

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.04.012

覆冰水电导率对地线绝缘子覆冰闪络影响的有限元仿真分析

雷敏, 李丹, 孔令倩, 邓昭俊

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 电力网络常会因覆冰、雷电等自然灾害而引起线路跳闸事故的发生, 给电力系统造成巨大的经济损失。为了提高线路融冰效率、改善线路覆冰现象, 研究了覆冰水电导率对地线绝缘子覆冰闪络电压的影响, 并且通过 Ansoft 有限元软件对 RCSE100C-2 型绝缘子进行了仿真分析。研究表明, 覆冰水电导率会影响地线绝缘子的覆冰闪络电压, 电导率越大, 闪络电压越低; 相同电导率条件下, 干闪络电压高于湿闪络电压。

关键词: 地线绝缘子; 覆冰水电导率; 闪络电压; 有限元分析

中图分类号: TM752+.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)04-0056-05

Finite Element Analysis of the Effect of Covered Water Conductivity on the Ground Insulator Icing Flashover

Lei Min, Li Dan, Kong Lingqian, Deng Zhaojun

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Icing of power lines, lightning and other natural disasters often bring about line tripping accidents and cause huge economic losses to the power system. In order to increase the ice melting efficiency of power lines and improve line icing phenomena, studied the effect of covered water conductivity to ground insulator icing flashover voltage, and simulated and analyzed insulator RCSE100C-2 by finite element software Ansoft. The results show that covered water conductivity affects ground insulator icing flashover voltage, the greater the conductivity, the lower the flashover voltage is; Under the same conductivity, dry flashover voltage is higher than wet flashover voltage.

Keywords: insulator ground; covered water conductivity; flashover voltage; finite element analysis

0 引言

高压电力线路常被建于海拔高、人烟稀少的山坡上。我国南方地区冬季气候湿冷, 高压电力线路因冻结而导致电力系统故障的现象时有发生。

对高压输电线路绝缘子覆冰危害最大的是雨淞。在雨淞条件下, 持续降落在输电线路绝缘子表面的

过冷却水会逐渐冻结, 且冻结的冷却水易形成冰凌, 严重时桥接、甚至包覆绝缘子^[1]。当环境温度回升到 0℃ 以上时, 输电线路绝缘子表面的冰层融化, 会因出现的水膜而形成导电通路, 导致在空气中发生闪络现象^[2], 最终引发线路跳闸事故, 给电力系统造成巨大的经济损失。

针对这一现象, 许多学者在融冰领域进行了大

收稿日期: 2015-06-20

基金项目: 湖南省研究生科研创新基金资助项目 (CX2015B563)

作者简介: 雷敏 (1973-), 女, 湖南株洲人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要从事复杂网络理论及其在电网稳定性分析中的应用研究, E-mail: leimin0606@hotmail.com

量的理论研究,其中部分学者对覆冰电导率做了分析,主要包括:

1) 冰的物理特性对绝缘子冰闪的影响。研究者认为,在冻结时,冰层中的导电离子以及水中的杂质会向其外表面迁移,使得其电导率提高^[3-6]。

2) 水膜电导率对于电场分布的影响。研究结果表明,水膜电导率会随着覆冰长度的增加而增大,这是因为水膜厚度的增加会进一步缩短空气间隙,导致冰凌尖端场强增大,水膜末端存在水滴会对绝缘子沿面电场分布畸变的影响变大^[7]。

此外,国内已建立了重庆大学国家重点实验室、国网湖南省防灾减灾中心以及小沙江户外试验场,以方便其工作人员在人工模拟气候条件下对绝缘子进行覆冰试验,并已取得了大量的研究成果:融冰滴水是导致未桥接冰凌较桥接冰柱更容易发生闪络的一个重要因素;覆冰条件下绝缘子串的闪络电压与绝缘子串长呈线性关系^[8];采用绝缘子表面固体涂层防污染法测试设计的防冰型复合绝缘子,能达到提高闪络电压的作用^[9]。本文拟结合已有研究成果,对地线绝缘子覆冰水电导率与闪络电压之间的关系进行研究,以期为后续融冰改造提供一定的理论参考。

1 有限元求解

1.1 位函数及微分方程

在分析和计算电磁场问题时,为了求出场量(E 或 B)与场源(ρ 或 j)之间的关系,常会引入位函数(或称势函数)作为辅助量,以减少未知数的个数,使得问题简化,同时也使物理概念更加清楚^[10]。在无旋场(即旋度为零的场)中,可以采用标量位函数,而在有旋场中,则必须采用矢量位函数而不能用标量位函数。静电场、电源以外区域的恒定电流场以及电流密度为零的空间范围内的磁场,都是无旋场,因此可引入标量电位 φ 或标量磁位 φ_m 。其与场强的关系可用如下公式表示:

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

$$\text{或 } E = -\nabla\varphi_m. \quad (2)$$

式(1)和式(2)中的负号,表示电位梯度与电场强度方向相反,从矢量分析可知,任何标量函数的梯度旋度恒等于零,位函数总是满足无旋场的条件。对于电场而言,利用式(1)可以确定电位函数与电荷密度之间的关系,从而可以根据电荷分布找出相应的位函数,再由它求出电场强度。对式(1)两端取散度可得到式(3):

$$\nabla E = -\Delta\varphi. \quad (3)$$

利用静电学的高斯定律,可得到式(4),这就是静态的泊松方程。

$$\Delta\varphi = -\rho/\varepsilon. \quad (4)$$

式(4)中, ε 为介质的介电常数,在没有自由电荷区域, $\rho=0$,此时,式(4)变为式(5),该特殊情况下的泊松方程称为拉普拉斯方程。

$$\Delta\varphi = 0. \quad (5)$$

式(4)和式(5)合称电位场微分方程。

在无电流区域,标量磁位恒满足拉普拉斯方程。解出 φ_m 后,即可求出磁场强度。

对于有电流区域,因 $\nabla \times H = j$,属于有旋场,因此必须引入矢量磁位 A ,一般为空间坐标和时间的函数,包含3个空间分量。在国际单位制中, A 的单位是 Wb/m ;自采用矢量磁化之后,应使麦克斯韦方程组仍旧能够得到满足,只要使 A 与 B 之间满足式(6)便能符合要求。

$$B = \nabla \times A. \quad (6)$$

对于没有电流存在的区域,矢量磁位 A 同样能够应用。求解具体磁场问题时,根据电流分布决定矢量磁位 A ,再用式(6)求出 B ,即可得解。

1.2 求解方程

求解具体磁场问题时,根据电流分布决定矢量磁位 A ,再用式(6)求出 B ,即得到解。Ansoft中常用的求解方程有:

1) 二维、三维静电场求解器所满足的泊松方程,如式(4)所示。

2) 二维稳恒电场求解器所满足的拉普拉斯方程,如式(5)所示。

3) 二维交变电场求解器所满足的复数拉普拉斯方程,如式(7)所示;

$$\nabla \times [(\sigma + j\omega\varepsilon)\nabla\varphi] = 0. \quad (7)$$

4) 二维静磁场求解器所满足的非齐次标量波动方程,如式(8)所示;

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = j. \quad (8)$$

5) 二维涡流场求解器所满足的波动方程,如式(9)所示;

$$\begin{cases} \nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times A) = (-\nabla\varphi - j\omega A)(\sigma + j\omega\varepsilon), \\ I_T = \int_{\Omega} j \times d\Omega = \int_{\Omega} (-\nabla\varphi - j\omega A)(\sigma + j\omega\varepsilon) d\omega. \end{cases} \quad (9)$$

6) 二维轴向磁场求解器所满足的齐次波动方程,如式(10)所示;

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\sigma + j\omega\varepsilon} \nabla \times H \right) + j\omega\mu H = 0. \quad (10)$$

7) 三维静磁场和涡流场求解器所满足的齐次波

动方程，如式(11)所示。

$$\begin{cases} \nabla \times \left(\frac{1}{\sigma + j\omega z} \nabla \times H \right) + j\omega \mu H = 0, \\ \nabla \times (\mu \nabla \varphi) = 0. \end{cases} \quad (11)$$

因此，可以对各个不同场域的微分方程进行数值求解。如可以采用有限元法解得磁势和电势的场分布值，然后经过转化并处理，即可得到电磁场的各个物理量。

2 仿真建模

在本研究中，选用 Ansoft 有限元分析软件对 RCSE100C-2型绝缘子进行仿真建模。仿真计算中，采用气球边界条件，在指定区域建立仿真模型，所设定的材料成分以及参数条件如表1所示。

表1 仿真参数设计

Table 1 Simulation parameter design

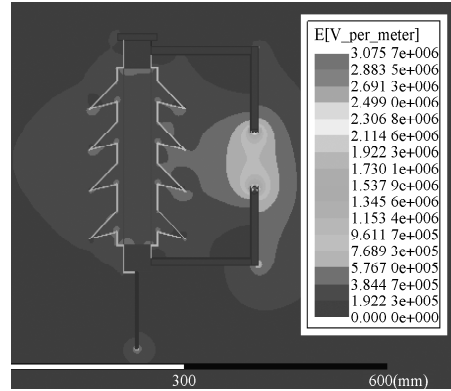
材料	相对介电常数	电导率 / (S · m ⁻¹)
钢化玻璃	5.5	0
橡胶	3	0
绝缘套	4	0
铁	1	10 300 000
铜	1	58 000 000
空气	1.000 6	0
冰	5	0

设定模型的激励源以及网格分布，在网格划分规则中，设定最大边长为 2 mm。然后定义求解，按照 Ansoft 软件自身默认的设置，最多求解 10 次后可自动完成求解，收敛目标采用软件默认的 1，即误差 不大于 1% 后软件自动完成求解。至此，模型可进入场强电位的计算阶段。

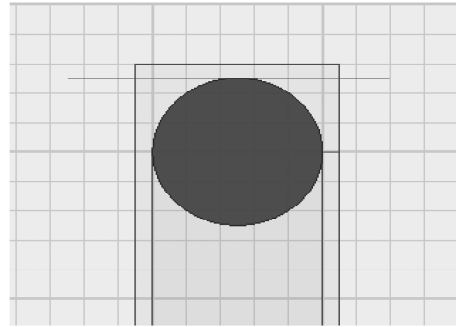
在仿真模型建立在空气条件下，其场强分布云图如图 1a 所示。由图中右侧的场强数值和彩色对照表可以看出，绝缘子周围的场强基本上大于 0，且在并联间隙两端的场强较大。其中，最大场强分布在下端并联间隙的尖端处，约为 30.7 kV/cm，而其他覆冰处场强大小介于 0 ~ 15 kV/cm 之间。

由图 1a 可以得知，RCSE100C-2 型绝缘子间隙金属两端的场强最大，且在下端间隙表面的场强最高。在最大场强处设定场强测试线（如图 1b 所示，测试线位于正切间隙表面，其长度为 20 mm），然后以求解器对其进行计算。

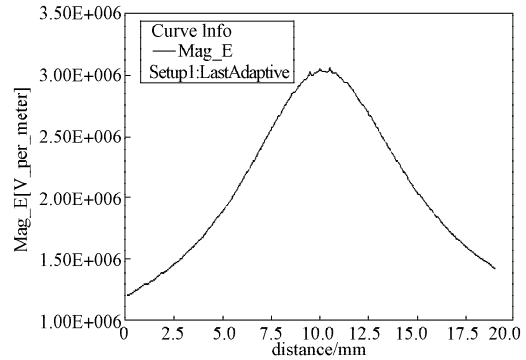
测试线场强值如图 1c 所示。由图可知，在测试线 10 mm 处左右两侧，场强均有小幅度提升。可见，在并联间隙的两个尖端场强较大，最大约 30.3 kV/cm，其值与场强分布云图最大场强相近，越远离尖端，场强越低，仿真模型在此电压下被击穿。



a) 场强分布云图



b) 场强测试线



c) 场强值

图1 仿真模型场强测试

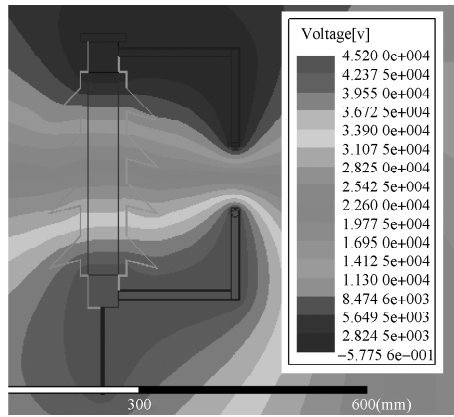
Fig. 1 Simulation field strength test

3 数据分析

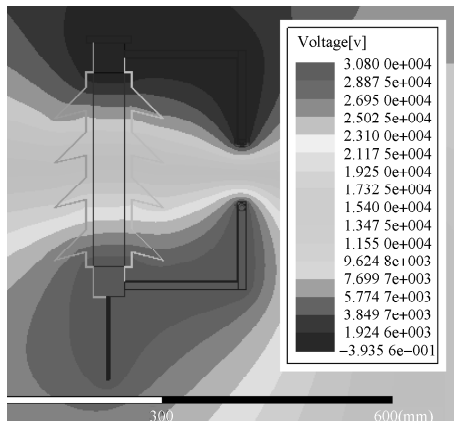
在不同覆冰水电导率下，计算在干闪络和湿闪络覆冰状态下电场强度超过 30 kV/cm 的闪络电压，在其他条件相同的情况下，设定覆冰水电导率分别为 50, 100, 150 μS/cm。

3.1 干闪络电压

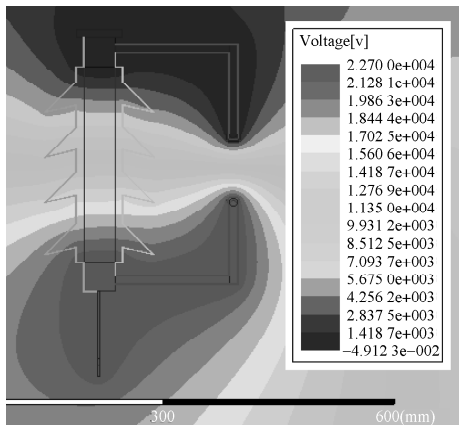
冰层未融化时，计算绝缘子的干闪络电压，根据仿真结果，不同覆冰水电导率下的干闪络电压如图 2 所示。当覆冰水电导率为 50 μS/cm 时，所得仿真计算结果如图 2a 所示，可知此时的闪络电压为 45.2 kV；当覆冰水电导率为 100 μS/cm 时，所得仿真计算结果如图 2b 所示，可知此时的闪络电压为 30.8 kV；当覆冰水电导率为 150 μS/cm 时，所得仿真计算结果如图 2c 所示，可知此时的闪络电压为 22.7 kV。



a) 50 μS/cm覆冰水电导率



b) 100 μS/cm覆冰水电导率



c) 150 μS/cm覆冰水电导率

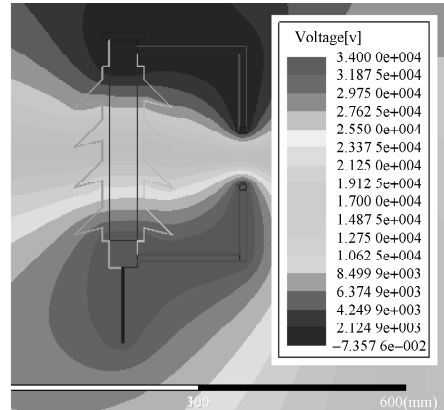
图2 干闪络电压计算云图

Fig. 2 Dry flashover voltage calculation chart

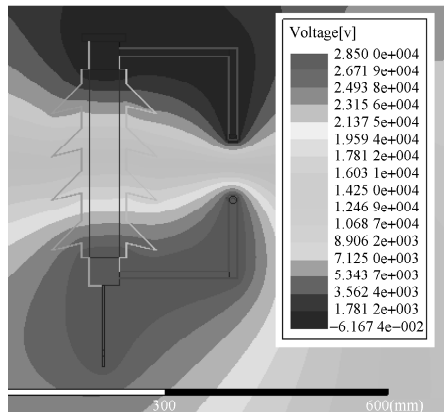
3.2 湿闪络电压

仿真模拟室外现场环境，以冰层表面开始融化，绝缘子表面出现水珠时的闪络电压为湿闪络电压。根据仿真结果，不同覆冰水电导率下的湿闪络电压如图3所示。当覆冰水电导率为50 μS/cm时，所得仿真计算结果如图3a所示，可知此时的闪络电压为34.0 kV；当覆冰水电导率为100 μS/cm时，所得仿真计算结果如图3b所示，可知此时的闪络电压为28.5 kV；当覆冰水电导率为150 μS/cm时，所得

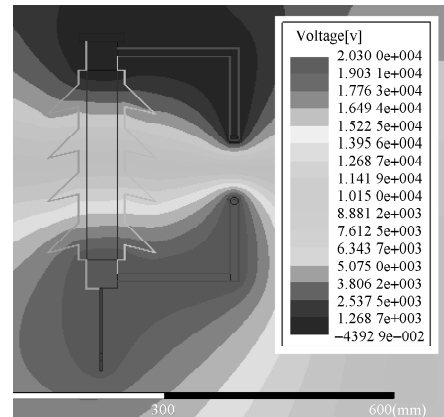
仿真计算结果如图3c所示，可知此时的闪络电压为20.3kV。



a) 50 μS/cm覆冰水电导率



b) 100 μS/cm覆冰水电导率



c) 150 μS/cm覆冰水电导率

图3 湿闪络电压计算云图

Fig. 3 Wet flashover voltage calculation chart

3.3 数据分析

绝缘子闪络电压的仿真数据对比如图4所示。由图4可知，地线绝缘子覆冰闪络电压与覆冰水电导率有关，同一模型和外界条件下，电导率越大，闪络电压越低；相同覆冰水电导率条件下，干闪络电压高于湿闪络电压，以50 μS/cm电导率为例，干闪络电压为45.2 kV，湿闪络电压为34.0 kV。

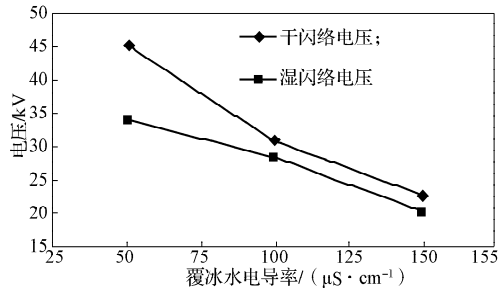


图4 闪络电压仿真数据

Fig. 4 Simulation data of flashover voltage

4 结论

根据电网线路融冰需要,提出了以覆冰水电导率对地线绝缘子覆冰闪络电压进行研究,建立了并联间隙地线绝缘子覆冰闪络的仿真模型,通过对模型进行仿真分析,得到如下结论:

1) 通过场强击穿的理论值可确定模型闪络时的电压值,计算结果表明,在两端间隙表面最易发生闪络,特别是在间隙的尖端,场强最大;

2) 闪络电压受覆冰水电导率的影响,在设定的3种仿真参数中,闪络电压均不相同,而且呈规律性变化,即并联间隙地线绝缘子的覆冰水电导率越大,闪络电压越低;

由仿真及计算结果可见,在户外现场对导线融冰时,需要考虑并联间隙装置的物理特性,以及覆冰水电导率的大小,以便地线融冰工作安全、有效地进行。

参考文献:

- [1] 蒋兴良,卢杰,苑吉河,等.输电线路绝缘子串防冰闪措施研究[J].电网技术,2008,32(14):19-24.
Jiang Xingliang, Lu Jie, Yuan Jihe, et al. Study on Measures to Prevent Icing Flashover of Insulator Strings[J]. Power System Technology, 2008, 32(14): 19-24.
- [2] 黄道春,胡毅,万启发,等.绝缘子冰闪特性和提高冰闪电压措施研究综述[J].电网技术,2010,34(5):46-54.
Huang Daochun, Hu Yi, Wan Qifa, et al. Review on Flashover Characteristics and Measures to Improve Flashover Voltage of the Ice Coated Insulators[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 46-54.
- [3] 姚涛,胡毅,鄢雄,等.超特高压输变电设备的覆冰试验技术[J].高电压技术,2009,35(3):574-578.
Yao Tao, Hu Yi, Wu Xiong, et al. Icing Test Techniques of EHV and UHV Transmission and Transformation Equipment[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 574-578.
- [4] 巢亚锋,蒋兴良,张志劲,等.覆冰水在自然环境下冻结过程中电解质晶释效应实验与分析[J].电网技术,2013,37(2):539-544.
Chao Yafeng, Jiang Xingliang, Zhang Zhijin, et al. Experiments and Analysis of Crystallization Effect During Transition of Freezing Water from Liquid Phase to Solid Phase in Natural Environment[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 539-544.
- [5] 雷敏,杨万里,李丹,等.分布式电源并网对配电网的影响[J].湖南工业大学学报,2014,28(5):68-73.
Lei Min, Yang Wanli, Li Dan, et al. Effect of Distributed Generation Grid-Connection on Distribution System[J]. Hunan University of Technology, 2014, 28(5): 68-73.
- [6] 黄道春,胡毅,万启发,等.绝缘子冰闪特性和提高冰闪电压措施研究综述[J].电网技术,2010,34(5):46-54.
Huang Daochun, Hu Yi, Wan Qifa, et al. Review on Flashover Characteristics and Measures to Improve Flashover Voltage of the Ice-Coated Insulators[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 46-54.
- [7] 廖嘉骏,阳林,郝艳捧.融冰期110kV覆冰复合绝缘子电场仿真研究[J].高压电器,2015,51(3):47-54.
Liao Jiajun, Yang Lin, Hao Yanpeng. Simulation of Electric Field for 110 kV Iced Composite Insulator in Melting Period [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3): 47-54.
- [8] 蒋兴良,董冰冰,张志劲,等.绝缘子覆冰闪络研究进展[J].高电压技术,2014,40(2):317-335.
Jiang Xingliang, Dong Bingbing, Zhang Zhijin, et al. Research and Development on Flashover of Ice-Covered Insulators[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 317-335.
- [9] 黄长学,蒋兴良,杜忠东,等.110kV防冰闪型复合绝缘子的冰闪特性[J].高电压技术,2009,35(10):2540-2544.
Huang Changxue, Jiang Xingliang, Du Zhongdong, et al. Ice Flashover Characteristics of 110 kV Anti-Icing Composite Insulator[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2540-2544.
- [10] 赵博,张红亮. ANSOFT12在工程电磁场中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010:14-45.
Zhao Bo, Zhang Hongliang. ANSOFT12 Application in Engineering Electromagnetic Fields[M]. Beijing: China Water Power Press, 2010: 14-45.

(责任编辑:廖友媛)