

直流偏磁对500 kV变压器振动特性的影响分析

何良¹, 吴天宝², 李荣¹, 丁登伟¹, 杨洁³, 李盛涛⁴

(1. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610213; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072;
3. 成都航空职业技术学院, 四川 成都 610100; 4. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:特高压直流工程单极-大地回路运行时, 直流电流侵入大型变压器绕组, 致使变压器振动加剧。为了深入了解直流偏磁对大型变压器振动特性的影响, 分析了变压器的振动机理及直流偏磁的影响机制。在白鹤滩—江苏±800 kV特高压直流输电工程调试期间, 对500 kV三相变压器的中性点电流、振动信号进行了实测, 量化了直流偏磁程度, 分析了不同直流偏磁程度下变压器振动信号时域及频谱特征。提取了波形畸变比、奇偶次谐波能量比、累计能量占比、功率谱熵等特征量来分析直流偏磁对大型变压器振动特性的影响。结果表明: 直流偏磁导致波形畸变, 1个工频周期内2个半周期对应的振动波形不再对称分布; 随着直流偏磁程度增加, 振动信号主频分量改变, 50 Hz倍频谐波分量增多, 其中50 Hz奇次谐波增幅要大于偶次谐波, 且影响主要集中在600 Hz以内; 由于铁心饱和作用, 直流偏磁增大到一定程度时, 磁不平衡性降低, 振动信号复杂度不再增加。

关键词:特高压直流输电; 直流偏磁; 电力变压器; 振动特性

中图分类号: TM41

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202306003

0 引言

特高压直流输电工程作为能源传输的骨干网络, 在构建新型电力系统、服务“双碳”目标中发挥着重要作用。“十四五”期间, 国家电网公司将继续加快特高压直流工程建设, 完善特高压骨干网架。随着直流工程不断发展, 直流偏磁问题愈发突出。当特高压直流工程单极-大地回路运行时, 数kA的直流电流通过接地极流入大地, 致使部分直流电流侵入大型电力变压器绕组, 最高电流幅值达200 A, 产生直流偏磁现象, 引发变压器损耗增加、振动噪声加剧、局部过热等不良后果, 严重影响变压器的安全稳定运行^[1]。振动监测法具有灵敏度高、与系统无直接电气连接、易于实现带电检测等诸多优点, 近年来在变压器机械状态检测及诊断中逐渐引起国内外学者的关注^[2]。变压器运行时的振动主要来源于铁心和绕组, 在直流偏磁作用下, 变压器励磁电流畸变, 铁心磁致伸缩特性发生改变, 漏磁增加, 导致铁心和绕组振动异常, 故开展直流偏磁下变压器振动特性的研究有助于变压器状态评估^[3-4]。

目前, 国内外学者对变压器直流偏磁振动开展了若干研究。文献[5-6]研究了直流偏磁对硅钢片磁致伸缩特性的影响, 指出直流偏磁使磁致伸缩回环失去原有的对称性, 偏磁磁场使磁致伸缩峰值增大, 形变加剧, 但研究仅限于硅钢片层面。文献[7-10]分析了直流偏磁对变压器的振动特性的影响, 并开展了相关试验研究, 但研究仅限于低电压、

小容量变压器。然而, 有关高电压、大容量变压器直流偏磁的振动研究还相对较少, 仅文献[11-12]分析了500 kV单相变压器的振动特性, 通过频谱分析得到一些重要结论。综上所述, 直流偏磁对大型变压器振动特性影响的研究还存在诸多不足, 尤其是电网中具有相当比例的大型三相变压器。

本文依托白鹤滩—江苏±800 kV特高压直流输电工程(简称白鹤滩—江苏工程), 开展直流偏磁对大型变压器振动特性影响的研究, 详细分析了变压器的振动机理及直流偏磁对变压器振动的影响机制; 在白鹤滩—江苏工程调试期间, 对500 kV三相变压器的中性点电流、振动信号进行了测量; 量化了直流偏磁程度, 分析了不同直流偏磁程度下变压器振动信号时域及频谱特征, 提取了典型特征量分析直流偏磁程度对变压器振动特性的影响, 为大型变压器直流偏磁下的振动机制及特性研究提供参考。

1 变压器的振动机制

1.1 铁心的振动机制

铁心振动主要由硅钢片的磁致伸缩以及硅钢片间的电磁力引起, 且磁致伸缩是主要原因^[13]。变压器正常运行时, 假定铁心磁通量 φ 为:

$$\varphi = \varphi_a \cos(\omega t) \quad (1)$$

式中: φ_a 为交流磁通幅值; ω 为电源角频率。

铁心中磁感应强度 B 为:

$$B = \frac{\varphi}{S} = \frac{\varphi_a \cos(\omega t)}{S} \quad (2)$$

式中: S 为铁心横截面积。

在一定范围内, 铁心磁致伸缩位移量 λ 近似正

比于 φ^2 ,满足如下关系:

$$\lambda = L \frac{\varepsilon_s B^2}{B_s^2} \quad (3)$$

式中: L 为硅钢片轴向尺寸; ε_s 为硅钢片饱和磁致伸缩率; B_s 为硅钢片饱和磁感应强度。

综上可得,由磁致伸缩引起的铁心振动加速度 a_c 为:

$$a_c = \frac{d^2 \lambda}{dt^2} = -\frac{2\omega^2 L \varepsilon_s \varphi_a^2 \cos(2\omega t)}{B_s^2} \quad (4)$$

可以看出,铁心振动基频为2倍电源频率。由于铁心材料具有非线性特性,铁心振动信号中除基频100 Hz分量外,还含有谐波分量,如200、300 Hz等100 Hz的倍频分量。

1.2 绕组的振动机制

当变压器绕组中流过负载电流时,在交变的漏磁场作用下产生周期性的振动^[14]。变压器正常运行时,假定负载电流 I 为:

$$I = I_m \sin(\omega t + \phi_0) \quad (5)$$

式中: I_m 为负载电流幅值; ϕ_0 为电流初始相角。

漏磁场中磁感应强度 B_w 正比于负载电流,满足如下关系:

$$B_w = K_b I_m \sin(\omega t + \phi_0) \quad (6)$$

式中: K_b 为比例系数。

作用在绕组线圈上的电磁力 F 为:

$$F = K_b I_m^2 \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2\omega t + 2\phi_0) \right] \quad (7)$$

绕组振动是电磁力激励下的强迫振动,满足如下方程:

$$M \frac{d^2 z}{dt^2} + C \frac{dz}{dt} + Kz = F + Mg \quad (8)$$

式中: M 为绕组模型质量矩阵; C 为模型阻尼系数矩阵; K 为模型弹性系数矩阵; z 为线圈的静态位移矩阵; F 为洛仑兹力矩阵; g 为加速度。

综上可得,由电磁力引起的绕组振动加速度 a_w 为:

$$a_w = -\frac{AK}{M} e^{-\frac{Ct}{2M}} \sin\left(\sqrt{\frac{K}{M}} t + \alpha\right) - K_b I_m^2 D \sin(2\omega t + 2\phi_0 + \beta) \quad (9)$$

式中: A 和 α 与初始条件相关; D 和 β 为固定条件下与绕组参数有关的常数。

可以看出,绕组振动基频为2倍电源频率。由于垫块等绝缘材料的非线性动力学特性,绕组振动信号中除基频100 Hz分量外,还存在200、300 Hz等谐波分量。

1.3 直流偏磁下变压器的振动机制

直流偏磁产生机理和铁心磁通与磁致伸缩位移的对应关系分别如附录A图A1、A2所示。

变压器正常运行时,工作在铁心磁化曲线线性段。当绕组中流过直流电流时,铁心中直流磁通 φ_d 与交流磁通 $\varphi_a \cos(\omega t)$ 相叠加,致使总磁通曲线整体向上偏移,如附录A图A1(a)所示;这使得原来处于线性段的部分磁化曲线偏移至饱和段,导致与直流磁通同向的半周期磁感应强度增大,而反向的半周期磁感应强度减小,如附录A图A1(b)所示;进而导致励磁电流发生畸变,形成正负半周期不对称的尖波,变压器工作在半周期饱和状态,如附录A图A1(c)所示。这导致铁心磁导率下降,漏磁增加,励磁电流与谐波分量增大,加剧了绕组振动^[15]。

另一方面,变压器正常运行时,磁致伸缩位移量 λ 是变形的正弦信号,正负半周期近似对称,如附录A图A2(c)中的实线所示。当变压器存在直流偏磁时,铁心磁通量 φ 是在交变磁通 $\varphi_a \cos(\omega t)$ 上叠加了直流磁通 φ_d ,由于铁心磁致伸缩位移是磁通的函数^[13],直流偏磁时磁致伸缩位移与磁通间的近似关系如附录A图A2(c)中的虚线所示,在磁通正半周期磁致伸缩位移幅值增大、铁心形变加剧,负半周期对应的位移及变形变较小,这导致正负半周期波形不再对称,信号复杂度增加^[11]。

2 大型变压器直流偏磁现场测试

白鹤滩—江苏工程是“西电东送”重点工程,额定输送功率达8000 MW,额定电流为5000 A。布拖换流站是该工程送端站,大坝接地极与换流站直线距离约为25 km。布拖换流站周边部分变电站及直流接地极的拓扑结构如附录A图A3所示。

500 kV 普提变电站与大坝接地极间直线距离约为17.1 km,站内2号500 kV主变基本信息如附录A表A1所示。系统调试时2号主变中性点直接接地,高压侧、中压侧和低压侧负载电流分别为450、1020、930 A。

白鹤滩—江苏工程进行单极-大地回路调试时,设置系统调试电流为500、1000、1500、2000 A这4种工况。在调试前和上述4种工况下,分别检测500 kV普提变电站2号主变中性点电流和振动信号。4个典型振动测点分别布置在高压套管侧、中压套管侧油箱壁下1/3处,如附录A图A4所示。振动检测系统为自主研发,振动传感器型号为PCB 333B50,频带范围为0.5~3000 Hz,灵敏度为1000 mV/g,系统每秒采样25 600点。

3 测试数据分析

3.1 直流偏磁程度量化

白鹤滩—江苏工程进行调试时,2号主变中性点电流与系统调试电流呈线性增长关系,如图1所示。当系统未调试时中性点电流为0,当系统调试

电流为2 000 A时中性点电流增加至10.6 A,表明存在明显的直流电流 i_d 侵入2号主变绕组。

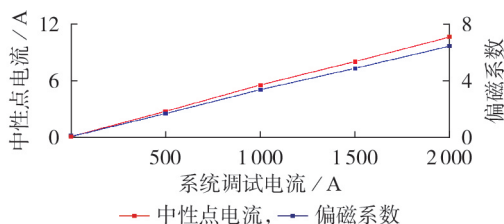


图1 中性点电流及偏磁系数与系统调试电流的关系

Fig.1 Relationship between neutral current, DC bias coefficient and system debug current

直流电流 i_d 使铁心中产生相应的直流磁通 φ_d , φ_d 能直接反映直流偏磁水平。而 φ_d 往往不能直接测得,若要准确计算 φ_d ,则不仅需要考虑到铁心磁滞效应,还需要对模型中的基本磁化曲线进行反复迭代修正,算法复杂。但若直接采用 i_d 描述直流偏磁程度,又未考虑到变压器本身的实际情况。因此,从工程实用的角度出发,本文基于励磁电流 i_e 与直流电流 i_d 定义偏磁系数,以量化直流偏磁程度,具体如下:

$$k = i_d / i_e \quad (10)$$

式中: k 为偏磁系数。

由2号主变铭牌参数可得,高压绕组的励磁电流 $i_e=0.55$ A,文献[16]报道了直流电流在变压器绕组中的分布情况,为简化分析,本文假定 i_d 在三相中平均分配。调试期间,2号主变直流偏磁程度如图1所示,其变化趋势与中性点电流一致。

3.2 振动信号时域波形分析

系统调试期间,2号主变测点1振动信号的时域波形变化如图2所示,其他测点振动信号的时域波形变化见附录A图A5—A7。当无直流偏磁时,4个

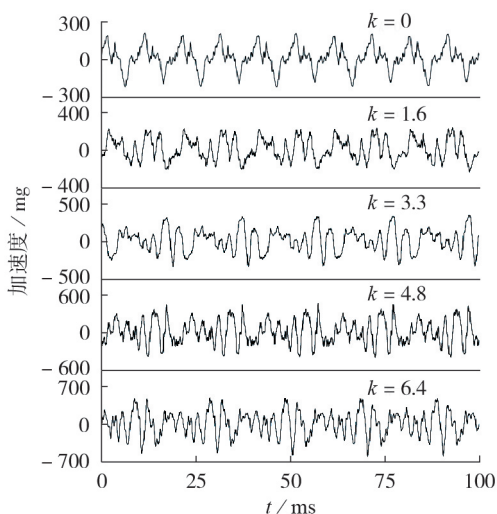


图2 测点1在不同偏磁系数下的振动信号

Fig.2 Vibration signal at Point 1 under different DC bias coefficients

测点振动信号存在差异性,但均为变形的正弦波形,1个励磁周期内2个半周期对应的振动波形高度相似,呈对称分布。当变压器中性点注入直流时,变压器工作在半周期饱和状态,4个测点振动信号畸变明显,信号复杂度增加,不再近似正弦波形,2个半周期对应的信号波形相似度降低,不再对称分布。随着偏磁系数的增大,4个测点振动信号畸变增大。

2号主变4个测点加速度有效值变化趋势如附录A图A8所示。由图可见:加速度有效值整体随直流偏磁呈增大趋势;受变压器结构影响,不同测点的加速度有效值变化趋势存在差异性,其中测点2受影响最大,加速度有效值从无直流偏磁时的105 mg增加至偏磁系数为6.4时的346 mg。

3.3 振动信号频谱分析

系统调试期间,2号主变测点1振动信号的频谱分布变化如图3所示,其他测点振动信号的频谱分布变化见附录A图A9—A11。当无直流偏磁时,测点1振动信号的频率主要分布在100、300、500 Hz处,测点2、3振动信号的频率主要分布在100、300 Hz处,测点4振动信号的频率主要集中在100 Hz。不同测点振动信号频谱分布不同,但主频均为100 Hz。

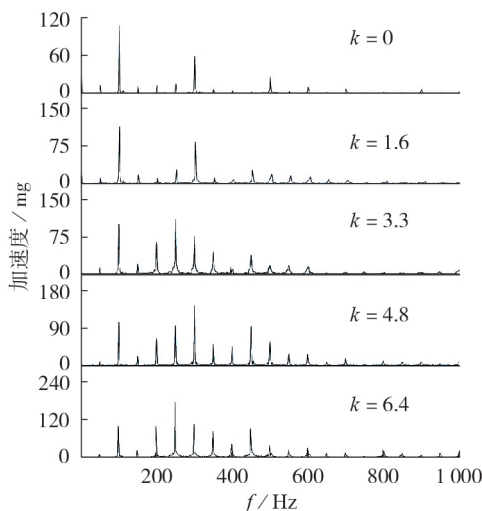


图3 测点1在不同偏磁系数下的信号频谱

Fig.3 Frequency spectra of signal at Point 1 under different DC bias coefficients

当变压器中性点注入直流时,振动信号中50 Hz奇次谐波分量明显增多,例如当 $k=1.6$ 时,测点1出现了450、550 Hz等分量,测点2出现了250 Hz分量,测点3、4均出现了250、350、450 Hz等分量。随着偏磁系数逐渐增大,不同测点谐波分量变化存在差异性,主频分量也发生变化,如当 $k=6.4$ 时,4个测点的主频分量分别为250、250、350、450 Hz。此外,随着偏磁系数增大,50 Hz倍频分量幅值增加各异,信号能量主要集中在600 Hz以内。

4 直流偏磁对变压器振动特性影响分析

正常情况下,变压器振动信号近似变形的正弦波形,而直流偏磁导致波形发生畸变。直流偏磁对振动信号 100 Hz 基频分量的影响如图 4 所示。测点 1、2、4 处的 100 Hz 基频分量受直流偏磁影响并不明显;而测点 3 处的 100 Hz 基频分量整体呈减小趋势,从无直流偏磁时的 146 mg 减小至偏磁系数为 6.4 时的 78 mg。由此可见,直流偏磁导致信号畸变及振动加剧的本质原因在于除基频分量外的 50 Hz 倍频分量显著增多。

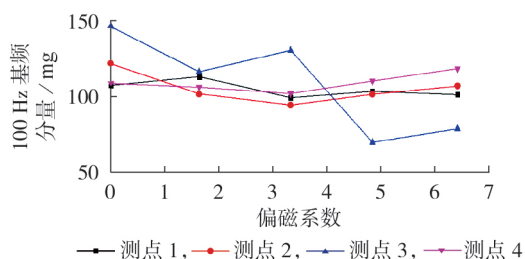


图4 100 Hz基频分量变化趋势

Fig.4 Change trend of 100 Hz fundamental frequency component

为描述直流偏磁对波形畸变程度的影响,提取 50 Hz 倍频谐波分量与 100 Hz 基频分量的能量比,即波形畸变比作为第 1 个特征值。由于变压器振动信号频谱主要分布在 2 kHz 以内,本文仅对 2 kHz 以内的振动信号进行分析。波形畸变比 R_{THD} 的计算公式如式(11)所示。

$$R_{THD} = \frac{\sum_{i=1}^N A_i^2 - A_2^2}{A_2^2} \quad (11)$$

式中: A_i 为第 i 个 50 Hz 倍频谐波分量的幅值; A_2 为 100 Hz 基频分量幅值; N 为 2 kHz 频率范围内 50 Hz 倍频谐波分量个数。

各测点波形畸变比变化趋势如图 5 所示。由图可见:无直流偏磁时各测点波形畸变比均小于 0.5,振动信号以基频分量为主;随着偏磁系数增大,各测点波形畸变比变化存在差异性,但整体呈增大趋势;测点 4 的波形畸变相对较小,当偏磁系数为 6.4 时波

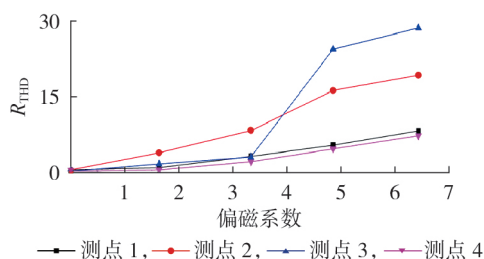


图5 振动信号波形畸变比变化趋势

Fig.5 Change trend of waveform distortion ratio of vibration signal

形畸变比为 7;测点 3 的波形畸变最大,当偏磁系数为 6.4 时波形畸变比增大至 28。

同时,为分析直流偏磁对 50 Hz 奇次、偶次谐波的影响,提取 2 kHz 频段内 50 Hz 奇偶次谐波能量比 $R_{o/e}$ 作为第 2 个特征值,其计算公式如式(12)所示。

$$R_{o/e} = \sum_{i=1}^{N/2} A_{2i-1}^2 / \sum_{i=1}^{N/2} A_{2i}^2 \quad (12)$$

式中: A_{2i-1} 、 A_{2i} 分别为 50 Hz 奇次、偶次谐波幅值。

各测点的 $R_{o/e}$ 变化趋势如图 6 所示。由图可见:无直流偏磁时,各测点的 $R_{o/e}$ 趋近于 0,振动信号以 50 Hz 偶次谐波分量为主;随着偏磁系数的增大,各测点的 $R_{o/e}$ 变化存在差异性,但整体呈增大趋势;测点 3 处的 $R_{o/e}$ 变化最明显,当偏磁系数为 6.4 时 $R_{o/e}$ 增大至 4.3;测点 4 处的 $R_{o/e}$ 变化相对较小,当偏磁系数为 6.4 时 $R_{o/e}$ 增大至 1.4;直流偏磁会同时导致 50 Hz 奇次、偶次谐波分量增多,但奇次谐波增幅大于偶次谐波。

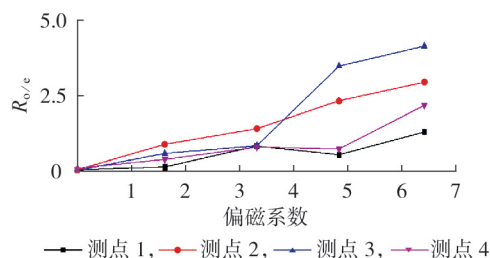


图6 振动信号奇偶次谐波能量比变化趋势

Fig.6 Change trend of energy ratio between odd harmonics and even harmonics of vibration signal

进一步地,为分析直流偏磁对 50 Hz 倍频谐波分量在频带内分布的影响,提取累计能量占比 $R_{1/a}$ 作为第 3 个特征值,具体如式(13)所示。

$$R_{1/a} = \sum_{i=1}^{N_{thres}} A_i^2 / \sum_{i=1}^N A_i^2 \quad (13)$$

式中: N_{thres} 为截止频率内 50 Hz 倍频谐波分量个数。

各测点的 $R_{1/a}$ 变化趋势如附录 A 图 A12 所示。由图可见:无直流偏磁时,4 个测点的振动信号能量主要集中在 300 Hz 以内,占比分别为 0.91、0.96、0.96 和 0.94;随着偏磁系数的增大,各测点的能量分布变化显著,曲线台阶变多,50 Hz 奇次谐波梯度大于偶次谐波,600 Hz 后曲线变缓,逐渐趋于稳定;当偏磁系数为 6.4 时,4 个测点的 600 Hz 内能量占比分别为 0.93、0.96、0.91 和 0.91,上述结果表明直流偏磁导致增加的 50 Hz 倍频谐波主要集中在 600 Hz 以内。

更进一步地,为分析直流偏磁对 50 Hz 倍频谐波分量在频带内变化规律的影响,提取功率谱熵 H 作为第 4 个特征值, H 的计算公式如式(14)所示。

$$H = -\sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i \quad (14)$$

$$p_i = A_i^2 / \sum_{k=1}^N A_k^2 \quad (15)$$

各测点功率谱熵 H 变化趋势如图7所示。由图可见:各测点 H 存在差异,但整体变化趋势相似,当偏磁系数较小时, H 逐渐变大,但偏磁系数增加到一定程度后, H 不再增加,且略有下降。这是由于铁心饱和作用,直流偏磁增大到一定程度时,磁不平衡性降低,振动信号复杂度不再增加。

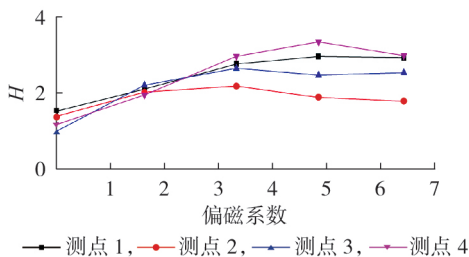


图7 振动信号功率谱熵变化趋势

Fig.7 Change trend of entropy power spectrum of vibration signal

5 结论

本文分析了变压器的振动机理及直流偏磁影响机制,在白鹤滩—江苏工程调试期间,对500 kV三相变压器的中性点电流、振动信号进行了实测,量化了直流偏磁程度,开展了振动信号时域和频域分析,通过提取波形畸变比、奇偶次谐波能量比、高低频能量比、功率谱熵等特征量分析了直流偏磁对变压器振动特性的影响机制,得到以下结论。

1)变压器正常运行时,工作在铁心磁化曲线线性段,振动信号基频为2倍电源频率。直流偏磁使部分铁心磁化曲线偏移至饱和段,励磁电流和磁致伸缩位移发生畸变,进而影响变压器振动特性。

2)当直流电流侵入大型变压器时,振动信号畸变明显,复杂度增加,不再近似正弦波形,2个半周期对应的信号波形相似度降低,不再对称分布。随着偏磁程度增加,振动信号主频分量发生改变,频谱中50 Hz奇次倍频谐波分量明显增多,不同测点各谐波分量幅值增加各异。

3)直流偏磁对变压器振动的影响机制在于除基频分量之外的50 Hz倍频谐波分量显著增多,其中50 Hz奇次谐波增幅要大于偶次谐波,且影响主要集中在600 Hz以内。由于铁心饱和作用,直流偏磁增大到一定程度时,磁不平衡性降低,振动信号复杂度不再增加。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 全江涛,谢志成,陈科基,等. 特/超高压直流输电系统单极运行下变压器中性点直流电流分布规律仿真分析[J]. 高电压技

术,2015,41(3):787-793.

QUAN Jiangtao, XIE Zhicheng, CHEN Keji, et al. Mechanism analysis and simulation of DC current distribution along transformer neutral point under the condition of UHVDC/HVDC single-pole operation [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3):787-793.

[2] 汲胜昌,张凡,师愉航,等. 基于振动信号的电力变压器机械状态诊断方法研究综述[J]. 高电压技术,2020,46(1):257-272.

Ji Shengchang, ZHANG Fan, SHI Yuhang, et al. Review on vibration-based mechanical condition monitoring in power transformers [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1):257-272.

[3] HE Jinliang, YU Zhanqing, ZENG Rong, et al. Vibration and audible noise characteristics of AC transformer caused by HVDC system under monopole operation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4):1835-1842.

[4] DING Dingwei, ZHAO Dongbo, ZHANG Xinhai, et al. Investigation of vibration impacts on HVAC transformer from HVDC system under monopole operation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(3):1386-1392.

[5] 张艳丽,王佳音,白保东,等. 直流偏磁磁场对硅钢片磁致伸缩特性的影响分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(15):4299-4306.

ZHANG Yanli, WANG Jiayin, BAI Baodong, et al. Influence analysis of DC biased magnetic field on magnetostrictive characteristics of silicon steel sheet [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15):4299-4306.

[6] 王振,张艳丽,张殿海,等. 直流偏磁下叠片铁心磁致伸缩的实验测试与分析[J]. 中国电机工程学报,2018,38(16):4918-4925.

WANG Zhen, ZHANG Yanli, ZHANG Dianhai, et al. Experimental tests and analysis of magnetostrictive behaviors in laminated cores at the presence of DC bias [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16):4918-4925.

[7] 祝丽花,杨庆新,闫荣格,等. 考虑磁致伸缩效应电力变压器振动噪声的研究[J]. 电工技术学报,2013,28(4):1-6,19.

ZHU Lihua, YANG Qingxin, YAN Rongge, et al. Research on vibration and noise of power transformer cores including magnetostriction effects [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4):1-6, 19.

[8] 汪金刚,毛凯,段旭,等. 直流偏磁下的变压器振动仿真与试验[J]. 电机与控制学报,2015,19(1):58-67.

WANG Jingang, MAO Kai, DUAN Xu, et al. Simulation and test of transformer vibration under DC bias [J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(1):58-67.

[9] 谢志成,钱海,林湘宁,等. 直流偏磁下变压器运行状态量化评估方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(2):216-223.

XIE Zhicheng, QIAN Hai, LIN Xiangning, et al. Quantitative state assessment method for transformer under DC bias [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2):216-223.

[10] 李长云,郝爱东,娄禹. 直流偏磁条件下电力变压器振动特性研究进展[J]. 电力自动化设备,2018,38(6):215-223.

LI Changyun, HAO Aidong, LOU Yu. Status and progress of research on transformer vibration characteristics with DC bias [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6):215-223.

[11] 郭洁,黄海,唐昕,等. 500 kV电力变压器偏磁振动分析[J]. 电网技术,2012,36(3):70-75.

GUO Jie, HUANG Hai, TANG Xin, et al. Analysis on 500 kV power transformer vibration under DC magnetic biasing [J]. Power System Technology, 2012, 36(3):70-75.

[12] 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.
- [13] 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.
- [14] 张凡, 汲胜昌, 师愉航, 等. 电力变压器绕组振动及传播特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(9): 2790-2798.
ZHANG Fan, JI Shengchang, SHI Yuhang, et al. Research on transformer winding vibration and propagation characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(9): 2790-2798.
- [15] 赵志刚, 刘福贵, 张俊杰, 等. 直流偏磁条件下变压器励磁电流的实验与分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 71-76.
ZHAO Zhigang, LIU Fugui, ZHANG Junjie, et al. Measurement and analysis of magnetizing current in DC-biased transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 71-76.
- [16] 李晓萍, 文习山. 三相五柱变压器直流偏磁计算研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 127-131.
LI Xiaoping, WEN Xishan. DC bias computation study on three-phase five limbs transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 127-131.

作者简介:

何 良(1987—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为电力设备状态检测及诊断(**E-mail**: helxjtu@163.com);

李盛涛(1963—), 男, 教授, 博士, 通信作者, 主要研究方向为电介质理论及其应用、电缆绝缘材料与绝缘技术、电气功能材料及器件等(**E-mail**: sli@mail.xjtu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Influence analysis of DC bias on vibration characteristics of 500 kV transformer

HE Liang¹, WU Tianbao², LI Rong¹, DING Dengwei¹, YANG Jie³, LI Shengtao⁴

(1. Sichuan Energy Internet Research Institute Tsinghua University, Chengdu 610213, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China;

3. Chengdu Aeronautic Polytechnic, Chengdu 610100, China;

4. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Under the monopole-ground operation mode of ultra-high voltage direct current(UHVDC) transmission project, the direct current(DC) intrudes into the winding of large power transformer, causing vibration of transformer to intensify. In order to deeply understand the influence of DC bias on the vibration characteristics of large power transformer, the vibration mechanism of transformers and the influence of DC bias are analyzed. During the system commissioning of Baihetan-Jiangsu ± 800 kV UHVDC power transmission project, the neutral current and vibration signals of 500 kV three-phase transformer are measured, the DC bias degree is quantified, and the time-domain and frequency spectrum characteristics of vibration signal under different DC bias degrees are analyzed. The waveform distortion ratio, odd-even harmonic energy ratio, cumulative energy ratio and power spectrum entropy are extracted to analyze the influence of DC bias on the vibration characteristics of large power transformer. The results show that DC bias leads to waveform distortion and the vibration waveforms of two half-period waveforms within a power frequency period are no longer distributed symmetrically. With the increase of DC bias degree, the main frequency components of vibration signal change, and the 50 Hz doubling components gradually increase, among which the odd harmonic components increase more than the even harmonic components, and the influence is mainly concentrated within 600 Hz. Due to the saturation effect of the iron core, when the DC bias increases to a certain extent, the magnetic unbalance decreases and the complexity of vibration signals no longer increases.

Key words: UHVDC power transmission; DC bias; power transformers; vibration characteristics

附录 A

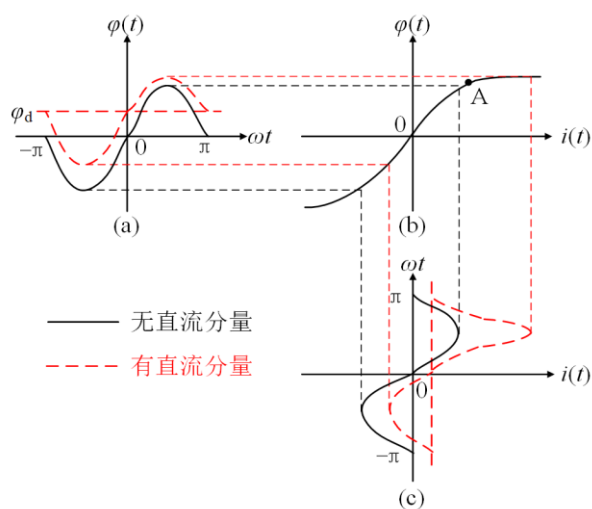


图 A1 直流偏磁产生机理

Fig.A1 Generation mechanism of DC magnetic bias

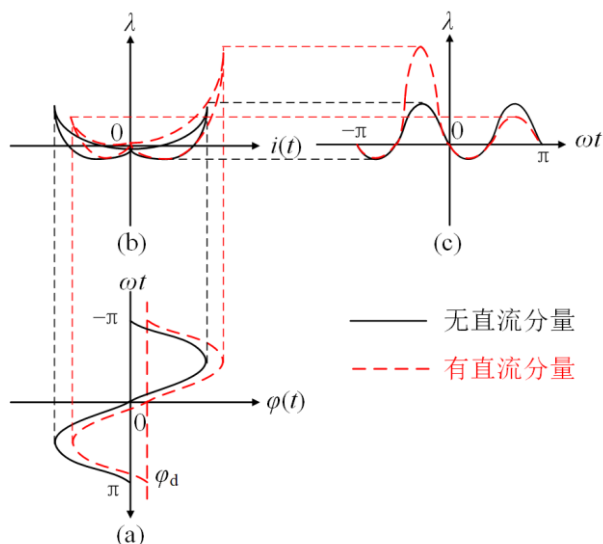


图 A2 铁芯磁通与磁致伸缩位移对应关系

Fig.A2 Relationship between magnetic flux and magnetostriction displacement

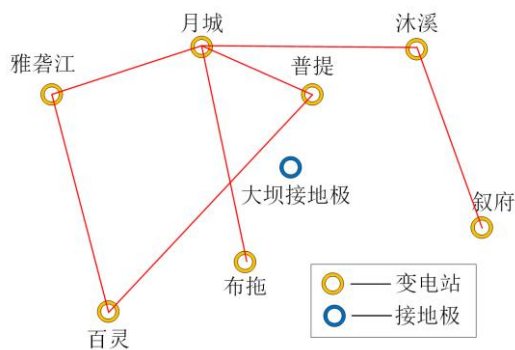


图 A3 布拖换流站周边部分变电站及接地极拓扑图

Fig.A3 Topology diagram of partial transformer substations and grounding poles around Butuo converter station

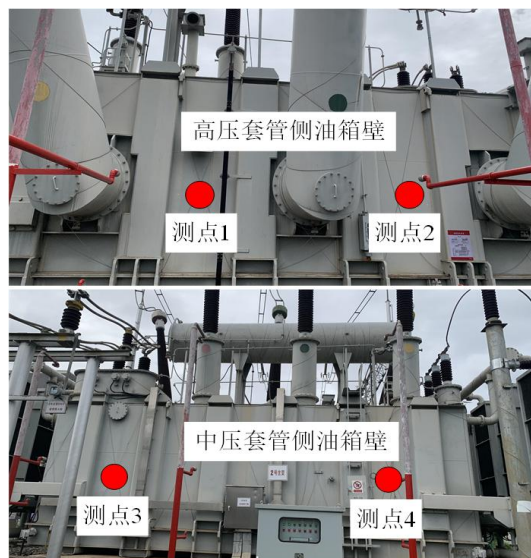


图 A4 振动传感器位置

Fig.A4 Position of vibration sensors

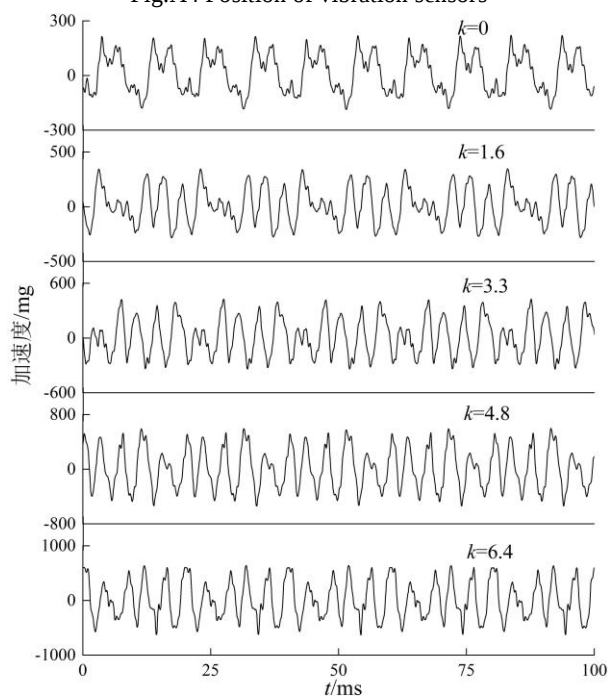


图 A5 测点 2 在不同偏磁系数下的振动波形

Fig.A5 Vibration signals of Point 2 under different DC bias coefficients

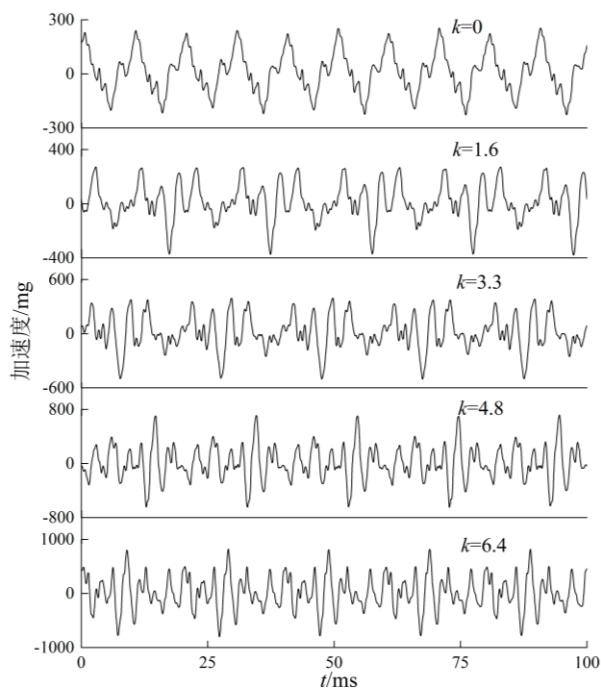


图 A6 测点 3 在不同偏磁系数下的振动波形

Fig.A6 Vibration signals of Point 3 under different DC bias coefficients

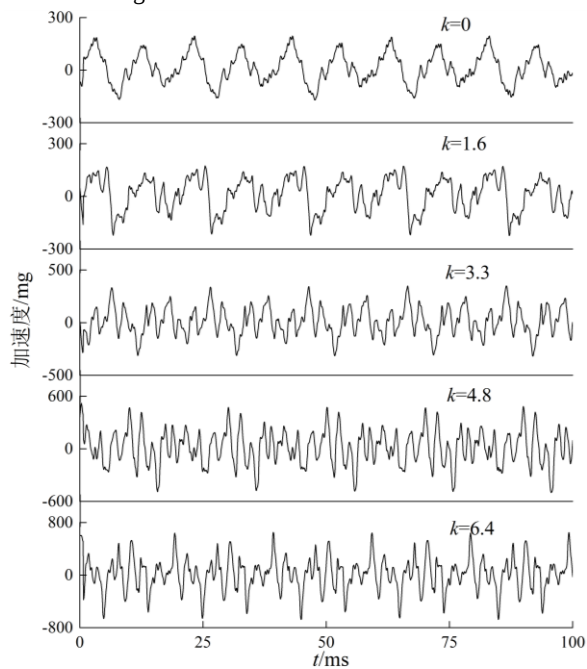


图 A7 测点 4 在不同偏磁系数下的振动波形

Fig.A7 Vibration signals of Point 4 under different DC bias coefficients

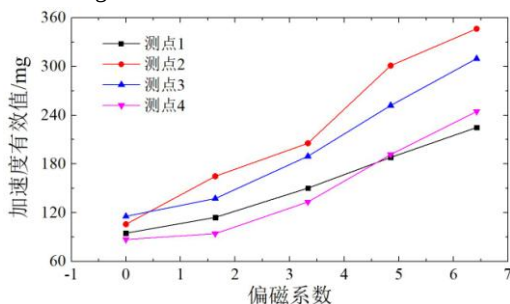


图 A8 振动信号加速度有效值变化趋势

Fig.A8 Change trend of acceleration of vibration effective value

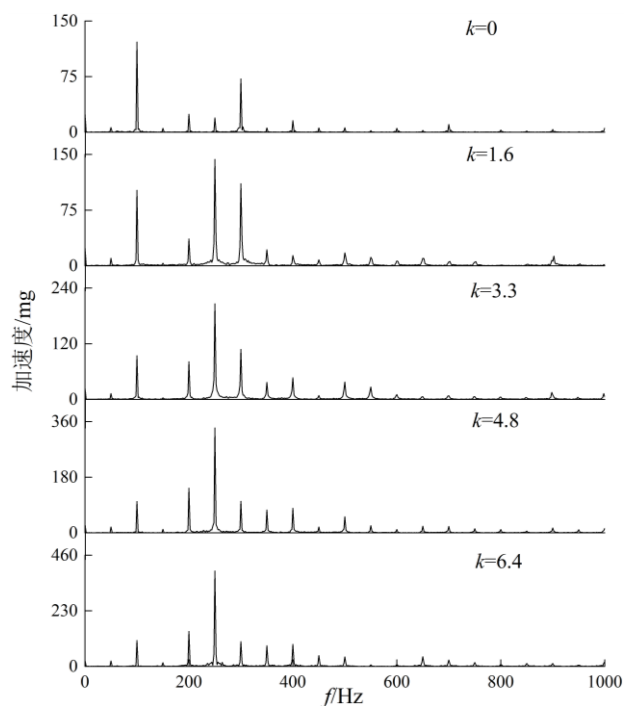


图 A9 测点 2 在不同偏磁系数下的信号频谱

Fig.A9 Frequency spectra of Point 2 at different DC bias coefficients

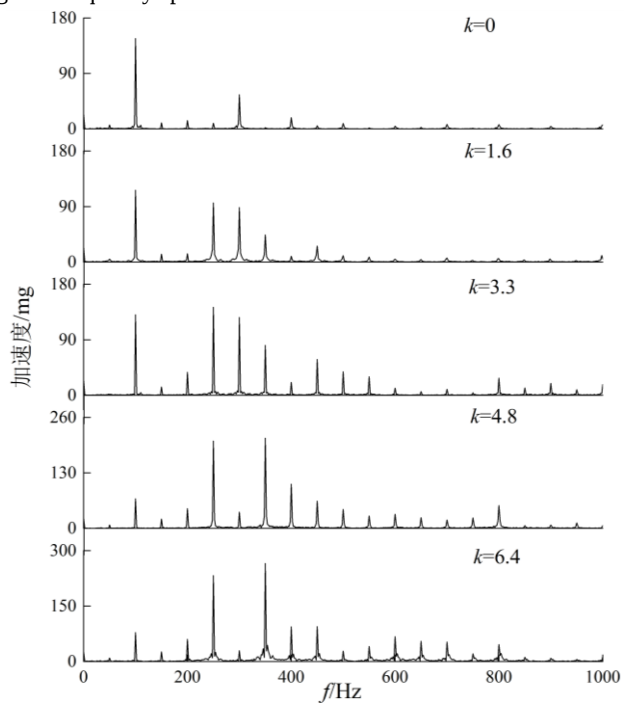


图 A10 测点 3 在不同偏磁系数下的信号频谱

Fig.A10 Frequency spectra of Point 3 under different DC bias coefficients

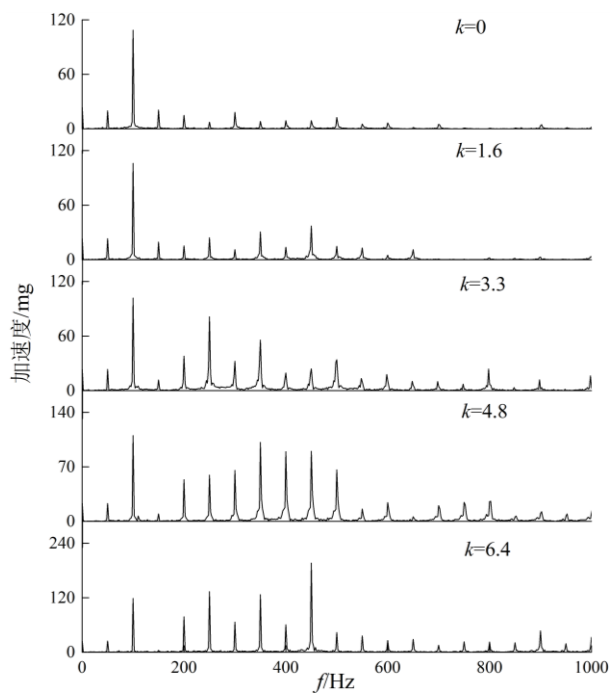


图 A11 测点 4 在不同偏磁系数时的信号频谱

Fig.A11 Frequency spectra of point 4 at different DC bias coefficients

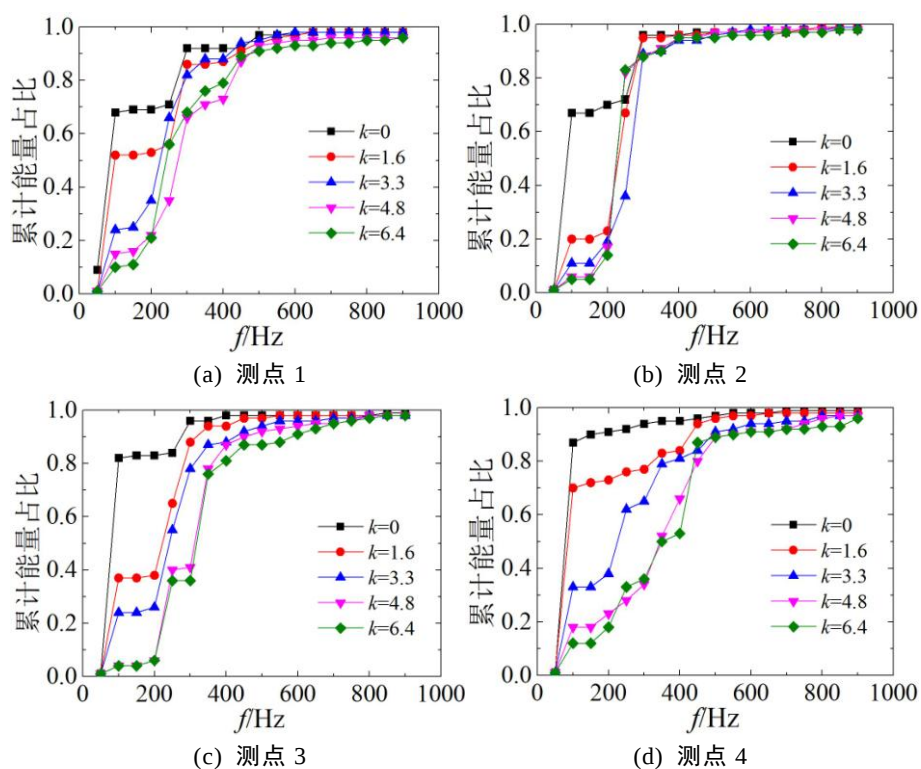


图 A12 振动信号高低频能量比变化趋势

Fig.A12 Change trend of ratio between high frequency and low frequency component of vibration signal

表 A1 变压器基本信息
TableA1 Basic information of transformer

项目	参数
型号	OSFPS-750000/500
相数	3
额定容量/ (MV·A)	750/750/240
额定电压/kV	550/230±2×2.5%/36
额定电流/A	787/1883/3849
空载电流	0.07%
联结组编号	YN/aO/d11