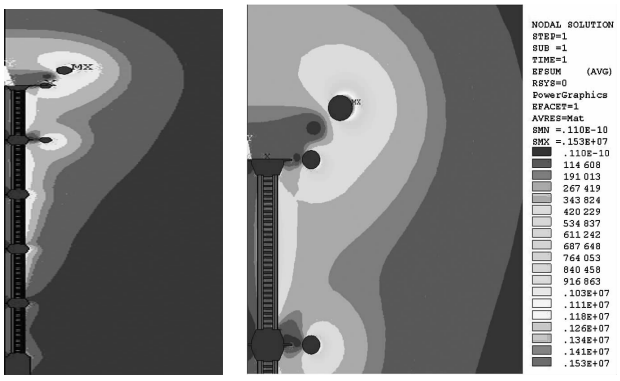


(a)整体云图　　(b)高压端局部云图

图 5　未加装防晕环时的电场分布云图

图 5 的计算结果表明，未加装防晕环时，避雷器高压端最大电场强度为 51.6 kV/cm，大大超出了空气的起晕场强；第 2 节单元下法兰处的最大电场强度达到 25 kV/cm(一般选不大于 15 kV/cm)；第 3 节单元下法兰处的最大电场强度为 9.3 kV/cm。

因此在第 1 节单元的上下法兰处需要有防晕措施，这里采用的是加装防晕环。第 1 节单元上法兰处加装两个防晕环，一大一小；下法兰处加装一个防晕环，尺寸与上面的小防晕环相同。加装防晕环后的场强分布见图 6。



(a)整体云图　　(b)高压端局部云图

图 6　加装防晕环时的电场分布云图

图 6 的计算结果表明，加装了防晕环后，最大电场强度出现在大防晕环外侧的空气中，场强值降低到 15.30 kV/cm；第 1 节单元下法兰防晕环处空气最大电场强度为 11.65 kV/cm，和加装之前相比有了明显的降低。

3　防晕环优化

电场计算结果表明，应该进一步降低大防晕环处的电场强度，需要对该防晕环进行结构的优化。笔者通过调整其环径、截面管径和罩入深度对其结构进行了优化。不同的防晕环尺寸与最大电场强度的关系见表 1～3。

表 1　防晕环罩入深度与最大电场强度的关系

改变罩入深度/mm	最大电场强度/(kV·cm^{-1})
下降 100	15.5
不变	15.3
上升 200	15.6
上升 500	15.4

表 2　防晕环外径与最大电场强度的关系

改变环外径/mm	最大电场强度/(kV·cm^{-1})
2 200	16.3
2 600(不变)	15.3
3 000	15.1
3 400	14.6

表 3　防晕环截面管径与最大电场强度的关系

改变截面管径/mm	最大电场强度/(kV·cm^{-1})
300(不变)	15.3
320	14.9
350	14.3
400	13.5

(下转第 15 页)

出以下结论：

（1）在电源向高压发生器充电过程中，第一级电容器和硅堆都有轻微过电压，其中直流柱上滤波电容 C_1 上的过电压倍数是 1.16，D_1 上的过电压倍数是 1.15，交流柱上的电容器 C_1' 上的电压倍数是 1.35，C_2' 上的过电压倍数是 1.16。设计中电容器的耐压应在 1.4 倍以上。

（2）发生器负载短路后，直流保护电阻上瞬时承担全部输出电压，短路电流峰值小于 50 A；第一级硅堆 D_1 上的暂态峰值电流最大，与正常运行时相比，峰值电流倍数为 8.66。

（3）由于发生器负载短路时，直流保护电阻承受的电压即为输出电压，要求直流保护电阻的耐压按额定输出电压设计并预留一定裕度；交流柱上的充电电容器 C_1 在发生器的充电过程中承受的过电压是其额定电压的 1.35 倍，设计中电容器的耐压应在 1.4 倍以上。

参考文献：

[1] 刘振亚.特高压电网[M].北京：中国经济出版社，2005.

[2] 尚　春.特高压输电技术在南方电网的发展与应用[J].高电压技术，2006，32(1)：35–37.

[3] 张文亮，于永清，李光范，等.特高压直流技术研究[J]，中国电机工程学报，2007，27(22)：1–7.

[4] 黄道春，魏远航，钟连宏，等.我国发展特高压直流输电中的一些问题的探讨[J].电网技术，2007，31(8)：6–12.

[5] 舒印彪.中国直流输电的现状及展望[J].高电压技术，2004，30(11)：1，2，20.

[6] 张仁豫.高电压实验技术[M].北京：清华大学出版社，1982.

[7] 华中工学院，上海交通大学.高电压实验技术[M].北京：水利电力出版社.

[8] DOMMEL H W（加拿大）.电力系统电磁暂态计算理论[M].李永庄，林集明，曾昭华，译.北京：水利电力出版社，1991.

[9] KUFFEL E，ZAENGL W. S.High-voltage Engineering：Fundamentals[M].Oxford，New York:Pergamon Press，1984.

[10] GALLAGHER T J，PEARMAIN A J.High Voltage：Measurement，Testing，and Design [M].Chichester；Ner York：Wiley，1983.

[11] RYAN H M.High Voltage Engineering and Test[M].Stevenage，Herts.，U.K.：Peregrinus on Behalf of the Institution of Electrical Engineers，1994.

[12] TRUMPY K，BRANDLIN F，FREIBERG E.High Power HVDC Test Equipment for Pollution Testing [C]//7th International Symposium on High Voltage Engineering（ISH），Dresden，Germany，1991：1–76.

[13] JB/T 8168–1999.脉冲电容器及直流电容器[S].2000.

[14] 孙才新，司马文霞，赵　杰，等.特高压输电系统的过电压问题[J].电力自动化设备，2005，25(9)：5–9.

[15] 项兴荣.高压硅堆在电力系统直流高电压电气实验装置中的应用[J].半导体技术，1996，6(3)：62–64.

[16] GB/T 16927.1–1997.高电压实验技术第一部分：一般实验要求[S].1997.

（上接第 11 页）

通过表 1 可以看出，在一定范围内，防晕环罩入深度的改变并不能有效地改善其周围空气的电场强度，因此选用初始给定的罩入深度。

通过表 2 可以看出，在一定范围内，增大防晕环外径可改善其周围空气的电场强度。考虑过大的环外径带来的其他不安全因素，认为环外径 26 00 mm 是合适的。

通过表 3 可以看出，在一定范围内增大防晕环的管径可以有效改善其周围空气的电场强度。当截面管径增大到 350 mm 时，高压端防晕环外侧空气的最大电场强度为 14.3 kV/cm。

4　结论

通过对特高压直流母线 MOA 的电位和电场分布的计算和分析，可以得出下面的结论：

（1）MOA 在直流持续运行电压下，氧化锌电阻片上承担相同的电压，不存在承担电压不均匀的现象；防晕环的作用是降低局部过高场强，防止电晕发生；

（2）通过对防晕环结构进行优化，结果认为，大防晕环罩入深度和环外径不变、截面管径增大到 350 mm 是合适的。

参考文献：

[1] 王玉平，张一鸣.特高压直流避雷器的技术特点与分析[J].电力设备，2007，8(3)：15–19.

[2] 李　立.特高压直流输电的技术特点与工程应用[J].电力设备 2006，7(3)：1–4.

[3] Q/GDW 144.±800 kV 特高压直流换流站过电压保护和绝缘配合导则[S].2006.

[4] 岳亚丽，朱海涛，张源斌.氧化锌避雷器电阻片电位分布测量系统的研制[J].高电压技术，2006，32(10)：22–24.

[5] 王世山，何计谋，金　强.悬挂式避雷器电位分布计算及均压环优化配置[J].电瓷避雷器，2005(3)：24–28.

[6] 王仲奕，童心军，赵彦珍.高压交直流电容式套管内部电场的分析比较及改进[J].高压电器，2003，39(3)：9–11.