

基于振动信号的城市电网变压器直流偏磁状态辨识方法

刘 君¹, 牛 唯¹, 赵 露², 谈竹奎¹, 曾华荣¹,
陈沛龙¹, 许 逵¹, 欧阳泽宇¹, 林 圣²

(1. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550000; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘 要:针对城市轨道交通杂散电流引起的变压器直流偏磁问题,提出一种基于振动信号的城市电网变压器直流偏磁状态辨识方法,排除了短路故障、电网谐波干扰对状态辨识的影响。首先,分别对直流偏磁、短路故障、电网谐波干扰下的变压器振动信号的持续时间及频率特征进行分析,研究发现,相比于其他故障,在直流偏磁下变压器振动将加剧,振动信号频率分量复杂化,出现一系列高次谐波分量,特别是 50 Hz 奇倍频分量增加明显;然后基于此,利用振动信号除 100 Hz 外的 50 Hz 倍频分量的能量之和,排除短路故障对直流偏磁状态辨识的影响;其次,利用除 100 Hz 外的 50 Hz 奇倍频分量与除 100 Hz 外的 50 Hz 倍频分量的能量之和的比值,排除电网谐波干扰对直流偏磁状态辨识的影响,以实现城轨杂散电流引起的变压器直流偏磁的状态辨识;最后,对现场实测数据进行分析及处理,进一步验证该方法的准确性。

关 键 词:变压器;振动信号;杂散电流;直流偏磁;状态辨识

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.05.021 中图分类号:TM406 文章编号:1673-9140(2021)05-0169-10

State identification method for transformer of urban power grid under DC bias based on vibration signal

LIU Jun¹, NIU Wei¹, ZHAO Lu², TAN Zhukui¹, ZENG Huarong¹,
CHEN Peilong¹, XU Kui¹, OUYANG Zeyu¹, LIN Sheng²

(1. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550000, China;
2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: Aiming at the problem of transformer DC bias caused by the urban rail transit, this paper proposes a DC bias state identification method based on vibration signal for transformers of urban power grid. Firstly, the time of duration and the frequency characteristics of the transformer vibration signal under the conditions of DC bias, short fault

收稿日期:2020-05-30;修回日期:2020-11-05

基金项目:国家自然科学基金(51677153);贵州电网公司电科院项目(0666002019030101GY00014)

通信作者:林 圣(1983-),男,教授,博士生导师,主要从事交直流混联电网保护与控制、城市轨道交通杂散电流分析与抑制研究;E-mail: slin@swjtu.edu.cn

and harmonic interference is analyzed. It is found that compared with other faults, the transformer vibration intensifies under DC magnetic bias. The frequency component of vibration signal becomes complex. A series of high-order harmonic components, especially the 50Hz odd double frequency component, increase significantly. Based on these phenomena, the influence of short circuit fault on DC bias state identification is eliminated by using the sum of energy of 50 Hz octave component of vibration signal except 100 Hz. Then, the ratio of the sum of the energy of 50 Hz odd octave components except 100 Hz over the sum of energy of 50 Hz octave components except 100 Hz is used to eliminate the influence of power grid harmonic interference on DC magnetic bias state identification, so as to realize the state identification of transformer DC magnetic bias caused by urban rail stray current. Finally, the on-site measured data is analyzed and processed to further verify the accuracy of proposed method.

Key words: transformer; vibration signal; stray current; DC bias; state identification

变压器产生直流磁势或者直流磁通使得变压器工作在非正常状态的现象,称为变压器的直流偏磁^[1]。变压器在直流偏磁状态下,绝缘性能下降,无功损耗增大,振动噪声加剧,还会使继电保护装置误动,从而影响变压器的正常运行,损害变压器的运行寿命^[2-6]。

城市轨道交通供电系统采用直流供电方式,直流电流由接触网流入机车,并经由钢轨回流至牵引变电站。由于地铁钢轨对地绝缘难以保证,导致部分电流泄漏入地并形成杂散电流。部分杂散电流可能流入中性点接地的城市电网变压器^[7-9],使变压器磁化曲线的工作点发生偏移而出现直流偏磁现象。随着城市轨道交通大规模、高密度运行以及钢轨对地绝缘逐渐老化,杂散电流的分布呈现持久化、周期化、增大化趋势,导致直流偏磁现象越来越严重^[10-12],所以合理地度量直流偏磁对变压器运行状态的影响,正确的状态辨识方法至关重要。因此,提出正确的直流偏磁辨识方法,制定合理的直流偏磁抑制策略,对于解决威胁电网安全的实际问题,保障城市电网的安全、可靠、高效运行具有重要意义。

为实现变压器直流偏磁状态的准确辨识,越来越多的学者致力于变压器的直流偏磁研究^[13-17]。比如,相关学者利用变压器电路与磁路相关性,建立数学与仿真等效模型,计算出变压器的励磁电流及其畸变率,对变压器的直流偏磁状态进行分析^[13]。文献[14]提出一种综合考虑变压器结构特征与铁芯材料的非线性磁化特性的拓扑修正暂态模型,计算出直流偏磁励磁电流进行直流偏磁的耐受评估。上述文献利用励磁电流来衡量变压器的直流

偏磁状态,而励磁电流在实际运行时不易测得,只能通过仿真获得,从而使实际运行中变压器的实时状态辨识受到限制。

中性点直流电流过大是引起变压器直流偏磁现象的直接原因,中性点直流电流能从一定程度上反映出变压器的直流偏磁状态。变压器振动信号特征也能反映出变压器状态,因此,除了利用变压器电气量,也有学者尝试将变压器振动特性与变压器的运行状态联系起来,对变压器的直流偏磁状态进行评价^[15-17]。文献[15]对直流偏磁下的变压器建立量化评估模型,并形成考虑直流偏磁持续时间的变压器状态评估修正因子,实现对直流偏磁的量化评估;文献[16]结合变压器的振动测试数据进行直流偏磁振动分析及特征提取,提出了相应的信号特征提取方法用于获取直流偏磁振动特征;文献[17]分析并提取了直流偏磁前后变压器噪声与振动特性,对比分析该特征量的变化趋势,对变压器直流偏磁状态进行有效地评价。由于短路故障、电网谐波干扰也会使变压器振动信号特征发生改变,例如使变压器振动加剧,从而对变压器直流偏磁状态辨识造成影响,但在之前的研究中往往不被重视。

为排除短路故障、谐波干扰对变压器直流偏磁状态辨识造成影响,该文针对城市轨道交通杂散电流引起的变压器直流偏磁,提出一种基于振动信号的城市电网变压器直流偏磁状态辨识方法。首先分别对直流偏磁、短路故障、谐波干扰下的变压器振动信号的持续时间及频率特征进行了分析;然后提取出可以区分短路故障、谐波干扰的特征值,以准确实现城轨杂散电流引起的变压器直流偏磁的状态辨

识;最后对现场实测数据进行分析及处理,进而验证该方法的准确性。

1 变压器振动特性分析

分析了变压器正常运行下的振动机理,接着分别对直流偏磁、短路故障、谐波干扰下的振动特性进行分析,为后续直流偏磁辨识方法的提出奠定理论基础。

1.1 变压器振动机理简析

变压器振动主要由铁芯振动和绕组振动引起。铁芯振动主要取决于硅钢片的磁致伸缩,即硅钢片被磁化导致尺寸发生改变,从而产生振动。在一定的磁通范围内,铁芯磁致伸缩位移为

$$\lambda(t) \approx \alpha B^2(t) \quad (1)$$

式中 B 为磁通; α 为与铁芯材料有关的常数。当变压器正常运行时,匝数为 N_1 的一次侧施加电压为

$$U_1 = V_0 \sin(\omega t) \quad (2)$$

式中 V_0 为电源电压幅值; ω 为角频率,即

$$\omega = 2\pi f \quad (3)$$

式中 f 为电源电压基频,值为 50 Hz。横截面积为 A 的铁芯中磁通密度为

$$B(t) = \frac{V_0 \cos(\omega t)}{N_1 A \omega} = B_a \cos(\omega t) \quad (4)$$

式中 B_a 为磁通密度幅值。根据式(1)、(4)可知,变压器正常运行时,铁芯磁致伸缩位移为

$$\lambda(t) = \frac{1}{2} \alpha \cdot B_a^2 (1 + \cos(2\omega t)) \quad (5)$$

由式(4)、(5)可知,铁芯振动信号的特征与电源电压相关,铁芯振动信号的基频为电源电压基频的 2 倍,且铁芯振动信号基频幅值与一次侧电压幅值的平方成正比。

变压器绕组在负载电流和漏磁场产生的电磁力作用下振动,根据绕组在电场中的受力特性^[18],绕组电磁力为

$$F = p I^2(t) \quad (6)$$

式中 p 为电动力系数; $I(t)$ 为负载电流,即

$$I(t) = I_m \sin(\omega t) \quad (7)$$

式中 I_m 为负载电流幅值。

因此,绕组电磁力为

$$F = \frac{1}{2} p \cdot I_m^2 (1 + \cos(2\omega t)) \quad (8)$$

绕组振动速度信号正比于所受电磁力一阶导数,绕组振动加速度信号正比于电磁力二阶导数^[18],由式(8)可提取绕组振动特性:绕组振动信号的基频为负载电流基频的 2 倍,且其幅值与负载电流幅值平方成正比。

1.2 直流偏磁下的振动特性

变压器中性点流过较大的直流电流将导致变压器出现直流偏磁现象。变压器发生直流偏磁时,直流电流产生的直流磁通叠加于交流磁通,导致与偏磁方向一致的半个周期的磁通密度大幅增加,而另外半个周期的磁通密度反而减少,磁通曲线上下半波不对称、每半个周期出现一次饱和,即铁芯的半波饱和现象。半波饱和现象使磁化曲线的工作点进入非线性饱和区,进而导致励磁电流产生严重畸变、幅值增大,同时出现高次谐波分量^[17]。因此,变压器铁芯磁通密度和绕组电流频率分量也会复杂化,且各次谐波分量幅值增加。

铁芯磁致伸缩位移是磁通的函数,直流偏磁下铁芯磁通和磁致伸缩位移波形如图 1 所示^[16]。

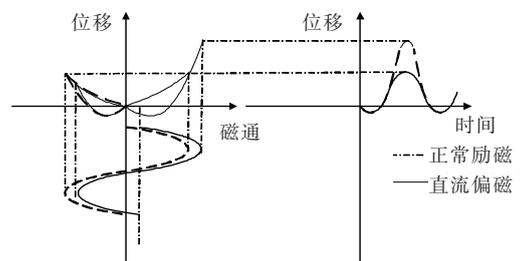


图 1 直流偏磁下铁芯磁通和磁致伸缩位移波形

Figure 1 Magnetic flux and magnetostrictive displacement waveform of core under DC bias

直流偏磁下,认为在变压器铁芯交流磁通上叠加一个直流分量^[16],则变压器铁芯磁通密度为

$$B_1(t) = B_d + B_N \cos(n\omega t) \quad (9)$$

式中 B_d 为铁芯磁通的直流分量; B_N 为负载运行下铁芯磁通的交流分量幅值; n 为谐波次数。

此外,根据式(1)、(6)可得此时变压器的磁致伸缩位移为

$$\lambda_1(t) = \alpha(B_d^2 + 2B_d B_N \cos(n\omega t) + \frac{1}{2}B_N^2 + \frac{1}{2}B_N^2 \cos(2n\omega t)) \quad (10)$$

同时,直流偏磁下,变压器负载电流为

$$I_1(t) = I_N \sin(n\omega t) + I_0 \quad (11)$$

式中 I_0 为负载电流的直流分量; I_N 为负载电流交流分量的幅值。

因此,根据式(4)、(8)可知,绕组振动为

$$F = p(I_0^2 + \frac{1}{2}I_N^2 + \frac{1}{2}I_N^2 \cos(2n\omega t) + 2I_0 I_N \sin(n\omega t)) \quad (12)$$

结合式(10)、(12)可知,当变压器发生直流偏磁时,变压器铁芯和绕组振动信号中电源电压基频的奇倍频分量增加^[17]。且直流偏磁下变压器铁芯和绕组振动信号频率分量复杂化,出现一系列高次谐波分量,各频率分量幅值有所增加,特别是50 Hz奇倍频分量增加明显^[19]。

1.3 短路故障下的振动特性

变压器出现瞬时性短路故障时,会产生一个极大的短路冲击电流,导致变压器振动强度急剧增大。系统在故障恢复时间内切除故障,使振动信号恢复到正常值,短路故障从出现到切除持续时间较短。因此,在出现瞬时性短路故障时,变压器振动信号各频率分量的能量之和出现较大值,但该时间是极短的,能量和并不会长时间稳定于该值^[20]。

1.4 电网谐波干扰下的振动特性

出现电网谐波干扰时,变压器铁芯中产生的合成磁通密度为

$$B_2(t) = \sum_{n=1}^k B_{N1} \cos(n\omega t) \quad (13)$$

结合式(1)、(13)可得,在各次谐波共同作用下铁芯磁致伸缩位移为

$$\lambda_2(t) = \frac{\alpha}{2} \left(k + \sum_{n=1}^k B_{N1} \cos(2n\omega t) \right) \quad (14)$$

由式(13)、(14)可知,在电网谐波干扰下,铁芯振动信号加剧,同时出现电网谐波频率的2倍频分量。

同样,在电网谐波干扰下,负载电流中出现谐波分量,由于绕组振动与负载电流平方成正比,所以绕组振动信号增大并出现电网谐波频率的2倍频分量^[21]。

2 变压器直流偏磁辨识方法

根据变压器直流偏磁、短路故障、谐波干扰下振动特征的分析,本文提出一种基于振动信号的城市电网变压器的直流偏磁状态辨识方法。首先识别变压器是否出现振动异常,是否出现了直流偏磁、短路故障、电网谐波干扰这3种异常状态;然后排除短路故障和谐波干扰;最后实现变压器的直流偏磁状态辨识,其流程如图2所示。

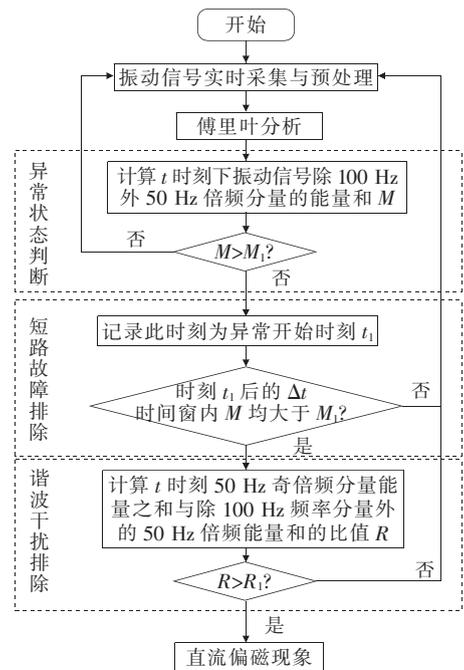


图2 变压器的直流偏磁状态辨识

Figure 2 Flow chart of DC bias state identification of transformer

2.1 变压器异常状态的辨识

与变压器正常运行状态相比,直流偏磁状态、短路故障、谐波干扰3种异常状态下振动都将加剧,导致50 Hz倍频分量的总能量增加。振动信号100 Hz频率分量的幅值与负载电流、电源电压的平方成正比,受到电流电压的影响较大,从而对变压器直流偏磁状态辨识影响较大^[22]。由相关文献及现场实测数据分析得出,振动信号的频率分量主要集中在1 000 Hz内^[23]。因此利用振动信号1 000 Hz内除100 Hz外的50 Hz倍频分量的能量之和,对其进行度量,即

$$\begin{cases} M = \sum_{n=1}^{20} M(50 \cdot n) \\ [M(50 \cdot n) = H^2(50 \cdot n), n = 1, 3, 4, \dots, 20 \end{cases} \quad (15)$$

式中 M 为特征值; $H(50 \cdot n)$ 为振动信号中 $50n$ Hz 频率分量的幅值。

利用计算所得特征值 M , 识别变压器是否处于异常状态。若 M 持续小于阈值 M_1 , 则变压器处于正常工作状态; 若 M 大于阈值 M_1 , 则变压器处于异常工作状态。利用大量的现场实测数据, 并根据专家经验知识确定 M_1 。

2.2 短路故障干扰的排除

在发生瞬时性短路故障时, 产生一个极大的短路冲击电流, 导致变压器振动强度急剧增大, 使得 M 增加。短路故障切除后又立即恢复至正常值^[24], 短路故障从出现到切除持续时间较短。因此, 判断 M 是否在异常开始时刻 t_1 后的时间窗 Δt 内均大于 M_1 , 以排除短路故障对直流偏磁辨识的影响。若是, 则可以排除短路故障干扰, 进而继续判断变压器直流偏磁辨识是否受电网谐波干扰。时间窗 Δt 根据短路冲击故障恢复时间确定。

2.3 电网谐波干扰的排除

在电网谐波干扰下, 振动信号幅值增大并出现电网谐波频率的 2 倍频分量。与电网谐波干扰相比, 直流偏磁会引起振动信号 50 Hz 奇倍频分量增多^[25]。且 100 Hz 频率分量受到电流电压的影响较大, 因此选择 50 Hz 奇倍频分量的能量和与除 100 Hz 外的 50 Hz 倍频能量之比, 来衡量 50 Hz 奇倍频分量增多, 其比值为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{10} M(50 \cdot (2i - 1))}{\sum_{i=1}^{20} M(50 \cdot i) - M(100)} \quad (16)$$

判断比值 R 是否在异常开始时刻 t_1 后是否大于 R_1 。若是, 说明变压器振动信号中出现大量的 50 Hz 奇倍频分量, 则排除电网谐波对辨识干扰, 认为变压器中出现直流偏磁现象。利用大量的现场实测数据, 根据专家经验知识确定 R_1 。

3 应用与验证

3.1 案例分析 1

选取某城市 500 kV 变电站主变压器为研究对象, 变压器型号为 ODFPSZ9-250000/525/ $\sqrt{3}$, 额定电流为 824.8 A, 为单相三线圈有载调压电力变压器。对该变压器 2019 年 5 月 11 日 05:22—06:22 内的振动信号以及中性点直流电流进行实时监测, 采样频率为 4 000 Hz。利用 CJBZ-1 速度型振动传感器在变压器箱体侧面的中间偏下位置进行振动信号的采集; 利用 HDIE-C41-100P1O23 型直流霍尔传感器在变压器中性点接地杆上进行中性点直流的采集, 如图 3 所示。

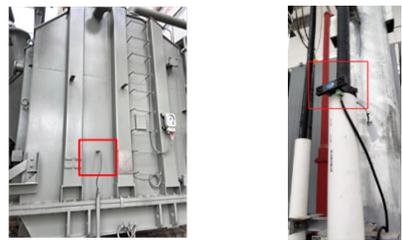


图3 振动信号测试(左)及中性点直流测试(右)

Figure 3 Vibration signal test (left) and DC test at neutral point (right)

在实际应用过程中, M_1 和 R_1 阈值范围根据对大量实测数据的处理分析确定, 确定阈值后, 再利用该方法对变压器的直流偏磁状态进行实时在线辨识。因此, 针对该文所监测变压器, 根据大量实测数据以及现场工作人员和专家经验知识, 设定阈值 M_1 为 0.01, R_1 为 0.4。由于短路冲击故障恢复时间约为 0.2 s^[26], 因此设定时间窗 Δt 为 0.2 s。

用该文所提出的状态辨识方法对采集到的振动信号进行处理分析并进行直流偏磁状态辨识, 最后用中性点直流电流数据对状态辨识结果进行验证分析。

3.1.1 直流偏磁辨识方法的应用

实测获得该变压器 2019 年 5 月 11 日 05:22—06:22 内的振动信号如图 4 所示。

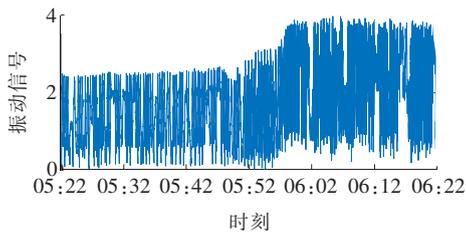


图4 时域振动信号

Figure 4 Time domain vibration signal diagram

05:52之前,变压器振动信号幅值在 $0\sim 2.5$ m/s之间波动;05:52—06:02时间段内,振动信号幅值开始出现上升趋势;06:02—06:22时间段内振动信号幅值在 $0.5\sim 4$ m/s之间波动。与05:52之前相比,05:52—06:02时间段内振动信号的幅值和波动范围呈现上升趋势,06:02—06:22时间段内振动信号的幅值和波动范围处于一个较大值。

对该变压器采集到的振动信号经过去噪、滤波等预处理后,以时间窗为1 s,以步长为0.125 s,提取变压器振动信号进行傅里叶变换,获得50 Hz倍频分量的幅值,再利用式(15)计算 M ,作为当前时刻 t 下的特征值。同时,则获得05:22—06:22时间段内 M 随时间变化趋势如图5所示。

由图5可知,在05:22—05:52时间段内, M 最大值为 2.2×10^{-3} 、最小值为 1.5×10^{-3} 、波动范围仅有 0.7×10^{-3} , M 值较小且波动范围较小;在05:52—06:02时间段内能量一直处于增大趋势;在06:02—06:22时间段内, M 最大值为 18.8×10^{-3} 、最小值为 10.6×10^{-3} 、波动范围为 8.3×10^{-3} , M 值较大且波动范围也较大, M 均高于0.01。因此,变压器在05:22—05:52时间段内没有出现直流偏磁异常状态;在05:52—06:22时间段内,变压器出

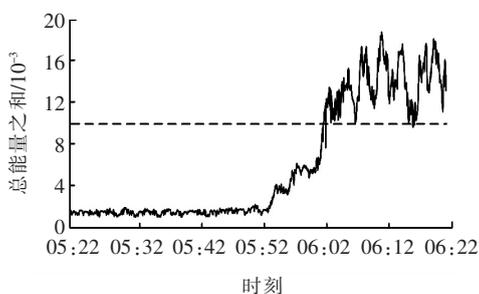


图5 振动信号除100 Hz外的50 Hz倍频分量总能量之和

Figure 5 Sum of the total energy of the 50 Hz octave component of the vibration signal except 100 Hz

现异常状态,可能出现直流偏磁现象,由于 M 一直高于0.01,排除变压器出现短路故障。

与 M 计算方法相似,利用式(16)计算05:22—06:22时间段内 R 随时间变化趋势,如图6所示。

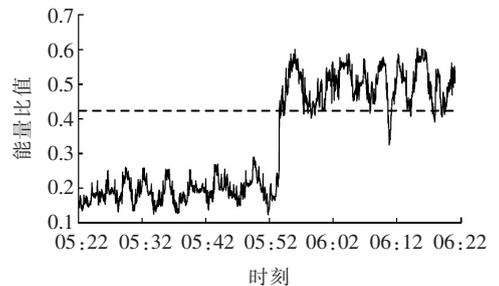


图6 振动信号50 Hz奇倍频能量和与除100 Hz总能量比

Figure 6 Ratio of the sum of the energy of the 50 Hz odd octave over the total energy except 100 Hz of the vibration signal

由图6可知,比值 R 在05:22—05:52时间段内,最大值为0.259、最小值为0.135;在05:52—06:22时间段内,比值 R 开始增大,比值 R 最大值为0.586、最小值为0.401。因此,变压器在05:22—05:52时间段内没有直流偏磁,在05:52—06:22时间段内, R 一直高于0.4,则排除了电网谐波干扰,变压器处于直流偏磁状态。综合上述分析,变压器在05:22—05:52时间段内处于正常运行状态没有受到直流偏磁影响,05:52—06:22时间段内出现了直流偏磁现象。

3.1.2 直流偏磁状态辨识方法的验证

根据《高压直流输电大地返回运行系统设计技术规程》(DL/T 5224—2014),各类变压器允许通过的中性点直流电流具体包括:单相变压器为额定电流的0.3%;三相三柱变压器为额定电流的0.5%;三相五柱式变压器为额定电流的0.7%。直流偏磁的程度与变压器绕组中流过的直流电流的大小密切相关,因此将额定电流的0.3%作为测试变压器允许通过的中性点直流电流值,即利用中性点直流是否大于5 A来判断变压器是否出现直流偏磁现象。

该变压器距地铁线最短距离为600 m,受到由城市轨道交通引起的杂散电流的影响较大。根据对该变压器多天振动数据的监测分析,05:52地铁站发出第一趟列车,而变压器在此刻开始出现振动异

常,与地铁发车时间吻合。出现该现象的原因是由于地铁发车,产生杂散电流,部分杂散电流流入中性点接地的变压器,从而导致变压器产生直流偏磁现象。05:52 地铁开始发车后,多列车的持续运行会不断地产生杂散电流,进而使得变压器一直处于直流偏磁状态。因此,从地铁 05:52 发车到 00:00 收车,变压器持续受到直流偏磁的影响。

对同一变压器进行振动信号监测的同时,对该变压器在 05:22—06:22 时间段内的中性点直流电流进行实时监测。并且经过去噪、滤波等预处理后,获得该时段中性点直流如图 7 所示。

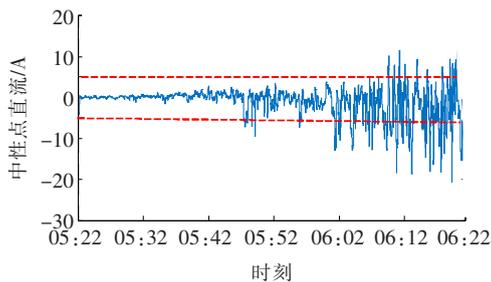


图 7 变压器中性点直流电流

Figure 7 DC component of transformer at neutral point

从图 7 分析得出,在 05:22—05:52 时间段内变压器中性点直流电流幅值最大值为 1.441 A、最小值为 -0.913 A、波动范围为 2.354 A,变压器中性点直流幅值较小,且其幅值变化范围较小。在 05:52—06:02 时间段内,中性点直流电流幅值逐渐增大;在 06:02—06:22 时间段内中性点直流电流其幅值最大值为 11.59 A、最小值为 -18.76 A,波动范围可以达到 30 A,变压器中性点电流幅值显著增大,且其幅值变化范围较大。结合现场实测中点直流数据以及《高压直流输电大地返回运行系统设计技术规程》可得出结论,变压器在 05:22—05:52 时间段内没有受到直流偏磁的影响;在 05:52—06:22 时间段内变压器开始出现直流偏磁并受到直流偏磁影响。

此结论与所提出的状态辨识方法中所得出的结果一致,并且直流偏磁出现时间与地铁发车时间吻合,进一步证明了该文提出的变压器直流偏磁状态辨识方法的有效性。

3.2 案例分析 2

选取某城市 220 kV 变电站主变压器为研究对

象,变压器型号为 SFSZ11-K-240000/220。该变压器为三相三绕组有载调压电力变压器,额定电流为 699.8 A。设定阈值 M_1 为 0.01, R_1 为 0.4。以案例 1 相同的数据采集方式对该变压器进行振动信号监测,振动信号如图 8 所示。

对变压器振动信号进行去噪、滤波等预处理后,以时间窗为 1 s,步长为 0.125 s,对变压器振动信号进行傅里叶变换,获得 50 Hz 倍频分量的幅值,再利用式(12)计算 M ,得出该时间段 M 如图 9 所示。

该时间段内 M 高于阈值 0.01,其最小值为 10.3×10^{-3} 。则变压器出现异常状态,可能出现直流偏磁现象。由于该时间段内 M 一直大于 0.01,因此排除变压器出现短路故障。接着,利用式(16)计算 R ,得出该时间段 R 如图 10 所示。

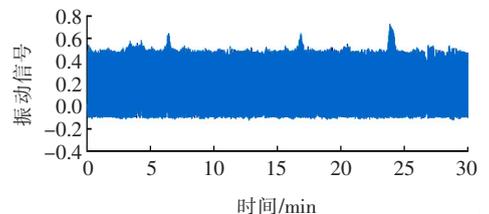


图 8 振动信号波形

Figure 8 Waveform of the vibration signal

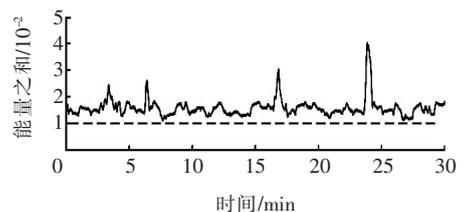


图 9 振动信号除 100 Hz 外的 50 Hz 倍频分量总能量之和

Figure 9 Sum of the total energy of the 50 Hz octave component of the vibration signal except 100 Hz

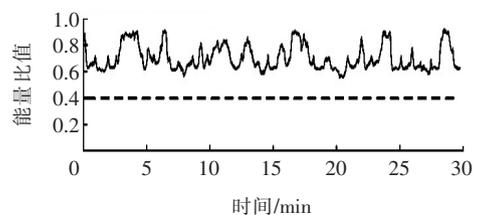


图 10 振动信号 50 Hz 奇倍频能量和与除 100 Hz 总能量比

Figure 10 Ratio of the sum of the energy of the 50 Hz odd octave over the total energy except 100 Hz of the vibration signal

该时间段内 R 一直高于阈值 0.4, 最小值为 0.61。则排除变压器出现电网谐波干扰, 变压器处于直流偏磁状态。

最后利用变压器中性点直流电流对案例 2 中的直流偏磁辨识结论进行验证。对同一变压器相同时间段内中性点直流进行实时监测, 电流波形如图 11 所示。

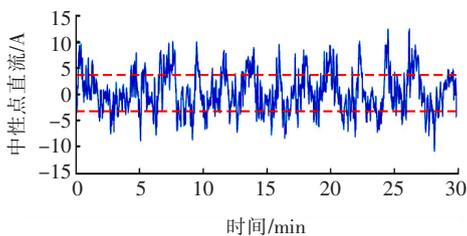


图 11 变压器中性点直流电流

Figure 11 DC component of transformer at neutral point

根据《高压直流输电大地返回运行系统设计技术规程》(DL/T 5224—2014), 将额定电流的 0.5% 作为测试变压器允许通过的中性点直流电流值, 即利用中性点直流是否大于 3.5 A 来判断变压器是否出现直流偏磁现象。该时间段内, 中性点直流幅值最大值可达 11 A, 在 $-10 \sim 10$ A 范围内波动。因此, 变压器在该时间段内有直流偏磁现象, 与利用该文直流偏磁辨识方法所得出的结论一致, 进一步证明了该方法的有效性。

4 结语

为排除短路故障、电网谐波电流干扰, 实现变压器的直流偏磁状态辨识, 该文针对城市轨道交通杂散电流引起的变压器直流偏磁, 提出一种基于振动信号的变压器直流偏磁状态辨识方法。主要得出如下结论。

1) 直流偏磁状态、短路故障、电网谐波干扰 3 种异常状态下振动都将加剧, 振动信号除 100 Hz 外的 50 Hz 倍频分量的能量之和增加。

2) 在发生瞬时性短路故障时, 除 100 Hz 外的 50 Hz 倍频分量的能量之和突增, 在短路故障切除后又立即恢复至正常值。

3) 与电网谐波干扰相比, 直流偏磁会引起振动

信号 50 Hz 奇倍频分量增多。

4) 利用除 100 Hz 外的 50 Hz 倍频分量的能量之和、50 Hz 奇倍频分量的能量和与除 100 Hz 外的 50 Hz 倍频分量的能量之和的比值, 能够排除短路故障、电网谐波干扰对状态辨识的影响, 从而实现变压器的直流偏磁状态辨识。

参考文献:

- [1] 文习山, 郭婷婷, 何智强, 等. 直流偏磁相关问题研究综述[J]. 高压电器, 2016, 52(6): 1-8.
WEN Xishan, GUO Tingting, HE Zhiqiang, et al. Research summary on the impacts of DC magnetic bias on transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(6): 1-8.
- [2] 乔峰, 何英发, 翁汉琮, 等. 变压器直流偏磁对无功功率影响的仿真分析[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(4): 102-108.
QIAO Feng, HE Yingfa, WENG Hanli, et al. Simulation analysis on the effect of transformers DC magnetic biasing to reactive power consumption[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(4): 102-108.
- [3] 王格万, 潘超, 郑逸丹, 等. 变压器直流扰动下励磁谐波与铁心饱和失稳研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 49-55.
WANG Gewan, PAN Chao, ZHENG Yidan, et al. Research on excitation harmonics and core saturation instability of transformer under DC disturbance[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 49-55.
- [4] 姜朋亮, 赵文彬, 卢武, 等. 基于 GIC 对电网变压器偏磁特性的研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(2): 25-33.
JIANG Pengliang, ZHAO Wenbin, LU Wu, et al. Research on magnetic bias characteristics of power grid transformer based on GIC[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(2): 25-33.
- [5] 刘连光, 马成廉. 一种考虑接地极选址及受端电网结构的偏磁电流减小方法[J]. 中国电力, 2021, 54(7): 100-108.
LIU Lianguang, MA Chenglian. A DC bias current reducing method considering grounding electrode location and receiving-end grid structure[J]. Electric Power,

- 2021,54(7):100-108.
- [6] 师混夏,吴邦,靳宇晖,等. 直流偏磁对变压器影响研究综述[J]. 高压电器,2018,54(7):20-43.
SHI Mixia,WU Bang,JIN Yuhui,et al. Research summary on the impacts of DC magnetic bias on transformer[J]. High Voltage Apparatus,2018,54(7):20-43.
- [7] Wang A,Lin S,Hu Z H,et al. Evaluation model of DC current distribution in AC power systems caused by stray current of DC metro systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2021,36(1):114-123.
- [8] 罗远国,刘君,毛钧毅,等. 轨地过渡电阻对电网地铁杂散电流分布影响分析[J]. 电网与清洁能源,2021,37(4):32-40.
LUO Yuanguo,LIU Jun,MAO Junyi,et al. Analysis of the influence of rail-to-Ground resistance on the stray current distribution in a power grid[J]. Power System and Clean Energy,2021,37(4):32-40.
- [9] 宋伟,张波,黄军,等. 直流输电地中回流对高速铁路系统影响的仿真研究[J]. 智慧电力,2020,48(11):9-15.
SONG Wei,ZHANG Bo,HUANG Jun,et al. Numerical analysis of influence of ground return current in HVDC ground electrode on high speed railway system[J]. Smart Power,2020,48(11):9-15.
- [10] 王爱民,林圣,李俊逸,等. 城市轨道交通长线路杂散电流仿真模型[J]. 高电压技术,2020,46(4):1379-1386.
WANG Aimin,LIN Sheng,LI Junyi,et al. Stray current simulation model of the long line of DC metro systems[J]. High Voltage Engineering,2020,46(4):1379-1386.
- [11] 彭平,周卫华,谢耀恒,等. 关于地铁杂散电流引起的变压器直流偏磁的分析与研究[J]. 变压器,2017,54(11):26-30.
PENG Ping,ZHOU Weihua,XIE Yaoheng,et al. Analysis and research on DC bias of transformer caused by metro stray current[J]. Transformer,2017,54(11):26-30.
- [12] 彭平,曾祥君,倪砚茹,等. 考虑地铁杂散电流影响的变压器直流偏磁电流建模方法[J]. 电力科学与技术学报,2021,36(1):192-198.
PENG Ping,ZENG Xiangjiun,NI Yanru,et al. Modeling for the DC bias current of transformer caused by the metro stray current[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(1):192-198.
- [13] 王玲,马明,徐柏榆,等. 基于非线性磁路方程的变压器直流偏磁风险评估[J]. 变压器,2018,55(10):55-60.
WANG Ling,MA Ming,XU Baiyu,et al. Risk assessment of DC bias of transformer based on nonlinear magnetic circuit equation[J]. Transformer,2018,55(10):55-60.
- [14] 李金龙,李金忠,张书琦. 变压器拓扑修正暂态模型及其在直流偏磁耐受评估中的应用[J]. 电网技术,2019,43(9):3439-3447.
LI Jinlong,LI Jinzhong,ZHANG Shuqi. Topology correct duality-based transformer transient model and its application in DC bias assessment[J]. Power System Technology,2019,43(9):3439-3447.
- [15] 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.
- [16] 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. Analysis on 500 kV power transformer vibration under DC magnetic biasing[J]. Power System Technology,2012,36(3):70-75.
- [17] 吴晓文,周年光,胡胜,等. 城市轨道交通引起的变压器直流偏磁噪声与振动特性[J]. 电测与仪表,2017,54(17):117-122.
WU Xiaowen,ZHOU Nianguang,HU Sheng,et al. Audible noise and vibration characteristics of DC-bias in power transformers caused by urban mass transit system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2017,54(17):117-122.
- [18] 李英,黄莹,邹宇星,等. 大容量变压器负载噪声的试验研究[J]. 变压器,2015,52(8):53-58.
LI Ying,HUANG Ying,ZOU Yuxing,et al. Test and research of load noise in large transformer[J]. Transformer,2015,52(8):53-58.
- [19] 高沛,王丰华,苏磊,等. 直流偏磁下电力变压器的振动特性[J]. 电网技术,2014,38(6):1536-1541.

- GAO Pei, WANG Fenghua, SU Lei, et al. Analysis on vibration characteristics of power transformer under DC bias[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1536-1541.
- [20] 杨文荣,何源,陈玥. 过电压下变压器的振动特性研究[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(12): 123-126.
- YANG Wenrong, HE Yuan, CHEN Yue. Study on vibration characteristics of transformer under overvoltage[J]. Experimental Technology and Management, 2019, 36(12): 123-126.
- [21] 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 Rongbing, et al. Effects of harmonics on vibration characteristic of transformer[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(11): 198-202.
- [22] 马宏忠,耿志慧,陈楷,等. 基于振动的电力变压器绕组变形故障诊断新方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 89-95.
- MA Hongzhong, GENG Zhihui, CHEN Kai, et al. A new fault diagnosis method for power transformer winding deformation based on vibration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 89-95.
- [23] 马海,周力行. 基于直流偏磁影响下变压器本体振动与噪声的在线监测[J]. 电气技术, 2012(9): 29-33.
- MA Hai, ZHOU Lixing. On-line monitoring of transformer vibration and noise based on DC magnetic biasing[J]. Electrical Engineering, 2012(9): 29-33.
- [24] 张凡,汲胜昌,祝令瑜,等. 短路冲击下变压器振动频响函数研究[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(2): 97-103.
- ZHANG Fan, JI Shengchang, ZHU Lingyu, et al. Frequency response function of short circuit vibration for power transformer[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(2): 97-103.
- [25] 汲胜昌,师愉航,张凡,等. 电力变压器振动与噪声及其控制措施研究现状与展望[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 1-17.
- JI Shengchang, SHI Yuhang, ZHANG Fan, et al. Review on vibration and noise of power transformer and its control measures[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 1-17.
- [26] 李谦,张波,蒋愉宽,等. 变电站内短路电流暂态过程及其影响因素[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 1986-1993.
- LI Qian, ZHANG Bo, JIANG Yukuan, et al. Transient process of short-circuit current in substations and its influential factors[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 1986-1993.