

Analysis of Coil Abnormality in Failure of 10 kV Switch at 220 kV Substation

Jing Pan¹, Jun Zhan², Jingwei Xiao¹, Jing Jin¹

¹Shantou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co. Ltd., Shantou Guangdong

²School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan Hubei

Email: 739564263@qq.com

Received: May 24th, 2018; accepted: Jun. 7th, 2018; published: Jun. 13th, 2018

Abstract

The protection operation sequence diagram and the fault sequence diagram were established respectively based on the data of the line protection monitoring and control device and the fault record diagram, which was aimed at a 10 kV switch refusing operation fault that occurred in a 220 KV substation. It completely restored the whole accident and the time points of each protection device action and equipment response. Through on-site investigation and maintenance of the substation, it was finally determined that the accident was caused by the burning of the coil. Through the analysis of the coil structure and working principle, the internal and external factors that may cause the coil to burn out were discussed, which has certain reference values for preventing the coil from burning down.

Keywords

Breaker Coil, Fault Recorder, Protection Action Diagram, Fault Analysis, Coil Burned

220 kV某站10 kV开关拒动故障中线圈异常问题分析

潘靖¹, 詹隽², 肖静薇¹, 金晶¹

¹广东电网有限责任公司汕头供电局, 广东 汕头

²武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉

Email: 739564263@qq.com

收稿日期: 2018年5月24日; 录用日期: 2018年6月7日; 发布日期: 2018年6月13日

摘要

针对220 KV变电站发生的10 kV开关拒动故障, 该文基于线路保护测控装置数据以及故障录波图, 分别

建立了保护动作时序图和故障发生时序图，完整还原了整个事故发生的经过以及各个保护装置动作和设备响应的时间点；通过对变电站的现场排查和检修，最终确定事故是由于线圈烧毁造成的；通过对线圈结构以及工作原理的分析，讨论了可能导致线圈烧毁的内部因素和外部因素，对防止线圈烧毁具有一定参考价值。

关键词

断路器线圈，故障录波图，保护动作时序图，故障分析，线圈烧毁

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

断路器是电力系统最重要的设备，主要作用是在正常或故障时，自动地控制各种电力线路和设备的开断和关合，以保证系统的正常运行。当发生事故时，我们必须阻止事故朝着恶化的方向发展[1]。作为断路器机构的主要元件，分合闸线圈长期以来未得到足够重视，没有国家标准及全面的检测要求，各厂家产品质量参差不齐，国外对于断路器线圈烧毁故障的研究也寥寥无几，大多数研究都集中在断路器本身，但分合闸线圈能否正确动作是断路器进行开断的关键因素[2] [3] [4]。未来伴随电网设备越来越多，断路器总量不断增长，尤其在沿海地区，高盐高湿高热环境不利于设备的运行。一旦线圈出现问题，会影响故障切除，扩大事故范围，影响供电可靠性，电网内也多次发生因分合闸线圈异常导致的事故范围扩大，尤其是分合闸线圈烧毁导致的事故范围扩大逐年增多[5] [6]。分合闸线圈烧毁的频率增加以及单次事故造成的经济损失，都会对系统的稳定性、可靠性以及经济性产生影响[7]。因此，对实际工程中分合闸线圈烧毁事故进行研究分析显得尤为必要[8]。通过对实际烧毁线圈的检测从而探讨导致线圈烧毁的原因及机理，对系统的正常运行将会起到正面积极的作用[9]。

2. 故障经过

某 220 kV 站在 2015 年发生了一次线路开关拒跳，导致#2 变跳三侧故障。

其故障过程如下：10 kV 矢崎线(用户专用线路)的配电站发生单相短路故障，逐步发展为三相短路，220 kV 变电站 10 kV 线路保护动作，开关拒动，#2 主变低压 1 侧过流 1 时限、2 时限、3 时限先后动作，主变三侧开关跳闸，10 kV 2 段母线失压，事故前#2 主变变低 502 开关负荷电流为 978.76 A，负荷损失 17.46 MVA。具体保护动作过程如下：

① 10 kV 矢崎线保护动作过程：15 时 02 分 09 秒 709 毫秒过流 1 段动作，二次故障电流 $I = 8.56$ A (一次值 5136 A)；15 时 02 分 10 秒 004 毫秒过流 2 段动作，二次故障电流 $I = 8.28$ A (一次值 4968 A)；15 时 02 分 14 秒 501 毫秒重合闸动作(时标来自后台监控系统 SOE 报文)。

② #2 主变保护动作过程：主 I 保护 15 时 02 分 09 秒 722 毫秒动作，低压 1 侧过流 I 段 1 时限动作 2828 ms 动作跳 10 kV 分段 500、550 开关并闭锁 500、550 备自投，低压 1 侧过流 I 段 2 时限动作 3128 ms 动作跳主变变低开关，低压 1 侧过流 I 段 3 时限动作 3428 ms 动作跳主变各侧；主 II 保护 15 时 02 分 09 秒 732 毫秒动作，低压 1 侧过流 I 段 1 时限动作 2828 ms 动作跳 10 kV 分段 500、550 开关并闭锁 500、550 备自投，低压 1 侧过流 I 段 2 时限动作 3128 ms 动作跳主变变低开关，低压 1 侧过流 I 段 3 时限动作

3428 ms 动作跳主变各侧，主变变高变中侧开关正常跳闸，在低压 1 侧过流 I 段 2 时限动作 546 ms 后变低 502 开关分闸。

本次事件导致该变电站 #2 主变非计划停运 1 小时 24 分；10 kV II 段母线非计划停运 1 小时 27 分，10 kV 矢崎线非计划停运 6 小时 33 分；负荷损失 17.46 MW，没有重要用户停电。

故障情况总结如下：

- 1、220 kV 变电站矢崎线线路故障，保护动作跳闸，矢崎线路断路器未分闸；
- 2、#2 主变变低保护动作，变低进线断路器在 500 ms 后跳闸；
- 3、故障 300 ms 延时后，主变保护动作跳三侧开关。

3. 故障排查

3.1. 保护动作情况及分析

故障录波及保护动作情况如下：

矢崎线保护动作图如图 1 至图 3 所示，根据保护动作报告，15 时 02 分 09 秒 10 kV 矢崎线保护过流 1 段(定值为 5.0 A，时限 0.2 S)、2 段(定值 1.0 A，时限 0.5 S)。



Figure 1. Line protection 1 operation diagram

图 1. 矢崎线 1 段保护动作图

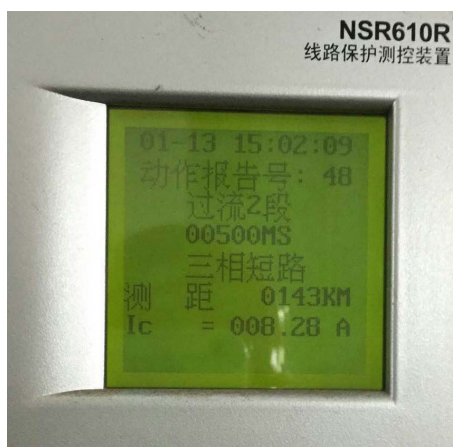


Figure 2. Line protection 2 operation diagram

图 2. 矢崎线 2 段保护动作图



Figure 3. Line reclosing protection action diagram
图 3. 矢崎线重合闸保护动作图

动作跳闸，现场 10 kV 矢崎线 577 开关并未跳开；15 时 02 分 10 秒 10 kV 矢崎线 577 开关报“控制回路断线”，15 时 02 分 14 秒 10 kV 矢崎线报“重合闸动作”。

10 kV 矢崎线故障时 577 开关拒动，在保护发跳闸令后，由于开关未能跳开造成跳闸线圈烧毁并引发“控制回路断线”告警。#2 主变跳闸后，故障电流消失，10 kV 矢崎线保护因三相电流为 0，控制回路断线(分闸线圈烧毁)无法提供分、合闸位置信号，现场有合后位、保护启动，重合闸条件(重合闸逻辑如图 4 所示)满足，故 15 时 02 分 14 秒 10 kV 矢崎线保护经延时 1500 ms 后重合闸动作。

故障保护动作时序如表 1 所示，绝对时间以集中式故障录波器时间为准。

保护录波图如图 5 至图 7 所示，由保护及故障录波图分析，故障发生初期为单相接地故障，其后发展为 BC 相间故障并迅速发展为三相故障，故障初期故障#2 主变变低相电流二次值为 1.8 A，满足主变低压侧后备复压过流保护电流定值 1.04 A，但由于各相电压均高于 43 V (约 75%额定电压)且保持对称，复合电压(低压动作值线电压 70 V，负序电压动作值相电压 4.0 V)未能开放，主变低压侧后备复压过流保护未能动作；至 1608 ms，故障进一步发展，#2 主变低压侧 B 相电压下降至约 34 V (60%相电压)，故障相电流升至二次值 3.0 A，此时满足#2 主变低压侧后备复压过流保护动作条件，经 1200 ms 延时过流 I 段动作跳 10 kV 分段 500、550 开关并闭锁备自投，经 1500 ms 延时过流 II 段动作跳#2 主变变低，由于变低开关未能在 300 ms 内断开，经 1800 ms 延时过流 III 段动作跳#2 主变各侧开关。

3.2. 一次设备排查情况

(一) 10 kV 矢崎线专用配电站故障情况

该配电站属专线用户资产，由用户负责维护，距变电站长度约为 4.5 km。配电站内可见明显短路烧损痕迹，如图 8 所示。

(二) #2 主变本体检查情况

现场对#2 主变本体进行外观检查。主变油位正常，储油柜外观未见异常，主变本体未见漏油痕迹。检查#2 主变本体及有载开关瓦斯继电器均未动作。

(三) #2 主变 10 kV 侧设备检查及分析

经现场检查，10 kV 矢崎线开关柜有烧焦气味，其余设备外观检查无异常，根据保护动作报文及设备检查情况确定本次故障非近区短路故障。高压室整体环境正常，开关柜内无潮湿锈蚀及凝露情况，如图 9 所示。

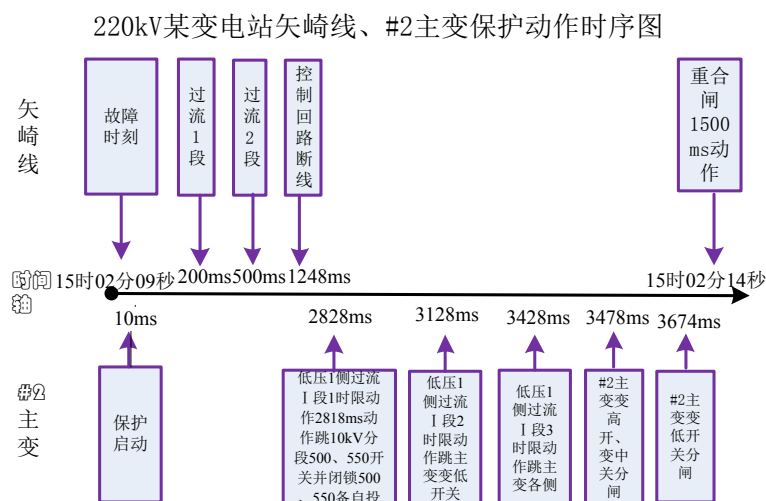


Figure 4. Protection action sequence diagram

图 4. 保护动作时序图

Table 1. Fault protection operation timing diagram

表 1. 故障保护动作时序图

| 序号 | 相对时间 | 保护动作行为 |
|----|----------------------|---|
| 1 | 15:02:09:72 (零时刻) | 10 kV 矢崎线发生 BC 相故障。 |
| 2 | 200 ms | 10 kV 矢崎线过流 I 段动作，二次故障电流 $I = 8.56$ A (一次值 5136 A)。 |
| 3 | 495 ms | 10 kV 矢崎线过流 II 段动作，二次故障电流 $I = 8.28$ A (一次值 4968 A)。 |
| 4 | 1248 ms | 10 kV 矢崎线保护控制回路断线。 |
| 5 | 2828 ms | #2 主变主 I 保护低压 1 分支过流 I 段 1 时限动作，跳 10 kV 分段 500、550 开关并闭锁 500、550 备自投。 #2 主变主 II 保护低压 1 分支过流 I 段 1 时限动作，跳 10 kV 分段 500、550 开关并闭锁 500、550 备自投。 |
| 6 | 3128 ms | #2 主变主 I 保护低压 1 分支过流 I 段 2 时限动作，跳 #2 主变变低开关。 #2 主变主 II 保护低压 1 分支过流 I 段 2 时限动作，跳 #2 主变变低开关。 |
| 7 | 3428 ms | #2 主变主 I 保护低压 1 分支过流 I 段 3 时限动作，跳 #2 主变各侧。 #2 主变主 II 保护低压 1 分支过流 I 段 3 时限动作，跳 #2 主变各侧。 |
| 8 | 3478 ms | #2 主变变高开关分闸。 |
| 9 | 3471 ms | #2 主变变中开关分闸。 |
| 10 | 3674 ms | #2 主变变低开关分闸。 |
| 11 | 4992 ms | 10 kV 矢崎线重合闸动作。 |

检修人员对 10 kV 矢崎线开关进行检修，分闸线圈已被烧毁，如图 10 所示。

检修人员对 502 开关进行检修，分闸线圈外观无异常，直阻正常，如图 11(a)所示。拆开线圈后，线圈内部也无损坏痕迹，线圈绕制做工较粗糙，如图 11(b)所示。检修人员更换线圈前进行低电压动作试验，动作电压分别在 174 V、188 V、197 V 才能进行分闸，动作分散性大，且不满足规程(65%~120%) U_n 可靠动作(即 143 V~264 V)的要求，且低电压合闸试验有 3 次合闸不成功，更换分、合闸线圈并进行机构调整后试验合格。

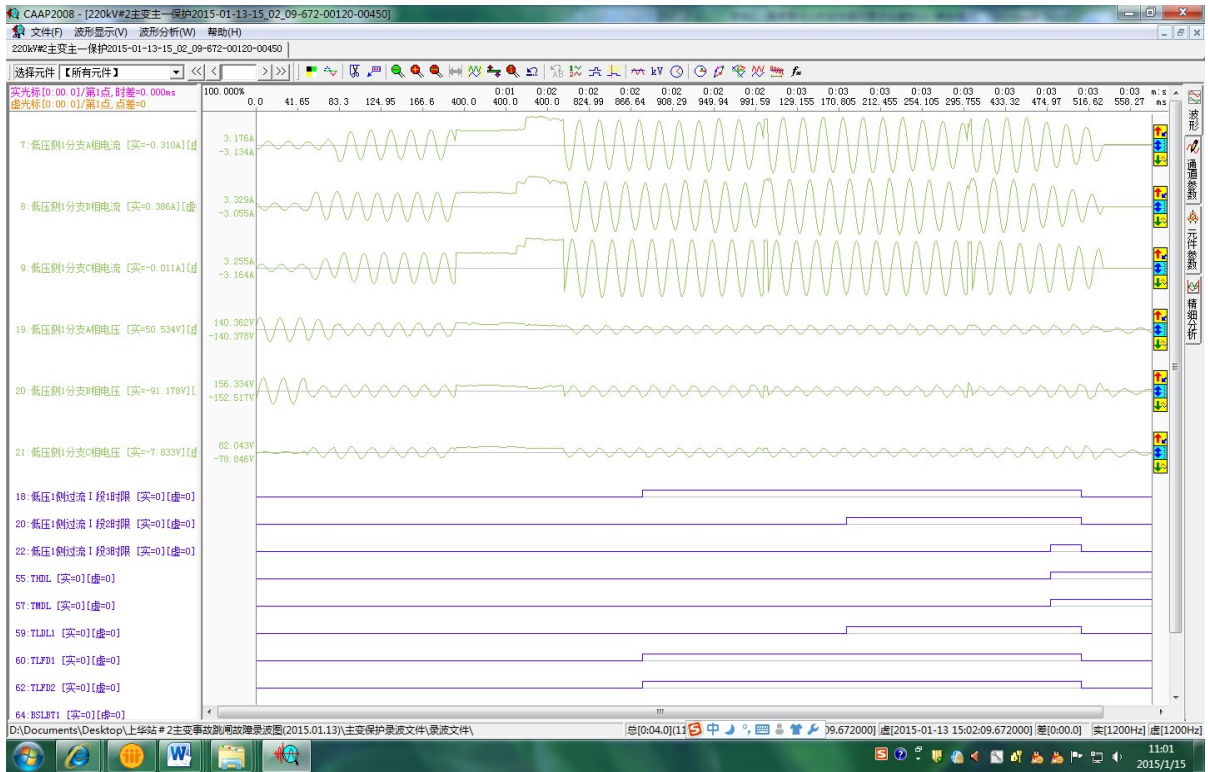


Figure 5. Main I protection record
图 5. 主 I 保护录波图

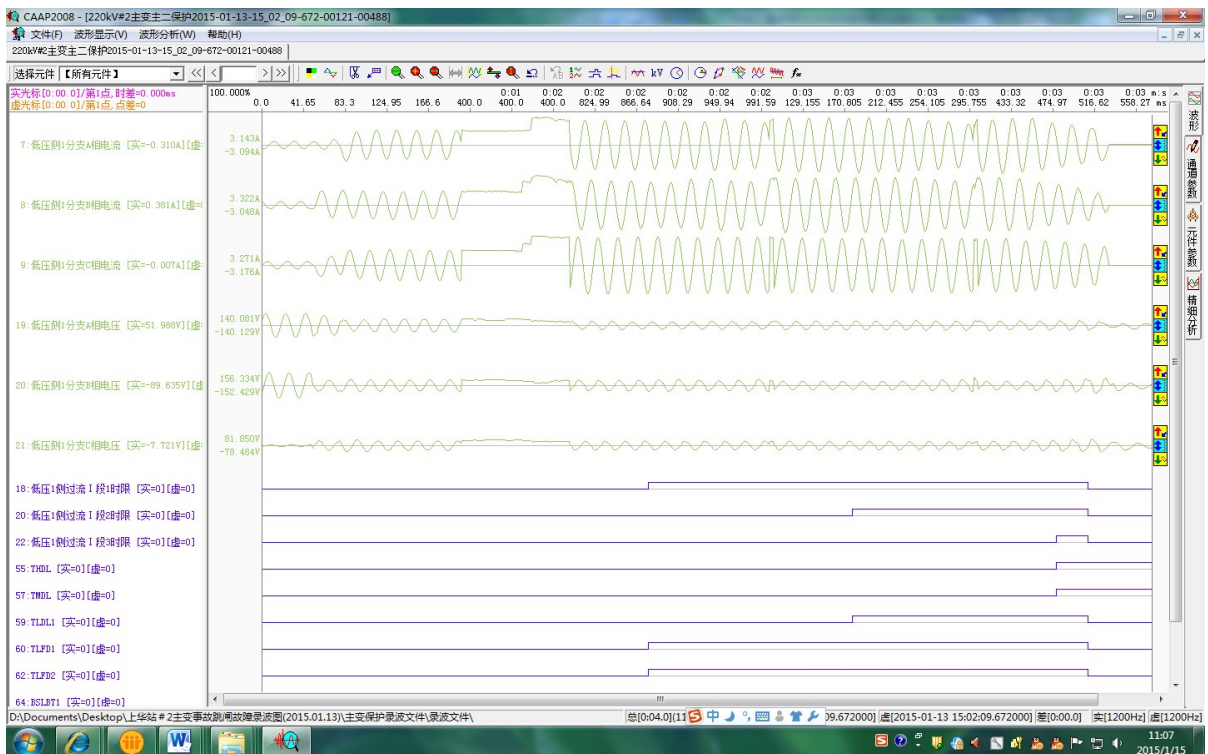


Figure 6. Main II protection record
图 6. 主 II 保护录波图

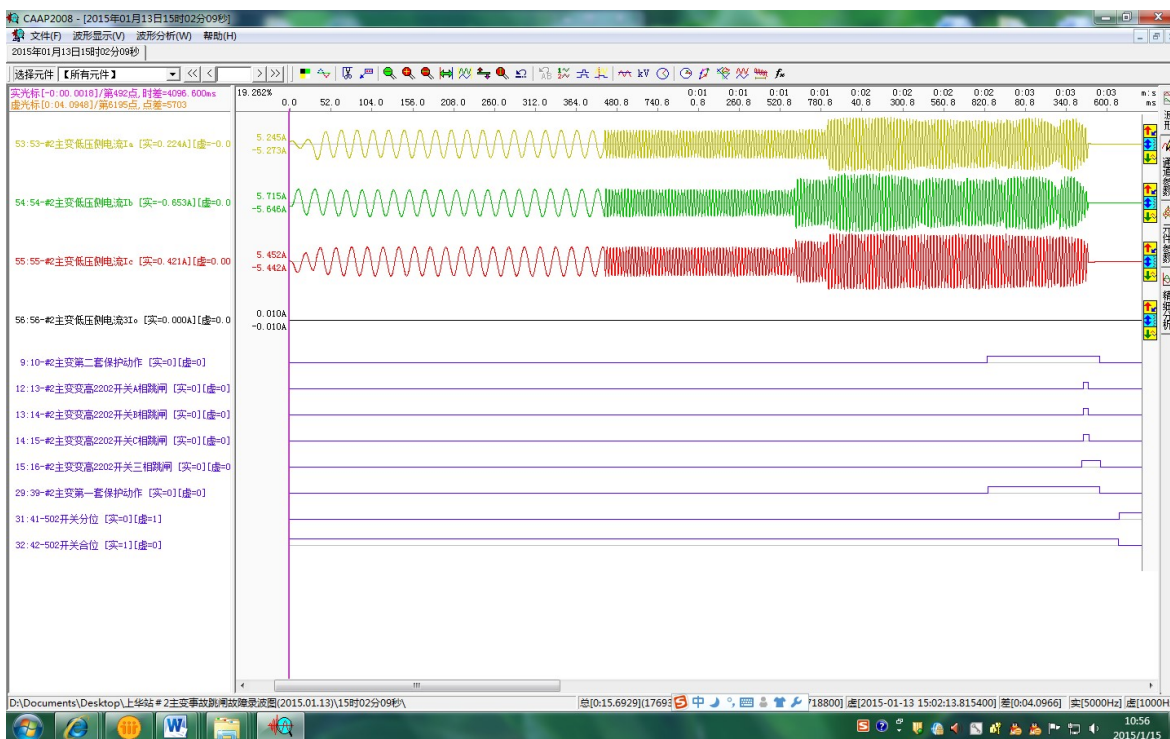


Figure 7. Fault record
图 7. 故障录波图



Figure 8. Situation of power distribution station
图 8. 配电站故障情况



Figure 9. The overall environment of the high pressure chamber at the substation
图 9. 变电站高压室整体环境

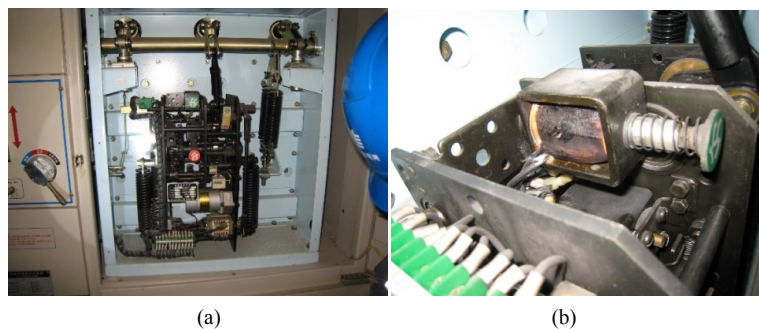


Figure 10. 10 kV switch mechanism and Breaker coil burning picture
图 10. 10 kV 矢崎线开关机构及分闸线圈烧毁图

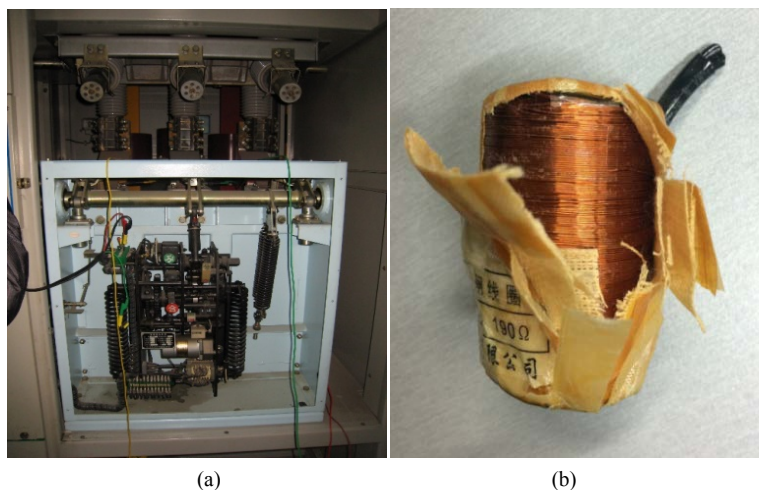


Figure 11. Turns down the 502 switch mechanism and anatomical separated gate coil
图 11. 变低 502 开关机构及解剖后的分闸线圈图

4. 事故分析

4.1. 事件发生直接原因

导致本次事件的直接原因为矢崎线专用配电站(用户资产)发生单相短路故障,随后逐步发展为两相故障,约 24 ms 发展为三相故障,200 ms 后矢崎线保护动作,开关拒动,保护出口 1.048 秒后分闸线圈烧毁。变电站#2 主变低压侧后备保护动作,1 时限跳 500、550 分段开关并闭锁备自投,2 时限跳 502 开关,由于 502 开关未能及时分闸(保护出口后约 546 ms 分闸)致 3 时限动作跳主变三侧。

4.2. 事故发生的根本原因

导致本次事故发生的根本原因是由于分闸线圈烧毁导致的开关拒动。本次事故中所使用的断路器型号为 ZN28-10, 配用操作机构为 CT19-II 型, 投运时间为 2002 年 9 月。该型号操作机构属早期研发的弹操机构, 机构所配套的分、合闸线圈无论技术水平和生产工艺都有明显的时代局限性。线圈由漆包线绕制后, 采用油纸包覆后再浸漆, 使用过程中线圈暴露在空气中, 容易受到运行环境中的影响, 引起线圈匝间绝缘老化, 或者线圈变形后电磁力减弱。故障后检查, 矢崎线断路器分闸线圈从投运后没有更换过, 多年运行过程可能累积动作发热, 结合长期暴露在空气中线圈老化, 在本次故障前线圈匝间绝缘可能已被破坏, 因此, 矢崎线保护动作后断路器分闸线圈产生的电磁力不足, 无法在动作瞬间使断路器机构脱扣

跳闸，而持续励磁电流作用 1.5 s，分闸线圈发热烧毁。

5. 线圈分析

5.1. 整体分析

断路器分合闸线圈结构示意图如图 12 所示，分合闸线圈由动铁芯、静铁芯、线圈、铁盘、外壳以及连杆组成。导线围绕静铁芯环绕形成多匝线圈，动铁芯(粗)与连杆(细)相连，其中动铁芯为导磁材料，连杆为非导磁材料。弹簧连接圆盘，正常时弹簧将动铁芯芯弹出，连杆收缩回外壳内。断路器分合闸线圈工作电压为 220/110 V 直流电压，其线圈电阻阻值在 100~200 Ω 区间内，额定工作电压越大，对应阻值越大[10][11]。其工作电流一般在 1 A 左右，因此线圈通电时流过线圈内的电流不大。根据电磁感应现象，线圈通电时产生磁场，线圈产生的磁场将动铁芯与外壳顶部的铁盘磁化，铁盘与动铁芯之间因为磁化产生吸引力，动铁芯被吸附带动连杆朝向金属盘运动，连杆伸出外壳。

电流产生磁场克服弹簧做功，在这个过程中通过线圈的电流不大，但是电流所产生的磁场强度是影响分合闸线圈所能产生的力的主要因素。因此，线圈烧毁分为两种情况：若线圈的电流过大，在短时间内便会烧毁线圈；与这种情况相反，如果线圈中流过工作电流太小，电流所产生的磁场力无法克服弹簧拉力，连杆无法动作，断路器无法获得相应的力和动量从而产生动作。在这种情况下，由于断路器为断开电路，从而线圈仍然处于通电的状态下，时间过长则会导致线圈发热最终烧毁。在实际工程中，如果通过线圈的电流超过 5 分钟，则线圈就会烧毁。

5.2. 断路器分合闸线圈烧毁故障分析

当断路器分合闸线圈烧毁时，我们应该从以下两种可能的情况进行分析判断。

1) 电磁铁芯机械故障

电磁铁机械故障导致线圈烧毁分为两种情况：第一种是由于静铁芯制作工艺误差引起的；第二种是

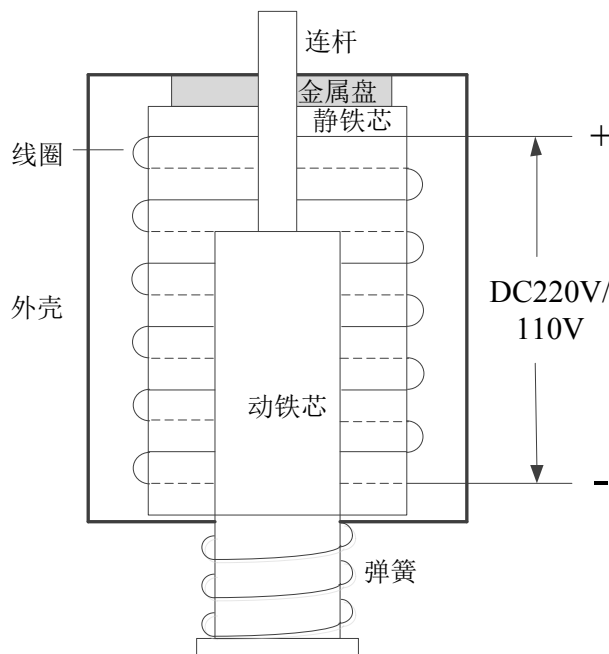


Figure 12. Coil internal structure
图 12. 线圈内部结构图

由于动铁芯设计缺陷导致的。第一种情况的发生是由于线圈的松动所导致的。如果线圈由于发热或者缠绕过程中的误差产生一定的松动,在断路器分闸过程中会使得本不应该动作的静铁芯发生一定的位移,导致连杆无法提供足够的动力使断路器机械部分将电路切断,线圈中长时间流过工作电流造成线圈烧毁的严重后果。第二种情况的发生是由于线圈的设计以及生产工艺的不合理造成的。动铁芯的设计和安装需要经过严谨的分析和计算,因为当动铁芯运动的路径过短,没能达到分闸所需的行程长度时,断路器无法立刻动作,线圈持续通电造成线圈烧毁。以上两种情况属于电磁铁芯机械故障。线圈部件中,铁芯是分合闸设备的核心部件之一,一旦发生上述两种情况,便会造成线圈的烧毁。

2) 分合闸继电器回路故障

正常情况下,断路器将电路断开之后,保护装置会停止发出分合闸指令使得线圈断电[6]。静铁芯引发故障是因为断路器未能将电路断开,造成保护装置持续发出分合闸指令,使得线圈长时间通电,最终发热烧毁。但如果分合闸继电器发生故障,或者分合闸控制回路的开关行程过长,或者分合闸回路中的电阻太大,均会造成线圈持续接收到分合闸指令从而长时间通电导致发热烧毁。前两种情况是由于分合闸继电器发生了故障,无法停止发出分合闸指令或者无法有效接入回路而对分合闸线圈通电之后的动作发出指令。此时分合闸指令就会长时间作用于线圈,使得线圈长时间通电导致发热,最终由于温度过高而烧毁。在分闸回路电阻较大情况中,由于电阻过大造成分压,线圈上的电压不足以提供产生分合闸的动作。因为当回路电阻过大时,线圈中流过的电流较小,此时电流产生的磁场力不足以克服弹簧力的大小,使得断路器无法完成分闸的动作,保护动作在断路器未分断电路的情况下持续发出分合闸指令,造成线圈长时间通电从而发生烧毁。

6. 结束语

本文对 220 kV 变电站发生的一次 10 kV 开关拒动故障中的断路器线圈进行了分析。通过对故障录波及保护动作情况记录分析处理事故的具体经过,再通过现场的检修发现了事故的原因是由于线圈烧毁造成的。依据事故情况,通过理论分析,结合事故测量数据对事故后线圈的状态进行了定性判断。并且通过对线圈的内部结构以及工作方式的分析,详述了可能造成线圈烧毁的原因,并且从线圈结构的铁芯部分以及线圈接受指令的保护回路出发,分别叙述了可能造成线圈烧毁的内部因素和外部因素,对预防线圈烧毁事故从线圈结构的设计制作以及保护回路的设计方面提供了参考。目前国内外诸多断路器线圈生产厂家如康德瑞恩电磁技术公司对断路器线圈在进行不断的优化,且文中对于断路器线圈原理及结构的分析是正对目前市场上主流使用的一款产品,但是断路器线圈的原理以及动静铁芯的基本结构不会改变,所有断路器线圈的设计与制造都是基于此。因此本文研究探讨的线圈烧毁分析具有普遍适用性,对于所有断路器线圈制造时,在防止线圈烧毁设计方面均具有参考价值。

基金项目

广东电网有限责任公司科技项目资助(项目编号: 030500KK52170002)。

参考文献

- [1] 张春喜. 关于预防断路器分合闸线圈烧毁的可行性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [2] 靳文娟, 季天瑶, 唐文虎. 基于振动信号分析的高压断路器机械故障诊断[J]. 广东电力, 2017, 30(10): 104-110.
- [3] 赵莉华, 荣强, 景伟, 等. 基于 LabVIEW 的高压断路器操作机构状态评估[J]. 电测与仪表, 2016, 53(22): 54-59.
- [4] 刘煌煌. SF₆ 断路器储能接点故障引起合闸线圈烧毁的分析与改进[J]. 电气技术, 2016, 17(10): 146-148.
- [5] 李鹏飞, 周文俊, 曾国, 等. 高压断路器合闸弹簧动态特性及储能状态检测方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 104-112.

-
- [6] Huang, X. and He, X. (2011) Design of an On-Line Monitoring System of Mechanical Characteristics of High Voltage Circuit Breakers.
- [7] 缪希仁, 吴晓梅, 石敦义, 等. 采用 HHT 振动分析的低压断路器合闸同期辨识[J]. 电工技术学报, 2014, 29(11): 154-161.
- [8] 毛晨炜. 断路器防跳回路的配合问题及优化措施研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [9] Miao, H. and Zou, A. (2010) Research on Fault Diagnosis of High-Voltage Circuit Breaker Based on the Improved DS Evidence Theory. *2nd International Conference on Information Science and Engineering (ICISE)*, Wuhan, 25-26 August 2010, 1460-1463.
- [10] 崔勇, 王川, 杨锦红, 等. 高压断路器控制回路隐性故障检修方法[J]. 高压电器, 2011, 47(12): 96-99.
- [11] Yu, Y., Sharoff, S., Babych, B. and Mo Bi, L. (2016) A Hybrid Feature Set for Automatic Human Translation Quality Assessment. *LREC 2016, Edition of the Language Resources and Evaluation Conference*, 23-28 May.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2333-5394, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jee@hanspub.org