

DOI: 10.7667/PSPC201788

特高压 1100 kV GIS 现场交流耐压试验技术

傅智为^{1,2}, 林一泓¹, 吴勇昊¹, 卞志文¹, 魏登峰¹

(1. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007; 2. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350003)

摘要: 为了减少开展特高压 1100 kV GIS 现场交流耐压试验时可能出现的问题, 立足于近年来国内特高压站 GIS 现场试验积累的经验, 从特高压 1100 kV GIS 的结构特点、试验方案的选择、试验频率和加压程序的考虑、试验接线中的注意事项及试验判据等各个方面对特高压 1100 kV GIS 现场交流耐压试验技术进行了系统性的介绍。并详细地分析了试验过程中的关键点, 给出了试验参数估算的算例, 为设备配置和试验电源选取提供依据。特高压 1100 kV GIS 交流耐压试验电压高、设备容量大、套管高度高, 给现场试验带来诸多难题, 应提前做好充足的准备。
关键词: 特高压; GIS; 现场交流耐压试验; 试验设备配置; 试验技术

Test technology of on site AC voltage test of UHV 1100 kV GIS

FU Zhiwei^{1,2}, LIN Yihong¹, WU Yonghao¹, BIAN Zhiwen¹, WEI Dengfeng¹

(1. State Grid Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou 350007, China;
2. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd, Fuzhou 350003, China)

Abstract: In order to reduce the problems probably happened when carrying out the on site test of UHV 1100 kV GIS, and based on the on site experience of domestic UHV substation test in recent years, the test technology of on site AC voltage test of UHV 1100 kV GIS is systematically introduced in terms of the structure characteristics of UHV 1100 kV GIS, the choice of test scheme, consideration of test frequency and voltage applied process, attentions of test wiring, and test criterion. This paper also analyzes the key points during the test in detail, and gives an estimated example of test parameters which provides the basis for equipment configuration and test source choice. Adequate preparation should be made ahead of time due to high AC withstand test voltage of 1100 kV GIS, large capacity of equipment, great height of bushing, which may bring many difficulties to the actual implementation of on site test.

Key words: UHV; GIS; on site AC withstand voltage test; test equipment configuration, test technology

0 引言

GIS 设备在贮存、运输、安装、现场调试及检修过程中, 可能出现机械或绝缘性能受损的情况。现场交接试验是设备投运送电前的最后一道检验关口, 对于保障设备投运质量具有决定性的作用。

交流耐压试验是检测 GIS 设备绝缘性能的主要手段, 为确保特高压 GIS 投运时绝缘性能完好, 国标对特高压 1100 kV GIS 的现场交流耐压试验制定了严格的试验标准和试验程序^[1]。相比较低电压等级的 GIS, 特高压 1100 kV GIS 现场交流耐压试验试验电压高、试验回路对地电容量大、试品体积大, 这给现场试验带来了诸多困难。在进行特高压 1100 kV GIS 现场交流耐压试验时, 应先进行必要

的核算和勘查, 确保试验设备的配置、试验电源的选取、现场空间距离等满足试验需求。

近年来特高压在我国迅速发展, 积累了大量现场试验经验, 试验技术也不断进步完善, 本文根据近年来国内特高压现场试验实际经验, 全面的介绍了特高压 1100 kV GIS 现场交流耐压试验试验技术, 总结了近年来现场试验的经验, 并给出了现场试验参数计算和设备配置选择的实例。

1 特高压 1100 kV GIS 结构特点

与高压、超高压 GIS 相比, 特高压 1100 kV GIS 绝缘水平进一步提高、开断容量进一步增大、抑制过电压要求进一步提升, 绝缘配合更为紧密。受机械强度、断路器操作功、制造成本等因素的制约,

特高压 GIS 的产品尺寸不能无限制增大, 为在相对合理的尺寸内, 满足更高的绝缘性能和机械性能要求, 给特高压 GIS 的设计、制造、安装带来了更多的难题, 也对其制造、安装中工艺控制和试验提出了更高的要求^[2-17]。

特高压 1100 kV GIS 各气室内部对电场分布有着更为严格的控制要求, 对于绝缘缺陷也更为敏感, 现场交流耐压试验对于发现绝缘缺陷、保障特高压 1100 kV GIS 投运质量有着更为重要的意义。



图 1 特高压 1100 kV GIS 典型现场布置图

Fig. 1 On site typical layout plan of UHV 1100 kV GIS

国内特高压 1100 kV GIS 普遍采用“一字型”分层分相布置方式, 采用 3/2 接线方式, 进出线套管位于两侧, 安装高度达 17 m 左右, 一般临近站内通道。

2 特高压 1100 kV GIS 现场交流耐压试验方法

特高压 1100 kV GIS 现场交流耐压试验总体分为老练试验、耐压试验及局部放电测试三个阶段。

老练试验可以将 GIS 设备内部由于装配或现场安装产生的导电或非导电微粒移到低电场区域, 降低这些微粒对设备的危险性; 同时, 通过放电消除细小的微粒或电极上的毛刺、附着的尘埃等, 达到“净化”试品的目的。

交流电压耐受试验可以对 GIS 设备由于运输和安装过程中导致的机械和绝缘缺陷进行考核。

局部放电测量有助于检查 GIS 内部多种缺陷, 是耐压试验很好的补充。若耐压中发生击穿, 可通过预先设置的超声定位装置, 辅助定位。

2.1 试验方案

GIS 现场交流耐压试验有两种不同的试验方法和装置可供选择: 一种是采用电感可调的工频谐振装置, 另一种是采用变频谐振装置。

变频谐振装置由于电抗器电感固定, 电抗器内部不存在可调气隙和机械传动机构, 电抗器重量能有所减轻, 结构也更为简单可靠, 更适应高电压、大容量设备的现场试验需求。因此, 目前特高压 1100 kV GIS 现场交流耐压试验一般使用变频串联谐振原理进行, 试验接线如图 2。从进出线套管处施加试验电压至导体和外壳之间, 非被试相导体接地。

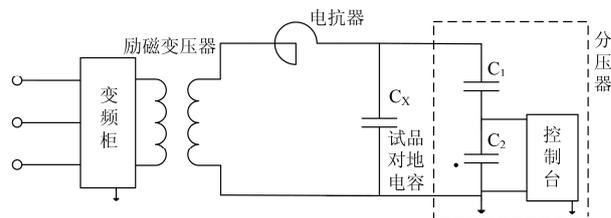


图 2 特高压 GIS 交流耐压试验接线图

Fig. 2 Wiring diagram of AC voltage test of UHV GIS

对于新建特高压站间隔数较多的情况, 由于特高压 1100 kV GIS 安装和返修周期较长, 为尽快发现特高压 GIS 内部绝缘缺陷, 同时综合考虑试品电容量不宜过大, 国内 GIS 现场交接交流耐压常采取分阶段耐压的形式, 推荐每安装 3 至 4 台断路器间隔进行一次耐压试验。但在制定分段试验方案时, 要注意尽可能减少 GIS 内固体绝缘元件承受试验电压的次数。

此外, 根据国内现场经验, 特高压 1100 kV GIS 设备经运输、安装并经过现场联调试验多次操作, 可能有异物颗粒掉落, 导致绝缘性能受损。因此被试间隔内各元件之间的联调试验宜在绝缘试验前进行。对于采用分阶段耐压试验方案的, 在整体联调试验完成后, 建议通过施加一定时间的老练试验电压再次确认 GIS 绝缘状态。

2.2 试验频率

GB/T 16927.1-1997《高电压试验技术第一部分: 一般试验要求》在交流电压试验条款中规定: “试验电压一般应是频率为 45~65 Hz 的交流电压, 通常称为工频试验电压”。试验频率对不同试品的绝缘有着不同程度影响, 一般来说, 在 45~65 Hz 的频率范围内, 频率变化对绝缘性能的影响可忽略。

GIS 内的绝缘介质受试验频率影响较小, 现场工频耐压试验允许有较大的频率偏差^[18], 一般为 10~300 Hz, 但这是基于较低电压等级设备的试验和运行经验, 对于特高压 1100 kV GIS 现场试验, 由于实际试验、运行经验有限, 应更谨慎的考虑试验频率的严格性问题。文献[19]对现场 GIS 交流耐压试验工频谐振装置的现场适应性问题, 以及变频谐

振装置的工频严格性问题进行了深入的探讨, 提出特高压 GIS 现场交流耐压试验的一个基本原则: 通过合适的试验设备及参数配置, 将试验频率限制在 45~65 Hz 或尽量将其限制在附近的一定范围内。但未进一步给出具体的频率限定范围, 有待更多的研究和现场经验积累。

此外, 若带母线 PT 进行交流耐压试验, 还应注意控制试验频率满足 PT 制造厂要求。

2.3 试验加压程序

根据 GB/T 50832-2013《1000 kV 系统电气装置安装工程电气设备交接试验标准》中对特高压 1100 kV GIS 现场交接交流耐压的规定, 762 kV 以下的老练时间为 5 min, 耐压试验电压为出厂耐压值的 80%, 即 880 kV。但近年来的工程实践经验表明, 标准规定的加压程序和试验电压值难以确保特高压 GIS 投运质量, GIS 在耐压试验通过后仍有绝缘事件发生。因此, 从 2014 年起, 为进一步提高特高压 GIS 现场交接绝缘性能检验水平, 在国内特高压 GIS 现场交接交流耐压试验中, 普遍采取: 将 762 kV 以下的老练时间从 5 min 增加至 20 min, 并将耐压值从出厂值的 80% 提高至 100%, 即 1100 kV。同时, 为保障局放测试过程中测试人员的人身安全, 在耐压通过后, 试验电压降至 762 kV, 30 min 后方进行局部放电测试。预防性试验暂未参照此做法。

因此, 现场交接交流耐压试验的程序为: 零起升压至 $U_r/\sqrt{3}$ ($1100/\sqrt{3}=635$ kV), 持续 10min; 再升至 $1.2U_r/\sqrt{3}$ (762 kV), 持续时间 20min, 完成老练; 最后升至 U_r (1100 kV), 进行 1min 耐压, 耐压试验结束后, 将试验电压降至 $1.2U_r/\sqrt{3}$ (762 kV), 保持 30 min 后进行局放测试, 如图 3 所示。

GIS 母线电压互感器空载电流测量可与 GIS 主回路绝缘试验一起进行, 分别在耐压试验前后进行测量, 试验电压为 577 kV。

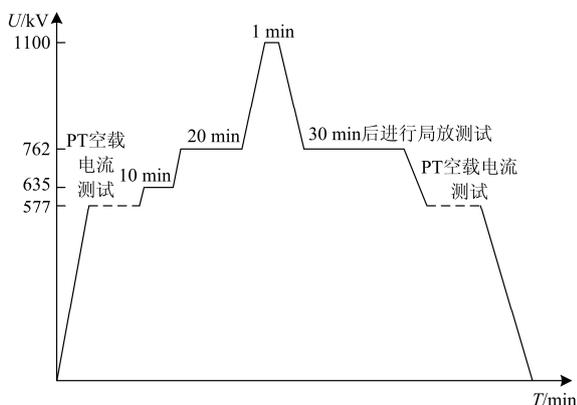


图 3 特高压 GIS 交流耐压试验加压程序

Fig. 3 Voltage applied process of AC voltage test of UHV GIS

进行局部放电测量时, 超声波测试应对每个气体间隔进行, 在 GIS 外壳上按小于 1 m 的间隔距离布置测点, 跨过盆式绝缘子即增加一个测点; 特高频测试应在每个盆式绝缘子处测量。

局部放电测量及电压互感器空载电流测量结束后将试验电压降至零, 断开试验电源并将试品放电接地。

2.4 试验接线

特高压 GIS 现场交流耐压试验设备装配和试验接线工作往往需要 1 到 2 天, 且相比常规 GIS 试验有更多需要注意的地方, 试验前应提前进行参数估算并到现场进行勘探。

2.4.1 电源接线

特高压 GIS 交流耐压试验对电源容量要求较高, 试验前提前确认现场试验电源条件, 容量满足估算结果要求, 且距试验设备摆放位置不宜过远, 以防电源电缆上压降过大, 影响试验设备工况。同时, 应根据估算结果, 选择电源接线电缆截面。

2.4.2 二次短接

耐压试验中, 被试范围内电流互感器的二次绕组均应短路并接地, 被试范围较大时, 现场电流互感器二次短接接地工作量可能较大, 特别是在本体处进行短接时, 宜提前做好短接工作, 必要时在试验前再次确认短接情况。

2.4.3 一次接线

(1) 试验回路中暴露在空气中的部分应与临近的避雷器、架空母线、构架等其他设备设施保持足够的空气绝缘距离(建议不小于 10 m), 并确保临近的金属导体可靠接地。由于特高压 GIS 试验加压引线较长, 应特别注意加压线的摆动是否会导致与周边物体的安全距离不足。

(2) 建议试验加压套管临近的电压互感器、避雷器在耐压试验通过后安装, 特别是交接试验耐压值选取 1100 kV 时, 电压互感器、避雷器的安装极有可能导致加压引线安全距离不足。

(3) 从线路侧套管加压时, 道路宽度较小, 普遍设计为 3.5 m 左右, 而试验设备均压环尺寸较大, 可能导致同临近避雷器等设备的均压环距离过近, 应提前评估, 必要时预先拆除相关设备。

(4) 经验表明, $\Phi 500\sim\Phi 800$ mm 的加压用无晕导线即可满足 1100 kV 电压等级耐压试验要求(不同地区受地理、气候条件有所影响)。

(5) 由于特高压 GIS 套管较高, 且距站内道路距离一般 10 m 以上, 加压引线通常超过 20 m, 推荐选用金属编织工艺的无晕导线, 以提高强度。同时, 在试验接线过程中应注意避免对无晕导线的挤

压、弯折, 以防无晕导线断裂, 这点在两侧接头固定处应特别注意。

(6) 无晕导线内的承力拉线应具备足够强度, 特别是在受潮较重且主回路接触不佳的情况下, 加压时拉线上有泄漏电流流过, 可能会烧断拉线, 推荐选用直径不小于 20 mm 的尼龙绳。另外, 宜准备充足的备品导线, 以免应导线断裂影响试验。

2.5 试验判据

在规定的整个试验过程中, 没有发生击穿放电和绝缘遭到破坏的现象, 且局放测试无异常, 则认为试验通过。一旦试品发生击穿, 即判定为试验未通过。同时, 根据超声局部放电测试定位结果及放电引起的声、光、电、化学(气体)等各种效应, 分析故障性质和故障位置, 并采取必要的修复措施(如解体检查等), 处理完毕后再重新进行相关试验, 禁止直接再次加压。

为准确定位试验中可能发生放电的故障气室, 试验前宜提前布置无线击穿定位装置, 击穿定位装置一般采用超声波振动传感器, 试验时, 应保证每一气室至少有 1 个有效的定位传感器。特高压试验加压时间较长, 使用电池作为电源的传感器, 应注意提前充电。

3 特高压 GIS 交流耐压试验设备配置

为减小试验设备的体积、容量, 并能适应频繁拆卸、运输和安装的要求, 特高压 GIS 现场交流耐压试验一般选用变频串联谐振设备。

为合理进行试验设备的选择, 以及试验电源的准备, 试验前应对各试验参数进行估算。

特高压 1100 kV GIS 一个完整串电容量约 5000~8000 pF, 母线电容量约 50 pF/m, 也可参照制造厂提供的电容量, 考虑目前各设备制造厂试验设备制造水平和现场试验电源条件, 建议各阶段试品电容量不超过 25 000 pF。

为使试验频率靠近工频范围, 应合理选择串联电抗器的电抗值。目前, 各主要串谐设备制造厂生产的 1100 kV GIS 耐压用单节电抗值一般在 80~100 H 左右, 额定电压为 300 kV, 这样当耐压值为 1100 kV 时串联 4 节, 耐压值为 880 kV 时只须串联 3 节, 提高了设备的灵活性和通用性。

下文以国内某特高压变电站 1100 kV GIS 现场交接交流耐压试验作为范例进行计算。

根据制造厂提供的数据, 被试段 GIS 电容量 C_X 约 19 000 pF, 分压器电容量 (C_1+C_2) 约为

1000 pF, 总电容量 C 约 20 000 pF;

单节电抗器电抗值为 93.5 H, 4 节串联电抗值: $L = 4 \times 93.5 \text{ H} = 374 \text{ H}$;

故试验频率: $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 59 \text{ Hz}$, 可满足 VT

制造厂对试验频率的要求;

最高试验电压按 $U_r = 1100 \text{ kV}$ 考虑, 则一次侧最大试验电流: $I_n = wCU_r = 11.3 \text{ A}$, 电抗器额定电流 12 A, 满足试验要求;

考虑充足的裕度, 试验时品质因数 Q 按照 30 考虑, 则耐压试验所需试验电源容量: $P = U_r I / Q = 300.7 \text{ kW}$, 450 kW 的变频电源和试验变压器, 可满足试验需求;

电源(三相 380 V)最大输出电流(1 min 耐压时)为: $I_l = \frac{P}{\sqrt{3}U} = 457 \text{ A}$, 现场需要准备 500 A 以上

的 380 V 试验电源, 并配置合适的电源电缆线。

超声局放定位装置应根据试验范围选用通道足够且具备无线传输功能的设备, 以满足定位测试的需求并提高安全保障。

该站特高压 1100 kV GIS 耐压主要试验设备配置选择如表 1。

表 1 该站特高压 1100 kV GIS 耐压主要试验设备配置

Table 1 Main test equipment of voltage test of UHV 1100 kV GIS of the station

设备名称	规格
串联谐振电抗器	300 kV/ 93.5H/12 A(×4 节) 额定容量: 450 kVA
励磁变压器	高压绕组额定电压/电流: 11250 V/10 A×4 组 低压绕组额定电压/电流: 460 V/978.3 A
电容分压器	1200 kV(300 kV/3900 pF×4 节); 精度: 1.0 级 容量: 450 kW
变频电源柜	输出频率: 20~400 Hz 输出电压: 0~500 V
绝缘摇表	500~10 000 V/5 mA
GIS 局部放电超声检测仪	声发射传感器工作频段: 20~220 kHz 声发射传感器前置放大倍数: 40 dB 无线发射器传输距离: 100~500 m 系统最大无线传感器节点数: 256 采样速度: 1 M Samples/s 发射器电池供电连续工作时间 ≥ 2 h

4 结论

从试验原理上说,特高压 1100 kV GIS 现场交流耐压试验同常规 GIS 并无区别,一般采用串联谐振的形式进行。但特高压 1100 kV GIS 绝缘配合紧密、试验电压高、设备容量大、套管高度高,给现场试验的实际实施带来诸多难题。特别是未开展过特高压试验的单位或人员,应提前做好充足的准备,重点考虑以下几个方面:

(1) 应综合考虑现场建设情况、试品容量、设备条件等因素,制定合理的(分段)试验方案,应考虑到带 PT 试验的情况,并使试验频率靠近工频范围,提高试验的严格性。

(2) 应对提前试验参数进行估算验证,确保仪器设备和现场电源能满足方案要求,一般情况下,品质因素 Q 取值 30~50 即可,确保留有充足的裕度。

(3) 试验前应提前到现场进行勘察,确认 GIS 侧避雷器、电压互感器的安装是否会对试验造成影响,并同施工安装方及时沟通。根据工程经验,耐压值为 1100 kV 时,空气绝缘净距不宜小于 10 m。

(4) 根据实践经验,使用 $\Phi 500$ mm 的加压用无晕导线,即可满足 1100 kV 电压等级耐压试验要求,高海拔及潮湿气候等条件时适当考虑增加无晕导线尺寸($\Phi 500\sim\Phi 800$ mm)。

(5) 特高压加压用无晕导线最长可达 20 余米,为保证足够强度,推荐使用金属编织工艺的无晕导线,并在使用时避免挤压、弯折。

(6) 特高压 GIS 耐用试验较常规耐压试验通流时间大大加长,试验回路中引线接头应确保可靠连接、良好导通,避免发热。同时,绝缘承力拉线在潮湿条件下也会流有一定的电流,可能发生烧断的情况,推荐使用直径不小于 20 mm 的尼龙绳。

参考文献

- [1] 1000 kV 系统电气装置安装工程电气设备交接试验标准: GB/T 50832—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
Standard for acceptance test of electric equipment of 1000 kV system electric equipment installation engineering: GB/T 50832—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [2] 卢鹏, 韩书谟, 赵文强, 等. 1100 kV GIS 关键技术研究[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 1-5.
LU Peng, HAN Shumo, ZHAO Wenqiang, et al. Study on key technology of 1100 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 1-5.
- [3] 王娜, 刘吉成, 张浩. 特高压 1100 kV GIS 用母线的研制[J]. 电力建设, 2014, 35(6): 102-105.
WANG Na, LIU Jicheng, ZHANG Hao. 1100 kV UHV busbar development for GIS[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(6): 102-105.
- [4] 徐建源, 路璐, 林莘. 1100 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 1100 kV disconnecter in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10): 2102-2106.
- [5] 夏文, 王传川, 徐晟. 特高压 1100 kV GIS 设备的两种技术方案[J]. 高压电器, 2011, 41(9): 44-49.
XIA Wen, WANG Chuanchuan, XU Sheng. Two technical solutions for UHV 1100 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 41(9): 44-49.
- [6] 刘振亚. 特高压交流电气设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [7] 张璐, 张乔根, 刘石, 等. 特快速瞬态过电压和雷电冲击作用下特高压 GIS 绝缘特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 335-341.
ZHANG Lu, ZHANG Qiaogen, LIU Shi, et al. Insulation characteristics of UHV GIS under VFTO and lightning impulse[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 335-341.
- [8] 裴振江, 何俊佳, 姚斯立. 特高压断路器的大容量开断试验等价性分析与开断试验方法[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 1-5.
PEI Zhenjiang, HE Junjia, YAO Sili. UHV circuit breaker high power breaking test analysis and test methods[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 1-5.
- [9] 赵晋泉, 邓晖, 吴小辰, 等. 基于广域响应的电力系统暂态稳定控制技术评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 1-9.
ZHAO Jinquan, DENG Hui, WU Xiaochen, et al. Review on power system transient stability control technologies based on PMU/WAMS[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 1-9.
- [10] 王晶, 曹文斌, 杨增力, 等. 多种电流互感器暂态饱和特性及其复杂工况下动模试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 58-65.
WANG Jing, CAO Wenbin, YANG Zengli, et al. Study

- on multiple types of CTs transient saturation and its dynamic simulation tests in complex operating conditions[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 58-65.
- [11] 高凡, 吴军, 刘涤尘, 等. 特高压电网社会效益评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 12-17.
GAO Fan, WU Jun, LIU Dichen, et al. Research on the social benefit evaluation method of UHV power grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 12-17.
- [12] 张猛, 李心一, 穆双录, 等. 特高压 63 kA 大容量 GIS 设备的研制[J]. 高压电器, 2011, 47(4): 1-6.
ZHANG Meng, LI Xinyi, MU Shuanglu, et al. Research and development of UHV 63 kA GIS with high-power[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(4): 1-6.
- [13] 李鹏, 李金忠, 崔博源, 等. 特高压交流输变电装备最新技术发展[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1068-1078.
LI Peng, LI Jinzhong, CUI Boyuan, et al. Achievements in the newest technology of UHV AC power transmission equipment[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1068-1078.
- [14] 孙秋芹, 汪泓, 刘洋, 等. 特高压输电线路潜供电流的暂态特性研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 97-103.
SUN Qiuqin, WANG Feng, LIU Yang, et al. Research on transient characteristics of secondary arc current of ultra high voltage transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 97-103.
- [15] 陈强, 李庆民, 丛浩熹, 等. 引入多重边界条件的 GIS 母线温度分布多场耦合计算及影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 187-195.
CHEN Qiang, LI Qingmin, CONG Haoxi, et al. Numerical calculation and correlative factors analysis on temperature distribution of gis bus bar based on coupled multi-physics methodology combined with multiple boundary conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 187-195.
- [16] 季洪鑫, 李成榕, 庞志开, 等. 电压波形对 GIS 自由金属颗粒放电特性的影响[J]. 电工技术学报, 2016, 31(13): 218-226.
JI Hongxin, LI Chengrong, PANG Zhikai, et al. Influence of voltage waveforms on partial discharge characteristics of GIS mobilized metal particles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(13): 218-226.
- [17] 董飞飞. 特高压输变电技术的现状分析和发展趋势研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(11): 1-3, 8.
DONG Feifei. Research on situation and development trend of UHV power transmission and transformation technology[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(11): 1-3, 8.
- [18] 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备: GB7674—1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages of 72.5 kV and above: GB7674-1997[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997.
- [19] 张文亮, 张国兵. 特高压 GIS 现场工频耐压试验与变频谐振装置限频方案原理[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(24): 1-4.
ZHANG Wenliang, ZHANG Guobing. UHVAC GIS on site power-frequency voltage tests and restricted-frequency principle of frequency-regulating resonance devices[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(24): 1-4.

收稿日期: 2017-06-23; 修回日期: 2017-11-10

作者简介:

傅智为(1985—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为高电压与绝缘技术。E-mail: xyfzw0921@qq.com

(编辑 姜新丽)