

重覆冰条件下防冰防雷绝缘子电场仿真与伞裙优化

陆佳政, 谢鹏康, 方 针, 蒋正龙

(国网湖南省电力公司防灾减灾中心 电网输变电设备防灾减灾国家重点实验室, 湖南 长沙 410007)

摘要:为研究防冰防雷绝缘子在重覆冰条件下的电场分布特性,进而优化防冰防雷绝缘子的伞裙结构,缓解其在覆冰状态下的电场畸变,建立了220 kV防冰防雷绝缘子的有限元仿真模型,计算得到了不同伞裙结构的绝缘子在清洁和覆冰条件下的电场分布,根据仿真结果对伞裙结构进行了优化,并对比了伞裙优化前后防冰防雷绝缘子的电场分布特性。结果表明:清洁状态下,伞裙结构对绝缘子电场分布影响很小;覆冰状态下,超大伞裙数目为5时可以更加有效地缓解重度覆冰对空间电场产生的畸变。优化后的伞裙结构可以使绝缘子在覆冰条件下的空间电场畸变有所缓解,起到提高冰闪电压的作用。

关键词:绝缘子;覆冰;电场分布;伞裙优化;闪络电压;有限元仿真模型

中图分类号:TM 85

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.03.027

0 引言

防冰防雷绝缘子采用绝缘子和避雷器串联的结构,故而同时拥有避雷器和绝缘子的功能;采用超大伞裙的结构,可以延缓覆冰状态下伞裙的冰凌桥接过程。防冰防雷绝缘子因其具有安装简单、成本低廉等优点,在多雷重冰地区得到了广泛的应用^[1-2]。实际运行经验表明,覆冰会使绝缘子周围的电场产生畸变,严重时甚至会导致绝缘子覆冰闪络事故的发生,威胁到电力系统的正常稳定运行^[3-7]。因此,分析防冰防雷绝缘子在重覆冰条件下的电场分布特性,研究其伞裙结构优化方法,对增强防冰防雷绝缘子的可靠性和稳定性有着十分重要的意义。

文献[1-2,8]分析了防冰防雷绝缘子的电场分布特性并开展了相关的试验研究,证明了防冰防雷绝缘子的电气特性足以满足工程实用要求,但其并未分析不同的伞裙结构对绝缘子电场分布的影响。文献[9-11]对复合绝缘子的覆冰特性展开了研究,通过试验的方法分析了不同伞裙结构对绝缘子覆冰过程以及覆冰闪络特性的影响,但其并未研究覆冰条件下绝缘子的电场分布。文献[12-17]通过有限元仿真软件计算得到了复合绝缘子在清洁和覆冰状态下的电场分布,比较了不同伞裙结构下绝缘子的电场分布特性,结果表明超大伞裙结构可以在覆冰条件下起到缓解空间电场畸变的作用。

综上所述,在重覆冰条件下,采用传统复合绝缘

子大小的伞裙仍然会被冰凌桥接,而采用超大伞裙结构可以起到延缓冰凌桥接、改善电场分布的作用。现有文献中,关于重覆冰条件下超大伞裙结构对防冰防雷型绝缘子电场分布的影响研究较少。因此,本文利用有限元分析软件,计算得到了不同超大伞裙结构的防冰防雷绝缘子在重覆冰条件下的电场分布,并基于电场仿真结果对绝缘子的超大伞裙结构进行了优化。结果表明,优化后的超大伞裙结构可以缓解因覆冰而导致的空间电场畸变,进而起到提高绝缘子闪络电压的作用。

1 模型建立与参数选取

本文研究的防冰防雷绝缘子由芯棒、氧化锌电阻片、伞裙以及均压环等组成,其结构如图1所示。从功能上看,防冰防雷绝缘子分为避雷段和绝缘段,其避雷段中安装有氧化锌电阻片。当线路正常运行

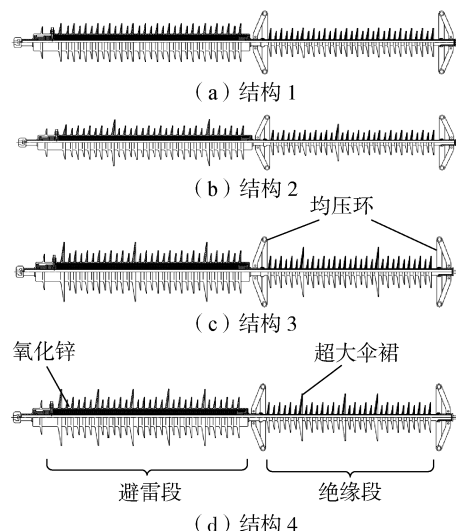


图1 不同伞裙结构下的防冰防雷绝缘子

Fig.1 Anti-icing and anti-lightning insulators with different shed structures

收稿日期:2016-12-21;修回日期:2017-10-20

基金项目:国家电网公司科技项目(5216A015001N)

Project supported by the Science and Technology Program of SGCC (5216A015001N)

时,绝缘段承受绝大部分电压;当雷电直击于杆塔或绕击于导线时,雷电过电压会导致绝缘段两端均压环之间的间隙发生击穿,防雷段的氧化锌电阻片动作,进而对雷电过电压起到钳制的作用^[1-2]。在重覆冰区域中,绝缘子伞裙之间容易出现冰凌桥接的现象,为了延缓冰凌桥接的时间,绝缘子通常采用超大伞裙的结构。为研究超大伞裙结构对防冰防雷绝缘子电场分布的影响,本文选取图 1 所示的 4 种伞裙结构的绝缘子进行分析。

图 1 所示的 4 种结构的防冰防雷绝缘子上分别均匀分布有 0、3、5、8 片超大伞裙。其主要结构参数如下:绝缘子的结构长度 $h=2\ 490\text{ mm}$,绝缘子爬电距离 $l=8\ 600\text{ mm}$,伞裙间距 $d=34.5\text{ mm}$,绝缘段长度 $h_1=900\text{ mm}$,避雷段长度 $h_2=1\ 590\text{ mm}$,绝缘段小伞、大伞、超大伞的直径分别为 156 mm 、 180 mm 、 300 mm ,避雷段小伞、大伞、超大伞的直径分别为 210 mm 、 260 mm 、 320 mm 。

本文在有限元分析软件 Ansoft 中建立了绝缘子、杆塔以及导线的 3 维有限元仿真模型,如图 2 所示,图中杆塔采用 220 kV 酒杯型杆塔,导线长度为绝缘子长度的 5 倍。仿真中建立了电场求解区域,使绝缘子到区域边界的距离远大于绝缘子本身的长度,并假定地平面以及求解区域边界上的电位为 0。为了更好地研究绝缘子空间电场分布,选取参照线(图 2(b)中 $A-A'$ 以及 $B-B'$),分析绝缘段和避雷段大伞裙外沿的电场电位分布特性。仿真模型中用到的主要电介质的物理参数如表 1 所示^[8]。

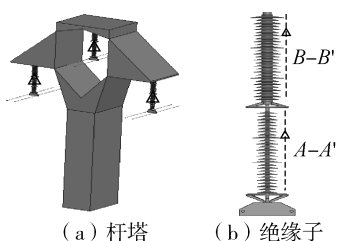


图 2 杆塔与绝缘子有限元模型

Fig.2 Finite element models of tower and insulator

表 1 电介质物理参数

Table 1 Physical parameter of dielectrics

电介质	相对介电常数	电导率/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	电介质	相对介电常数	电导率/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)
空气	1	—	水	81	300
橡胶	3.5	10^{-12}	导线	—	5.998×10^{10}
冰	75	10^{-6}	氧化锌	600	100
铁	—	1.03×10^{10}			

本文在进行覆冰绝缘子建模时,对覆冰条件进行如下假设^[17]。

a. 整个绝缘子表面的覆冰是均匀且对称的。

b. 绝缘子伞裙上表面冰层厚度为 10 mm ,绝缘子伞裙下表面不存在覆冰。湿冰状态下冰层表面存在厚度为 0.5 mm 的水膜。

c. 在重覆冰状态下,绝缘子大伞裙之间通过冰凌桥接,超大伞裙下悬挂长度为 25 cm 的冰凌。由于大伞裙以及超大伞裙的遮蔽作用,小伞裙之间不存在冰凌。

由于工频电磁场为准静态场,本文在进行仿真时,将绝缘子空间电场等效为静态场进行分析^[18]。对导线施加直流电压,其幅值为 220 kV 交流相电压的最大值,通过计算得到清洁和覆冰条件下绝缘子的电场分布特性。

2 绝缘子电场、电位分布

2.1 清洁条件下绝缘子电场、电位分布比较

清洁条件下,悬挂于杆塔侧面的不同伞裙结构的绝缘子,其垂直于导线横截面上的电场强度分布云图如图 3 所示,绝缘子参照线上的电场、电位分布曲线如图 4 所示。比较不同超大伞裙结构的绝缘子电场强度、电位分布特性可知,清洁条件下不同超大伞裙结构的绝缘子,其场强分布和电位分布基本一致。且由仿真结果可知,清洁条件下绝缘子最大空间场强出现在高压端均压环表面,为 17.7 kV/cm ;在绝缘段和避雷段,电场强度呈现两端大、中间小的趋势,这是由于避雷段氧化锌的相对介电常数远大于绝缘段的环氧树脂以及硅橡胶,因此绝缘段的电场强度与电压降落远大于避雷段。

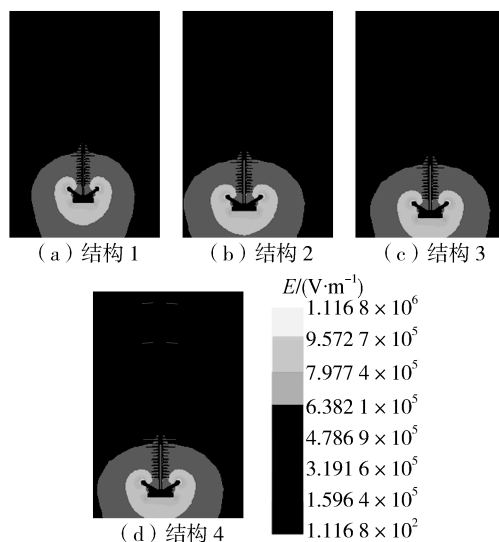


图 3 清洁条件下不同伞裙结构绝缘子电场分布

Fig.3 Electric field distribution of insulators with different shed structures under clean condition

2.2 覆冰条件下绝缘子电场、电位分布比较

绝缘子覆冰分为干冰和湿冰 2 种类型。在融冰阶段,绝缘子表面存在一层电导率较大的水膜,加剧

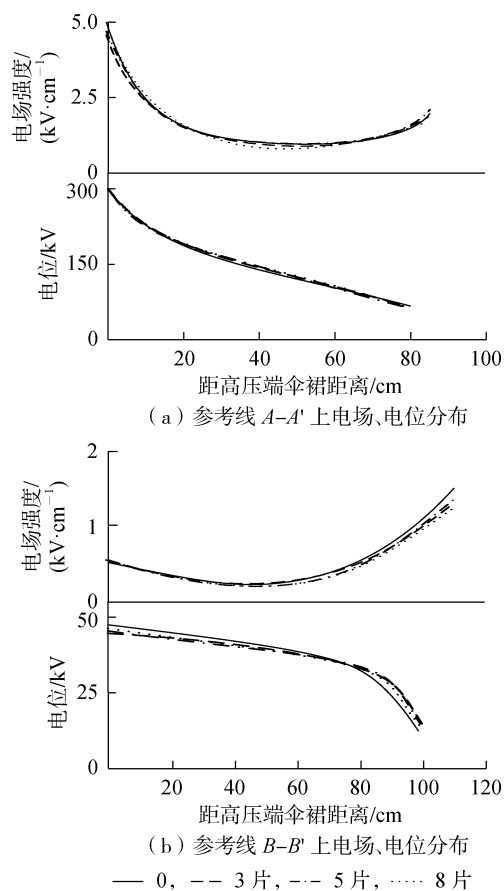


图4 清洁条件下参考线上电场、电位分布

Fig.4 Electric field and electric potential distribution on reference lines under clean condition

了空间电场的畸变,增加了绝缘子覆冰闪络的概率^[17]。因此,本文选取电场畸变更严重的湿冰条件进行分析,计算湿冰条件下绝缘子的电场分布特性。

当绝缘子表面覆有湿冰时,不同伞裙结构的绝缘子空间电场分布云图如图5所示。可见在重度覆冰的条件下,均压环以及冰凌端部的电场强度最大;未安装超大伞裙时,绝缘子空间电场强度最大值为40 kV/cm;安装有5片超大伞裙结构的防冰防雷绝缘子时,其空间最大电场强度为22.7 kV/cm,相较于其他伞裙结构而言,其空间最大电场强度最小。

覆冰条件下不同伞裙结构的绝缘子,其参考线上电场、电位分布曲线如图6所示。可见,在重覆冰条件下,冰凌之间的空气间隙承担了大部分的电压降落,且空气间隙之间的电场强度大于其他区域;相较于其他伞裙结构,5片超大伞裙结构的绝缘子参考线上的电场畸变最小。由图5和图6可知,对于未安装超大伞裙结构的绝缘子,其伞裙容易被冰凌桥接,进而导致空间场强畸变加剧;当超大伞裙数目过多时,超大伞裙之间距离过近,在重度覆冰的条件下,也会导致超大伞裙

之间发生冰凌桥接,进而引起空间电场畸变加剧;当绝缘子上超大伞裙数目为5时,其超大伞裙结构之间的距离适中,超大伞裙之间最难被冰凌桥接,因而其空间电场畸变最小。

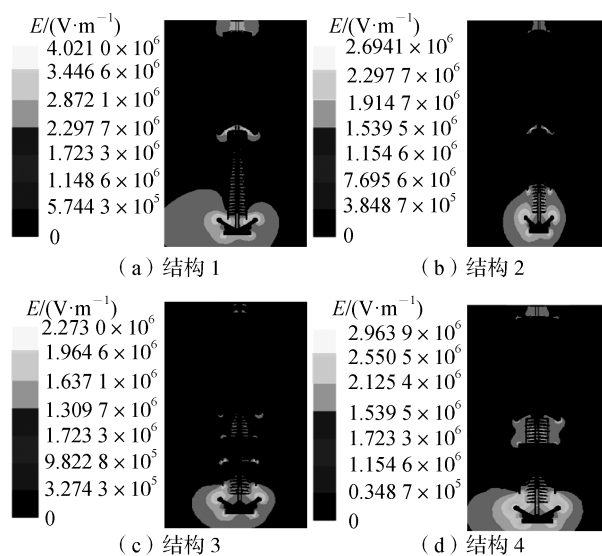


图5 覆冰条件下不同伞裙结构覆冰绝缘子电场分布

Fig.5 Electric field distribution of insulator with different shed structures under icing condition

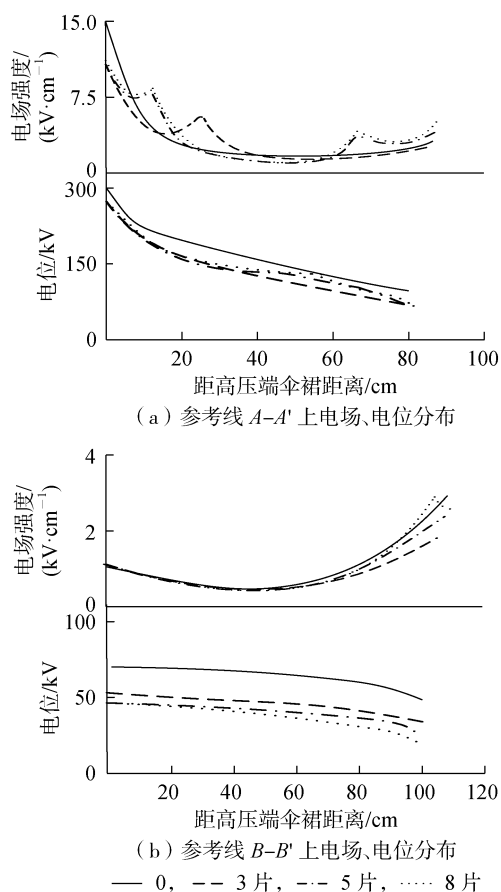


图6 覆冰条件下参考线上电场、电位分布

Fig.6 Electric field and electric potential distribution on reference lines under icing condition

3 伞裙结构优化

由上述防冰防雷绝缘子电场仿真结果可知,清洁条件下,伞裙结构对电场分布的影响很小;覆冰条件下,超大伞裙可以起到缓解冰凌桥接、提供空气间隙并缓解电场畸变的作用。由覆冰条件下的绝缘子电场仿真结果可知,高压端均压环附近的电场强度最大,超大伞裙过于靠近均压环会导致覆冰条件下冰凌与均压环之间的绝缘间隙过窄,造成空间电场畸变加剧。因此,本文在图1(c)的伞裙结构的基础上,保持绝缘段超大伞裙之间的间距不变,增大了超大伞裙与高压端均压环之间的距离。伞裙优化前后,防冰防雷绝缘子绝缘段结构如图7所示。可见优化后超大伞裙之间的间距仍为300 mm,而高压端超大伞裙与高压端均压环之间的距离为450 mm。

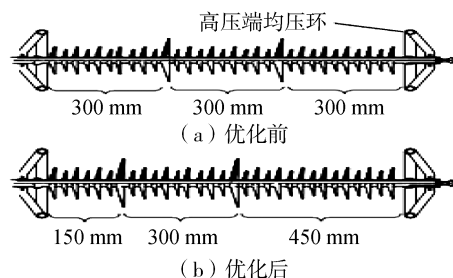


图7 优化前后绝缘段伞裙结构

Fig.7 Shed structures of insulation part before and after optimization

根据图5及图6所示的覆冰条件下的电场、电位仿真结果可知,绝缘段电场强度以及电压降落远远大于避雷段,因此本文选取绝缘段电场、电位进行分析。图8为仿真得到的重覆冰状态下绝缘子伞裙优化前后的空间电场分布。由图8可以看出,重覆冰状态下,优化后的伞裙结构最大空间电场由22.7 kV/cm下降至19.7 kV/cm。图9为绝缘子伞裙优化前后参考线上的场强分布曲线。由图9可知,优化超大伞裙位置后,参考线上的最大场强有所下降。对比优化前后的绝缘

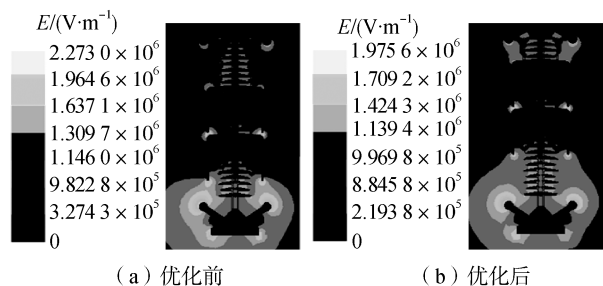


图8 伞裙结构优化前后覆冰条件下绝缘场强分布

Fig.8 Electric field distribution before and after shed structure optimization under icing condition

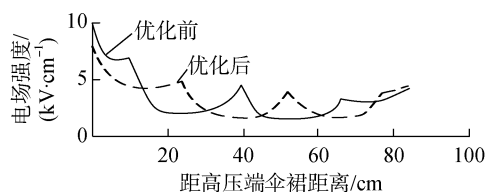


图9 伞裙结构优化前后覆冰条件下参考线A-A'上电场
Fig.9 Electric field on reference line A-A' before and after shed structure optimization under icing condition

段电场、电位分布可知,优化后的伞裙结构可以减小防冰防雷绝缘子在覆冰状态下的空间电场畸变。

4 结论

本文针对不同超大伞裙结构的防冰防雷型绝缘子,开展了重覆冰条件下的有限元电场仿真研究,根据仿真结果对绝缘子超大伞裙的安装位置进行了优化并进行了仿真验证,得到主要结论如下。

a. 由于氧化锌电阻片的相对介电常数较大,因此绝缘子避雷段承受的压降和电场强度远小于绝缘段。

b. 清洁条件下,超大伞裙结构对电场分布的影响很小;重覆冰条件下,在防冰防雷绝缘子中均匀插入5片超大伞裙可以对其下方的伞裙起到遮蔽的作用,进而防止超大伞裙之间发生冰凌桥接,缓解因覆冰而造成的空间电场畸变。

c. 在重覆冰条件下,超大伞裙过度靠近高压端会导致冰凌下端与高压端均压环之间距离过窄,均压环表面场强过大。因此将绝缘段伞裙适当上移,可以在一定程度上降低空间最大场强,进而防止绝缘子覆冰闪络的发生。

参考文献:

- [1] 谢鹏康. 一种新型复合绝缘子外绝缘特性的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
XIE Pengkang. The outer insulative characteristics of a new composite insulator[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [2] 罗正经. 防雷防冰闪合成绝缘子电场仿真与试验研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2013.
LUO Zhengjing. Electric field simulation and experimental investigation of an anti-ice-flashover composite insulator with lightning protection[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2013.
- [3] 于昕哲,周军,刘博,等. 全尺寸超、特高压交流绝缘子串的覆冰闪络特性[J]. 高电压技术,2013,39(6):1454-1459.
YU Xinzhe, ZHOU Jun, LIU Bo, et al. Icing flashover characteristic of full-scale EHV and UHV AC insulator strings[J]. High Voltage

- Engineering, 2013, 39(6): 1454-1459.
- [4] 杨浩, 吴畏. 基于三维重建的绝缘子覆冰图像监测[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 92-98.
YANG Hao, WU Wei. Insulator icing monitoring based on 3D image reconstruction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 92-98.
- [5] 蒋兴良, 袁超, 胡建林, 等. 220 kV 防冰闪型复合绝缘子冰闪特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2506-2513.
JIANG Xingliang, YUAN Chao, HU Jianlin, et al. Ice flashover characteristics of 220 kV anti-icing composite insulator[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2506-2513.
- [6] 张志劲, 蒋兴良, 胡建林, 等. 间插布置方式对交流绝缘子串覆冰特性影响[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 170-176.
ZHANG Zhijin, JIANG Xingliang, HU Jianlin, et al. Influence of the type of insulators connected with alternately large and small diameter sheds on AC icing flashover performance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 170-176.
- [7] 周晓雨, 李华强, 刘沛清, 等. 考虑电网安全风险的融冰序列决策[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 141-147.
ZHOU Xiaoyu, LI Huaqiang, LIU Peiqing, et al. Decision-making scheme of ice-melting sequence considering grid safety risk[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 141-147.
- [8] 罗正经, 陆佳政, 赵纯, 等. 防雷防冰闪合成绝缘子自适应电场分布仿真分析[J]. 湖南电力, 2013(3): 13-17.
LUO Zhengjing, LU Jiazheng, ZHAO Chun, et al. Simulation analysis of adaptive electric field distribution of an anti-ice-flashover composite insulator with the function of lightning protection[J]. Hunan Electric Power, 2013(3): 13-17.
- [9] 舒立春, 蒋兴良, 田玉春, 等. 海拔 4 000 m 以上地区 4 种合成绝缘子覆冰交流闪络特性及电压校正[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 97-101.
SHU Lichun, JIANG Xingliang, TIAN Yuchun, et al. AC flashover performance and voltage correction of four types of iced composite insulator at altitude 4 000 m above[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 97-101.
- [10] 蒋兴良, 谢述教, 舒立春, 等. 低气压下三种直流绝缘子覆冰闪络特性及其比较[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 158-193.
JIANG Xingliang, XIE Shujiao, SHU Lichun, et al. Ice flashover performance and comparison on three types of DC insulators at low atmospheric pressure[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 158-193.
- [11] 陆佳政, 胡建平, 方针, 等. 雪峰山脉小沙江自然灾害试验场覆冰与融冰试验[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 388-394.
LU Jiazheng, HU Jianping, FANG Zhen, et al. Icing accretion and ice-melting test at Xiaoshajiang natural disasters test site in Xuefeng Mountain[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 388-394.
- [12] 常浩, 石岩, 殷威扬, 等. 交直流线路融冰技术研究[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 1-6.
CHANG Hao, SHI Yan, YIN Weiyang, et al. Ice-melting technologies for HVAC and HVDC transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 1-6.
- [13] ALE-EMRAN S M, FARZANEH M. Numerical analysis of the combined effects of booster sheds and grading rings on an ice-covered EHV ceramic post insulator[C]//IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). Ottawa, Ontario, Canada; IEEE, 2013: 346-350.
- [14] VOLAT C, EMRAN S M A, FARZANEH M. Numerical simulations of ice-covered EHV post station insulator performance equipped with booster sheds[C]//2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI). San Juan, PR, USA; IEEE, 2012: 91-94.
- [15] EMRAN S M A, FARZANEH M, VOLAT C. Simulation analysis of the effect of booster sheds on post insulators under icing conditions[C]//2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). Montreal, Quebec, Canada; IEEE, 2012: 749-752.
- [16] 蒋兴良, 刘毓, 张志劲, 等. 覆冰地区交流输电线路复合绝缘子伞裙结构的电场分布优化[J]. 电工技术学报, 2015, 39(7): 2064-2068.
JIANG Xingliang, LIU Yu, ZHANG Zhijin, et al. Sheds configuration optimization of AC composite insulators used in AC transmission lines at icing areas based on electric field distribution[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 39(7): 2064-2068.
- [17] 江全元, 晏鸣宇, 周志宇, 等. 重覆冰地区超大伞裙结构复合绝缘子的仿真及优化设计[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 2064-2068.
JIANG Quanyuan, YAN Minyu, ZHOU Zhiyu, et al. Numerical simulations and optimal design of composite insulator with extra large sheds under heavy icing condition[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 2064-2068.
- [18] 司马文霞, 邵进, 杨庆. 应用有限元法计算覆冰合成绝缘子电位分布[J]. 高电压技术, 2007, 33(4): 21-25.
SIMA Wenxia, SHAO Jin, YANG Qing. Calculation of potential distribution to 220 kV icing non-ceramic insulators by finite element method[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(4): 21-25.
- [19] TAHERI S, FARZANEH M, FOFANA I. Dynamic modeling of AC multiple ARCS of EHV post station insulators covered with ice[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(4): 2214-2223.
- [20] TAHERI S, FARZANEH M, FOFANA I. Equivalent surface conductivity of ice accumulated on insulators during development of AC and DC flashovers arcs[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(5): 1789-1798.
- [21] FOFANA I, FARZANEH M, HEMMATJOU H, et al. Study of discharge in air from the tip of an icicle[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(3): 730-740.

作者简介:



陆佳政

陆佳政(1969—),男,湖南常德人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统防灾减灾技术;

谢鹏康(1988—),男,湖南邵阳人,工程师,博士,主要研究方向为电力系统防灾减灾技术(E-mail: xiepengkang@126.com)。

Electric field simulation and sheds optimization of anti-icing and anti-lightning insulator under heavy icing condition

LU Jiazheng, XIE Pengkang, FANG Zhen, JIANG Zhenglong

(State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid Transmission and Distribution Equipment,
State Grid Hunan Electric Power Corporation Disaster Prevention & Reduction Center, Changsha 410007, China)

Abstract: In order to analyze the electric field distribution of anti-icing and anti-lightning insulator under heavy icing conditions, and further accomplish the shed structure optimization and the distortion alleviation of electric field caused by icing, the finite element simulation model of 220 kV anti-icing and anti-lightning insulator is proposed. The electric field distributions of insulators with different shed structures under clean and icing conditions are calculated, based on which the shed structures are optimized and the electric field distributions of anti-icing and anti-lightning insulator before and after optimization are compared. The simulative results illustrate that the shed structure has very limited influence on the electric field under clean conditions, and the distortion of electric field caused by heavy icing can be alleviated effectively under icing conditions when the number of extra-large shed is 5. Optimized shed structures can alleviate the distortion of electric field caused by icing, which contributes to the improvement of icing flashover voltage.

Key words: electric insulators; icing; electric field distribution; sheds optimization; flashover voltage; finite element simulation model

·····
(上接第 198 页 continued on page 198)

Parameter measurement of interior permanent magnet synchronous motor model considering iron losses

ZHANG Xinghua, TONG Xinyu, LIU Wei

(College of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: A novel method to measure the parameters of interior permanent magnet synchronous motor considering iron losses is proposed. Based on the permanent magnet synchronous motor drive control platform commonly used in laboratories, the principles and methods to measure permanent magnet flux linkage, stator resistance, equivalent iron loss resistance and d - and q -axis inductances of the interior permanent magnet synchronous motor are described in detail. The proposed method has the advantages of clear theoretical concept, easy implementation and excellent versatility. The effectiveness and feasibility of the proposed method are validated by a practical test.

Key words: interior permanent magnet synchronous motor; electric motor model; iron loss; parameter measurement