

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.05.016

影响GIL柱式环氧树脂复合绝缘子绝缘性能的因素

王娜, 戴通令, 刘吉成, 吴文海, 余良清, 张浩

(新东北电气集团高压开关有限公司, 沈阳 110025)

摘要: 气体绝缘刚性输电线路(GIL), 具有结构紧凑、安全可靠、输送容量大、电容电流小、无电磁干扰等优点。GIL中的绝缘子在结构中起着支撑带电导体的作用, 其性能和可靠性直接决定了整个GIL产品的技术水平和长期运行可靠性。文中对影响环氧树脂复合绝缘子绝缘性能的因素进行分析, 包括绝缘子根部圆角半径、绝缘子支柱倾角、绝缘子低压端嵌件直径、绝缘子高压端嵌件处环氧树脂厚度, 并得出如下结论: 在结构允许的前提下, 绝缘子根部圆角半径越大, 沿面电场强度值越小; 绝缘子支柱的倾角越大, 绝缘子沿面电场强度值越小, 但低压端嵌件上电场强度值越大, 设计时要兼顾考虑; 低压端嵌件直径越大, 嵌件上电场强度值越小; 高压端嵌件处环氧树脂厚度越大, 绝缘子沿面矢量合成值越大, 高压端嵌件上电场强度值越小, 设计时要同时考虑。根据文中理论基础研制的特高压GIL柱式环氧树脂复合绝缘子顺利通过了全部绝缘型式试验, 验证了相关结论的可靠性。

关键词: 气体绝缘刚性输电线路; 支柱式; 环氧树脂复合绝缘子; 绝缘性能

Factors Affecting Insulation Performance of GIL Column Epoxy Resin Composite Insulators

WANG Na, DAI Tongling, LIU Jicheng, WU Wenhai, YU Liangqing, ZHANG Hao

(New Northeast Electric Group High Voltage Switchgear Co., Ltd., Shenyang 110025, China)

Abstract: Gas-insulated transmission line (GIL) has the advantages of compact structure, safety and reliability, large transmission capacity, small capacitance current and no electromagnetic interference. The insulator supports the conductor in GIL, its performance determines the technical level and the long-term reliability of GIL. This paper analyzes the factors of insulation performance for epoxy resin composite insulator, including the root R of column insulator, the angle of column insulator, the diameter of low voltage terminal component, the epoxy thickness of high voltage terminal component. The results are as follows: under the permission of the structure, the larger of the root R of column insulator, the smaller the electric field intensity; the larger the angle of column insulator, the smaller the electric field intensity, however, the greater the electric field intensity on the low voltage terminal component, the more consideration should be taken in the design. The larger of the low voltage terminal component diameter, the smaller the intensity of the electric field; the larger of the epoxy thickness of high voltage terminal component, the larger the value of the surface vector of the insulator is, the smaller the electric field intensity of the high voltage terminal component is, the design should be considered at the same time. The UHV GIL column insulator which developed with above theories has passed the insulation type test, which indicates the reliability of the related conclusions.

Key words: gas-insulated transmission line (GIL); columnar form; epoxy resin composite insulator; insulation performance

0 引言

气体绝缘刚性输电线路(GIL)具有结构紧凑、安全可靠、输送容量大、电容电流小、无电磁干扰等优点, 特别是在环境或结构对架空线有限制时非常合适^[1-3]。随着中国乃至全球电力的发展, 城市规模及用电负荷的增加, GIL市场已逐步进入壮大期^[4-9]。

GIL由金属外壳、导体、支撑绝缘子及伸缩节等部件组成, 其中支撑绝缘子在GIL的结构中起着连接及支撑带电导体的重要作用, 在产品的运行中承受电场强度和机械应力, 其性能和可靠性直接决定了整个GIL产品的技术水平和长期运行可靠性^[10-14]。因此, 绝缘子材料的选择、性能的可靠性对整体GIL的设计至关重要。

环氧树脂与固化剂的组合搭配使环氧树脂复

合绝缘子具有优良的物理、力学性能,介电性能以及良好的可加工工艺性^[15],因此是用作 GIL 绝缘部件的理想材料。文中对影响环氧树脂复合绝缘子绝缘性能的几个因素进行理论分析计算,为 GIL 柱式环氧树脂复合绝缘子的设计提供理论支撑。

1 GIL 柱式环氧树脂复合绝缘子结构及特点

GIL 柱式环氧树脂复合绝缘子根据其结构可以做成单柱式、双柱式及三柱式等形状,见图 1。单柱式绝缘子可防止母线自重变形时采用,若要防止母线多方向变形,可设计成三柱式结构。

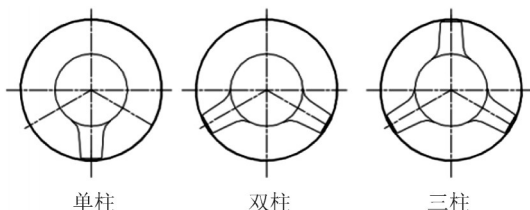


图 1 GIL 柱式环氧树脂复合绝缘子示意图

Fig. 1 The figure of columnar epoxy resin composite insulator of GIL

根据 GIL 结构的需要,柱式环氧树脂复合绝缘子可以做成固定式和滑动式结构,固定三柱式绝缘子固定连接于导体和外壳上。滑动三柱式绝缘子连接在导体上,由于温度变化等因素,导致导体和罐体长度变化不一致时,滑动绝缘子能够相对外壳进行滑动^[16-18]。

2 GIL 柱式环氧树脂复合绝缘子绝缘性能分析

采用有限元数值分析方法^[19-20]对 GIL 环氧树脂复合绝缘子绝缘性能进行计算分析,由于 GIL 柱式环氧树脂复合绝缘子为非轴对称结构,因此采用三维有限元方法对其绝缘性能进行分析计算。以图 1 中三柱式结构为例,从三柱整体结构中选取典型的沿面,计算其电场强度分布,沿面所示见图 2。

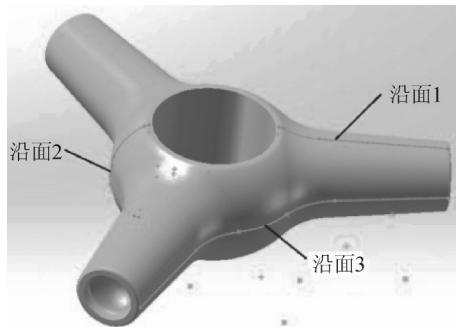


图 2 计算沿面说明

Fig. 2 The description of surfaces

以特高压 GIL 柱式环氧树脂复合绝缘子结构为例,采用有限元分析软件对三柱绝缘子进行电场强度计算,计算中高电位施加雷电冲击耐受电压 2 400 kV,罐体侧施加零电位,计算结果见图 3-6,各沿面详细计算结果汇总见表 1。

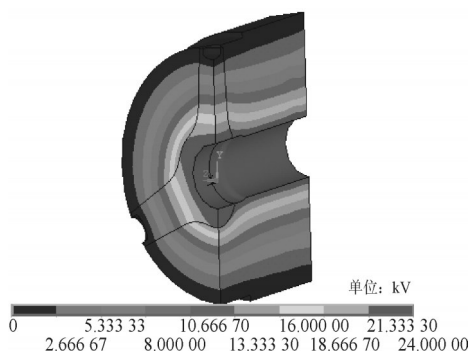


图 3 GIL 电位等值分布云图

Fig. 3 The voltage distribution of GIL

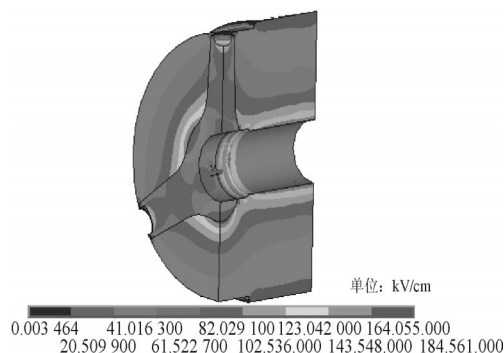


图 4 GIL 电场强度等值分布云图

Fig. 4 The electric intensity distribution of GIL

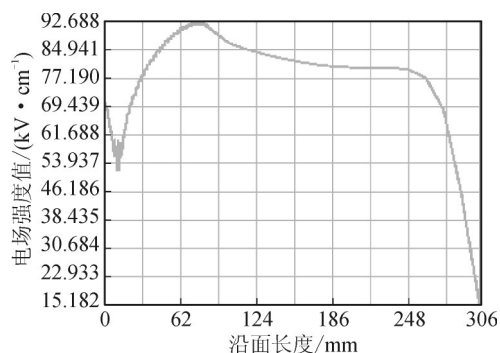


图 5 柱式绝缘子切向场强分布曲线(沿面 1)

Fig. 5 The E_t distribution of columnar insulator(surface 1)

从表 1 计算结果可以看出,GIL 柱式环氧树脂复合绝缘子电场强度分布存在如下特点:

- 1)柱式绝缘子沿面 1 的切向值 E_t 最大;
- 2)柱式绝缘子沿面 2 的矢量合成值 E_{abs} 最大;
- 3)柱式绝缘子低压端嵌件电场强度值大于高压端嵌件。

影响绝缘件绝缘性能的主要因素在于沿面的

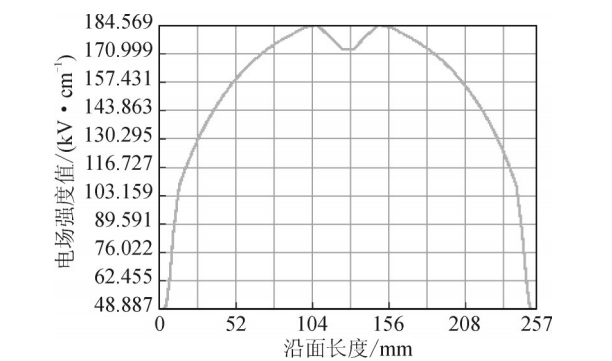


图6 柱式绝缘子矢量合成场强分布曲线(沿面2)
Fig. 6 The E_{abs} distribution of columnar insulator (surface 2)

表1 三柱绝缘子沿面电场强度计算结果汇总
Table 1 The electric intensity of the column insulator

沿面1		沿面2		沿面3		高压端	低压端
E_s	E_{abs}	E_s	E_{abs}	E_s	E_{abs}	嵌件	嵌件
92.7	114.3	49.3	184.6	91.0	172.5	99.8	134.6

切向值、矢量合成值及绝缘子内部与电极交界处(即金属嵌件处)的电场强度分布^[16]。因此,三柱绝缘子设计时要确保其沿面的切向值、矢量合成值及绝缘子内部与电极交界处电场强度值在产品结构可以实现的范围内尽可能小。

3 影响 GIL 柱式环氧树脂复合绝缘子绝缘性能的因素

根据上述对 GIL 三柱绝缘子绝缘性能的计算,分析影响其绝缘性能的因素主要有如下几项。

3.1 柱式绝缘子根部圆角半径 R 大小

柱式绝缘子沿面切向值 E_s 最大值出现在沿面1的凹陷处,即倒角 R 处(见图7),改变 R 的大小,对柱式绝缘子电场强度进行优化计算,柱式绝缘子沿面1电场强度值与倒角 R 的关系见8。

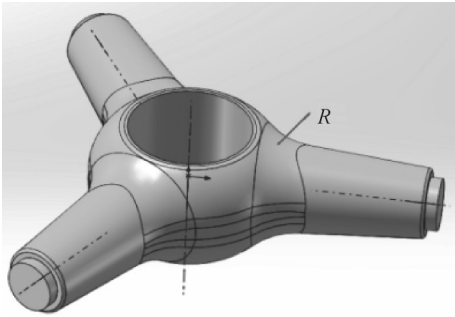


图7 柱式绝缘子根部圆角
Fig. 7 The root R of column insulator

从图8可以看出,柱式绝缘子沿面1的切向值及矢量合成值随着倒角 R 的增大而减小。可见,在

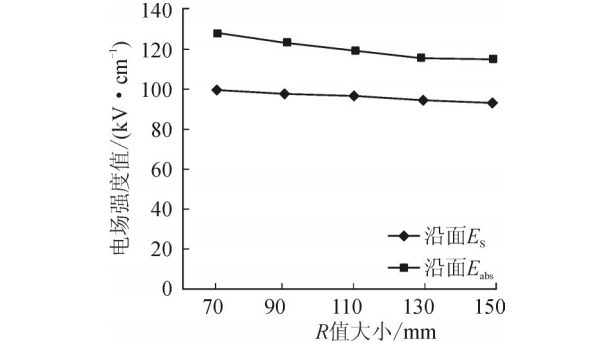


图8 沿面1电场强度值与倒角 R 的关系曲线
Fig. 8 The curve between electric intensity and R of surface 1

结构允许的前提下,适当的选择较大的 R 值,可以减小柱式绝缘子沿面的切向值及矢量合成值,从而改善绝缘子沿面绝缘性能。

3.2 柱式绝缘子支柱倾角 α 大小

柱式绝缘子支柱倾角的大小对绝缘子沿面电场分布有影响,倾角示意见图9。在其他条件不变的前提下,改变倾角 α 的大小,计算柱式绝缘子电场强度值,倾角大小与柱式绝缘子电场强度值的关系见图10。

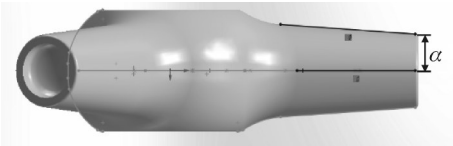


图9 支柱倾角示意图
Fig. 9 The angle between electric intensity and the insulator

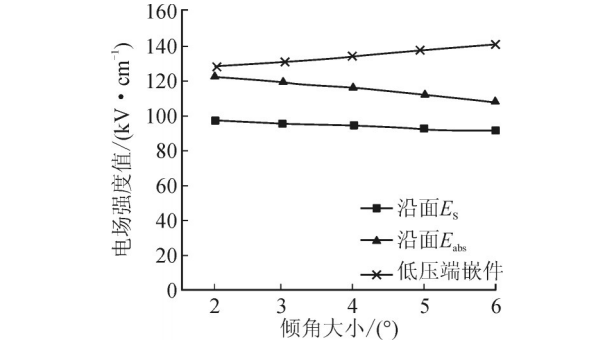


图10 绝缘子沿面电场强度与支柱倾角大小的关系曲线
Fig. 10 The curve between electric intensity and angle α

从图10可以看出,随着柱式绝缘子支柱倾角的增大,绝缘子沿面1的切向值及矢量合成值减小,但绝缘子低压端嵌件上电场强度值增大。因此,设计柱式绝缘子形状时,不能为了减小柱式绝缘子沿面电场强度值单纯增大支柱的倾角,还要兼顾考虑低压端嵌件上电场强度值。

3.3 柱式绝缘子低压端嵌件直径 D

柱式绝缘子低压端嵌件直径 D 对其表面电场分

布有着重要的影响,通过调整嵌件的直径,可以降低其表面最大电场强度值,使环氧树脂与金属嵌件界面处的电场强度值降低,电场分布更加均匀。

在支柱直径不变、倾斜角度不变、嵌件高度不变的前提下,改变低压端金属嵌件的直径,见图11,得出低压端嵌件直径与其电场强度值的关系见图12。

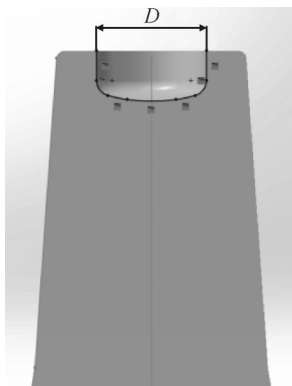


图11 低压端嵌件形状

Fig. 11 The shape of low voltage metal

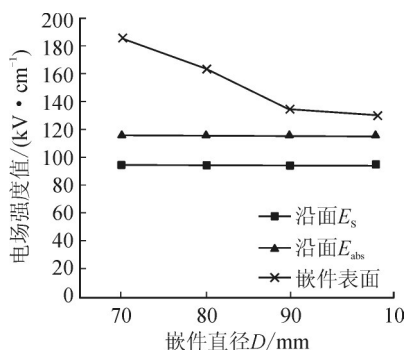


图12 绝缘子沿面电场强度与低压端嵌件直径大小关系曲线

Fig. 12 The curve between electric intensity and low voltage metal diameter

从图12可以看出,低压端嵌件直径越大,嵌件上电场强度值越小,支柱绝缘子沿面切向值及矢量合成值基本保持不变。

同时,低压端嵌件形状变化越平缓,其电场强度值越小,电场强度越均匀,设计时可以通过多段圆弧过渡来实现。

3.4 高压端嵌件处环氧树脂的厚度 d

从表1计算结果可以得出,柱式环氧树脂复合绝缘子矢量合成场强值最大处位于沿面2,改变沿面2,即高压端嵌件处环氧树脂的厚度 d ,见图13,其余参数不变,得到环氧树脂厚度与绝缘子沿面电场强度关系曲线图,见图14。

从图14中可见,高压端嵌件处环氧树脂厚度 d 越大,绝缘子沿面矢量合成值越大,高压端嵌件上电场强度值越小。

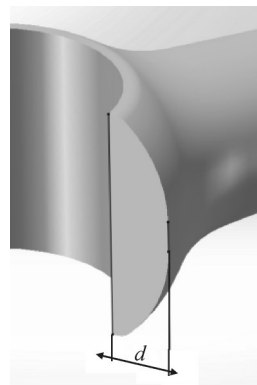


图13 高压端嵌件处环氧树脂厚度 d 示意

Fig. 13 The epoxy thickness d of high voltage metal

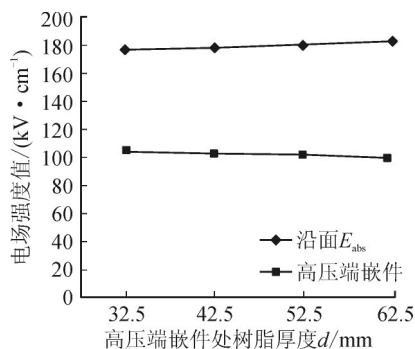


图14 绝缘子沿面电场强度与高压端嵌件处环氧树脂厚度关系曲线

Fig. 14 The curve between electric intensity and the epoxy thickness of high voltage metal

4 特高压GIL柱式环氧树脂复合绝缘子的成功研制

根据上述对GIL柱式环氧树脂复合绝缘子绝缘性能影响因素的分析,文中经过反复优化设计,研制出了性能可靠的特高压GIL柱式环氧树脂复合绝缘子,见图15。该柱式绝缘子已经顺利通过了产品的各项绝缘型式试验,验证了其结构设计的合理性。



图15 特高压GIL柱式环氧树脂复合绝缘子

Fig. 15 The UHV columnar epoxy resin composite insulator

5 结论

文中对柱式环氧树脂复合绝缘子绝缘性能进行计算分析,并通过仿真计算分析了影响其绝缘性

能的因素,得出如下结论:

1)高、低压端嵌件与环氧树脂交界面的电场强度值会影响绝缘子的电场强度分布;

2)为降低柱式绝缘子沿面切向场强值,可以适当增大支柱根部倒角并增大支柱倾角;

3)增大低压端嵌件直径,采用多段圆弧过渡的结构,可以有效地改善低压端嵌件上电场强度值,从而改善环氧树脂与低压端金属嵌件界面处电场强度值及电场强度分布;

4)减小高压端嵌件处环氧树脂厚度可以有效降低支柱绝缘子沿面矢量合成值。

参考文献:

- [1] 赫曼·科赫. 气体绝缘输电线路[M]. 北京:机械工业出版社,2017.
KOCH H. Gas-insulated transmission lines[M]. Beijing:China Machine Press,2017.
- [2] 范建斌. 气体绝缘金属封闭输电线路及其应用[J]. 中国电力,2008,41(8):38-43.
FAN Jianbin. Gas insulated metal enclosed transmission line(GIL)and its application[J]. Electric Power,2008,41(8):38-43.
- [3] 宋邦申. 浅谈气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)的发展趋势[J]. 电工文摘,2010(3):6-7.
SONG Bangshen. The develop trend of the gas insulated transmission line[J]. Electrician Abstracts,2010(3):6-7.
- [4] 王湘汉,汪 汎,邱毓昌. 气体绝缘传输线的近期发展动向[J]. 高压电器,2008,44(1):69-72.
WANG Xianghan, WANG Feng, QIU Yuchang. Recent development trend of gas insulated line[J]. High Voltage Apparatus,2008,44(1):69-72.
- [5] 尚 涛,李 果. 气体绝缘输电线路的特点及其应用[J]. 南方电网技术,2011,5(1):81-84.
SHANG Tao, LI Guo. Discussion on the characteristics of GIL and its application in power systems[J]. Southern Power System Technology,2011,5(1):81-84.
- [6] 陈 琳,雷 鸣,汤 鑫. 气体绝缘输电线路的结构特点及安装方式的探讨[J]. 高压电器,2013,49(5):120-123.
CHEN Lin, LEI Ming, THANG Xin. Discussion on the structural features and installation method of the gas-insulated transmission lines[J]. High Voltage Apparatus,2013,49(5):120-123.
- [7] KOCH H, HOPKINS M. Overview of gas insulated lines[C]// Power Engineering Society General Meeting. California, USA:IEEE,2005:940-944.
- [8] KOCH H, KUMAR A, CHRISTL N, et al. Advanced technologies for power transmission and distribution-benefits and impact of innovations[Z]. Germany:Siemens Brochure,2010.
- [9] KOCH H. Innovative trends in the high voltage field[C]// IEEE PES Substations Committee Meeting. Bellevue, WA:IEEE,2007:4.
- [10] 阮全荣,李 晖,刘国锋,等. 高落差垂直竖井 GIL 隔室设置的研究[J]. 高压电器,2010,46(8):52-55.
RUAN Quanrong, LI Hui, LIU Guofeng, et al. Research on arrangement of GIL compartment in high drop vertical shaft[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(8):52-55.
- [11] 张高潮. 气体绝缘输电线研究现状[J]. 绝缘材料,2014,47(6):6-9.
ZHANG Gaochao. Research situation of gas-insulated transmission line[J]. Insulating Materials,2014,47(6):6-9.
- [12] 冶海廷,王亦平,马仲鸣. 拉西瓦水电站 800 kV GIL 结构特点及安装试验[J]. 水力发电,2009,35(11):60-62.
YE Haiting, WANG Yiping, Ma Zhongming. The structures and tests of the 800 kV GIL in La xiwa[J]. Water Power,2009,35(11):60-62.
- [13] KUROYANAGI Y, TOYA A. Institute of electric and electronic engineer construction of 8 000 a class 275 kV gas insulated transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1990,5(1):14-20.
- [14] VOLCKER O, KOCH H. Insulation co-ordination for gas insulated transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2001,16(1):122-130.
- [15] 俞翔霄,俞赞琪,陆惠英. 环氧树脂电绝缘材料[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
YU Xiangxiao, YU Zhanqi, LU Huiying. The epoxy electric insulation material[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2007.
- [16] 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 electric appliance design[M]. Beijing:China Machine Press,2003.
- [17] 朱德恒,严 璋. 高电压绝缘[M]. 北京:清华大学出版社,1992.
ZHU Deheng, YAN Zhang. High voltage insulation[M]. Beijing:Tsinghua University Press,1992.
- [18] 徐国政,张节容. 高压断路器原理和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
XU Guozheng, ZHANG Jierong. The theory and application of high voltage circuit breaker[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2000.
- [19] 刘 涛,杨凤鹏. 精通 Ansys[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
LIU Tao, YANG Fengpeng. Conversance with Ansys[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2002.
- [20] 谢德馨. 三维涡流场的有限元方法[M]. 北京:科学出版社,1999.
XIE Dexin. The finite analysis of three-dimensional vortex[M]. Beijing:Science Press,1999.

- bination and multiple feature fusion method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 334-340.
- [11] 张晓星,唐 炬,彭文雄,等. GIS局部放电检测的微带贴片天线研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(12): 1596-1599.
ZHANG Xiaoxing, TANG Ju, PENG Wenxiong, et al. Study on the outer UHF microstrip patch antenna for partial discharge detection in GIS[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(12): 1596-1599.
- [12] 唐 炬,许中荣,孙才新,等. 应用复小波变换抑制GIS局部放电信号中白噪声干扰的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 30-34.
TANG Ju, XU Zhongrong, SUN Caixin, et al. Application of complex wavelet transform to suppress white-noise interference in GIS PD signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 30-34.
- [13] 司文荣,李军浩,袁 鹏,等. 基于波形非线性映射的多局部放电脉冲群快速分类[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 216-221.
SI Wenrong, LI Junhao, YUAN Peng, et al. The fast grouping technique of PD sequence based on the nonlinear mapping of pulse shapes[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 216-221.
- [14] 李 化,杨新春,李 剑,等. 基于小波分解尺度系数能量最大原则的GIS局部放电超高频信号自适应小波去噪[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 84-91.
LI Hua, YANG Xinchun, LI Jian, et al. The maximum energy of wavelet decomposition approximation-related adaptive wavelet de-noising for partial discharge UHF pulse in GIS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 84-91.
- [15] 金立军,张明锐,刘卫东. GIS局部放电故障诊断试验研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(11): 88-92.
JIN Lijun, ZHANG Mingrui, LIU Weidong. Examination and research on the partial discharge fault diagnostics in gas insulated switchgear[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(11): 88-92.
- [16] 司文荣,李军浩,袁 鹏,等. 气体绝缘组合电器多局部放电源的检测与识别[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16): 119-126.
SI Wenrong, LI Junhao, YUAN Peng, et al. Detection and identification techniques for multi-PD sources in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 119-126.
- [17] 王 娜,李春生. 工频电场、磁场标准对比及建议[J]. 电力科学与工程 2007, 23(1): 62-64.
WANG Na, LI Chunsheng. Comparison and suggestion on power frequency electric field[J]. Electric Power Science and Engineering, 2007, 23(1): 62-64.
- [18] 谈克雄,薛家麒合. 高压静电场数值计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
TAN Kexiong, XUE Jiaqige. Numerical high voltage electric field calculation[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1990.
- [19] 卫李静,王伯时,汪忆新,等. 均压环对复合绝缘子电场分布影响的研究[J]. 高压电器, 2006, 42(4): 262-264.
WEI Lijing, WANG Boshi, WANG Yixin, et al. Effects of shielding rings on the electric field distributions of composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(4): 262-264.
- [20] 范建斌,谷 琛,殷 禹,等. ± 800 kV 管母线的电晕起始特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 47-52.
FAN Jianbin, GU Chen, YIN Yu, et al. Research on corona onset performance of ± 800 kV bus bar[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 47-52.
- [21] 刘浩军,宫瑞磊,王曙鸿,等. 252 kV 分支母线结构的改进设计[J]. 高压电器, 2014, 50(10): 112-115.
LIU Haojun, GONG Ruilei, WANG Shuhong, et al. Improvement design of 252 kV branch busbar structure[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(10): 112-115.
- [22] 万保权,郭 雄,杨毅波,等. 750 kV 变电站母线电磁环境参数的试验研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(3): 57-59.
WAN Baoquan, WU Xiong, YANG Yibo, et al. Study on electromagnetic environment of bus in 750 kV station[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(3): 57-59.
- 熊 俊(1983—),男,硕士,高级工程师,研究方向为GIS在线监测技术、气体放电理论。
- 莫文雄(1971—),男,硕士,高级工程师,研究方向为GIS在线监测技术、气体放电理论。
- 张 强(1990—),男,博士研究生,研究方向为电气设备在线监测与故障诊断。
- 李成榕(1957—),男,教授,博士生导师,从事电力系统动态安全防御与电气设备状态检测、高电压新技术及其应用、电气绝缘理论及新材料、气体放电等方面的研究。
- 朱 璐(1987—),男,博士研究生,研究方向为电气设备在线监测与故障诊断。

(上接第 105 页)

王 娜(1981—),女,高级工程师,从事高压开关设备的研制及产品结构仿真分析工作。

戴通令(1982—),男,高级工程师,从事高压开关设备的研制及管理工作。

刘吉成(1981—),男,高级工程师,从事特高压开关设备的工程设计及新产品研发。

吴文海(1977—),男,高级工程师,从事高压开关设备的研制及管理工作。

余良清(1968—),男,教授级高级工程师,从事高压开关设备的研制及管理工作。

张 浩(1981—),男,高级工程师,从事高压开关设备的新产品研发及工程设计。