

特高压交流架空线路用复合绝缘子均压特性研究

孙西昌¹, 彭宗仁², 党镇平¹, 丁京玲¹, 王婷婷¹

(1. 西安电瓷研究所, 陕西 西安 710077; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 介绍了特高压交流架空线路用 1 000 kV 棒形悬式复合绝缘子电场分布计算及均压特性研究等情况, 运用三维有限元法, 比较了整体单支、1/3 和 2/3 元件组串、1/6 和 5/6 元件组串和一种 1/6 瓷质绝缘子及 5/6 复合绝缘子组串, 结果可以看出, 两复合绝缘子元件组串对电场分布没有任何改善, 在结构上复合绝缘子采用整体单支比两元件组串的好; 导线侧使用瓷质绝缘子, 接地侧使用复合绝缘子组串, 可以充分利用瓷质绝缘子良好的耐电弧性和复合绝缘子良好的憎水防污性, 比采用整体单支复合绝缘子的电场分布均匀, 使复合绝缘子元件端部密封处的电场强度降低了 60% 以上。计算分析了特高压绝缘子的电场分布, 均压环经优化配置后, 使整体单支复合绝缘子导线侧的电场强度小于 320 V/mm, 瓷质绝缘子和复合绝缘子组串, 复合绝缘子承受的最大场强小于 110 V/mm。

关键词: 特高压交流架空线路; 棒形悬式复合绝缘子; 电场分布; 电场强度; 均压环优化

中图分类号: TM216

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)06-0527-04

Study on Electrical Stress Grading of Composite Insulators for UHV Transmission Lines

SUN Xi-chang¹, PENG Zong-ren², DANG Zhen-ping¹, DING Jing-ling¹, WANG Ting-ting¹

1. Xi'an Electro-ceramic Research Institute, Xi'an 710077, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Calculation of electrical stress distribution and grading performance of 1 000 kV composite insulator for UHV a.c. overhead transmission line is described. Comparison among one-piece unit, strings of 1/3 and 2/3 units, 1/6 and 5/6 units as well as 1/6 porcelain unit and 5/6 composite units is performed. The results show that two-units string gives no improvement in stress distribution, the structure of one-piece unit is better than two-unit string in design, and applying porcelain unit to live end and composite units to earth end can fully take advantage of arc-resistant performance of porcelain insulator and hydrophobic performance of composite performance to achieve better stress distribution than one-piece insulator, reducing the electrical stress at end sealing of composite insulator by 60%. Calculation and analysis of the electrical stress distribution of UHV insulator are conducted. After optimization of grading ring the electrical stress at live end of one-piece insulator is less than 320V/mm, and the maximum value at composite insulator of porcelain-composite units combination is less than 110 V/mm.

Key words: UHV a.c. overhead line; composite rod insulator; electrical stress distribution; electrical field strength; optimization of grading ring

0 引言

据统计, 目前我国电网使用的复合绝缘子数量已远超过 200 万只, 总的来说运行状态良好。但也存在着一些问题: 如伞裙老化、端部断裂、憎水性下降和不明原因的闪络。特别在风沙大、紫外线强、干旱少雨的气候恶劣地区, 伞裙弹性下降变硬、变脆, 严重的开裂掉块, 在南方潮湿地区出现严重的电蚀损现象^[1,2]。

棒形悬式复合绝缘子主要由芯棒、伞套、两端金

属附件和均压环等构成, 其结构见图 1。

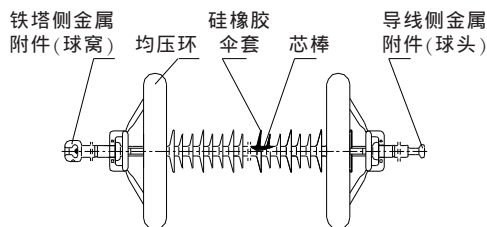


图 1 1 000 kV 交流棒形悬式复合绝缘子结构示意图

由于复合绝缘子是由两种有机绝缘材料模压而成, 其耐电蚀损性能不如无机瓷绝缘材料, 因此要想使有机复合绝缘子长期安全可靠运行, 就应采取措

收稿日期: 2008-06-30; 修回日期: 2008-08-01

作者简介: 孙西昌(1953-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事绝缘子的研究开发工作。

施合理控制导线侧的电场强度^[3-7]。

笔者运用三维有限元法,计算分析了特高压绝缘子的电场分布,考虑了均压环结构型式及安装位置对绝缘子电场分布的影响,得出1000 kV交流棒形悬式复合绝缘子的均压环优化设计方案,确定了均压环安装位置和结构尺寸。

1 计算模型

运用三维仿真计算模型^[8],按照1000 kV交流线路杆塔、绝缘子、导线和金属附件的实际尺寸,结合大地、均压环等条件进行实体建模。1000 kV线路棒形悬式复合绝缘子,采用I型结构,复合绝缘子长度(含金属附件)8050 mm^[9],导线采用八分裂结构,子导线间距382.6 mm,分布在直径为1000 mm的正八边形顶点上,实体计算模型图略。

1000 kV复合绝缘子、杆塔、导线、均压环的尺寸为

(1)伞形结构(大、小、小伞形)为:有机绝缘子大伞径200 mm;小伞径160 mm;大、小、小、大伞间距分别为39、44、47 mm;瓷绝缘子大伞径209 mm;小伞径179 mm;大、小伞间距33.5、38.5 mm。

(2)均压环尺寸:环外径800 mm;截面直径100 mm。

(3)导线及杆塔尺寸:导线长为20000 mm;杆塔高为80000 mm;导线为8×LGJ-500/35钢芯铝绞线。

均压环位置及轴向电场分布曲线沿X方向截取路径见图2,图中h为均压环的中心平面与金属附件上表面的距离;X为轴向电场分布曲线的截取路径。

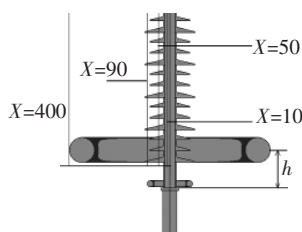


图2 均压环位置及轴向电场分布曲线沿X方向截取路径示意图

2 计算方案

1000 kV交流棒形悬式绝缘子三维有限元法电场分布计算方案如下:整体单支,有机复合绝缘子;组合结构,由一个占总长度的1/3和2/3的两段有机复合绝缘子元件串联而成,计算时短段在导线侧;组合结构,由一个占总长度的1/6和5/6的两段有机复合绝缘子元件串联而成,计算时短段在导线侧;组合结构,由一个占总长度的1/6瓷绝缘子元件和5/6有机复合绝缘子元件串联而成,计算时瓷绝缘子元件在导线侧。

1000 kV交流棒形悬式绝缘子均压环配置优化设计因数为:均压环外径的优化;均压环位置的优化;大均压环截面直径的优化;配小均压环的作用;关于组合结构的两元件连接处电场分布问题。

3 均压环配置优化

3.1 均压环外径的优化

设定均压环截面直径为100 mm,位置为150 mm,大均压环外径变化时导线侧的电场分布云图见图3,选择3幅典型图。

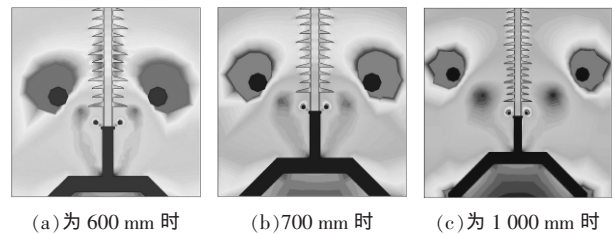


图3 大均压环外径变化时导线侧的电场分布

从图3的电场分布云图可以看出,当大均压环外径为600 mm时,复合绝缘子导线侧的电场比较集中,在均压环上方3个大伞裙间的区域内电场畸变比较严重,最大电场强度约400 V/mm。当大均压环外径为1000 mm时,复合绝缘子导线侧的电场强度明显减小,但是大均压环对小均压环的屏蔽作用明显减弱。通过对比得出,大均压环外径取700~800 mm时,电场分布较为合理。

3.2 均压环位置的优化

设定均压环外径为800 mm,截面直径为100 mm。大均压环位置变化时导线侧的3幅典型电场分布云图,见图4,大均压环位置变化时与均压环外侧相切的轴向电场分布曲线略,曲线中关键部位电场强度值见表1。

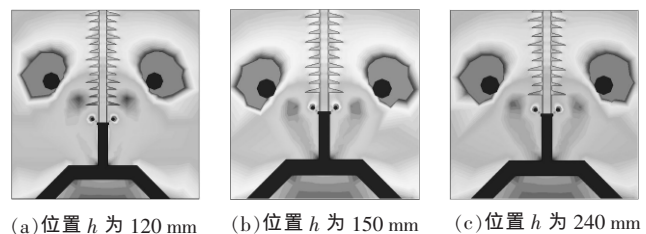


图4 大均压环位置变化时导线侧的电场分布

表1 大均压环位置变化时与均压环外侧相切的关键部位电场强度

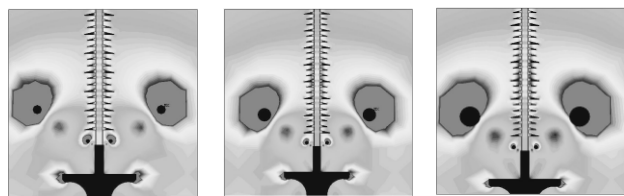
大均压环位置/mm	导线侧最大电场强度/(V·mm ⁻¹)
h=120	624.5
h=150	613.8
h=180	688.1
h=240	757.7

从图4的电场分布云图可以看出,随着均压环的上移,复合绝缘子导线侧的电场分布有所改善,但是

大均压环对小均压环的屏蔽作用有所减弱。从与均压环外侧相切的轴向电场分布曲线可以看出,当均压环的位置 h 为 150 mm 时,均压环外侧的电场强度最小,其值为 613.8 V/mm。通过对比可以得出,均压环的位置 h 取 150 mm 左右时,复合绝缘子导线侧的电场分布相对合理。

3.3 大均压环截面直径的优化

设定均压环外径为 900 mm,位置 $h=240$ mm,大均压环截面直径变化时导线侧的 3 幅电场分布云图,见图 5,轴向电场分布曲线略,曲线中关键部位电场强度见表 2,均压环表面最大电场强度随大环截面直径的变化曲线见图 6。



(a)截面直径为 60 mm (b)截面直径为 100 mm (c)截面直径为 140 mm

图 5 大均压环截面直径变化时导线侧的电场分布

表 2 大均压环截面直径变化时关键部位电场强度

大均压环截面直径/mm	轴向电场分布曲线中电场强度最大值/(V·mm ⁻¹)			
	截取路径 X=0 mm(穿过芯棒)	截取路径 X=50 mm(穿过大小伞和空气隙)	截取路径 X=200 mm(穿过绝缘子和均压环外侧空气隙)	截取路径 X=450 mm(与均压环外侧切口空气隙)
60	289.7	364.7	321.1	1 293.7
80	292.7	366.5	333.2	1 215.7
100	295.5	372.4	346.2	930.6
120	300.5	379.3	357.5	986.6
140	306.1	385.9	372.3	919.8

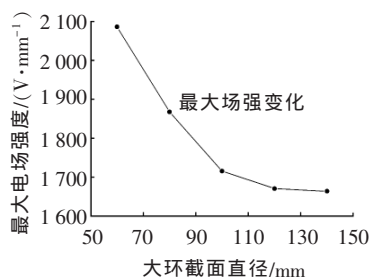


图 6 均压环表面最大电场强度随大环截面直径变化曲线

从图 5 的电场分布云图和图 6 的电场分布曲线可以看出,均压环环截面直径变化对复合绝缘子的电场分布影响很小,增大环截面直径会加强对绝缘子端部及连接金属附件的屏蔽效果。

从图 6 还可以看出,均压环环截面直径变化时,对均压环表面的电场强度有较大影响,环截面直径越大,均压环表面场强越低,起晕的可能性愈小。当均压环的截面直径大于 100 mm 以后,均压环表面的最大场强减小趋于饱和,因此均压环的环截面直

径取 100~120 mm 较为合理。

3.4 配小均压环的作用

均压环的配用方式为:不带小均压环;采用德国西门子式小均压环;采用较大配置小均压环;

同时采用西门子式和较大配置小均压环。针对这 4 种情况进行了电场分布计算,选择 3 幅配置小均压环时导线侧的电场分布云图作比较,见图 7。

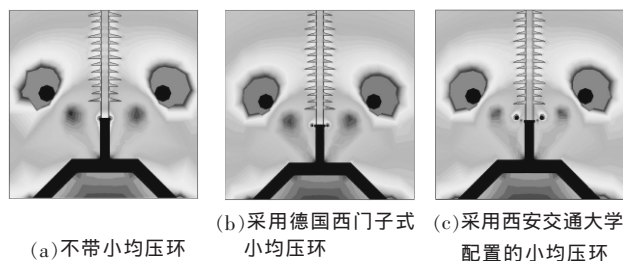


图 7 配置小均压环时导线侧的电场分布

从图 7 的电场分布云图可以看出,小均压环对导线侧金属附件端处的电场分布影响很大,不带小均压环时,金属附件端处的电场畸变严重。在芯棒和护套与金属附件连接处,采用西门子式的小均压环时,芯棒和护套的电场强度大于 270 V/mm;采用西安交通大学配置的小均压环时芯棒和护套的电场强度小于 210 V/mm;两种小环同时采用时,芯棒和护套的电场强度与单独采用西安交通大学配置的小均压环时的电场强度接近,大约为 210 V/mm。因此,建议单独采用西安交通大学配置的小均压环。

3.5 关于组合结构的两元件连接处电场分布问题

通过电场仿真计算,表明在两元件连接处需要加装均压环,以屏蔽连接处局部场强集中。以 1/3 和 2/3 两元件组成的复合绝缘子为例进行了电场分布计算,选择 2 幅元件连接处的电场分布云图作比较,见图 8。

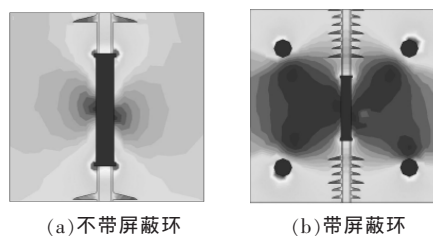


图 8 两元件连接处的电场分布

4 均压环优化配置后的计算结果

均压环经优化配置后,4 种结构的棒形悬式绝缘子串电场分布计算结果见表 3,选择典型曲线(截取路径 $X=10$ mm 时穿过芯棒的轴向电场分布)见图 9、10、11。

通过对 4 种结构的 1 000 kV 线路棒形悬式绝缘子的电场分布计算,得出以下结论:

(1)通过对第 1、2、3 种结构的棒形悬式有机复合绝缘子电场分布云图和电场分布曲线的比较,同

表3 4种结构的棒形悬式绝缘子串电场分布计算结果

绝缘子结构	轴向电场分布曲线中电场强度最大值/(V·mm ⁻¹)			
	截取路径 X=10 mm (穿过芯棒)	截取路径 X=50 mm (穿过大小伞和空气间隙)	截取路径 X=90 mm (穿过大伞和空气间隙)	截取路径 X=400 mm (与均压环外侧相切)
整体单支	256.982(见图9)	279.444	264.819	759.315
1/3 和 2/3 两有机元件组合	249.870	298.046	257.555	638.328
1/6 和 5/6 两有机元件组合	255.177(见图10)	303.891	263.599	641.883
1/6 瓷元件和 5/6 有机元件组合	244.867(见图11)	X=60 mm 时, 350.972	X=85 mm 时, 323.823	644.310

注:组合结构的两元件连接处均带屏蔽环。

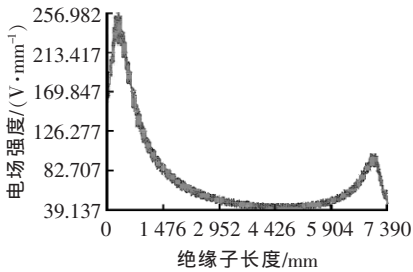


图9 整体单支

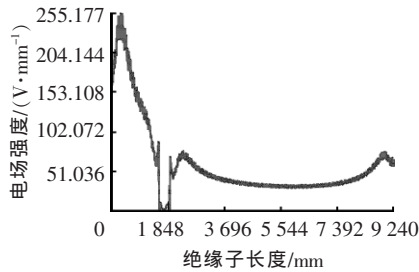


图10 1/6 和 5/6 两有机元件组合

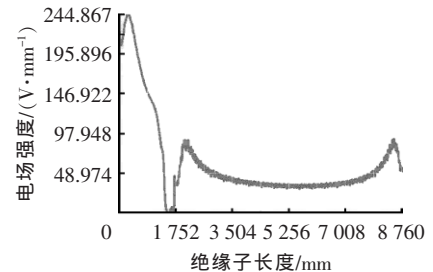


图11 1/6 瓷和 5/6 有机元件组合

时考虑到3种结构的长度,可以看出,由两个有机复合元件串联成的组合式对电场分布没有任何改善,同时元件连接处不加装均压环时,会引起局部的场强集中,尤其是由1/6和5/6两种元件组合而成的有机复合绝缘子。因此,在结构上,采用整体单支比由两个元件组合而成的有机复合绝缘子好。

(2)通过对第1、4种结构的棒形悬式绝缘子电场分布云图和电场分布曲线的比较,整体单支有机复合绝缘子其伞裙附近的最大场强一般超过320 V/mm;采用瓷质绝缘子和有机复合绝缘子组串时,有机复合绝缘子伞裙附近的场强明显降低,最大场强小于110 V/mm。

(3)采用瓷质棒形绝缘子和有机复合棒形绝缘子组串,由于瓷的介电常数大于芯棒和伞套材料的介电常数,相同长度、结构相近的瓷质绝缘子的电容要大于有机复合绝缘子,电容效应可以最大限度地实现分布电压均匀化。因此,采用瓷质绝缘子和有机复合绝缘子组串比采用整体单支有机复合绝缘子的电场分布更均匀。同时,可以充分利用瓷质绝缘子良好的耐电弧性和有机复合绝缘子良好的憎水防污性,有效抑制复合绝缘子的电晕放电和电蚀损。

参考文献:

- [1] 张锐. 我国复合绝缘子关键制造技术的发展与展望[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 106-110.
- [2] 吴光亚, 蔡炜. 复合绝缘子存在及研究的问题[J]. 电瓷避雷器, 2000, 214(4): 15-17.
- [3] YA Dong. Simulation of Electric Field Distribution of Composite Insulator [C]// XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, 2005: 27-32.
- [4] 谷山强, 何金良, 陈维江, 等. 复合绝缘子均压环导弧性能的仿真分析[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 22-25.
- [5] QIU Wei-guo, SABO S A. Electric Field and Potential Distributions along Dry and Clan Non-ceramic Insulator [C]// Electrical Insulator Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, Proceedings, 2001: 437-440.
- [6] 杨杰, 吉晓波, 周国华, 等. 均压装置对复合绝缘子电气性能的影响[J]. 高电压技术, 2004, 30(2): 24-25.
- [7] 周志成, 何俊佳, 陈俊武, 等. 均压环改善绝缘子串电压分布研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 45-48.
- [8] VANCIA B, SAHA T K, GILLESPIE T. Electric Field Modelling of Non-ceramic High Voltage Insulators [C]// Australasian Universities Power Engineering Conference, 2005: 25-28.
- [9] 孙西昌. 特高压交流棒形悬式复合绝缘子的研究[J]. 电瓷避雷器, 2006, 214(6): 1-6.

(上接第526页)

参考文献:

- [1] 王国利, 郝艳捧, 李彦明. 油中典型局部放电模型放电波形特征参数的提取[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 34-37.
- [2] 王猛, 谈克雄, 高文胜, 等. 局部放电脉冲波形的时频联合分析特征提取方法[J]. 电工技术学报, 2002, 17(2): 76-79.
- [3] 王国利, 郝艳捧, 李彦明, 等. 联合时频分析应用于局部放电信号处理的研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(3): 12-14.
- [4] COHEN L. Time-frequency Distribution- a Review Proc. [J]. IEEE, 1989(77): 941-981.
- [5] 科恩. 时-频分析: 理论与应用[M]. 白居宪, 译. 西安: 西安交

通大学出版社, 1998.

- [6] 黄成军, 郁惟镛. 基于小波分解的自适应滤波算法在抑制局部放电窄带周期干扰中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 107-111.
- [7] 肖燕, 郁惟镛. 用于提取局放脉冲的波形匹配识别方法初探[J]. 电工技术学报, 2005, 20(5): 87-91.
- [8] AUGER F, FLANDRIN P, LEMOINE O. Time-frequency Toolbox Reference Guide[M]. GdR ISIS, 2005.
- [9] 胡昌华. 基于MATLAB的系统分析与设计时频分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.