

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.03.002

1 100 kV B类接地开关三维电场数值计算与优化设计

张志文¹, 严小敏¹, 邓文华², 王春华², 赵健康¹

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南长高高压开关集团股份公司, 长沙 410219)

摘要: 接地开关的静电场仿真计算可以指导产品的结构优化, 从而缩短产品研发周期降低产品研发费用。为了得到接地开关表面电场, 以承德特高压串补用串1 100 kV B类接地开关为样本, 计算接地开关分闸状态下表面电场分布。首先依据设计尺寸利用SolidWorks软件对接地开关进行实体建模; 然后依据三维有限元数值计算法对接地开关典型时刻下的电场电位进行了三维有限元仿真计算, 得出其电位及表面电场分布; 仿真结果显示高场强出现在辅助回路均压环、静触头均压环及动触头表面; 接着对接地开关高场强区域进行了优化设计, 优化后均压环表面场强在安全范围内, 动触头表面场强得到显著改善; 最后对优化后的接地开关进行静电感应电流开合试验, 试验通过, 证明了优化的合理性。该仿真结果可以为1 100 kV B类接地开关的研发及推广提供理论参考。

关键词: 特高压; B类接地开关; 有限元法; 三维电场; 动触头优化; 均压环优化; 静电感应电流

Numerical Calculation of There-dimensional Electric Field and Optimal Design of 1 100 kV Class B-type Earthing Switch

ZHANG Zhiwen¹, YAN Xiaomin¹, DENG Wenhua², WANG Chunhua², ZHAO Jiankang¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Changgao High Voltage Switch Gear Group Co., Ltd., Changsha 410219, China)

Abstract: The electrostatic field simulation can help to guide the structure optimization of an earthing switch, shorten the product development cycle, and reduce the product development costs. In this study, a 1 100 kV B-type earthing switch for the supplemental lines of Chengde UHV transmission line was taken as an example to calculate the electric field distribution around the switch surface in open state. Firstly, according to the design dimensions, a three-dimensional mathematical model was established using the software SolidWorks. Secondly, according to the three-dimensional finite element numerical method, the finite element analysis software was used to calculate and analyze the electric potential and electric field around the earthing switch surface at the typical moment, thus the electric potential and field distribution were obtained. Simulation result showed that higher electric field intensity appeared on the auxiliary loop grading ring, static contact grading rings and moving contact. Thirdly, optimal design for these high electric field intensity areas was carried out, consequently the electric field around grading ring surface was in safe range, and the electric field around moving contact surface was significantly improved. Finally, electrostatic induction current switching tests were conducted on the optimized earthing switch, verifying the rationality of the optimization. This study may provide a theoretical reference for development and popularization of 1 100 kV B-type earthing switch.

Key words: ultra-high voltage; B-type earthing switch; finite element method; there-dimensional electric field; optimal design of moving contact; optimal design of grading ring; electrostatic induction current

收稿日期:2018-07-14; 修回日期:2018-09-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477046)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51477046).

0 引言

在有高压电器工作的场所,复杂的空间电磁场能在导体上产生极高的感应电压,因此即使使用隔离开关将带电部位进行隔离,被检修设备上导体感应所产生的电压电流也足以对检修人员产生伤害,因此需用接地开关对被检修部位进行可靠接地。现代电力系统中,为了减少线路走廊降低造价,越来越多输电线路采用同塔双回或多回线路。在线路较长的情况下,两条线路间的耦合会非常严重,这样在一条线路带电另一条线路用接地开关去开合接地时,需要开合比较大的感应电压和感应电流,这种高开合参数的接地开关称为B类接地开关。在实际工程中,220~800 kV电压系统中B类接地开关应用较多^[1],研发及使用都较为成熟,文中研究的承德特高压串补用串1 100 kV B类接地开关为世界上首条同塔双回侧特高压接地开关,属国内外首次研发产品,无现成经验可借鉴,因此需要借助相关软件对其电场进行仿真计算,指导样机研发与优化。

事实上,早期国内对于户外高压开关的研究并不多,近几年更是少之又少,关于高压隔离开关本体电场分析的文章屈指可数^[2~4],对于高压接地开关本体电场分析的文章更是没有。对户外高压开关鲜有研究的原因在于GIS、COMPASS、隔离断路器等技术引领了发展方向因而一直备受推崇;且户外高压开关本身体量庞大,机构复杂对模型处理以及分网技术有着十分严格的要求,模拟仿真门槛相对较高。对高压开关研究比较有代表性的是文[2],该文指出交流场计算基于静电场理论,而直流场计算则采用恒定传导电流场理论。当前国内外论文对高压开关的研究大部分集中在隔离开关故障以及GIS隔离开关上。关于高压开关的研究最为突出的是沈阳工业大学的林莘、徐建源团队对GIS隔离开关电场分析、电场特性及绝缘性能研究^[5~9]。其余的主要针对绝缘子均压环的优化设计做了大量研究^[10~22]。文中是针对1 100 kV B类接地开关型式试验中出现的各种击穿提出的。为了得到接地开关电场分布,应用有限元软件依据三维有限元数值计算方法对接地开关电位、电场进行了计算与分析^[23~25],为接地开关的优化设计及推广提供理论依据。

1 有限元模型的建立与简化

1 100 kV接地开关采用单柱折臂式结构,主要

分为主导电部分(动、静触头)、绝缘子、底座及传动部分、操作机构这4大部分。在电场分析中,根据实际经验,放电主要发生在导电部分,因此重点考虑主导电部分。文中模型主要保留接地开关的各类均压环、连接导线、导电管及安装底座。

接地开关是一个非常复杂的装配体,Ansys本身建模效率不高,因此采用功能强大的SolidWorks进行实体建模,然后转化为parasolid模式导入Ansys中。受现有计算机计算能力限制,应对计算模型进行适当的简化与修改,以减少单元数量、降低硬件资源占用。因此模型建立过程中化简原则为:保留重点部位前提下去除螺钉、螺栓等细小结构,简化圆角、倒角、螺孔等细微特征;根据导体内部电场处处为零的原理,均压环、导电杆等非实心模型可做实心处理,避免布林运算时出现过多余体,从而避免网格划分时还要对其内部再做另外划分。假设接地开关表面干燥、清洁,处于海拔为零的自然环境。开关几何结构图与简化后结构图见图1。

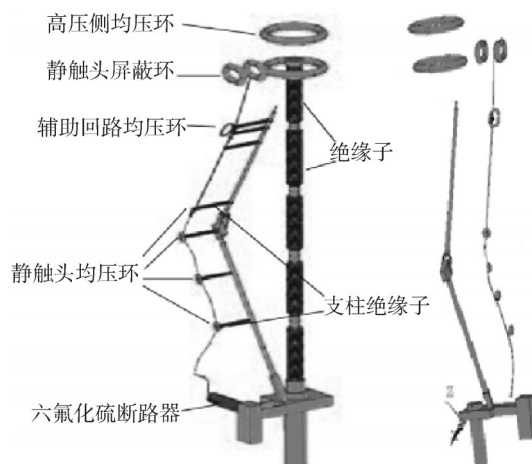


图1 接地开关几何机构图

Fig. 1 Geometry structure of earthing switch

针对开域问题,在模型外建8 000 mm×10 000 mm×15 000 mm的小空气域以及20 000 mm×20 000 mm×25 000 mm的大空气域外边界,见图2。

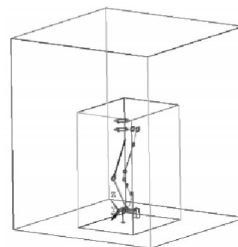


图2 接地开关空气域

Fig. 2 Air field around the earthing switch

2 有限元模型的处理

交流场选择solid123静电单元。

在交流场下,电压周期 T 远小于介电弛豫时间,此时传导电流远小于位移电流,电场按材料的介电常数分布,因此只需对计算模型设置相对介电常数。接地开关本体外的空气域相对介电常数为1,导体相对介电常数为100 000。

文中对接地开关模型外的小空气域采用6级智能网格划分,大空气域采用8级智能网格划分;接地开关自身重点部位采用1级智能网格划分,同时控制区域尺寸,分网不均区域采用局部细化;非重点部位采用2级到4级智能网格划分,细小结构尽量采用高等级网格划分控制网格数量。以此确保求解精度的同时控制网格数量。采用预处理共轭梯度法处理器(preconditioned conjugate gradient, PCG)求解接地开关电场分布问题。

接地开关在分闸状态下,开关主触头与静触头分开,SF₆断路器分闸,引弧触棒与引弧触头尚未分离状态时,接地开关主回路与辅助回路之间的电场畸变严重,对主回路与辅助回路之间空气间隙的考验最为严酷。为此,选取该状态进行计算分析。选择接地开关断口距离为1 000 mm。

根据GB/Z 24837—2009可查1 100 kV B类接地开关额定感应电压(有效值)为180 kV且电压波形全在 X 轴上方,此时电压峰值为 $180 \times 2 \times \sqrt{2} = 509$ kV。

因此辅助回路以及接地开关高压侧端部均压环表面施加最大电磁感应电压509 kV;在主回路、接地开关底座和计算场域的外边界施加零电位。接地开关电位分布见图3。

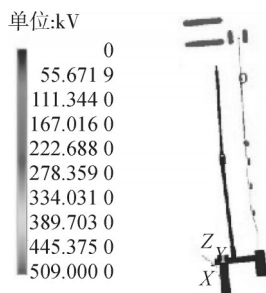


图3 接地开关电位分布

Fig. 3 Electric potential distribution of earthing switch

3 接地开关电场分析与计算

当接地开关表面最高场强高于3 000 kV/m时,有可能会发生电晕放电,因此设定3 000 kV/m为控制场强。根据文[2],隔离开关最大场强值出现

在各处均压环上,因此文中重点对接地开关的各类均压环以及动触头进行分析。

接地开关高压侧均压环表面电场分布见图4,图4中圈1区域为场强最大处,圈2区域为场强最小处。从图4可以看出,均压环场强最大值为1 538.11 kV/m,远小于最大控制场强,因此不会出现电晕现象。

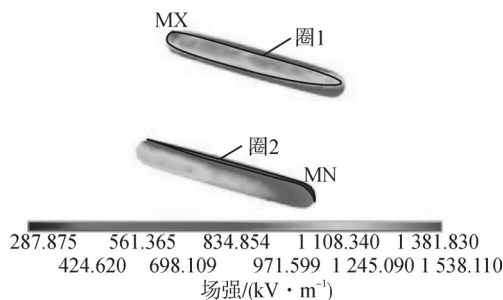


图4 高压侧均压环表面电场分布

Fig. 4 Electric field distribution around surfaces of high-voltage side grading ring

接地开关静触头屏蔽环表面电场分布见图5,最大场强出现在远高压侧均压环的屏蔽环外表面,为2 045.58 kV/m,因此也在安全范围内。

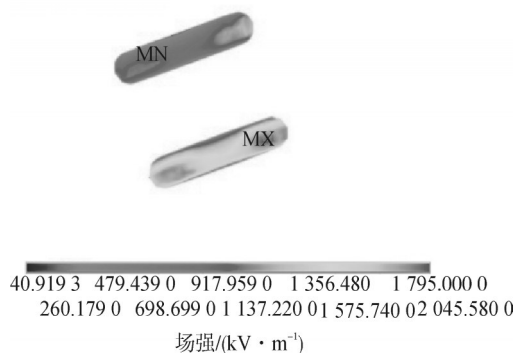


图5 静触头屏蔽环表面电场分布

Fig. 5 Electric field distribution around surfaces of static contact shielding ring

辅助回路均压环表面电场分布见图6,从图6中可以看出,均压环外表面场强较大,最大场强为3 739.15 kV/m,且均压环四拐角均有区域超过控制场强,因此容易起晕。

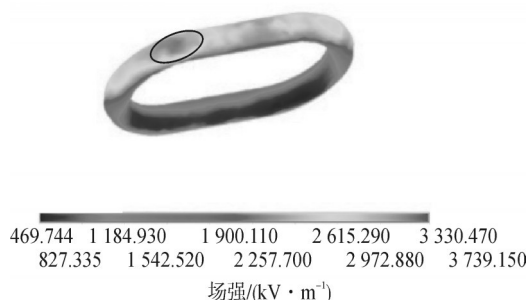


图6 辅助回路均压环表面电场分布

Fig. 6 Electric field distribution around surfaces of auxiliary loop grading ring

令图 1 中静触头均压环从上到下为 1~4 号, 各均压环场强最大值在 4 988. 86 ~5 706. 93 kV/m。以 4 号均压环为例, 其电场分布见图 7。从图 7 可以看出, 椭圆框中均压环大面积区域超过了安全范围。且各环表面均有大面积区域超过控制场强, 尤其是 2 号与 4 号均压环。这是由于小均压环本身承受较高电压, 同时受辅助回路电场影响较大, 因此自身电场较大, 会有放电危险。

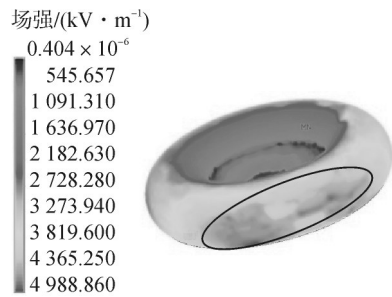


图 7 静触头均压环表面电场分布

Fig. 7 Electric field distribution around surfaces of static contact grading ring

动触头电场分布见图 8, 从图 8 可以看出, 最大场强为 8 077. 28 kV/m, 远超过最大控制场强。调整云图控制选项, 过滤安全场强, 灰色区域表示安全场强范围内, 可以看出椭圆框中动触头端面场强均大于安全场强, 这是由于动触头距离开关高压侧近, 受高压侧电场影响大, 而高压侧均压环对其屏蔽作用又较弱, 因此动触头端面电场极大, 极有可能会发生放电, 导致开关被击穿。

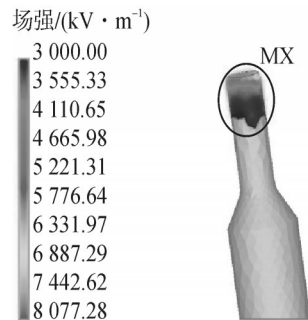


图 8 动触头表面超过控制场强区域

Fig. 8 Area beyond safety limits of moving contact

4 接地开关优化设计

4.1 辅助回路均压环优化设计

辅助回路均压环形状比较规则, 为椭圆形圆柱管。可通过调整其自身环径、管径参数来控制其场强。由于其电场强度超出安全范围并不很多, 因此将均压环环径由原来的 60 mm 增加到 90 mm, 开关其余参数不变重新计算场强, 得到辅助回路均压环

表面电场分布见图 9。最大场强为 2 861. 13 kV/m, 与之前相比下降了 23. 48%。由于模拟的是开关最恶劣的工况, 且考虑到工艺要求及经济成本要求, 均压环环径再做放大实用性不高, 因此保持环径为 90 mm 即可满足要求。

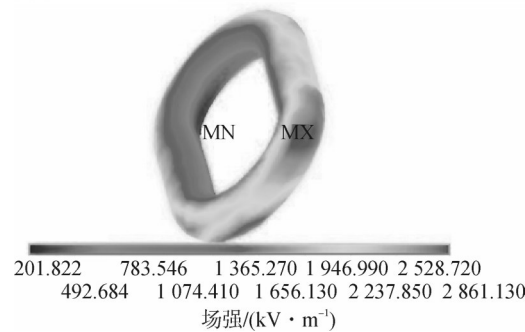


图 9 优化后均压环表面电场分布

Fig. 9 Electric field distribution around surfaces of the optimized grading ring

4.2 静触头均压环优化设计

各静触头均压环表面大场强区域均出现在其外表面靠近外沿边缘处。边缘处薄壳为直角, 且均压环本身具有壳壁薄、盘径小的特点, 因此表面电荷密度大, 场强较大。故可以通过改变小均压环的壳壁厚度、盘径大小及环径来改善均压盘表面电场。文中将小均压环的壳壁由原来的 3 mm 增加到 6 mm; 盘径由 110 mm 增加到 160 mm; 环径由 80 mm 增加到 140 mm; 保持辅助回路均压环管径 90 mm, 接地开关其他参数不变。重新计算场强, 得到各均压环电场见表 1。

表 1 优化前与优化后均压环最大电场比较

Table 1 Comparison of the maximum electric field intensity of grading rings before and after optimization

均压环	优化前/(kV·m ⁻¹)	优化后/(kV·m ⁻¹)
1	5 706.93	2 929.11
2	5 066.10	2 611.68
3	4 741.39	2 673.14
4	4 988.86	2 727.76

由表 1 可以看出, 各均压环最大场强均有不同程度下降, 下降幅度在 43. 62%~48. 67%, 各均压环最大场强均保持在安全范围内。因此不会发生放电现象。考虑到开关实际运行及制造成本要求, 再继续增加盘径或者环径意义不大, 因此认为此均压盘参数即符合要求。

4.3 动触头优化设计

整个动触头端面场强均超过控制场强, 因此动触头表面场强改善尤为必要。降低动触头场强一方面可以通过改变高压侧均压环参数来控制动触

头场强;另一方面可以通过调整动触头自身结构来降低场强。由于动触头端面电场太大,改变高压侧均压环对其电场改善并不太明显,因此文中选择改变动触头端面。

现将动触头由带圆弧的端面调整为直径60 mm的半球头;断口距离由1 000 mm调整为1 300 mm;主回路与辅助回路距离由1 180 mm调整为1 300 mm;辅助回路均压环及静触头均压环参数保持为优化后参数;接地开关其余参数不变,重新计算场强,见图10。优化后动触头最大场强为4 982.83 kV/m,最大电场下降了38.31%。此时继续增加断口距离动触头表面电场可控制在3 000 kV/m以内。但是从工程实际出发,继续增加断口距离就要调整整个开关结构,由下面试验可知断口距离为1 300 mm时开关即可正常工作,因此从节省开发制作成本角度来看继续优化并无实际意义。因此保持动触头端面为60 mm半球头,断口距离为1 300 mm即可。

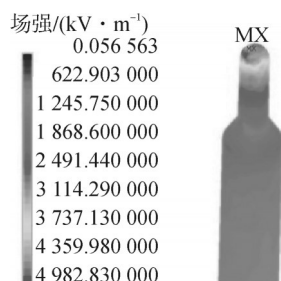


图10 优化后动触头表面电场分布

Fig. 10 Electric field distribution around surfaces of the optimized moving contact

5 样机试验

对接地开关进行了静电感应电流关合和开断试验。接地开关开断静电感应电流试验前照片见图11。试验依据标准为GB 1985—2014条款6.107;试验参数为电压180 kV、电流50 A;选择样机断口距离为1 300 mm,主回路与辅助回路距离为1 300 mm,主触头端面为直径60 mm的半球面。

接地开关试验参数及试验结果见表2、3,试验次数为10次。试验后试品无明显变化,空载操作正常,气压表指示无明显变化,试验通过。

6 结论

通过对分闸状态下1 100 kV特高压B类接地开

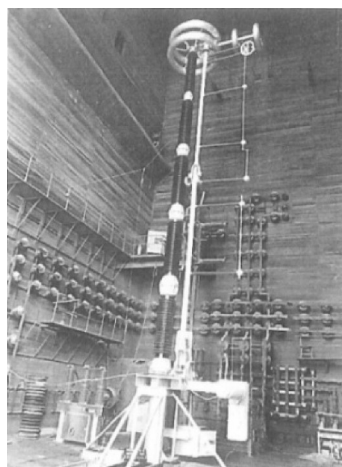


图11 接地开关试验前照片

Fig. 11 The photo of earthing switch before test

表2 静电感应电流关合试验

Table 2 Making electrostatically induced current test

试验次数	关合电流峰值/A	试验电流/ A	试验电压/ kV
1	237	50.3	182
2	-256	50.2	182
3	-300	50.1	182
4	-291	50.3	182
5	326	50.3	182
6	330	50.2	182
7	306	51.0	183
8	-284	50.3	182
9	-250	50.6	182
10	-318	50.3	182

表3 静电感应电流开断试验

Table 3 Breaking electrostatically induced current test

试验次数	开断电 流/A	工频恢复 电压/kV	燃弧时 间/ms
1	51.2	181	3.5
2	51.4	181	3.2
3	51.3	181	2.1
4	51.2	181	4.6
5	51.0	181	3.1
6	50.2	180	1.2
7	50.8	180	8.4
8	50.6	180	4.7
9	50.4	181	4.1
10	51.2	181	6.7

关典型时刻的下的电场电位进行三维有限元仿真计算,并对其结构进行优化与改造,可得出以下结论:

1)接地开关高压侧均压环与静触头屏蔽环表面电场均在安全范围内;辅助回路均压环表面最大场强为3 739.15 kV/m,可能会出现电晕;4个静触头

均压环表面最大场强在 4 988.86~5 706.93 kV/m 之间, 极易出现电晕放电; 动触头表面最大场强为 8 077.28 kV/m, 且整个端面场强皆超出控制场强, 因此很可能发生电晕放电。

2) 其他条件不变情况下, 分别调整辅助回路均压环管径, 静触头均压环管径、环径、壳壁厚度可以有效改善各处的电场强度, 将接地开关各关键部位场强均控制在安全范围内。将动触头端面由带弧形端面改为半球头, 断口距离由 1 000 mm 调整为 1 300 mm, 主回路与辅助回路之间距离增加到 1 300 mm, 动触头表面场强得到显著改善, 此时触头表面可能会出现电晕, 但不会出现空气间隙击穿, 从工程实际及制作成本角度出发, 继续优化无实际意义。

3) 对接地开关进行了静电感应电流关合和开断试验, 试验后试品无明显变化, 试验通过, 验证了优化的合理性。

参考文献

- [1] 何金良, 张波, 曾嵘, 等. 1 000 kV 特高压变电站接地系统的设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 34(7): 7-12.
HE Jinliang, ZHANG Bo, ZENG Rong, et al. Grounding system design of 1 000 kV ultra-high voltage substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 34(7): 7-12.
- [2] 田冀焕, 沙彦超, 周远翔, 等. 800 kV 等级高压隔离开关的交、直流电场仿真计算[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1216-1223.
TIAN Jihuan, SHA Yanchao, ZHOU Yuanxiang, et al. Simulation of AC and DC electric field for 800 kV grade high voltage disconnecter[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1216-1223.
- [3] 刘雨芳, 周腊吾, 邓文华, 等. 550 kV 隔离开关静触头电场数值计算与均压环设计[J]. 高压电器, 2016, 52(9): 65-70.
LIU Yufang, ZHOU Lawu, DENG Wenhua, et al. Numerical calculation of electric field and design of grading ring for fixed contact of 550 kV disconnecter[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(9): 65-70.
- [4] 游贤衡. 高压隔离接地模块三维静电场分析及结构改进[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
YOU Xianheng. Analysis and structure improvement of the 3-D electrostatic field of the high-voltage isolation grounding module[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.
- [5] 徐建源, 路璐, 林莘. 1 100 kV GIS 隔离开关的电场数值计算与分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 2102-2106.
XU Jianyuan, LU Lu, LIN Xin. Numerical analysis of electric field of 1 100 kV disconnecter in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10): 2102-2106.
- [6] 路璐. 特高压 GIS 隔离开关的电场特性及绝缘性能研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009.
LU Lu. The research of electric field and insulation characteristic for ultra high voltage disconnecter[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2009.
- [7] 林莘, 司秉娥, 徐建源, 等. 1 100 kV GIS 中隔离开关及故障接地开关电场数值分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2007, 29(5): 524-528.
LIN Xin, SI Bing'e, XU Jianyuan, et al. Electric field numerical analysis of extra-high voltage disconnecter and fault earthing switch in 1 100 kV GIS[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2007, 29(5): 524-528.
- [8] 徐建源, 司秉娥, 林莘, 等. 基于虚拟介电常数法的特高压 GIS 中隔离开关电场参数计算[J]. 电工技术学报, 2008, 23(5): 37-42.
XU Jianyuan, SI Bing'e, LIN Xin, et al. Electric field parameter calculation of extra-high voltage GIS disconnecter based on dummy dielectric constant method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(5): 37-42.
- [9] 林莘, 蔡强, 徐建源, 等. 基于区域分解法的 1 100 kV 隔离开关大规模电场计算问题[J]. 高压电器, 2011, 47(2): 1-6.
LIN Xin, CAI Qiang, XU Jianyuan, et al. Large scale of electric field calculation of 1 100 kV disconnecter based on domain decomposition method[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(2): 1-6.
- [10] 黄道春, 阮江军, 刘守豹. 特高压交流复合绝缘子电位和均压环表面电场分布计算[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1442-1447.
HUANG Daochun, RUAN Jiangju, LIU Shoubao. Potential distribution along UHV AC transmission line composite insulator and electric field distribution on the surface of grading ring[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1442-1447.
- [11] 司马文霞, 武坤, 李立涅, 等. 800 kV 线路直流复合绝缘子均压环结构研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 33-36.
SIMA Wenxia, WU Kun, LI Licheng, et al. Optimization of corona ring design for 800 kV UHV DC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 33-36.
- [12] 司马文霞, 杨庆, 孙才新, 等. 基于有限元和神经网络方法对超高压合成绝缘子均压环结构优化的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 115-120.
SIMA Wenxia, YANG Qing, SUN Caixin, et al. Optimization of corona ring design for EHV composite insulator using finite element and neural network method[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 115-120.
- [13] 梁超. 特高压电气设备的电场特性及绝缘性能的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2010.
LIANG Chao. The research of electric field and insulation characteristic for UHV electric appliance[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2010.
- [14] 徐光辉. 800 kV 隔离开关屏蔽环设计[J]. 高压电器, 2006, 42(5): 337-339.

- XU Guanghui. Design of the shielding ring of 800 kV disconnect[J]. High Voltage Apparatus, 2006,42(5): 337-339.
- [15] 田冀焕,周远翔,郭绍伟,等. 直流换流站阀厅内三维电场的分布式并行计算[J]. 高电压技术, 2010,36(5): 1205-1210.
- TIAN Jihuan, ZHOU Yuanxiang, GUO Shaowei, et al. Distributed parallel computation of the 3D electric field in the HVDC converter valve hall[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(5):1205-1210.
- [16] 谢天喜,莫娟,彭宗仁,等. 500 kV 紧凑型线路悬垂复合绝缘子均压环电晕抑制分析[J]. 高电压技术, 2010,36(7): 1779-1784.
- XIE Tianxi, MO Juan, PENG Zongren, et al. Corona suppression of grading rings on suspension composite insulators on 500 kV compact transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(7): 1779-1784.
- [17] 唐铭骏,叶丽莎,林春耀,等. 500 kV 站用绝缘子串均压环优化设计[J]. 高压电器, 2015,51(5):63-70.
- TANG Mingjun, YE Lisha, LIN Chunyao, et al. Optimization of shielding ring of insulator string in 500 kV substation [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(5): 63-70.
- [18] 刘振,卞星明,王黎明,等. 特高压直流复合绝缘子均压环设计[J]. 高电压技术, 2006,32(12):137-141.
- LIU Zhen, BIAN Xingming, WANG Liming, et al. Calculation of electric field distribution along composite insulator strings and design of grading ring of UHVDC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 137-141.
- [19] 薄学微,卞星明,王黎明,等. 750 kV 交流复合绝缘子均压环优化设计[J]. 高压电器, 2010,46(12):5-8.
- BO Xuewei, BIAN Xingming, WANG Liming, et al. Optimal design of grading rings for 750 kV AC composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2010,46(12): 5-8.
- [20] 李禾,王闯,刘鹏,等. 1000 kV 特高压交流变电站铝管母线末端屏蔽方式研究[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2562-2569.
- LI He, WANG Chuang, LIU Peng, et al. Study on terminal shielding way of aluminum tubular bus in 1 000 kV UHV AC substations[J]. Power System Technolog, 2014, 38(9): 2562-2569.
- [21] ZHAO T, COMBER M G. Calculation of electric field and potential distribution along nonceramic insulators considering the effects of conductors and transmission towers[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2000, 15(1): 313-318.
- [22] ZHANG B, HAN S J, HE J L, et al. Numerical analysis of electric - field distribution around composite insulator and head of transmission tower[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006,21(2): 959-965.
- [23] 谢德馨,杨仕友. 工程电磁场数值分析与综合[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- XIE Dexin, YANG Shiyu. Numerical analysis and integration of engineering electromagnetic[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [24] Ansys Inc. Machanical APDL basic analysis guide, chapter5: Solution[R]. [S.l.]: Ansys Inc., 2009.
- [25] 冯慈璋,马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京:高等教育出版社 2008.
- FENG Cizhang, MA Xikui. Introduction to engineering electromagnetic fields[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.
- 张志文(1963—),男,教授,博士生导师,研究方向为交直流电能变换系统理论与新技术、现代电气装备自动化与新技术、电力系统谐波抑制。
- 严小敏(1992—),女,硕士研究生,研究方向为高电压与绝缘技术、电磁场数值计算(通信作者)。

(上接第7页)

- zhong University of Science and Technology Power System and Automation, 2006.
- [18] SU Y, LIU P, ZHANG H. Introduction of determination and setting method of the arcing time for three-phase synthetic test for high voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(4):313-314.
- [19] PENG B, XIAO D. Online monitoring of the breaker's electrical life[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(12): 38-41.
- [20] CAI C, CHEN B, SUN B, et al. Contactless online condition monitoring technology for HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(4):845-852.
- [21] NATTI S, KEZUNOVIC M. Assessing circuit breaker performance using condition - based data and Bayesian approach[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(9): 1796-1804.
- [22] RAZI-KAZEMI A A, VAKILIAN M, NIAYESH K, et al. Circuit - breaker automated failure tracking based on coil current signature[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1):283-290.
- [23] HENDERSON R, SEEDS D. Condition assessment of circuit breakers using a trip coil profiling approach[C]//Proceedings of the 1996 IEE Colloquium on Monitors and Condition Assessment Equipment. London, UK: IEE, 1996: 1-13.
- [24] MA X, ZHANG J, WANG P. Fundamentals of Electromagnetic Fields[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [25] YOKOMIZU Y, MATSUMURA T. Radiation power of SF₆ arc in current range from 500 to 20 000 A at pressures of 0.1 and 0.4 MPa[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41(12):1-9.
- CHENG Tingting(1990—), Female, Doctoral candidate, Research direction for the high voltage switch equipment reliability evaluation.