

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.07.015

基于多层模型的GIS盆式绝缘子温度分布仿真

高 凯¹, 陈洪岗¹, 陆启宇², 夏昊天³, 许乐然³, 关永刚³, 丁登伟³

(1. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437; 2. 国网上海市电力公司, 上海 200122; 3. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: GIS盆式绝缘子两侧存在与母线连接的电接触点,其接触电阻在GIS运行过程中可能会因接触不良而增大,从而产生异常发热,甚至引起故障。为探究盆式绝缘子在实际运行中的温度分布规律,文中利用110 kV GIS盆式绝缘子搭建了真型试验平台,依据该平台的参数建立了等比例的盆式绝缘子多层仿真模型,并通过注入等效热源的方式模拟通流导体、SF₆气体以及GIS外壳对盆式绝缘子的热传递过程,替代了对流及辐射传热计算,使单次计算时间从几小时缩短至几分钟,在保证结果准确性的前提下有效提升了仿真计算速度。利用试验平台进行了800、1 200、1 600 A负荷电流的温升试验,通过红外仪及热电偶测量了盆式绝缘子表面的温度分布,验证了该仿真模型的有效性,并总结出不同负荷电流下仿真参数的设置规律。最后通过与单层模型仿真结果的对比分析表明多层模型的优化结果更加符合试验数据的温度变化规律。

关键词: GIS; 盆式绝缘子; 多层模型; 等效热源

Simulation of Temperature Distribution on GIS Basin Insulator Based on Multi-layer Model

GAO Kai¹, CHEN Honggang¹, LU Qiyu², XIA Haotian³, XU Leran³,
GUAN Yonggang³, DING Dengwei³

(1. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China; 2. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China; 3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: There are electrical contact points at both sides of the GIS basin insulator connected to the bus bar. The contact resistance may increase due to poor contact during the operation, resulting in abnormal heating and even cause a failure. In order to explore the temperature distribution of the basin insulator in operation, a 110 kV GIS basin insulator was used as a test platform. And a multi-layer simulation model of the basin insulator was established based on the platform parameters. The equivalent heat source was injected to simulate the heat transfer process of the conductor, SF₆ gas, and GIS shell to the basin insulator, instead of convection and radiation. The single calculation time was reduced from hours to minutes using this method. The speed of calculation was effectively improved under the premise of ensuring the accuracy of the results. The temperature rise tests at 800, 1 200, and 1 600 A load currents were carried out by the test platform. Infrared imager and thermocouples were used to measure the temperature distribution on the surface of basin insulator. The validity of the simulation model was verified by test data, and the regularity of simulation parameter settings under different load currents was summarized. Finally, compared with the simulation result of the single-layer model, the optimization result of the multi-layer model is closer to test data.

Key words: GIS; basin insulator; multi-layer model; equivalent heat source

收稿日期:2020-01-17; 修回日期:2020-03-18

基金项目:国家电网有限公司科技项目资助(520940170024)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(520940170024).

0 引言

随着中国电力事业的不断发展,气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated switchgear, GIS)以其占地面积小、故障概率低、环境影响小、可靠性高等优势在输变电领域得到了广泛应用^[1-3]。但是GIS全封闭的结构特点使其内部存在的异常发热、局部放电等轻微故障不易及早发现与检修^[4-6],随着运行时间的增长,会逐渐发展成过热性故障、绝缘击穿等恶性事故^[7-8]。相较于传统空气绝缘设备,GIS设备发生事故后,处理难度更大,耗费时间也更长。统计资料显示,导电回路故障和绝缘故障是GIS故障的主要类型,一些GIS设备故障在早期会表现出发热异常^[9-12]。

盆式绝缘子主要材料是环氧树脂,是GIS设备中极为重要的绝缘部件,用来对GIS中的高电压通流导体进行支撑固定,并使其对外壳、对地绝缘^[13-15]。在盆式绝缘子两边有与通流导体连接的接头,在GIS运行过程中,其接触电阻可能会因某些原因增大,因而产生的异常发热会加快电连接处的接触劣化,以及盆式绝缘子的绝缘老化,从而增大发生导电回路故障或绝缘故障的概率^[16-17]。因此,对GIS的盆式绝缘子进行温度分布及发热情形的评估有实际应用意义。

实际运行条件下,盆式绝缘子的热量来源主要包括通流导体、SF₆气体以及GIS外壳3部分。GIS内部SF₆气体会将从通流导体上吸收的热量通过对流传递给盆式绝缘子和GIS外壳。由于SF₆气体各处的温度和流速不同,其传递给盆式绝缘子和GIS外壳各处的热量也不同^[18-21],这给准确仿真计算增加了很大的负担。如果要考虑GIS内部SF₆气体对流,需要建立三维立体模型,计算需要几小时甚至更长时间。因此,绝大多数仿真研究只考虑了通流导体传递给盆式绝缘子的热量,而忽略了SF₆气体对流传热以及辐射传热的影响,并且对盆式绝缘子的网格剖分较粗糙,因而不能准确计算盆式绝缘子的热场分布^[22-25]。

文中提出一种GIS盆式绝缘子温度分布仿真计算的优化模型,对盆式绝缘子的环氧树脂复合材料部分进行多个环形分层,在各分层界面上单独设置等效热源,以模拟通流导体、SF₆气体对流和GIS外壳三者传递给盆式绝缘子的热量。该方法综合考虑了盆式绝缘子的全部热源,又不必进行对流及辐射传热计算,显著缩短了仿真计算时间,并有效提升了仿真结果的准确性。

1 GIS盆式绝缘子的多层模型

1.1 盆式绝缘子的基本结构

根据GIS盆式绝缘子的制造方法,环氧树脂复合材料采用热固化技术直接与中心导体固定,使盆式绝缘子的结构分为两部分:用于与通流回路连接的中心导体部分;以及支撑中心导体,使其与GIS外壳保持电气绝缘的环氧树脂复合材料部分。在盆式绝缘子的外边缘、中心导体上通常会开孔以满足GIS外壳对接和通流导体连接的要求。大部分盆式绝缘子的形状是一边凹进、一边凸起的盆状,其形状设计与电压等级、绝缘性能、机械强度等因素相关。该研究中进行试验的110 kV GIS盆式绝缘子见图1。

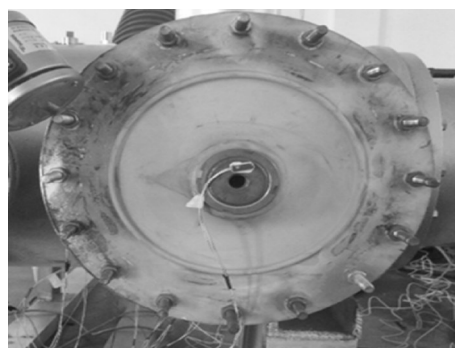


图1 110 kV GIS盆式绝缘子

Fig. 1 110 kV GIS basin insulator

1.2 盆式绝缘子的多层模型

文中研究针对图1的盆式绝缘子建立的多层模型示意图见图2。由于试验平台的盆式绝缘子凸起部分较小,为简化计算,在热计算模型中忽略了凸起的部分,简化建立了平板圆盘模型;忽略盆式绝缘子上存在的棱或螺栓孔等对热传导的影响。

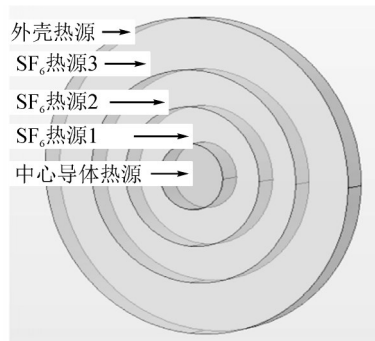


图2 盆式绝缘子的多层模型

Fig. 2 Multi-layer basin insulator model

图2圆柱体中心部分对应GIS的中心导体,材质为铜;外面3层同心的空心圆柱体是绝缘部分,材质为环氧树脂复合材料。模型中各部分的尺寸、材料属性等与盆式绝缘子试验平台保持一致。

该模型为模拟盆式绝缘子实际运行中的传热情况,使用第2类传热边界条件,在中心导体域、环氧树脂复合材料的3个环形表面、盆式绝缘子外边线上分别设置等效热源,以模拟通流导体、SF₆气体和GIS外壳传递给盆式绝缘子的热量;由于试验平台中绝缘子的一侧暴露于空气中,故在该侧表面设置第3类边界条件,规定空气的对流换热系数、材料的表面辐射率和周围环境的温度,以模拟外界环境对盆式绝缘子的散热情况。这样,在计算中只考虑“固体传导”和“表面辐射”两种热传递方式,对于各个环形接触面,不引入另外的接触热阻。

由于该仿真模型只涉及盆式绝缘子的热传导及热辐射,计算量较小,所以可以相应增加网格剖分的数量,以提高计算结果的精细度,同时仍可保证较快的计算速度。

文中研究使用自由四面体网格对模型进行剖分,见图3。若需进一步提高仿真结果的精细度,可以对上方一定角度的扇形区域进行网格加密,从而得到更多的数据点。这样的网格剖分设置,可以将计算时间控制在几分钟内,并得到更加精细的计算结果。

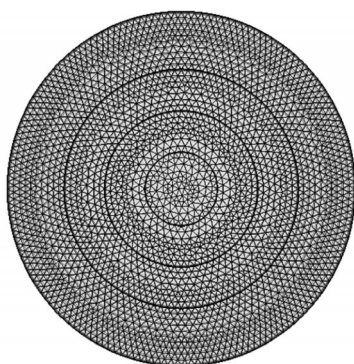


图3 网格剖分的优化

Fig. 3 Meshing optimization

2 仿真计算与试验分析

2.1 温升试验中盆式绝缘子表面的温度分布

为了确定仿真模型中等效热源的参数,同时也为了检验仿真模型的有效性,对盆式绝缘子试验平台进行了3组温升试验,负荷电流分别设置为800、1 200、1 600 A。待温升稳定后,使用FLIR P630红外热像仪对盆式绝缘子表面进行红外图像拍摄,结合FLIR Tools红外图像处理软件,得到了盆式绝缘子沿径向的温度分布数据。同时使用热电偶直接测温,校正红外热像仪的测量温度。盆式绝缘子所拍摄的红外图像图见图4。800、1 200、1 600 A负荷电流下温升稳定后盆式绝缘子沿图4所示径向

的温度分布数据分别见图5-7。

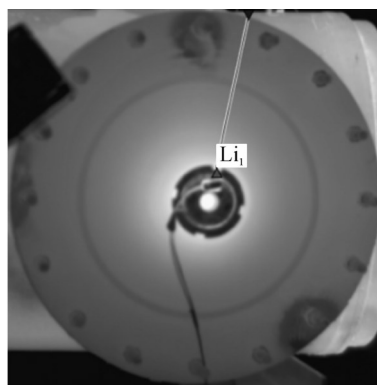


图4 红外图像处理

Fig. 4 Infrared image processing

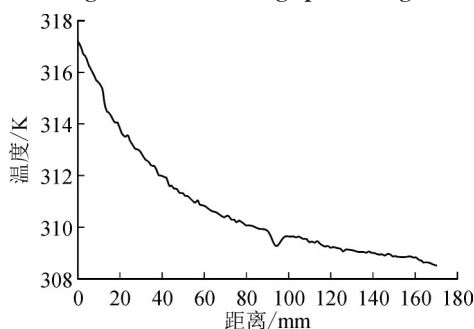


图5 800 A 负荷电流下盆式绝缘子沿径向温度分布

Fig. 5 Radial temperature distribution of basin insulator at 800 A load current

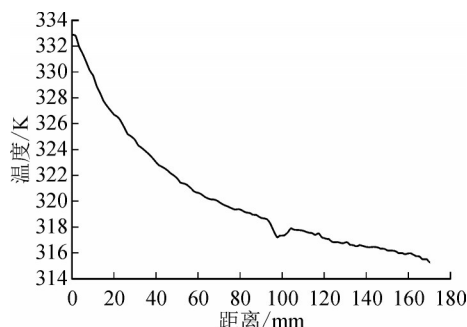


图6 1 200 A 负荷电流下盆式绝缘子沿径向温度分布

Fig. 6 Radial temperature distribution of basin insulator at 1 200 A load current

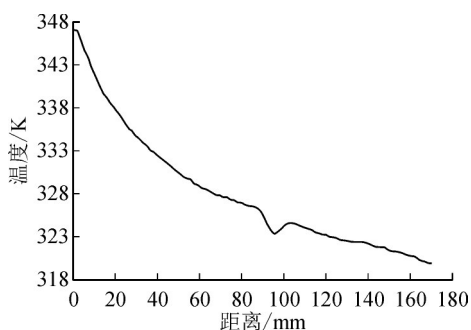


图7 1 600 A 负荷电流下盆式绝缘子沿径向温度分布

Fig. 7 Radial temperature distribution of basin insulator at 1 600 A load current

3种负荷电流下的温度曲线均在中间段出现一

小段凹陷,这是由于盆式绝缘子上该位置处存在一圈凸起的棱,从而影响其在红外图像上反映出的温度。

2.2 等效热源的确定

依据 1 200 A 负荷电流下的盆式绝缘子温度分布数据,对仿真模型中各部分热源进行了设置和调整,最终得到了与试验一致的仿真结果。多层模型的温度场仿真结果见图 8。

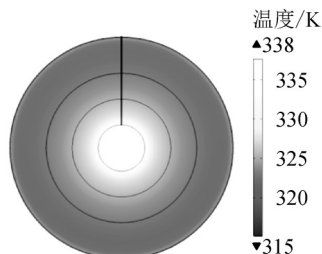


图8 温度场仿真结果

Fig. 8 Results of temperature field simulation

设置的通导体等效热源功率为 1.5 W, SF₆ 等效热源由内至外分别为 4.2、4.5、6.8 W, 外壳等效热源为 3 W。将仿真数据与 1 200 A 负荷电流下的试验数据进行对比, 见图 9。仿真数据沿图 8 中黑实线所示径向读取。该仿真结果除最高温度与试验数据略有差别外, 在温度变化曲线上基本与试验数据一致, 这证实了多层建模方法的有效性。

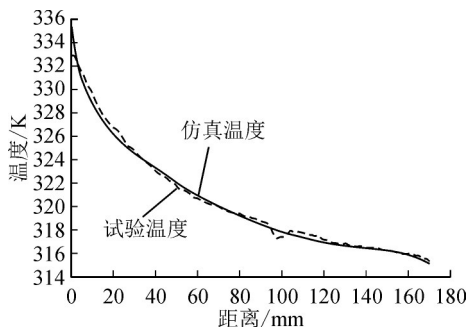


图9 仿真数据与试验数据的对比

Fig. 9 Data comparison of simulation and test

2.3 不同电流下仿真结果的规律性

在盆式绝缘子各部分的热源中, 中心导体产生的焦耳热与负荷电流的平方近似呈正比关系, 外壳产生的焦耳热与环流、涡流的平方呈正比关系, 而辐射传热和 SF₆ 气体的对流传热与各部分温度有关。本研究尝试探究不同负荷电流下, 盆式绝缘子各部分的等效热源是否呈现一定的规律性。

在依据 1 600、800 A 负荷电流下的试验数据对仿真模型的热源参数进行校准时, 改变了调整热源参数的方法。考虑到重复对每个独立的热源参数进行调整, 无法得到统一的适用规律, 设置了比例系数 k , 以统一的比例关系对全部热源进行调整。1 600、800 A 负荷电流下仿真数据与试验数据的对

比曲线分别见图 10、11。仿真中比例系数 k 与负荷电流与 1 200 A 之比的平方值之间的相对误差见表 1。

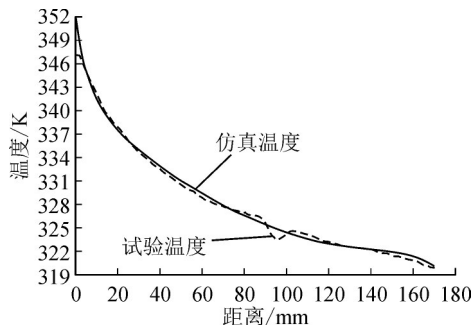


图10 1 600 A 负荷电流下的数据对比

Fig. 10 Data comparison at 1 600 A load current

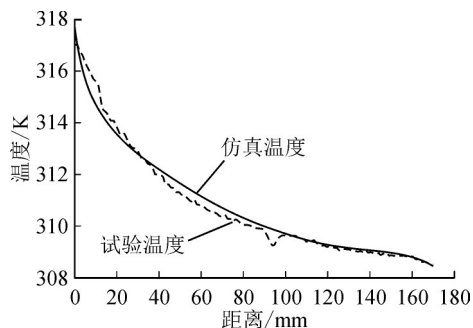


图11 800 A 负荷电流下的数据对比

Fig. 11 Data comparison at 800 A load current

表1 比例系数 k 与理论值间的关系

Table 1 Relationship between the proportional coefficient k and the theoretical value

负荷电流/A	理论比例值	比例系数 k	误差/%
1 600	1.777 8	1.635 6	8
800	0.444 4	0.431 1	3

800、1 200、1 600 A 负荷电流下的仿真数据与试验数据的最大差值分别为 0.91、2.55、4.81 °C, 且均出现在在盆式绝缘子与 GIS 中心导体相邻的 10 mm 范围内。

从图 10、11 可以看出, 按照固定比例系数 k 调整热源数值后也可以得到较准确的仿真结果。从表 1 中可以注意到, 比例系数 k 会比负荷电流的平方值略小, 这可能是 SF₆ 对流传热以及辐射传热过程造成的, 但是该相对误差是在允许范围内的。使用此仿真模型时, 通过一次温升试验数据的校准, 按照与电流平方呈正比的关系, 就可以较准确地得到其余负荷电流下盆式绝缘子的温度分布。

3 多层模型准确性的对比验证

现有的盆式绝缘子仿真研究中, 往往在建模时将环氧树脂复合材料部分看作一个整体, 即单层模型。这样的建模方式默认了 SF₆ 气体与盆式绝缘子

各位置的对流换热量相同。

该研究按照这样的思路建立了单层仿真模型, 并通过试验数据对热源参数进行了设置与调整。建立的单层模型见图12, 1 200 A 负荷电流时单层模型的仿真数据与试验数据、多层模型的仿真数据的对比见图13。

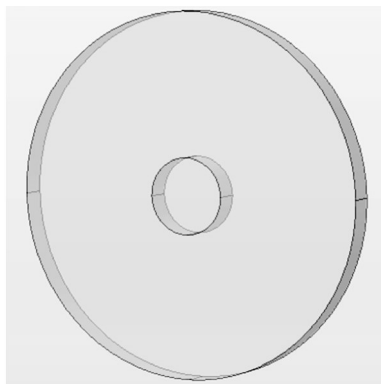


图12 盆式绝缘子单层模型

Fig. 12 Single-layer basin insulator model

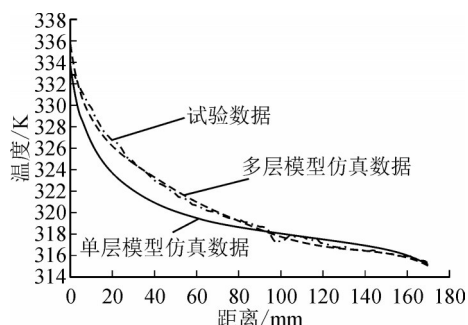


图13 单层模型、多层模型的仿真数据与试验值对比

Fig. 13 Data comparison among single-layer model, multi-layer model and test

图13反映出多层仿真模型的准确性。单层模型的仿真数据在盆式绝缘子内侧明显低于试验数据, 这表明在盆式绝缘子内侧, SF_6 气体的对流换热量应该高于外侧。提出的多层模型思路可以很好地模拟对流传热时存在的对流换热量随位置改变的现象。

4 结论

1)建立了GIS盆式绝缘子的多层模型, 并通过注入等效热源的方式模拟通流导体、 SF_6 气体以及GIS外壳对盆式绝缘子的热传递过程, 替代了复杂的对流及辐射传热计算, 使单次计算时间从几小时缩短至几分钟。

2)使用110 kV GIS盆式绝缘子试验平台进行了800、1 200、1 600 A 负荷电流下的温升试验, 使用FLIR P630红外热像仪和热电偶测量了盆式绝缘子表面温度分布规律。通过试验数据优化调整了仿真

模型中热源参数设置, 得到了不同负荷电流下仿真模型热源设置的规律, 验证了多层模型的有效性。

3)通过与单层模型仿真数据的对比, 验证了多层模型对盆式绝缘子表面温度分布规律仿真的准确性。该优化方法可以很好地模拟对流传热时存在的对流换热量随位置改变的现象。

参考文献:

- [1] 孙秋芹, 罗宸江, 汪 枫, 等. 特高压GIS盆式绝缘子沿面闪络特性研究综述[J]. 高压电器, 2018, 54(5): 17-25.
SUN Qiupin, LUO Chenjiang, WANG Feng, et al. Overview on the surface flashover of basin-type insulator in UHV GIS [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(5): 17-25.
- [2] 常文治, 毕建刚, 刘姝媛, 等. GIS盆式绝缘子典型缺陷的电场仿真[J]. 高压电器, 2018, 54(5): 138-143.
CHANG Wenzhi, BI Jiangang, LIU Shupin, et al. Electric field simulation of GIS insulators typical defects[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(5): 138-143.
- [3] MA G M, ZHOU H Y, SHI C, et al. Distributed partial discharge detection in a power transformer based on phase-shifted FBG[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(7): 2788-2795.
- [4] 王浩然, 郭子豪, 张丝钰, 等. 缺陷对特高压交流盆式绝缘子电场分布的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(3): 982-992.
WANG Haoran, GUO Zihao, ZHANG Siyu, et al. Influence of UHV AC GIS spacer defects on electrical field distribution[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 982-992.
- [5] 陈 飞. GIS设备的发展和应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
CHEN Fei. Development and application research of GIS equipment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [6] 宋国海. GIS安全技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
SONG Guohai. Research on GIS security technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [7] 毛金福. 220 kV GIS故障原因分析与处理[J]. 电工技术, 2019(17): 66-68.
MAO Jinfu. Cause analysis and treatment of 220 kV GIS failure[J]. Electrical Engineering Technology, 2019(17): 66-68.
- [8] 葛志成, 董冠良, 林 琛, 等. 500 kV GIS盆式绝缘子故障原因分析与处理[J]. 吉林电力, 2019, 47(4): 47-49.
GE Zhicheng, DONG Guanliang, LIN Chen, et al. Analysis and treatment of 500 kV GIS basin insulator failure[J]. Jilin Electric Power, 2019, 47(4): 47-49.
- [9] 马 慧. 简述变电站组合开关GIS的运行与维护[J]. 科技资讯, 2013(8): 155.
MA Hui. Brief introduction to the operation and maintenance of substation combination switch GIS[J]. Science and Technology Information, 2013(8): 155.
- [10] 崔杨柳, 马宏忠, 王涛云, 等. 基于故障树理论的GIS故障分析[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 125-133.

- CUI Yangliu, MA Hongzhong, WANG Taoyun, et al. GIS fault analysis based on fault tree theory[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 125-133.
- [11] 庄 丞, 曾建斌, 袁传镇. 表面异物对 252 kV 气体绝缘组合电器盆式绝缘子绝缘性能的影响[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4208-4216.
- ZHUANG Cheng, ZENG Jianbin, YUAN Chuazhen. Effect of surface foreign matter on the insulation performance of 252 kV gas-insulated combined appliance basin insulators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4208-4216.
- [12] 廖新征, 王红梅, 丁登伟, 等. 基于特高频时频分析的 GIS 盆式绝缘子缺陷分析[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 47-53.
- LIAO Xinzhen, WANG Hongmei, DING Dengwei, et al. Defect analysis of GIS basin insulators based on UHF time-frequency analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 47-53.
- [13] 郭子豪, 王浩然, 李 禾, 等. 特高压盆式绝缘子水压试验中应力应变分布的仿真计算与光纤测量[J]. 高电压技术, 2018, 44(3): 993-1002.
- GUO Zihao, WANG Haoran, LI He, et al. Calculation and experimental study on strain and stress distribution of UHV GIS spacer during hydrostatic test[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 993-1002.
- [14] 邓 丹, 陈 允, 崔博源, 等. 盆式绝缘子用环氧浇注材料的固化工艺及性能研究[J]. 绝缘材料, 2017, 50(10): 21-25.
- DENG Dan, CHEN Yun, CUI Boyuan, et al. Study on the curing process and performance of epoxy casting materials for pot insulators[J]. Insulating Materials, 2017, 50(10): 21-25.
- [15] 王 闯, 贾 静, 赵 朗, 等. 特高压 1 100 kV GIS 盆式绝缘子中心导体与绝缘盆体之间界面应力形成和作用过程讨论[J]. 西安理工大学学报, 2019, 35(2): 155-162.
- WANG Chuang, JIA Jing, ZHAO Lang, et al. Discussion on the formation and interaction process of the interface stress between the central conductor and the insulating basin of the 1 100 kV GIS Basin Insulator in UHV[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2019, 35(2): 155-162.
- [16] 孙国霞, 关向雨, 金向朝, 等. 基于多场耦合计算的气体绝缘开关设备母线接头过热性故障分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3445-3451.
- SUN Guoxia, GUAN Xiangyu, JIN Xiangchao, et al. Super-heat fault analysis of busbar joints for gas insulated switchgear based on multi-field coupling calculation[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3445-3451.
- [17] 郭伟林. 盆式绝缘子表面绝缘特性的影响因素研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- GUO Weilin. Study on influencing factors of surface insulation characteristics of basin insulators[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [18] 陈世萍, 丛浩熹. 基于有限元分析的单相 GIS 母线电热流耦合场仿真[J]. 信息通信, 2019(7): 1-2.
- CHEN Shiping, CONG Haoxi. Simulation of electromagnetic heat flow coupling field of single-phase GIS bus based on finite element analysis[J]. Information and Communications, 2019(7): 1-2.
- [19] 郭煜敬, 张 博, 王之军, 等. GIS 整间隔温升仿真及典型通流结构优化技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(s1): 257-265.
- GUO Yujing, ZHANG Bo, WANG Zhijun, et al. Research on GIS whole interval temperature rise simulation and typical flow structure optimization technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(s1): 257-265.
- [20] 汤清双, 李 猛, 李 鹏, 等. 大容量气体绝缘开关设备散热技术研究[J]. 电工电气, 2018(8): 25-29.
- TANG Qingshuang, LI Meng, LI Peng, et al. Research on heat dissipation technology of large-capacity gas-insulated switchgear [J]. Electrical Engineering, 2018(8): 25-29.
- [21] 周 甜, 李自品, 沈泉宇, 等. GIS 隔离开关触头温升多场耦合数值计算与分析[J]. 中国电力, 2018, 51(2): 13-20.
- ZHOU Tian, LI Zipin, SHEN Quanyu, et al. Numerical calculation and analysis of multi-field coupling for temperature rise of GIS disconnect switch contacts[J]. China Electric Power, 2018, 51(2): 13-20.
- [22] 张施令, 张丝钰, 王浩然, 等. 高压交流盆式绝缘子电热场模拟与绝缘事故分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 42-47.
- ZHANG Shiling, ZHANG Siyu, WANG Haoran, et al. Electrothermal field simulation and insulation accident analysis of high voltage AC basin insulators[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 42-47.
- [23] 李 意. 计及温度的 GIS 盆式绝缘子气隙缺陷特性的研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2018.
- LI Yi. Study on air gap defect characteristics of GIS basin insulators considering temperature[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2018.
- [24] 阮智玮, 阚超豪, 王 垒. 盆式绝缘子温度场仿真分析[J]. 电气工程学报, 2019, 14(3): 41-46.
- RUAN Zhiwei, KAN Chaohao, WANG Lei. Simulation analysis of temperature field of basin insulator[J]. Journal of Electrical Engineering, 2019, 14(3): 41-46.
- [25] 马 波, 吴旭涛, 李秀广, 等. GIS 温度场分布特性及影响因素的有限元仿真研究[J]. 绝缘材料, 2019, 52(3): 69-73.
- MA Bo, WU Xutao, LI Xiuguang, et al. Finite element simulation of GIS temperature field distribution characteristics and influencing factors[J]. Insulating Materials, 2019, 52(3): 69-73.

高 凯(1975—), 男, 高级工程师, 主要从事电力设备状态检测与诊断技术方面的研究。

夏昊天(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为 GIS 设备状态在线监测。