

基于振动信号的有载调压开关故障诊断技术研究

随着现代电网对供电电压要求的不断提升，变压器有载调压开关（On Load Tap Changer, OLTC）的动作次数不断增多，其操作不良和机械故障率也相应增加。国内现OLTC的运行检修主要采用离线定期检修方式，工作量大、效率低，且故障诊断准确度不高。从振动信号采集、信号预处理、故障特征信号提取和故障诊断四个方面，介绍了一种基于声学振动的有载调压开关故障诊断技术。通过具体故障诊断实例对该技术的应用进行了分析，并对该技术的发展提出了展望。

邓文斌 王 伟 黎安静/中国南方电网有限责任公司超高压输电公司贵阳局

0 引言

有载调压开关（On Load Tap Changer, OLTC）是变压器本体中唯一的可动部件，也是关键部件之一。依靠有载调压开关准确及时的动作，不仅可以减少和避免电压的大幅度波动，而且可以强制分配负荷潮流，挖掘设备无功和有功出力，保证电力系统安全可靠运行，增加电网调度的灵活性。目前，国内OLTC的运行检修仍采用离线定期检修方式，检修人员现场工作量大、效率低且故障诊断准确度不高。基于振动信号记录及分析的创新测量法的使用，可以使器械在不拆开OLTC的情况下进行内部机械状态的完整检查，可以大幅提高现场检修人员的工作效率及故障诊断准确度，有效减少变压器的停电时间。

一系列的动作事件，这些事件中，触头的碰撞、摩擦等都伴随有机电振动信号的产生。一般这些振动信号可以使用体外传感的方式进行测试。当OLTC存在一些故障隐患时，由于触头动作而引起OLTC表面的振动信号与正常状态时相比会有所不同，因此测录这些动作过程的振动波形并对其进行分析，与正常信号相比，能有效地反映出OLTC的运行工况。基于振动信号的OLTC故障诊断只需简单几步：首先是对电动机驱动信号及调压开关振动信号的提取；其次是对信号的模式进行识别；最后是对调压开关的工况进行分析，即可完成对OLTC的故障诊断。

OLTC的振动信号中包含了调压开关工作过程中大量的信息，但一般直接对信号进行比较并不能诊断出OLTC的故障，通常需要对信号进行分析，提取信号中的有用特征来区别正常信号和故障信号，根据振动信号指纹特征识别不同的故障类型。具体的OLTC故障振动诊断过程如图1所示。

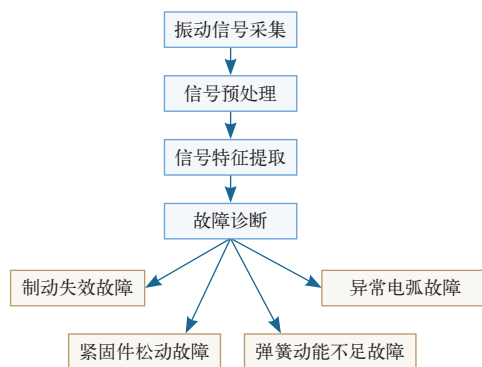


图1 调压开关振动诊断流程



邓文斌/工程师

关键词/Keywords

有载调压开关 ·
故障诊断 ·
振动信号 ·

1 OLTC振动诊断过程

作为变压器本体中唯一可进行机械动作的部件，OLTC的一次操作包含了

2 OLTC振动信号采集

OLTC振动信号采集的技术难点主要在于受变压器现场恶劣工作环境的影响,包括克服电磁干扰、各种信号噪声干扰,从而能给后期的模式识别提供一个干净的信号。对于电磁干扰的影响,主要是利用双层电磁屏蔽的方法来实现。在OLTC上最接近开关动作部件的地方振动信号最强,但实际工程应用中,在开关的动作部件边上不允许安装信号探头,而只能将探头安装在变压器外壳的侧面等易于施工的地方,这时能测到的振动峰值一般也在1g左右,如果要保证46 dB的SNR,这时的电噪声要达到 $100\text{ mV} \div 200 = 0.5\text{ mV}$ (1g的电信号为100 mV)。

而在这种模数混合电路中,要将噪声电平控制在0.5 mV,除了要设计电路以及每一级放大电路要做好匹配外,在信号出来的第一级要滤波,在模-数转换后,还要通过高性能的数字滤波器进一步滤除杂波。另外,要特别注意信号的模地和数地的隔离,只有这样才能得到较为干净的振动信号。

3 振动信号预处理及特征信号提取

振动信号的探头为一个宽频段加速计,用于采集槽上机械装置动作的振动波,如同一个金属探伤器。切勿将这种方法与阶段检测的声(超声波)测量相混淆,超声波测量中使用回声传感器。通过对采集的振动信号进行处理,辅以电动机的电流信号,可以抽取出有效的特征信号,如图2所示,以鉴别OLTC操作程序中的不同步骤。

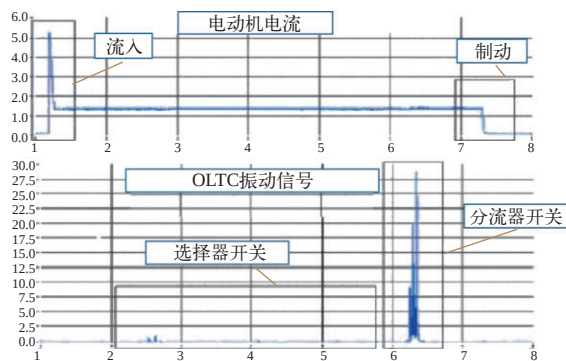
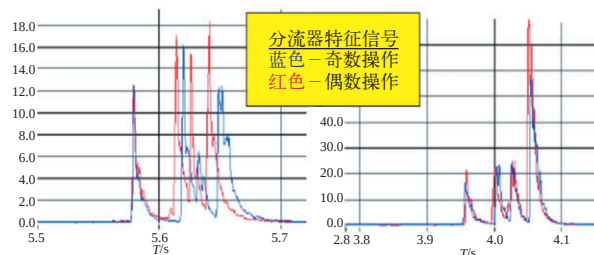


图2 典型振动和电动机电流特征信号

检修人员需对一些OLTC操作进行关键调整,在调整过程中可能会导致偶数或非偶数之间出现不对称操作。为确定合适的调整,通过布置探头取得振动信号,对图表上的偶数和奇数特征信号进行简单叠加,如图3所示。



(a) 不对称特征信号=错误调整 (b) 对称特征信号=正确调整

图3 调整操作后的有载调压开关特征信号

从图3所示特征信号的稳定性和重复性可以看出,该方法适合进行趋势预测。这种方法容许充分利用其诊断潜能,因为每个OLTC都有自己独特的振动特征信号。通过追踪相同装置的特征信号,从理论上可以检测出OLTC大部分内部状况的变化。相反,相似的特征信号则表明工况稳定。

4 电动机机械润滑故障及开关触头磨损故障判断

在一次OLTC切换过程中,由于电动机保护激活,造成开关切换非正常停止。检修人员通过一系列方法进行现场排查,但却未找到问题根源。但在开关附近布置上振动信号探头后,发现在电动机润滑前开关操作过程中,采集的振动信号有明显的陡波出现,而对电动机润滑后,发现开关切换过程中在该时间节点并未出现陡波,具体特征信号对比如图4所示。故判断该次电动机保护动作的原因在于电动机缺少机械润滑,且电动机足够引起电流增加及切断热保护,从而终止开关操作。由于这种故障间歇发生(连续操作和温度的结合),在未采用振动声测量方法的情况下则很难进行诊断。

在将振动信号探头安装到多台变压器上之后,提取了一台运行2年的OLTC与一台运行5年的OLTC特征信号,如图5所示。发现运行2年的OLTC特征信号波形出现了严重偏离,经过现场

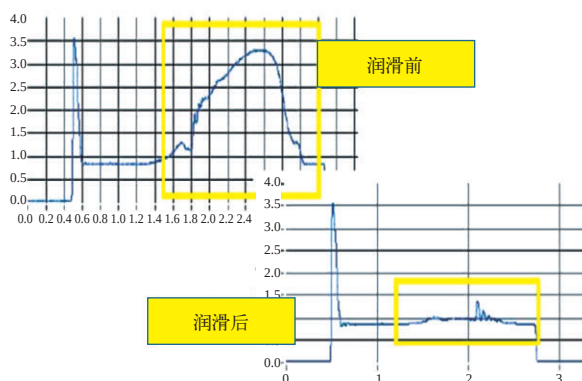


图4 电动机润滑前与润滑后的特征信号对比

吊芯检查，发现该开关触头在经过315 000次操作后，出现了80%以上的磨损，需要更换触头。图5为用于确认分流式OLTC的磨损或良好状态的趋势分析。

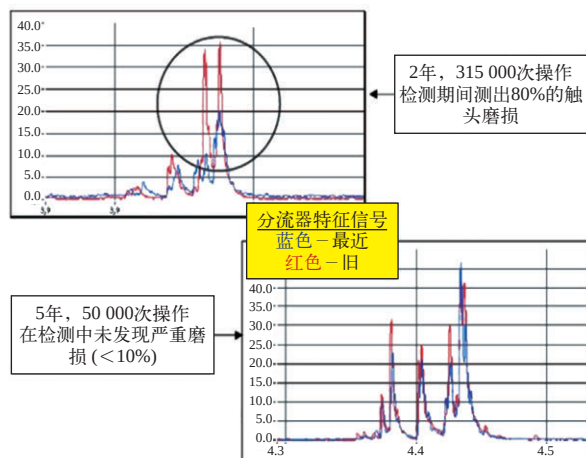


图5 触头磨损开关与正常开关的特征信号对比

5 弹簧松动故障诊断实例分析

5.1 原始信号的提取

在振动信号的采集，分别使用了100 kHz和500 kHz采样频率的系统对某OLTC正常状态下进行了三次重复采样，开关升和降的振动信号有明显的区别，但升和降的信号在不同次测试时都有稳定的振动信号模式。

5.2 信号时域分析

OLTC的一次调压是由选择开关、切换开关等几个动作完成的，各个动作过程中都会产生脉冲激励而表现出相应的振动信号，因此在时域分析

中，各个动作之间的时间间隔是反映OLTC状态的一个重要参考量。将采集到的原始信号通过以下几部分：①原始信号提取的包络；②包络的局部放大分析；③小波分解后进行包络分析得到调压开关的时域特征。图6和表1给出了信号的时域特征分析。

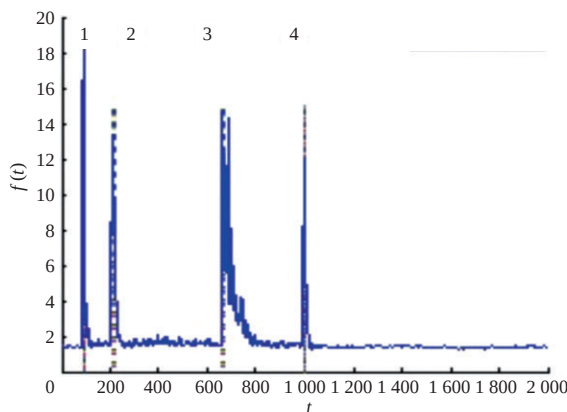


图6 调压开关信号的时域特性分析

表1 开关各个动作对应的信号特征值

动作	升1	升2	升3	升4	升5	升6
1—2	126	123	121	124	127	120
	134	118	117	83	112	118
	137	107	124	123	119	116
2—3	451	449	452	450	454	453
	451	451	449	448	452	453
	448	449	452	448	451	449
3—4	338	336	335	337	332	334
	332	333	336	331	333	335
	335	336	334	334	332	335

从表1可以看出，在时域各个动作所对应的振动信号特征值，具有较好的重复性，可以将表1的特征信号值当作基准值，作为后续故障诊断的参考。

5.3 信号频域分析

与时域特征相对应，振动信号的频域特征也是故障诊断一个重要的参考特征。信号的频域特征一般由频谱图来表示，根据频谱图中的频率成分以及各有关频率成分处的幅值大小，可以对结构进行故障诊断，图7为开关振动的频谱图，可以看出开关振动的频率成分主要在10 kHz之内。

5.4 弹簧松动故障判断

图8给出了在开关的升3过程中，无弹簧松动故障信号和有故障信号的比较图。可以看出在有

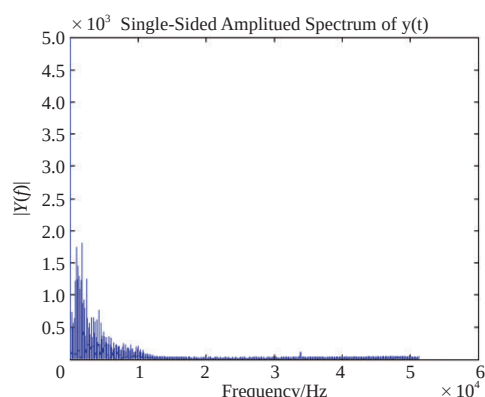


图7 开关振动信号升1的频谱图

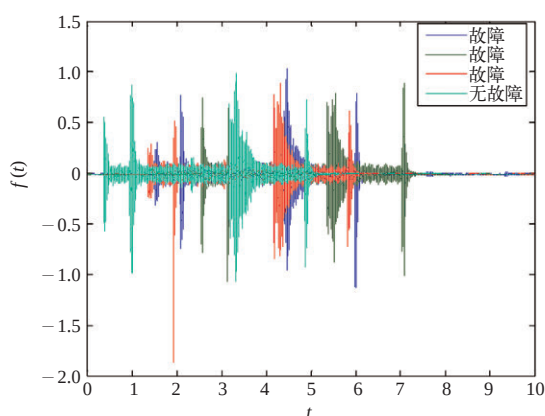


图8 弹簧松动故障和无故障时域信号对比

故障时信号的前两个振动峰值明显比弹簧恢复拉紧后的幅值小。对图8的原始数据经小波分解后进行包络分析，并进行同步处理后，各信号峰值的时间间隔数值如表2所示。

表2 故障开关与正常开关的时域值对比

第一组升		1	2	3	4	5	6
1-2	正常	136	120	120	—	120	121
	故障	133	133	119	114	119	122
2-3	正常	450	448	447	446	449	450
	故障	448	449	445	445	443	448
3-4	正常	334	336	335	337	336	338
	故障	335	336	338	338	338	337

从图8及表2中数值可以看出，有弹簧松动故障时的时间间隔和无故障的时间间隔是不同的。同时，提取发生弹簧松动故障的开关与正常开关的振动特征信号，如图9所示，发现弹簧松动的开关振动特征信号与正常的开关比出现了明显的波动及偏差，尤其在出现尖波的地方，偏差最大。

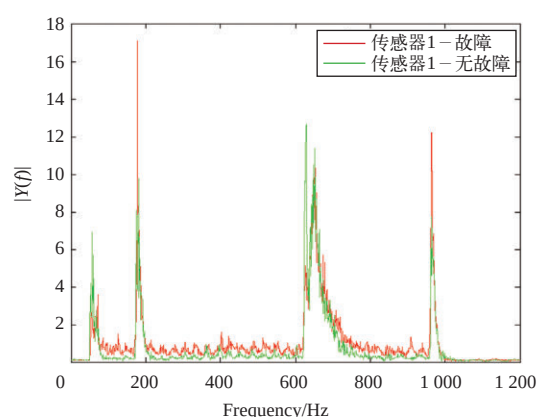


图9 弹簧松动开关与正常开关的振动特征信号对比

由前面的分析可以看到：①在信号的时域分析中，通过提取信号包络并通过小波分解可以较好地保留信号的基本特征，在不同次的测试中，开关不同动作之间的信号间隔也有很好的重复性，其可以作为后续故障诊断的一个参考；②在信号的频域分析中，频率分布也有很好的重复性，可以作为后续诊断的参考。

6 结束语

本文从OLTC振动信号采集、信号预处理、特征信号提取及振动信号的故障诊断几个方面，介绍了基于声学振动的OLTC故障诊断技术。通过对正常开关与故障开关的振动特征信号对比发现：①故障开关的特征信号与正常开关的特征信号波形有了较大偏差；②故障开关的特征信号波形易在某个时段出现大的陡波；③故障开关与正常开关的振动峰值时间间隔不同。这种技术可以在现场检测出多种不同故障，比如触头磨损、异常电弧、零部件松动和变形、三项驱动不平衡及制动失效等，具有广泛的应用前景。但在现场恶劣的工作环境影响下，考虑信号的抗干扰性，如何做好电路设计，放大电路匹配，信号滤波和模-数转换后通过高性能的数字滤波器进行滤杂波，仍然值得进行更深入的研究。

参考文献

- [1] 张惠峰. 基于振动信号EMD-HT时频分析的变压 (下转第61页)

- [3] 谢彦召, 孙蓓云, 周辉, 等. 地面附近的高空核爆电磁脉冲环境 [J]. 强激光与粒子束, 2003, 15 (7): 680-684.
- [4] 刘成龙. 电磁脉冲对天线系统的耦合效应仿真 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [5] 张昕, 王锋. 电磁脉冲与短波天线耦合特性的研究 [J]. 现代电子技术, 2011, 34 (5): 187-189.
- [6] 甄可龙, 吕善伟, 张岩. 强电磁环境对雷达接收机的天线耦合分析 [J]. 河北科技大学学报, 2011 (2): 147-151.
- [7] 王天顺. 机载天线电磁耦合分析 [J]. 飞机设计, 1995 (3): 62-68, 80.
- [8] Jiang Zheng, Yin Wenyan, Liu Qifeng, et al. Transient responses of some antennas under the impact of an intentionally incident high-power electromagnetic pulse [J]. Progress in Electromagnetic Research, 2010, 105: 365-381.
- [9] 颜克文, 阮成礼, 梁源, 等. 通信设备天线端口电磁脉冲防护技术研究 [J]. 舰船电子工程, 2012, 32 (8): 61-63.
- [10] 良志强. 电磁脉冲的防护研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [11] 颜克文. 短波通信设备电磁防护技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [12] 国防科学技术工业委员会. GJB 151B—2013 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2013.
- [13] 王宇, 方东明, 陈博, 等. 基于旋转谐振结构的单芯片二维电场传感器 [J]. 传感器与微系统, 2016, 35 (2): 103-105, 112.
- [14] 马天兵, 赵耀军. 基于DSP的光纤电压传感器的设计 [J]. 传感器与微系统, 2006, 25 (6): 58-60.
- [15] Mats G Backstrom, Karl Gunnar Lovstrand. Susceptibility of electronic systems to high-power microwaves: summary of test experience [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Comptibility, 2004, 46 (3): 396-403.
- [16] He Jinliang, Chen Shuiming, Zeng R, et al. Electrical parameter statistic analysis and parallel coordination of ZnO varistors in low-voltage protection devices [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (1): 131-137.

(收稿日期: 2017-02-14) EA

(上接第55页)

- 器有载调压开关故障诊断 [J]. 高压电器, 2012 (1): 76-81.
- [2] 张伟政. 小波奇异性检测诊断有载调压开关故障 [J]. 高电压技术, 2006 (7): 49-52.
- [3] 高鹏. 调压开关振动信号EMD熵和小波熵的比较 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2012 (4): 48-53.
- [4] 洪祥. 基于EEMD的有载调压开关触头松动故障诊断 [J]. 华电技术, 2012 (1): 12-15.
- [5] 郑婧. 基于独立成分分析和端点检测的变压器有载调压开关振动信号自适应分离 [J]. 电网技术, 2010 (11): 208-213.

(收稿日期: 2016-11-09) EA