

图3 短时互相关算法

图3中互相关系数 r 的计算公式^[10]定义为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^w [s(i) - \tilde{s}] [y(i) - \tilde{y}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^w [s(i) - \tilde{s}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^w [y(i) - \tilde{y}]^2}} \quad (4)$$

式中, \sim 表示对数组求平均值。

以此得到时移 n 个离散点的互相关系数序列为 $r(n)$,然后对 $r(n)$ 取绝对值得到绝对互相关系数序列曲线并用于电缆故障定位,此时电缆故障的反射信息被放大,易于开展电缆故障定位工作。

2 仿真测试

为了验证所提方法的可行性和有效性,下面开展了仿真测试分析,仿真模型采用10 kV交联聚乙烯电力电缆,其单位长度的各参数值^[11]如下:

$$R_0 \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2}} \left(\frac{1}{r_c} \sqrt{\rho_c} + \frac{1}{r_s} \sqrt{\rho_s} \right) \quad (5)$$

$$L_0 \approx \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_s}{r_c} + \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{2\mu_0}{\omega}} \left(\frac{1}{r_c} \sqrt{\rho_c} + \frac{1}{r_s} \sqrt{\rho_s} \right) \quad (6)$$

$$G_0 = \frac{2\pi\sigma}{\ln(r_s/r_c)} \quad (7)$$

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(r_s/r_c)} \quad (8)$$

式中: r_c 为缆芯半径,取4 mm; r_s 为屏蔽层内半径,取9.5 mm; ρ_c 为缆芯电阻率,取 $17.5 \mu\Omega \cdot \text{mm}$; ρ_s 为屏蔽层电阻率,取 $17.5 \mu\Omega \cdot \text{mm}$; μ_0 为真空磁导率,取 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; σ 为电介质的电导率,取 10^{-16} S/m ; ϵ 为电介质的介电常数,取 $2.04 \times 10^{-11} \text{ F/m}$ 。

本仿真中电缆模型长度设置为300 m,故障位置设置在距首端200 m,故障类型设置为经过渡电阻接地故障^[4],过渡电阻值设置为300 Ω 。

所提低压脉冲法测试信号选用高斯脉冲波。高

斯脉冲波的时宽可以任意调节。当作为测试信号的高斯脉冲波设置为窄时宽时,测试信号和各反射信号的时宽都会较窄,因此测试信号和各反射信号不易形成混叠,测试盲区更小;但是此时测试信号中高频能量较大,在电缆对高频信号的强衰减效应影响下,测试信号的能量会衰减很快,导致反射信号的能量较弱,难以检测。当作为测试信号的高斯脉冲波设置为宽时宽时,虽然测试信号和各反射信号容易形成混叠,会造成较大的测试盲区,但是此时测试信号的低频能量更大,抗衰减能力更强。综上所述,应该根据被测电缆的长度选取对应的测试信号时宽。当电缆长度较短时,电缆整体的衰减效应较弱,此时应选取窄时宽的测试信号,以降低测试盲区的长度;电缆长度较长时,电缆整体的衰减效应较强,此时应选取宽时宽的测试信号,以增加测试盲区的代价提升反射信号的抗衰减能力,便于反射信号的检测。

以此得到仿真电缆模型的低压脉冲法测试波形如图4所示。为了便于分析,已经将低压脉冲法测试波形的时间横轴乘以电磁波速度得到距离横轴。从图4中可以看出,由于在经过渡电阻接地故障点和电缆末端位置处存在电缆的阻抗失配现象,所以在相应位置出现了行波反射现象,导致低压脉冲法测试波形在相应位置出现了反射波,通过分析反射波的时延信息可实现电缆故障定位。同时还可以看出,由于经过渡电阻接地故障点位置的阻抗失配程度较弱,因此该位置的反射波幅值较低,难以直接从低压脉冲法的测试波形中检测到该反射波;当故障的严重程度更弱时,该位置的反射波幅值更低,更加难以检测。

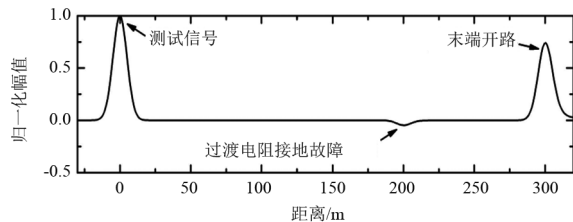


图4 仿真电缆模型的低压脉冲法测试波形

利用短时互相关对图4中低压脉冲法测试波形进行处理得到绝对互相关系数序列曲线如图5所示。对比图4和图5可以看出,相比于低压脉冲法测试波形曲线,绝对互相关系数序列曲线中经过渡电阻接地故障点和电缆开路末端两处位置均出现了明显的异常峰值,并且两处峰的幅值和陡度较大,反

射信息更加明显,说明了所提方法可以有效放大低压脉冲法测试波形中故障的反射信息,易于电缆故障定位。

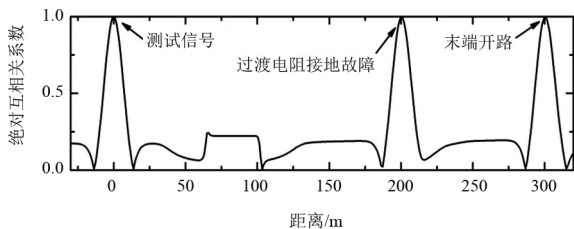


图 5 仿真电缆模型的绝对互相关系数序列曲线

3 实例分析

为了进一步验证所提方法的有效性,参考文献[12],采用和电力电缆结构类似的通信同轴电缆开展实际测试。具体的测试系统如图 6 所示:同轴电缆总长为 40 m,在距首端 20 m 处 A 点设置过渡电阻接地故障,过渡电阻的阻值为 81 Ω ;距首端 40 m 的 B 点为电缆末端,设置为开路状态,可以视为开路故障。因此该同轴电缆可视为在 A 点存在经过渡电阻接地的软故障和 B 点存在完全开路的硬故障两处故障。

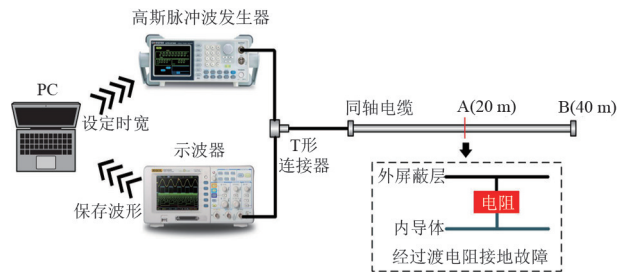


图 6 低压脉冲法的测试系统

在图 6 中,开始测试时,PC 会根据测试电缆的长度设定适宜的高斯脉冲时宽;然后,由高斯脉冲发生器接受时宽设定值后输出作为测试信号的高斯脉冲波,测试信号经过 T 形连接器后进入电缆,在电缆的故障处产生反射波,反射波信号和测试信号都途经 T 形连接器后被示波器采集并保存;最后,示波器将保存的测试信号和反射波信号传输给 PC 进行分析。

由于所做实验中测试电缆长度较短,仅有 40 m,因此高斯脉冲波时宽设置为 16 ns。通过测试得到实测的低压脉冲波测试波形如图 7 所示,同样为了方便分析,已将低压脉冲波测试波形的时间横轴乘

以电磁波波速得到距离横轴。从图 7 中可以看出,由于 A、B 位置处均存在电缆故障,因此低压脉冲波测试波形曲线中 A、B 位置处均出现了反射信号,但是该反射信号的幅值受到故障严重程度和电缆中衰减效应的影响,因此反射信号的幅值较低,峰值位置不突出,难以准确定位电缆故障,当故障的严重程度减轻时,该现象会进一步加剧。

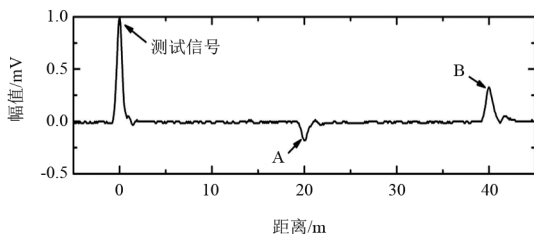


图 7 实际电缆的低压脉冲法测试波形

利用所提短时互相关算法对图 7 中低压脉冲法测试波形进行处理,得到绝对互相关系数序列曲线如图 8 所示。从图 8 中可以看出,由于电缆中 A、B 位置存在故障,因此绝对互相关系数序列曲线中 A、B 对应位置处出现了明显的异常峰值,相对于低压脉冲波测试波形曲线而言,两处峰的幅值和陡度明显增加,峰值位置更加突出,故障的反射信息被放大,使故障定位更加容易。综上所述,实测结果也说明了所提方法可以有效地放大低压脉冲法测试波形中故障的反射信息,便于电缆故障定位。

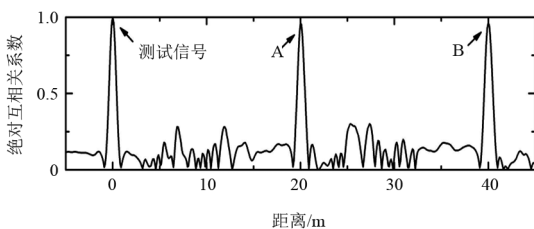


图 8 实际电缆的绝对互相关系数序列曲线

4 结论

1) 上面提出了将短时互相关算法应用于低压脉冲法的电缆故障定位技术中。该方法首先截取短时参考信号,然后将短时参考信号进行时移后与低压脉冲测试波形求取绝对互相关系数序列曲线,最后读取绝对互相关系数序列曲线的峰值位置来定位电缆故障。

2) 传统的低压脉冲法测试波形中反射信号幅值较低,峰值位置不突出,难以准确定位电缆故障,

绝对互相关系数序列曲线可以有效提升故障处异常峰的幅值和陡度,便于电缆故障定位。

3) 仿真和实测结果表明,所提方法可以有效提升对低压脉冲法中反射信息的识别能力,提高对电缆故障的定位能力。

参考文献

- [1] 饶显杰,周凯,汪先进,等. 基于改进 SVD 算法的局部放电窄带干扰抑制方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(2): 705-713.
 - [2] 高树国,刘贺晨,范辉,等. 考虑波速特性的小波变换模极大值法的电力电缆局部放电定位研究[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2244-2250.
 - [3] 王丹阳,唐健钧,陈讴,等. 基于时域反射法的航空电缆故障定位技术研究[J]. 航空制造技术, 2019, 62(S2): 84-88.
 - [4] 李露. 船用电力电缆故障诊断的仿真研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
 - [5] 杨帆,曾莼,阮羚,等. 中压交联电缆接头复合界面受潮缺陷的诊断方法研究[J]. 高压电器, 2014, 50(5): 1-5.
 - [6] 余坤,赫志伟,王善民,等. 基于低压脉冲法的电力
-
- (上接第 5 页)
- [6] 宋玉才,冯智慧. 架空电力线路导线断股原因分析及预防措施[J]. 电工技术, 2015(12): 11-12.
 - [7] SI Jiajun, ZHU Kuanjun. Aerodynamic analysis of bundle with six cables for UHVDC by numerical simulation based on LES[C]. Power Engineering and Automation Conference (PEAM), IEEE, 2012: 1-5.
 - [8] 万建成,周立宪,刘臻,等. 1000 mm² 大截面导线用防振锤设计[J]. 电力建设, 2011, 32(1): 94-98.
 - [9] LIU S, SUN N, YIN Q, et al. Study of new vibration suppression devices for application to EHV transmission line groundwires[J]. Energy Procedia, 2011(12): 313-319.
 - [10] 赵颖越. 我国南北气候分界线对全球变化的响应[D]. 成都: 四川师范大学, 2019.
 - [11] 全国架空线路标准化技术委员会. 防振锤技术条件和试验方法: DL/T 1099—2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
 - [12] 程敏杰,王建文. 利用机器视觉的直齿轮在线测量方法研究[J]. 机械设计, 2020, 37(3): 19-22.
 - [13] 王刚,彭商贤,黄时聪,等. 一种非接触式机器人位姿精度测量系统[J]. 机械设计, 1992, 9(6): 37-38.
 - [14] 谢源,康双扬. 基于四目白光视觉的蜗杆压力角检测研究[J]. 机械设计, 2021, 38(6): 70-74.

电缆外力破坏检测技术研究[J]. 四川电力技术, 2017, 40(4): 48-52.

- [7] 陈伟,王谦,吴高林,等. 基于时域脉冲反射的高压电力电缆测长技术研究[J]. 中国仪器仪表, 2020(8): 83-87.
- [8] 李启飞,温玮,韩蕾蕾,等. 基于短时互相关算法对航空磁异常信号的检测[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(6): 178-183.
- [9] 孟佳彬,李智华,吴春华,等. 基于 SSTDR 的光伏系统对地故障检测方法[J]. 太阳能学报, 2020, 41(10): 109-118.
- [10] 白春乐,马娇. 一种基于互相关系数的白噪声不相关性检验方法[J]. 机械设计与制造工程, 2018, 47(10): 67-69.
- [11] 谢敏,周凯,赵世林,等. 新型基于反射系数谱的电力电缆局部缺陷定位方法[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 3083-3089.
- [12] 尹振东,王莉,陈洪圳,等. 增广时频域反射法在电缆复合故障检测中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7760-7773.

作者简介:

周涛(1984),男,工程师,主要从事电气设备试验和故障诊断方面的工作。(收稿日期:2022-07-15)

- [15] 陈嘉麟,李金奎. 光纤复合架空地线的防振[J]. 电力系统通信, 2006, 27(9): 6-9.
- [16] 王藏柱,杨晓红. 输电线路导线的振动和防振[J]. 电力情报, 2002(1): 69-70.
- [17] 刘胜春,王景朝,吴建生,等. 500 kV 大跨越四分裂导线及地线防振试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2007(4): 332-336.

作者简介:

刘敬华(1977),男,教授级高级工程师,研究方向为电网设备运维管理;

赵彬(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为电网风振防治;

邹赫(1985),女,博士,经济师,研究方向为对外直接投资、电力设备技术经济性评价;

李鹏(1984),男,博士,高级工程师,研究方向为电网风振防治;

李孟轩(1991),男,博士,高级工程师,研究方向为电网智能感知与传感;

汉京善(1992),男,硕士,工程师,研究方向为人工智能技术;

杨知(1992),男,博士,高级工程师,研究为输电线路防灾减灾。

(收稿日期:2022-07-20)

CQ6型气动操动机构断路器合后即分故障分析

黄楷敏

(深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要:电网正常运行时,断路器为电网的安全提供了重要保障。气动操作机构是断路器的重要组成部分,操作机构的可靠性很大程度上影响了断路器的可靠性,保证气动操作机构的可靠性非常重要。文中对西安西电开关有限公司的GIS设备断路器配备CQ6型气动操动机构存在合闸即刻跳闸的现象,从电气回路、机构机械传动、零部件材料检测等多方面进行综合分析,剖析了机构缺陷的根本原因。最终得出机构分合操动异常情况与机构零部件材料及设计基本无关,主要原因在于分闸铁芯复位弹簧过短且弹力不足,并提出了处理防范措施,供同行参考。

关键词:气动机构;合后即分;CQ型气动机构

中图分类号:TM 561.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2023)01-0059-03

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230111

Fault Analysis on Instant Opening after Closing of CQ6 Pneumatic Operating Mechanism for Circuit Breaker

HUANG Kaimin

(Shenzhen Electric Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China)

Abstract: During the normal operation of power grid, the circuit breaker provides an important guarantee for the safety of power grid. Pneumatic operating mechanism is an important part of circuit breaker, and the reliability of operating mechanism greatly affects the reliability of circuit breaker. So it is very important to ensure the reliability of pneumatic operating mechanism. Aiming at the phenomenon of instant opening after closing of CQ6 pneumatic operating mechanism for circuit breaker of GIS equipment manufactured by Xi'an Xidian Switchgear Co., Ltd., the root causes of mechanism defects are analyzed from the aspects of electrical circuit, mechanism mechanical transmission, parts and materials detection and so on. Finally, it is concluded that the abnormal opening and closing operation of the mechanism has nothing to do with the parts, materials and design. The main reason is that the return spring of opening iron core is too short and the elastic force is insufficient. The treatment and preventive measures are put forward for reference.

Key words: pneumatic mechanism; instant opening after closing; CQ type pneumatic mechanism

0 引言

断路器在电网安全运行中起着举足轻重的作用^[1-3]。气动操作机构是断路器的重要组成部分,操作机构的可靠性很大程度上影响了断路器的可靠性^[4-6]。操作机构可分为弹簧操动机构、液压操动机构结构、电磁操动机构结构、气动操动机构结构等^[7-10]。其中,气动操动机构有机构简单、动作可靠、磨损小、稳定性高和噪声大的特点。此外,设备还配有防跳跃功能的机构,也不存在慢分和慢合的

问题^[7-8]。但在实际运行中也会出现一些问题,例如气动操动机构的压缩空气中含有水分和杂质,压缩空气会使水分进入工作缸、控制阀和储气罐,使零部件锈蚀,进而使机构动作不灵活,严重时会降低气动操作机构的可靠性,容易发生拒动现象^[4]。由于密封要求高,最常见缺陷就是漏气致使频繁打压或无法减压,导致断路器闭锁操动^[11-13]。

为了解决这些问题,一些学者展开了相关研究。文献[4]提出给气动操作机构加装气水分离装置来减小空气水分对气动操作机构稳定性的影响。文献[14]从投资费用、经济效益及设备改造效果等方

面综合考虑,提出购买一组新操作机构,用新机构换下旧机构并送去检修,将检修好的机构更换另外的旧机构,再检修另外的旧机构,以此来解决 CQ6 型气动操动机构故障频繁的现象。

此次遇到的合后即分现象较为少见,针对此缺陷,从电气回路、机构机械传动、零部件材料检测等多方面进行了综合分析,一步一步剖析了机构缺陷的根本原因。

1 设备情况

某站 220 kV 某线路 2371 断路器在备自投接入时发现,该间隔断路器 C 相机合后即分,无法保持合闸状态。查询同型号断路器历史缺陷,近期也发生过该缺陷,当时紧急处理方式更换分闸控制阀。该断路器由西安西电开关有限公司生产,型号为 250-SFMT-40B,配套 CQ6 型气动机构,于 2002 年投运,设备主要铭牌参数如下:

型号	250-SFMT-40B
额定电压	220 kV
额定电流	2000 A
额定频率	50 Hz
额定短路开断电流	50 kA
额定操作压力	0.5 MPa(20 ℃)

2 缺陷处理及分析

2.1 电气回路检查

就地控制柜合闸,观察机构动作情况。C 相机可完成合闸动作后即刻分闸。在断开控制电源的状态下,确认线圈两端均无电压;解除分闸线圈两端接线,采用手动合闸线圈,机构仍出现合后即分现象。由此可排除在合闸过程中,分闸控制回路串电导致机构偷跳,即可排除二次电气回路导致机构合后即分。

2.2 机构机械传动检查

2.2.1 CQ6 型气动操动机构动作原理

CQ6 型气动操动机构是一种以压缩空气为动力进行分闸操动,以合闸弹簧为合闸力的高压断路器操动机构。分闸时,压缩空气推动活塞,活塞推动活塞连杆(动触头连杆)完成分闸动作,同时为合闸弹簧储能;合闸时,合闸弹簧推动活塞与活塞连杆(动

触头连杆)完成合闸动作。

在分闸位置时,合闸脱扣模块状态如图 1 所示。合闸线圈励磁后,合闸线圈的铁芯向下运动,带动铁芯连杆撞击脱扣掣子,脱扣掣子与分闸保持掣子的啮合被触脱,分闸保持掣子解脱后,活塞连杆和触头在合闸弹簧力的作用下向上运动,从而合闸。

在合闸位置时,分闸脱扣模块状态如图 2 所示。分闸线圈励磁后,分闸线圈的铁芯向下运动,撞击掣子 2,掣子 2 与掣子 1 间的啮合就被释放。当被解脱时,圆柱阀便不受约束而靠弹簧力打开。此时储气罐中的压缩空气流入气缸,使活塞向下运动,带动触头分闸。在分闸过程的末期,圆柱阀又被与活塞连在一起的凸轮拐臂压回最低端并被掣子 1 锁住,气缸内的压缩空气通过排气口排出,销钉“A”被分闸保持掣子锁住,断路器被保持在分闸状态。

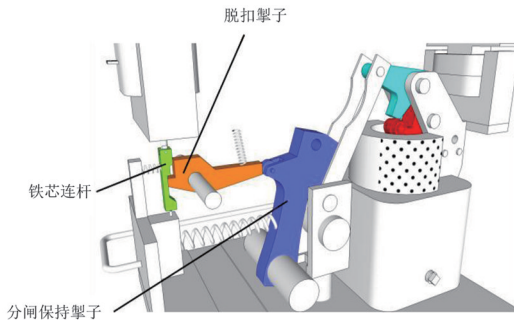


图 1 合闸脱扣模块(分闸位置)

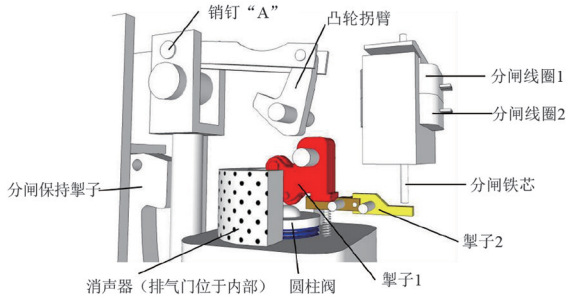


图 2 分闸脱扣模块(合闸位置)

2.2.2 缺陷部位排查

通过合闸动作原理可知,在机构完成合闸后,分闸控制阀中的圆柱阀在掣子 1 与掣子 2 啮合的作用下,保持关闭压缩空气通路,断路器在合闸弹簧的作用下保持合闸状态。初步怀疑掣子 2 未能啮合住掣子 1,导致圆柱阀未能关闭压缩空气通路,使压缩空气再次进入气缸实现分闸。

借用慢速拍摄机构拍摄合后即分的动作过程以及正常合闸的动作过程。通过慢放视频发现,在合闸脱扣后,C 相机机构实际已完成合闸动作,但掣子 2

未能啮合住掣子 1, 从而掣子 1 未能压住圆柱阀, 贮气缸内的压缩空气流入气缸将活塞向下推, 使机构即刻分闸。

在视频内发现分闸铁芯存在动作触碰掣子 2, 影响掣子 1 与掣子 2 的啮合。进一步怀疑原因为分闸间隙过小、掣子 2 复位弹簧力不足或分闸铁芯晃动使分闸脱扣器脱扣。

首先, 检查分闸间隙, 采用间隙尺分别测量三相机构分闸铁芯与掣子 2 的间隙, A、B、C 分别为 0.8 mm、0.7 mm、0.7 mm, 满足厂家标准(0.5~0.9 mm), 可排除分闸间隙过小导致分闸铁芯撞击掣子 2。

进一步确认原因, 将分闸铁芯临时卡住防止晃动, 手动按合闸线圈, 机构能够顺利完成合闸。经多次试验, 机构未再出现合后即分现象。通过慢速摄影检查, 分闸铁芯卡住后, 掣子 1 与掣子 2 可以完全啮合, 圆柱阀正常关闭。从而可以排除掣子 2 复位弹簧力不足。

进一步排查故障原因是否为合闸过程中分闸铁芯晃动影响掣子 1 与掣子 2 的机械配合, 检查分闸驱动模块, 发现 C 相分闸线圈存在明显晃动, A、B 相分闸线圈相对稳固。在稳固分闸线圈后再试验检查, 机构能正常合闸, 但在多次试验后, 仍出现多次合后即分的现象。在偶然合闸成功状态下, 检查掣子 1 与掣子 2 的啮合情况, 与正常机构(图 3)对比, 发现啮合不完全, 因此线圈晃动不是主要原因造成分闸铁芯晃动。

由此可确认故障原因为合闸冲击产生的振动, 促使分闸铁芯在重力作用下推动掣子 2。

分闸铁芯晃动情况与分闸铁芯复位弹簧弹力有关, 怀疑复位弹簧弹力不足导致铁芯晃动较大。对分闸线圈模块解体, 检查复位弹簧, 由于现场没有相关弹力测量仪器, 与新弹簧以及 A、B 两相复位弹簧进行对比, 发现 C 相复位弹簧但明显短于其他复位弹簧(见图 4)。咨询厂家标准, 正常复位弹簧长度为 34~36 mm, 而 C 相复位弹簧仅有 30 mm。更换新复位弹簧, 调整为原有的分闸间隙, 多次试验结果均正常合闸, 掣子 1 与掣子 2 正常啮合, 同时开展断路器特性试验, 数据合格, 故障消除。

2.3 厂内检测零部件

为进一步检查分闸控制模块零部件是否存在工艺问题, 检修人员与厂家一起对原更换的相关零部件进行检查及尺寸检测, 检测结果如下:

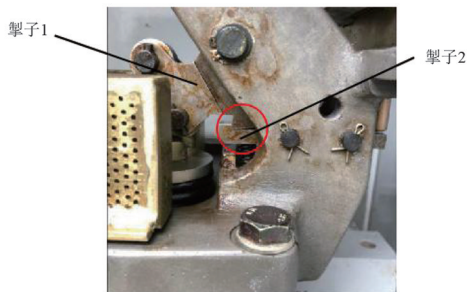


图 3 掣子 1 与掣子 2 正常啮合物图



图 4 分闸铁芯复位弹簧

1) 分闸铁芯过重或过长, 在合闸冲击下产生的振动造成误动。于是对分闸电磁铁的铁芯的重量和操动杆尺寸测量, 结果均符合厂家标准要求。

2) 分闸铁芯在多次励磁后, 存在剩磁, 在合闸冲击下产生的振动造成误动。对铁芯的材料进行化验及漏磁试验, 结果均符合相应标准要求。

3) 掣子 1 与掣子 2 在多次机构动作下, 存在磨损或尺寸不满足要求, 导致啮合不到位。于是解体掣子 1 与掣子 2(见图 5), 并进行尺寸检测, 检查结果符合装配要求。



图 5 掣子 1 和掣子 2 解体

4) 分闸控制阀圆柱塞尺寸不满足要求, 导致无法关闭压缩空气通路。对控制阀的关键部件进行解体检查, 并对其尺寸进行检测, 检查结果符合装配要求。

2.4 小结

以上综合分析, 机构分合操动异常情况与断路

(下转第 82 页)

