

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2025.02.026

高参数363 kV GIS设备研发及设计

张 凯, 高振奎, 李建征, 崔军阳, 陈 蕾

(河南平芝高压开关有限公司, 河南 平顶山 467013)

摘要: 363 kV 线路作为西北地区的主干线路,发展形式良好,市场前景广阔。但随着科技的进步,某公司的363 kV 产品已无法适应日趋激烈的竞争环境。文中以断路器、隔离/接地/快速接地开关、母线为基础,介绍公司新研制的363 kV GIS整体参数、产品设计和型式试验情况。断路器设计时分析了大电流容量试验电弧能量对弧触头的烧蚀情况,断口间五柱支撑结构;隔离/接地/快速接地开关设计时分析了绝缘、温升等;母线设计时分析了导体温升和绝缘盆子电场、机械强度。型式试验表明:新研制的363 kV GIS满足高参数要求,断路器额定短路电流63 kA,标准时间常数120 ms,快速接地开关达到超“B”类;目前已取得第三方全套型式试验报告,正式应用在中国西北地区变电站工程项目。

关键词: 363 kV GIS; 高参数; 标准时间常数; 120 ms; 型式试验

Development and Design of 363 kV GIS with High Parameter

ZHANG Kai, GAO Zhenkui, LI Jianzheng, CUI Junyang, CHEN Lei

(Henan Pingzhi High Voltage Switchgear Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467013, China)

Abstract: 363 kV transmission line, as the main line in the Northwest Region of China, has a good development situation and broad market prospects. However, with the progress of science and technology, 363 kV GIS from a certain company has no way to adapt to the increasingly fierce competitive environment any longer. In this paper, the circuit breaker, disconnector/earthing switch/fast earthing switch are taken as the base, the overall parameters, design and type test of the 363 kV GIS which is newly developed by our company is introduced. In the design of circuit breaker, the ablation of arc energy on arcing contact during the high current capacity test and the five-column support structure across open contacts are introduced. In the design of disconnector/earthing switch/fast earthing switch, the insulation and temperature rise ect are analyzed. And in the design of busbar, the temperature rise of conductor, the electric field and mechanical strength of the insulating spacer are analyzed. The type test shows that the newly developed 363 kV GIS meets the high parameter requirements. The rated short-circuit current of the circuit breaker is 63 kA, the standard time constant is 120 ms and the fast earthing switch meets the super class ‘B’. At present, the product has obtained full set of type tests report released by the third independent test authority and is officially applied to the substation project in the northwest region of China.

Key words: 363 kV GIS; high parameters; standard time constant; 120 ms; type test

0 引言

363 kV 作为西北地区电力系统中的主干线路,发展形式良好,市场前景广阔,在中国的电力建设规划中发挥着不可或缺的作用。但随着科技的进步,某公司的363 kV 产品已无法适应日趋激烈的竞争环境。另外,各GIS厂家均在优化产品结构,推进

产品更新换代,提高参数,以适应日新月异的电网发展。因此,在满足客户需求、保证电网安全的前提下,开发参数高、结构紧凑、性能稳定的GIS产品成为未来的发展趋势^[1-7]。

1 363 kV GIS结构和额定参数

363 kV GIS设备组件主要包含断路器、接地/快

收稿日期:2024-09-06; 修回日期:2024-11-23

基金项目:河南平芝高压开关有限公司自筹项目(PGKJ2022-054)。

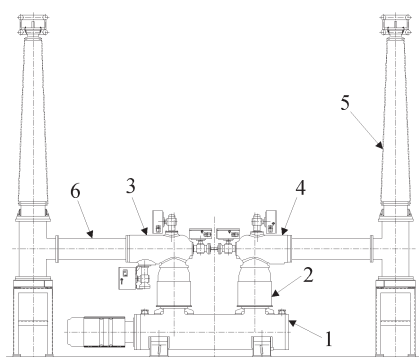
Project Supported by Self-funded Project of Henan Pingzhi High Voltage Switch Co., Ltd.(PGKJ2022-054).

速接地开关、隔离开关、连接母线、互感器(VT及CT)、进出线套管、电缆等^[8]。通过组件之间的协调设计、产品装配后可以最大程度减小设备间距,单间隔占地面积约10 m²左右,有效降低工程的土地占有率和项目整体造价。同时,组件模块化设计,便于运输、装配、拆解更换,通用性高、可应对多种工程接线^[9-10]。额定参数见表1,产品结构见图1。

表1 额定参数

Table 1 Rated parameters

序号	项目	参数
1	额定电压/kV	363
2	额定频率/Hz	50
3	额定电流/A	5 000
4	额定短路电流/kA	63
5	额定短路持续时间/s	3
6	标准时间常数/ms	120
7	1 min 工频耐受电压 (有效值)/kV	对地 510 断口 510+210
8	额定雷电冲击耐受电压(1.2/ 50 μs 峰值)/kV	对地 1 175 断口 1 175+295
9	额定操作冲击耐受电压 (250/2 500 μs)/kV	对地 950 断口 850+295
10	额定压力/MPa	断路器 0.60 其他气室 0.45



1—断路器; 2—电流互感器; 3—隔离/接地/快速接地开关;
4—隔离/接地开关; 5—套管; 6—母线。

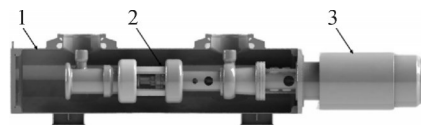
图1 363 kV 产品结构

Fig. 1 Product structure of 363 kV GIS

1.1 断路器设计

断路器设计质量直接关系到电网运行的安全、稳定、可靠。363 kV 断路器(GCB)采用单断口、卧式结构;同时,驱动系统配置高度集成、特性稳定的液压碟簧机构,安装便捷、开断性能优良^[11-12]。GCB 基本结构见图2。

另外,随着电网系统容量的不断增大,短路电流直流分量的时间常数不断提高,有很大可能大于现有产品标准时间常数,导致保护设备难以及时可靠地消除系统故障,威胁电网安全性。目前,西北



1—壳体; 2—灭弧室; 3—碟簧机构。

图2 GCB 基本结构

Fig. 2 Basic structure of GCB

客户已在部分招标文件中提出短路电流直流分量满足120 ms的要求。国家标准规定时间常数仅对T100a试验方式存在影响,而在进行T100a首开极大半波试验过程中,标准时间常数120 ms时,短路电流峰值达到148.9 kA,为高参数断路器设计提出了更加苛刻的要求^[13]。

1.1.1 断路器弧触头设计

为满足高参数条件下断路器开断试验,零件耐烧蚀问题成为开发的难点。弧触头作为容量试验的关键部件,间隙内产生的电弧,会导致材料的烧蚀和转移,不仅影响使用寿命,还影响开断性能^[14]。业内一般选用铜钨合金材料制作弧触头,钨粉平均粒度在4~6 μm之间;但有关研究证明触头材质均匀性、混合比例等也会直接影响耐烧蚀性^[15]。为了充分研究弧触头性能,选用CuW65、CuW70两种混合比例方案,在T100a、50 kA试验中进行验证,结果表明CuW70的耐烧蚀性明显优于CuW65,为高参数弧触头设计提供参考依据^[16]。试验结果见图3、4。



图3 CuW65 烧蚀情况

Fig. 3 Ablation situation of CuW65



图4 CuW70 烧蚀情况

Fig. 4 Ablation situation of CuW70

1.1.2 断路器断口支撑设计

断路器开断是操作机构带动压气缸在电弧零点形成气吹效应和工频恢复电压与断口间绝缘介质强度建立的过程^[17-18]。在大电流试验阶段,断口绝缘强度建立尤为重要,为了满足时间常数120 ms试验要求,断口间设计5根柱式绝缘杆取代传统的

绝缘筒支撑结构,不仅利于试验过程中断口SF₆气体及时置换、补充,同时分、合闸状态确认、异物清扫更加方便、彻底,有效减少放电事故发生。

由于五柱支撑结构首次应用断路器断口间,充分考虑工作状态,选用环氧树脂填充混料制造部件,沿面切向电场强度12 kV/mm以下、机械应力80 MPa以上,利用Comsol、Ansys解析软件分析计算,从而设计出符合要求的零件结构^[19]。五柱支撑沿面电场见图5,五柱支撑应力分布见图6。

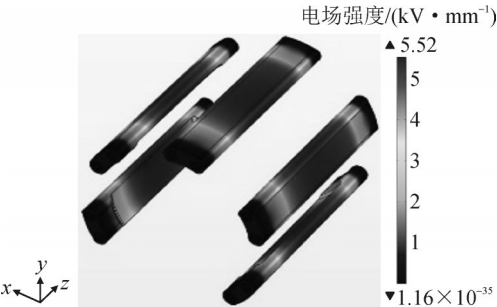


图5 五柱支撑沿面电场

Fig. 5 Surface electric field of five-column support

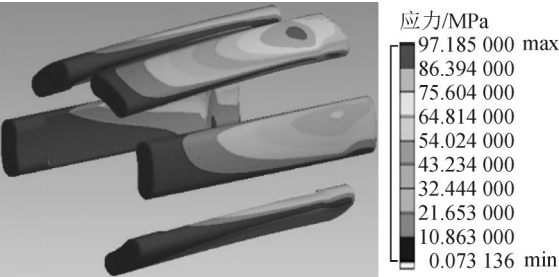


图6 五柱支撑应力分布

Fig. 6 Stress distribution of five-column support

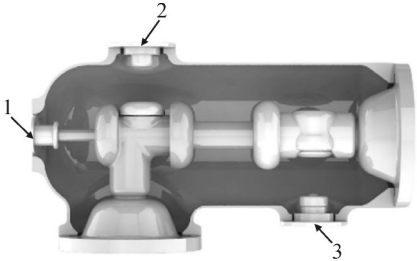
1.2 隔离、接地、快速接地开关设计

隔离、接地、快速接地开关各元件装配在单个壳体内部,产品体积减小约20%、壳体及导体铸造化设计,零部件规格减少25%,提高装配效率和可靠性^[20-21];应对3/2主接线工程时操作机构可采用“一拖三”设计,通过杆端微调连杆长度抵消传动角度损失,保证产品的同期性;该结构的实施不仅节约制造成本、方便巡视平台设计和日常巡检,还可减少连接电缆使用和现场工作量。

为应对工程项目不同的接线方式要求,在壳体铸造加工阶段将对应的位置封堵或打开,即可实现单独隔离、隔离+接地、隔离+接地+快速接地3种产品规格形式的自由转换,减少铸造模具数量,节约制造成本。基本结构见图7。

1.2.1 隔离、接地、快速接地开关绝缘设计

为满足隔离、接地、快速接地开关27 kV/mm绝缘性能要求,利用Ansys解析软件进行绝缘仿真,并对触头分闸过程中的电场进行分析,优化触头形状



1—接地开关;2—隔离开关;3—快速接地开关。

图7 DS/ES/HES基本结构

Fig. 7 Basic structure of DS/ES/HES

及屏蔽外形,选择了最优化的设计方案^[22]。电场仿真结果见图8。触头分闸过程电场分析见图9。

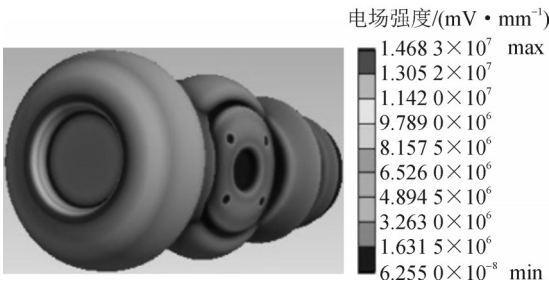
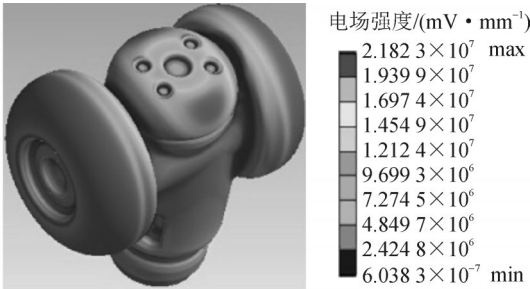


图8 电场仿真结果

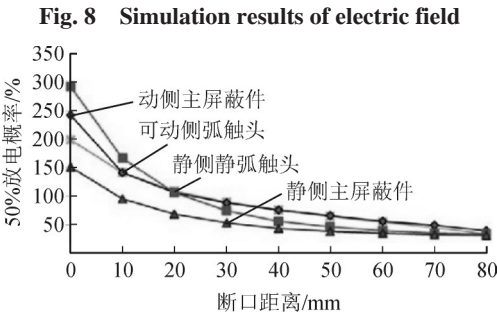


图9 触头分闸过程电场分析

Fig. 9 Electric field analysis of contact opening

1.2.2 隔离、接地、快速接地开关温升设计

由于隔离、接地、快速接地开关共箱形式设计,内部空间狭小,长期带电运行的热传导成为重点。因此,为满足1.1×5 000 A大电流温升试验时标准规定值要求,设计时详细分析产品结构,参考相关文献绘制热回路等效模型^[23],利用解析软件进行温升仿真,开发出满足通流要求的产品。热回路等效模型见图10。温升试验结果见图11。

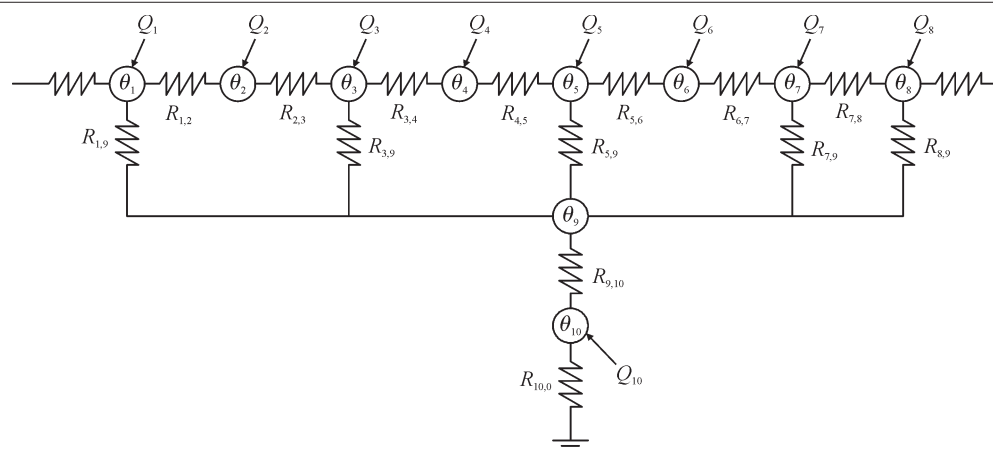


图10 热回路等效模型

Fig. 10 Equivalent model of thermal circuit

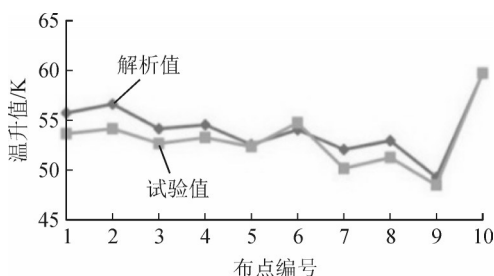


图11 温升试验结果

Fig. 11 Test result of temperature rise

1.2.3 快速接地开关超“B”类设计

随着同塔架空线的运用及输送距离越来越长,快速接地开关开合线路感应电流的要求也逐步提高。目前,快速接地开关开合感应电流的能力无简单便捷的仿真计算方法,只能通过以往的设计经验和试验数据,通过电弧功率和分闸速度之间的联系进行评估,再试验验证正确性^[24-25]。

363 kV 快速接地开关产品断口距离 140 mm,最大燃弧区间为动触头在整个断口距离的动作区间。对已取得报告的B类快速接地开关进行分析,机构分闸速度 $v=2.4$ m/s,整个开断过程存在5个电弧过零点,在第一个电弧零点时,断口距离最大仅24 mm,无法开断;可能在第二、三电弧零点完成开断,如果此时触头速度无法满足熄弧要求,则开断失败。产品电弧功率为7 040 W,在前3个电弧过零点开断时,需要的分闸速度 $v=2.41$ m/s,与“B”类快速接地开关的分闸速度基本一致;因此,在不改变原有设计的情况下,可将快速接地开关提升至超“B”类参数要求。

1.3 其他单元

1.3.1 母线

母线采用常规分相结构,使用树脂与金属嵌件

浇注制造的绝缘盆子或圆柱式绝缘子作为支撑件;同时,建立模型,对母线 1.1×5 000 A 温升进行仿真计算,指导母线的设计选型。

现场应用时,为了均衡产品装配、地基建设等问题造成的尺寸偏差,选择适当位置设置补偿用伸缩波纹管,消除尺寸偏差同时吸收环境温度变化产生的应力^[26]。母线结构见图12。温升计算结果见图13。

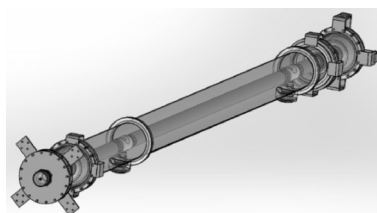


图12 母线结构

Fig. 12 Structure of main-bus

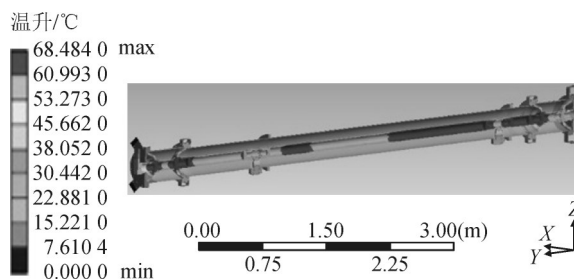


图13 温升计算结果

Fig. 13 Calculation results of temperature rise

1.3.2 绝缘盆子

绝缘盆子作为GIS设备气室划分、导体支撑的主要元件,在产品应用中起着至关重要的作用,其设计质量直接影响产品的最终性能;根据相关设计经验,沿面电场 14 kV/mm 以下,机械应力 65 MPa 以下,充分计算、论证,最终开发出满足要求的产品^[27-28]。沿面电场结果见图14,机械应力结果见图15。

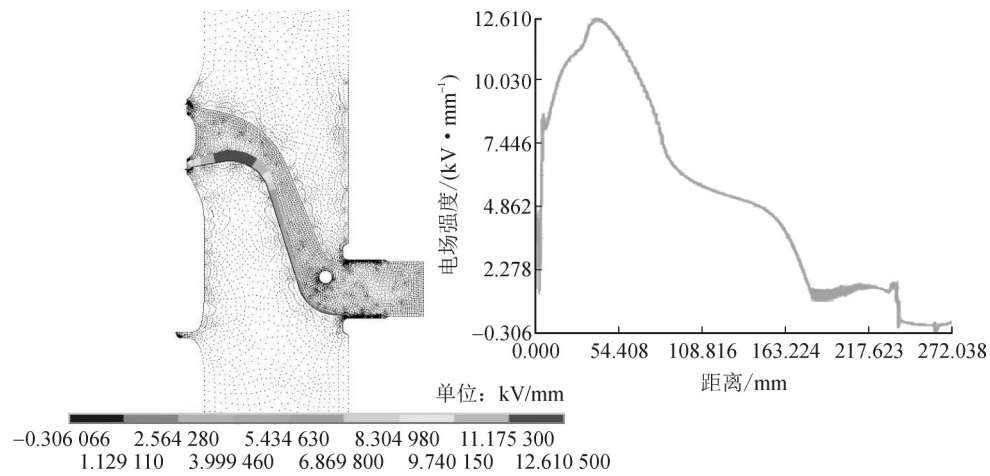


图 14 绝缘盆子沿面电场

Fig. 14 Surface electric field of insulated basin

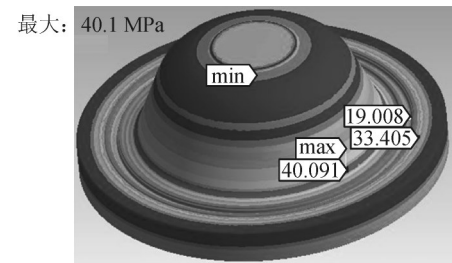


图 15 绝缘盆子机械应力

Fig. 15 Mechanical stress of insulated basin

2 型式试验

在第三方检测单位依据 GB、DL 及 IEC 等标准要求,完成全部验证工作并获得型式试验报告。整个试验过程产品性能表现优异,满足预期的高参数要求。

2.1 断路器试验

断路器完成基本短路(T10~T100)、近区故障(L75、L90)、容性电流(C2级)、机械耐受(M2级)等断路器全套型式试验,其中T100a试验标准时间常数满足120 ms参数要求,可更好地适应日益增大的电网容量^[29-30]。型式试验见图16,T100a试验参数、结果见表2、3。



图 16 断路器开断试验

Fig. 16 Switching test of circuit breaker

表 2 T100a 试验参数

Table 2 T100a test parameters		
参数	中等非对称大半波	非对称大半波
直流分量/%	30.6	62.1
U_i/kV	275.0	227.0
$di/dt/(\text{A}\cdot\mu\text{s}^{-1})$	26.9	22.4
U_o/kV	498.0	372.0

表 3 T100a 试验结果

Table 3 T100a test results				
试验方式	燃弧时间/ms	峰值电流/kA	半波时间/ms	U_o/kV
中等	15.1	117.6	11.6	489.1
非对称大半波	17.8	148.9	14.3	373.5
首开极大半波	25.4	148.9	14.4	374.0

2.2 隔离开关(DS)试验

隔离开关试验有小电容/小电感电流开合、绝缘、温升、母线转换电流、机械耐受、短时及峰值耐受等^[31-32]。主要试验参数见表4。

表 4 隔离开关主要试验参数

Table 4 The main test data of DS	
项目	参数
母线转换电流试验	1 600 A, 300 V, 100 次
小电容电流开合	2 A, 50 次
小电感电流开合	2 A, 50 次
机械耐受试验	M2 级

2.3 快速接地开关(HES)试验

快速接地开关试验有机械耐受、绝缘、温升、短时及峰值耐受、短路关合、感应电流等,其中开合感应电流试验满足超“B”类要求^[24]。主要试验参数见

表5,型式试验见图17。

表5 快速接地开关主要试验参数

Table 5 The main test data of HES

项目	参数
开合电磁感应电流试验	320 A, 22 kV, 10次
开合静电感应电流试验	18 A, 25 kV, 10次
机械耐受试验	M2级

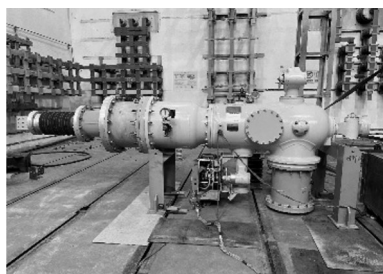


图17 HES超“B”类试验

Fig. 17 Super class “B” test of HES

2.4 母线试验

母线试验有温升、绝缘、短时及峰值耐受等。主要试验参数见表6。

表6 母线主要试验参数

Table 6 The main test data of BUS

项目	参数
温升试验	5 500 A
短时及峰值耐受试验	63 kA, 3 s/171 kA

3 结论

该363 kV GIS设备具备如下特点:

1)断路器采用单断口灭弧室,卧式布置,断口间支撑采用五柱结构设计,标准时间常数达到120 ms要求,性能参数明显提升,可适应日益增大的电网容量。

2)隔离、接地、快速接地开关各元件装配在单个壳体内部;壳体铝合金铸造。结构趋于紧凑的同时,提高了通用性,具有明显的便利性。

3)快速接地开关达到超“B”类参数要求;隔离、接地、快速接地开关操作机构3/2接线时可采用“一拖三”设计,便于维护、巡检。

4)单间隔GIS设备占地面积约10 m²左右,实现断路器、隔离接地开关、电流互感器等组件整体运输,减少现场对接工作量和运输成本。

因此,新研制363 kV GIS设备具备“高参数、高可靠性、结构紧凑”的特点,将为中国西北地区能源建设提供质量稳定、价格低廉的输变电设备。

参考文献:

- [1] 周小谦. 我国电力发展与西北电力展望[J]. 电网与清洁能源, 2008, 24(9): 3-9.
ZHOU Xiaoqian. Development of electric power in China and prospects for northwest electric power[J]. Power Grid and Clean Energy, 2008, 24(9): 3-9.
- [2] 刘瑞丰, 王睿, 刘庆, 等. 促进新能源发展的西北电力调峰容量市场机制初探[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(9): 93-99.
LIU Ruifeng, WANG Rui, LIU Qing, et al. Preliminary study on the market mechanism of northwest electric power peak shaving capacity to promote the development of new energy[J]. Power Grid and Clean Energy, 2020, 36(9): 93-99.
- [3] 蓝瑞珏. 我国252~550 kV高压开关设备技术参数与电网需求的差距[J]. 电力设备, 2006(12): 1-3.
LAN Zengjue. The gap between the technical parameters of 252~550 kV high-voltage switchgear in China and the demand for the power grid[J]. Electric Power Preparation, 2006(12): 1-3.
- [4] 周秀, 吴旭涛, 田天, 等. 基于机—热—电多参量信号特征的GIS隔离开关状态评估方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 220-228.
ZHOU Xiu, WU Xutao, TIAN Tian, et al. Condition assessment method of GIS disconnecter based on vibration-thermal-electrical multi-parameter signal characteristics[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 220-228.
- [5] 付威, 符国晖, 韦波, 等. GIS扩建过程中接口的绝缘与温升性能分析[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(11): 66-71.
FU Wei, FU Guohui, WEI Bo, et al. An analysis of the insulation and temperature rise performance of the interface during GIS expansion process[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(11): 66-71.
- [6] 刘航斌, 林厚飞, 褚静, 等. 基于CWGAN-div和Mi-CNN的GIS局部放电图谱识别[J]. 浙江电力, 2023, 42(8): 75-83.
LIU Hangbin, LIN Houfei, CHU Jing, et al. Recognition of partial discharge patterns of GIS based on CWGAN-div and Mi-CNN[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(8): 75-83.
- [7] 梁基重, 晋涛, 牛曙, 等. 基于EMDFFT特征提取的GIS机械缺陷诊断方法研究[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(3): 216-223.
LIANG Jizhong, JIN Tao, NIU Shu, et al. Research on GIS mechanical defect diagnosis method based on EMD-FFT feature extraction[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(3): 216-223.

- [8] 赵紫光. GIS 在电网规划中的应用[J]. 科技风, 2018(31):182.
ZHAO Ziguang. Application of GIS in power grid planning[J]. Technology Wind, 2018(31):182.
- [9] 丁锐. GIS 电站抗震计算及支撑设计[J]. 能源与节能, 2014(12):58-59.
DING Rui. GIS station aseismic calculation and support design[J]. Energy and Conservation, 2014(12):58-59.
- [10] 涂嘉毅, 关向雨, 赵俊义, 等. 基于 SVD-IACMD 的 GIS 振动信号去噪算法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(6):163-172.
TU Jiayi, GUAN Xiangyu, ZHAO Junyi, et al. GIS vibration signal denoising algorithm based on SVD-IACMD[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(6):163-172.
- [11] 徐国政. 高压断路器原理和应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.
XU Guozheng. Principle and application of high voltage circuit breaker[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [12] 李良创, 龙民权, 齐向东, 等. 碟簧液压机构原理及常见故障分析[J]. 无线互联科技, 2021, 18(8):21-22.
LI Liangchuang, LONG Minquan, QI Xiangdong, et al. Principle and common fault analysis of hydraulic mechanism of disc spring[J]. Wireless Internet Technology, 2021, 18(8):21-22.
- [13] 高压交流断路器的合成试验:GB/T 4473—2018[S]. 2018.
Synthetic testing of high-voltage alternating current circuit-breakers:GB/T 4473—2018[S]. 2018.
- [14] 杨晓红. 超高压 CuW/CuCr 整体电触头材料的研究[D]. 西安:西安理工大学, 2009.
YANG Xiaohong. Research on ultra high voltage CuW/CuCr integral electrical contact materials[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology, 2009.
- [15] 罗昊, 从善海, 程在望, 等. 不同配比电触头铜钨合金的组织及性能[J]. 有色金属工程, 2014, 4(2):29-31.
LUO Hao, CONG Shanhai, CHENG Zaiwang, et al. Microstructure and properties of Copper Tungsten alloys with different ratios for electrical contacts[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2014, 4(2):29-31.
- [16] 王颜明, 张然. 高压电器开关触头铜钨合金电弧侵蚀试验研究[J]. 铸造技术, 2018, 39(10):2217-2219.
WANG Yanming, ZHANG Ran. Experimental study on arc erosion of Copper Tungsten alloy for high voltage electrical switch contacts[J]. Casting Technology, 2018, 39(10):2217-2219.
- [17] 姜仁卓, 何柏娜, 颜雅迪, 等. 双能式 SF₆ 高压断路器灭弧室结构设计及熄弧特性仿真研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(6):2040-2048.
JIANG Renzhuo, HE Baina, JI Yadi, et al. Design of arc extinguishing chamber structure and simulation study of arc extinguishing characteristics for dual energy SF₆ high voltage circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6):2040-2048.
- [18] 余银钢, 潘天红. 新型双机构快速机械开关断路器结构与性能分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(20):144-153.
YU Yingang, PAN Tianhong. Structure and performance analysis of a new type of fast mechanical switch circuit breaker with a double mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(20):144-153.
- [19] 谢庆, 吕天舒, 宋岩泽, 等. 交直流切换下环氧树脂表面电场分布特性的仿真研究[J]. 高压电器, 2022, 58(11):24-30.
XIE Qing, LYU Tianshu, SONG Yanze, et al. Simulation research on electric field distribution characteristics of epoxy resin surface under AC - DC switching[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(11):24-30.
- [20] 王亚鸽, 苏戈. 新型 252 kV GIS 隔离开关铸造壳体压力—应力试验研究[J]. 铸造技术, 2016(1):196-199.
WANG Yage, SU Ge. Test and study of casing hydrostatic pressure-stress relationship of new 252 kV GIS disconnector[J]. Foundry Technology, 2016(1):196-199.
- [21] 黎斌. SF₆ 高压电气设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
LI Bin. Design of SF₆ high voltage apparatus[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [22] 姚永其, 王志刚, 张国跃. 550 kV 隔离开关的电场仿真分析[J]. 大连交通大学学报, 2020, 41(3):93-96.
YAO Yongqi, WANG Zhigang, ZHANG Guoyue. Electric field simulation analysis of 550 kV disconnector[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2020, 41(3):93-96.
- [23] 骆常璐, 杨蛟龙, 李松磊. 基于等效热路和有限元分析的 GIS 温升研究[J]. 高压电器, 2021, 57(5):67-76.
LUO Changlu, YANG Jiaolong, LI Songlei. GIS temperature rise research based on equivalent thermal path and finite element analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(5):67-76.
- [24] 许罗生, 孙琼, 包联霜. 一种高压交流接地开关开合超 B 类感应电流装置设计[J]. 电工电气, 2021(8):57-60.
XU Luosheng, SUN Qiong, BAO Lianshuang. Design of a high voltage AC grounding switch switching super class B induced current device[J]. Journal of Electrical Engineering, 2021(8):57-60.
- [25] 徐敏航, 吕鹏瑞, 崔爱强. 基于显式动力学的快速接地开关触头系统仿真分析与试验研究[J]. 电器与能效管理技术, 2023(7):18-24.
XU Minhang, LYU Pengrui, CUI Aiqiang. Simulation analysis and experimental research on contact system of fast earthing switch based on explicit dynamics[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2023(7):18-24.

- LI Yongfu, FU Jin, WANG Qian, et al. Temperature compensation and temperature features study of two non-contact over voltage optical sensors[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(31): 192-196.
- [16] HIDA K, KOUNO T. A method for measuring electric field in space charge by means of pockels device[J]. Journal of Electrostatics, 1982, 13(1): 99.
- [17] YANG Qing, SUN Shangpeng, HE Yanxiao, et al. Intense electric-field optical sensor for broad temperature-range applications based on a piecewise transfer function[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1648-1656.
- [18] SIMA Wenxia, HAN Rui, YANG Qing, et al. Dual LiNbO₃ crystal-based batteryless and contactless optical transient overvoltage sensor for overhead transmission line and substation applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7323-7332.
- [19] IMBURGIA A, MICELI R, SANSEVERINO E R, et al. Review of space charge measurement systems: Acoustic, thermal and optical methods[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2016, 23(5): 3126-3142.
- [20] CECELJA F, BORDOVSKY M, BALACHANDRAN W. Lithium niobate sensor for measurement of DC electric fields[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(2): 465-469.
- [21] HITZENBERGER C K, GOETZINGER E, STICKER M, et al. Imaging of polarization properties of transparent and scattering structures by phase-resolved polarization-sensitive optical-coherence tomography[C]//Saratov Fall Meeting: Optical Technologies in Biophysics & Medicine III. Russian: [s.n.], 2001: 1-7.
- [22] 裴丽燕, 马靖, 许灿华, 等. 基于晶体劈的电光晶体半波电压测量[J]. 光子学报, 2015, 44(9): 92-97.
- PEI Liyan, MA Jing, XU Canhua, et al. Measurement of half-wave voltage of electro-optic crystal based on crystal wedge[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(9): 92-97.
- 教刚(1985—), 男, 大学本科, 高级工程师, 从事配网运维、配网检修、智能配网、数字配网、配网智能等方向研究(通信作者)(E-mail: 1276089318@qq.com)。

(上接第229页)

- Energy Management Technology, 2023(7): 18-24.
- [26] 赵艳涛, 秦晓宇, 张垒. 应力等效线性化对GIS母线壳体的分析[J]. 河南科技, 2015(12): 47-48.
- ZHAO Yantao, QIN Xiaoyu, ZHANG Lei. Analysis of GIS bus shell by stress equivalent linearization[J]. Henan Science and Technology, 2015(12): 47-48.
- [27] 李渊, 白晓萍, 王澄, 等. 绝缘盆子等高压电气产品用关键零部件的性能研究[J]. 电气时代, 2019(6): 110-112.
- LI Yuan, BAI Xiaoping, WANG Cheng, et al. Performance study of key components for high-voltage electrical products such as insulated pots[J]. Electrical Times, 2019(6): 110-112.
- [28] 戴立庆, 王巧燕, 徐铁胜, 等. 750 kV GIS盆式绝缘子开裂导致漏气分析与治理[J]. 新乡学院学报, 2022, 39(6): 56-58.
- DAI Liqing, WANG Qiaoyan, XU Tiesheng, et al. Analysis and treatment of air leakage caused by cracking of 750 kV GIS basin insulators[J]. Journal of Xinxiang University, 2022, 39(6): 56-58.
- [29] 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求: GB/T 11022—2020[S]. 2020.
- Common specifications for high-voltage alternating-current switchgear and controlgear standards: GB/T 11022—2020[S]. 2020.
- [30] 高压交流断路器: GB/T 1984—2014[S]. 2014.
- High-voltage alternating-current circuit-breakers: GB/T 1984—2014[S]. 2014.
- [31] 高压交流隔离开关和接地开关: GB/T 1985—2014[S]. 2014.
- High-voltage alternating-current disconnectors and earthing switches: GB/T 1985—2014[S]. 2014.
- [32] High-voltage switchgear and controlgear-Part 102: Alternating current disconnectors and earthing switches IEC 62271-102: 2013[S]. 2013.
- 张凯(1983—), 男, 工程师, 主要从事高压GIS开发工作(通信作者)(E-mail: 13782472975@163.com)。
- 高振奎(1989—), 男, 工程师, 主要从事高压GIS开发工作。
- 李建征(1981—), 男, 工程师, 主要从事高压GIS开发工作。
- 崔军阳(1990—), 男, 工程师, 主要从事高压GIS开发工作。
- 陈蕾(1984—), 女, 助理工程师, 主要从事高压GIS试验工作。