

特高压氧化锌避雷器电场分布计算

杨雅倩¹, 罗日成¹, 郭天伟¹, 李腾飞¹, 吴东²

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙 410114, 2. 淄博供电公司, 山东 淄博 255032)

摘要: 特高压氧化锌避雷器是绝缘配合的基础, 避雷器性能的好坏直接影响整个变电站运行的安全稳定。以1 000 kV变电站用氧化锌避雷器为例, 采用Ansoft Maxwell有限元软件仿真计算其周围电场分布情况, 尤其是距离地面2 m高度处, 避雷器一侧水平方向上沿线场强大小; 并分析避雷器发生损坏时, 电场强度变化情况, 以及考虑有无高压线、高压引线的长度、求解域大小及底座的高度对电场分布的影响。结果表明: 各避雷器损坏情况下, 最大场强均有所减小; 去除高压线和缩小求解域避雷器周围最大场强增大; 缩短高压引线的长度, 距地面2 m高度处沿线场强有所增大; 提高底座高度, 沿线场强减小。研究结果为避雷器电场分析提供了一定的依据。

关键词: 特高压(UHV); 有限元法(FEM); 氧化锌避雷器; 电场分布; 影响因素

Analysis on Electric Field Calculation of UHV ZnO Surge Arrester

YANG Yaqian¹, LUO Richeng¹, GUO Tianwei¹, LI Tengfei¹, WU Dong²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Zibo Power Supply Company, Shandong Zibo 255032, China)

Abstract: Surge arrester used for UHV power systems is a base of insulation co-ordination. The safety and stability to whole substation is directly influenced by the characteristics of surge arrester. A case study of 1 000 kV ZnO surge arrester for substation, the simulation calculation of electric field around arrester, especially the field strength which from the ground 2 m height along the level of the side of surge arrester is carried out by using finite element analysis software Ansoft Maxwell. Analyzing the changes of field strength when arrester damage occurs and considering the influence of the high-voltage line, length of high-voltage lead, the size of solving domain and the height of base on electric field distribution. The results demonstrate that the maximum field strength around the surge arrester has reduced when the arrester damage occurs in different section, and it would increase through removing the high voltage line and reducing the solution domain. Shortening the length of high-voltage lead, the field strength has increased which from the ground 2 m height along the level of the side of surge arrester. However, the electric field strength decreases when heighten the base. The results of study provide a support for electric field analysis of ZnO surge arrester.

Key words: ultra-high voltage (UHV); finite element method (FEM); ZnO surge arrester; electric distribution; influencing factor

0 引言

近些年来随着中国对电力需求的增加, 超特高压已经成为电力部门发展的主要方向, 避雷器的主

要作用是防止过电压, 因氧化锌避雷器具有无续流、无间隙、流通容量大等特点, 故其成为中国避雷器发展的主要方向。

目前已有许多文献从均压环和底座的优化设

收稿日期: 2018-06-20; 修回日期: 2018-08-08

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(50977003); 电力与交通安全监控及节能技术教育部工程研究中心基金(2010#03)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(NSFC)(50977003), Power and Traffic Safety Monitoring and Energy Saving Engineering Research Center of Ministry of Education Fund(2010#03).

计方面来改善避雷器的性能,由于其自身的可靠性决定着整个变电站运行的安全稳定,又超特高压避雷器的尺寸大,长期运行后其电位分布较为不均匀,会严重影响避雷器的保护性能,电阻片承担电压不均会造成氧化锌避雷器损坏,因而对避雷器电位及电场方面的研究就显得格外重要^[1-6]。文[2]建立避雷器三维仿真模型,讨论支架高度、均压环环径、电阻片的相对介电常数和有无高压线对避雷器电位分布的影响及屏蔽环对地面附近的电场分布影响情况;文[7]采用 Ansys 软件分别仿真计算变电站用避雷器、新型线路避雷器及带纯空气间隙线路避雷器的电位和电场分布情况,并发现新型线路避雷器的电位和电场分布优于变电站用避雷器,且通过加装和改善均压环来提高避雷器的性能;文[8]仿真计算带串联绝缘子线路避雷器的电场分布,并通过优化均压环尺寸和其罩入深度来改善电场分布情况。文中主要研究有无高压线、高压引线的长度、求解域的大小及高压线与地面之间的距离等方面对 1 000 kV 氧化锌避雷器周围电场强度的影响,以及部分电阻片发生损坏时,避雷器场强变化情况,分析是否可以采用电场法检测手段来判断避雷器好坏^[7-12]。

1 理论计算

1.1 有限元法

有限元法的基本原理是把一个复杂且连续介质的求解区域分解成很多个形状较为简单的小子区域,一般称这些子区域为“有限元”,多数情况下也叫“单元”,将求边界问题的思想运用在每个子区域中,通过计算小区域,之后总和各个小区域的结果,进而得到整个大区域的解^[13-16]。即把不能直接求解的微分方程分解成有限个单元,再通过计算庞大的方程组得出各个节点上的场量的方法。

1.2 三维电场计算原理

在 Ansoft 三维电场求解器中,以标量电位 Φ 作为待求量,并配以正确的边界条件作为定解条件,三维电场满足的方程为

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \nabla \Phi) = -\rho_v \quad (1)$$

式(1)中: $\Phi(x, y, z)$ 为三维的标量电位; $\epsilon_r(x, y, z)$ 为 3 个方向矢量上的相对介电常数; ϵ_0 为真空的介电常数; $\rho_v(x, y, z)$ 为体电荷密度。

在 Maxwell 3D 的电场模块中求解的是三维标量电位 Φ ,一旦求解得到标量电位值,可以由麦克斯韦微分方程组直接得到电场强度 E 和电位移矢量

D ,这两个基本场量可由式(2)计算得到。

$$\begin{cases} E = -\nabla \Phi \\ D = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot (-\nabla \Phi) \end{cases} \quad (2)$$

另外,电流密度 J 也可由三维标量电位 Φ 计算得到,见式(3)

$$J = \sigma(x, y, z) \cdot E = \sigma(x, y, z) \cdot (-\nabla \Phi) \quad (3)$$

2 模型的建立

Y20-828/1620 型交流无间隙金属氧化物避雷器性能符合国家标准 GB 11032—2010、GBZ 24845—2009《1 000 kV 交流系统用无间隙金属氧化物避雷器技术规范》的规定,是用来保护 1 000 kV 交流特高压电力系统的输变电设备免受雷电过电压和操作过电压损害的新型保护电器。1 000 kV 避雷器外形尺寸见表 1。按照与实物大小 1:1 比例的型号为 Y20-828 的 1 000 kV 避雷器模型见图 1。图 1 中,底座 6 m,高压线长度 20 m,高压引线 1 m。

表 1 1 000 kV 避雷器外形尺寸

Table 1 The shape dimension of 1 000 kV surge arrester

型号	总高/mm	元件高度/mm	总重/kg
Y20-828/1620	13 150	2 360	7 300



图 1 1 000 kV 氧化锌避雷器模型

Fig. 1 ZnO surge arrester model of 1 000 kV

3 避雷器电位和电场分布

3.1 避雷器内部电阻片电压承担率

避雷器内部电阻片的电压承担率直接决定着整个避雷器性能的好坏,距避雷器高压端越近,其电压承担率越大,故仅研究第 1 节和第 5 节的电阻片上的电压承担率即可^[17-21]。

第 1 节与最后 1 节避雷器电阻片上的电压承担率见图 2。由仿真结果可以看出,第 1 节荷电率在 1.08~1.12 范围内,第 5 节荷电率在 0.85~0.94 之间,均满足避雷器的性能要求。

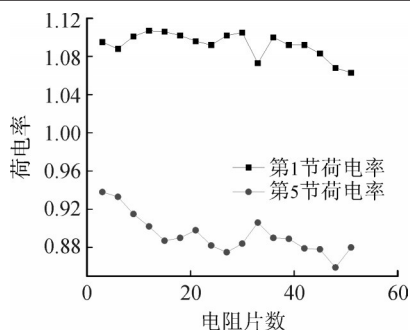
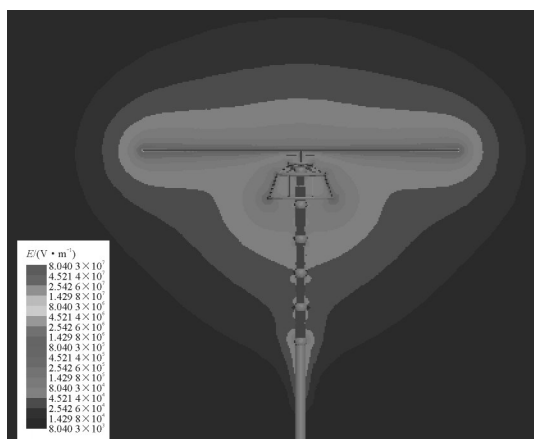
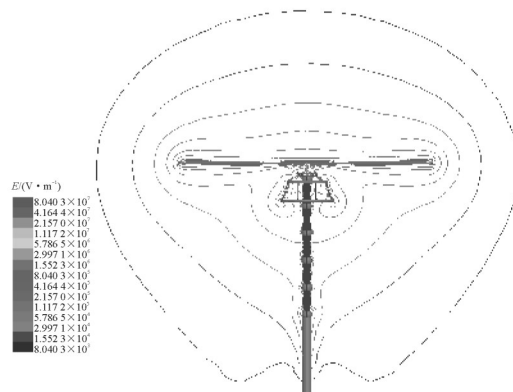


图2 电压承担率

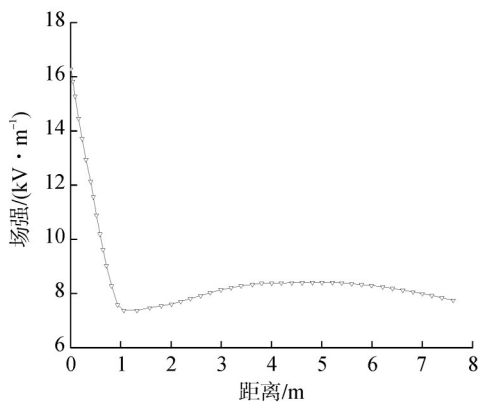
Fig. 2 Voltage loading rate



(a) 电场分布云图



(b) 电场线分布情况



(c) 距地面2m沿线电场强度

图3 避雷器周围电场分布

Fig. 3 Electric field distribution around surge arrester

位置分布较为稀疏。由距离地面2 m高度处,避雷器一侧水平方向上的沿线场强分布情况,整体先迅速下降到最低点,后呈现出先增加后减小的趋势;且在距避雷器1.2 m位置取得场强最小值7 357.913 9 V/m,距避雷器0 m位置(底座表面),场强达到最大值16 287.903 9 V/m。

3.3 一节部分电阻片损坏时,氧化锌避雷器周围电场分布情况

避雷器的第1节、第2节、第3节、第4节、第5节部分电阻片分别发生损坏的情况下,研究其周围电

3.2 正常情况下氧化锌避雷器电场分布

有关避雷器电位分布及其改善措施方面的研究现已相当成熟,且满足避雷器的性能要求,文中重点研究避雷器周围电场分布情况。1 000 kV氧化锌避雷器周围电场分布云图、电场线分布图以及距地面2 m高度处避雷器一侧水平方向上的沿线电场分布情况见图3。

图3仿真的结果表明,避雷器周围的场强最大值为 $8.040\ 3 \times 10^7$ V/m,且根据电场线分布情况可以看出,高压线及均压环附近,电场线分布密集,其他

场分布情况,见图4。

图4显示电阻片部分损坏分别发生在各节避雷器时,其避雷器周围的电场分布情况。从图4可以看出,避雷器周围整体的电场分布情况并无明显差别,5种情况下最大电场强度分别为 $7.419\ 9 \times 10^7$ 、 $5.708\ 2 \times 10^7$ 、 $7.724\ 4 \times 10^7$ 、 $7.979\ 4 \times 10^7$ 、 $8.011\ 7 \times 10^7$ V/m,均小于正常情况下的最大电场强度。其中第2节部分电阻片发生损坏时,最大电场强度为 $5.708\ 2 \times 10^7$ V/m,较其他情况,场强减小明显,远低于正常情况下的最大场强 $8.040\ 3 \times 10^7$ V/m;其他情况各场强最大值大小

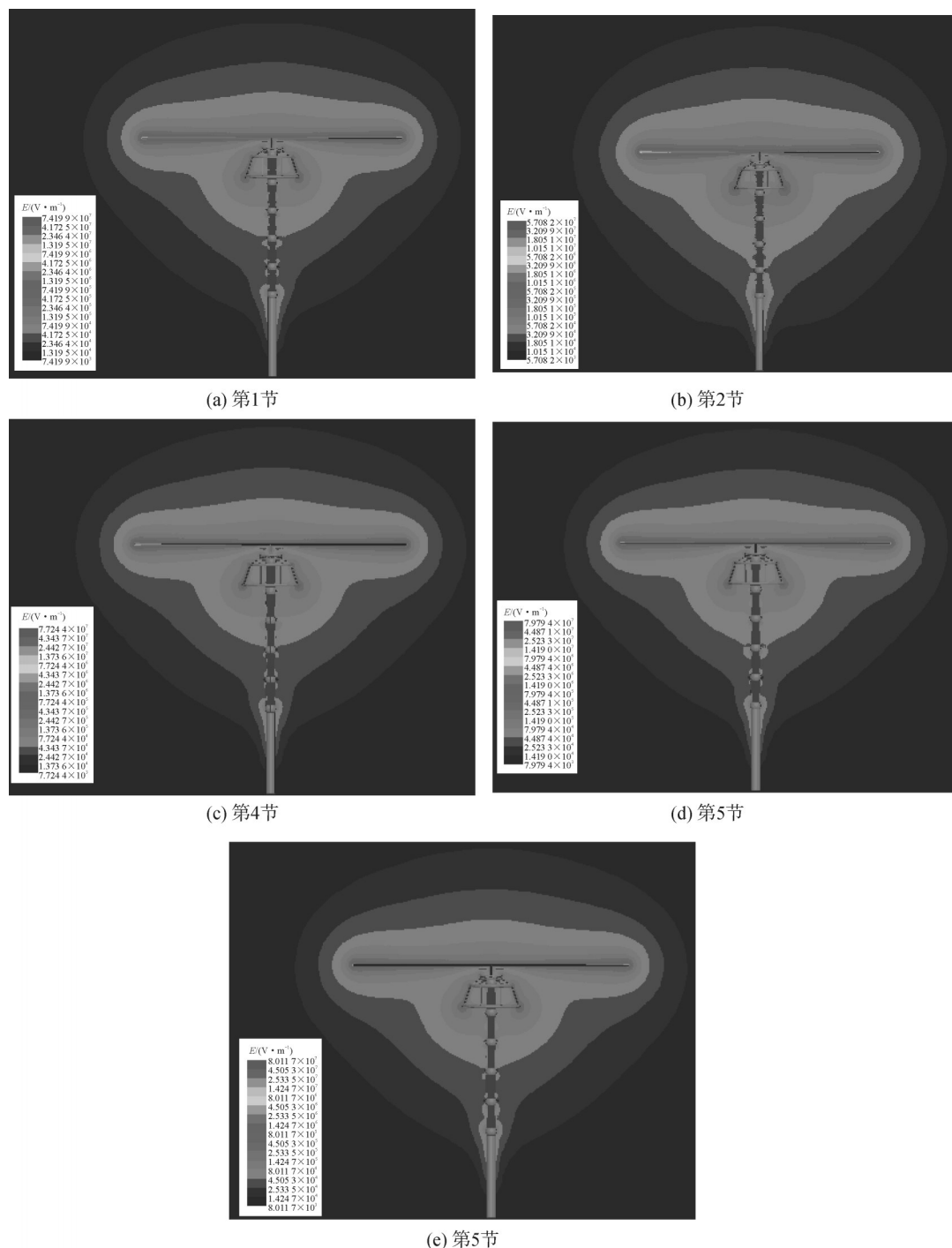


图4 部分电阻片发生损坏时,避雷器周围电场分布情况

Fig. 4 Electric field distribution around surge arrester after part of the resistor chip damage

相当,最后1节部分电阻片发生损坏时,其最大场强与正常情况最大场强最为接近。

3.4 距地面2 m高度处,避雷器一侧沿线电场分布情况

研究各节部分电阻片分别发生损坏时,距地面2 m高度沿线场强分布情况。分析电阻片损坏对沿线场强大小影响。

仿真计算电阻片损坏情况下,距地面2 m高度处沿线场强分布见表2。表2为避雷器底座表面和1.2 m处典型位置处最大场强和最小场强大小。由表2仿真结果可知,整体沿线场强分布规律均与正常情况相同;场强最低点均出现在距避雷器水平距离约1.2 m位置处,且沿线各情况下的最大场强和最小场强与正常情况下的仿真结果并无显著差别。

表2 部分电阻片发生损坏,距地面2 m 沿线电场强度

Table 2 Electric field strength on 2 m from the ground after part of the resistor chip damage $V \cdot m^{-1}$

避雷器损坏情况	距地面2 m 高度,沿线场强分布	
	最小场强	最大场强
第1节	7 336.528 1	16 239.952 1
第2节	7 313.843 2	16 189.601 5
第3节	7 323.864 5	16 211.787 7
第4节	7 340.293 1	16 248.023 8
第5节	7 389.923 5	16 358.022 0

4 影响避雷器电场分布的一些因素

4.1 有无高压线对避雷器周围电场分布影响

研究有无高压线对避雷器周围电场分布的影响,无高压线情况下避雷器周围电场分布云图见图5。

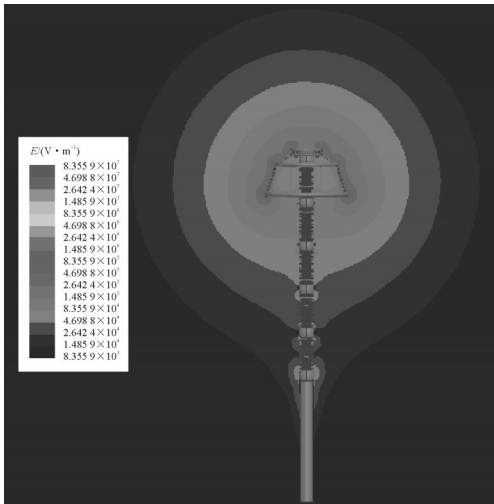


图5 无高压线电场分布云图

Fig. 5 Distribution of electric field without high-voltage lines

对比有无高压线的仿真结果,无高压线时,避雷器附近最大电场强度为 $8.3559 \times 10^7 V/m$,大于正常情况下的最大场强值。

4.2 求解域大小对避雷器电场分布的影响

以上均为大求解域仿真计算的结果,现缩小求解域,其他条件均不改变,研究求解域大小对电场仿真结果的影响,见图6。

小求解域下,避雷器周围的最大场强为 $8.1240 \times 10^7 V/m$,比大求解域下的最大电场强度 $8.0403 \times 10^7 V/m$,略大一些,仿真结果表明,缩小求解域会使电场强度仿真结果增大,但影响不大,故在有限元仿真计算时,可适当缩小求解域以减少计算量。

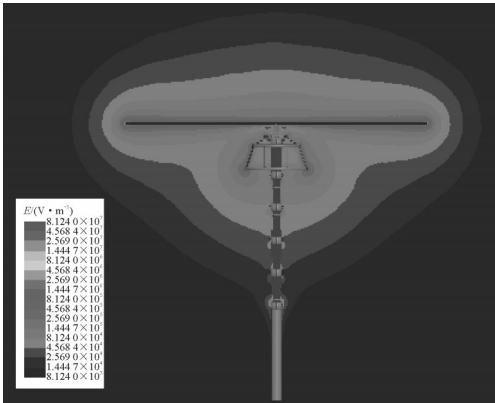


图6 小求解域时电场分布

Fig. 6 Electric field distribution in small solution domain

4.3 高压引线的长度对沿线场强大小的影响

高压引线是将高压线和避雷器高压端连接在一起的一段导线,长度一般不超过1 m。以上仿真计算均以1 m 高压引线来进行研究的,现缩短高压引线长度至0.3 m,研究高压引线的长度对距地面两米高度沿线电场强度的影响。

高压引线分别为1 m和0.3 m时,距地面2 m高度处避雷器一侧沿线场强见图7。其中,0.3 m高压引线避雷器底座表面处场强最大为 $21\,855.429\,5 V/m$ 大于高压线为1 m情况下底座表面的场强 $16\,287.903\,9 V/m$,最小场强为 $8\,246.458\,3 V/m$ 也出现在距避雷器水平方向1.2 m 附近;其沿线整体的场强分布趋势与长为1 m的高压引线的情况相比较均有所增大。这是由于高压引线减小,即缩短高压线与地面间的距离,故距地面2 m高度处的场强分布也相应增大;仿真结果与理论分析相符合。

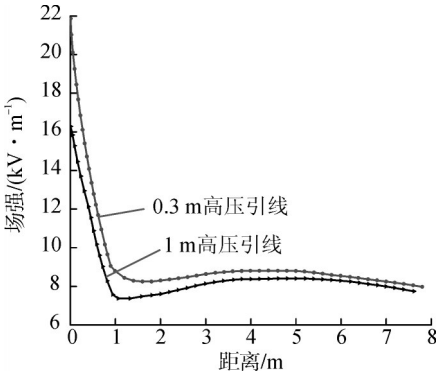


图7 高压引线0.3 m时距离地面2 m处避雷器电场分布

Fig. 7 Electric field strength on 2 m from the ground when the length of high-voltage lead is 0.3 m

4.4 底座高度对沿线场强的影响

上述均在避雷器底座高度为6 m的情况下进行电场仿真计算,现将底座增高2 m,即增大高压线对地高度,研究不同导线对地高度,距地面2 m高度,避雷器一侧水平方向场强分布情况见图8。

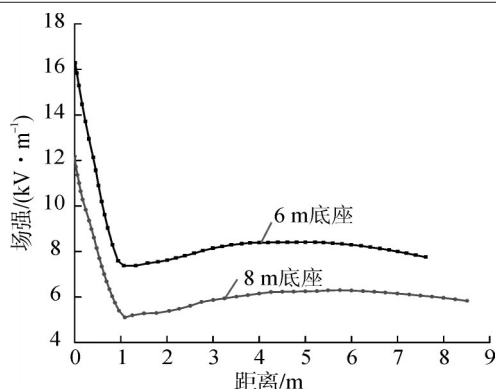


图8 增加高压线对地高度后沿线电场分布

Fig. 8 Electric field distribution on 2 m from the ground after addition of the distance between high-voltage and ground

由图8可知,增加底座高度到8 m,其距地面2 m高度避雷器一侧水平方向上的场强较底座为6 m的情况下的电场强度显著减小,底座表面场强最大值12 179.297 4 V/m,最小值为5 099.788 7 V/m,均明显小于6 m底座时的场强,这是由于提升底座高度即增大高压线与地面之间的距离,故其场强大小降低。

4.5 均压环与底座之间的转移电容

分析影响均压环与底座之间的转移电容的一些因素。现其他条件均不变,分别改变高压线、高压引线长度、求解域的大小以及底座高度等条件,研究其对转移电容的影响见表3。

表3 均压环与底座间的转移电容

Table 3 Transfer capacitance between grading ring and base

仿真条件	转移电容/pF
高压线引线1 m、大求解域	4.564 6
无高压线、大求解域	5.127 8
高压引线0.3 m、大求解域	4.577 0
增加底座高度、大求解域	5.933 8
高压引线1 m、小求解域	1.771 6

对比各仿真情况下,均压环与底座间的转移电容。由表3可知,1 m高压引线与0.3 m高压引线两种情况下转移电容仅相差0.012 4 pF,说明高压引线的长度对转移电容的大小几乎没有影响;去除高压引线时,均压环与底座间的转移电容有所增大;小求解域下,转移电容大小为1.774 1 pF约为大求解域情况下的一半;增加底座高度,转移电容增大也较为明显;对比以上仿真结果可知,求解域的大小对均压环与底座间的转移电容起关键作用。

5 结论

运用Ansoft Maxwell有限元电磁软件仿真计算

1 000 kV避雷器周围的电场分布情况,研究避雷器电阻片发生损坏时,其场强变化;并分析高压线、高压引线、求解域及底座高度对电场分布的影响;由仿真结果得到以下几点结论:

1)避雷器各节部分电阻片发生损坏时,其周围整体电场强度并无显著变化规律,无法采用电场法来检测避雷器性能的好坏;但电阻片损坏分别发生在各节避雷器时,其最大场强均有所降低,其中第2节损坏时,最大场强减小最为明显。

2)去除高压线和缩小求解域的情况下,避雷器周围最大场强均增大。

3)比较高压引线分别为1 m和0.3 m时,距地面2 m高度处避雷器一侧水平方向上的沿线场强分布情况,可以看出缩短高压引线的长度,其整体沿线场强都有所增大,尤其在底座表面处增大最为明显,场强最大值分别为16 287.903 9、21 855.429 5 V/m。

4)增大底座高度,即增加高压线与地面之间的距离,其距地面2 m高度处的沿线场强下降显著,故适当提高底座高度,可改善电场分布。

5)求解域大小对均压环与底座之间的转移电容影响最为明显,高压引线的长度对其几乎没有影响。

参考文献:

- [1] 杨敬华,范承勇. 40.5 kV真空断路器绝缘结构电场分析及优化设计[J]. 电网技术,2011,35(12):146-152.
YANG Jinghua, FAN Chengyong. electric field analysis and optimization design of insulation structure of 40.5 kV vacuum circuit-breaker[J]. Power System Technology, 2011,35(12):146-152.
- [2] 章爱武,刘春翔,朱弘钊,等. 500 kV线路避雷器电场分析及优化设计[J]. 电瓷避雷器,2014(5):41-45.
ZHANG Aiwu, LIU Chunxiang, ZHU Hongzhao, et al. Electric field analysis and optimized design of the arrester on 500 kV transmission lines[J]. Insulations and Surge Arrester, 2014(5):41-45.
- [3] 王世山,汲胜昌. 计及金属塔和母线效应的悬挂式避雷器电场计算及结构优化[J]. 电工技术学报,2005,20(6):30-34.
WANG Shishan, JI Shengchang. Electric calculation and structure optimization for suspended type surge arresters considering the effect of metal towers and buses[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005,20(6):30-34.
- [4] 韩社教,李平舟,路彦峰,等. 1 000 kV立柱式氧化锌避雷器三维电位分布计算及均压环设计[J]. 中国电机工程学报,2007,27(27):50-55.
HAN Shejiao, LI Pingzhou, LU Yanfeng, et al. 3D potential distribution calculation and design of grading rings for post-type ZnO surge arrester for 1 000 kV substation [J]. Proceed-

- ings of the Chinese for Electrical Engineering, 2007, 27(27): 50-55.
- [5] 王世山. 运行中 750 kV 悬挂式避雷器电场计算及设计优化[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(6): 801-806.
WANG Shishan. Electric field calculation and design optimization in running state for 750 kV suspended-type surge arrester[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(6): 801-806.
- [6] 江 讯, 王仲奕, 金 强. 棒形悬式复合绝缘子电场计算和优化[J]. 高压电器, 2005, 41(5): 340-342.
JIANG Xun, WANG Zhongyi, JIN Qiang. Calculation and optimization of electric field and voltage distribution along long-rod composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(5): 340-342.
- [7] 许 安, 杨 翔, 贾文彬. 220 kV 带纯空气间隙线路避雷器的电场分析[J]. 电瓷避雷器, 2016(2): 100-105.
XU An, YANG Xiang, JIA Wenbin. The electric field analysis of 220 kV line arrester with pure air gap[J]. Insulations and Surge Arrester, 2016(2): 100-105.
- [8] 江 讯, 王仲奕. 330 kV 带均压环的棒形悬式复合绝缘子电场有限元分析[J]. 高压电器, 2004, 40(3): 215-217.
JIANG Xun, WANG Zhongyi. Analysis of the electric field of 330 kV composite insulator with grading rings[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(3): 215-217.
- [9] 项 阳, 郭 洁, 赵 珊, 等. 500 kV 六氟化硫绝缘罐式金属氧化物避雷器电场分析[J]. 电瓷避雷器, 2009(3): 35-39.
XIANG Yang, GUO Jie, ZHAO Shan, et al. Electric field analysis of 500 kV tank type metal oxide surge arresters[J]. Insulations and Surge Arrester, 2009(3): 35-39.
- [10] 王永强, 胡芳芳, 谢 军, 等. GIS 盆式绝缘子气息缺陷下电场变化规律仿真研究[J]. 绝缘材料, 2016, 49(1): 40-45.
WANG Yongqiang, HU Fangfang, XIE Jun, et al. Simulation study on electric field change rule of GIS disc insulator with air gap defects [J]. Insulation Materials, 2016, 49(1): 40-45.
- [11] CHRISTODOULOU C A, SPANIAS C A, KONTARGYRI V T, et al. Study of electric field around a metal oxide surge arrester: Measurement and simulation[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(8): 2014-2021.
- [12] 陈智勇, 蒋学军, 李 婧. 复合绝缘子伞群损坏对绝缘子电场分布的影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2013(5): 44.
CHEN Zhiyong, JIANG Xuejun, LI Jing. Studies of the effect of the shed damage of composite insulator on electric field distribution along insulator[J]. Insulations and Surge Arrester, 2013(5): 44.
- [13] 路彦峰. 氧化锌避雷器电位分布数值计算研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
LU Yanfeng. Research on numerical calculation of the potential distribution of ZnO surge arrester[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2007.
- [14] 陈 忠, 黄贵均. 应用二维轴对称场有限元法的电站型 MOA 电位分布计算及均压设计[J]. 电瓷避雷器, 2016(2): 155-161.
CHEN Zhong, HUANG Guijun. Potential distribution calculation and uniform design for 220 kV station type ZnO surge arrester based on 2D axial asymmetry finite element method [J]. Insulations and Surge Arrester, 2016, (2): 155-161.
- [15] 韩 昊, 何相奎. 500 kV 悬挂式带串联间隙线路避雷器电场分布研究[J]. 科技创新导报, 2012, 15(1): 4-7.
HAN Hao, HE Xiangkui. Electric field distribution of 500 kV suspension type line arrester with pure air clearance in series[J]. Science and Technology Consulting Herald, 2012, 15(1): 4-7.
- [16] 韩社教, 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): 105-108.
HAN Shejiao, DAI Dong, MA Xikui, et al. Calculation of potential distribution for zinc-oxide surge arrester by finite element method[J]. Proceedings of the Chinese for Electrical Engineering, 2001, 21(12): 105-108.
- [17] 郭 洁, 何计谋, 李晓峰. 750 kV 金属氧化物避雷器电位分布研究[J]. 中国电力, 2006, 39(1): 15-17.
GUO Jie, HE Jimou, LI Xiaofeng. Study on the potential distribution of 750 kV metal oxide surge arrester[J]. Electric Power, 2006, 39(1): 15-17.
- [18] 安翠翠, 刘 航, 王 琼, 等. 特高压直流母线 MOA 的电位与电场分析[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 9-11.
AN Cuicui, LIU Hang, WANG Qiong, et al. Calculation of electric potential and field distribution of UHVDC bus bar MOA[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 9-11.
- [19] 岳亚丽, 江少成, 张源斌. 800 kV MOA 的电位分布数值分析和测量[J]. 高压电器, 2009, 45(4): 63-64.
YUE Yali, JIANG Shaocheng, ZHANG Yuanbin. Numerical analysis and measuring for the potential distribution of 800 kV MOA[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4): 63-64.
- [20] 陈德兴, 张永记, 晋文杰, 等. 紧凑型运行方式下 220 kV 金属氧化物避雷器电位与电场分布的计算[J]. 高压电器, 2011, 47(2): 39-42.
CHEN Dexing, ZHANG Yongji, JIN Wenjie, et al. Calculation of electric potential and field distribution of 220 kV MOA under compact operation mode[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(2): 39-42.
- [21] 赵 宇, 马文玲, 窦小晶, 等. 1 000 kV 瓷外套 MOA 电位分布计算与试验[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 11-15.
ZHAO Yu, MA Wenling, DOU Xiaojing, et al. Calculation and measurement of potential distribution of 1 000 kV metal oxide arrester[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 11-15.

杨雅倩(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高电压技术、带电作业技术等。