

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2025.02.006

不同含量谐波电流作用下变压器振动特性分析

范斌涛¹, 吴书煜^{2,3}, 汲胜昌², 张喆¹, 周明宇⁴

(1. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 西安 710100; 2. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室, 西安 710049; 3. 山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590; 4. 西安石油大学电子工程学院, 西安 710065)

摘要: 流过变压器绕组的谐波电流对振动造成巨大影响, 基于此, 文中着重研究了谐波电流对振动的影响规律。通过理论推导, 从电磁激励方面阐明了变压器绕组振动谐波产生的原因; 搭建变压器谐波加载系统, 对比了不同含量谐波电流作用下绕组振动特性与振动特征参量变化规律; 基于振动在线监测系统, 研究了振动特征参量随时间顺序、电流大小顺序的变化规律以及谐波对振动造成的影响。研究结果表明: 谐波电流造成绕组振动增大、振动谐波含量增加, 不同振动特征参量与谐波电流总畸变率呈现一定的相关性, 应用振动法对变压器绕组进行机械状态监测与故障诊断必须计及电流大小与谐波总畸变率的影响。

关键词: 变压器; 谐波电流; 振动特性; 振动特征参量; 变化规律

Vibration Characteristic Analysis of Transformer Under Harmonic Current with Different Contents

FAN Bintao¹, WU Shuyu^{2,3}, JI Shengchang², ZHANG Zhe¹, ZHOU Mingyu⁴

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Shandong Qingdao 266590, China; 4. School of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: The harmonic current flowing through the winding of transformer has a great influence on the vibration. On this basis, the influence of harmonic current on the vibration is studied emphatically. Through theoretical derivation, the cause of the vibration harmonics of transformer winding are described from the aspect of electromagnetic excitation. The harmonic loading system of the transformer is set up, and the variation of vibration characteristics and the vibration characteristic parameters under the action of harmonic current with different contents are compared. Based on the vibration online vibration monitoring system, the variation of vibration characteristic parameters with time sequence, magnitude and sequence of current as well as the influence of harmonics on vibration are studied. The study results show that the harmonic current causes the winding vibration and the vibration harmonic content to increase, and the different vibration characteristic parameters have a certain correlation with the total distortion rate of the harmonic current. The influence of the magnitude of current and the total distortion rate of the harmonic must be taken into account in the mechanical condition monitoring and fault diagnosis of the winding of transformer by the vibration method.

Key words: transformer; harmonic current; vibration characteristics; vibration characteristic parameters; law of variation

0 引言

随着电网的快速与多元化发展, 分布式新能源装机容量大大增加, 大量换流器、统一潮流控制器等新型电力电子设备接入系统^[1-9], 与电网中原有的

非线性电力设备共同产生大量谐波^[10-11], 对整个电力系统的稳定运行带来威胁。同时, 谐波电流流过变压器, 使得振动呈现出复杂、幅值增大以及谐波含量增加的变化趋势, 对变压器运行造成巨大影响, 需要引起格外的关注与研究^[12-16]。

收稿日期: 2024-09-19; 修回日期: 2024-11-18

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2024QE475)。

Project Supported by Natural Science Foundation of Shandong Province(ZR2024QE475).

国内外研究学者针对变压器振动已经做了大量研究,包括模型建立^[17-18]、振动耦合^[19]、传播规律^[20]、故障诊断^[21-22]等方面。同时,探究了振动在不同温度^[23]、功率因素^[24]、负载不平衡度^[25]、直流偏磁^[26-28]等条件下的变化规律,而谐波对变压器振动的影响也逐渐展开研究^[29-32]。文[29]中研究了3、5、7、9次谐波输入变压器后,发现振动信号峰值增大,频谱范围扩大,高频分量增加,振动能量由低频段向高频段转移;文[30]中研究了高比例谐波激励下在运换流变压器振动变化规律,指出特定位置的振动主频率为200 Hz与400 Hz,同时定义了4种振动阶段,为机械故障诊断提供了有效区间;文[31]中仿真研究了谐波条件下变压器铁心应力与振动特性,结果表明,谐波注入后,铁心应力分布变化明显,数量级大幅增加,最大振动出现在高频2 500 Hz;文[32]中分析了谐波电压与谐波电流对换流变压器振动的影响,阐明了高次谐波电压是产生振动信号高频分量的主要原因。上述研究只是分析了某一谐波作用下变压器振动特性,并未考虑不同谐波对振动的影响。事实上,流过变压器绕组谐波电流的不确定性使得绕组振动在不同电流下表现出不同特征,即使在同一状态下,振动也出现较大差异。因此,谐波对振动的影响,不仅使得振动复杂化,而且对基于振动法进行绕组故障诊断造成巨大影响,误判率大大增加。

为充分研究谐波对振动的影响,文中建立了变压器绕组谐波加载系统与振动测试平台,研究了不同含量谐波电流作用下振动特性;分析了试验变压器与在运变压器振动基频幅值、基频占比、主频率、主频幅值、主频占比的变化规律以及与谐波总畸变率之间的关系,研究结果对指导变压器机械故障诊断具有重要意义。

1 谐波激励下变压器振动机理分析

1.1 绕组振动理论分析

变压器绕组多为饼式结构,整体上是线饼与垫块交替叠加组成的。在轴向上,可将绕组振动模型等效为质量—弹簧—阻尼模型。其中,同一线饼可视为集中的质量单元,垫块等绝缘材料视为弹簧,变压器油等阻尼视为粘壶,由此建立变压器绕组轴向振动模型,见图1。图1中: $m_1, \dots, m_n$ 为不同位置线饼的等效质量; $c_1, \dots, c_{n+1}$ 为等效阻尼; $k_1, \dots, k_{n+1}$ 为不同垫块的等效刚度。根据动力学理论,可获得绕组振动方程

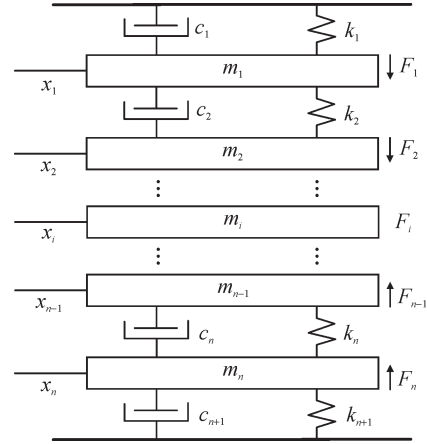


图1 绕组轴向等效振动模型

Fig. 1 Axial equivalent vibration model of winding

$$M\ddot{a} + C\dot{v} + Kx = F \quad (1)$$

式(1)中: M 为绕组质量矩阵; C 为阻尼系数矩阵; K 为刚度系数矩阵; $\ddot{a}$ 、 $\dot{v}$ 、 x 分别为绕组轴向振动的加速度矩阵、速度矩阵和位移矩阵,且 $\ddot{x} = \dot{v} = \ddot{a}$; F 为轴向电磁力矩阵。

式(1)为常系数非齐次线性微分方程,其解与电磁力同频率,也就是变压器绕组振动频率与电磁力频率一致。

1.2 谐波对振动的影响

假设绕组电流为单一频率 $i = I \cos(\omega t + \theta)$, I 为电流幅值, $\omega = 2\pi f$ 为角频率, f 为电流频率, θ 为初始相位,绕组所受电磁力为

$$F = ki^2 = \frac{1}{2}kI^2[1 + \cos(2\omega t + 2\theta)] \quad (2)$$

式(2)中, k 为电磁力系数。

由式(2)可知,单一频率电流作用下,绕组电磁力由一个常数以及一个2倍于电流频率的正弦量组成,其数值大小与电流的平方成正比。因此,当电流频率为50 Hz,电磁力与振动频率都为100 Hz。

随着非线性电力电子的大量应用与高压直流输电系统的大力发展,流过变压器绕组的谐波电流也大大增加。假设绕组电流为双频率 $i = I_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1) + I_2 \cos(\omega_2 t + \theta_2)$,绕组所受电磁力为

$$F = \frac{1}{2}k(I_1^2 + I_2^2) + \frac{1}{2}k[I_1^2 \cos(2\omega_1 t + 2\theta_1) + I_2^2 \cos(2\omega_2 t + 2\theta_2)] + k\{I_1 I_2 \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + (\theta_1 + \theta_2)] + I_1 I_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\theta_1 - \theta_2)]\} \quad (3)$$

由式(3)可知,双频率电流激励下的电磁力除包括二倍频 $2f_1$ 和 $2f_2$ 外,还包含和频 $f_1 + f_2$ 与差频 $f_1 - f_2$,在电磁力的作用下,产生同频率的振动。由此可以推论,当多频率电流流过绕组时,将产生更多频率成分的电磁力,包括二倍频、和频与差频。在如此

丰富频率的电磁力作用下,绕组产生多谐波振动且振动幅值增大。若电磁力频率接近绕组某阶固有频率时,将产生共振现象,由此大大增加了绕组发生共振的概率。因此,在绕组绕制与压紧阶段,应使各阶固有频率远离电磁力频率点。

2 变压器振动实验平台搭建

2.1 振动平台与实验回路

为研究不同谐波电流对振动的影响,搭建了包括可控谐波源、中频变压器、试验变压器等电力设备在内的谐波加载系统与实验平台,以及振动加速度传感器、交流电流钳、采集仪等数据采集系统,振动测试平台与实验回路分别见图2、3,试验变压器主要参数见表1。

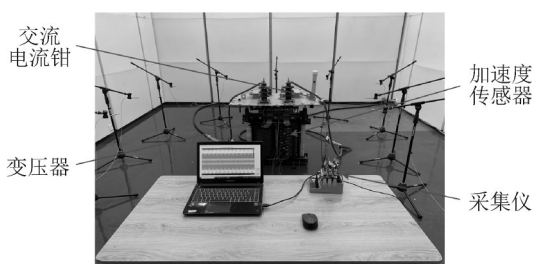


图2 振动测试平台

Fig. 2 Vibration test platform

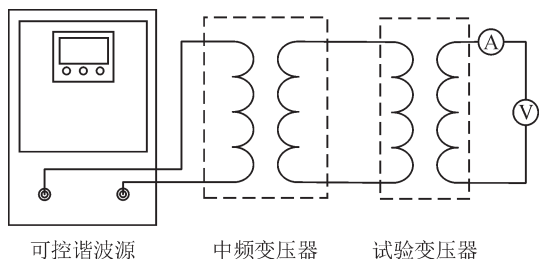


图3 谐波加载系统接线回路

Fig. 3 Wiring circuit of harmonic loading system

表1 变压器参数

Table 1 Transformer parameters

参数	数值
额定容量/kVA	50
额定电压/kV	0.8/0.4
额定电流/A	62.5/125.0

其中,可控谐波源为谐波电流产生装置,最多可输出10个不同频率的谐波电流,通过中频变压器加载到试验变压器上。振动传感器与交流电流钳同步、同采样频率采集变压器加速度信号与电流信号。同时,采取负载试验方式,将低压绕组短路,在高压绕组施加不同谐波电流。

2.2 振动测点布置

根据绕组结构与线饼数量,在绕组表面布置

11个加速度传感器,即每隔4个线饼布置一个加速度传感器,从下往上依次为1号测点、2号测点、…、11号测点,见图4。

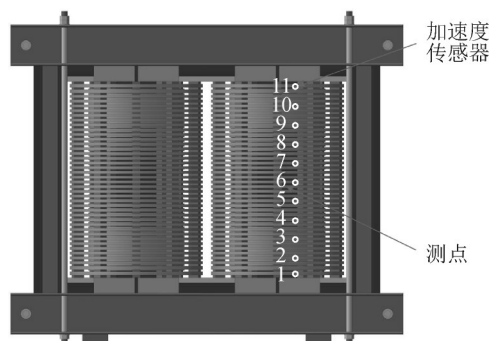


图4 绕组振动测点

Fig. 4 Winding vibration measuring points

3 不同谐波电流作用下变压器振动特性分析

3.1 不同频率电流组合下的振动特性分析

为充分研究谐波电流对振动特性的影响规律,对绕组施加不同频率组合形式的电流,分为4种情况:①单频率50 Hz;②双频率(50+150) Hz;③三频率(50+150+250) Hz;④四频率(50+100+150+250) Hz。并依次命名为工况1、工况2、工况3、工况4。详细施加情况见表2。

表2 不同频率组合的电流

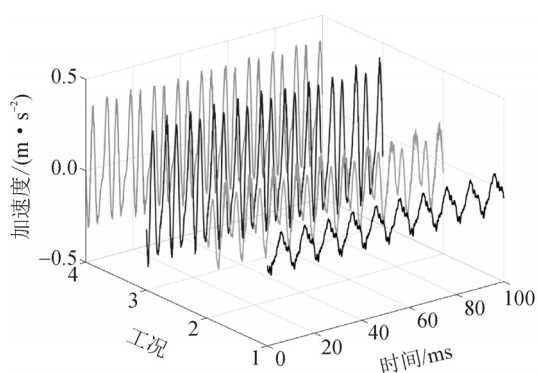
Table 2 Current of different frequency combinations

工况	电流/A			
	50 Hz	100 Hz	150 Hz	250 Hz
1	125.0	0.0	0.0	0.0
2	125.0	0.0	12.5	0.0
3	125.0	0.0	12.5	10.0
4	125.0	10.0	12.5	10.0

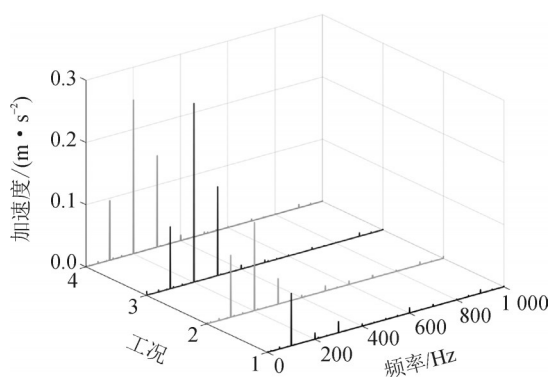
对绕组施加表2中不同频率组合的电流,采集不同测点振动信号,以测点3为例,其波形与频谱见图5。

由图5可知,变压器绕组在不同频率电流作用下,振动具有较大差异。随谐波含量的增加,振动周期减小,振动幅值增大,4种工况下的振动有效值分别为0.062 2、0.127 7、0.237 5、0.215 0 m/s²,工况3的振动是工况1的3.82倍。从频谱上来看,在文中实验谐波加载条件下,变压器绕组振动频率分布在0~1 000 Hz范围,且主要集中在500 Hz以内。随电流谐波含量的增加,振动谐波明显增大,且谐波幅值远超基频幅值。4种工况下的电流谐波总畸变率分别为1.83%、10.05%、12.81%、12.74%,振动总畸变率为27.74%、148.65%、322.59%、300.12%,从中可以看出,较小的谐波电流能够引起巨大的振动,且振

动谐波含量大大增加。



(a) 波形



(b) FFT

图5 不同频率电流作用下的振动

Fig. 5 Vibration under different frequency currents

进一步深入研究谐波对振动的影响,提取4种工况下100、200、300 Hz振动,见图6。图6中,在工况1状态下,因谐波含量较小,100 Hz振动大于200 Hz和300 Hz。但对绕组施加一定的谐波电流后,基频100 Hz振动大小保持相对稳定,谐波振动迅速增大,且逐渐超过基频振动。以工况3为例,100、200、300 Hz振动幅值分别为0.099、0.287、0.146 m/s²,而100、200、300 Hz电磁力幅值比例分别为1、0.296、0.143,也就是仅为100 Hz电磁力的0.296倍的200 Hz电磁力,引起的振动是100 Hz振动的2.899倍,足以说明谐波电流对振动具有较大影响。探究更深层次的原因,由模态试验得到3号测点的频响曲线,见图7。采用最小二乘复频域法(PolyMAX)对频响曲线进行模态参数识别,得到一阶固有频率为243.2 Hz。由此可知,200 Hz电磁力更接近一阶固有频率,因此,此频率下较小的电磁力能够引起较大的振动,当200 Hz电磁力增加时,200 Hz振动迅速增大。从而推测,谐波电流产生的丰富频率电磁力,可使振动增大,同时增加了绕组发生共振的概率。

3.2 不同含量谐波电流下的振动特征参量分析

绕组机械故障诊断研究往往依赖振动特征参

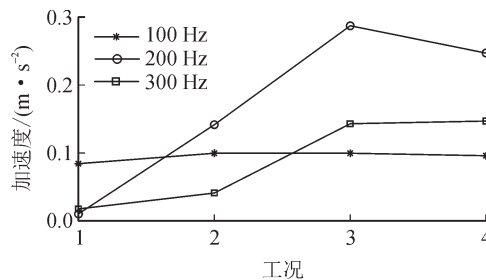


图6 不同频率振动变化规律

Fig. 6 Variation law of vibration at different frequencies

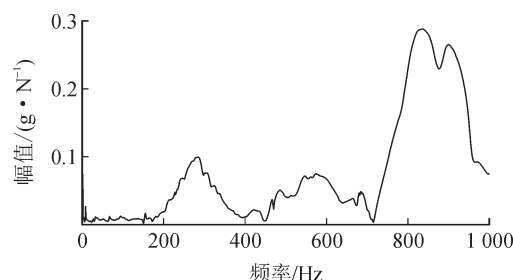


图7 绕组频响曲线

Fig. 7 Winding frequency response curve

量,本节重点研究基频幅值、基频占比、主频率、主频幅值、主频占比以及频谱复杂度等振动特征参量在不同含量谐波下的变化规律。其中,各个振动特征参量表示如下:

- 1)基频幅值为100 Hz振动信号的幅值;
- 2)基频占比为100 Hz振动信号的幅值占有所有50*×**i*(*i*=1,2,3,⋯,*n*) Hz振动信号幅值总和的比值;
- 3)主频率为振动信号幅值最大的频率;
- 4)主频幅值为主频率的幅值;
- 5)主频占比为主频率的幅值占有所有50*×**i*(*i*=1,2,3,⋯,*n*) Hz振动信号幅值总和的比值;
- 6)频谱复杂度计算公式为^[33]

$$C = \left| \sum_{i=1}^n (e_{50 \times i} \log_2 e_{50 \times i}) \right| \quad (4)$$

式(4)中: $e_{50 \times i}$ 为频率能量占比 $e_{50 \times i} = A_{50 \times i}^2 / \sum_{i=1}^n A_{50 \times i}^2$, $A_{50 \times i}$ 为50*×**i* Hz频率幅值;*n*取20。

对绕组施加步长为5%*I_N*,范围为5%*I_N*~150%*I_N*的工频电流,由于谐波源的控制偏差与电网频率的波动,加载在绕组上的电流谐波总畸变率会有一定的变化,见图8。同时,计算不同电流下振动特征参量,见图9。

由图8可知,在整个实验过程中,电流谐波总畸变率呈现出减小、增大、减小的变化趋势,最大谐波总畸变率出现在65%*I_N*,为4.066%。由于电流大小与总畸变率的不同,振动特征参量也发生较大变化,总体具有以下变化规律:

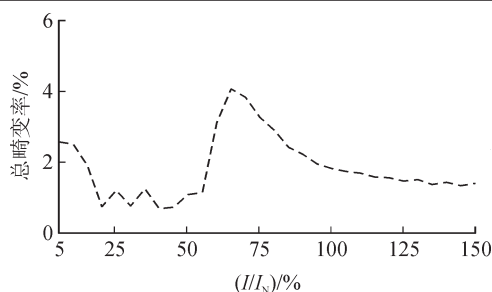
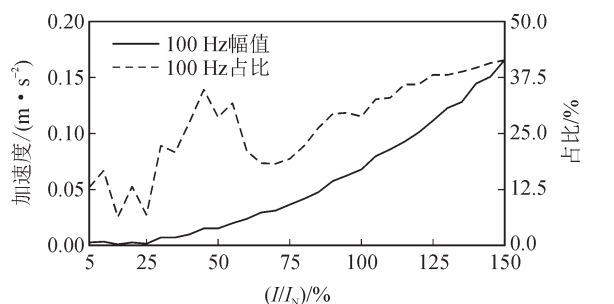
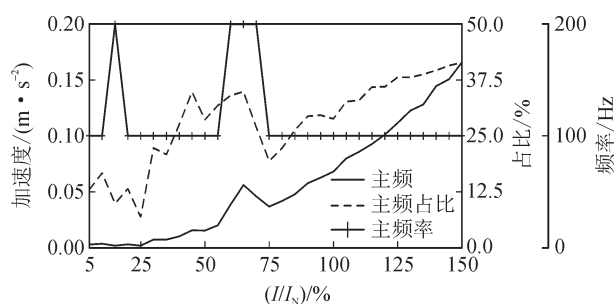


图8 不同电流下谐波总畸变率

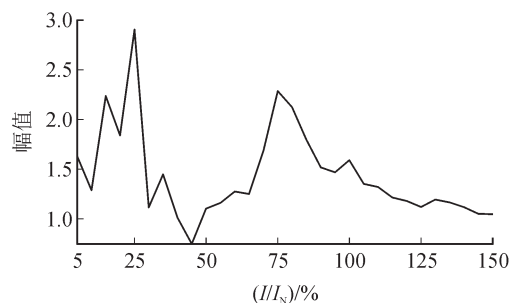
Fig. 8 Total harmonic distortion under different currents



(a) 基频100 Hz特征值



(b) 主频率特征值



(c) 频谱复杂度

图9 不同电流下振动特征参量变化规律

Fig. 9 Variation law of vibration characteristic parameters under different currents

1)基频 100 Hz 振动幅值随电流增大而增大,基频占比与电流总畸变率呈负相关关系,最大值是最小值的6.51倍。

2)主频率在不同含量谐波下发生变化,尤其在较大电流谐波总畸变率点,主频率与基频不一致,由 100 Hz 变为 200 Hz。主频振动幅值随电流增大而增大,在最大电流谐波总畸变率点有突变增大的现象。当主频与基频相同时,主频占比与电流总畸变率呈负相关关系;当主频与基频不同时,主频占

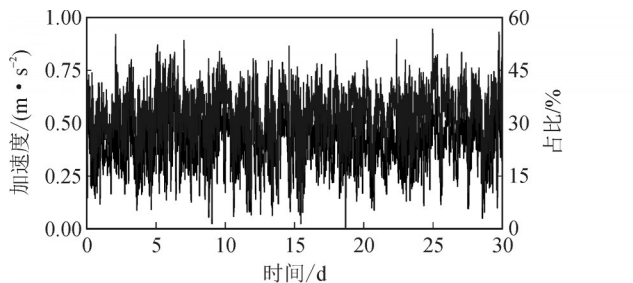
比与电流总畸变率呈正相关关系;最大值是最小值的6.08倍。

3)频谱复杂度与电流谐波总畸变率呈正相关关系。当电流较小时,振动较小,噪声含量较大,造成频谱复杂度较大,此时的频谱复杂度与实际存在一定的偏差,最大值是最小值的3.90倍。因此,在采用频谱复杂度对振动分析与故障诊断时,理应选择振动较大的点。

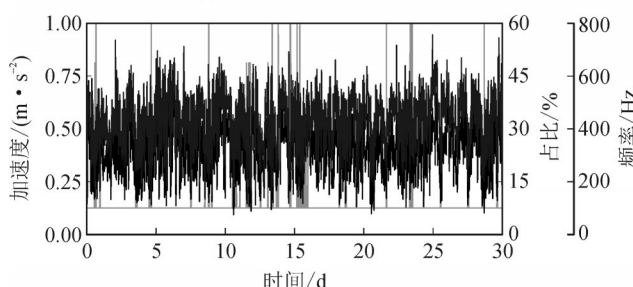
通过上述分析可以看出,振动特征值与电流大小以及谐波总畸变率有密切的关系,当两者变化时,振动特征参量发生巨大变化。为提高绕组振动特性分析与故障诊断的准确性,必须计及谐波电流对振动的影响。

3.3 在运变压器振动特征参量分析

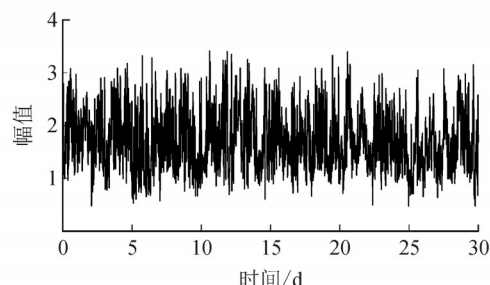
对一台 330 kV 在运变压器进行振动在线监测,振动在线监测系统每隔 5 min 采集一次数据,每次采集 2 s 信号。由此,计算了连续 30 天的每隔半个小时的振动特征参量(一天 48 个数据点),见图 10。



(a) 基频100 Hz特征值



(b) 主频率特征值



(c) 频谱复杂度

图10 振动特征参量随时间顺序变化规律

Fig. 10 Variation law of vibration characteristic parameters with time order

由图 10 可知,在整个 30 天内,变压器振动发生

了巨大变化,各个振动特征参量变化非常明显,其最大值、最小值与倍数关系见表3。从表3中可以看出,各个振动特征值最大、最小值相差较大,尤其是基频特征值,变化更是明显,其幅值与占比最大、最小倍数已接近110与80。出现如此巨大的差异,一方面与电流大小以及谐波总畸变率有关,另一方面振动信号来源油箱表面,同时包含绕组与铁心等多种振动源信号。但根据文[30]中研究结果,铁心在整个振动变化过程中保持相对稳定,因此,油箱表面振动变化主要与绕组变化有关,即与电流大小和谐波总畸变率有关。若不加以计及电流的影响,即使在同一状态下,绕组振动也将发生巨大变化,造成误判。

表3 振动特征参量信息统计

Table 3 Vibration characteristic parameter information statistics

特征参量	最大值	最小值	倍数
基频幅值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	0.850	0.008	109.602
基频占比/%	56.717	0.733	77.358
主频率/Hz	800	100	8
主频幅值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	0.850	0.094	9.084
主频占比/%	56.717	12.295	4.613
频谱复杂度	3.411	0.472	7.223

由于没有同步获取电流信号,本节以振动有效值大小为顺序,探究振动特征参量随电流大小(振动大小即为电流大小, $a \propto I^2$)变化规律。振动有效值见图11,振动特征值见图12。

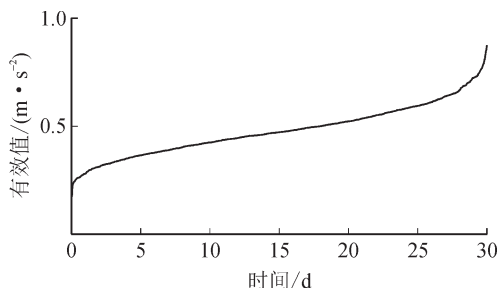


图11 绕组振动有效值

Fig. 11 Winding vibration RMS

图12中,基频幅值、基频占比、主频幅值、主频占比整体上随电流增大而增大,频谱复杂度随电流增大而减小,主频率在电流较小时频繁发生变化,在电流较大时与基频一致,保持在100 Hz不变。由此可以推测,当电流较小时,绕组振动较小,此时以铁心振动为主,绕组基频占比与主频占比相对较小,频谱复杂度较大;当电流较大时,绕组振动变大,因铁心振动稳定,变化的主要是绕组振动,此时基频占比与主频占比相应变大,频谱复杂度变小。

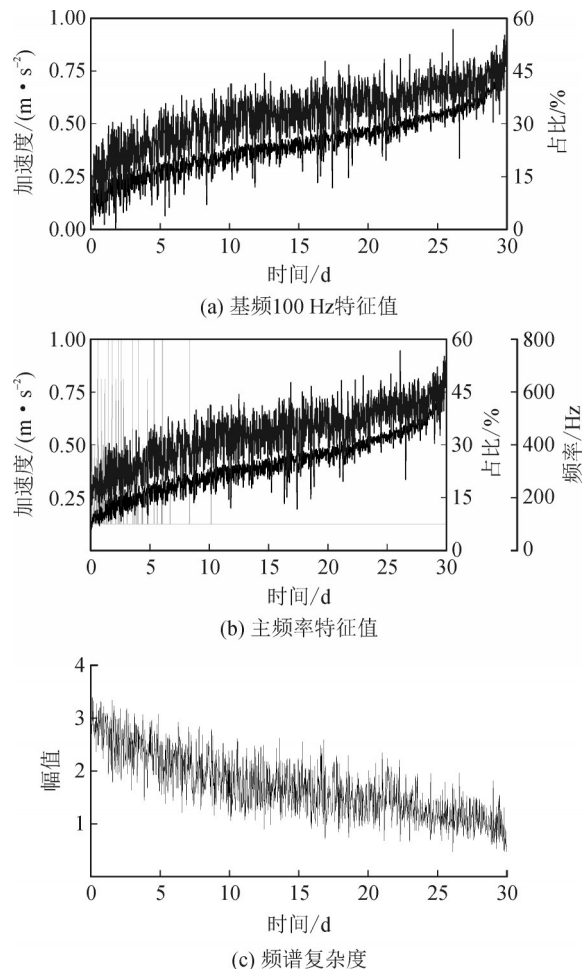


图12 振动特征参量随电流顺序变化规律

Fig. 12 Variation law of vibration characteristic parameters with current order

同时,不同时刻电流下,谐波总畸变率不同,造成相近电流下的振动特征参量依然出现差异。因此,尽量选择同一电流大小与相同谐波总畸变率的运行工况下对在运变压器进行振动在线监测,从而提高诊断的准确率。

4 结论

文中在搭建了谐波电流加载系统的基础上,研究了不同含量谐波电流作用下的振动变化规律,得到以下结论:

1)谐波电流对振动影响巨大,即使较小的谐波电流也会产生较大的振动,造成振动谐波含量大大增加。

2)基频幅值与主频幅值随电流增大而增大,基频占比与电流谐波总畸变率呈负相关关系。当主频与基频相同时,主频占比与电流谐波总畸变率呈负相关关系;当主频与基频不同时,主频占比与电流谐波总畸变率呈正相关关系。频谱复杂度与电

流谐波总畸变率呈正相关关系。

3)在运变压器在整个运行周期内,油箱表面振动变化明显,基频幅值、基频占比、主频幅值、主频占比随电流增大而增大,频谱复杂度随电流增大而减小。相同电流大小、不同含量谐波电流使得振动特征参量出现较大差异。

4)基于振动法对变压器绕组进行在线监测与故障诊断必须计及谐波电流的影响,尽量选择电流大小相同、谐波含量一致的点,从而提高诊断准确性。

参考文献:

- [1] 贺 隼,郭罗权,谭庄熙,等.高比例新能源电网中储能调频死区优化设定控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024,52(18):65-75.
HE Li, GUO Luoquan, TAN Zhuangxi, et al. Improved dead zone setting of a frequency regulation strategy for energy storage with high penetration of RESs[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 65-75.
- [2] 李永琪,陈代忠,王顺亮,等.基于简化开关函数的电网换相换流器直流侧简化阻抗建模方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(5):73-79.
LI Yongqi, CHEN Daizhong, WANG Shunliang, et al. Modeling method for DC side simplified impedance of line commutated converter based on simplified switching function[J]. Smart Power, 2023, 51(5): 73-79.
- [3] 周 蔚,栗时平,苏 杰,等.基于NLESO的交直流微电网双向AC/DC换流器改进滑模稳压控制[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(3): 150-157.
ZHOU Wei, SU Shiping, SU Jie, et al. Improved sliding mode voltage stability control of bidirectional AC/DC converter in AC/DC microgrid based on NLESO[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(3): 150-157.
- [4] 徐 华,周路遥,宋金根,等.不同安装方式下分布式潮流控制器的过电压水平分析[J]. 浙江电力, 2023, 42(1):79-88.
XU Hua, ZHOU Luyao, SONG Jingen, et al. Overvoltage level analysis of a distributed power flow controller under different installation schemes[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(1): 79-88.
- [5] 石磊磊,贾清泉,林丽娟,等. 电力电子化配电网谐波分布式全局优化治理策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9):2914-2923.
SHI Leilei, JIA Qingquan, LIN Lijuan, et al. Distributed global optimal harmonic mitigation strategy for power electronics high penetrated distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2914-2923.
- [6] 汪进锋,唐爱红,郭国伟,等.分布式潮流控制器的阻尼控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 163-171.
WANG Jinfeng, TANG Aihong, GUO Guowei, et al. Damping control with a distributed power flow controller[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10): 163-171.
- [7] 翁 华,朱维骏,张 旭,等.含换流器型电源电力系统的短路计算方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(1): 16-23.
WENG Hua, ZHU Weijun, ZHANG Xu, et al. Short-circuit current calculation method for power system with converter-interfaced generator[J]. Smart Power, 2023, 51(1): 16-23.
- [8] 阳同光,沈 兵.模块化多电平换流器IGBT模块失效机理和状态监测研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 174-187.
YANG Tongguang, SHEN Bing. Review of failure mechanism and state monitoring technology for modular multilevel converter IGBT modules[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 174-187.
- [9] 宋金根,周路遥,李时泰,等.雷击情况下分布式潮流控制器的暂态特性分析[J]. 浙江电力, 2023, 42(11):63-71.
SONG Jingen, ZHOU Luyao, LI Shitai, et al. Transient characteristics analysis of DPFC under lightning strikes[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(11): 63-71.
- [10] ARGHANDEH R, ONEN A, JUNG J, et al. Harmonic interactions of multiple distributed energy resources in power distribution networks[J]. Electric Power Systems Research, 2013(105): 124-133.
- [11] WANG Xiongfei, BLAABJERG F. Harmonic stability in power electronic-based power systems: Concept, modeling, and analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3):2858-2870.
- [12] 谢丽蓉,严 磊,吐松江·卡日,等.基于特征判定系数的电力变压器振动信号故障诊断[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3):217-225.
XIE Lirong, YAN Lü, TUSONGJIANG Kari, et al. Power transformer vibration signal fault diagnosis based on feature determination coefficient[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 217-225.
- [13] 李琪茜,张振东,刘 浩,等.影响油浸式电力变压器振动因素的研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(9):96-101.
LI Qihuan, ZHANG Zhendong, LIU Hao, et al. Study on factors affecting vibration of oil immersed power transformers [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(9): 96-101.
- [14] 刘道生,李泽帅,李 鹏,等.变压器振动特性分析及其降噪技术研究综述[J]. 变压器, 2023, 60(7): 18-27.
LIU Daosheng, LI Zeshuai, LI Peng, et al. Review of characteristics analysis on vibration and technology research on reducing noise of transformers[J]. Transformer, 2023, 60(7): 18-27.
- [15] 韩 学,宋文乐,刘 杨,等.不同铁磁材料变压器铁芯磁致伸缩及振动噪声特性分析[J]. 大电机技术, 2023(1): 68-73.

- HAN Xue, SONG Wenle, LIU Yang, et al. Analysis of magnetostrictive vibration and noise performance in transformers with different iron core materials[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2023(1): 68-73.
- [16] 张 煦, 曹 辰, 路敦林, 等. 基于电—磁—结构多信息耦合的变压器振动特性仿真与试验[J]. 变压器, 2023, 60(7): 51-58.
- ZHANG Xu, CAO Chen, LU Dunlin, et al. Simulation and testing of transformer vibration characteristics coupling of multiple information based on electromagnetic structure[J]. Transformer, 2023, 60(7): 51-58.
- [17] ZHANG Fan, JI Shengchang, MA Hui, et al. Operational modal analysis of transformer windings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 35(3): 1285-1298.
- [18] 师愉航, 汲胜昌, 张 凡, 等. 变压器绕组多倍频振动机理及特性[J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2536-2544.
- SHI Yuhang, JI Shengchang, ZHANG Fan, et al. Multi-frequency vibration mechanism and characteristics of transformer windings[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2536-2544.
- [19] 高树国, 党永亮, 苏 磊, 等. 基于光纤测振系统的变压器绕组与铁心耦合振动特性研究[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 152-158.
- GAO Shuguo, DANG Yongliang, SU Lei, et al. Research of coupling vibration between power transformer windings and core through fiber optic vibration measurement system[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 152-158.
- [20] 魏 旭, 吴书煜, 姜 宁, 等. 高压电抗器振动特性及实验分析[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 66-73.
- WEI Xu, WU Shuyu, JIANG Ning, et al. Theoretical and experimental analyses on high-voltage reactor vibration characteristics[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 66-73.
- [21] SHI Yuhang, JI Shengchang, ZHANG Fan, et al. Application of operating deflection shapes to the vibration-based mechanical condition monitoring of power transformer windings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 2164-2173.
- [22] HONG Kaixing, JIN Ming, HUANG Hai. Transformer winding fault diagnosis using vibration image and deep learning[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 676-685.
- [23] CAO Zhan, SHENGCHANG Ji, FAN Zhang, et al. Study on the influence of oil temperature on power transformer vibration[C]//2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). [S.l.]: IEEE, 2016: 56-59.
- [24] 朱叶叶, 汲胜昌, 张 凡, 等. 电力变压器振动产生机理及影响因素研究[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(6): 115-125.
- ZHU Yeye, JI Shengchang, ZHANG Fan, et al. Vibration mechanism and influence factors in power transformers[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(6): 115-125.
- [25] 潘 超, 陈 祥, 蔡国伟, 等. 基于电磁—机械耦合原理的变压器三相不平衡运行绕组振动模—态特征[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4695-4707.
- PAN Chao, CHEN Xiang, CAI Guowei, et al. Mode-state characteristics of three-phase unbalanced operation winding vibration of transformer based on electromagnetic mechanical coupling principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4695-4707.
- [26] 吴 静, 吴世宝, 邓 维, 等. 直流偏磁下变压器的振动噪音分析[J]. 高压电器, 2021, 57(10): 146-157.
- WU Jing, WU Shibao, DENG Wei, et al. Vibration and noise analysis of transformer under DC bias[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(10): 146-157.
- [27] 李唐兵, 童 涛, 席 儒, 等. 直流偏磁下的电力变压器振动特性研究[J]. 变压器, 2023, 60(3): 52-58.
- LI Tangbing, TONG Tao, XI Ru, et al. Research on vibration characteristics of transformer under DC bias[J]. Transformer, 2023, 60(3): 52-58.
- [28] 李 冰, 王泽忠, 刘海波, 等. 直流偏磁下 500 kV 单相变压器振动噪声的试验研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(13): 2801-2811.
- LI Bing, WANG Zezhong, LIU Haibo, et al. Experiment on vibro-acoustic characteristic of 500 kV single-phase transformer under DC-bias[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(13): 2801-2811.
- [29] 赵莉华, 丰 遥, 谢荣斌, 等. 谐波对变压器振动特性的影响[J]. 水电能源科学, 2017, 35(11): 198-202.
- ZHAO Lihua, FENG Yao, XIE Rongbin, et al. Influence of harmonics on vibration properties of transformer[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(11): 198-202.
- [30] 吴书煜, 汲胜昌, 孙建涛, 等. 在运换流变压器振动监测及其变化规律[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1561-1570.
- WU Shuyu, JI Shengchang, SUN Jiantao, et al. Vibration monitoring and variation law of converter transformer in operation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1561-1570.
- [31] 黄之明, 王 乔, 张逸凡, 等. 谐波条件下 500 kV 联接变压器铁心应力及振动特性仿真分析[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 86-92.
- HUANG Zhiming, WANG Qiao, ZHANG Yifan, et al. Simulation analysis on stress and vibration characteristics of 500 kV connected transformer core in harmonic condition[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 86-92.
- [32] PAN Zhicheng, JINZHUANG Lü, JUN Deng, et al. Research on vibration characteristics of converter transformer under the influence of harmonic voltage and harmonic current[C]//2021 International Conference on Power System

- [30] GULSKI E, KREUGER F H. Computer-aided recognition of discharge sources[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992, 27(1): 82-92.
- [31] 陆正嘉, 杨在乐, 杜长宇, 等. 基于信息融合技术的变电设备运行故障协同诊断方法研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2020(10): 207-210.
LU Zhengjia, YANG Zaile, DU Changyu, et al. Research on cooperative diagnosis method of substation equipment operation fault based on information fusion technology[J]. Automation & Instrumentation, 2020(10): 207-210.
- [32] 苗红霞, 萧旋旋, 江冰, 等. 基于信息融合的预装式变电站健康状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 85-91.
MIAO Hongxia, XIAO Xuanxuan, JIANG Bing, et al. State evaluation of prefabricated substation based on information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 85-91.
- [33] 陈伟根, 刘娟, 曹敏. 基于信息融合的变压器内部故障诊断方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3797-3803.
CHEN Weigen, LIU Juan, CAO Min. Diagnosis method of internal fault for transformers based on information fusion
- [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3797-3803.
- [34] 李婷, 肖京, 刘赞, 等. 基于信息融合和神经网络的变压器内部故障快速诊断方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(11): 194-200.
LI Ting, XIAO Jing, LIU Yun, et al. Fast diagnosis method of transformer internal fault based on information fusion and neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(11): 194-200.
- [35] 陈飞建, 吕元双, 樊国盛, 等. 基于信息融合的智能变电站继电保护设备自动测试系统[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 158-163.
CHEN Feijian, LYU Yuanshuang, FAN Guosheng, et al. Automatic test system of relay protection device for smart substation based on information fusion technology[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 158-163.
- 杨旭(1990—), 男, 博士, 高工, 研究方向为输变电设备状态监测与故障诊断(通信作者)(E-mail: 844072450@qq.com)。

(上接第53页)

- Technology (POWERCON).[S.l.]: IEEE, 2021: 2307-2311.
- [33] 吴书煜, 汲胜昌, 祝令瑜, 等. 基于多重信息分解与时变权重组合的换流变压器振动状态参量综合预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7792-7804.
WU Shuyu, JI Shengchang, ZHU Lingyu, et al. Comprehensive prediction method of converter transformer vibration state parameters based on multiple information decomposition and time - varying weight combination[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7792-7804.
- 范斌涛(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统试验研究、配网技术研究(通信作者)(E-mail: 372138199@qq.com)。