

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.05.021

基于252 kV三相盆式绝缘子水压试验的仿真分析及结构优化

武胜斌, 姜旭, 辛昭昭, 金松安, 马占峰, 陈志彬

(西安西电电气研究院有限责任公司, 西安 710075)

摘要:文中描述了252 kV三相盆式绝缘子破坏水压试验的情况,为明确三相盆式绝缘子破坏水压不能满足标准要求的原因,首先对252 kV三相盆式绝缘子进行了建模、仿真与分析,明确了三相盆式绝缘子相间盆式结构交汇处应力集中是破坏水压偏低的原因。随后对模型进行了改进,将应力集中由‘Y’型分布转化为‘△’型分布,显著降低了最大应力值,显著改善了盆式绝缘子的耐压状态。最后讨论给出了252 kV三相盆式绝缘子在强度设计过程中应结合仿真计算进行机械强度设计的基本思想。文中的工作为三相盆式绝缘子的设计提供了一定的参考。

关键词:有限元; 机械强度; 盆式绝缘子

Simulation Analysis and Structure Optimization Based on the Hydrostatic Test of 252 kV Three-phase Basin-type Insulator

WU Shengbin, JIANG Xu, XIN Zhaozhao, JIN Song'an, MA Zhanfeng, CHEN Zhibin

(Xi'an XD Electric Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: The destructive hydrostatic test of 252 kV three-phase basin-type insulator is described in this paper. In order to clarify why the destructive hydrostatic test of three-phase basin-type insulator could not meet the standard requirements, investigations are carried out in this paper. Firstly, the three-phase basin-type insulator is modeled, simulated and analyzed. It is specified that the stress concentration at the intersection of three-phase basin-type insulators causes lower pressure during destructive hydrostatic test. Secondly, the structure of the insulator is optimized and its ability of resisting compression is improved remarkably by changing the stress concentration from ‘Y’ type distribution to ‘△’ type distribution. Finally, some basic ideas for mechanical strength in optimization design are proposed, which are that simulations should be taken into account during the mechanical strength design for 252 kV three-phase basin-type insulator. Therefore, the work in this paper can provide useful references for the design of three-phase basin-type insulators.

Key words: finite element; mechanical strength; basin-type insulator

0 引言

起绝缘支撑及气室隔离作用的盆式绝缘子是GIS内绝缘故障的高发区^[1-4],因此绝缘子的绝缘设计在GIS的研发过程中具有十分重要的地位。由于GIS正常运行时相邻两气室压差很小,正常工作时起气室隔离作用的绝缘子承受的压力较低,因此设计人员对绝缘子的机械强度设计存在重视不够的情况。由于GIS在运行过程中也存在带电检修和带

电扩建的情况,在这类情况下起隔离气室作用的绝缘子将承受较大压差,一旦绝缘子机械强度不足将可能引发重大安全事故。

随着GIS设计技术的发展,252 kV三相绝缘子在三相共箱主母线的应用已经非常普遍^[5]。为了实现GIS的小型化设计,在252 kV三相绝缘子的设计过程中也采用了单相盆式绝缘子的盆式结构,其具有单相盆式绝缘子相间距小、爬电距离大的结构特点。然而,由于三相盆式绝缘子呈非轴对称结构,

且直径尺寸较单相绝缘子显著增大,三相盆式绝缘子的机械强度设计较为困难,开展252 kV三相盆式绝缘子机械性能研究已成为该类绝缘子设计的重要内容。基于此,文中首先对252 kV三相盆式绝缘子破坏水压试验的情况进行了描述;随后对三相盆式绝缘子进行了建模、计算与分析及结构的优化设计;最后讨论了252 kV三相盆式绝缘子在强度设计过程中应注意的问题。

1 252 kV 三相盆式绝缘子结构及水压试验

三相盆式绝缘子的主体结构是由三个单相盆式绝缘子以三角形安放在一起的组合结构形式,每个嵌件都处于对应的单相盆式绝缘子结构的中心。在绝缘子的中部区域有3个起连通两侧电路作用的金属嵌件,每个嵌件都处于对应盆式结构的中心。金属法兰是用来支撑环氧部分,避免安装时螺栓的紧固应力直接施加在环氧上,同时该法兰的存在使得绝缘子的浇注更加便利,绝缘子两侧罐体与绝缘子法兰构成外壳接地回路。在进行252 kV三相盆式绝缘子机械性能试验时,首先将浇注好的绝缘子安装到施加水压的工装上,然后在绝缘子的凹侧注满水后进行压力破坏。三相盆式绝缘子水压试验的现场图见图1,从图1可以明显的观察到绝缘子破裂后,水从裂缝处流出的现象。



图1 水压试验现场

Fig. 1 Hydraulic test site

采用相同的方式依次对两个盆式绝缘子的凹侧逐步施加水压直至发生破裂,破坏水压数值为1.48 MPa和1.45 MPa,拆除工装后,三相盆式绝缘子试验后的照片分别见图2、3。由于此三相盆式绝缘子设计的适用压力为0.6 MPa,根据GB 7674—2008规定绝缘隔板的破坏压力须按3倍的设计压力考核,该三相盆式绝缘子应能承受1.8 MPa的破坏压力。因此,试验中的三相盆子没有满足机械强度的要求。经分析和后续的试验验证,排除了可能由于嵌件与环氧之间的粘合力不够导致破坏水压过低这一因素,以及通过将3个嵌件表面进行滚花处理^[6]来改善盆子强度的措施。

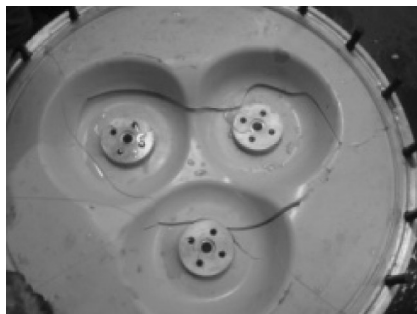


图2 破坏水压1.48 MPa

Fig. 2 Rupture pressure 1.48 MPa



图3 破坏水压1.45 MPa

Fig. 3 Rupture pressure 1.45 MPa

2 三相盆式绝缘子的建模与仿真

为了查找出水压试验中三相盆式绝缘子不能满足试验要求的原因及其改进设计方案。文中基于252 kV三相盆式绝缘子的结构进行了三相盆式绝缘子的建模和仿真计算。

2.1 三维模型及简化建模

三相盆式绝缘子的三维模型见图4。在绝缘子浇注过程中为了避免环氧收缩产生裂纹,在法兰与环氧接合面处涂了脱模剂,因此绝缘子产品的金属法兰与环氧之间在环氧固化过程形成了间隙。为了使环氧和金属法兰不脱离,在环氧圆周部分设计了如图4右侧图所示的凸台,在凸台与法兰之间也存在环氧收缩形成的间隙,三相盆式绝缘子在环氧圆周方向的凸台处的局部剖视图见图5。

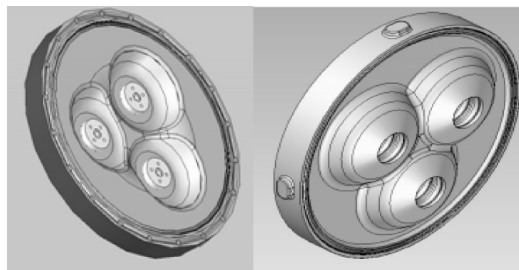


图4 三相盆式绝缘子的三维模型

Fig. 4 Three-dimensional model of three-phase basin-type insulator

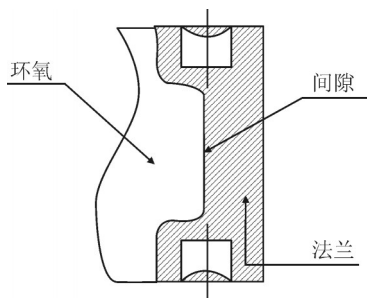


图5 环氧与法兰局部剖视图

Fig. 5 Section view of epoxy and flange

为了降低建模的复杂程度及仿真计算的难度,在不影响计算精度的条件下,需要对三维模型进行简化处理。由于嵌件表面受到的压力,仅与圆柱的横截面有关,因此可以将螺纹孔和台阶特征删除。3个金属嵌件与环氧之间采用环氧与金属嵌件直接贴合的简化处理方式^[7-11]。由于环氧与金属法兰之间存在间隙,因此水压试验时,绝缘子的金属法兰对绝缘子没有约束效果,因此可以省去盆式绝缘子的浇注口等圆周凸起部分,简化后的绝缘子外围见图6。

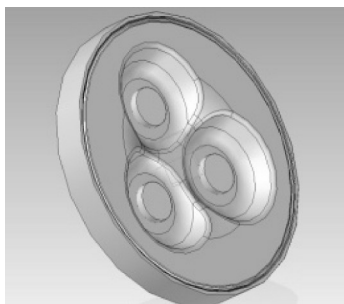


图6 简化后的模型

Fig. 6 Simplified model

三相盆式绝缘子约束条件图见图7。正常装配时,密封槽放置密封圈,密封圈与密封槽和对面箱体的法兰面相贴合,形成对箱体内气体的密封,因此,约束面选取图7中标注的绝缘子凹侧施加水压时对应箱体的法兰面。

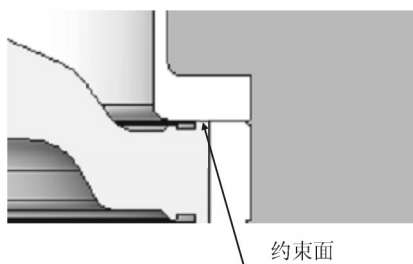


图7 约束条件意图

Fig. 7 Schematic drawing of constraint condition

2.2 仿真计算结果及分析

调用 Ansys 有限元软件包,导入简化后的三维

模型。设定环氧和铝嵌件的材料属性^[12-14],其中环氧(填充氧化铝)的弹性模量 1.2×10^{10} Pa、泊松比 0.31,铝导体的弹性模量 6.9×10^{10} Pa、泊松比 0.33。选取图7所示环氧的“受力面”为固定支撑面,在绝缘子的凹侧受力面上施加 2 MPa 的压强。计算得到应力分布云图见图8。从图8可以看出,最大应力处于中心的‘Y’型区域,计算得到的最大应力值为 109.78 MPa,嵌件粘结处的应力最大值约为 22 MPa。沿‘Y’型一条边的凸面应力分布情况,得到相应的应力分布曲线见图9,从图9可以看到应力分布是一个大波峰。

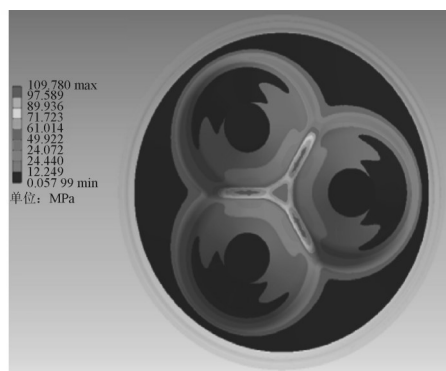


图8 凸侧应力分布云图

Fig. 8 Stress distribution nephogram

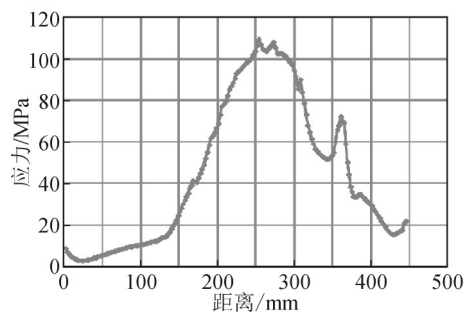
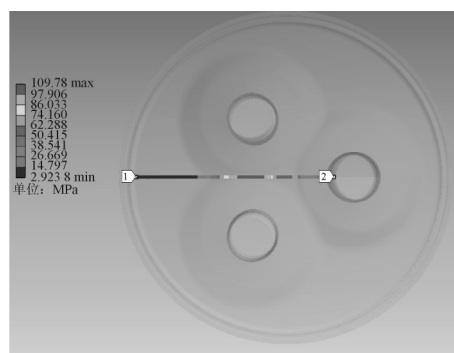


图9 凸面应力沿线分布曲线

Fig. 9 The distribution curve of the stress along the convex surface

环氧树脂浇注件(填充 Al_2O_3)机械强度特性与不同应力之间的关系^[15]见表1。以氧化铝为填料的环氧树脂在水压试验时,环氧树脂主要承受拉伸、弯曲应力,受原材料、工艺条件的影响。以表1中的数

值为参考标准,当原材料优良、工艺配方合理、工艺严格时破坏拉伸、弯曲应力为80 MPa。1.48 MPa对应计算的最大应力值为81.24 MPa,1.45 MPa对应的最大应力值为79.59 MPa。表明试验结果、建模计算的结果、表1的参考值基本一致,初步验证了仿真方法的合理性和正确性。

表1 环氧树脂浇注件(填充 Al_2O_3)的机械强度特性

Table 1 Mechanical strength property of epoxy resincasting parts (filling Al_2O_3) MPa						
应力	拉伸	扭转	剪切	弯曲	挤压	嵌件粘结
I级破坏应力	80	40	48	80	120	25
II级破坏应力	64	32	38	64	96	20

3 三相盆式绝缘子的结构优化及讨论

3.1 优化思路

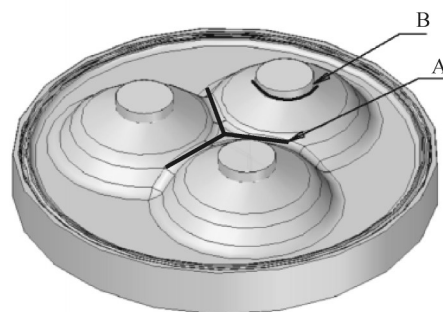
从有限元数值分析的结果来看,该三相盆式绝缘子在设计时没有处理好盆式结构及盆子交接处的结构。盆子交接处的‘Y’型部分结构突变,导致此部位应力过度集中,图9中的应力分布曲线也给出了直观的数值。因此,结合图1水压试验中呈现出的破裂痕迹,需对应力集中区域进行优化设计,对盆式绝缘子‘Y’型部分结构进行调整。

3.2 优化的结构及结果

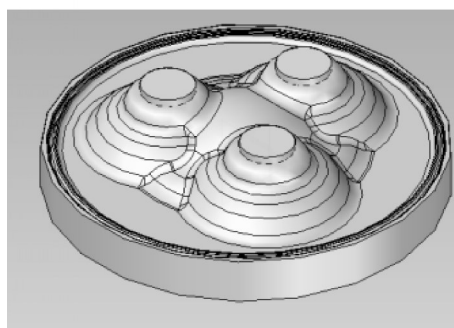
为了降低绝缘子‘Y’型结构部分的应力值,以及优化应力分布,文中主要采用加强‘Y’型部分的结构强度和调整‘Y’型区域结构的方式,来达到减少应力突变的目的。

改进前后的三相盆式绝缘子的三维模型见图10。修改了模型之后2 MPa压力条件下的绝缘子凸面应力分布情况见图11。为了加强‘Y’型部分的结构强度,将图10(a)中黑色粗线标注的‘Y’型区域(序号A)部分进行了填充加强,即增加了‘Y’型区域的厚度。从图10两图的比较可以看到,任意两嵌件间的结构突变由一处被分散成了两处,图11仿真结果对此进行了进一步证明。考虑到增大‘Y’型域强度后,将会影响到金属嵌件周围环氧的应力分布,因此增加了嵌件处(序号B)环氧的高度,而环氧高度的增加也增大了环氧与嵌件的粘结面积,降低了嵌件处粘结应力值,从而对嵌件附近环氧的机械强度起到改善作用。

从图11可以看出,最大应力值已由修改前的109.78 MPa降为修改后的63.07 MPa,且应力集中由‘Y’型分布转化为‘△’型分布。与图9相同路径的凸面的强度分布,得到相应的应力分布曲线见图12。从图12可以看出,应力分布较图9显著提升。



(a) ‘Y’型分布



(b) ‘Δ’型分布

图10 改进前后的三相盆式绝缘子的三维模型

Fig. 10 Three-dimensional model of three-phase basin-type insulator before and after improvement

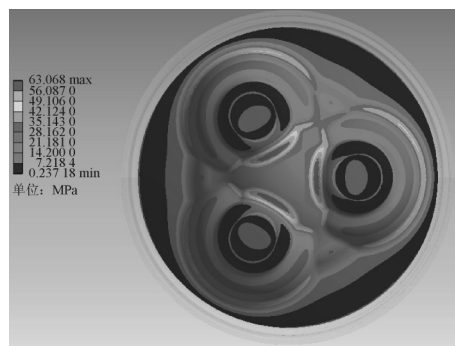


图11 凸侧应力分布云图

Fig. 11 Stress distribution nephogram

此外,在优化结构的计算过程中,除了结构及施加载荷大小不同外,边界条件类型、计算模型、所用工具均与图8结构下计算的情况相同,通过与表1中的数值进行对比不难发现,在2 MPa下的压力载荷下,优化后结构的最大应力值63.07 MPa小于环氧的破坏拉伸、弯曲应力值80 MPa。可以推断,优化结构后的盆式绝缘子足以耐受3倍使用压力1.8 MPa破坏压力的作用。

4 结论

文中针对三相盆式绝缘子破坏水压试验情况,进行了建模计算与分析,明确了破坏水压偏低的原因,并对模型结构进行了改进,得出如下结论:

1)由于三相盆式绝缘子的相间存在盆式结构交

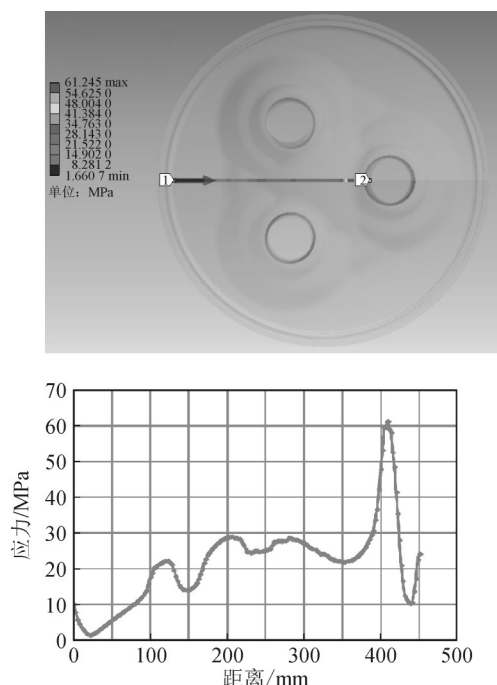


图12 凸面应力沿线分布曲线

Fig. 12 The distribution curve of the stress along the convex surface

汇的情况,如果处理不慎,将出现交汇处应力过度集中的情况,交汇处应力的过度集中是导致本类三相盆式绝缘子水压试验数值过低的主要原因。

2)采用对‘Y’型区域填充加强的方式,实现了应力集中由‘Y’型分布转化为‘△’型分布,从而显著分散了应力集中度,降低了最大应力值。

参考文献:

- [1] 周云锋,杨景刚,张子阳. 组合电器盆式绝缘子内部气隙缺陷的带电检测与分析[J]. 高压电器,2012,48(9):118-122.
ZHOU Yunfeng, YANG Jinggang, ZHANG Ziyang. On-line detection and analysis of gas cavity in insulator of gas insulated switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(9):118-122.
- [2] 田可新,王 钢. GIS绝缘子在冲击电压下沿面闪络的分析[J]. 高压电器,2003,39(6):17-19.
TIAN Kexin, WANG Gang. Analysis of the surface flashover on GIS basin insulator under lightning impulse voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(6):17-19.
- [3] 黎 斌. GIS盆式绝缘子金属外圈及屏蔽内环设计的必要性[J]. 高压电器,2012,48(8):109-112.
LI Bin. Necessity of design for the metal outer rings and shelding inner ring of GIS basin - type insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8):109-112.
- [4] 陈 仓,张 杰,赵满江,等. GIS典型绝缘故障案例及原因分析[J]. 电瓷避雷器,2013(6):7-14.
CHEN Cang, ZHANG Jie, ZHAO Manjiang, et al. Analysis of typical insulation fault cases of GIS[J]. Insulator and Surge Arresters, 2013(6):7-14.
- [5] 费龙菲,龚晓燕,陈 维. GIS/GCB用三相盘式绝缘子水压强度的影响因素分析[J]. 高压电器,2014,50(4):125-130.
FEI Longfei, GONG Xiaoyan, CHEN Wei. Factors influencing the water pressure of insulation spacer in GIS/GCB[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4):125-130.
- [6] 陈 允,崔博源,王宁华,等. 1 100 kV 盘式绝缘子改善机械强度的研究[J]. 高压电器,2015,51(7):52-56.
CHEN Yun, CUI Boyuan, WANG Ninghua, et al. Study of improving mechanical strength for 1 100 kV spacer insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7):52-56.
- [7] 陈 允,崔博源,王宁华,等. 1 100 kV 气体绝缘开关设备用盘式绝缘子中心嵌件结构设计[J]. 高电压技术,2016,42(2):564-570.
CHEN Yun, CUI Boyuan, WANG Ninghua, et al. Structural design of central insert in basin-type insulator used for 1 100 kV GIS[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2):564-570.
- [8] 吴海军. 环氧树脂真空浇注工艺过程及注意事项[J]. 变压器,2000,37(5):33-36.
WU Haijun. Resin vacuum cast process and its point for attention[J]. Transformer, 2000, 37(5):33-36.
- [9] 陈 平,刘胜平,王德中. 环氧树脂及其应用[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
CHEN Ping, LIU Shengping, WANG Dezhong. Epoxy resin and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [10] 何 愈. 高压SF₆开关用浇铸环氧树脂的研制和应用性能[J]. 热固性树脂,1998(3):53-60.
HE Yu. Preparation and application properties of casting epoxy resin for SF₆ high - voltage switch[J]. Thermosetting Resin, 1998(3):53-60.
- [11] 李盛彪,黄世强,王石泉. 胶粘剂选用与粘接技术[M]. 北京:化学工业出版社,2002.
LI Chengbiao, HUANG Shiqiang, WANG Shiquan. Adhesive selection and bonding technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [12] 孙永恒,魏俊梅. ZF15 -550型GIS母线用盘式绝缘子电场强度及机械强度计算[C]//中国电机工程学会高压电器委员会2004年学术会议论文集. [S. l.]:中国电机工程学会高压电器委员会,2004:855 -859.
SUN Yongheng, WEI Junmei. Calculation of electric field strength and mechanical strength of insulator in ZF15 -550 GIS[C]//Proceedings of the 2004 Academic Conference. [S. l.]: High Voltage Apparatus Committee of China Electrical Engineering Society, 2004:855-859.
- [13] 卢彦辉,段晓辉,张友鹏,等. 基于SolidWorks和Ansys的盘式绝缘子设计与分析[J]. 科技信息,2010(25):412.
LU Yanhui, DUAN Xiaohui, ZHANG Youpeng, et al. Design of typical insulation fault cases of GIS[J]. Insulator and Surge Arresters, 2013(6):7-14.

(下转第143页)

- 播路径的分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(5): 1044-1048.
- LIU Junhua, GUO Canxin, YAO Ming, et al. Analysis on the propagation routes of electromagnetic waves of partial discharge in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(5): 1044-1048.
- [13] 刘君华, 姚明, 黄成军, 等. GIS中局部放电电磁波的模式特性[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1654-1660.
- LIU Junhua, YAO Ming, HUANG Chengjun, et al. Characteristics of PD EM-wave modes in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1654-1660.
- [14] 刘有为, 吴立远, 弓艳明. GIS设备气体分解物及其影响因素研究[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 58-61.
- LIU Youwei, WU Liyuan, GONG Yanming. Investigation on SF₆ decomposition products in GIS and affecting factors[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 58-61.
- [15] 肖登明, 董越, 黄东海. 我国特高压输电工程的GIS技术[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 115-117.
- XIAO Dengming, DONG Yue, HUANG Donghai. GIS technology of UHV transmission engineering in China[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 115-117.
- [16] JUDD M D. Using finite difference time domain techniques to model electrical discharge phenomena[J]. Report Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena Annual, 2000(2): 518-521.
- [17] JUDD M D, HAMPTON B F, FARISH O. Modelling partial discharge excitation of UHF signals in waveguide structures using green's functions[J]. IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology, 1996, 143(1): 63-70.
- [18] 丁登伟, 高文胜, 刘卫东. 采用特高频法的GIS典型缺陷特性分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 706-710.
- DING Dengwei, GAO Wensheng, LIU Weidong. Analysis on the typical partial discharge using UHF detection method for GIS[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 706-710.
- [19] 郑文栋, 王辉, 钱勇, 等. 基于自适应仿射传播聚类的GIS局放缺陷分类研究[J]. 高压电器, 2013, 49(8): 50-55.
- ZHENG Wendong, WANG Hui, QIAN Yong, et al. Pattern recognition of partial discharge in GIS based on the adaptive affinity propagation clustering algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(8): 50-55.
- [20] 黎斌. SF₆高压电器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- LI Bin. Design of SF₆ high voltage apparatus[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2015.
- 常文治(1983—), 男, 博士, 高工, 研究方向为电力设备在线监测与状态评估。
- 毕建刚(1977—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为电力设备在线监测与状态评估。
- ~~~~~
- (上接第 137 页)
- sign and analysis of salver-shaped insulator based on SolidWorks and Ansys[J]. Science & Technology Information, 2010(25): 412.
- [14] CHEN Yuqiang, Jin Song'an, WANG Yong, et al. Calculation and verification of inner hydraulic strength of basin-type insulator[C]//2017 4th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology. [S.l.]: IEEE, 2017: 1015-1019.
- [15] 黎斌. SF₆高压电器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- LI Bin. SF₆ high voltage apparatus designing[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- 武胜斌(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事高电压与绝缘技术研究及高压GIS设计工作。
- 姜旭(1982—), 男, 博士, 工程师, 主要从事开关电器设计与研发工作。