

变压器有载分接开关故障案例分析及 缺陷模拟试验研究

董青迅, 罗 杨, 周 波, 邱 炜, 胡祥胜, 蒋闵威, 吴 雄, 袁明哲

(国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610041)

摘要:有载分接开关(OLTC)是实现变压器带载电压调节的关键设备,其可靠运行对于电网安全稳定具有重要意义。首先,以双过渡电阻组合式 OLTC 为例介绍了有载分接开关的典型结构和工作原理;然后,分析了3起典型故障案例,其中机械缺陷是导致 OLTC 故障的重要原因;最后,搭建了 OLTC 机械缺陷模拟平台,采用振动法开展了机械缺陷检测研究。结果表明不同状态下振动信号特征值变化,为后续 OLTC 状态评估提供了重要支撑。

关键词:有载分接开关; 动作原理; 机械故障案例; 缺陷模拟

中图分类号:TM 411 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2024)04-0087-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240413

Fault Case Analysis and Defect Simulation of On-load Tap-changer in Transformer

DONG Qingxun, LUO Yang, ZHOU Bo, QIU Wei, HU Xiangsheng, JIANG Minwei,

WU Xiong, YUAN Mingzhe

(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:On-load tap-changer (OLTC) is a crucial equipment for regulating the voltage of transformers under load, and its reliability is of great significance to the safe and stable operation of power grid. Firstly, the typical structure and working principle are briefly introduced by taking double transition resistance OLTC for example. And then, three typical accident cases are analyzed, which indicates that mechanical fault is an important cause of OLTC failure. Finally, a mechanical fault model for OLTC of 110 kV transformer is established, and vibration analysis method is adopted to study the mechanical fault. The results show that the vibration signal changes significantly under different conditions, which provides important supports for the subsequent state detection and evaluation of OLTC.

Key words:on-load tap-changer; working principle; mechanical failure case; defect simulation

0 引 言

有载分接开关(on-load tap-changer, OLTC)能够在保证负载连续的情况下调整变压器电压,对保持电压稳定、潮流优化等具有重要作用^[1]。由于 OLTC 与变压器绕组直接相连,一旦出现故障,可能形成千安级的短路电流,甚至导致变压器燃爆,严重威胁变压器的安全稳定运行。

OLTC 结构复杂,运行中遭受电气、热和机械等

多应力作用,容易出现触头烧蚀、传动机构磨损、部件松动等故障^[2-3]。近年来,发生了多起由 OLTC 引发的故障事故,给日常运维带来了极大压力,如:某换流站变压器真空 OLTC 过渡电阻连接松动,造成放电烧蚀,从而导致油室中乙炔异常增大^[4];某变电站变压器 OLTC 转轴接触电阻异常增大导致的过热,造成触头烧蚀故障^[5];某变压器 OLTC 筒底齿轮与选择器导线机械摩擦导线断股,导致切换开关触头放电^[6]。因此,OLTC 状态检测及评估技术逐渐成为研究热点。

为确保 OLTC 安全稳定运行,下面在介绍 OLTC

典型结构及工作原理的基础上,针对 3 起典型案例进行原因分析,并开展了机械缺陷模拟试验研究,为后续 OLTC 故障检测及诊断提供支撑。

1 OLTC 典型结构及工作原理

OLTC 是在变压器带负载的情况下,通过触头动作来调整变压器高压侧、低压侧的有效匝数比实现调压。典型 M 型 OLTC 包含电动机构、弹簧机构和操作机构。电动机构为 OLTC 调压操作提供能量。弹簧机构控制切换开关主触头与固定触头接触或分离。操作机构控制切换开关的合闸和分闸动作,其中选择开关与变压器绕组直接相连,实现绕组单数、双数的选择,用于承载电流、不接通与开断负载电流。切换开关包括绝缘转轴、快速机构、弧形板和动触头系统等,切换开关经过渡电路将动触头切换到预先选择的静触头上完成电流切换。

以双过渡电阻 M 型 OLTC 为例说明其工作原理。当 OLTC 进行调压操作时,首先,选择开关动作实现下次切换触头的预选择;然后,通过电动机构带动切换开关经过渡电路在带载情况下完成逐级切换。切换开关动作原理如图 1 所示,在执行调压操作时,切换步骤按照图 1(a)至图 1(g)顺序完成。

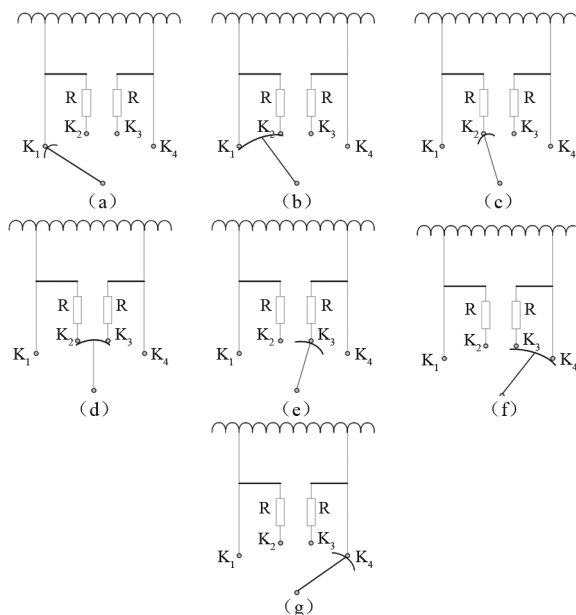


图 1 切换开关动作原理

在 OLTC 切换过程中,结构卡涩、触头松动、弹簧储能不足、过渡电阻松动等缺陷都会造成切换失败,甚至出现故障,下面结合现场实际案例分析 OLTC 故障。

2 OLTC 典型故障案例分析

2.1 案例 1:机构卡涩故障

某变电站 110 kV 的 1 号主变压器 OLTC 的切换开关单/双切换存在问题。吊芯检查发现,OLTC 内部紧固螺栓脱落,其中一颗螺栓掉入有载油室,另一颗螺栓卡在机构里面,如图 2 所示。同时,检查发现选择开关 C 相 7 挡触头处存在明显的烧蚀痕迹。



(a) 正常固定的紧固均压螺栓



(b) 掉落的均压螺栓

图 2 分接开关吊芯检查

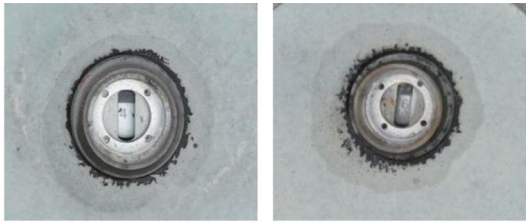
经分析,本次事故是由于紧固件螺栓松动、脱落导致的。事故初期,紧固件螺栓松动导致接触不良,接触电阻增大,在长期电流作用下,松动部位过热;另一方面,松动螺栓在电动力作用下松动缺陷加剧并最终脱落,进而导致机构卡涩,切换不到位,切换开关触头产生电弧,烧蚀触头,最终造成本体重瓦斯保护动作。

2.2 案例 2:挡位调节故障

某 220 kV 变电站 1 号、2 号主变压器挡位均处于 6 挡,但是无功功率相差很大。初步判定两台主变压器相序不对或者变比存在不一致,并列运行的主变压器间存在环流。

现场查看有载机构表盘挡位,发现大盖上挡位 1 号主变压器为 4 挡,2 号主变压器为 6 挡,如图 3 所示。1 号主变压器大盖上挡位和有载机构表盘挡位显示不一致,说明 OLTC 在调挡过程中挡位显示

存在错误,根据此时的无功环流计算可知,此时两台主变压器的挡位应该只相差一挡,即1号主变压器此时的实际挡位应该为5挡。为了验证判断的准确性,此时将2号主变压器调至5挡,1号主变压器保持不变,调挡后两台主变压器的无功功率平衡,环流消失,说明之前计算和判断的准确性。



(a) 1号主变压器挡位(4挡) (b) 2号主变压器挡位(6挡)

图3 两台主变压器 OLTC 挡位

分析可知,1号主变压器 OLTC 存在明显缺陷,有载机构表盘和大盖挡位显示与实际挡位不一致,这可能是由于 OLTC 调挡过程中传动不可靠,存在触头机械松动故障,从而导致挡位切换失败。

2.3 案例3:分接开关烧蚀故障

某110 kV变电站发生2号主变压器从4挡调至5挡过程中,OLTC重瓦斯保护及本体重瓦斯保护动作,变压器本体油乙炔含量严重超标,根据三比值法计算为102,判断存在内部放电故障。停电手动调挡时发现 OLTC 水平连杆与齿轮盒连接脱落。现场吊芯检查发现分接选择器导线与切换开关筒底齿轮位置存在烧损,如图4所示。分接选择器动静触头之间存在烧损、主触头及主通断触头之间存在烧损,如图4所示。

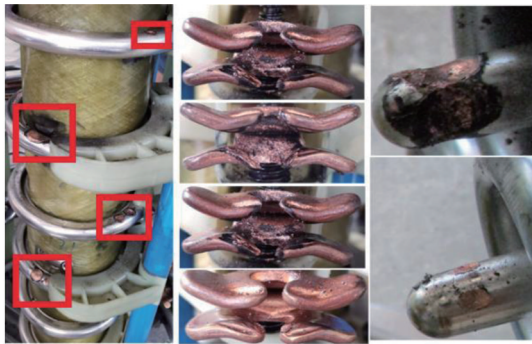


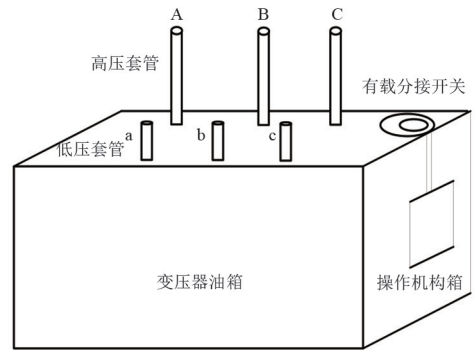
图4 动静触头烧蚀与导电环烧蚀

经分析,切换开关筒底齿轮与分接选择器 V1 导线摩擦造成了短路,进而导致其他4个部位出现烧损。具体是由于切换开关机械故障未完成切换动作,分接选择器导线之间就发生了级间短路、相间短路。

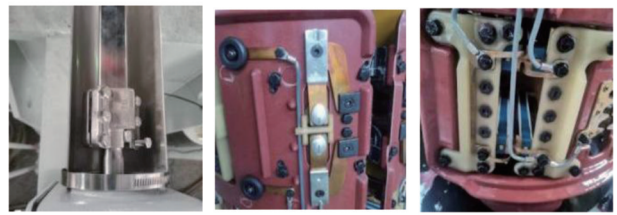
通过上述3个故障案例分析可知,机械缺陷是导致 OLTC 故障的重要原因。由于缺乏在线监测手段,无法及时有效地对这些缺陷进行感知和预警,给现场运维工作带来极大不便。因此,下面将结合 OLTC 典型机械缺陷及状态检测技术开展缺陷模拟试验研究,为 OLTC 机械状态在线监测提供支撑。

3 OLTC 缺陷模拟试验研究

为进一步研究典型缺陷特征与检测诊断技术,以双过渡电阻 M 型 OLTC 为例,开展了 OLTC 典型机械缺陷模拟试验研究。首先,基于110 kV 三相一体式变压器搭建了典型缺陷模拟平台,如图5所示,包括铁芯、绕组及双过渡电阻 M 型 OLTC。该平台可设置典型机械缺陷,如传动轴松动、触头松动、过渡电阻松动等。



(a) 110 kV 变压器试验平台



(b) 传动轴松动

(c) 触头松动

(d) 过渡电阻松动

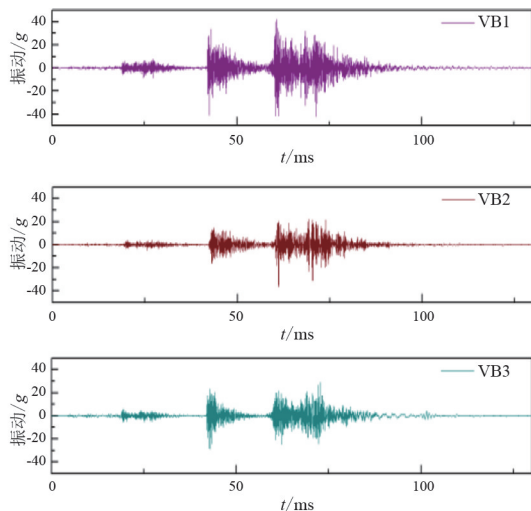
图5 OLTC 故障平台

所建平台采用振动法对 OLTC 正常状态及典型机械缺陷下进行检测和评估。振动法具有非侵入式、灵敏度高等特点,在电力设备机械状态诊断中应用广泛。在 OLTC 操作机构箱内布置电流传感器检测驱动电机电流信号,在变压器油箱壳体上布置加速度传感器检测振动信号,如图6所示。其中3个加速度传感器安装在油箱壁的窄面、宽面与顶部,分别记为 VB1、VB2 和 VB3,可从 X、Y、Z 3 个方向对振动信号进行检测。

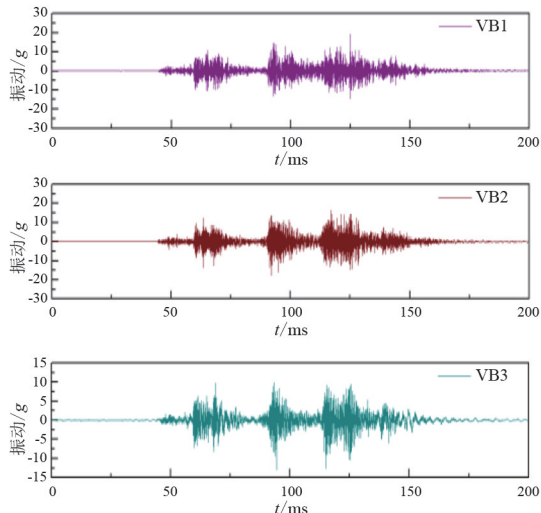


图 6 传感器布置示意

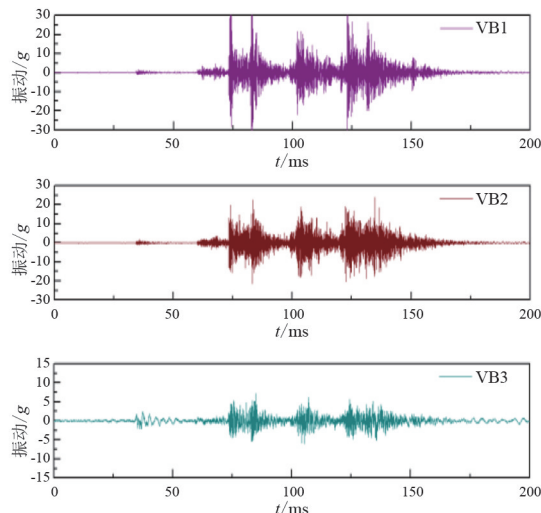
试验时以驱动电机电流为触发信号,同步采集振动信号,采样频率为 100 kHz,数据采集时间为 10 s。正常工况和典型机械缺陷下的振动数据如图 7 所示。可以看出 OLTC 切换过程中存在多个振动脉冲,同种状态下 3 个测点的振动脉冲存在差异性;不同状态下振动信号变化明显,同一条件下 3 个测量点振动信号的变化不大。表 1 对 OLTC 在不同状态下 3 个测点的振动信号进行了对比分析,包含信号分布特征、信号幅值和频率特征等。可以看出不同状态下这几种特征区分度明显,通过分析这些特征量可以有效区分不同机械缺陷,为后续故障分析与诊断提供支撑。



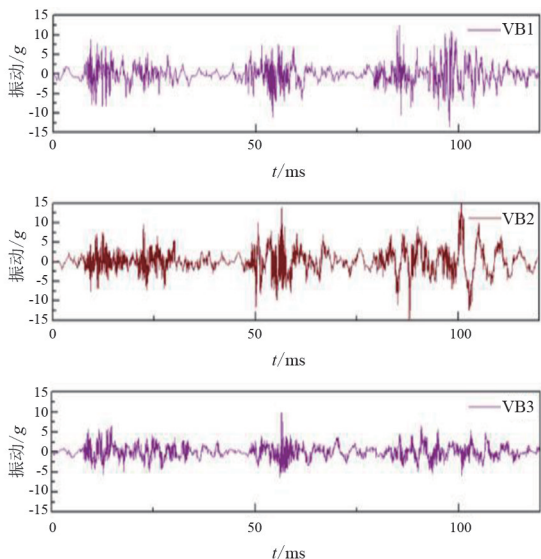
(a) 正常状态



(b) 传动轴松动



(c) 触头松动



(d) 过流电阻松动

图 7 不同状态下振动信号

other standards[J]. Procedia Engineering, 2011, 14 (C): 1799-1806.

- [5] 廖宗高, 傅鹏程. IEC、ASCE、GB 50545 规范风荷载计算对比与分析[J]. 电力勘测设计, 2011(3): 59-63.
- [6] 张盈哲, 廖宗高, 谢强. 输电线路设计规范中风荷载计算方法的比较[J]. 电力建设, 2013, 34(7): 57-62.
- [7] 汪晶毅, 潘春平, 朱映洁. 国内外架空输电线路档中线间距设计的对比研究[J]. 中国电力, 2017, 50(11): 90-95.
- [8] 岳浩, 黄欲成, 李健. 中美设计规范导线风冰荷载比较[J]. 电力科学与工程, 2015, 31(1): 72-78.
- [9] Guidelines for electrical transmission line structural loading (third edition): ASCE 74—2009 [S].

- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范: GB 50545—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 1000 kV 架空输电线路设计规范: GB 50665—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. ±800 kV 直流架空输电线路设计规范: GB 50790—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.

作者简介:

冯 勇(1985), 男, 硕士, 高级工程师, 从事输电线路设计及其管理工作。 (收稿日期: 2023-08-31)

(上接第 90 页)

表 1 不同状态下振动信号特征分析

类别	分布特征	幅值特征	频率特征
正常	三分段。第 1 段信号平缓且幅值最小; 第 2 段信号陡且幅值较大; 第 3 段存在多个信号混叠, 信号频率高且幅值最大	3 个测点中 VB1 较大, VB3 较小	中高频成分多
传动轴松动	三分段。第 1 段信号变陡且幅值增大; 第 2 段信号上升变缓; 第 3 段信号变缓且幅值变小	3 个测点幅值整体变小	中高频成分多
触头松动	三分段。第 1 段信号变陡且幅值增大; 第 2 段信号变缓; 第 3 段信号变缓。第 1 段和第 3 段信号存在尖峰	3 个测点中 VB1 较大, VB3 较小	高频成分增多
过渡电阻松动	三分段。第 2 段和第 3 段幅值明显减小, 信号变缓	3 个测点幅值整体变小	低频成分增多

4 结 论

上面介绍了 OLTC 典型结构, 以双过渡电阻组合式 OLTC 为例分析了工作原理。结合实际生产工作, 介绍了 3 起典型故障案例, 结果表明机械缺陷是导致机构卡涩、切换失败、触头烧蚀的主要原因。结合典型故障缺陷开展了机械缺陷模拟试验研究, 以双过渡电阻 M 型 OLTC 为基础, 搭建了故障模拟试验平台, 设置了传动轴松动、触头松动过渡电阻松动等典型机械缺陷, 并采用振动法对不同状态进行检测, 结果发现不同状态下振动信号分布特征、信号幅值和频率特征等差别明显, 可为后续 OLTC 故障诊断研究工作提供重要支撑。

参考文献

- [1] 张德明. 变压器真空有载分接开关[M]. 北京: 中国电

力出版社, 2015.

- [2] 电力行业电力变压器标准化技术委员会. 变压器油中溶解气体分析和判断导则: DL/T 722—2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [3] 电力行业电力变压器标准化技术委员会. 电力变压器分接开关运行维修导则: DL/T 574—2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- [4] 骆欣瑜, 廖文龙, 刘睿, 等. 一起换流变压器真空有载分接开关乙炔异常分析[J]. 四川电力技术, 2023, 46(3): 90-94.
- [5] 梁毅毅, 吴雄, 吴晓晖, 等. 一起 220 kV 主变压器有载分接开关触头烧损缺陷分析[J]. 四川电力技术, 2023, 46(1): 78-82.
- [6] 谢茜, 刘睿, 张宗喜, 等. 一起变压器 M 型有载分接开关事故的分析[J]. 四川电力技术, 2020, 43(1): 63-66.

作者简介:

董青迅(1986), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电测热工技术监督;

罗 杨(1985), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化;

周 波(1984), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为技术监督;

邱 炜(1985), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为技术监督与一次检修;

胡祥胜(1986), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电测热工技术监督;

蒋闵威(1996), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电测热工技术监督;

吴 雄(1990), 男, 高级工程师, 研究方向为一次检修;

袁明哲(1985), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为二次检修。

(收稿日期: 2023-10-17)