

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2020.06.018

750 kV 敞开式接地开关异常合闸故障分析

李娜¹, 马飞越², 牛勃², 相中华³, 倪辉², 刘博³

(1. 中国矿业大学 银川学院, 银川 750001; 2. 国网宁夏电力有限公司 电力科学研究院, 银川 750002;
3. 国网宁夏电力有限公司, 银川 750002)

摘要: 为准确分析某敞开式变电站 750 kV 接地开关在大风天气下异常合闸原因, 本文通过现场检查、接地开关动作过程分析、结构件材质分析、受力情况分析, 确定了该接地开关异常合闸故障原因为曲臂螺栓尺寸设计不合理及材质不符合要求导致螺栓松脱。最后基于故障分析结果开展针对性验证试验, 制定防范措施, 确保了设备安全运行。

关键词: 敞开式变电站; 接地开关; 异常合闸; 风力仿真; 故障分析

中图分类号: TM51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2020)06-1131-06

Analysis of abnormal closing fault of 750 kV AIS earthing switch

LI Na¹, MA Fei-Yue², NIU Bo², XIANG Zhong-Hua³, NI Hui², LIU Bo³

(1. Yinchuan College, China University of Mining and Technology, Yinchuan 750001, China;
2. Institute of Electric Power Sciences, Ningxia Electric Power Co. Ltd., Yinchuan 750002, China;
3. State Grid Ningxia Electric Power Co. Ltd., Yinchuan 750002, China)

Abstract: In order to accurately analyze the earthing switch failure causes in windy weather, through the onsite inspection, action process analysis, material analysis of structural parts and the stress condition analysis, this paper confirms that the failure reason of the abnormal closing of this earthing switch is the loosened bolt caused by the unreasonable size design of the crank arm bolt and the unqualified material. Furthermore, the targeted validation tests and preventive measures are carried out to ensure the safe operation of the equipment.

Keywords: AIS; Earthing switch; Abnormal closing; Wind simulation; Fault analysis

1 引言

接地开关通常被用于释放被检修设备和回路的静电以及保证停电检修时检修人员人身安全, 是一种机械接地装置。它可以在异常情况下耐受一定时间的电流, 但在正常情况下不通过负荷电流^[1-3]。接地开关和隔离开关经常被组合成一台装置使用。隔离开关除了具有主触头外, 还带有接地开关以用于在分闸后将隔离开关的一端接地^[4-6]。主触头和接地开关实现机械联锁, 当隔离开关闭合

时接地开关不能闭合, 而当接地开关闭合时主触头不能闭合^[7-8]。750 kV 敞开式接地开关按导电杆结构型式一般包括直臂式和折臂式两种, 折臂式接地开关迎风面积为直臂式接地开关的一半, 设备正常运行过程中隔离开关处于合闸位置, 接地开关处于分闸位置, 此时折臂式接地开关风载对各传动部位的影响要小于直臂式接地开关^[9-11]。本文对系统内一起罕见的 750 kV 变电站敞开式接地开关异常合闸故障进行分析并提出防范措施, 避免在大风天气条件下再次发生类似问题。

收稿日期: 2019-12-27

基金项目: 宁夏银川机电能源装备专业群资助项目(SGNXDK00PJJS1700013)

作者简介: 李娜(1982—), 女, 回族, 河南太康人, 讲师, 研究方向为电气设备在线诊断与检测。E-mail: zhu496217362@163.com

2 故障简述

2018 年 12 月 2 日,某 750 kV 变电站 750 kV II 母 C 相故障,母差保护动作跳闸,一次故障电流 23.7 kA,无负荷损失,现场无操作、检修工作. 保护动作情况:750 kV II 母两套母差保护均动作跳开连接于 750 kV II 母的断路器. 母线保护“变化量差动”动作,20 ms“稳态量差动”动作,动作相别 C 相,保护动作正确. 现场查看发现隔离开关处于合闸状态,754227 接地开关 C 相异常合闸,A、B 两相保持原分闸位置. 故障设备型号为 GW7B-800DW,额定电流 5 000 A,操动机构型号为 CJ6U,操作方式为三相电气联动,单相独立机构. 故障时环境温度 0 ℃,现场实测瞬时风速不小于 29 m/s.

3 故障情况检查

故障后现场检查 75422 隔离开关处于分闸状态,754227 接地开关 C 相的接地刀杆处于竖直位置,75422 隔离开关、754227 接地刀闸操作电源未投,接地刀杆上下两端均有电烧蚀痕迹,接地刀杆上端部的动触头已经进入接地静触头,但没有翻转,没有完全到达合闸位置,接地刀杆下端部的动触头也没有翻转后与触片形成可靠动接触. 754227 接地刀闸三相机械位置指示均在分,对比三相接地刀闸机构、闭锁板、传动杆位置,机构至水平传动拉杆位置一致,操动机构和机械传动系统无机械损坏.

进一步检查发现,接地刀杆下端部与曲臂连接的四个螺栓已掉落三个,仅剩一个已完全退出螺纹孔,保留在曲臂的孔内,螺栓端部有弯曲变形,导电夹螺纹孔部分受损严重. 正常相曲臂与导电夹部位结构如图 1,C 相故障相曲臂及导电夹检查情况如图 2 所示.

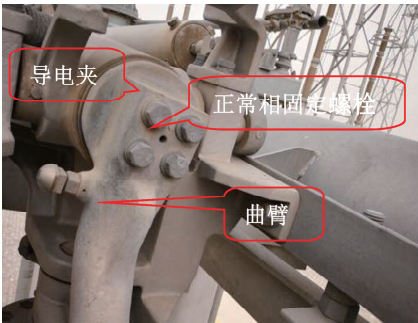


图 1 正常相接地开关曲臂部位
Fig. 1 Crank arm of normal phase grounding switch



(a) C 相脱落螺栓



(b) C 相未掉落的螺栓



(c) C 相导电夹受损情况

图 2 C 相曲臂及导电夹情况图

Fig. 2 Case diagrams of C-phase curved arm and conductive clip

4 故障原因分析

4.1 动作过程分析

1) GW7B-800DW 隔离开关配的是直杆式接地开关,其操作是由所配的 CJ6U 电动操动机构驱动. 合闸操作时,CJ6U 机构输出轴通过垂直操作杆带动水平联杆水平运动,水平联杆带动拐臂和摇臂在水平面内旋转,并通过曲臂带动接地刀杆在竖直平面旋转,并绕其中心翻转,当接地刀杆旋转至接地静触头,导电杆继续绕自身轴线翻转,其端部的动触头与静触头触片可靠接触,完成合闸操作. 分闸操作时,CJ6U 机构输出轴通过垂直操作杆带动水平联杆向相反方向水平运动,水平联杆带动拐臂和摇臂在水平面内旋转,并通过摇臂带动接地刀杆绕其中心翻转,其端部的动触头与静触头触片分

开后,接地刀杆在竖直平面旋转至水平位置,完成分闸操作^[12-13]。

2)曲臂与接地刀杆之间的没有螺栓连接后,接地刀杆不受机构及传动系统约束,在弹簧平衡力及有外力叠加作用时,有可能使接地刀杆向合闸方向运动。

同时曲臂处于自由状态,可以绕其下端的轴中心旋转。现场检测图 2 中剩余的一个螺栓显示,螺栓端部的变形是由于导电杆在向合闸运动过程中,带动螺栓一起运动,螺栓也带动曲臂绕自身轴中心翻转一定角度后,螺栓脱离接地刀杆,这时接地刀杆与曲臂之间也就完全脱开。

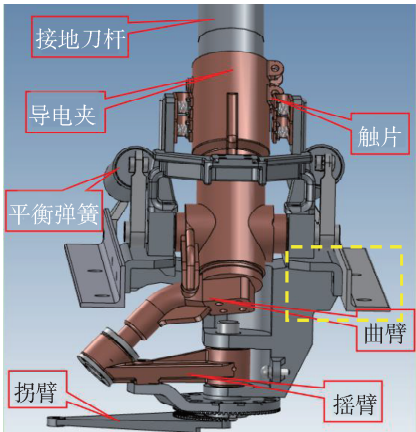


图 3 GW7B-800DW 接地开关结构图
Fig. 3 Structure of GW7B-800DW grounding switch

4.2 结构件测量分析

依据以上现场检查及动作过程分析可知螺栓脱落部位为图 3 中虚线框部位曲臂与导电夹的固定螺栓,结合图 4 该部位相关零部件设计图纸如,地刀杆下端部螺纹深 24 mm,孔深 27 mm,使用四个 M12×75,螺纹旋入深度 15 mm,按照国标规定螺栓直径计算螺杆旋入深度应不小于 15 mm 相对应。现场实测传动连接件厚度约 60 mm,螺栓垫片厚度约 6 mm,螺栓旋入深度约 12 mm。对拆解后的导电夹依据插入螺纹深度进行测量,测量结果如图 5 所示,测试 C 相接地开关导电夹 4 个螺孔四个螺栓孔深度分别为 22.65、22.58、22.75、22.67 mm,底部绿色铜绿部分为未插入深度,按螺孔螺纹损坏部分测量螺栓旋入深度分别为 12.77、13.38、13.36、12.81 mm。测试结果反应螺栓旋入深度不符合标准及厂家设计要求,由于制造质量未进行检测控制,镀锌钢制螺栓联结存在旋入深度不足,导致拉脱隐患。

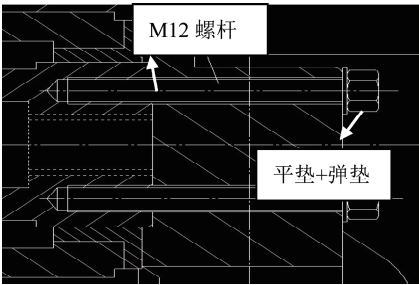


图 4 接地开关曲臂设计图
Fig. 4 Design diagram of grounding switch arm



图 5 螺孔插入深度测量图
Fig. 5 Diagram of screw hole insertion depth measurement

4.3 材质分析

该 750 kV 变电站隔离开关所配接地开关导电夹部位材质为铸造铜铬合金,配比为铸铜铬 0.3 合金(ZCuCr0.3),纯铜的特点是具有优异的导电、导热性能,加入铬元素是为了得到较高的力学性能和保持高的导电性能,满足高压电器产品导体零件的使用性能要求。对故障相接地开关进行金属材质检测,检测结果与厂家工艺要求进行对比,如表 1 所示,可以看出该接地开关存在铸造缺陷,导电夹中元素含量不符合厂家控制标准,铬元素含量已超出 0.7%(铬元素在铜中的最大溶解度),当铜中加入的元素超过它的最大溶解度后,便会出现过剩相,数量多时会使强度和塑形同时大大降低。

表 1 接地开关导电夹材质检测结果
Tab. 1 The result of grounding switch conductive clip material

检测项目		Cr/%	抗拉强度 /MPa	延伸率 /%	硬度/HB
范围	最小值	0.15	260	20	93
	最大值	0.45	415	37	130
检测值		1.19	316	22	105

4.4 风力仿真分析

由于该接地刀闸导电杆与传动曲臂连接异常、闭锁失效,在大风外力作用下,平衡弹簧释能,接地刀闸异常合闸。为分析接地刀闸在大风气象条件

下受力情况,754227 接地刀闸分闸状态时导电杆与水平方向接近于 0°,现场测试风速 29 m/s,风向与导电杆转动方向平行,依据导电杆参数、弹簧参数进行建模,采用 ANSYS 进行有限元受力分析,将此问题当作稳态问题处理,由于风速较高,必须考虑湍流效应,接地开关阻力来源于两部分,一个是杆前后压力不对称而造成的阻力,称为型阻,另外一个杆受到的摩擦力,称为摩阻,通常情况下,型阻要远远大于摩阻^[14]. 有限元分析时,由于阻力系数在迭代过程中上下波动,因此将 3 001 至 5 000 步的值进行平均,得到阻力系数 32. 746 8,相应的阻力系数如式(1)所示.

$$C_d=2D/\rho U^2 L \tag{1}$$

由式(1)知,当密度 $\rho=1. 225 \text{ kg/m}^3$,速度 $U=1 \text{ m/s}$,长度 $L=1 \text{ m}$ 时,单位长度的阻力为 $D=80. 229 \text{ 5 N/m}$. 杆全长 $H=7. 44 \text{ m}$,所以风对杆的总合力矩为 $M=DH^2/2=2 \text{ 220. 498 4 N} \cdot \text{m}$.

接地开关弹簧所属的连杆机构如下图 7 所示,机构 a 长度 0. 132 m,两个支撑点距离 b 为 0. 716 m,当弹簧完全不受力时(即杆处于垂直位置),此时角度 135°,长度 c 可由三角形的余弦公式得到, $c_1=0. 8147 \text{ m}$;而当杆处于水平位置,此时角度 45°, $c_2=0. 6296 \text{ m}$,弹簧最大压缩量为 0. 185 1 m. 在杆抬起角度变化时,根据余弦公式得到边长 c ,就可以得到弹簧的压缩量,并根据胡克定律 $F=k\Delta$ 计算弹簧提供的力,再根据海伦公式和面积公式可以得到弹簧力的力臂^[15-17]. 因此通过上述步骤我们可以得到不同角度下弹簧力的力矩^[18-19]. 运动过程中部件之间和内部会产生摩擦力矩,阻碍杆的运动^[20-24]. 基于上述分析,我们计算出杆在抬起不同角度时各力所产生的力矩图 7 所示,总作用力矩如图 8 所示. 从风力仿真分析可以看出,当导电杆与水平方向夹角接近 7°时,受风力影响风力力矩与弹力力矩之和大于重力力矩则导电杆受风力影响抬起,在抬起角度逐渐增大时风力力矩逐渐变大,力矩总和不断增大,造成接地刀闸导电杆合闸.

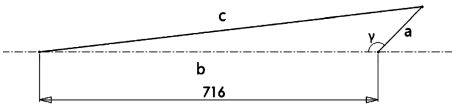


图 6 弹簧连杆机构示意图
Fig. 6 Schematic diagram of spring linkage

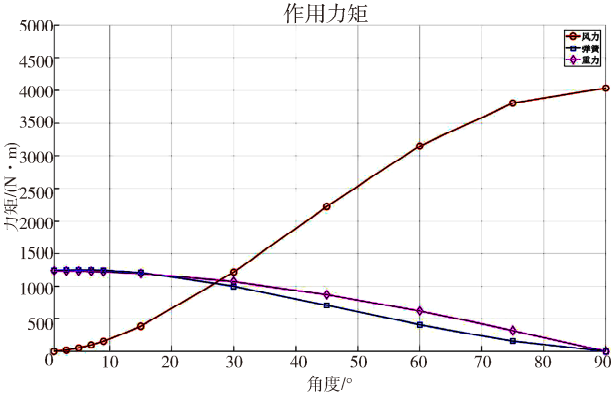


图 7 接地开关所有力矩随角度变化图
Fig. 7 The diagram of grounding switch torque with angle change

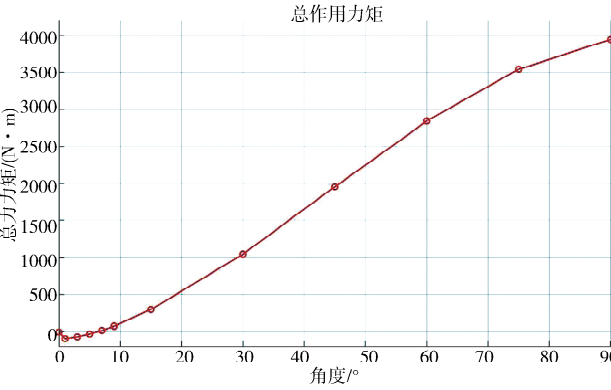


图 8 接地开关总作用力矩随角度变化图
Fig. 8 The diagram of grounding switch total acting torque with angle change

5 验证试验及防范措施

5.1 验证试验

为了验证该 750 kV 敞开式接地开关螺栓脱落问题产生的机理及故障原因,进行以下模拟试验:接地开关铰接机构的四个 M12x75 螺栓在未紧固状态(弹垫未压平)见图 3. 绳索或凸轮机构模拟风力摆动接地刀杆前端,使 M12x75 螺栓受到交变应力作用. 摆动按照 8 s/次,4 千次/天进行试验,连续 5 天试验,共计 2 万次,示意图见图 9. 模拟试验用 CJ6B 机构驱动,摆动幅度约 230 mm,间隔时间 4 s,CJ6B 机构由试验控制台控制并计数,试验过程中,定期观察螺栓是否松动及损坏,并做记录. 试验结果显示发生松动时,试验次数为 7 200 次,下侧两螺栓出现松动,紧固标记错位,螺栓头与垫片之间出现间隙,上侧两螺栓未出现松动,松动螺栓如图 10 所示.

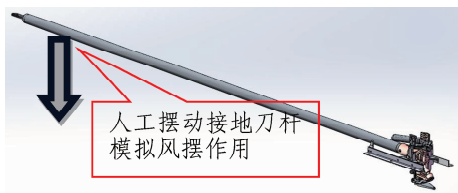


图 9 人工摆动验证试验受力图

Fig. 9 The diagram of artificial swing verification test force



图 10 螺栓松动模拟分析

Fig. 10 Simulation analysis of bolt loosening

5.2 防范措施

该 750 kV 敞开式接地开关异常合闸造成母线跳闸故障虽属个例,但暴露出设备生产厂家在设计制造、安装工艺等方面存在缺陷,并且运行维护单位对设备巡视检查存在盲点。为防范接地开关异常合闸故障再次发生,采取措施主要有:(1)完善变电站巡视制度,结合全面巡视,使用望远镜、照相机对站内构支架上高处部分、设备受力部件、紧固件处螺栓进行巡视,提早发现螺栓松动等问题。(2)按照工艺标准细化检修作业指导卡,增加刀闸螺栓防松措施检查、力矩检查等要求,并进行铰接机构连接螺栓涂防松厌氧胶加固。在螺栓紧固时按要求涂抹紧固胶,紧固后标识。(3)改进接地开关分闸托架结构,由单点支撑改进为多点接触,在刀闸底座设计安装导电杆夹紧装置,将直臂式接地开关改进为折臂式,提升该型号接地刀闸防风、抗风水平。(4)生产厂家严格铸铜铬合金材料铸造工艺,并按照国家标准及厂家控制要求按照螺栓螺孔深度标准工艺整改。(5)加强巡检,主要检查机械转动部件无锈蚀,转动正常;隔离开关的双臂是否升起,曲折位置是否放平;位于隔离开关和地刀之间的五防闭锁是否工作正常;电机行程是否到位;手动分闸是否存在卡涩;三相分闸同期是否在合格范围内;传动杆是否变位变形^[25-27]。

6 结 论

(1)通过该变电站 750 kV 敞开式接地开关现

场故障检查及动作过程分析,接地开关部位底部在长期振动过程中松动脱落是运行状态下异常合闸的直接原因。

(2)对接地开关曲臂部位材质检测,并开展导电杆风力仿真,确定了大风天气下异常合闸故障本因是设备传动部位设计不合理,材质工艺把控不严引起。

(3)开展同型式接地开关验证试验,模拟风力摆动接地刀杆曲臂部位螺栓状态,与分析结论一致,并进一步提出防范措施,防止同类型设备再次发生故障。

参考文献:

- [1] 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: 171.
- [2] 盛明学,王志清. 户外高压隔离开关常见故障的原因分析与处理[J]. 高压电器, 2010, 46: 93.
- [3] 郑宁敏,林匹. 一起刀闸操作引起开关跳闸事故的分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 37: 103.
- [4] 张硕颖. 一起 220 kV 隔离开关控制失效的诊断与处理[J]. 高压电器, 2012, 48: 92.
- [5] 马一迪,黄新波,朱永灿,等. 开关柜接地开关电动操控装置的设计[J]. 电子设计工程, 2019, 27: 110.
- [6] 马明明,谭迈之,孙德祥,等. 激光选区熔化成形高压接地开关传动件工艺与性能研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2018, 41: 76.
- [7] 何启超. 变电站电气隔离开关安装施工技术探讨[J]. 机电信息, 2017, 20: 16.
- [8] 郭良超,杜迎乾,雷琴,等. 快速接地开关操动机构驱动弹簧优化设计[J]. 高压电器, 2018, 54: 228.
- [9] Alternating current disconnectors and earthing switches; IEC 62271-102-2004 [S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2004.
- [10] 程立,董桂华,张鑫. 基于多场耦合的刀闸式接地开关强度分析[J]. 电气技术, 2018, 19: 40.
- [11] 张新一. 电力系统分界开关误动问题的研究与解决方案[J]. 山东工业技术, 2018(11): 178.
- [12] 华俊杰,庄燕燕,陈旭,等. 基于机构合闸缓冲对快速接地开关过冲的研究[J]. 高压电器, 2018, 54: 228.
- [13] 王东旭. 高压隔离开关常见故障分析—结合 GW4 型隔离开关处理案例[J]. 科技资讯, 2016, 14: 57.
- [14] 荣军,冉昌,张文鹏,等. 500 kV 变电站隔离开关、接地刀闸防误操作的联锁条件[J]. 电工技术, 2016, 20: 119.

[15] 何大伟, 邓渊, 苑国旗, 等. 新型隔离接地开关用电动机驱动机构关键技术研究[J]. 电气应用, 2018, 37: 35.

[16] 司维, 司洪孝. 220 kV GIS 隔离开关机械特性的研究与改进[J]. 高压电器, 2018, 54: 243.

[17] Ma M, Wang Z, Zeng X. A comparison on metal-lurgical behaviors of 316L stainless steel by selective laser melting and laser cladding deposition [J]. Mat Sci Eng A: Struct, 2016, 685: 265.

[18] 马啸川, 李庆武, 刘静, 等. 变电站机器人自动巡检中的刀闸开合状态分析[J]. 电力测量与仪器学报, 2018, 54: 243.

[19] 赵洲峰, 周华, 吴锦华, 等. GW4 型隔离开关运动学分析与装配方法研究[J]. 高压电器, 2018, 54: 34.

[20] 田晓涛, 蒋志刚, 王艳秋. 接地开关电动力分析[J]. 宁夏电力, 2006, 5: 37.

[21] 赵莉华, 张浩, 景伟, 等. 基于线圈电流的高压断路器操作机构性能研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2015, 47: 146.

[22] 程立, 董桂华, 张鑫. 基于多场耦合的刀闸式接地开关强度分析[J]. 电气技术, 2018, 19: 40.

[23] 姜海龙, 李潼清, 程浩, 等. 基于 PSO-LSSVM 的高压真空断路器弹簧机构机械故障诊断[J]. 高压电器, 2019, 55: 248.

[24] Rao M M, Paul M, Jain H S. Analytical and experimental studies on induced current switching by a fault-proof gas insulated earthing switch [J]. Int J Emerg Electr Pow Syst, 2010, 11: Art 4.

[25] Wang M, Mina R Z. Development and evaluation of germanium telluride phase change material based ohmic switches for RF applications [J]. J Micromech Microeng, 2017, 27: 412.

[26] Sukomal D, Shibani K K, Ajay K P, *et al.* Extensive performance evaluations of RF MEMS single-pole-multi-throw switches up to X-band frequency [J]. J Micromech Microeng, 2017, 27: 523.

[27] Deepak B, Anuroop B, Prem K, *et al.* Low voltage driven RF MEMS capacitive switch using reinforcement for reduced buckling [J]. J Micromech Microeng, 2017, 27: 159.

引用本文格式:

中 文: 李娜, 马飞越, 牛勃, 等. 750 kV 敞开式接地开关异常合闸故障分析[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2020, 57: 1131.

英 文: Li N, Ma F Y, Niu B, *et al.* Analysis of abnormal closing fault of 750 kV AIS earthing switch [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2020, 57: 1131.