

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.05.038

500 kV 液压机构断路器重合闸异常分析

甄玉杰^{1,2}, 蔡青青², 闫斌斌³

(1. 河北省仪器仪表工程技术研究中心, 河北 承德 067000; 2. 承德石油高等专科学校, 河北 承德 067000; 3. 国网山西省电力公司检修分公司, 太原 030000)

摘要: 针对电力系统中发生的故障大部分都是瞬时性故障,采用自动重合闸装置可以切除此类故障。文中介绍了一起配用液压机构的高压断路器重合闸异常质量事件,通过现场分析线路保护装置的动作情况和后台报文,检查断路器操作机构压力微动开关接点压力整定值,查明事件原因为合闸低油压闭锁接点的调节螺杆受挤压偏离轴线使合闸闭锁油压整定值偏高,断路器分闸后机构油压低于合闸闭锁整定值而导致重合闸失败。并根据故障原因提出了处理方案,通过现场反复测试验证了方案的有效性。

关键词: 高压断路器; 重合闸; 瞬时性故障; 质量事件; 压力微动开关

Analysis on an Abnormal Reclosing Event of the 500 kV Circuit Breaker with Hydraulic Operating Mechanism

ZHEN Yujie^{1,2}, CAI Qingqing², YAN Binbin³

(1. Hebei Instrumentation Engineering Technology Research Center, Hebei Chengde 067000, China; 2. Chengde Petroleum College, Hebei Chengde 067000, China; 3. State Grid Maintenance Company of Shanxi Province, Taiyuan 030000, China)

Abstract: This paper reports an abnormal reclosing event of the high-voltage circuit breaker equipped with hydraulic operating mechanism. The action of the line protection device and the background message were analyzed on site, and the microswitch pressure setting value of the operating mechanism was checked. As a result, this event was found to be due to that the adjusting screw of the low-oil pressure closing lock contact was squeezed off the axis to cause higher setting value of closing lock oil pressure, and after the circuit breaker was opened the oil pressure of the mechanism was lower than the setting value of closing lock oil pressure, which led to the failure of reclosing. A resulting treatment scheme was proposed, and multiple tests on site verified the effectiveness of the scheme.

Key words: high-voltage circuit breaker; reclosing; transient faults; quality event; pressure microswitch

0 引言

高压断路器作为电力系统中承担灭弧和开断负荷或异常电流的重要一次设备,其动作的可靠性尤为重要,高压断路器的不正确动作会引起国民经济的巨大损失^[1-8]。根据电力系统发生的故障统计可知,由于线路对树枝放电、鸟害、大风引起的碰线等瞬时性故障占比达到80%。此类型故障在断路器

跳闸后会立即消除,继电保护发出重合闸指令,线路重合成功恢复正常运行,当重合闸跳令不能出口或机构本身重合闸闭锁都会导致重合闸失败,扩大事故范围^[9-15]。操动机构是决定断路器动作性能的重要组成部分,目前500 kV及以上电压等级的高压断路器操动机构主要是液压机构。液压机构体积小,储存能量大,操作噪声少,但是经常出现渗漏油缺陷,随环境温度变化影响较大^[16-21]。

收稿日期:2019-12-19; 修回日期:2020-02-11

基金项目:河北省自然科学基金(E2018502134)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of Hebei (E2018502134).

针对一起 500 kV 液压机构断路器合闸低油压闭锁导致断路器重合闸失败的质量事件,通过现场分析线路保护装置的动作情况,检查断路器的操作机构压力微动开关接点,最终查明事件原因。现场检修人员更换合闸低油压闭锁接点的调节螺杆,调整重合闸闭锁油压、合闸闭锁油压整定值,测试远控和就地实现分—合—分的过程,未出现重合不成功的情况。

1 故障过程

2016年1月20日20时32分,某500 kV变电站1 500 kV线路发生A相接地故障跳闸,双套主保护正确动作,对侧的变电站2 5031、5032断路器重合成功,该站5012断路器重合成功,5011断路器A相合闸闭锁,非全相延时动作,三相跳闸,故障线路主接线图见图1。

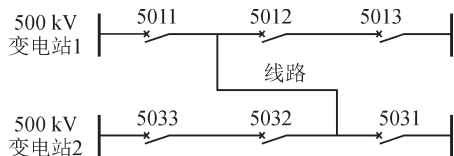


图1 故障线路主接线图

Fig. 1 Mine wiring diagram of the fault line

20时32分43秒850毫秒,A相跳闸,20时32分43秒930毫秒,5011测控合闸低油压闭锁动作,20时32分45秒361毫秒,A相重合闸出口,20时32分46秒460毫秒,非全相动作,20时32分48秒012毫秒,5011测控合闸低油压闭锁返回。20时45分,5011断路器转冷备,检修人员进行现场检查。

2 事件调查

该变电站5011、5012断路器设备型号ZF27-550的HGIS,额定电压550 kV,出厂日期2013-06-03,投运日期2014-07-02。操动机构形式为液压机构,分相操作,铭牌值见表1。

表1 断路器参数值

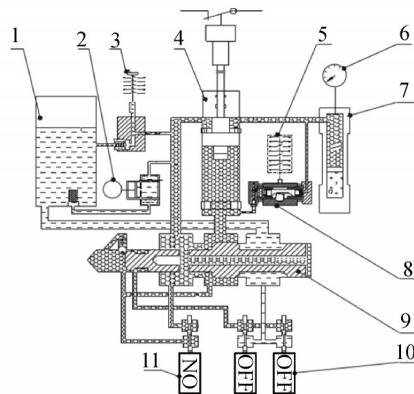
Table 1 Circuit breaker parameter MPa

参数名称	额定值	参数名称	额定值
SF ₆ 额定压力	0.60	油泵停止油压	32.6
SF ₆ 报警压力	0.52	重合闸闭锁油压	29.1
SF ₆ 闭锁压力	0.50	合闸闭锁压力	27.8
油泵启动压力	31.60	分闸闭锁压力	25.8

2.1 液压机构动作原理

该型号断路器使用CYT型的液压操动机构,为常高压差动保持式液压机构。采用瑞士贝林格公司生产的控制阀系统,为集成块组合方式,结构紧

凑,无外置管路,性能优良,可靠性高。CYT型液压机构原理图见图2。



1—油箱;2—油泵电机;3—油压开关;4—工作缸;
5—辅助开关;6—油压表;7—贮压器;8—信号缸;
9—控制阀;10—分闸电磁铁;11—合闸电磁铁。

图2 液压机构原理图

Fig. 2 Hydraulic mechanism schematic

合闸操作:分闸位置时,工作缸活塞上部处于高油压状态,活塞杆下部处于零压状态。合闸电磁铁接受命令后,控制阀中合闸一级阀的阀口打开,高压油经一级阀进入二级阀阀杆的活塞左侧推动二级阀向右运动,封住连通工作缸的排油通道打开高压通道,由于工作缸活塞下部受力面积大于上部,便产生一个向上的力,推动活塞向上运动实现合闸。工作缸活塞向上运动的同时也带动辅助开关转换,主控室内的合闸指示信号接通。

分闸操作:分闸电磁铁接受命令后,控制阀中分闸一级阀阀口打开,二级阀左侧的高压油排出,二级阀向左运动,打开连通工作缸的排油通道封住高压通道。同时,工作缸活塞下部与油箱连通成为低压状态,活塞在上部油压作用下向下运动,实现分闸。同时带动辅助开关转换,主控室内的分闸指示信号接通。

由该型号的断路器动作原理可知,导致重合闸失败的原因主要有继电保护装置动作不正确引起分合闸电磁铁动作不正确和断路器机构本身重合闸闭锁。文中主要从断路器保护装置、控制回路故障和断路器本体操作机构故障分析此次事故原因。测试,查明原因为油压开关故障。首先分析保护装置的故障简报和断路器控制回路,其次进行了断路器液压机构外观检查和油压开关接点测试。

2.2 断路器保护装置、控制回路分析

从保护装置的故障简报可知,5011断路器5 ms保护启动,27 ms A相跟跳动作,80 ms A相单跳启动重合,1 584 ms重合闸动作;5012断路器5 ms保护启动,25 ms A相跟跳动作,80 ms A相单跳启动重合,1 284 ms重合闸动作。由线路微机电力录波图

可知,5012 断路器 A 相重合闸成功,5011 断路器 A 相保护重合闸出口但 A 相没有合闸,非全相延时动作 A 相跳闸。后台机报文可知:20 日 20 时 32 分,该线路 A 相故障跳闸,双套主保护正确动作,5012 断路器重合成功,5011 断路器 A 相合闸闭锁,非全相延时动作,三相跳闸,5011 测控合闸低油压闭锁动作,后台显示有:“低油压合闸闭锁”、“控制回路 I 断线”、“控制回路 II 断线”、“压力低禁止合闸”等信号。对 5011 断路器的重合闸功能进行检查,重合闸跳令发出后,保护合闸接点的合闸保持时间和出口电压都满足要求,从而判定从保护装置到断路器合闸回路的信号可以准确传送。由上可知,线路保护装置的动作是正确的,初步判断是 5011 断路器 A 相机构有缺陷,导致断路器接到重合闸跳令不能执行。断路器合闸控制回路原理图见图 3,元件代号说明见表 2。

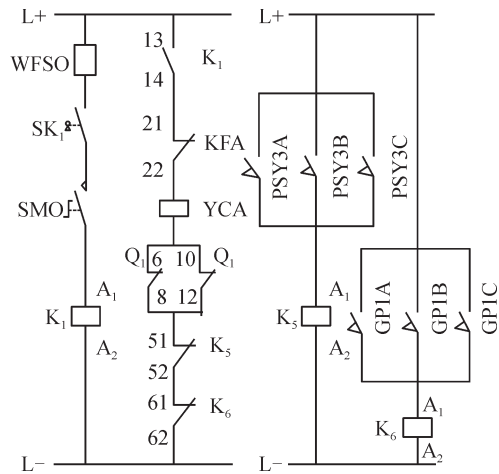


图3 合闸回路原理图

Fig. 3 Closing circuit schematic

表 2 合闸回路二次元件表

Table 2 Closing circuit secondary element			
元件编号	元件名称	元件编号	元件名称
K ₁	中间继电器	Q ₁	辅助开关
K ₅	合闸低油压闭锁继电器	YCA	合闸线圈
K ₆	低气压闭锁继电器	KFA	防跳继电器
PSY ₃	合闸低油压闭锁接点	GP ₁	SF ₆ 低气压闭锁接点

现场 5011 断路器处于分位,检修人员检查 5011 断路器液压机构油压值为 32.6 MPa,SF₆密度继电器表 0.62 MPa,用万用表检查合闸回路,K₁的 13 接点到 K₆的 62 接点是导通的,说明二次回路无异常。用万用表检查分闸二次回路也无异常,合闸脱扣器、分闸脱扣器的动作电压也满足要求。现场遥控合

闸 5011 断路器,可以正确动作,此时现场机构油压值为 30.5 MPa,油泵电机启动打压到 32.8 MPa。现场模拟单相接地故障,此时 5011 断路器 A 相重合闸成功,机构油压值为 29.2 MPa。

由上述分析可得,5011 断路器 A 相发生接地故障时,线路保护装置的动作是正确的,通过现场模拟单相接地故障可知,断路器本体的操作机构也是正常。厂家油压闭锁值设定应该是重合闸闭锁油压高于合闸低油压闭锁值,根据后台报文只报“低油压合闸闭锁”而没有报“重合闸闭锁”报文,初步判断应该这是由于合闸低油压闭锁值整定太高。

2.3 油压开关检查

现场人员对 5011 断路器 A 相液压机构现场检查发现 PSY₃合闸低油压闭锁接点的调节螺杆与闭锁接点轴线有偏差,调节螺杆顶部有受挤压的迹象,其他调节螺杆都正常。

对液压机构的油压开关接点现场进行了测试,测试结果如下:

- 1)模拟机构微动开关逐一动作与后台报文显示一致,检查二次接线正确。
- 2)通过油压表,检查机构压力微动开关的整定值,液压机构油压额定值与实际值比较见表 3。

表 3 液压机构油压整定值与实际值比较

Table 3 Comparison of pressure setting value and actual value of hydraulic mechanism MPa			
项目名称	额定值	测试值	备注
油泵启动油压(P ₂)	31.6±1.0	31.6	满足
油泵停止油压(P ₁)	32.6±1.0	32.8	满足
合闸闭锁油压(P ₄)	27.8±0.8	30.0	不满足
分闸闭锁油压(P ₅)	25.8±0.7	25.8	满足
重合闸闭锁油压(P ₃)	30.5±1.0	29.5	满足
油泵停止油压和油泵启动油压之差(P ₁ -P ₂)	≥1.0	1.2	满足
油泵启动油压和重合闸闭锁油压之差(P ₂ -P ₃)	1.3	2.1	偏大
油泵启动油压和合闸闭锁油压之差(P ₂ -P ₄)	4.3	1.6	偏小
合闸闭锁油压和分闸闭锁油压之差(P ₄ -P ₅)	2.3	4.2	偏大

通过对 5011 断路器 A 相液压机构油压开关外观检查和接点测试,由于 PSY₃合闸低油压闭锁接点的调节螺杆与闭锁接点轴线有偏差使合闸闭锁油压(P₄)整定值超出最大额定值 1.4 MPa,与出厂试验报告不符,导致和 P₄相关的实际压差都不满足厂家提供标准。

2.4 模拟重合闸动作

对设备进行单次分闸和合闸能量消耗检查,发现分闸一次消耗约2.1 MPa,合闸一次消耗约1.5 MPa。额定压力下(32.6 MPa),模拟A相重合闸,分闸(能量消耗约2.1 MPa),油压降为30.5 MPa,高于合闸闭锁油压,断路器合闸回路中K₅的51、52触点保持闭合,重合闸正确动作。压力降至31.8 MPa(高于油泵启动压力值),模拟A相重合闸,分闸(能量消耗约2.1 MPa),油压降为29.7 MPa,PSY₃合闸油压闭锁接点闭合,合闸低油压闭锁继电器K₅线圈通电,断路器合闸回路中K₅的51、52触点断开,重合失败。

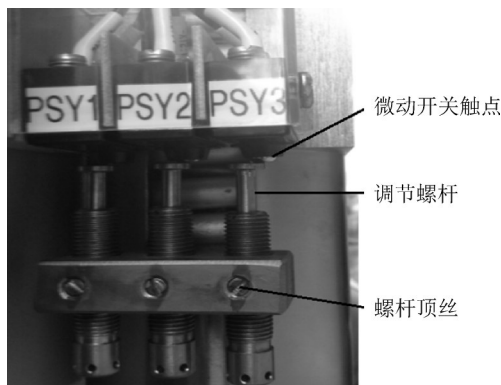
由上述分析可知,此次故障根本原因为合闸低油压闭锁接点的调节螺杆与闭锁接点轴线有偏差使P₄整定值偏高。当由于外界因素使断路器油压在31.6 MPa到32.1 MPa之间时,断路器分闸后油压低于P₄整定值,合闸闭锁。该次设备故障发生时间为1月20日,有大风降雪,温度变化幅度比较大,可能机构油压正好处于31.6 MPa到32.1 MPa之间,断路器分闸后,油压低合闸闭锁,导致重合闸失败。

3 现场处理方案

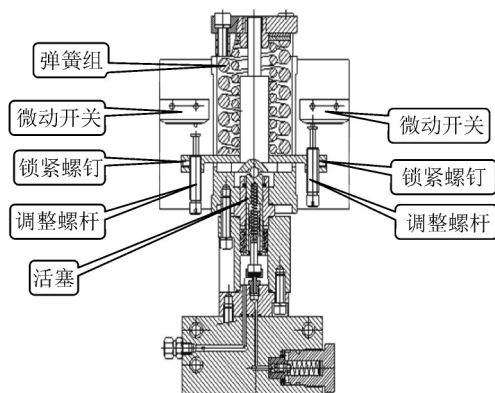
由于PSY₃合闸低油压闭锁接点的调节螺杆受挤压偏离轴线,现场更换调接螺杆。现场通过调节油压开关上的调节螺杆与微动开关触点的距离来实现闭锁功能。松开调节螺杆顶丝,使调节螺杆可以上下位移来调整距离,调节时需观察压力表示值,来判断闭锁调节功能。油压开关见图4。

液压机构油泵启动压力值为(31.6±1.0) MPa,厂家工作人员技术研究后将油泵启动压力值从31.6 MPa调整为31.8 MPa,可以使液压机构一直保持在相对高压状态,此压力值满足厂家技术要求。现场调试液压机构油泵启动压力值为31.8 MPa。由于该站所处环境温度变化剧烈,为了防止合闸被闭锁,将启动压力值与合闸闭锁值的差值基准值由3.8 MPa上调为4.5 MPa,但是不会造成断路器性能下降和功能异常,由此可得出调试后的合闸闭锁为27.3 MPa。整定值的得出是根据厂家试验及技术分析得到,满足厂家技术要求。对5011断路器三相油压值整定见表4。

理论上对5011断路器液压机构仅调整的是闭锁压力的整定值,氮气预充压力19.0 MPa没变,断路器液压机构的压力系统和传动系统没变,不会影响操作机构的性能,从而也不会影响断路器动作性能。为进一步确认断路器的动作特性指标,现场用石家庄汉迪GKC436E高压开关测试仪对5011A相



(a) 油压开关实物



(b) 油压开关内部结构

图4 油压开关

Fig. 4 Oil pressure switch

表4 5011断路器油压整定值

Table 4 5011 circuit breaker pressure setting value

项目名称	整定值	MPa		
		A相测试值	B相测试值	C相测试值
油泵启动油压	31.8	31.8	31.7	31.9
油泵停止油压	33.2	33.2	33.1	33.2
合闸闭锁油压	27.3	27.3	27.3	27.3
分闸闭锁油压	25.3	25.2	25.3	25.3
重合闸闭锁油压	30.8	30.9	30.9	30.8

断路器进行机械特性测试。断路器机械特性试验测试值见表5,机械特性曲线见图5。

表5 断路器机械特性测试值

Table 5 Result of mechanical characteristics

项目	测试值	交接值	厂家标准
分闸时间/ms	15.7	15.6	15.0 ~ 20.0
分闸速度/(m·s ⁻¹)	11.53	11.33	11.00 ~ 13.00
合闸时间/ms	65.8	65.6	60.0 ~ 80.0
合闸速度/(m·s ⁻¹)	5.03	5.00	4.50 ~ 5.50

通过数据比对分析,调整之后的断路器各项性能参数都符合厂家技术要求。在非常极端情况下,

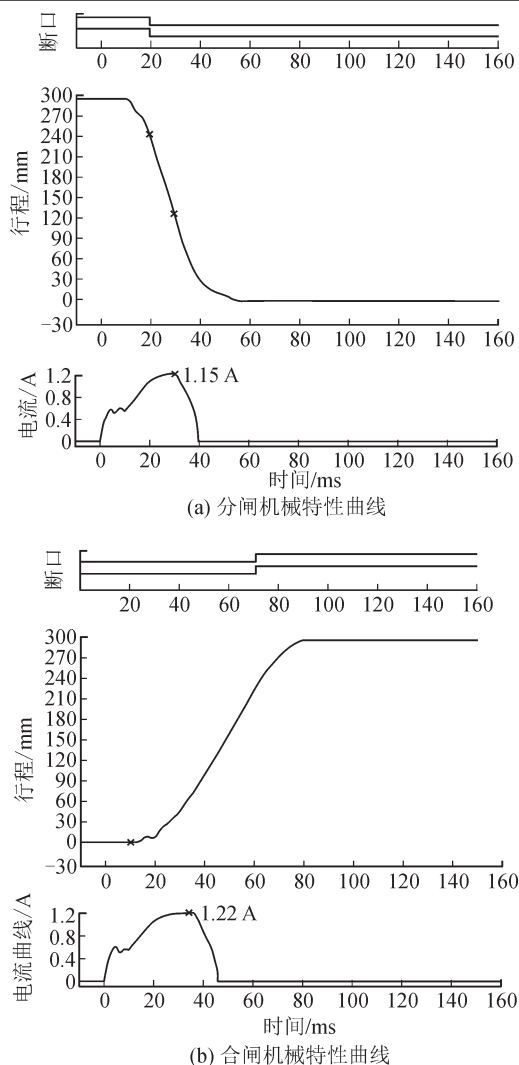


图5 断路器机械特性曲线

Fig. 5 Curve of circuit breaker mechanical characteristic
断路器正常运行时油压也不会低于启动压力值,即不小于31.8 MPa。油压值整定后经过现场实际测试,5011断路器A、B、C相在31.8 MPa下均能实现一次分—合一分的过程,未出现重合不成功的情况。

4 预防措施

该次故障的主要原因是断路器液压机构合闸低油压闭锁接点的调节螺杆受挤压偏离轴线导致合闸闭锁油压整定值偏高,暴露出制造厂装配工艺离散性较大,明显超出设计制造标准要求,且出厂检验把关不严等问题。厂家没有全面注意液压操作机构的断路器受外界环境因素影响较大的问题,冬季温度较低,温度变化剧烈,液压机构油压变化大,可能导致重合闸失败,不能及时切除故障。根据故障原因,提出以下几条预防措施:

1)结合停电检修,注意液压操作机构的压力微动开关的调节螺杆与闭锁接点轴线的角度,断路器

压力微动开关的整定值进行全部校验。

2)停电检修试验中,要重点测试分合闸速度和行程曲线,分合闸线圈电阻和线圈电流曲线,检查操作机构内部各部件,二次侧电气元件性能,管路有无渗漏油。

3)因操作机构中液压油的属性,要及时观察油箱油位,夏天气温高热胀油位过高时排油,冬天气温低冷缩油位过低时补油。随着时间和操作次数的增加,可能导致油压开关整定值有偏差,对使用年限超过8年断路器用专用测试仪器的检测调节螺杆与闭锁接点轴线偏差量。

4)现场监造过程中,要严格控制油压开关整定值和断路器的动作特性。交接过程也要重新测量,防止远距离运输造成断路器磕碰。

5 结语

针对一起液压操作机构型号为ZF27-550 HGIS的断路器重合闸故障事件,通过现场分析测试判断,查明主要原因为合闸低油压闭锁接点的调节螺杆受挤压偏离轴线。根据事件原因,更换调节螺杆,调整了启动压力值、合闸闭锁值、重合闸闭锁值,远控和就地实现一次分—合一分的过程,未出现重合不成功的情况。对其该断路器持续观察一年,在同类型的天气情况下也未发现类似故障,进一步证明了该方法的正确性。

参考文献:

- [1] 林 莘. 现代高压电器技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
LIN Xin. Modern high voltage electric apparatus technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [2] 汪 峰, 夏小飞. 一起220 kV SF₆断路器分闸不成功故障分析与处理[J]. 广西电力, 2015, 38(6): 38-40.
WANG Feng, XIA Xiaofei. Analysis and treatment of an unsuccessful opening fault of 220 kV SF₆ circuit breaker[J]. Guangxi Electric Power, 2015, 38(6): 38-40.
- [3] 孙曙光, 张 强, 杜太行, 等. 基于振动信号的低压万能式断路器分合闸故障程度评估方法的研究[J]. 中国电机工程, 2017, 37(18): 5473-5482.
SUN Shuguang, ZHANG Qiang, DU Taihang, et al. Study of evaluation method for low voltage conventional circuit breaker switching fault degree based on vibration signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5473-5482.
- [4] 胡子珩. 输变电设备典型缺陷及故障案例分析[M]. 北京:中国电力出版社, 2016.
HU Zihang. Analysis of typical defects and failure cases of power transmission and transformation equipment[M]. Bei-

- jing:China Electric Power Press,2016.
- [5] 向真,张欣,黄荣辉,等. X射线数字成像技术在开关设备缺陷诊断中的应用[J]. 高压电器,2016,52(2):195-199.
- XIANG Zhen,ZHANG Xin,HUANG Ronghui,et al. Application of X-ray digital radiography in the defect diagnosis of switch gears[J]. High Voltage Apparatus,2016,52(2):195-199.
- [6] 袁正华,宋锐,栗振海,等.一起500 kV开关误合事件的分析[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(13):112-113.
- YUAN Zhenghua,SONG Rui,LI Zhenhai,et al. Analysis of an incorrect closing accident of 500 kV breaker[J]. Power System Protection and Control,2009,37(13):112-113.
- [7] 王成友,闫红华,刘灿东.等液压式高玉断路器机械特性在线监测故障几率研究[J]. 高压电器,2015,51(8):86-91.
- WANG Chengyou,YAN Honghua,LIU Candong. Analysis on online monitoring fault probability of mechanical characteristics for hvdraulic high voltage circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus,2015,51(8):86-91.
- [8] 邱志斌,阮江军,黄道春.等高压隔离开关机械故障分析及诊断技术综述[J]. 高压电器,2015,51(8):171-179.
- QIU Zhibin,RUAN Jiangjun,HUANG Daochun. Mechanical faults analysis of high voltage disconnectors and review of diagnosis technology[J]. High Voltage Apparatus,2015,51(8):171-179.
- [9] 于建龙.一起调试期间500 kV SF₆断路器灭弧室瓷套爆炸原因的分析[J]. 湖北电力,2016(4):32-35.
- YU Jianlong. Analysis of an explosion of the porcelain sleeve of 500 kV SF₆ circuit breaker during the commissioning period[J]. Hubei Electric Power,2016(4):32-35.
- [10] 王宏茹,甘红庆,郭剑黎,等.一起开关偷跳重合闸不动作的分析和改进[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(24):201-202.
- WANG Hongru,GAN Hongqing,GUO Jianli,et al. Analysis and improvement about a case of recloser miss operation when switch secret trip[J]. Power System Protection and Control,2009,37(24):201-202.
- [11] 刘玉,文俊,肖湘宁.特高压线路单相自适应重合闸仿真分析[J]. 电网技术,2010,34(3):11-15.
- LIU Yu,WEN Jun,XIAO Xiangning. Simulation analysis on single-phase adaptive autoreclosure of UHV transmission line[J]. Power System Technology,2010,34(3):11-15.
- [12] 孙银山,张文涛,张一茗,等.高压断路器分合闸线圈电流信号特征提取与故障判别方法研究[J]. 高压电器,2015,51(9):134-139.
- SUN Yinshan,ZHANG Wentao,ZHANG Yiming,et al. Research on feature value extraction and fault recognition of coil current signal in high-voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus,2015,51(9):134-139.
- [13] 李璐,牛田野,姜国庆,等.一起500 kV SF₆断路器爆炸事故的分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(s1):246-250.
- LI Lu,NIU Tianye,JIANG Guoqing,et al. Analysis of an explosion accident of 500 kV circuit breaker caused by insulation pull arm defect[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(s1):246-250.
- [14] 周仙娥.800 kV断路器配液压操动机构分、合闸特性优化设计及可靠性研究[D]. 西安:西安交通大学,2013.
- ZHOU Xian'e. The optimum design of open and close characteristics and reliability consideration of 800 kV circuit breaker equipped with hydraulic operating mechanism[D]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University,2013.
- [15] 张旭宏,陈保伦.断路器用大功率液压操动机构的设计[J]. 高压电器,2010,46(1):1-4.
- ZHANG Xuhong,CHEN Baolun. Design of the high power hydraulic operating mechanism for CB[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(1):1-4.
- [16] 李海波,于军.液压系统中空气含量对液压机构的影响[J]. 高压电器,2014,50(1):119-123.
- LI Haibo,YU Jun. Influence of air content in hydraulic system on hydraulic mechanism[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(1):119-123.
- [17] 付荣荣,赵莉华,荣强,等.高压断路器操作机构机械特性研究[J]. 高压电器,2017,53(5):56-62.
- FU Rongrong,ZHAO Lihua,RONG Qiang,et al. Study on mechanical characteristics of operating mechanism of high voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus,2017,53(5):56-62.
- [18] 陈保伦.液压操动机构的设计与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- CHEN Baolun. Design and application of hydraulic operating mechanisms[M]. Beijing:China Machine Press,2011.
- [19] 刘伟,徐兵,杨华勇,等.高压断路器液压操动机构特性研究[J]. 机械工程学报,2010,46(10):148-155.
- LIU Wei,XU Bing,YANG Huayong,et al. Characteristic analysis of high voltage circuit breaker with hydraulic operating mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering,2010,46(10):148-155.
- [20] 郑吓耕.110 kV SF₆断路器爆炸的原因分析[J]. 红水河. 2017(1):109-112.
- ZHENG Xiageng. Cause analysis of 110 kV SF₆ circuit breaker explosion[J]. Hong Shui Rive,2017(1):109-112.
- [21] 舒服华.高压断路器弹簧操动机构合闸弹簧可靠性分析[J]. 高压电器,2007,43(5):368-370.
- SHU Fuhua. Closing switch spring reliability analysis & improvement of high voltage circuit breaker operating mechanisms[J]. High Voltage Apparatus,2007,43(5):368-370.

甄玉杰(1971—),男,副教授,主要研究方向为控制技术与控制工程。

闫斌斌(1990—),男,硕士,工程师,研究方向为断路器检修试验、状态评价(通讯作者)。