

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.03.025

1 100 kV GIS 断路器合闸电阻故障检测及分析

褚周健, 徐 鹏, 付文波, 赵文翰, 陈 昊, 谭风雷, 张海华
(国网江苏省电力有限公司检修分公司, 南京 211102)

摘要: 断路器的合闸电阻能够有效抑制合闸涌流以及操作过电压,对电网的稳定运行起着重要作用,合闸电阻一旦出现故障,无法正确投入或退出,将会造成巨大的设备和安全事故。由于1 100 kV GIS 断路器为多断口结构,断口间的配合时序偏差以及各触头弹跳因素的干扰,经常导致合闸电阻特性无法测量,或者测试结果误差较大。针对一起1 100 kV GIS 断路器合闸电阻预投入时间及阻值无法检测事件展开研究,分析其结构与测试原理,通过提高测试频率获取完整测试波形,推断得出合闸电阻的预投入时间及其阻值无法检测的原因是其中一侧的合闸电阻断口失效。解体检查,发现该断路器其中一侧合闸电阻动触头因固定螺栓断裂而导致该侧动触头脱落,验证了电阻断口失效导致动作特性无法检测的推断。最后从制作工艺、试验项目、试验仪器、检测手段等方面提出相应的建议及改进措施,为同类型设备的工艺管控和故障诊断提供参考。

关键词: 1 100 kV GIS; 断路器; 合闸电阻; 故障检测

Fault Detection and Analysis on Closing Resistor of 1 100 kV GIS Circuit Breaker

CHU Zhoujian, XU Peng, FU Wenbo, ZHAO Wenhan, CHEN Hao, TAN Fenglei, ZHANG Haihua
(Maintenance Branch Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The closing resistor of circuit breaker can effectively suppress the closing inrush current and switching over-voltage and play an important role in stable operation of power grid. The closing resistor will, once in case of fault and of correct operation and out of operation, causing huge equipment and safety accidents. Since the 1 100 kV GIS circuit breaker is of mostly multi-break structure, the coordination time sequence deviation across open contacts and the interference of contact bounce factor often lead to the characteristics of the closing resistor with no way to be measured, or the error of the test result is too large. As for such event that the pre-switching time and the resistance of the closing resistor of 1 100 kV GIS circuit breaker has no way to be detected, its structure and test principle are analyzed. It is concluded, through increasing the test frequency to obtain the complete test waveform, that one of the reasons that the pre-switching time and its resistance of the closing resistor have no way to be measured is the failure of across open contacts of closing resistor at one side. It is found through disassembly and inspection that the moving contact at one side of the closing resistor peels off due to breakage of the fixing bolt, and the conclusion that the operation characteristic has no way to be detected due to failure of open contacts of the resistor is verified. Finally, the corresponding suggestions and improvement measures are proposed from such aspects as manufacturing process, test items, test instruments and detection means, which can provide reference for process control and fault diagnosis of the same type of equipment.

Key words: 1 100 kV GIS; circuit breaker; closing resistor; fault detection

0 引言

随着社会经济的高速发展,人们对电力的需求

也快速增长。由于在输电容量、输电距离以及输电效率等方面的巨大优势,特高压技术日益为人瞩目^[1-13]。

1 100 kV 断路器作为超特高压变电站的主要设备之

收稿日期:2023-10-21; 修回日期:2023-12-27

基金项目:山东省自然科学基金面上项目(ZR2020ME194)。

Project Supported by National Natural Science Foundation General Projects of Shandong Province(ZR2020ME194).

一,其在电网运行时起到开合正常线路以及切除故障电流的作用,但在空载线路投切或是线路重合闸的情况下有可能会产生威胁电力系统设备安全的合闸过电压和重合闸过电压^[14-19]。当前,抑制上述过电压的普遍方法是在断路器上配置合闸电阻,现已被广泛应用于超特高压电网中^[20-22]。近年来,断路器合闸电阻异常时有发生,有时依靠常规的试验手段难以进行准确的故障诊断,在此背景下,综合运用多种检测手段从不同技术维度对断路器合闸电阻故障进行分析和判断,能有效甄别断路器合闸电阻当前状态,提高断路器的安全运行水平^[23-26]。

1 事故简介

2021年,对某特高压变电站一台ZF6-1100kV型断路器开展机械特性测试时,发现其合闸电阻值及预投入时间均无法检测,测试结果均为“0”。此型号断路器的合闸电阻预投入时间技术参数标准是8~11 ms,合闸电阻阻值标准为 $(560\pm 30)\ \Omega$ 。为排除因断路器机械特性故障造成的误判,遂对现场另一台同型号断路器开展合闸电阻测试,试验结果正常,合闸电阻动作特性的两个测试数据均在标准值参考范围内。从而基本可以断定,该断路器合闸电阻存在故障。

ZF6-1100kV型断路器采取双断口结构设计,每个主断口均并接一组合闸电阻^[27-29]。每极合闸电阻均由96个电阻片串联而成,与电阻断口的触头串联后并接在主断口两侧,其电气结构原理见图1。

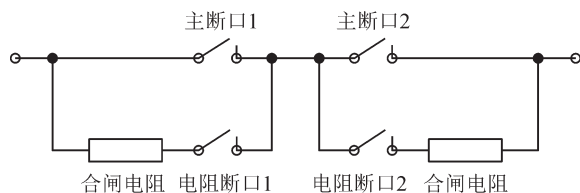


图1 ZF6-1100kV型断路器电气结构示意图

Fig. 1 Electrical structure of ZF6-1100kV circuit breaker

合闸电阻的动触头通过螺栓连接固定在主断口灭弧室的压气缸上,静触头采用弹簧结构与电阻串联。断路器在合闸时,固定在压气缸上的电阻动触头在主断口的带动下随着压气缸朝着合闸方向运动,由于主断口动、静触头间的开距大于合闸电阻触头 $(30\pm 1)\text{ mm}$,保证了合闸电阻触头能够提前于主断口8~11 ms接触,实现合闸电阻的预投入;分闸时,合闸电阻动触头随着压气缸在主断口的带动下朝着分闸方向运动,由于此时弹簧结构的合闸电阻静触头尚处于被压缩状态下,相当于增加了电阻

触头之间的开距,而分闸速度又远大于弹簧自身恢复速度,使得电阻动触头在分闸时完成“逃逸”,实现合闸电阻的先分操作。

2 原因分析

2.1 测试原理

合闸电阻动作特性测试原理为:通过采集断路器在合闸动作全过程中标准采样电阻的电压电流变化数据,再经A/D转换模块计算得出预投入时间和合闸电阻阻值^[30-31]。在分闸状态下,测试回路不通,标准采样电阻无电流通过,A/D转换值结果为零;合闸过程中,电阻触头先于主断口投入,采样电阻与合闸电阻串联构成闭合回路,通过串联分压原理即可计算得出电阻的阻值;当主断口接触时,合闸电阻被短路退出,测试回路的电流达到峰值,A/D转换值达到最大,再通过A/D转换模块对采集的数据进行计算即可得出合闸电阻值及其预投入时间。

根据上述测试原理,从分闸到完全合闸,测试数据应由3部分组成:合闸电阻投入前,电流值为零;合闸电阻断口投入而主断口未投入,电流值出现;主断口投入,电流值达到最大。导出断路器在合闸电阻正常投入状态下测试波形见图2,横坐标为对应的是测试时间,纵坐标对应的是测试电流。从图2可以看出,合闸过程中合闸电阻触头与主断口之间的配合存在明显的过渡“台阶”。第1个“台阶”表示合闸电阻开关闭合、主触头断开,即为合闸电阻预投入状态;第2个“台阶”表示主断口触头合上,电阻被短接退出,即合闸完成状态。

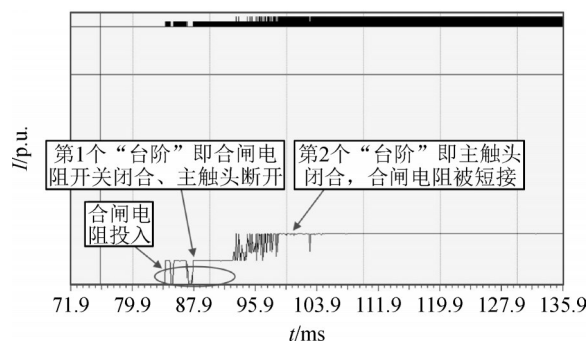


图2 合闸电阻正常检测波形

Fig. 2 Testing waveform of closing resistance in normal condition

2.2 原因初步分析

由于ZF6-1100kV型断路器采用双断口结构,两个断口之间存在时序配合关系,电阻触头和主触头在刚接触时会有较大的颤动,且外施的电压较低,因此在波形上会出现频繁的抖动现象。在触头颤动较为严重的情况下接入合闸电阻时,电流可能

出现断续,甚至无法保持稳定,导致无法计算合闸电阻,试验结果为“0”。

为解决无法获取测试波形的问题,现场将测试频率从 10 kHz 提高到 100 kHz,在同等测试环境及测试参数条件下,得到相对稳定的合闸电阻测试波形见图3。图3中在断路器合闸时间范围内,无过渡“台阶”波形,未发现合闸电阻预先投入的动作现象,测试波形直接进入主第2阶段,即:主触头将合闸电阻开关短接,因此仪器显示测试结果均为无。

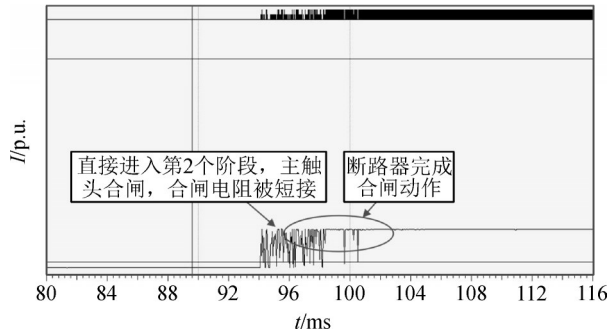


图3 合闸电阻异常检测波形
Fig. 3 Testing waveform of closing resistance under abnormal condition

根据测试波形分析,该断路器的合闸电阻未能正确投入,存在接触不良或接触不到位的可能。合闸电阻处于封闭的气室内部,无法直接观察,因此采用X光射线检测技术辅助观察合闸电阻的状态以及触头接触情况,由于特高压GIS断路器灭弧室筒壁较厚、直径较大,X光射线测试结果不明显,无法判断合闸电阻实际状态。为避免单一检测手段造成的故障误判,进一步开展断路器慢分慢合试验。经多次慢合操作,偶得合闸电阻测试结果为285 Ω(约为理论值(560±30) Ω的一半),且持续时间很短,稍一动作即消失,未见明显的合闸电阻预投入与主触头的时序配合。

结合上述测试结果推断,造成本次合闸电阻测试结果异常的原因为:断路器内部其中一个电阻断口失效,导致主触头在合上前无法测出合闸电阻阻值及预投入时间。只在主断口刚接通的一瞬间,即:一侧电阻断口1接通,另一侧主断口2接通,测得半极合闸电阻(约285 Ω),见图4。

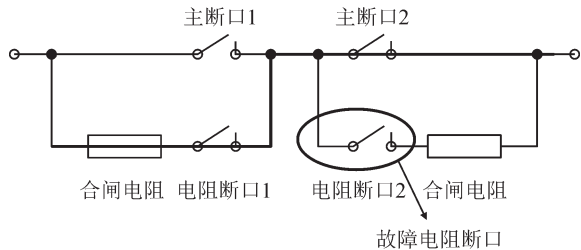


图4 合闸电阻断口故障示意图
Fig. 4 Faulting diagram of closing resistance fracture

本次案例的其中一侧电阻断口失效的原因有以下3种:一是合闸电阻故障,串联电阻片断裂损坏,或是电阻串短接片掉落或松动、接触不可靠,导致并联回路断开;二是合闸电阻静触头故障,触头内部的复位弹簧失效,在某一次合闸压缩后无法正常复位,相当于合闸电阻动、静触头间的开距变大,再次合闸时电阻被主断口短接,导致电阻无法实现先合;三是合闸电阻动触头故障,动触头在合闸过程中受到冲击变形、松动甚至脱落,造成合闸电阻断口失效。

3 解体检查

为进一步确认本次案例中合闸电阻检测结果异常的原因,将故障断路器返厂进行解体。检查发现该断路器内部其中一侧的合闸电阻动触头已完全脱落,并掉落至GIS罐体底部,见图5。

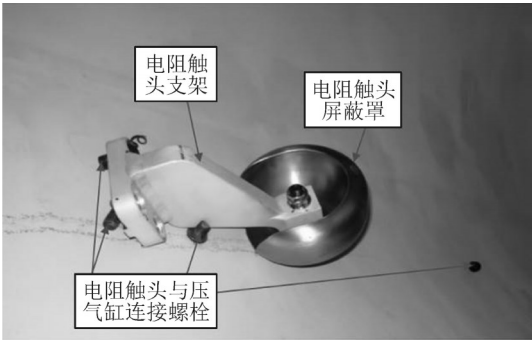


图5 脱落在罐体的动触头
Fig. 5 Contact of closing resistance falls off

压气缸上的4个动触头固定螺栓已全部脱落,其中两个长螺栓发生断裂;与动触头固定件连接的螺孔有明显撞击痕迹,且左上角螺孔表面存在较多毛刺,见图6。

对故障断路器出厂参数以及各部件进一步检查,复测各断口开距参数,均在合格范围内;拆解检查正常侧及故障侧动、静触头,故障侧动触头固定安装支撑件螺孔朝向分闸方向有磨损痕迹,螺栓断裂方向也为分闸运动方向;对断裂以及完好的固定螺栓进行金属材质分析,两种螺栓材质成分和金相测试均满足要求;取出两侧静触头弹簧开展力学特性测试,测试结果满足技术要求;排除了螺栓材质问题以及静触头复位弹簧卡涩故障。

厂内安装图纸和工艺指导文件要求:安装4个动触头固定件螺栓前应涂抹蓝色锁紧剂,且安装后需施加55 N·m的力矩。解体检查时发现,正常侧及故障侧的固定螺栓均无涂抹蓝色锁紧剂痕迹,正常侧螺栓力矩复验55 N·m符合要求,故障侧螺栓因脱落无法开展力矩复验。

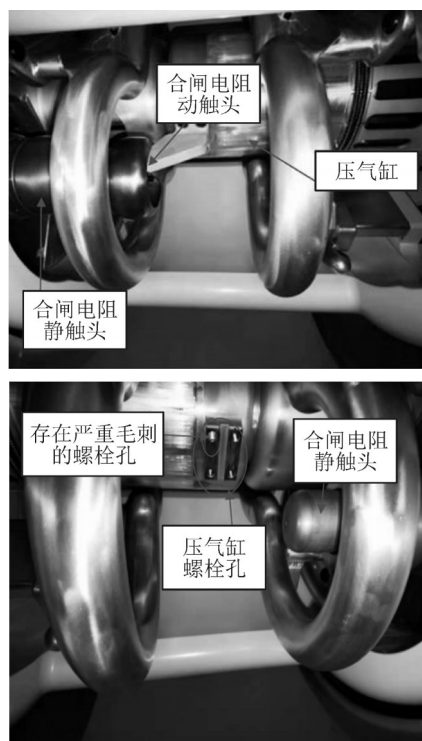


图6 非故障侧及故障侧合闸电阻断口图

Fig. 6 Fracture of closing resistance on health side and fault side

4 结论及建议

4.1 结论

造成本次断路器合闸电阻故障的原因:合闸电阻动触头固定螺栓发生断裂导致动触头的脱落为本次断路器故障的直接原因。

电阻动触头与压气缸使用4个M12螺栓连接,其中2个M12×35螺栓断裂,2个M12×25螺栓脱落。电阻动触头与压气缸连接处采用止口连接,确保连接螺栓不承受剪切力。当合闸电阻开关动触头两个M12×35螺栓长螺栓自身松动后,合闸电阻开关受重力作用与压气缸接触面产生缝隙,在分合闸过程中,受自身惯性和静触头反作用力影响,增加合闸电阻开关动触头逆时针方向受力。长螺栓在压气缸螺孔的横向推力和逆时针方向拉力作用下,使得缝隙进一步扩大,当螺栓拔出距离超出电阻动触头与压气缸止口深度(4 mm)时,长螺栓开始承受剪切力,随着分合闸操作次数的不断累加,固定螺栓逐渐松动乃至断裂。

对比非故障断口合闸电阻动触头固定螺栓,虽未涂锁紧剂,在同等运行条件及动作次数情况下,螺栓未发生松动、脱落等异常情况。因此推测:故障断口合闸电阻动触头紧固螺栓安装时,未按照工艺要求做好力矩复核,是导致合闸电阻动触头固定

螺栓断裂的一个重要原因。

4.2 建议

排查同型号、同批次断路器设备合闸电阻螺栓锁紧剂的涂抹和力矩复检情况,按照工艺指导要求建立并完善三级工艺检查机制,严格管控厂内的生产装配环节,避免因制造或安装而出现断路器质量问题。

目前针对合闸电阻动作特性的预防性试验内容主要是合闸电阻的阻值及其预投入时间,电阻阻值的测量能够反应合闸电阻本身是否存在故障,预投入时间的测试在一定程度上能够反应断路器合闸时电阻触头与主触头之间的配合关系,但并不能反应分闸时电阻断口退出时序与主触头之间的配合关系,若电阻断口的退出时间与主触头配合不当,比如未能正确的先于主触头分闸或是退出时间偏长,则会造成合闸电阻触头拉弧、引发事故,因此建议预防性试验内容增加分闸时合闸电阻退出时间的测试。

多断口结构断路器断口间的时序配合偏差以及触头间弹跳因素的干扰,往往造成合闸电阻无法精确检测,改进升级机械特性测试仪,提高采样电压和采样频率,能有效解决这一弊端。为避免单一技术手段造成误判,应采用多元检测方法提高故障检测准确性,如采用大功率X光检测设备检查罐体内部结构件状态;采用慢分慢合手段判断内部结构和配合关系是否存在异常等。

参考文献:

- [1] 郁丹,郭雨涵,唐人. 基于场景聚类的分布鲁棒区域新能源容量规划策略[J]. 供用电, 2022, 39(2): 86-92.
YU Dan, GUO Yuhan, TANG Ren. Distributed robust regional new energy capacity planning strategy based on scenario clustering[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(2): 86-92.
- [2] 刘斌,张玉琼,麻林巍,等. 西北地区源端基地综合能源系统的技术方案设计及优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 568-580.
LIU Bin, ZHANG Yuqiong, MA Linwei, et al. Design and optimization of technical schemes of supply-side base integrated energy systems in northwest China[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 568-580.
- [3] 刘颖坤,刘东,翁嘉明,等. 基于改进集中竞价的多能源系统交易优化方法[J]. 供用电, 2022, 39(10): 75-83.
LIU Yingkun, LIU Dong, WENG Jiaming, et al. Multi-energy system transaction optimization method based on improved centralized bidding[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(10): 75-83.

- [4] 牟大林, 林圣, 李小鹏, 等. 白鹤滩-江苏特高压混合直流输电线路行波保护适应性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 88-98.
MU Dalin, LIN Sheng, LI Xiaopeng, et al. Adaptability analysis of traveling wave protection for the Baihetan - Jiangsu serial hybrid LCC-MMC UHVDC transmission line [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 88-98.
- [5] 刘怀合, 黄桃, 秦福均, 等. 一种新型1 000 kV特高压交流变压器高压出线装置方案的研究[J]. 变压器, 2022, 59(11): 47-50.
LIU Huaihe, HUANG Tao, QIN Fujun, et al. Research on a new high voltage outlet device for 1 000 kV UHV AC transformer[J]. Transformer, 2022, 59(11): 47-50.
- [6] 李湘旗, 章德, 廖长风, 等. 针对特高压直流接入受端电网的TCSC装置定容选址规划[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1): 82-89.
LI Xiangqi, ZHANG De, LIAO Changfeng, et al. Capacity and location planning of TCSC for UHVDC receiving end power grid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 82-89.
- [7] 梁利辉, 李立峰, 付炜平, 等. 特高压同塔双回交流输电线路下方钢架大棚暂态电击特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(3): 54-60.
LIANG Lihui, LI Lifeng, FU Weiping, et al. Transient electric shock characteristics of steel frame sheds underneath UHV twin - tower ac transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(3): 54-60.
- [8] 刘泽洪, 王承玉, 路书军, 等. 苏通综合管廊工程特高压GIL关键技术要求[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2377-2385.
LIU Zehong, WANG Chengyu, LU Shujun, et al. Key technical parameters of UHV GIL in sutong utility tunnel project[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2377-2385.
- [9] 贾勇勇, 邓洁清, 腾云, 等. 特高压GIL超声波局部放电检测装置设计及校验技术研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2019(3): 27-30.
JIA Yongyong, DENG Jieqing, TENG Yun, et al. Design and calibration technology of UHV GIL ultrasonic partial discharge detection device[J]. Automation & Instrumentation, 2019(3): 27-30.
- [10] 谷琛, 李鹏, 何慧雯, 等. ± 1 100 kV以上电压等级直流输电技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6745-6753.
GU Chen, LI Peng, HE Huiwen, et al. Research on ± 1 100 kV and above UHV DC transmission technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6745-6753.
- [11] 陈铁, 蔡东阁, 何思敏, 等. 基于数据驱动的直流输电后续换相失败预判的研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(8): 68-74.
CHEN Tie, CAI Dongge, HE Simin, et al. Prediction of subsequent commutation failure of HVDC transmission based on data-driven[J]. Smart Power, 2022, 50(8): 68-74.
- [12] 梁利辉, 赵志刚, 闫敏, 等. 榆横—潍坊1 000 kV特高压交流输电线路检修接地方案研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(1): 36-43.
LIANG Lihui, ZHAO Zhigang, YAN Min, et al. Research on grounding scheme of 1 000 kv UHV AC transmission line in Yuheng - Weifang during maintenance[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1): 36-43.
- [13] 陶留海, 孙超, 李雪奎, 等. ± 1 100 kV特高压直流输电线路带电作业实用化技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(z1): 134-139.
TAO Lihai, SUN Chao, LI Xuekui, et al. Study on the practical technology for ± 1 100 kV UHVDC transmission line live working[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(z1): 134-139.
- [14] 刘子英, 张靖, 吴文辉. 合闸电阻对1 000 kV GIS高压隔离开关VFTO的抑制研究[J]. 高压电器, 2021, 57(5): 1-6.
LIU Ziying, ZHANG Jing, WU Wenhui. Study on suppressing VFTO of 1 000 kV GIS disconnecter by closing resistor [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(5): 1-6.
- [15] 史华勃, 张华, 孙文成, 等. 藏中联网工程系统调试风险防控策略[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2214-2221.
SHI Huabo, ZHANG Hua, SUN Wencheng, et al. Risk prevention and control strategy for system test of central Tibet AC interconnection project[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2214-2221.
- [16] 何金良, 邬锦波, 孟鹏飞, 等. 深度限制特高压系统操作过电压的可行性分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 210-217.
HE Jinliang, WU Jinbo, MENG Pengfei, et al. Feasibility analysis of deeply limiting switching overvoltage in UHV system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 210-217.
- [17] 李劲彬, 陈隽. 断路器合闸电阻投入过程中辅助断口触头的弹跳检测与诊断[J]. 高压电器, 2016, 52(1): 180-183.
LI Jinbin, CHEN Jun. Bounce detection and diagnosis of the auxiliary contacts during the switching process of the circuit breaker's closing resistor[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1): 180-183.
- [18] 马飞越, 牛勃, 黎炜, 等. 750 kV交流滤波器用断路器合闸电阻故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(4): 145-151.
MA Feiyue, NIU Bo, LI Wei, et al. Fault analysis of circuit breaker's closing resistor for 750 kV AC filter[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(4): 145-151.

- [19] 曹虹,夏秋,俞斌,等.特高压直流近区交流输电线路智能重合闸策略[J].电力系统保护与控制,2022,50(3):156-163.
CAO Hong, XIA Qiu, YU Bin, et al. Intelligent reclosing strategy for near area AC transmission lines connected with UHVDC[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3):156-163.
- [20] 牛勃,马飞越,丁培,等.800 kV交流滤波器场用断路器合闸电阻故障分析[J].高压电器,2020,56(7):36-43.
NIU Bo, MA Feiyue, DING Pei, et al. Fault analysis of pre-insertion resistors for 800 kV circuit breakers in AC filters field[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(7):36-43.
- [21] 李海涛,须雷,曹树江,等.避免高补偿度线路直流偏置风险的断路器合闸控制方法[J].电力工程技术,2019,38(1):56-61.
LI Haitao, XU Lei, CAO Shujang, et al. Control method of circuit breaker to avoid DC offset risk in closing transmission lines with high level of compensation[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2019, 38(1):56-61.
- [22] 班连庚,郑彬,周佩朋,等.特高压交流变压器选相合闸技术研究及工程应用[J].电网技术,2018,42(4):1226-1233.
BAN Liangeng, ZHENG Bin, ZHOU Peipeng, et al. Research and engineering application of phase selection closing technology for UHV AC transformers[J]. Power System Technology, 2018, 42(4):1226-1233.
- [23] 黎卫国,张长虹,夏谷林,等.500 kV交流滤波器用断路器灭弧室爆炸故障分析与防范措施[J].高压电器,2017,53(5):181-187.
LI Weiguo, ZHANG Changhong, XIA Gulin, et al. Research and protecting measures on explosive accident of circuit breaker arc-extinguishing chamber used in 500 kV AC filter[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(5):181-187.
- [24] 李振强,周沛洪,娄颖,等.特高压输电线路断路器不装合闸电阻的可行性研究[J].高电压技术,2015,41(11):3721-3727.
LI Zhenqiang, ZHOU Peihong, LOU Ying, et al. Feasibility research on canceling breaker closing resistor of UHV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11):3721-3727.
- [25] 孟维东,殷福煜,常越,等.800 kV SF₆罐式断路器合闸电阻研究[J].高压电器,2020,56(8):109-113.
MENG Weidong, YIN Fuyu, CHANG Yue, et al. Research of closing resistor in 800 kV SF₆ tank circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8):109-113.
- [26] 李宏楼,张帆,孙龙勇,等.550 kV柱式断路器合闸电阻可靠性改进[J].高压电器,2021,57(1):157-164.
LI Honglou, ZHANG Fan, SUN Longyong, et al. Reliability improvement of closing resistor for 550 kV column circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(1):157-164.
- [27] 周孝法,魏向向,王宾,等.一起交流滤波器用断路器击穿事故分析[J].电力系统保护与控制,2017,45(20):38-43.
ZHOU Xiaofa, WEI Xiangxiang, WANG Bin, et al. An accident analysis of circuit breaker explosion in AC filter branch in substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20):38-43.
- [28] 孔杰,何柏娜,宁家兴,等.断路器暂态模型及参数对VFTO影响的仿真分析[J].电测与仪表,2018,55(12):32-38.
KONG Jie, HE Baina, NING Jiaxing, et al. Simulation analysis of the influence of circuit breaker transient model and parameters on VFTO[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(12):32-38.
- [29] 彭翔天,高燃,万礼嵩,等.500 kV断路器合闸电阻故障分析及运行建议[J].东北电力技术,2020,41(7):53-56.
PENG Xiangtian, GAO Ran, WAN Lisong, et al. Fault analysis and operation suggestion on closing resistance of 500 kV circuit breaker[J]. Northeast Electric Power Technology, 2020, 41(7):53-56.
- [30] 赵云学,李彧,李科军,等.1 100 kV SF₆断路器合闸电阻研究[J].电气时代,2018(7):104-105.
ZHAO Yunxue, LI Yu, LI Kejun, et al. Research on closing resistance of 1 100 kV SF₆ circuit breaker[J]. Electric Age, 2018(7):104-105.
- [31] 杨景刚,贾勇勇,赵科,等.一起550 kV断路器合闸电阻阻值超标现象分析[J].高压电器,2015,51(8):197-199.
YANG Jinggang, JIA Yongyong, ZHAO Ke, et al. Analysis of an excessive resistance phenomenon of 550 kV circuit breaker closing resistor[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8):197-199.
- 褚周健(1992—),男,工程师,硕士,研究方向为高电压与绝缘、电气设备故障诊断(E-mail:15951083235@163.com)。
- 徐鹏(1990—),男,工程师,硕士,研究方向为高电压与绝缘、电气设备故障诊断(通信作者)(E-mail: xupeng1990_ncepu@163.com)。
- 付文波(1989—),男,工程师,硕士,研究方向为高电压与绝缘、电气设备故障诊断(E-mail:767138922@qq.com)。
- 赵文翰(1987—),男,工程师,硕士,研究方向为高电压与绝缘、电气设备故障诊断(E-mail:799210898@qq.com)。
- 陈昊(1980—),男,研究员级高工,博士,研究方向为电网运检管理(E-mail:pingfengma@126.com)。
- 谭风雷(1989—),男,工程师,硕士,研究方向为电网运检管理(E-mail:220122094@seu.edu.cn)。
- 张海华(1993—),男,工程师,硕士,研究方向为电网运检管理(E-mail:zhhearl@163.com)。