

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.02.022

基于ANSYS的雨滴分布对绝缘子表面电场的影响研究

汪 祥, 胡志坚

(武汉大学电气工程学院, 武汉 430072)

摘要: 笔者主要研究分析了线路绝缘子表面有雨滴分布时电场分布情况。利用有限元分析软件ANSYS构建了线路绝缘子有限元计算模型。通过对线路绝缘子模型仿真分析,首先得出了伞裙表面没有雨滴分布时伞裙上表面电场分布情况。接着通过仿真分析得出了雨滴位置、大小、电导率等因素对绝缘子表面电场的影响规律。最后通过对前述分析归纳总结,提出相应的优化建议,以提高电力系统运行的可靠性和安全性。

关键词: 绝缘子; 雨滴; 电场强度; 有限元

Influence of Distribution of Raindrops on Electric Field of Insulator Surface Based on ANSYS

WANG Xiang, HU Zhijian

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: This paper mainly studies the distribution of electric field of line insulator when there is raindrop distribution on sheds surface. Using finite element analysis software ANSYS to construct the finite element model of line insulators. By the simulation analysis on model of line insulators, firstly, the distribution of electric field on the surface of the umbrella skirt is obtained without raindrop, then the influence of the location, size and electrical conductivity of the rain, on electric field distribution of the insulator is analyzed. Finally, by summarizing the above analysis, the corresponding optimization suggestion is put forward to improve the reliability and security of power system operation.

Key words: insulator; raindrops; electric field; FEM

0 引言

通过对以往电力系统重大运行事故分析可知:污秽颗粒、尘埃及雨水^[1-6]对绝缘子表面积污特性及其分布具有决定性的作用;各种类型的雨滴作用在线路绝缘子表面,将直接影响到绝缘子表面电场的分布。因此有必要对雨滴作用下的线路绝缘子电场特性展开研究,分析雨滴位置、大小、电导率^[7-10]等对绝缘子表面电场分布造成的影响,找出利弊,从而提高电力系统运行的安全性与稳定性。

1 线路绝缘子建模

1.1 ANSYS 软件简介

有限元分析软件 ANSYS 是由 ANSYS 公司研

制的大型通用有限元分析软件,由于该软件运行速度快,分析结果精确,易于操作,在各个工程电磁领域都得到了广泛应用。

1.2 绝缘子模型

文中采用的分析对象是复合绝缘子 FXBW4-35/70,其具体结构参数见表 1。表 1 中: h 为结构高度; L 为爬电距离; H 为绝缘高度; D 为大小伞径; B 为两大伞间距; d 为芯棒直径。绝缘子各电介质的物理参数见表 2。复合绝缘子 FXBW4-35/70 的示意图见图 1。

表 1 35 kV 复合绝缘子结构参数
Table 1 Structure parameters of 35 kV composite insulators

composite insulators					mm
h	L	H	D	B	d
650	1 320	450	148/118	90	16

由于文中主要研究雨滴对复合绝缘子沿面电

表2 电介质物理参数表

Table 2 Physical parameters of dielectric		
材料	电导率/(S·cm ⁻¹)	相对介电常数
空气	0	1.0
硅橡胶	0	3.5
芯棒	0	4.5
金具	38 000 000	40 000.0

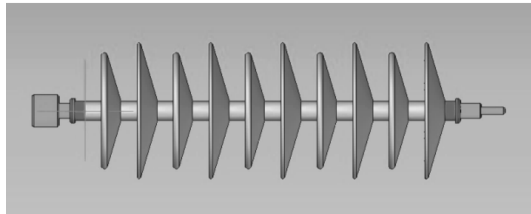


图1 复合绝缘子模型

Fig. 1 Model of composite insulators

场分布的影响,在计算中忽略了杆塔和导线对绝缘子电场的影响,并假设雨滴只分布在伞裙上表面。下面将在上述绝缘子模型基础上,分析雨滴位置、大小以及电导率对伞裙表面电场造成的影响。

2 雨滴位置对绝缘子沿面电场影响

雨滴落在复合绝缘子表面的情况十分复杂,文中仅考虑雨滴落在绝缘子的最上层伞裙表面上。为了研究方便,此处仅考虑雨滴的4种分布情况:沿面直线分布、四周对称均匀分布、一侧不均匀分布以及两侧不均匀分布。此处雨滴的电导率取为 10^{-10} S/m,相对介电常数为81^[1]。

2.1 伞裙上表面没有雨滴分布

通过 ANSYS 软件对上述绝缘子模型进行仿真分析,得到伞裙表面没有雨滴分布时电场分布云图,见图2。

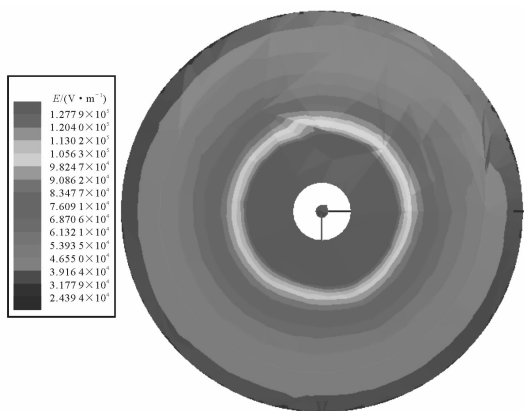


图2 没有雨滴分布时绝缘子表面电场分布云图

Fig. 2 Electric field contours of insulators when there is no raindrop distribution on sheds surface

在伞裙上表面,取两个同心圆,半径依次为10、80 mm,记为内圆、外圆,分析伞裙表面内外圆上电

场分布情况,内外圆上电场分布曲线见图3、4。

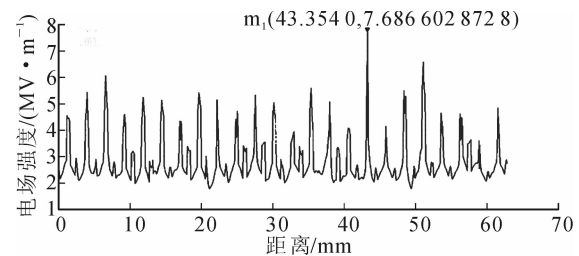


图3 没有雨滴时伞裙表面内圆上电场分布曲线

Fig. 3 Electric field distribution curve of inner circle on sheds surface when there is no raindrop distribution

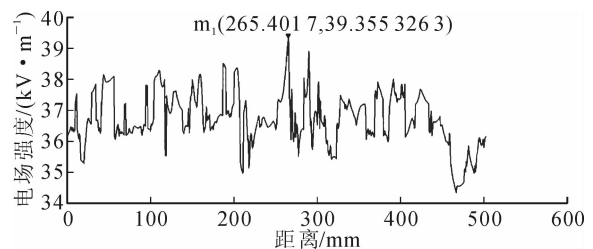


图4 没有雨滴分布时伞裙表面外圆上电场分布曲线

Fig. 4 Electric field distribution curve of outer circle on sheds surface when there is no raindrop distribution

从图2中可以看出,当伞裙上表面没有雨滴分布时,伞裙上表面电场分布有一定的规律性,伞裙表面靠近芯棒处电场强度较大,越靠近边缘,电场强度越小。

从图3、4中可知:当伞裙表面没有雨滴分布时,伞裙表面内圆上 $E_{\max}=7.686\ 602\ 872\ 8$ MV/m,外圆上 $E_{\max}=39.355\ 326\ 3$ kV/m。即使伞裙表面没有雨滴分布时,伞裙表面等径圆周上各处电场强度也不完全相同,这也和实际情况相符。

2.2 雨滴位置对绝缘子电场的影响

通过 ANSYS 软件的仿真分析,可以得到雨滴沿面直线分布、四周对称均匀分布、一侧不均匀分布以及两侧不均匀分布时绝缘子表面电场分布情况,4种情况下伞裙表面电场分布见图5-8。

由图5-8可知,伞裙表面雨滴的存在改变了伞裙表面原有电场的分布,在雨滴附近区域,电场强度总体呈现增强趋势;伞裙表面雨滴所处位置电场强度明显减弱。

为了直观地分析雨滴位置不同对伞裙表面电场造成的影响,和前述分析方法类似,在最上层伞裙表面上取两个同心圆,记为内圆、外圆,分析伞裙表面内外圆上电场分布情况,雨滴沿面直线分布时伞裙表面内外圆上电场分布情况见图9、10。

通过观察图9、10可知:当雨滴沿面直线分布时,伞裙表面内圆上 $E_{\max}=8.486\ 338\ 113\ 6$ MV/m,外圆上 $E_{\max}=40.005\ 486\ 0$ kV/m。对比没有雨滴分布情

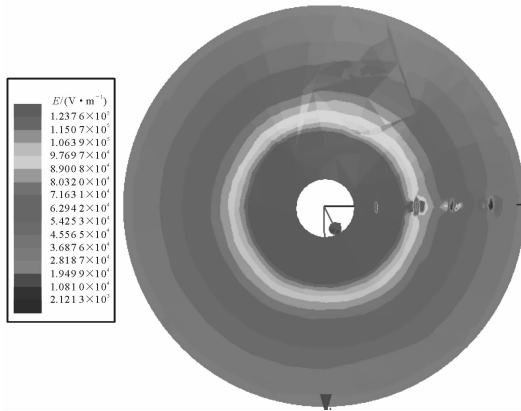


图5 雨滴沿面直线分布时伞裙表面电场分布

Fig. 5 Electric field distribution of sheds surface when distribution of raindrops is linear

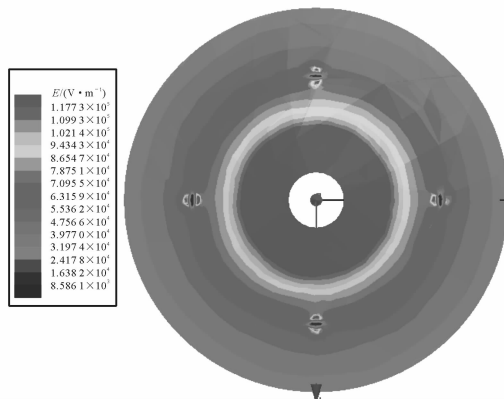


图6 雨滴四周对称均匀分布时伞裙表面电场分布

Fig. 6 Electric field distribution of sheds surface when distribution of raindrops is symmetrical

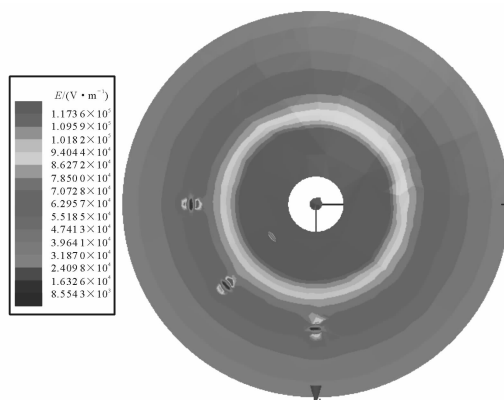


图7 雨滴一侧不均匀分布时伞裙表面电场分布

Fig. 7 Electric field distribution of sheds surface when distribution of raindrops is uneven on one side

况可知:伞裙表面内外圆上最大电场强度均有所增强,且伞裙表面内圆上最大电场强度增幅较大。

利用同样的分析方法,可以得出雨滴沿四周对称均匀分布、一侧不均匀分布以及两侧不均匀分布时,伞裙表面内外圆上电场分布情况,各情况下最

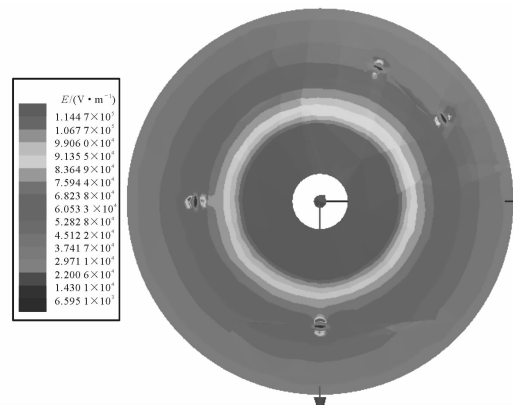


图8 雨滴两侧不均匀分布时伞裙表面电场分布

Fig. 8 Electric field distribution of sheds surface when distribution of raindrops is uneven on both sides

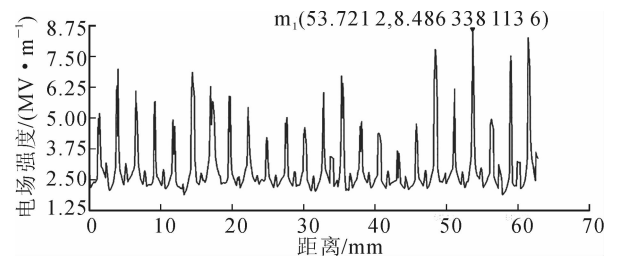


图9 雨滴沿直线分布时伞裙表面内圆上电场分布曲线

Fig. 9 Electric field distribution curve of inner circle on sheds surface when distribution of raindrops is linear

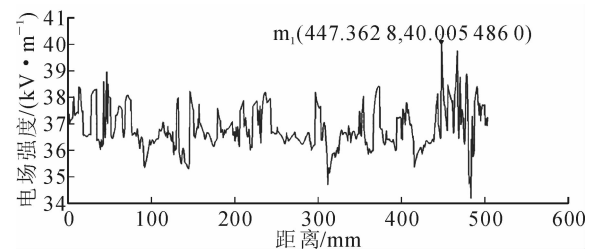


图10 雨滴沿直线分布时伞裙表面外圆上电场分布曲线

Fig. 10 Electric field distribution curve of outer circle on sheds surface when distribution of raindrops is linear

大场强见表3。

表3 雨滴位置不同时最大电场强度统计表

Table 3 The electric field distribution of insulators when the location of the raindrops is different

雨滴分布位置	内圆最大电场强度/ 外圆最大电场强度/ (MV·m ⁻¹) (kV·m ⁻¹)	
	(MV·m ⁻¹)	(kV·m ⁻¹)
直线分布	8.486 338 113 6	40.005 486 0
均匀分布	7.607 306 277 3	40.276 204 9
一侧不均匀分布	11.086 818 665 3	38.982 654 4
两侧不均匀分布	6.708 672 128 9	38.968 234 0

由表3知:当雨滴间分布位置不同时,伞裙表面内圆上最大电场强度会发生改变,当雨滴均匀分布或两侧不均匀分布时,伞裙表面内圆上最大电场

强度均比没有雨滴分布时小,当雨滴直线分布或一侧不均匀分布时,伞裙表面内圆上最大电场强度均比没有雨滴分布时大。4种情况下,伞裙表面外圆上最大电场强度变化幅度都较小。

综上:当雨滴在伞裙表面一侧分布时,雨滴的存在增大了伞裙表面内圆周上最大电场强度;当雨滴在伞裙两侧分布时,雨滴的存在降低了伞裙表面内圆周上最大电场强度。这表明:当雨滴分布在伞裙表面一侧时,对绝缘子的绝缘性能以及电力系统的运行安全影响较大。

3 雨滴大小对绝缘子沿面电场影响

雨滴大小是随机变化的,为了方便研究,该节假定所有雨滴大小一致且属性相同。当雨滴附着在伞裙表面时,改变其直径,观察伞裙表面电场变化情况。取伞裙表面的雨滴直径为2、3、4、5 mm,利用仿真软件可得出各情况下伞裙表面电场分布图,见图11~14。

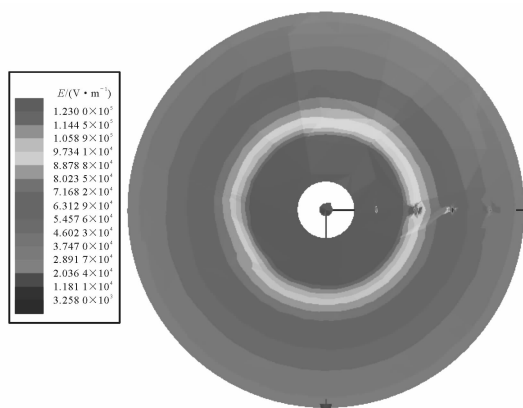


图 11 雨滴直径为 2 mm 时伞裙表面电场分布

Fig. 11 Electric field distribution of sheds surface when the diameter of raindrop is 2 mm

由图11~14可以看出,当雨滴直径发生改变时,伞裙表面电场分布也发生改变。对比图2知,在伞裙表面雨滴附近区域,电场强度明显增强。同样地,在最上层伞裙表面上取两个同心圆,记为内圆、外圆,分析伞裙表面内外圆上电场分布情况,雨滴直径为2 mm时伞裙表面内外圆上电场分布情况见图15、16。

由图15、16中可知:当雨滴直径为2 mm时,内圆上 $E_{\max}=7.539\ 401\ 567\ 1\ \text{MV/m}$,外圆上 $E_{\max}=38.539\ 915\ 3\ \text{kV/m}$ 。对比伞裙表面没有雨滴分布情况可知:伞裙表面内外圆上最大电场强度均有所减弱,且伞裙表面内圆上最大电场强度降幅较大。

利用同样的方法,可以得出,雨滴直径为3、4、5 mm时,伞裙表面内外圆上电场分布情况,各情况

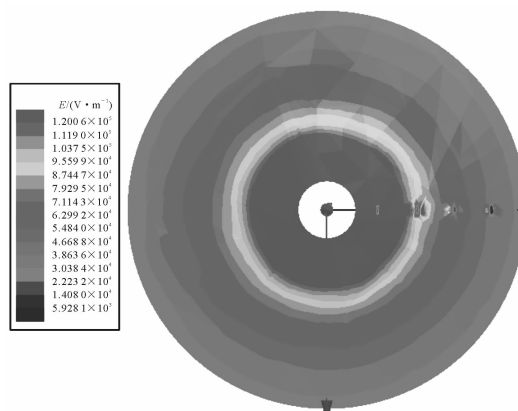


图 12 雨滴直径为 3 mm 时伞裙表面电场分布

Fig. 12 Electric field distribution of sheds surface when the diameter of raindrop is 3 mm

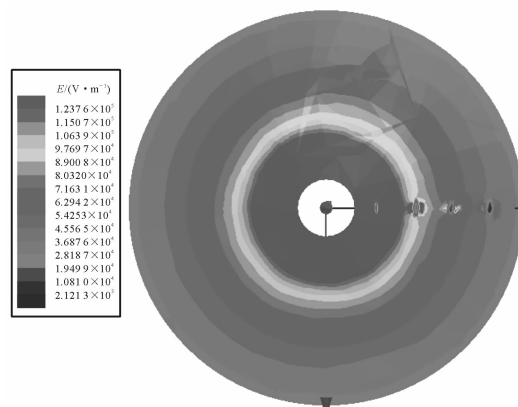


图 13 雨滴直径为 4 mm 时伞裙表面电场分布

Fig. 13 Electric field distribution of sheds surface when the diameter of raindrop is 4 mm

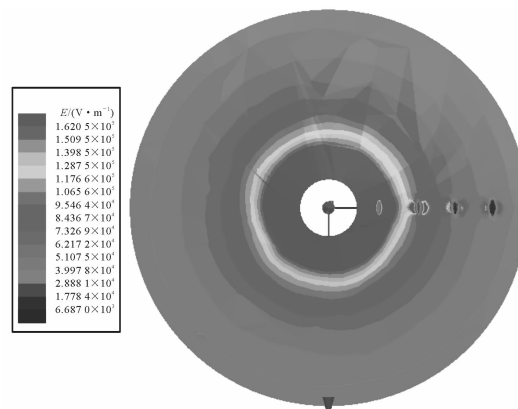


图 14 雨滴直径为 5 mm 时伞裙表面电场分布

Fig. 14 Electric field distribution of sheds surface when the diameter of raindrop is 5 mm

下最大场强见表4。

由表4知:随着雨滴直径的增大,伞裙表面内、外圆上的最大电场强度均呈现先增大后减小的趋势。当雨滴直径在2 mm时,雨滴的存在减弱了伞裙表面内圆上的最大电场强度。当雨滴直径为3、4、

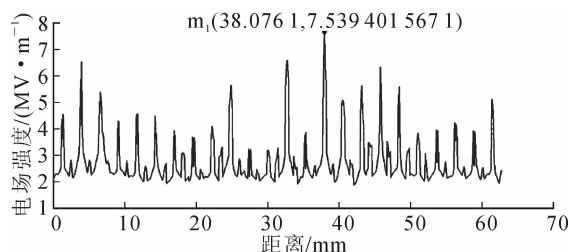


图 15 雨滴直径为 2 mm 时伞裙表面内圆上电场分布曲线
Fig. 15 Electric field distribution curve of inner circle on sheds surface when the diameter of raindrop is 2 mm

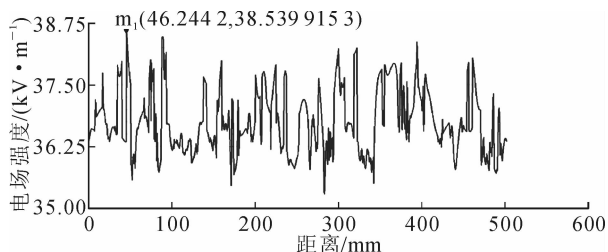


图 16 雨滴直径为 2 mm 时伞裙表面外圆上电场分布曲线
Fig. 16 Electric field distribution curve of outer circle on sheds surface when the diameter of raindrop is 2 mm

表 4 雨滴直径不同时最大电场强度统计表

Table 4 The electric field distribution of insulators when the diameter of raindrop is different

雨滴直径/mm	内圆最大电场强度/ (MV·m ⁻¹)	外圆最大电场强度/ (kV·m ⁻¹)
2	7.539 401 567 1	38.539 915 3
3	9.160 905 648 2	39.401 822 4
4	8.486 338 113 6	39.987 470 3
5	7.856 696 155 8	39.080 772 0

5 mm 时, 雨滴的存在增强了伞裙表面内圆上的最大电场强度, 且当雨滴直径为 3 mm 时, 对伞裙表面内圆上的最大电场强度影响最明显。雨滴直径的改变对伞裙表面外圆上最大电场强度影响不明显。

综上: 雨滴直径的变化将直接影响伞裙表面电场的分布。在该节所讨论的 4 种情况中, 雨滴直径为 3 mm 时, 对伞裙表面电场影响最大。由于该节只选取 4 种直径雨滴分析, 并不能断定 3 mm 雨滴即为最坏情况。

4 雨滴电导率对绝缘子沿面电场影响

在准静态电磁场中, 污秽雨滴的电导率会随着各种成分比例的不同而发生变化, 而相对介电常数变化很小, 在该节中, 雨滴的相对介电常数仍取为 81, 电导率在 0.031 S/m 到 0.99 S/m^[12] 之间变化。

假定雨滴数一定, 电导率取值依次取为 10^{-10} (纯净雨滴)、0.05、0.4、0.95 S/m。首先分析电导率为 0.95 S/m 的雨滴对伞裙表面电场的影响, 伞裙表面

电场分布情况见图 17。

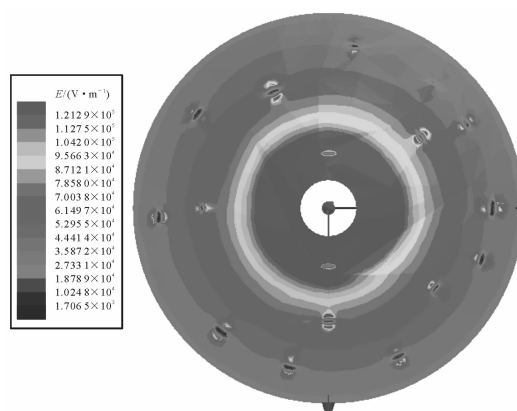


图 17 雨滴电导率为 0.95 S/m 时伞裙表面电场分布

Fig. 17 Electric field distribution of sheds surface when the conductivity of raindrops is 0.95 S/m

由图 17 可以看出, 当伞裙表面有雨滴分布时, 雨滴附近电场发生明显改变。同样地, 在最上层伞裙表面上取两个同心圆, 记为内圆、外圆, 分析伞裙表面内外圆上电场分布情况, 雨滴电导率为 0.95 S/m 时伞裙表面内外圆上电场分布情况见图 18、19。

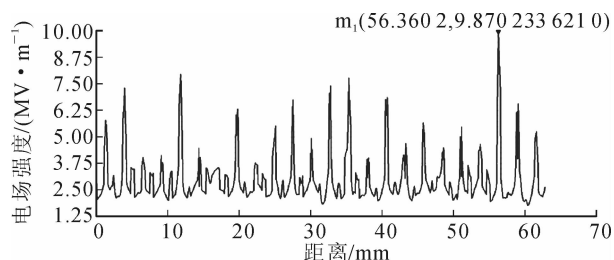


图 18 雨滴电导率为 0.95 S/m 时伞裙表面内圆上电场分布曲线

Fig. 18 Electric field distribution curve of inner circle on sheds surface when the conductivity of raindrops is 0.95 S/m

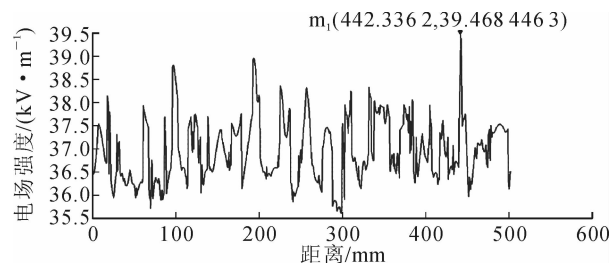


图 19 雨滴电导率为 0.95 S/m 时伞裙表面外圆上电场分布曲线

Fig. 19 Electric field distribution curve of outer circle on sheds surface when the conductivity of raindrops is 0.95 S/m

由图 18、19 可知: 当雨滴电导率为 0.95 S/m 时, 伞裙表面内圆上 $E_{\max}=9.870\ 233\ 621\ 0$ MV/m, 外圆上 $E_{\max}=39.468\ 446\ 3$ kV/m。

利用同样的分析方法, 可以得出雨滴电导率为

10^{-10} 、0.05、0.4 S/m 时,伞裙表面内外圆上电场分布情况,各情况下最大场强统计值见表5。

表5 雨滴电导率不同时最大电场强度统计表

Table 5 The electric field distribution of insulators when the conductivity of raindrops is different

雨滴电导率/(S·m ⁻¹)	内圆上最大电场强度/(MV·m ⁻¹)	外圆上最大电场强度/(kV·m ⁻¹)
10.00^{-10}	10 177 936.522 5	39.388 126 2
0.05	10.177 936 522 5	39.468 446 3
0.40	10.012 604 049 5	39.468 446 3
0.95	9.870 233 621 0	39.468 446 3

分析表5可知:雨滴电导率的变化对伞裙表面内外圆上最大电场强度影响很小,但这并不意味着污秽雨滴对绝缘子以及电力系统没有危害,因为污秽雨滴水分挥发后,会在伞裙表面形成很薄的污秽层,污秽层的存在是绝缘子发生污闪^[13-16]的重要外界条件之一。因此,污秽雨滴可能导致绝缘子发生污闪事故,这将严重威胁到电力系统的运行安全。

5 结论

笔者利用有限元分析软件 ANSYS,从微观角度阐述了雨滴的位置、大小以及电导率等对伞裙表面电场的影响规律,具体得出以下结论:

1)当雨滴在伞裙表面一侧分布时,会增大伞裙表面内侧圆周上最大电场强度,当雨滴在伞裙两侧分布时,会降低伞裙表面内侧圆周上最大电场强度。这表明雨滴分布在一侧时,对绝缘护套的绝缘性能影响大。

2)雨滴直径的不同会对伞裙表面电场造成影响,在文中所分析的4种雨滴直径中,雨滴直径为3 mm时,对伞裙表面电场影响最大。由于文中只选取了4种雨滴直径,因此不能断定雨滴直径为3 mm时即为最危险情况。

3)雨滴电导率的变化对伞裙表面电场影响很小,但这并不意味着污秽雨滴没有危害,因为污秽雨滴所形成的污秽层是引起绝缘子发生污闪事故的重要外因之一。

4)相关改进措施^[17-24]:①采用电气性能强、憎水性能好的材料作为绝缘子的伞裙;②加大伞裙的倾斜角度;③加大伞裙上表面的光滑程度。

参考文献:

[1] 吴广宁,张冠军,刘刚.高电压技术[M].北京:机械工业出版社,2007.

WU Guangning,ZHANG Guanjun,LIU Gang. High voltage engineering[M]. Beijing:China Machine Press,2007.

[2] 冯慈璋,马西奎.工程电磁场导论[M].北京:高等教育出版社,2000.

FENG Cizhang,MA Xikui. Introduction to electromagnetic fields project[M]. Beijing:Higher Education Press,2000.

[3] 陈国义.关于雾闪和湿闪的原因分析[J].高压电器,2002,4(2):50-51.

CHEN Guoyi. Analysis of the reason for fog-flashover and humidity flashover[J]. High Voltage Apparatus,2002,4(2):50-51.

[4] EL-KISHKY H,GORUR R S. Electric field computation on an insulating surface with discrete water droplets[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,1996,3(3):450-456.

[5] CALVA P A,ESPINO F C. Effect of the humidity in the ionic mobility in reduced air-density[C]//1998 IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Atlanta,USA:IEEE,1998:508-511.

[6] 陈澜,陈方东,赵雪松,等.大雨环境下雨滴对线路电晕特性的影响[J].高电压技术,2012,38(11):2863-2868.

CHEN Lan,CHEN Fangdong,ZHAO Xuesong,et al. Influence of rain drops on corona discharge in AC transmission lines under high rainy condition[J]. High Voltage Engineering,2012,38(11):2863-2868.

[7] 张星海.雨水对外绝缘特性的影响[J].高电压技术,1998,24(2):63-65.

ZHANG Xinghai. The influence of rain on the external insulation performance[J]. High Voltage Engineering,1998,24(2):63-65.

[8] 宋云海,刘刚,陈锡阳.降雨冲刷对绝缘子表面污层电导率及动态积污影响的研究[J].高压电器,2013,39(11):43-48.

SONG Yunhai,LIU Gang,CHEN Xiyang. Influence of rain flushing on conductivity of insulator surface pollution layer and dynamic contamination accumulation[J]. High Voltage Apparatus,2013,39(11):43-48.

[9] 陈昌龙,王黎明.电力机车车顶绝缘子电场计算[J].高压电器,2011,47(1):53-57.

CHEN Changlong,WANG Liming. Electric field calculation for electric locomotive roof insulator[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(1):53-57.

[10] 王仲奕,王琪,陈青.湿润复合绝缘子表面的电场分析[J].高压电器,2010,46(3):53-58.

WANG Zhongyi,WANG Qi,CHEN Qing. Calculation of AC electric field distributions along polluted polymer insulators[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(3):53-58.

[11] 杨坤松.动车组车顶绝缘子湿污和内部缺陷条件下电场分布研究[D].成都:西南交通大学,2014:17-18.

YANG Kunsong. Research on electric field distribution of

- roof insulator on emu under wetting contamination and internal defects conditions[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2014:17-18.
- [12] 李明翔. 高速动车组车顶绝缘子积污特性与电场分布研究[D]. 成都:西南交通大学, 2013:17-18.
- LI Mingxiang. Contamination characteristics and electric field distribution of roof insulators on high speed train[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2013:17-18.
- [13] 张海兵, 田 甜, 文 旭. 污湿环境下复合绝缘子电场分布的研究[J]. 广东工业大学学报, 2012, 29(2):58-62.
- ZHANG Haibing, TIAN Tian, WEN Xu. A study of electric fields around composite insulators under polluted and wet conditions[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2012, 29(2):58-62.
- [14] 赵林杰. 硅橡胶复合绝缘子憎水性与污闪特性研究[D]. 北京:华北电力大学, 2008:80-85.
- ZHAO Linjie. Study on the hydrophobicity and pollution flashover properties of silicone rubber composite insulators [D]. Beijing:North China Electric Power University, 2008:80-85.
- [15] 王 彬, 梁曦东, 张轶博, 等. 交、直流电压下复合绝缘子和瓷绝缘子的自然积污试验[J]. 高电压技术, 2009, 35(9):2322-2328.
- WANG Bin, LIANG Xidong, ZHANG Yibo, et al. Natural pollution test of composite and porcelain insulators under AC and DC stress[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9):2322-2328.
- [16] 张福增, 赵 锋, 王黎明, 等. 高海拔地区复合支柱绝缘子的污雨闪特性[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1):14-19.
- ZHANG Fuzeng, ZHAO Feng, WANG Liming, et al. Wet flashover characteristic of composite post insulators at high altitudes[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1):14-19.
- [17] 黎卫国, 郝艳捧, 熊国锟, 等. 覆冰复合绝缘子电位分布有限元仿真[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12):29-35.
- LI Weiguo, HAO Yanpeng, XIONG Guokun, et al. Simulation and analysis of potential distribution of iced composite insulator based on finite element method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12):29-35.
- [18] 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.
- [19] 危 鹏, 何远华, 胡文岐. 接触角法测绝缘子表面湿润性的对比和分析[J]. 电瓷避雷器, 2012(2):6-10.
- WEI Peng, HE Yuanhua, HU Wenqi. Contrast and analysis of contact angle method for measuring wettability of insulator surfaces[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(2):6-10.
- [20] 叶晓君, 何 维, 李恒真, 等. 低风速条件下污秽颗粒在电力外绝缘近表面的动力模型研究[J]. 电瓷避雷器, 2012(6):19-25.
- YE Xiaojun, HE Wei, LI Hengzhen, et al. Study on a dynamic model of pollution particles on the near surface of electric external insulation under low wind speed condition [J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(6):19-25.
- [21] 黄成才, 李永刚. 基于复合绝缘子污闪模型的闪络特性分析[J]. 电瓷避雷器, 2014(4):31-35.
- HUANG Chengcai, LI Yonggang. Analysis on flashover characteristics based on pollution flashover model of composite insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(4):31-35.
- [22] 杜思思, 张雪峰, 杨 军. 复合绝缘子不同憎水性下的电场分布研究[J]. 电瓷避雷器, 2014(5):11-16.
- DU Sisi, ZHANG Xuefeng, YANG Jun. Study on electric field distribution of composite insulator under different hydrophobicity levels[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(5):11-16.
- [23] 刘守豹, 阮江军, 余世峰, 等. 特高压复合绝缘子有限元模型的简化[J]. 高压电器, 2009, 45(2):4-6.
- LIU Shoubao, RUAN Jiangjun, YU Shifeng, et al. Simplified finite element model for ultra high voltage composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(2):4-6.
- [24] 江 汛, 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 insulators[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(5):340-342.
- 汪 祥(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统分析相关方面研究。
- 胡志坚(1969—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事互联电力系统鲁棒协调控制、输电线路参数带电测量、新能源与分布式电力系统等方面的研究工作。