

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.02.004

基于图像特征点跟踪的断路器合后即分故障分析方法

沙浩源¹, 刘佩¹, 王之赫¹, 郭涛¹, 王树刚¹, 许建刚²,
谢天喜³, 孙毅¹, 朱超¹, 邓凯¹

(1. 国网江苏省电力有限公司超高压分公司, 南京 211102; 2. 国网江苏省电力有限公司, 南京 211100;
3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 211103)

摘要: 针对断路器弹簧机构常见的合后即分故障, 文中提出了一种基于图像特征点跟踪的断路器合后即分故障分析方法。首先通过对弹簧机构传动过程的分析, 确定了合后即分故障的主要分析方向。然后, 基于高速摄影机数据采集平台完整记录了合闸、分闸瞬间, 弹簧机构中四级分闸杠杆的传动过程, 提出了基于图像特征点跟踪的弹跳幅度分析方法, 通过特征点准确跟踪了四级分闸杠杆的运动轨迹, 并引入了偏转角度参数准确量化了四级分闸杠杆的弹跳幅度。最后, 通过对偏转角度波形的分析, 判断出了导致断路器合后即分故障发生的主要原因。文中的实验验证部分对故障的分析结论进行了充分的论证, 此次故障分析的经验可为后续合后即分故障的研究与处理提供有益借鉴。

关键词: 断路器; 合后即分; 高速摄影机; 四级分闸杠杆; 偏转角度

Fault Analysis Method of Circuit Breaker Opening Immediately After Closing Based on Image Feature Point Tracking

SHA Haoyuan¹, LIU Pei¹, WANG Zhihe¹, GUO Tao¹, WANG Shugang¹, XU Jiangang²,
XIE Tianxi³, SUN Yi¹, ZHU Chao¹, DENG Kai¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. EHV Branch Company, Nanjing 211102, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 3. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: As for such common fault as opening immediately after closing of spring operating mechanism for circuit breaker, in this paper an opening immediately after closing of circuit breaker based on the image feature point tracking is proposed. Firstly, the main analysis direction of the fault of opening immediately after closing is determined through the analysis of the transmission process of the spring operating mechanism. Then, based on the high-speed camera data acquisition platform, the complete process of the closing and opening moments, as well as the transmission of the four-stage opening levers in the spring operating mechanism, are recorded, and the bounce amplitude analysis method based on image feature point tracking is proposed. The movement track of the four-stage opening lever is accurately tracked through the feature point, and the deflection angle parameter is introduced to accurately quantify the bounce amplitude of the four-stage opening lever. Finally, through the analysis of the deflection angle waveform, the main cause of the opening immediately after closing of the circuit breaker is determined. The analysis conclusion of the fault is fully demonstrated by the experimental verification part of the paper, and the experience of this fault analysis can provide useful reference for the research and treatment of the subsequent opening immediately after closing.

Key words: circuit breaker; opening immediately after closing; high speed camera; four-stage opening lever; deflection angle

收稿日期:2025-07-21; 修回日期:2025-10-11

基金项目:江苏省重点研发计划(BE2020027);江苏省国际科技合作项目(BZ2021012)。

Project Supported by Key Research and Development in Jiangsu Province(BE2020027), International S & T Cooperation Program of Jiangsu Province(BZ2021012).

0 引言

白鹤滩—江苏直流输电工程的受端姑苏特高压换流站在设备交接验收期间,某GIS断路器在远方操作过程中发生了合后即分故障。合后即分是断路器拒合的一种表现^[1-3],若该故障发生在系统重合闸自投的过程中,事故范围将会迅速扩大,从而严重影响电网的安全稳定运行^[4-5]。因此,有必要对断路器合后即分的故障机理进行分析,制定断路器类似故障的排查及处理方案,以避免对姑苏站后续的安全生产带来隐患。

合后即分故障属于弹簧机构断路器独有的故障类型^[6-9],目前已有学者对该类型故障进行了研究,文[10]将CT20弹簧机构出现合后即分故障的原因定位在分闸掣子上,文中概述性的分析了可能导致故障发生的重要因素,包括零件加工尺寸不合格、分闸掣子材料硬度不够以及元件损伤等,但并未给出具体的分析案例。文[11]排查了CT30弹簧操动机构的控制回路、机构状态以及零部件间隙尺寸,最终确定了复位弹簧的疲劳性能和松弛性能下降是导致其发生合后即分故障的原因。文[12]通过机械特性实验发现,LTB245-E1型故障弹簧机构频繁出现合后即分故障的原因是由于合闸速度过快,使得分闸模块在搭扣时产生了较大的震动和弹跳,导致该机构无法实现合闸保持。类似的,文[13]中BLK222机构除了分闸拐臂扣接位卡涩外,合闸弹簧输出功过大,合闸速度过快也是导致其发生合后即分的原因之一。以上研究对于合后即分故障的分析大多采用外观检查、尺寸量测、机械特性参数对比等手段,获取有效信息少,分析层次有限。由于条件限制,检修人员难以掌握在脱扣瞬间,分合闸掣子中问题零部件的动作状态,对故障原因的排查大多依赖经验,分析难度较大,且存在一定的不确定性。

针对上述问题,目前有学者利用高速摄影机来捕捉设备动作瞬间各元件的运行过程,通过对图像的分析来辅助检修人员对故障的处理^[14-16],文[17]在对220 kV断路器的合闸过程进行分析时,通过高速摄影机拍摄到了衔铁误碰锁杆,导致机构失去闭锁而分闸的过程,有效验证了检修人员对故障原因的假设,但文中并没有展示相关图像数据,欠缺对故障过程的分析。在此基础上,文[18]通过对比关键帧图像,直观的分析了CT20-III机构正常与故障分闸掣子之间弹跳幅度的差别,验证了复位弹簧压力

值不合格对分闸掣子的影响。但文中仅感性的对比了分闸图像的差异,并没有对其进行有效的量化分析,对故障分析的指导作用有限。

基于此,文中结合特高压姑苏站故障事件信息,首先将断路器弹簧机构的传动过程分为合闸脱扣、进入合闸保持、分闸脱扣3个子过程进行阐述,并分析了该机构合后即分故障产生的原因。然后,在扣接问题的验证过程中,采用高速摄影机图像采集平台记录了四级分闸杠杆的传动过程,并利用图像特征点跟踪了四级分闸杠杆的运动轨迹。同时,引入了偏转角度的计算方法,以初始位置为0点,计算了四级分闸杠杆相对于初始位置的偏转角度,有效量化了四级分闸杠杆在合闸过程中的弹跳情况,并且凭借对多次实验结果的统计分析,明确了故障的产生原因。最后,通过对四级分闸杠杆的解体检查,找出了四级分闸杠杆扣接不稳定的原因所在。文中实验验证部分对故障分析进行了充分论证,也为检修人员的准确消缺奠定了基础。

1 断路器合后即分故障分析

1.1 故障描述

2022年4月,某线路GIS断路器(型号为ZF28-550)B相在远端操作合闸后,迅速跳开并储能,此时三相不一致压板未投入,其余两相未动作。随后,将断路器控制切换至就地,对其进行单分操作,在重复至第4次时,故障复现,而后面又进行了15次操作,均未出现异常。故障发生后,检修人员对断路器的二次接线进行了仔细检查,排除了错误接线、寄生回路、二次电缆破皮、继电器故障等导致断路器合后即分故障发生的可能。

在故障复现时,检修人员观察到弹簧机构箱顺利完成合闸后,在未接收到分闸命令、分闸电磁铁行程杆未动作的情况下立即分闸,并且在分闸时,分闸掣子的各级分闸杠杆均有动作。因此,检修人员判断是由于分闸掣子系统杠杆间扣接不稳定,而最终导致断路器出现合后即分故障。

1.2 故障原因分析

1.2.1 弹簧机构传动原理分析

该断路器的操动机构为SSCT33弹簧机构,合闸弹簧一次储能可连续完成一次合闸和一次分闸动作。SSCT33机构分、合闸动作传动原理见图1,图1(a)、(b)、(c)分别表达了弹簧机构从合闸到分闸的3个子过程:合闸脱扣、进入合闸保持以及分闸脱扣。

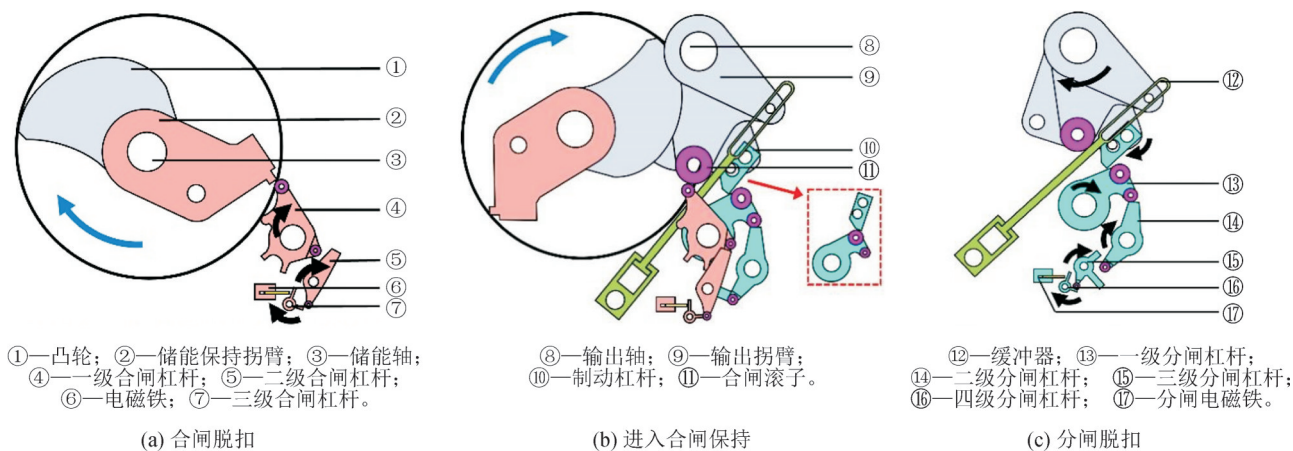


图1 分、合闸挚子的工作原理

Fig. 1 The working principle of the opening and closing trigger

1)由图1(a)可看出,得到合闸命令后,合闸线圈得电后,电磁铁⑥行程杆向外运动,推动三级合闸杠杆⑦顺时针转动,三级与二级合闸杠杆⑤脱扣,二级与一级合闸杠杆④也依次顺时针旋转脱扣,储能保持拐臂②松开,合闸弹簧释放能量。在合闸弹簧的作用下,储能轴③顺时针加速旋转,其旋转方向见图1(a)中箭头,凸轮①在储能轴的带动下转动。此时,合闸脱扣过程结束。

2)由图1(b)可看出,随着储能保持拐臂带动凸轮转动,凸轮①轮廓线压在合闸滚子⑪上推动输出拐臂⑨向外侧(合闸方向)转动,输出拐臂⑨带动输出轴⑧转动,并将运动传递到断路器,完成合闸操作。输出拐臂上的制动杠杆⑩也随之向外侧旋转,扣接在一级分闸杠杆⑬上,扣接状态如红色箭头所指向的虚线框,断路器进入合闸保持状态。此时,可以进行分闸操作。

3)由图1(c)可看出,与合闸脱扣过程类似,分闸线圈通电后,分闸电磁铁⑰行程杆依次推动四级分闸杠杆⑯、三级分闸杠杆⑮、二级分闸杠杆⑭、一级分闸杠杆⑬、制动杠杆⑩顺时针旋转脱扣。输出拐臂⑨在分闸弹簧作用下顺时针转动,输出轴⑧也随之转动并将运动传递至断路器,完成分闸操作。分闸末期,分闸弹簧的多余能量被缓冲器⑫吸收,保证断路器平稳的完成分闸动作。

1.2.2 故障原因分析

由图1(b)还可看出,在合闸保持前,四、三、二、一级分闸杠杆均处于复位状态,等待制动杠杆的扣接。同时,如文中事件描述,分闸电磁铁行程杆未动作,若是由于制动杠杆⑩与一级分闸杠杆⑬扣接不到位而导致合后即分的话,即在未达到图1(b)虚线框的稳定扣接位置时,立即动作分闸,则从三级分闸杠杆⑮到一级分闸杠杆⑬的三级扣接不会改

变原来的位置状态(即复位状态)。而在现场实际中,分闸挚子的各级分闸杠杆均有脱扣动作,三级扣接状态发生了改变,因此可排除制动杠杆⑩与一级分闸杠杆⑬扣接不到位的可能。并且由于一、二级分闸杠杆在合闸过程中均被下一级杠杆机械限位,不会出现扣接不可靠的现象,至此,合后即分的故障原因即可定位于四、三级分闸杠杆之间的扣接稳定性问题。

基于上述分析,对导致三、四级分闸杠杆扣接失效的原因进行两点假设:①由于合闸速度过快,导致机构发生剧烈震动,从而使得三、四级分闸杠杆脱扣;②三、四级分闸杠杆自身的扣接稳定性不足(弹跳幅度过大),导致在正常震动情况下脱扣。

针对假设1,由于断路器在交接试验中不对合闸速度作要求,因此,在验收过程中并没有考虑因合闸速度过快而对弹簧机构带来的影响。现采用机械特性测试仪(型号为GKC433E)对故障机构进行机械特性实验,以考察机构的分合闸速度是否在允许范围以内,实验结果见表1。在5次实验中,合闸速度维持在4.1 m/s左右,处于3.4~4.4 m/s标准范围内,合闸速度正常。同时,该故障机构的其他机械特性指标^[19-22](合闸行程、合闸时间、分闸速度、分闸时间、分合时间)均满足标准要求。将故障产品与同批次、同型号产品进行数据对比,结果无明显偏差,可以认为机械特性参数符合要求。故排除假设1合闸速度过快→震动过大→三、四级分闸杠杆脱扣→合闸保持失效→出现合后即分情况的可能性。

针对假设2,文中采用基于高速摄影机的数据采集平台分别对正常及故障弹簧机构的整体分合闸过程进行拍摄,并基于图像特征点跟踪法来刻画分合闸过程中分闸杠杆的弹跳情况,以此来验证三、四级分闸杠杆在操作过程中的扣接稳定性。这

表1 故障机构的机械特性测试记录

Table 1 Test records of mechanical characteristics of the faulty mechanism

测试内容	1	2	3	4	5	标准值
合闸行程/mm	169.75	169.61	169.75	169.71	169.61	170.00±4.00
合闸速度/(m·s ⁻¹)	4.08	4.10	4.10	4.10	4.11	3.90±0.50
合闸时间/ms	76.20	76.30	76.10	76.10	76.00	77.00±8.00
分闸速度/(m·s ⁻¹)	7.06	7.04	7.06	7.03	7.02	7.20±0.50
分闸时间/ms	23.20	23.20	23.10	23.20	22.90	25.00± 5.00
合分时间/ms	49.00	48.90	49.00	49.10	48.90	≤ 50.00
辅助触头切换时间/ms	41.10	41.00	41.70	41.00	40.80	—

里所指的正常机构为更换了三、四级分闸杠杆后的弹簧机构,其余部件与故障机构共用。

2 基于图像特征点跟踪的扣接稳定性分析

2.1 基于高速摄影机的数据采集平台

高速摄影机的数据采集平台架构见图2。该平台共包括3个部分:①高速摄影机(数据采集);②开关特性测试仪(断路器分合闸命令触发);③上位机(完成高速摄影机参数设置及数据分析)。

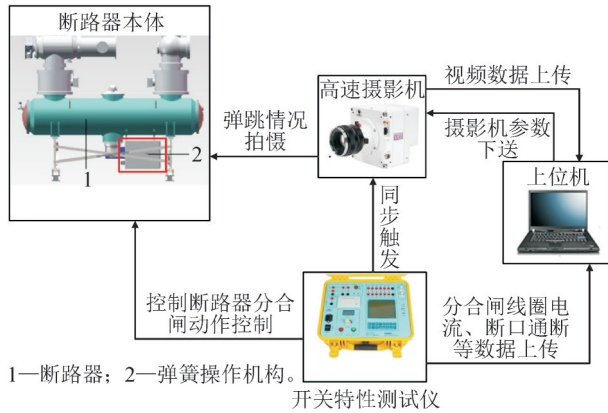


图2 高速摄影机的数据采集平台架构

Fig. 2 Data acquisition platform architecture for high-speed cameras

高速摄影机型号为 Phantom VE0410,采集图像分辨率为1 280×800时,拍摄速率最高可达到5 200 帧/s,若对图像分辨率的要求不高,可降低图像分辨率以提高相应的拍摄速率,最高拍摄速率可达650 000 帧/s。图2中断路器本体红色方框内为弹簧操作机构,也是实验的主要拍摄目标。

实验过程主要可分为:①将相机对准拍摄目标,并在上位机控制软件中完成对摄影机参数的设

置;②在开关特性测试仪发出分合闸指令的同时触发高速摄影机拍摄;③断路器操作完成后,高速摄影机的视频数据及开关特性测试仪的分合闸线圈电流、断口通断等数据上传上位机;④上位机完成综合数据分析并输出实验结果。

2.2 基于图像特征点跟踪的弹跳幅度分析方法

针对高速摄影机拍摄的图像数据,选取图像中杠杆上的某个像素特征点来跟踪杠杆的弹跳情况。图像特征点的性质有:①轮廓交接点;②对于同一场景,即使视角发生变化,仍能保持相对稳定;③附近区域像素点无论在梯度方向上还是其梯度幅值上有着较大变化。文中采用计算量较小,检测效率较高的Shi-Tomasi算法对图像的特征点进行检测^[23-28]。假设对于图像像素点(x,y),x为像素点横坐标,y为像素点纵坐标。若对窗口进行平移,平移量为(Δx,Δy),则移动后的图像灰度变化值E(Δx,Δy)可表达为

$$E(\Delta x, \Delta y) = \sum_{x,y} w(x,y) \cdot [I(x+\Delta x, y+\Delta y) - I(x,y)]^2 \quad (1)$$

式(1)中:w(x,y)为图像窗口函数;I(x,y)为像素点灰度值;I(x+Δx,y+Δy)为发生移动后的像素点灰度值。则根据全微分公式可得

$$I(x+\Delta x, y+\Delta y) = I(x,y) + I_x \Delta x + I_y \Delta y + o(\Delta x^2, \Delta y^2) \quad (2)$$

式(2)中:I_x=dI/dx;I_y=dI/dy。将式(2)代入式(1)中得到

$$E(\Delta x, \Delta y) = \sum_{x,y} w(x,y) (\Delta x^2 I_x^2 + 2\Delta x \Delta y I_x I_y + \Delta y^2 I_y^2) \quad (3)$$

将式(3)改为矩阵形式

$$E(\Delta x, \Delta y) = [\Delta x, \Delta y] \left[\sum_{x,y} w(x,y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (4)$$

令

$$M = \sum_{x,y} w(x,y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

则式(4)可简写为

$$E(\Delta x, \Delta y) = [\Delta x, \Delta y] M \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (6)$$

设矩阵M的特征值为λ₁,λ₂,由式(6)可知,若矩阵M的特征值结果较大,则表示区域内像素点梯度变化比较大,符合对图像特征点的要求,反之,若较小,则表示该区域内纹理变化较小。因此,取其中较小的特征值结果,并对其进行阈值判断,表达式为:

$$R = \min(\lambda_1, \lambda_2) \quad (7)$$

$$R > threshold \quad (8)$$

将图像中满足阈值条件的点保留,完成对图像特征点的检测。根据上述所述的原理,检测将得到大量的符合条件的特征点,在后续进行分析时可选取其中具有代表性的点进行计算。

假设选取其中 (x_k, y_k) 为特征点,通过图像特征点对四级分闸杠杆的弹跳幅度进行跟踪,以杠杆偏离初始位置的偏转角度大小来衡量其弹跳幅度的大小,见图3。

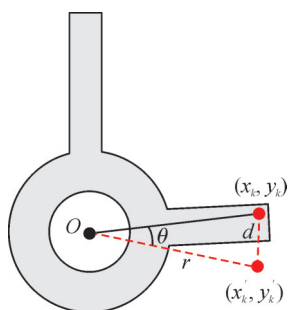


图3 四级分闸杠杆偏转角度的计算示意图

Fig. 3 Calculation diagram of deflection angle of four-stage opening lever

四级分闸杠杆的初始位置在黑色实线处,在 t 时刻后,特征点运动到了新的位置(虚线处),对应图上动作轨迹,特征点图上移动距离 d 可表达为

$$d = \sqrt{(x'_k - x_k)^2 + (y'_k - y_k)^2} \quad (9)$$

则由图3可知,文中所提出的四级分闸杠杆偏转角度的计算方法为

$$\theta = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{d}{2r}\right) \quad (10)$$

式(10)中: r 为四级分闸杠杆旋转半径对应的图上像素长度; θ 为四级分闸杠杆偏转角度计算结果。整体的图像采集示例见图4,四级分闸杠杆的旋转圆心 O 可在图像上进行准确定位。

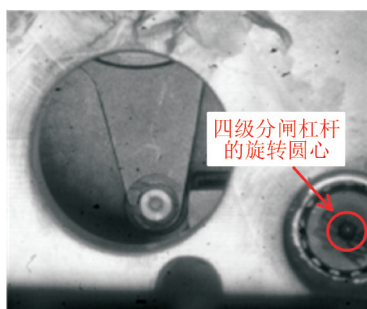


图4 高速摄影机图像采集示例

Fig. 4 Example of high-speed camera image acquisition

为准确的计算四级分闸杠杆旋转半径 r 的像素长度,文中采用实际四级分闸杠杆的旋转半径(图中横杆)长度与图上比例尺进行换算,而并非直接测量图上的像素跨度。

3 实验验证分析

文中基于上述数据采集平台分别对正常及故障机构进行了100次动作实验,其中,每动作7次保存一次高速摄影数据,共保存了15组数据。每次高速摄影机的图像采集都完整的记录了合闸脱扣以及进入合闸保持两个动作过程,并在合闸保持结束后继续记录20 s以上,以完整的采集四级分闸杠杆在操作结束后的弹跳情况。

对于四级分闸杠杆的弹跳幅度跟踪结果见图5-8,其中图5、6为正常四级分闸杠杆的弹跳情况,图7、8为故障四级分闸杠杆的弹跳情况。图5为5个时刻的偏转角度捕捉,在捕捉图像中,红色圆点为文中选择的图像特征点,位于四级分闸杠杆上边沿的左侧末端,该图像特征点的运动轨迹即可表达四级分闸杠杆的弹跳过程。方框为图像特征点的移动参照,其所处的像素位置在每一帧图像中保持不变。对整个过程中,每一帧图像的特征点相对于初始位置的偏转角度变化结果见图6,文中将图像特征点的初始位置设为 0° 偏转角度,向下(逆时针)移动,偏转角度幅值为正,反之(顺时针)则为负,波形中的红色圆点分别对应图5中的5个时刻。由于在整个操作过程中,整体的弹簧机构会发生一定程度的震动,文中在图像处理算法中将整个机构的震动情况考虑在内,利用图像像素点的相似处理技术将机构整体的震动位移消除,以准确的反应图像特征点的移动结果。

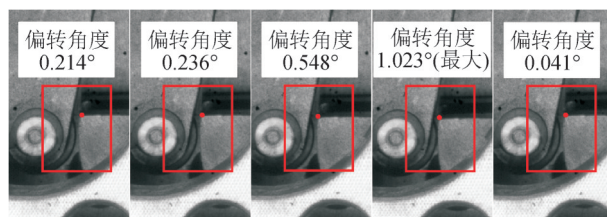


图5 5个时刻的偏转角度捕捉(正常)

Fig. 5 Deflection angle capture of five moments(normal)

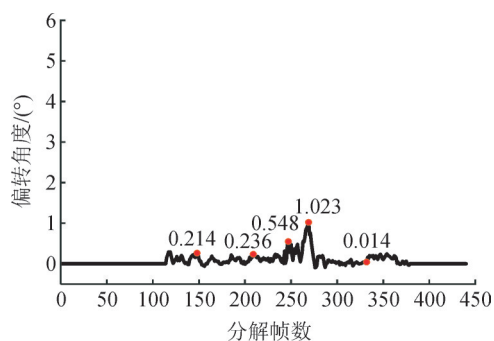


图6 偏转角度计算结果(正常)

Fig. 6 Calculation result of deflection angle(normal)

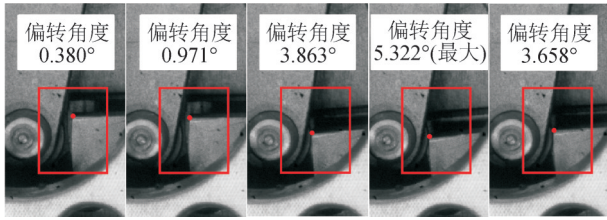


图7 5个时刻的偏转角度捕捉(故障)

Fig. 7 Deflection angle capture for five moments(fault)

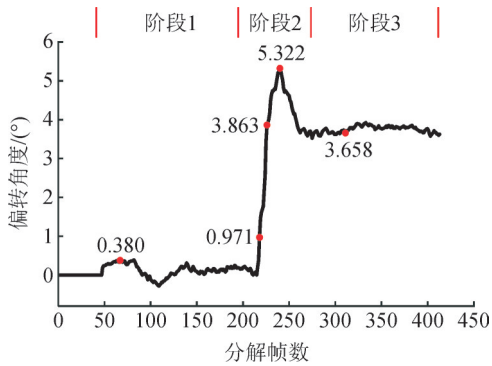


图8 偏转角度计算结果(故障)

Fig. 8 Calculation result of deflection angle(fault)

由图5可看出,从人类视觉的角度很难观察到这5个时刻图像中特征点偏转角度的变化情况。由图6可知,最大偏转角度也只有1.023°,并在最后发生了一定程度的回弹,与初始位置相差很小。

反观图7中的故障机构,5个时刻的特征点偏转角度发生了明显的变化。

由图7还可看出,最大偏转角度达到了5.322°,在最后发生回弹后,相对于初始位置的偏转角度依然有3.658°。由图8中的波形也可看出,故障四级分闸杠杆的偏转角度有着3个不同的变化阶段,阶段1、2、3对应的波形范围见图8。阶段1,在刚开始进行合闸脱扣时,相比于正常机构,故障机构的四级分闸杠杆随着机构整体的震动发生了一定幅度的弹跳,并且偏转角度的振幅达到了0.38°左右,显著高于同阶段正常机构的弹跳水平,此现象从侧面反应出了故障四级分闸杠杆的异常。

阶段2,在进入合闸保持时,故障四级分闸杠杆的偏转角度开始迅速升高,在达到5.322°的峰值后发生了一定程度的回弹。阶段2结束后进入阶段3,合闸保持后,四、三级分闸杠杆完成扣接,偏转角度 θ 值也稳定在了3.6°~3.7°之间。见图7最后一个时刻的采集图像,故障四级分闸杠杆的扣接位置相对于正常情况来说更靠下,其上边沿延长线几乎与三级分闸杠杆末端滚轴的轴心齐平,这种扣接状态极易导致合后即分故障的发生。

在对故障机构进行至97次实验时,合后即分的故障情况复现,见图9。由高速摄影机拍摄的分帧

图像中可以明显看出,四级分闸杠杆的扣接位置严重靠下而使得三级分闸杠杆末端滚轴滑动错位,最终导致扣接失效,断路器合闸保持失败。

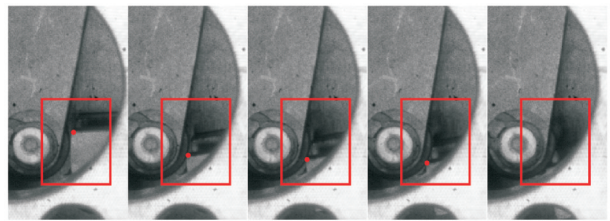


图9 5个时刻的偏转角度捕捉(合后即分)

Fig. 9 Deflection angle capture for five moments(instant opening after closing)

在完成100次动作实验后,文中统计了正常和故障机构四级分闸杠杆偏转角度的最大值 θ_{max} (合后即分故障复现的情况未统计在内),结果见图10。

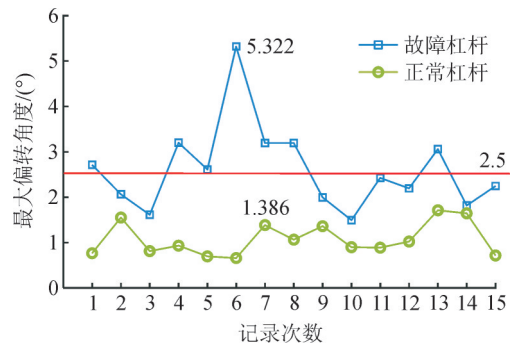


图10 正常和故障机构偏转角度最大值统计

Fig. 10 Statistics of the maximum value of deflection angle of normal and faulty mechanism

图10中蓝色折线为故障杠杆,绿色折线表示正常杠杆。由15次记录数据可知,故障四级分闸杠杆的最大偏转角度普遍偏高,仅有5次是在允许偏转幅度(0°~2.5°)之内,其余10次均大于允许范围,最大偏转角度达到了5.322°。相比之下,正常四级分闸杠杆的弹跳幅值要小很多,最大弹跳也只达到了1.386°。

对故障四级分闸杠杆进行了解体检查,外观见图11。对比正常四级分闸杠杆,外观并无异常,然而在转动杠杆时,故障杠杆有明显晃动,且可以用手轻松将四级分闸杠杆从平键中拔出。而正常四级分闸杠杆无晃动,且必须借助工具,才能将四分闸杠杆从平键中拔出。

正常平键和异常平键的对比见图12。由图12可见,异常平键有明显的按压痕迹。

对两个平键尺寸的量测发现,异常平键的尺寸明显低于正常平键,上端面宽度仅4.92 mm(图纸要求(5±0.01) mm),不符合装配标准。由此,通过最后的拆解分析可以确定,由于异常平键的尺寸不足,

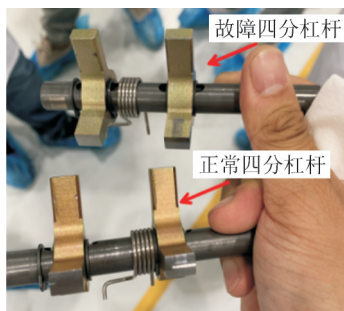


图11 四级分闸杠杆外观检查

Fig. 11 Four-stage opening lever appearance inspection

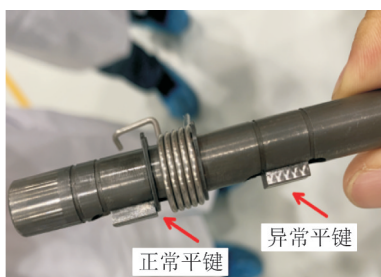


图12 正常平键和异常平键对比图

Fig. 12 Normal flat key and abnormal flat key comparison chart

导致四级分闸杠杆在平键上的固定不牢靠是合后即分故障的原因。在图8中,故障杠杆的偏转角度波形明确的反应了四级分闸杠杆的装配松动现象,因此,文中所提出的量化方法直接有效的指导了此次合后即分故障的分析,具有重要的实际应用价值。

4 结语

文中详细阐述了姑苏站断路器弹簧机构合后即分故障的分析思路及处理流程。通过高速摄影机数据采集平台,捕捉了断路器分合闸瞬间,四级分闸杠杆的弹跳情况,直观的呈现了四级分闸杠杆的运行状态,有效丰富了故障设备的信息,提高了故障处理的准确性。

同时,提出了基于图像特征点跟踪的弹跳幅度分析方法,准确量化了四级分闸杠杆的扣接稳定程度。在进行100次实验后,间隔统计了15次实验记录结果的最大偏转角度,综合反应了故障四级分闸杠杆的弹跳情况。实验结果有效验证了检修人员对故障原因的假设,为断路器的故障消缺指明了方向。

在后续的研究中,可将断路器弹簧机构的弹跳幅度作为断路器状态诊断的特征指标之一,结合已有指标对断路器的健康度进行评估。若发现断路器机构存在隐性故障或故障发生的趋势,即可进行消缺,以避免事故的发生。

参考文献:

- [1] 刘会兰,许文杰,赵书涛,等. 基于振动信号时间历程和自适应谱融合的断路器操动机构状态辨识方法[J]. 高电压技术,2023,49(5):1860-1869.
LIU Huilan, XU Wenjie, ZHAO Shutao, et al. State identification method of circuit breaker operating mechanism based on time course waveform and adaptive spectrum fusion analysis of vibration signal[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1860-1869.
- [2] 王劲鹤,姜炯挺,蒋科若,等. 基于角点定位的高压断路器分合闸线圈电流特征提取及状态判别[J]. 浙江电力,2024,43(6):125-132.
WANG Shaohu, JIANG Jiongting, JIANG Keruo, et al. Feature extraction and state discrimination of opening and closing coils of high-voltage circuit breakers based on corner point location[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(6): 125-132.
- [3] 杨秋玉,王栋,阮江军,等. 基于振动信号的断路器机械零部件故障程度识别[J]. 电工技术学报,2021,36(13):2880-2892.
YANG Qiuyu, WANG Dong, RUAN Jiangjun, et al. Fault severity estimation method for mechanical parts in circuit breakers based on vibration analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(13): 2880-2892.
- [4] 王昱皓,武建文,马速良,等. 基于核主成分分析—SoftMax的高压断路器机械故障诊断技术研究[J]. 电工技术学报,2020,35(s1):267-276.
WANG Yuhao, WU Jianwen, MA Suliang, et al. Mechanical fault diagnosis research of high voltage circuit breaker based on kernel principal component analysis and SoftMax[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(s1): 267-276.
- [5] 关永刚,杨元威,钟建英,等. 高压断路器机械故障诊断方法综述[J]. 高压电器,2018,54(7):10-19.
GUAN Yonggang, YANG Yuanwei, ZHONG Jianying, et al. Review on mechanical fault diagnosis methods for high-voltage circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7): 10-19.
- [6] 闫海宁. 基于在线监测的开关特性分析[J]. 高压电器,2014,50(8):119-123.
YAN Haining. Analysis of switchgear performance based on on-line monitoring[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(8): 119-123.
- [7] 孙董军,郑易谷,陈曦,等. 一起110 kV断路器合后即分故障及分析[J]. 云南电力技术,2019,47(2):29-31.
SUN Dongjun, ZHENG Yigu, CHEN Xi, et al. Analysis on an instant open after close failure of 110 kV circuit breaker[J]. Yunnan Electric Power, 2019, 47(2): 29-31.
- [8] 朱琦琦. 高压开关传动系统的运动学与动力学仿真[J]. 高压电器,2013,49(12):104-109.
ZHU Qiqi. Kinematic and dynamic simulations of drive systems of high-voltage switchgears[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 104-109.
- [9] 苏菊芳,张红军,文亚宁,等. CT20弹簧操动机构在252 kV高压断路器中的应用[J]. 高压电器,2011,47(6):87-90.
SU Jufang, ZHANG Hongjun, WEN Yaning, et al. Application of CT20 spring operating mechanism to 252 kV HV circuit-breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(6): 87-90.
- [10] 高励学,张和顺. 大功率CT20弹簧机构合后即分的故障分析及对策[J]. 高压电器,2012,48(12):143-147.

- GAO Lixue, ZHANG Heshun. Analysis of instant open after close failure with countermeasure for CT20 type high - power spring mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(12): 143-147.
- [11] 阮畅, 张伟, 黄高诚. 一起220 kV弹簧机构断路器合后即分故障与分析[J]. 电工技术, 2022(7): 95-97.
RUAN Chang, ZHANG Wei, HUANG Gaocheng. Analysis of a 220 kV spring mechanism circuit breaker instant open after closing failure[J]. Electric Engineering, 2022(7): 95-97.
- [12] 黄辉敏, 夏小飞, 芦宇峰, 等. 220 kV断路器机构合后即分故障原因分析[J]. 广西电力, 2019, 42(1): 23-25.
HUANG Huimin, XIA Xiaofei, LU Yufeng, et al. Analysis of the instant opening after closing fault of 220 kV circuit breaker mechanisms[J]. Guangxi Electric Power, 2019, 42(1): 23-25.
- [13] 房政. 户外220 kV断路器合后即分缺陷分析及解决方案[J]. 电工技术, 2019(23): 90-91.
FANG Zheng. Analysis and solution of 220 kV outdoor circuit breaker instant defect after closing[J]. Electric Engineering, 2019 (23): 90-91.
- [14] 邓金秋, 张国钢, 耿英三, 等. 基于机器视觉的高压断路器速度特性测量方法研究[J]. 高压电器, 2018, 54(7): 189-194.
DENG Jinqiu, ZHANG Guogang, GENG Yingsan, et al. Study on measurement method of speed characteristic of high voltage circuit breaker based on machine vision[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7): 189-194.
- [15] 王立军, 张拓, 刘光伟, 等. 基于机器视觉技术的高压断路器机械特性诊断[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 2148-2154.
WANG Lijun, ZHANG Tuo, LIU Guangwei, et al. Diagnostics on mechanical characteristics of high voltage circuit breaker based on machine vision technology[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46 (6): 2148-2154.
- [16] 董华军, 马丽婷, 李杰, 等. 基于图像处理技术的真空开关分闸速度检测[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2539-2544.
DONG Huajun, MA Liting, LI Jie, et al. Opening speed detection of vacuum switch based on image processing technology[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2539-2544.
- [17] 韩燕, 关成海, 闫斌斌, 等. 一起分闸掣子缺陷引起的断路器合后即分质量事件分析[J]. 高压电器, 2022, 58(2): 193-198.
HAN Yan, GUAN Chenghai, YAN Binbin, et al. Quality event analysis on opening of circuit breakers after closing due to defect of tripping latch[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(2): 193-198.
- [18] 黎卫国, 张长虹, 杨旭, 等. 一种弹簧操作机构合后即分故障分析[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 246-252.
LI Weiguo, ZHANG Changhong, YANG Xu, et al. Failure analysis of instant opening after closing of spring operating mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 246-252.
- [19] 李文艺, 彭跃辉, 刘坤亮, 等. 基于小波变换和随机森林算法的高压断路器机构机械特性监测技术研究[J]. 高压电器, 2022, 58(10): 75-82.
LI Wenyi, PENG Yuehui, LIU Kunliang, et al. Research on monitoring technology of mechanical characteristics of operating mechanism for high - voltage circuit breaker based on wavelet transform and random forest algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 75-82.
- [20] 刘锦杰, 叶波, 罗赞琛, 等. 一种基于云模型的SF₆高压断路器状态评估方法[J]. 高压电器, 2019, 55(4): 31-38.
LIU Jinjie, YE Bo, LUO Zanchen, et al. State assessment method for SF₆ high-voltage circuit breaker based on cloud model[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 31-38.
- [21] 胡博凯, 李奎, 牛峰, 等. 低压断路器机械特性状态监测方法研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3317-3330.
HU Bokai, LI Kui, NIU Feng, et al. Research on condition monitoring method of mechanical characteristics of low - voltage circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3317-3330.
- [22] 姚灿江, 徐刚, 孙龙勇, 等. 选相合闸断路器机械稳定性研究与设计[J]. 高压电器, 2022, 58(11): 167-175.
YAO Canjiang, XU Gang, SUN Longyong, et al. Research and design on mechanical stability of phase selective closing circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(11): 167-175.
- [23] 李成美, 白宏阳, 郭宏伟, 等. 一种改进光流法的运动目标检测及跟踪算法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(5): 249-256.
LI Chengmei, BAI Hongyang, GUO Hongwei, et al. Moving object detection and tracking based on improved optical flow method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(5): 249-256.
- [24] 孙国良, 伊力哈木·亚尔买买提, 张宽, 等. 基于小波变换与IAGA-BP神经网络的短期风电功率预测[J]. 电测与仪表, 2024, 61(5): 126-134.
SUN Guoliang, YILIHAMU Yaermaimaiti, ZHANG Kuan, et al. Short-term prediction of wind power based on wavelet transform and IAGA - BP neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(5): 126-134.
- [25] 刘春喜, 黄远航, 周立, 等. 基于改进算术优化算法的光伏多峰最大功率点跟踪控制[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(13): 36-46.
LIU Chunxi, HUANG Yuanhang, ZHOU Li, et al. Multi - peak maximum power point tracking control of PV systems based on improved arithmetic optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(13): 36-46.
- [26] 郭克, 戴璇, 张彬彬, 等. 基于机组动态分类的风电场一次调频协调控制算法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(21): 178-187.
GUO Ke, DAI Xuan, ZHANG Binbin, et al. Coordination control algorithm for primary frequency regulation of wind farms based on wind turbine dynamic classification[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(21): 178-187.
- [27] 黄远征, 尹春丽, 刘波, 等. 基于改进的快速Shi-Tomasi特征点检测算法的图像拼接算法[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(4): 70-73.
HUANG Yuanzheng, YIN Chunli, LIU Bo, et al. Image mosaic algorithm based on improved fast Shi - Tomasi feature points detection algorithm[J]. Machine Design & Research, 2018, 34(4): 70-73.
- [28] 蒋伟俊, 蒋文平, 陈孝明, 等. 基于改进淘金算法的变电站巡检路径两阶段规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(16): 1-13.
JIANG Weijun, JIANG Wenping, CHEN Xiaoming, et al. Two-stage substation inspection path planning method based on improved gold rush optimizer[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(16): 1-13.
- 沙浩源(1990—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统大数据分析及继电保护(通信作者)(E-mail: 2113559206@qq.com)。
刘佩(1989—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统大数据分析及继电保护(E-mail: 992745055@qq.com)。
王之赫(1989—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为高压直流输电技术(E-mail: walkerwzh@163.com)。