

基于振动信号时频域特征的换流变真空有载分接开关机械状态检测

潘志城, 张晋寅, 周海滨, 邓 军, 梁 晨

(中国南方电网有限责任公司超高压输电公司检修试验中心, 广州 510663)

摘要:文中针对换流变用真空有载分接开关的结构特点,开展分接开关切换过程的振动测试,分析振动信号的时频域特征,提出基于振动信号时频域特征的换流变真空有载分接开关状态检测的方法,并验证其工程可行性,实践结果证明该方法可有效检测分接开关驱动机构异常、支撑板断裂和减振器支座开裂等机械缺陷。

关键词:真空有载分接开关; 振动信号; 时频域特征; 机械状态

Mechanical Condition Detection of Vacuum On-load Tap-changer for Converter Transformer Based on Time-frequency Domain Characteristics of Vibration Signal

PAN Zhicheng, ZHANG Jinyin, ZHOU Haibin, DENG Jun, LIANG Chen

(Maintenance & Test Center of EHV Power Transmission Company, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China)

Abstract: In this paper, according to the structural characteristics of vacuum on-load tap-changer for converter transformer, vibration test is carried out during switching process in the field. Vibration characteristics in the time domain and frequency domain are studied. Based on the time-frequency domain characteristics of the vibration signal, a method to detect the condition of vacuum on-load tap-changer(OLTC) for converter transformer is proposed, and its engineering validity is verified. This method is proved to be effectively detect mechanical defects of vacuum on-load tap-changer, such as abnormal motor-drive mechanism, broken support plate and cracked absorber support.

Key words: vacuum on-load tap-changer; vibration signal; time-frequency domain characteristics; mechanical condition

0 引言

有载分接开关是换流变压器的核心部件,具有补偿换流变网侧交流电压的波动变化、调整换流阀触发角处于最佳运行工作范围、实现直流降压运行模式等重要作用^[1-2]。

有载分接开关是换流变压器中唯一的机械运动部件,尤其是真空有载分接开关,只有在其机械性能良好的情况下才能正常发挥作用。根据CIGRE和IEEE组织对变压器可靠性开展的2次世界范围内的调查,50%左右的变压器事故原因是真空有载分接开关这个旋转运动部件,而有载分接开关超

过70%以上的故障原因是机械故障。根据CIGRE发布的变压器运维导则报告中推荐的分接开关诊断方法,机械振动测试技术可以有效检测传动轴和齿轮故障、驱动电机故障、切换时序异常以及机械结构松动、断裂等机械故障^[3]。

某起换流变真空有载分接开关故障图见图1。在分接开关切换过程,因切换开关储能机构机械故障的原因机构传动失效导致真空泡无法工作,最终由于分接开关切换失败导致极间短路。

有载分接开关的切换过程对应相应的机构动作和碰撞过程,切换过程往往伴随着连续的振动信号。国内外研究机构在分接开关振动信号检测、分

收稿日期:2020-01-07; 修回日期:2020-03-09

基金项目:南方电网科技项目(CGYKJXM20190190)。

Project Supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (CGYKJXM20190190).



图1 某起换流变真空有载分接开关故障

Fig. 1 Fault of vacuum OLTC for converter transformer

析以及状态评估方面开展了丰富的工作^[4-7]。利用振动信号包含的丰富信息开展分接开关的状态评估和故障诊断,提取振动信号的指纹特征、分析信号特征与机械缺陷的对应关系以及形成预警机制是研究的重点^[8-14]。

文中针对某 ± 800 kV 特高压直流输电工程换流变用真空有载分接开关,分析分接开关振动机理、构建振动测试系统、开展振动信号测试和分析研究,研究分接开关振动特性与传感器位置、奇偶档位等的对应关系,提取分接开关振动信号的时频域特征,提出基于振动信号时频域特征的换流变真空有载分接开关状态检测的方法,并验证其工程可行性。

1 真空有载分接开关的结构特点

目前,全世界范围仅有2家公司(MR和ABB)可生产成熟的换流变用真空有载分接开关。真空有载分接开关因其真空泡绝佳的绝缘性能、极高的绝缘恢复速度、较长的使用寿命、绝缘油不会碳化等特点,代表着有载分接开关的发展方向。

典型的有载分接开关主要由浸泡在独立油室中的切换开关、变压器油箱内的分接选择器以及电动机构等组成,见图2。某型号真空有载分接开关的切换开关芯子见图3。切换开关主要包括绝缘转轴、储能切换机构、真空泡、主动静触头、过渡电阻器和避雷器组等。电动机构主要包括电动机构、伞齿轮与传动轴等。

真空有载分接开关的切换过程基本采用弹簧储能后释放能量驱动机构旋转的形式,在非常短的时间范围(40~60 ms)完成整个切换过程,切换结束最后时刻储能机构通过减振器缓冲切换过程产生的冲击机械力。由动量守恒原理可知,在这个过程分接开关的减振器将受到很大的冲击机械力,进而受到很大的机械振动加速度,同时力和加速度通过减振器传递到减振器基座、上支撑板、支撑孔等位置。目前,分接开关的机械故障主要为驱动机构的

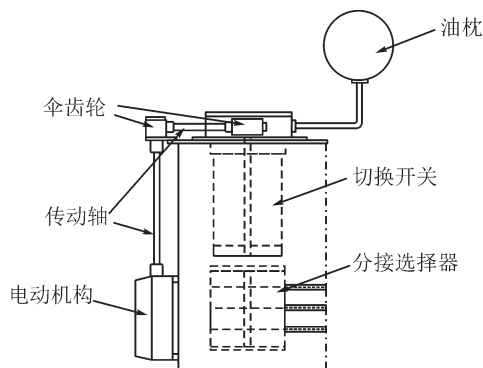


图2 换流变有载分接开关结构图

Fig. 2 Structure of vacuum OLTC for converter transformer

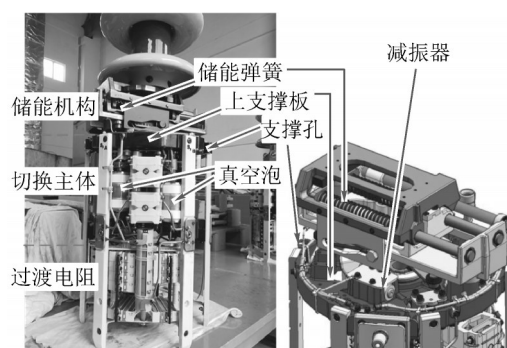


图3 切换开关结构图

Fig. 3 Structure of tap changer

异常机械磨损、异常转矩与运动卡涩、伞齿轮与传动轴松脱以及切换开关的支撑结构断裂、主轴变形和断裂、减振器支座开裂、触头弹簧疲劳、动触头松动和卡涩等。

2 真空有载分接开关的振动检测技术

2.1 真空有载分接开关的振动机理

真空有载分接开关的一次操作包含了一系列的动作事件,这些事件中电动机构驱动、弹簧储能释放、选择器和切换开关触头的碰撞摩擦等伴随着机械振动信号的产生。通过振动信号检测系统,获取真空有载分接开关盖板表面和附近油箱表面的振动信号,提取不同时间阶段振动信号的时频域特征量,检测诊断分接开关的机械状态和预测可能发生的机械故障。

2.2 真空有载分接开关振动信号检测系统

分接开关振动信号检测系统由振动传感器、采集器及信号分析软件构成^[15-19],见图4。

振动传感器选用1A941E型压电式加速度传感器(灵敏度 $10 \text{ mV/m}\cdot\text{s}^{-2}$,量程 $\pm 50 \text{ g}$,频响范围 $1 \text{ Hz}\sim 20 \text{ kHz}$),采集器选用DH5902N数据采集系统(最高采集频率 100 kHz),最多可实现16通道的振动加速度信号检测。

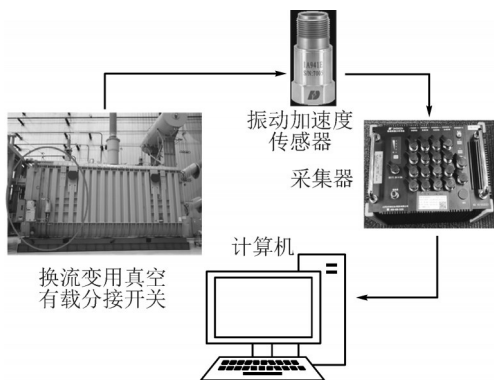


图4 分接开关振动信号检测系统

Fig. 4 Experimental system of OLTC vibration

3 真空有载分接开关的振动特性

3.1 真空有载分接开关的振动测试

开展换流变用真空有载分接开关的振动测试,见图5。

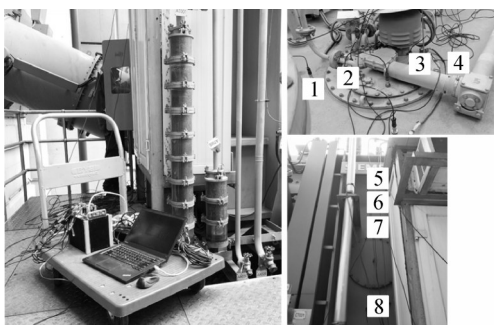


图5 振动传感器布点位置

Fig. 5 The position of vibration sensor

3.2 真空有载分接开关的振动特性

换流变用有载分接开关整个切换过程的振动信号见图6,振动加速度信号的采样频率为50 kHz。

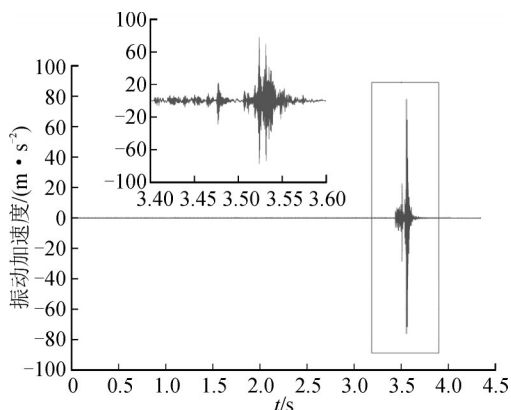


图6 分接开关切换振动波形

Fig. 6 Vibration waveform of OLTC

整个切换过程在4.346 s内完成,在前面3.556 s,电机驱动机构对储能弹簧进行储能的同时,驱动极性选择开关、分接选择开关切换到位,正常的分接开关在该过程基本不产生振动信号;在3.556 s时

刻,切换开关开始动作,振动信号呈现短时的冲击振动后迅速衰减的现象。该型号分接开关整个切换过程电机共转动33圈,在第27圈时开始储能弹簧脱扣驱动切换开关开始动作;图6的振动信号与电机驱动的规律相吻合。

因此,振动信号可分为3个时间阶段,第1时间阶段对应电机驱动机构为储能弹簧储能和驱动极性选择开关、分接选择开关缓慢切换的过程;第2时间阶段对应切换开关短时间快速切换过程;第3时间阶段对应切换开关切换完成后继续到达定位位置的过程。通过对不同时间阶段的振动信号进行分析,可检测驱动机构、切换开关等的机械状态。基于振动信号时频域特征,分析比较正常分接开关和缺陷分接开关在切换过程的振动波形特征,提取不同时间阶段的振动信号的时域特征和频域特征,从而最终实现检测换流变真空有载分接开关机械状态的目的。

3.3 传感器位置对振动特性的影响

振动加速度传感器的布点位置见图5。图5中测点2、3为分接开关顶盖表面,测点1、4为分接开关顶盖附近油箱上表面位置,测点5-8为最靠近分接开关的油箱侧壁位置,即距离分接开关水平距离最小的位置。

分接开关在偶数档切换至奇数档时,振动信号的时域瀑布图见图7。不同测点的振动信号时域特点类似,幅值不同,测点2、3振动信号幅值最大。分接开关振动源到测点2、3的机械传递路径最短,因此振动最强烈。

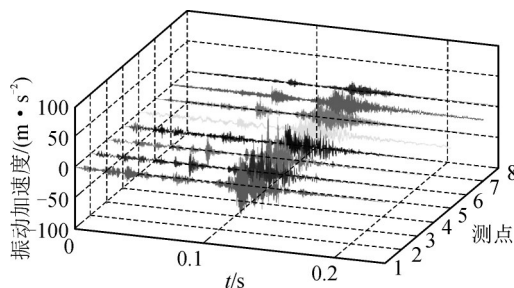


图7 不同测点振动时域瀑布图

Fig. 7 Vibration signals of different position

因此,为更好地分析真空分接开关的振动特性,应尽可能选择振动最激烈的位置进行检测^[20-21]。文中后续内容仅讨论在测点3位置的振动传感器获取的信号。

4 真空有载分接开关的机械状态检测

4.1 驱动机构的机械状态检测

分接开关在切换开关动作前的第一时间阶段可有效反映驱动机构的机械状态。见图8,对比图5

正常分接开关的振动波形, 4个振动波形在第一时间阶段(电机驱动开始至切换开关动作前)均存在反复且幅值相近的冲击振动, 而正常分接开关的振动波形在第一时间阶段无此现象, 这反映出电机轴承、齿轮传动机构、伞齿轮与传动轴等存在机械异常。对图8振动波形对应的有载分接开关驱动机构开展检查, 发现上面2个波形对应传动轴严重松脱和轻微松动的缺陷, 下面2个波形对应齿轮严重受潮锈蚀和电机轴承磨损的缺陷, 见图9。

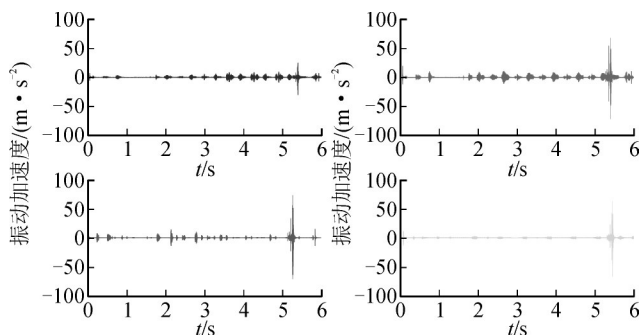


图8 缺陷的驱动机构振动时域波形

Fig. 8 Vibration signals of defective drive device

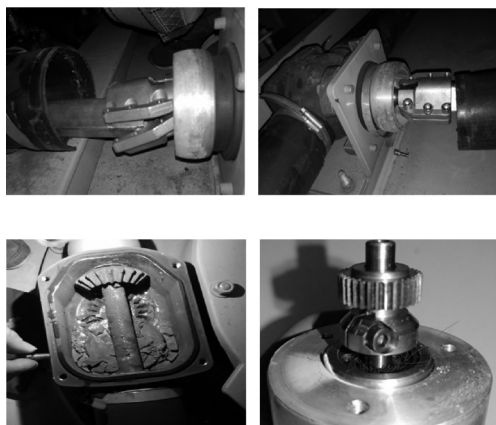


图9 驱动机构的缺陷

Fig. 9 Defects of the drive device

4.2 切换开关的机械状态检测

切换开关的切换过程对应振动剧烈的第2时间阶段, 对第2时间阶段的振动波形开展时频域分析可检测切换开关的机械状态。

4.2.1 振动信号的时域幅值特征

同型号换流变不同相的分接开关正常状态和存在机械缺陷的振动波形(16档至15档), 见图10。图10下图的振动加速度峰值达到 157.45 m/s^2 , 而正常的振动加速度峰值仅为 77.882 m/s^2 (上图), 峰值不平衡率达到67.6%。

振动峰值不平衡率可用于表征2个有载分接开关切换过程中振动加速度信号在振动加速度峰值上的差异程度, 其计算公式为

$$\Delta d_a = \frac{a_1 - a_2}{(a_1 + a_2)/2} \quad (1)$$

式(1)中, a_1 、 a_2 分别为2个有载分接开关切换过程中振动加速度信号的峰值。

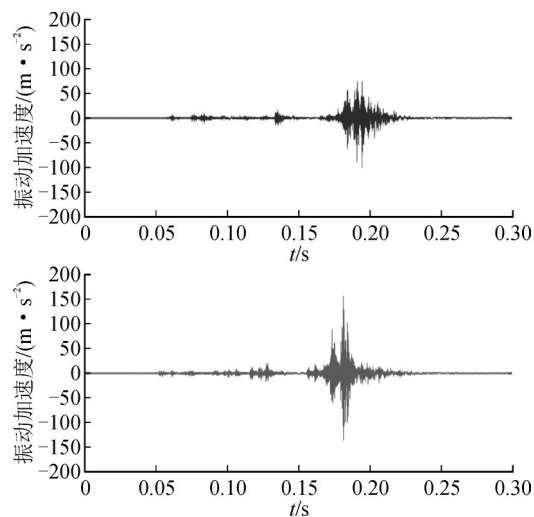


图10 振动信号时域波形

Fig. 10 Vibration signals of time domain

图10下图波形振动衰减的时间(约65 ms)明显比上图(约36 ms)长, 同时结合频域波形分析, 下图对应的分接开关存在明显的机械缺陷。对分接开关吊芯检查发现切换开关芯子支撑孔有多处贯穿性裂纹, 储能机构减振器基座及底板存在严重贯穿性裂纹, 同时上支撑板上表面和下表面存在多处裂纹, S_3 扇区主真空泡固定螺母脱落, 具体见图11。



图11 切换开关减振器附近裂纹等缺陷

Fig. 11 The crack near the shock absorber

开展切换开关芯子机械状态检测时, 可对同型号真空有载分接开关的振动波形进行时域特征分析, 重点关注振动峰值、振荡衰减时间等, 建议横向比较时振动峰值不平衡率不超过30%。

4.2.2 奇偶档切换时的振动信号时域特征

换流变用真空有载分接开关有个典型的特点是在过极性分接位置时切换开关连续切换2次, 包

括偶数档至奇数档、奇数档至偶数档两个切换过程。因此,可以通过检测该过程的振动信号,分析比较奇数档、偶数档切换过程的异同,从而检测切换开关的机械状态,尤其是减振器左右两侧基座及其附近结构的机械状态。同型号换流变同型号分接开关不同相的2组振动信号见图12。图12上图中奇数档至偶数档、偶数档至奇数档的2个切换过程振动信号基本一致,振动峰值不平衡率仅为4.48%;图12下图奇数档至偶数档、偶数档至奇数档的2个切换过程振动信号差异较大,振动峰值不平衡率仅达到69.0%,偶数档至奇数档切换过程振动峰值较大,说明奇数档对应的减振器附近存在机械缺陷。

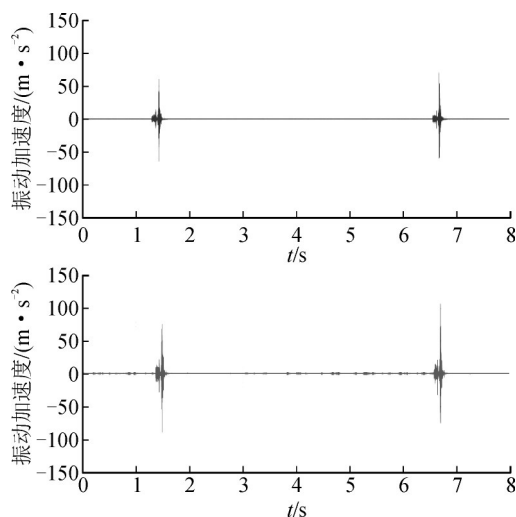


图12 奇偶档切换的振动波形比较

Fig. 12 Comparison of vibration of odd and even tap

分接开关吊芯检查发现,分接开关机械状态良好,未发现机械裂纹等缺陷见图13左图;分接开关减振器右侧(对应奇数档)及其附近储能机构支撑板存在多处裂纹见图13右图。

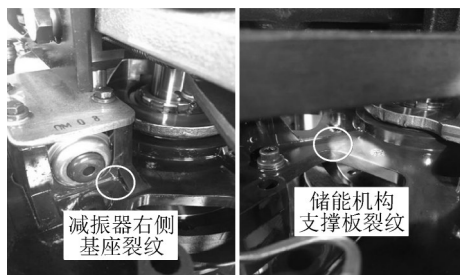


图13 切换开关减振器附近裂纹等缺陷

Fig. 13 The crack near the shock absorber

4.2.3 振动信号的频域分布特征

截取4.2.1章节图10中2个波形中对应切换开关动作过程的时间段(即第二时间阶段)的振动波形开展频域分析,振动信号频谱图见图14,振动信号频域分布在20 kHz以下,振动加速度信号的采样频

率为50 kHz。

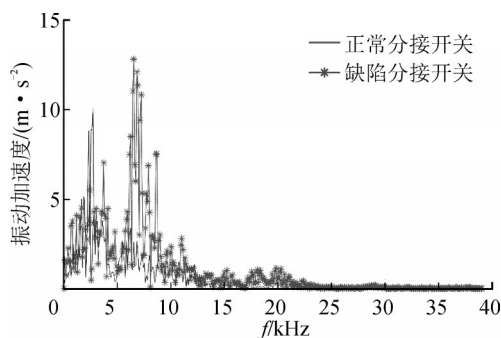


图14 振动波形的频域分析

Fig. 14 Analysis of vibration signal in frequency domain

与正常的分接开关振动加速度信号频谱图相比,缺陷分接开关振动加速度信号频谱图中低频段(0~5 kHz)分量较小,中频段(5~10 kHz)分量较丰富且存在峰值,高频段(10 kHz以上)无明显差别;正常分接开关振动加速度信号能量主要分布在5 kHz以下的低频段,5 kHz以上频率范围能量较少。

5 结论

- 1)振动传感器布点位置对振动特性的影响较大,分接开关顶盖表面振动最强烈;
- 2)振动信号第一时间阶段的时域特征可有效检测真空有载分接开关驱动机构的机械状态;
- 3)应重点关注振动信号的时域峰值、振荡衰减时间,振动峰值的不平衡率建议不超过30%;
- 4)真空有载分接开关的振动信号频率基本分布在20 kHz以内,切换开关存在缺陷时呈现低频分量减小、中频分量增大的特点。

参考文献:

- [1] 朱英浩,沈大中. 换流变压器用有载分接开关[M]. 北京: 中国电力出版社,2016.
ZHU Yinghao, SHEN Dazhong. On-load tap-changer in HVDC for converter transformer[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [2] 张德明. 变压器分接开关状态监测与故障诊断[M]. 北京: 中国电力出版社,2008.
ZHANG Deming. Condition monitoring and fault diagnosis of tap-changer for transformer[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [3] CIGRE Working Group A2. 34. Guide for transformer maintenance[Z]. Canada: CIGRE, 2011.
- [4] DUAN Ruochen, WANG Fenghua. Fault diagnosis of on-load tap-changer in converter transformer based on time-frequency vibration analysis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3815-3823.
- [5] DUAN Ruochen, ZUO Yiwen. Condition monitoring of on-load tap-changers in converter transformers based on vibra-

- tion method[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 11(2): 34-39.
- [6] 张惠峰, 马宏忠, 陈凯, 等. 基于振动信号 EMD-HT 时频分析的变压器有载分接开关故障诊断[J]. 高压电器, 2012, 48(1): 76-81.
- ZHANG Huifeng, MA Hongzhong, CHEN Kai, et al. Fault diagnosis of power transformer on-load tap changer based on EMD-HT analysis of vibration signal[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(1): 76-81.
- [7] 徐晨博, 王丰华, 傅坚, 等. 变压器有载分接开关振动测试系统设计与开发[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 987-993.
- XU Chenbo, WANG Fenghua, FU Jian, et al. Design and development of vibration test system for power transformer on-load tap changer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(5): 987-993.
- [8] 蒋西平, 王谦, 吴高林, 等. 基于声振动分析技术的 OLTC 机械状态特征诊断方法研究[J]. 变压器, 2019, 56(1): 34-40.
- JIANG Xiping, WANG Qian, WU Gaolin, et al. Research on method of mechanical state characteristics diagnosis based on vibration analysis technology for on-load tap changer[J]. Transformer, 2019, 56(1): 34-40.
- [9] 张静, 张丹丹, 程林, 等. 基于振动信号的有载分接开关故障模拟试验研究[J]. 高压电器, 2018, 54(10): 97-105.
- ZHANG Jing, ZHANG Dandan, CHENG Lin, et al. Experimental research on fault simulation of on-load tap changer based on vibration signals[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 97-105.
- [10] 张伟政, 施琳琛. 小波奇异性监测诊断有载分接开关故障[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 49-53.
- ZHANG Weizheng, SHI Linchen. Wavelet singularity detection used for fault diagnosis of on-load tap changers[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(7): 49-53.
- [11] 周翔, 王丰华, 傅坚, 等. 基于混沌理论和 K-means 聚类的有载分接开关机械状态监测[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1541-1548.
- ZHOU Xiang, WANG Fenghua, FU Jian, et al. Mechanical condition monitoring of on-load tap changers based on chaos theory and K-means clustering method[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1541-1548.
- [12] 强文渊, 韦家富, 刘友波, 等. 基于滑动时窗 K-Means 聚类的 CVT 早期故障诊断[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(3): 89-95.
- QIANG Wenyuan, WEI Jiafu, LIU Youbo, et al. Early fault diagnosis for capacitor voltage transformer using sliding K-Means clustering[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(3): 89-95.
- [13] 段若晨, 王丰华. 基于优化 HHT 算法与洛伦兹信息量度的换流变有载分接开关机械特征提取[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 3101-3109.
- DUAN Ruochen, WANG Fenghua. Mechanical features extraction of on-load tap changer in converter transformer based on optimized HHT algorithm and lorentz information measure[J]. Proceeding of the CSEE, 2016, 36(11): 3101-3109.
- [14] 邓敏. 基于振动信号的有载分接开关机械故障诊断研究[J]. 变压器, 2018, 55(10): 26-29.
- DENG Min. Diagnosis of mechanical faults for on-load tap changer based on vibration signal[J]. Transformer, 2018, 55(10): 26-29.
- [15] 钱国超. 电力变压器机械振动测试技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- QIAN Guochao. Mechanical vibration testing technology of power transformer[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [16] 刘志远, 陈海军, 于晓军, 等. 基于振动信号的变压器有载分接开关故障诊断方法研究进展与展望[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 18-25.
- LIU Zhiyuan, CHEN Haijun, YU Xiaojun, et al. Research progress and prospects on fault diagnosis method for transformer on-load tap changer based on vibration signal[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 18-25.
- [17] 樊家昊, 王丰华, 郑一鸣, 等. 基于递归定量分析的有载分接开关机械状态监测[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 197-203.
- FAN Jiahao, WANG Fenghua, ZHENG Yiming, et al. Mechanical condition monitoring of on-load tap changer based on recurrence quantification analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 197-203.
- [18] 武立平, 杨柳, 李刚, 等. 基于振动信号特征矩阵相似度的变压器机械故障诊断技术研究[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 211-217.
- WU Liping, YANG Liu, LI Gang, et al. Improved mechanical fault diagnosis technology of transformer based on similarity of vibration signal characteristic matrix[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 211-217.
- [19] 武立平, 吴强, 丰遥, 等. 基于振动信号 SVM 分类的变压器状态识别[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 232-238.
- WU Liping, WU Qiang, FENG Yao, et al. State recognition of transformer based on SVM classification of vibration signals[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 232-238.
- [20] 李鹏程. 基于振动信号分析法的换流变压器振动特性及其影响因素研究[J]. 高压电器, 2018, 54(4): 142-151.
- LI Pengcheng. Vibration characteristics and influential factors of converter transformer based on vibration signal analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(4): 142-151.
- [21] 徐卫, 钟斌, 杜向京, 等. 在运变压器表面不同测点振动特性分析[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 126-132.
- XU Wei, ZHONG Bin, DU Xiangjing, et al. Vibration characteristics of different measuring points on surface of transformer in operation[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 126-132.

潘志城(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电气设备故障诊断和高压试验技术。

张晋寅(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电气设备故障诊断和高压试验技术。

周海滨(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电气设备故障诊断和高压试验技术。

邓军(1985—), 男, 博士, 教授级高工, 主要研究方向为线圈类设备故障诊断。

梁晨(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电气设备故障诊断和高压试验技术。