

一起有载切换开关故障引起的 110 kV 变压器运行事故原因分析

黄鑫 胡林 陆晓彬 蔡川 兰洋 黄克全 马锡良
(国网成都供电公司 四川成都 610041)

摘要: 基于一起 110 kV 变压器的有载切换开关故障, 对其进行油色谱分析、短路阻抗、绕组变形、绕组直流电阻和有载分接开关切换时间和动作顺序试验, 结合吊罩检查, 分析出了事故原因及过程, 并且针对事故提出了预防性措施。

关键词: 变压器; 有载分接开关; 故障; 预防性检测

中图分类号: TM41 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2019)03-0080-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.03.019

Analysis of a 110 kV Transformer Operation Accident Caused by Failure of On-load Tap Changer

Huang Xin, Hu Lin, Lu Xiaobin, Cai Chuan, Lan Yang, Huang Kequan, Ma Xiliang
(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The switching process of on-load tap changer (OLTC) is introduced. The oil color spectrum analysis, short-circuit impedance, winding deformation, winding DC resistance and the switching time and action sequence of on-load tap changer are tested based on the fault of on-load tap changer of a 110 kV transformer. The cause and process of the accident are analyzed according to those test results combined with the inspection of hanging cover, and a new preventive detection method and new organizational measures are given for the accident.

Key words: transformer; on-load tap changer (OLTC); fault; preventive detection method

0 引言

电力变压器作为电力系统中的枢纽设备, 连接着电网、发电厂、用户, 在电网中起着电能转换的重要作用, 其运行状态直接关系到电网的平稳运行。电力变压器在运行过程中, 由于高峰低谷时输送容量不同会造成电压幅值波动, 为解决这一问题, 采用有载分接开关实现变压器的可变变比供电。有载调压电力变压器现在已普遍运用于各变电站中, 其基本原理就是在保证不中断负载电流的情况下, 实现变压器绕组分接头的切换, 从而改变绕组的匝数即变压器的电压比, 最终实现调压的目的。随着电能质量要求的不断提高, 有载调压变压器调整电压频率和累积电压调节的频率增加, 这就使得有载分接开关故障率不断提高。由于有载开关作为变压器中的运动部件, 它的工作状态将直接影响变压器的运行。

根据运行数据统计, 有载分接开关故障导致变压器故障占变压器事故总数的 40% 以上, 因此针对由有载开关故障导致变压器运行故障的典型案例分析具有十分重要的意义。下面基于一起由 110 kV 变电站主变压器有载分接开关的切换开关故障引起的变压器本体重瓦斯跳闸故障的案例, 结合继保动作、录波、化学、高压试验和返厂吊罩检查情况, 对故障经过、故障原因及大修方案进行了分析, 并提出针对性的建议和预控措施。

1 有载分接开关的切换过程

图 1 所示为双电阻有载调压开关的切换过程。其中图 1(a) 为开始切换前的状态, 此时分接开关接在分接触头 1 上; 图 1(b) 为切换开始时, 开关的滑动触头向分接触头 2 移动, 开关通过过渡电阻 R_1 与

分接触头1相连;图1(c)为滑动触头滑动到与1'、2'相连,滑动触头通过 R_1 、 R_2 分别与触头1、2相接;图1(d)为开关通过电阻 R_2 与分接触头2相连;图1(e)所示为切换完成状态,此时滑动触头与分接触头2连上,开关完全切到了分接触头2上。

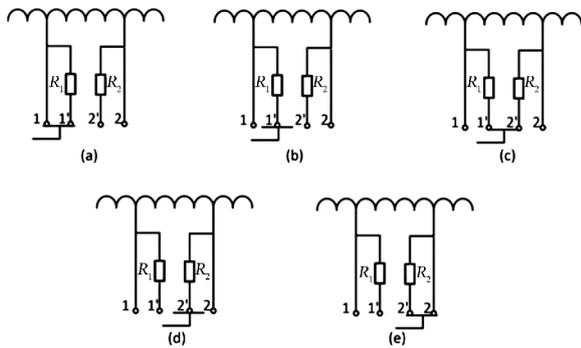


图1 有载分接开关工作顺序

因此从整个切换过程中电阻值的变化就能测定开关的工作顺序是否正确。从切换过程中三相的过渡电阻值随时间的变化曲线 $R-t$,可获得过渡时间、过渡电阻、三相同期性等参数。由切换开关的动作原理可知,切换开关在切换过程中,串入回路的电阻值随时间有规律地改变,将这一变化以图形方式记录下来,并与标准波形进行比较,就可以判断出切换开关的动作是否正常。

2 故障经过与设备概况

2.1 事故前运行方式

110 kV 某变电站 110 kV 为内桥式接线且仅有单进线,由某支线 181 断路器供 110 kV I 母及 1 号主变压器,经 110 kV 内桥 130 断路器供 110 kV II 母,110 kV I、II 段母线并列运行。10 kV 为单母线分段接线,事故前分裂运行。

2.2 设备基本情况

110 kV 某变电站 1 号主变压器型号为 SFZ10-50000/110,2012 年 9 月曾返厂大修更换绕组,2016 年 2 月进行预试维护,对有载切换开关进行吊检,发现其缸体存在漏油现象。2017 年 12 月进行现场大修,从检修人孔进入处理有载切换开关渗漏问题。

有载开关型号为 MIII600-72.5/C-10193W,过渡电阻为 3.2 Ω ,出厂时间为 2008 年 7 月,故障发生时,累积调挡 11 434 次。变压器铭牌如表 1

所示。

表 1 变压器铭牌参数

联结组别	空载电流 $I_0/\%$	空载损耗 W_0/kW	额定电压 /kV	额定电流 /A
YNd11	0.15	28.697	110 $\pm 8 \times$ 1.25% / 10.5	262.4 / 2749.3

2.3 事故经过

2018 年 4 月 14 日 06:47,110 kV 1 号主变压器非电量保护本体重瓦斯动作跳开 110 kV 某支线 181 断路器、110 kV 分段 130 断路器、1 号主变压器 901 断路器。1 号主变压器本体轻瓦斯未动作,电量保护均未启动,差动高低后备保护均未动作,全站失压。

3 事故现场检查情况及试验情况

故障发生后,对事故变压器开展继保、检修、高压、化学等检查及诊断试验。

3.1 保护及录波情况

结合非电量保护装置、监控后台、故障录波器等装置报告,得到以下故障信息。

1 号主变压器跳闸前,保护装置未见启动,且所有保护均未动作,保护电压未见明显降低,故排除 1 号主变压器外部故障的可能。10 kV 备自投由于两段母线电压消失,正常放电不动作。结合本体重瓦斯跳闸,怀疑其内部存在故障。

3.2 现场检查

主变压器外观无异常,本体瓦斯继电器内部无气体,主变压器各处均无放电及渗漏油痕迹且油位正常。现场传动调试瓦斯信号正确。110 kV 0 相升高座能放出少量气体。有载挡位停在 5、6 挡之间,查看主变压器监控后台信息,4 月 13 日 21:45 主变压器从 7 挡调至 6 挡,4 月 14 日主变压器跳闸时正在从 6 挡调至 5 挡。现场检查挡位圈数时,从 6 挡调往 5 挡的方向进行调挡,发现经过 11 圈选择分接开关动静触头闭合(简称选合),再过 7 圈指示盘刻度 5 挡到位。该型号的有载分接断路器的选择及切换顺序为 12 ± 1 圈时选择开关动静触头分离(简称选分),24 ± 1 圈选合,27-28 圈单双挡位切换,33 圈动作完成到位。由此可以分析选择开关在选分刚刚结束时因失去操作电源而停止,此时选择开关圈

表2 油色谱分析结果

单位: $\mu\text{L/L}$

取样口及脱气量	H_2	CO	CO_2	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_2H_2	总烃	结论
中部 2.6 ml	28.1	162.1	1 394.9	5.8	3.6	0.4	12.7	22.5	C_2H_2 超标
下部 3.2 ml	611.9	172.2	1 279.4	172.9	276.8	13.5	665.4	1 128.7	H_2 、 C_2H_6 、总烃超标

数如图2所示。

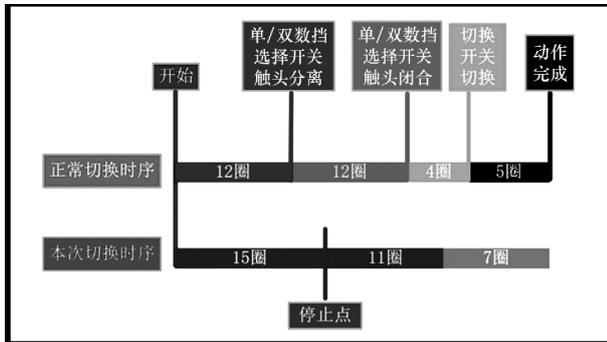


图2 有载圈数检查

3.3 诊断试验

3.3.1 油化试验

从主变压器中部及下部两个取样口取样,发现中部(靠油枕侧)油样特征气体含量远小于下部(靠有载侧),因此判断放电位置在变压器下部(靠有载侧)。

化验人员对该主变压器本体油样进行油中溶解气体色谱分析,结果如表2。根据油样分析结果,油样中部 C_2H_2 含量 $12.7 \mu\text{L/L}$,下部 C_2H_2 含量为 $665.4 \mu\text{L/L}$,超过状态检修试验规程要求值(不大于 $5 \mu\text{L/L}$)。其他气体含量也有增长。计算油中气体三比值编码为“1.0、2”,初步判断存在放电故障;由于中部油样特征气体含量远小于下部,因此判断放电位置在变压器下部。但进一步定位故障点和故障过程还应结合高压试验和返厂吊罩检查验证分析。

3.3.2 高压试验

高压诊断试验结果如下:1)短路阻抗、绕组变形、主体绝缘、低电压空载试验结果均合格;2)绕组直流电阻和有载分接开关切换时间和动作顺序试验结果不合格,试验结果分别如表3至表5所示。

由绕组直流电阻试验结果可以看出:1)在单数挡位时,相间不平衡度均在1%以下,满足要求;2)在双数挡时,C相直流电阻比A、B相高 $100 \text{ m}\Omega$ 以上,相间不平衡度均在20%以上,试验结果不合格。可以推测,C相双数挡位选择开关抽头或者有载切换开关主抽头接触不良,甚至有灼伤。如表5所示,在直流电阻测试过程中,换挡时发现切换开关不动

作。综上所述,初步怀疑可能是由于有载分接开关中切换开关的单/双切换存在故障。

3.3.3 返厂吊罩检查

为了验证分析结论,将1号主变压器返回变压器厂进行吊罩检查。

表3 高压绕组直流电阻试验结果

分接位置	R_{A0}/Ω	R_{B0}/Ω	R_{C0}/Ω	相间不平衡度/%
1	0.494 4	0.498 2	0.497 1	0.77
2	0.482 4	0.485 2	0.597 8	22.12
3	0.480 9	0.484 6	0.483 8	0.77
4	0.468 7	0.471 5	0.582 8	22.48
5	0.467 3	0.470 9	0.470 1	0.77
6	0.470 3	0.472 4	0.607 8	26.60
7	0.455 8	0.457 0	0.458 3	0.55
8	0.456 4	0.459 6	0.608 7	29.97
9a	0.439 3	0.442 2	0.441 6	0.66
9b	0.441 5	0.444 1	0.590 3	30.25
9c	0.439 2	0.442 1	0.441 5	0.66
10	0.441 3	0.443 6	0.589 0	30.06
11	0.454 5	0.457 7	0.456 9	0.70
12	0.455 8	0.458 3	0.587 9	26.38
13	0.468 4	0.471 3	0.471 2	0.62
14	0.469 1	0.472 1	0.613 2	27.81
15	0.481 9	0.484 9	0.484 5	0.62
16	0.483 0	0.485 6	0.621 3	26.10
17	0.495 3	0.498 7	0.497 7	0.68

表4 低压线圈直流电阻试验结果

R_{ab}/Ω	R_{bc}/Ω	R_{ca}/Ω	线间不平衡度/%
0.006 215	0.006 201	0.006 228	0.43

1)切换开关检查:发现切换开关绝缘筒连接处内侧均压环由于螺栓松动脱落至枪机处,对枪机下滑块造成卡涩。如图3所示,圆形框内为均压环实际位置,方框内为均压环该在位置。

检查切换开关桶底,发现外侧均压环及螺帽落

表5 分接开关选择及切换动作时序

动作顺序	2→3	3→4	4→3	3→2
选分(位置)/圈	11.0	11.5	11.0	11.0
选合(位置)/圈	22.5	22.0	22.5	22.0
切换	不动作	不动作	不动作	不动作
到位(位置)/圈	33	33	33	33

备注：“不动作”指切换开关没有动作时响的一声响。

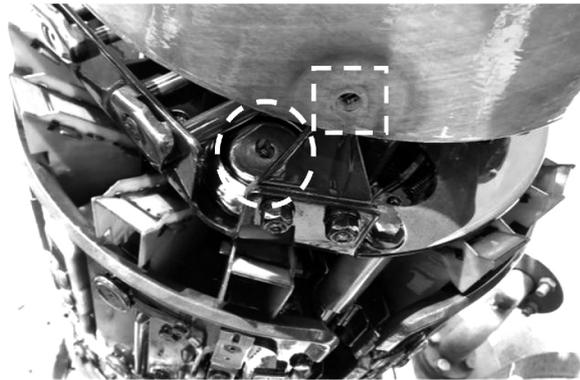


图3 均压环脱落卡住枪机

至桶底,但未找到对应平垫。同时在桶底还发现有一个多余的螺帽,将切换开关解体后发现这是A相过渡触头的固定螺栓上脱落的螺帽,如图4所示。



图4 切换开关内部螺帽脱落

2) 选择开关检查:在选择开关7挡A、B、C三相动、静触头处均有明显的拉弧痕迹,其中C相尤其严重,如图5所示。

3) 接触电阻试验:在均压环取出和放回时,分别对切换开关进行主触头接触电阻试验,其结果分别如表6、表7所示。

表6、表7的试验结果表明:均压环脱落造成机构卡涩,使得单数挡对应的主触头接触电阻为正常情况下的4~20倍,双数挡回路不通;机构卡涩时,使得切换开关无法切换至双数挡,而底部的极性选择开关正常动作且属于带负荷动作,会产生触头电



图5 拉弧痕迹

表6 主触头接触电阻测试
(均压环取出,正常动作)

主触头	A _上	A _下	B _上	B _下	C _上	C _下
单数挡阻值/ $\mu\Omega$	401	468	322	477	444	462
双数挡阻值/ $\mu\Omega$	367	432	427	434	466	457

表7 主触头接触电阻测试
(均压环放回原位置,机构卡涩)

主触头	A _上	A _下	B _上	B _下	C _上	C _下
单数挡阻值/ $\mu\Omega$	401	468	322	477	444	462
双数挡阻值/ $\mu\Omega$	不动作	不动作	不动作	不动作	不动作	不动作

弧烧蚀。吊罩发现选择开关最下面的C相7挡触头确实存在明显的烧蚀痕迹,与油化试验报告指出的中部油样特征气体含量远小于下部的结果相吻合。

4) 回路电阻测试:对选择开关和本体绕组分别单独进行了回路电阻测试,试验结果均合格,说明绕组并未受到影响,这与现场所做高压试验结果一致。

4 故障原因分析

综上所述,本次主变压器事故是由有载切换开关均压螺栓脱落,造成机构卡涩引起。其事故发生过程推演如下。

在4月13日21:45挡位由7挡向6挡切换时,切换开关因下落的均压环卡住枪机下滑块,未能由“双”切换到“单”,虽然挡位盘已显示为6挡,但电气上仍然通过选择开关的7挡及切换开关的单极导流,选择切换过程如图6所示。

当由6挡向5挡切换时,首先选择开关单数动触头由7挡向5挡转动,因切换开关卡在单数极不

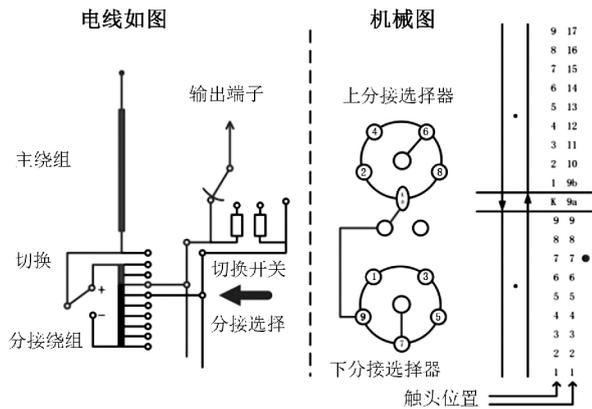


图6 选择切换过程

能切换,故选择开关带电流拉开导致拉弧放电。

5 结语

有载分接开关内部机械零件及电动机构电气元件繁多,连接复杂。尽管产品在设计 and 制造时,对容易松动和故障的零部件采取了可靠的防振动、防松动及防脱落措施,如采用一次性防松动螺栓螺母。但在投入现场运行后,由于有载切换开关频繁动作,长时间运行的积累效应必将会导致螺栓螺母松动。这就需要检修人员定期对螺丝进行检查。

但由于对有载开关的内部检查需要吊罩,且需要主变压器停电配合,因此通常只有在主变压器进行大修时才可对分接切换开关进行检查。这给定期检查内部螺栓是否松动带来了困难,可以通过在线检测技术的应用加以解决。另外,为保证有载开关在频繁调档时的可靠性,必须严格把控有载开关质量,并积极开展检修工作。

当变压器有载分接开关动作次数、运行时间临近厂家规定值时,应提前制定检修方案和计划对分接切换开关进行吊检大修。检查检修过程中,应重

(上接第74页)

采集系统提供的数据认真分析,画出向量图并结合现场实际判断准确原因。

参考文献

[1] 唐毅. 三相三线误接线对计量的影响[J]. 四川电力技术, 2008, 31(Z1): 18 - 19.

[2] 邱炳正. 交流电度表错误接线百例解析[M]. 北京: 中

点检验螺栓、螺母和线夹紧固情况。触头是易磨损的部件,应做好触头磨损记录,随时关注磨损程度,磨损严重的应及时更换。

参考文献

[1] Wang C, Lu L, Ma H, et al. Diagnosis for Loose Switching Contact Fault of On-load Tap-changer in Transformer[C]// China International Conference on Electricity Distribution IEEC 2010: 1 - 6.

[2] Erbrink J, Gulski E, Smit J, et al. Experimental Model for Diagnosing On-load Tap Changer Contact Aging with Dynamic Resistance Measurements[C]// The International Conference and Exhibition on Electricity Distribution IET, 2009: 1 - 17.

[3] 杜瑞红. 变压器有载分接开关特性测试系统的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2007.

[4] 李建明, 梁作德, 李琪. 一起由开关故障引起的变压器短路事故的分析计算[J]. 变压器, 2016, 53(12): 72 - 75.

[5] 黄志明. 110 kV 变压器有载开关吊检研究[J]. 军民两用技术与产品, 2016(8): 140.

[6] 杨义军. 主变压器有载分接开关故障原因分析及处理[J]. 变压器, 2012, 49(9): 73 - 74.

[7] 赵敏, 刘立, 别长报, 等. 一起 110 kV 变压器有载分接开关放电故障分析与处理[J]. 变压器, 2014, 51(8): 64 - 66.

[8] 国家电网公司. 输变电设备状态检修试验规程: Q/GDW 168 - 2008[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

[9] 杨军亭, 彭鹏, 温定筠, 等. 一起变压器有载分接开关事故分析[J]. 变压器, 2016, 53(2): 64 - 66.

[10] Caccese V, Mewer R, Vel S S. Detection of Bolt Load Loss in Hybrid Composite/Metal Bolted Connections[J]. Engineering Structures, 2004, 26(7): 895 - 906.

作者简介:

黄鑫(1986), 工程硕士, 工程师, 主要从事变压器检修管理工作。(收稿日期: 2019 - 02 - 26)

国计量出版社, 1996.

[3] 张莉. 用电信息采集系统显示电能表负电流原因分析[J]. 电工技术, 2017(4): 111 - 112.

[4] 于海波, 刘佳, 王春雨, 等. 功率因数对电能计量的影响[J]. 电测与仪表, 2014, 59(11): 9 - 11.

作者简介:

宋钰钰(1992), 硕士研究生, 助理工程师, 从事装表接电工作, 研究方向为智能供用电。

(收稿日期: 2019 - 02 - 11)