

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.10.015

城市轨道交通杂散电流对500 kV变压器直流偏磁影响测试分析

陈璐¹, 吴天逸¹, 苏磊¹, 黄华¹, 李晓华², 李俊聪²

(1. 国网上海市电力公司, 上海 200122; 2. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要:城市轨道交通运行会引起变压器直流偏磁问题,严重威胁电网的安全稳定运行。为研究轨道交通运行对变压器直流偏磁的影响,文中对上海市轨道交通沿线的某500 kV变压器,采用多物理量同步测量方法测试了轨道交通正常运行、高峰运行和停运后的变压器中性点直流、振动和噪声特性,并与2010年地铁刚投运时振动噪声数据进行比较。分析测试结果发现变压器中性点直流、振动噪声特性与轨道交通负荷功率呈现正相关的变化规律。证明了轨道交通运行引起的杂散电流会导致变压器长期直流偏磁运行,为解决类似问题提供了参考性意见。

关键词:城市轨道交通; 直流偏磁; 500 kV变压器; 振动噪声

Test and Analysis on Influence of Stray Current of Urban Rail Transit on DC Bias of 500 kV Transformer

CHEN Lu¹, WU Tianyi¹, SU Lei¹, HUANG Hua¹, LI Xiaohua², LI Juncong²

(1. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200122, China; 2. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The operation of urban rail transit will cause DC bias of transformer, which will seriously threaten the safe and stable operation of the power grid. In order to study the influence of operation of rail transit on the DC bias of transformer, the multi-physical measurement method is adopted of certain 500 kV transformer along the line of Shanghai rail transit to test the neutral point DC, vibration, and noise characteristics of the transformer during normal operation, peak operation and shutdown of the transformer, and compare with the vibration noise data of the subway in operation in 2010. It is found by the analysis and test result that the neutral point DC, vibration and noise characteristics of the transformer as well as the load power of the rail transit show a positive correlation. It proves that the stray current caused by rail transit operation will cause the transformer to operate with DC bias for a long time, which provides guidance for the operation and maintenance of the transformer.

Key words: urban rail transit; DC bias; 500 kV transformer; vibration noise

0 引言

随着现代化城市建设的不断加快,城市轨道交通规模越来越大^[1-3]。中国的轨道交通供电多采用直流牵引供电方式,主要由牵引变电所、接触网(架空线或接触轨)和回流系统组成^[4],其中回流系统由钢轨、道床及其附属结构等构成,钢轨兼做回流轨。由于钢轨对地并非完全绝缘,因此在地铁列车运行过程中,电流由钢轨泄漏流入大地,构成了轨

道交通直流供电系统的入地杂散电流^[5]。

轨道交通杂散电流与直流输电和太阳磁暴的不同之处在于,其具有间歇性、冲击性、日夜周期性、叠加性等特点^[6]。同时由于大城市轨道线路复杂,杂散电流的泄漏点不明,这些杂散直流电流可能会通过城市电网变电站的接地网流入变压器绕组,造成变压器的直流偏磁影响,引起主变振动和噪声加剧。采用由单相自耦变压器组成的大容量变压器更容易受到偏磁直流电流的影响^[7-8]。贵广

收稿日期:2024-03-23; 修回日期:2024-05-03

基金项目:国家电网有限公司科技项目资助(520940200013)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Co., Ltd.(520940200013).

直流输电线路中,春城站主变采用的是单相自耦变压器,在进行单极大地回线运行时,其中性点流入直流达34.5 A,噪声由采用单极金属回线时的74.5 dB升至93.9 dB^[9]。

对于城市轨道交通杂散电流的研究过程中,文[10]根据杂散电流产生及分布规律,建立了以“钢轨—排流网—大地”三层结构的电阻网络解析模型。文[11]分析了直流地铁系统的杂散电流随列车运行情况、接地方案及轨道参数的不同而变化。文[12]从轨道交通杂散电流产生机理出发,对影响杂散电流的不同因素进行研究。杂散电流在大地中呈现出电场分布^[13],会对轨道交通沿线变电站产生偏磁影响^[14]。文[15]结合地铁线路的列车运行情况,从时间和空间上对交流电力系统中的直流电流分布进行了分析。

变压器长期直流偏磁运行可能会引起变压器垫块松动和绝缘老化,降低变压器寿命^[16-21]。目前变压器直流偏磁运行的研究集中在地磁暴和直流输电单极大地运行引起的振动噪声增加,而轨道交通运行引起的周期性、冲击性杂散电流对变压器振动与噪声影响的研究还相对较少。

文中对上海市轨道交通沿线的一台500 kV变压器,采用多物理量同步测量的方式测试了轨道交通正常运行(14:45-14:46,17:20-17:21)、高峰运行(18:30-18:31)和轨道交通停运后(1:20-1:21,1:45-1:46)变压器的中性点电流、振动和噪声特性,同时也测量了附近轨道交通的负荷功率变化曲线。证明了轨道交通运行会对变压器中性点直流、振动和噪声特性造成影响,导致变压器长期工作于周期性杂散电流引起的直流偏磁状态下,变压器振动噪声加剧,从而故障隐患增加。

1 直流偏磁下变压器振动原理分析

1.1 城市轨道交通引起的直流偏磁机理

除了地磁暴与特高压换流站单极运行外,地铁运行也是造成交流变压器直流偏磁现象的重要原因。理论上,地铁钢轨对地绝缘性能良好,绝大部分牵引电流通过钢轨返回牵引变电站^[17,22]。然而,实际中钢轨并非完全对地绝缘,加之钢轨自身存在电阻,牵引电流流过时产生电位梯度,部分杂散电流经过土壤流入轨道附近交流变压器的接地中性点,导致变压器产生直流偏磁现象^[23],见图1。

城市轨道交通引起的变压器直流偏磁其严重程度与气象条件、土壤环境、列车数量、运行工况等

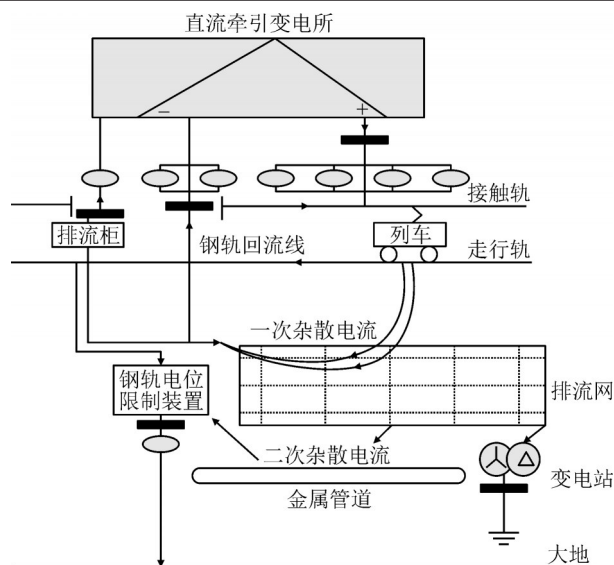


图1 城市轨道交通杂散电流传播示意图

Fig. 1 Schematic diagram of stray current propagation in urban rail transit

诸多因素有关^[24]。与特高压换流站单极运行时产生的直流偏磁不同,城市轨道交通引起直流偏磁时,主变中性点直流分量具有变化快、短期无明显变化规律等特点,因此产生的无规律异常噪声与振动对主变运行的影响较大,更容易造成绕组与铁心松动等问题。

1.2 直流偏磁下变压器绕组铁心振动原理

直流偏磁是变压器的一种非正常工作状态,侵入变压器的直流将在铁心中产生直流磁通,导致变压器铁心出现半波饱和、励磁电流畸变、局部过热和振动噪声加剧等一系列问题^[25-26],在考虑直流偏磁的情况下,铁心在振动时产生的加速度见式(1)^[27]

$$\alpha = \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} = \frac{-2\varepsilon_s N^2}{H_c^2 l^2 L^2} [I_0 U_m \cos(k\omega t + \varphi) + U_m^2 \cos(2k\omega t + 2\varphi)] \quad (1)$$

式(1)中: N 为匝数; l 为积分路径; L 为硅钢片变前的实际尺寸; ε_s 为硅钢片饱和磁致伸缩率; H_c 为矫顽力。

分析式(1)中铁心振动加速度的频率为交流电流的偶数倍,当存在直流时铁心不仅存在基频偶数倍的振动频谱,同时出现基频奇数倍的振动频谱。直流偏磁后各次电流谐波与振动频率的关系见表1。

由表1可以看出:

1)200、400、600、800 Hz的振动是直流侵入后的偶次谐波引起的;50、150、250、350、450 Hz的振动是直流侵入引起的。

2)100、300、500 Hz的振动无直流侵入时是交流基波及谐波引起的振动,有直流时是直流和交流共

表1 发生直流偏磁后各次电流谐波与振动频率的关系

Table 1 Relationship between the secondary current harmonics and the vibration frequency after the DC partial magnetism occurs

电流谐波次数	直流引起振动频率/Hz	交流引起振动频谱/Hz
1	50	100
2	100	200
3	150	300
4	200	400
5	250	500
6	300	600
7	350	700
...	...	...

同作用引起的振动,即直流侵入会加强这些频率处的振动。

2 500 kV 变压器多物理量同步测量

为分析轨道交通运行对500 kV变压器直流偏磁的影响。文中对上海市轨道交通沿线某500 kV变压器中性点直流、振动和噪声进行同步测量。选择一天工作日,从当天凌晨12点左右开始测量,一直到第二天的凌晨,研究轨道交通运行负荷的变化对此500 kV变压器的中性点电流、振动和噪声的影响。

2.1 变压器振动噪声多物理量同步测量流程

同步测量所使用的设备见表2,测试系统共分为振动、噪声、中性点电流3个模块。3个模块所采集的信号同步输入分析仪,再利用计算机软件进行分析。

表2 设备列表

Table 2 List of devices

测量信号	使用设备
振动	DHDAS9502(T95)型测振仪
噪声	BK2250型声计仪
中性点电流	Fluke381直流钳表

多物理量同步测量流程见图2。利用T95型测振仪的集成功能,将电流数据通过测振仪的电流端口输入,再将同一时间段的噪声数据导入信号分析系统,实现多物理量同步测量。

2.2 变压器振动噪声多物理量同步测量方法

2.2.1 500 kV 中性点直流测量

现场测试用霍尔元件及箱式监测装置图见图3,采用霍尔元件和箱式监测装置采集该站1号主变不同时刻中性点直流数据,比较正常时间段(14:45-14:46,17:20-17:21)、晚高峰(18:30-18:31)

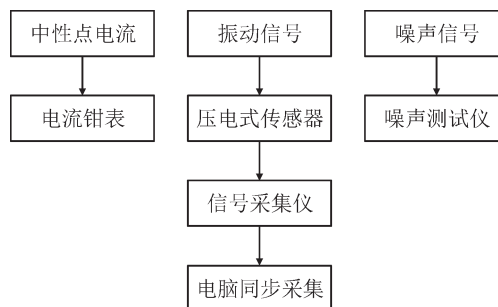


图2 多物理量同步测量流程图

Fig. 2 Flow chart of multiple physical volume synchronization measurement

和轨道交通运行停止后(1:20-1:21,1:45-1:46)中性点直流的变化规律。



(a) 箱式监测装置



(b) 霍尔元件

图3 现场测试用霍尔元件及箱式监测装置图

Fig. 3 Drawing of Hall elements and box monitoring device for field testing

2.2.2 500 kV 变压器振动测量

主变振动测点布置图见图4,振动测点布置在变压器箱体侧面,共设置9个测点并按照由上至下、由左至右的形式分布。用位移传感器和加速度传感器测量振动位移的峰—峰值 X_{pp} ,振动信号和加速度信号经放大器放大,送入振动分析仪进行分析,通过振动分析仪的设定可以得到测点的实时振动信号。

2.2.3 500 kV 变压器噪声测量

BK2250噪声仪现场测试图见图5,用Type2250型声计仪在主变带电情况下,对变压器进行噪声监



图4 主变振动测点布置图

Fig. 4 Layout drawing of the main variable vibration measurement point

测。距离主变1 m,高为1/2主变高的轮廓线上选择12个等距离的点进行10~30 s的噪声监测。噪声测点布置见图6,将运行的变压器按要求确定规定轮廓线,在变压器本体侧面四周布置测点,轮廓线为1 m,取12个测点进行测量。

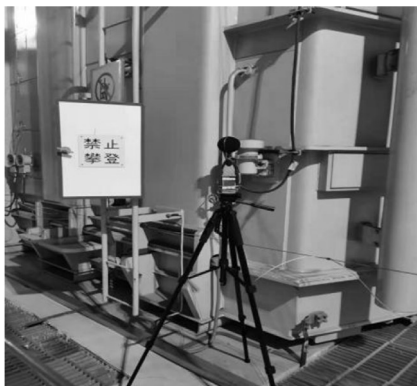


图5 BK2250噪声仪现场测试图

Fig. 5 Field test drawing of the BK2250 noisometer

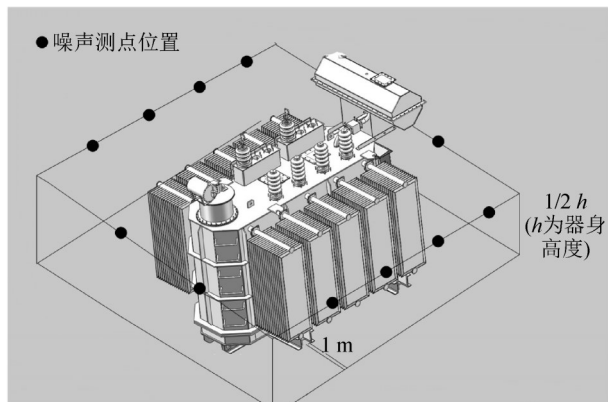


图6 主变噪声测点布置图

Fig. 6 Layout diagram of the main variable noise measurement point

3 500 kV变电站多物理场同步测量结果分析

3.1 变压器中性点直流测试结果

对上海市轨道交通沿线的一台500 kV变压器,采用多物理量同步测量的方式测试了轨道交通正常运行(14:45-14:46, 17:20-17:21)、高峰运行(18:30-18:31)和轨道交通停运后(1:20-1:21, 1:45-1:46)3个典型时间段的中性点电流、振动和噪声时域特性并进行频谱分析。

直流测试仪设置负值为中性点直流流入变压器,轨道交通不同运行时间变压器中性点电流随时间的变化规律比较图见图7。

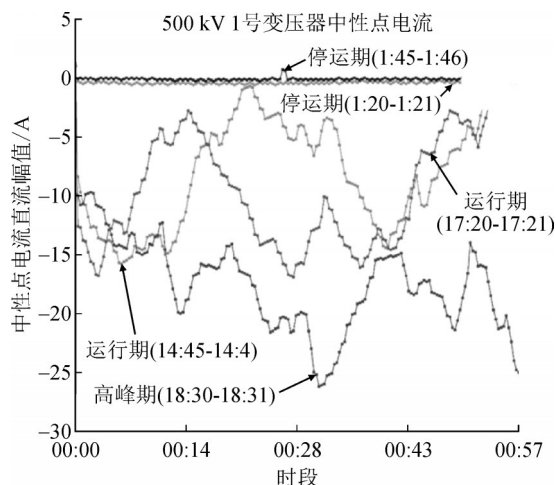


图7 变压器中性点直流随时间变化比较

Fig. 7 Comparison of transformer neutral point DC change over time

从图7的测试数据可以看出:

1)中性点直流基本都是流入变压器,且具有周期性和冲击性特点,符合轨道交通运行周期性和冲击性的特点。

2)变压器中性点直流的绝对值平均值14:45左右约在7 A,到17:20左右达到约10 A,18:30左右的轨道交通高峰期达到约20 A,说明变压器中性点直流会随着轨道交通负荷的增加而增加。

3)次日凌晨轨道交通停运后,变压器中性点直流逐步趋于0 A。证明了轨道交通运行对变压器直流偏磁运行的影响。

统计各时段变压器A相中性点直流绝对值最大值与平均值的大小见表3,对比发现:在地铁运行高峰期,中性点直流的大小相比较于地铁正常运行时期和地铁停运时期分别增加了42%和98%,说明地铁运行对变压器中性点直流有很大影响。

3.2 500 kV变压器振动特性测试结果

18:30-18:31地铁运行高峰期变压器A相箱体

表3 各时段变压器A相中性点直流大小幅值
Table 3 Large and small DC value of A phase neutral point of transformer in each period

时段	中性点直流绝对值最大值/A	中性点直流绝对值平均值/A
运行期(14:45-14:46)	16.30	5.51
运行期(17:20-17:21)	17.10	5.76
高峰期(18:30-18:31)	28.10	7.00
停运期(1:20-1:21)	0.55	0.35
停运期(1:45-1:46)	0.45	0.25

表面振动9个测试点的振动加速度信号随时间变化的曲线见图8,从图8可以看出,变压器受直流偏磁

影响,箱体中上、右上、中部、右中、左下和中下部振动波形整体发生偏移,出现周期性的偏振现象;且由于变压器铁心在左侧位置,导致右边3个测点的振动加速度幅值较小。

由于铁心在旁轭处振动较大,因此取与铁心旁轭垂直对应的箱体表面数据,即左侧中部测点数据进行振动分析。箱体左中部点的振动值在一天内不同时刻的振动最大、最小值的比较见表4,可以更加明显地看到变压器的偏振现象,测试时间段内变压器箱体都有偏振现象,而凌晨轨道交通停运后偏振现象消失,振动幅值也大幅下降,同样说明了轨道交通运行对变压器直流偏磁振动的影响。

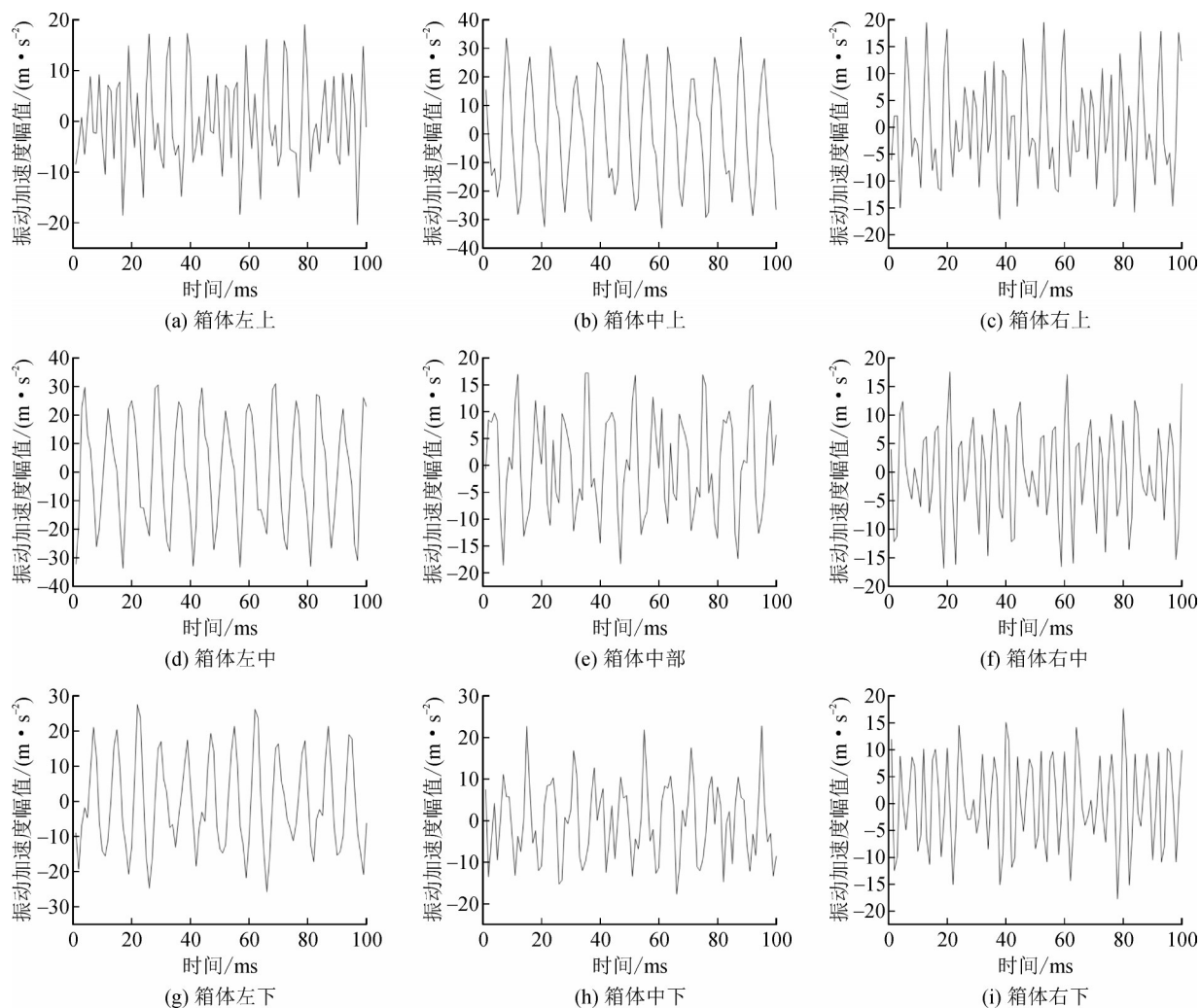


图8 直流偏磁引起的振动偏移现象

Fig. 8 Vibration offset caused by DC partial magnetism

表5将2021年地铁运行期、停运期主变振动加速度的最新数据与2010年地铁刚投运时主变振动加速度的数据对比发现:地铁停运期变压器振动最小,而A、B、C三相振动加速度平均值在地铁正常运行

时距2010年分别上升46%、10%、15.3%。考虑地铁主变长期受到轨道交通运行引起的直流偏磁影响,导致紧固件松动、振动加剧,若长期运行在此状态下,将会降低变压器的寿命,威胁电网的安全稳定运行。

表4 各时段变压器A相振动加速度幅值统计

Table 4 Statistics of phase vibration acceleration amplitude of transformer A during each period

地铁运行时间	振动最大值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	振动最小值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
14:45-14:46	1.50	-1.00
17:20-17:21	1.20	-0.50
18:30-18:31	31.00	-17.00
1:20-1:21	0.50	-0.50
1:45-1:46	0.30	-0.32

表5 地铁运行期、停运期主变各相振动加速度最新数据与主变投运时振动加速度数据对比

Table 5 Comparison of the latest vibration acceleration data of each phase and the vibration acceleration data when the main transformation is put into operation m/s^2

相位	2010年 (地铁运行期)		2021年 (地铁运行期)		2021年 (地铁停运期)	
	振动 最大值	振动 平均值	振动 最大值	振动 平均值	振动 最大值	振动 平均值
	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
A相	17.6	7.5	31.0	13.9	2.1	1.7
B相	12.7	7.0	18.6	7.8	1.9	1.5
C相	34.3	14.6	40.5	17.2	2.8	2.3

箱体表面左中部一点的振动加速度值在轨道交通正常运行、高峰运行和停运后的振动时域比较图见图9,从图9可以看出,在18:30轨道交通运行高峰期变压器的振动远大于14:45振动情况;1:20轨道交通停运后,变压器主变箱壁振动逐渐减弱趋于零,即地铁停运期振动加速度的幅值远小于地铁正常运行和高峰时期的振动加速度。说明变压器的

振动受轨道交通负荷的变化影响很大,再次证明了轨道交通杂散电流对变压器直流偏磁运行的影响。

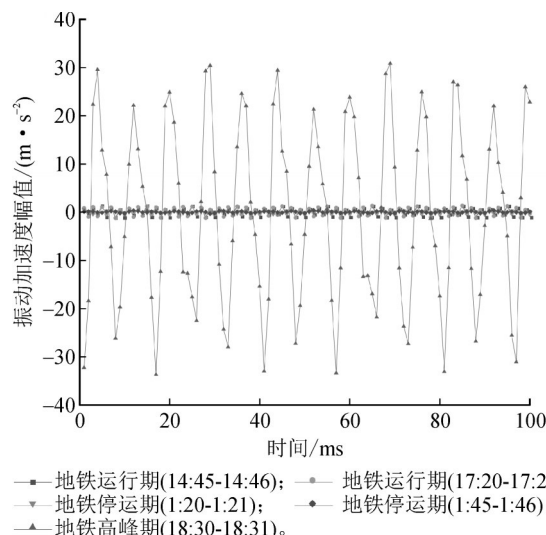


图9 变压器振动随时间变化比较

Fig. 9 Comparison of transformer vibrations over time

箱体表面左中部一点的振动加速度在不同时刻的频谱分布图见图10,从图10可以看出,地铁正常运行时主变振动频域的特征峰出现在50、100、250、400、600 Hz,在地铁高峰期间主变振动频域150 Hz和350 Hz谐波分量增加,且50、100、250 Hz等频谱处振动增强。由前面理论分析可知50、150 Hz等频谱都是直流侵入产生的振动频谱分量。地铁停运后振动主要以100 Hz为主,其余谐波分量含量较低,且振动幅值变得很小,说明此时已经没有杂散直流进入变压器中性点。

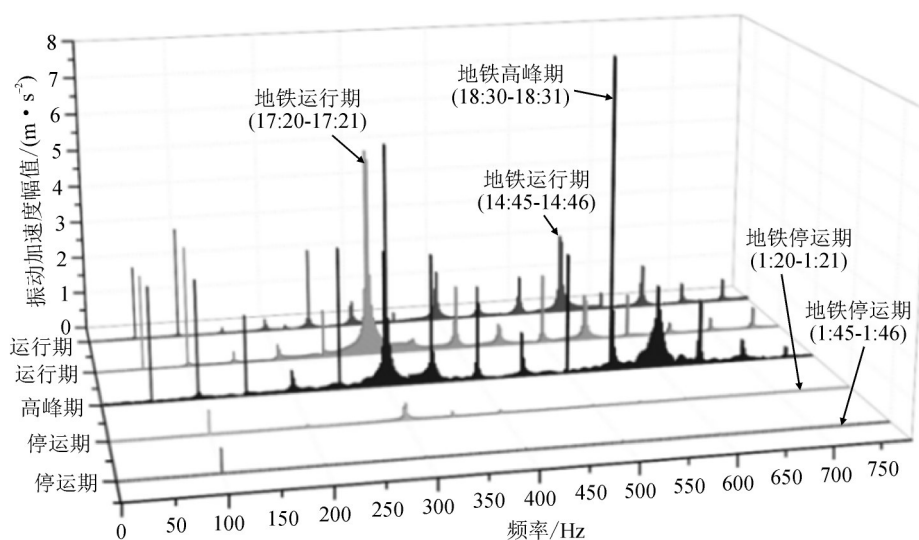


图10 变压器不同时间段振动频谱比较

Fig. 10 Comparison of vibration spectrum in different time periods

3.3 500 kV 变压器噪声测试结果分析

箱体靠近高压套管侧一点噪声值在轨道交通

正常运行、高峰运行和停运后的噪声时域比较图见图11,从噪声时域分布图可以看出,晚高峰期的变

压器噪声均值约为96 dB,正常运行工况时的变压器噪声均值约为94 dB。轨道交通停运后1:20噪声均值大约降为86 dB,1:45后大约降为84 dB,比高峰期下降了约10 dB。同样可以说明轨道交通运行引起的杂散电流对沿线变压器噪声产生了影响。

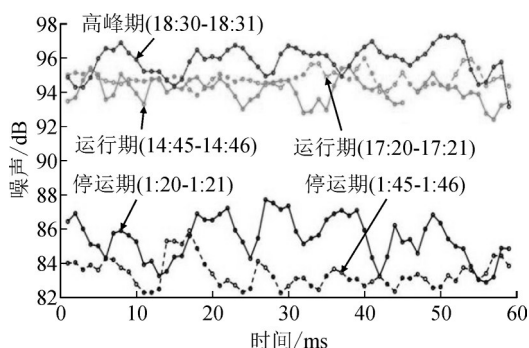


图11 噪声幅值随时间变化的波形比较

Fig. 11 A waveform comparison of the noise amplitude values over time

表6将2021年地铁运行期、停运期主变噪声的最新数据与2010年地铁刚投运时主变噪声的数据对比发现:地铁停运期变压器噪声水平最低,而A、B、C三相整体噪声在地铁正常运行时距2010年分别上升16.7%、13%、15%,与振动增加的幅度呈正相关,且随着地铁运行引起的直流偏磁持续侵入变压器,造成变压器与出厂时相比振动噪声加剧,寿命降低。

表6 地铁运行期主变噪声最新数据与主变投运时噪声数据对比

Table 6 Comparison of the latest data of main change noise during subway operation period with the noise data of main change put into operation dB						
相位	2010年 (地铁运行期)		2021年 (地铁运行期)		2021年 (地铁停运期)	
	噪声 最大值	噪声 平均值	噪声 最大值	噪声 平均值	噪声 最大值	噪声 平均值
A相	82.4	81.2	97.8	95.5	80.1	76.3
B相	79.8	84.7	96.9	95.6	74.7	73.1
C相	83.6	81.1	95.3	93.6	77.2	75.8

箱体靠近高压套管侧一点噪声值在轨道交通正常运行、高峰运行和停运后的噪声频域比较图见图12,从图12可以看出,噪声的频谱分布变化的规律:①噪声频谱主要集中在200~1 000 Hz;②轨道交通停运后变压器的噪声下降了大约10 dB,但是直流引起的频谱分量并没有随着轨道交通的停运和噪声的下降而消失,因为存在背景噪声。

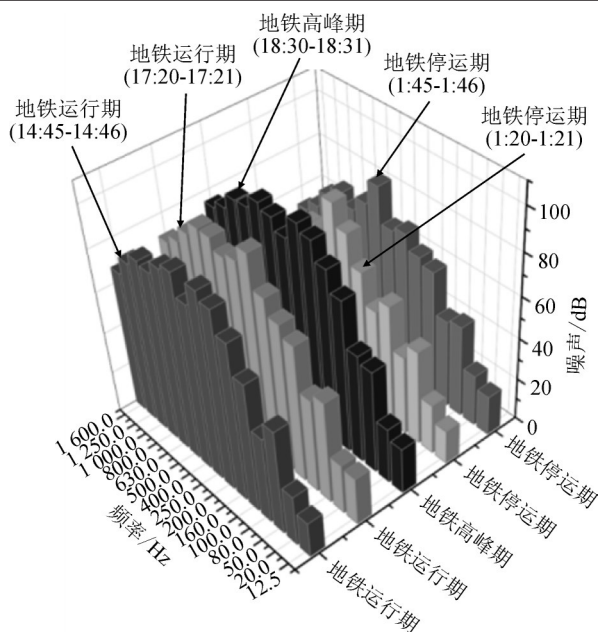


图12 噪声幅值的频域比较

Fig. 12 Comparison of the frequency domain of the noise amplitudes

4 轨道交通运行对500 kV变压器各物理量同步变化的影响

为进一步证明轨道交通运行对变压器中性点电流、振动和噪声的影响,利用FLUKE功率测量仪对距离该500 kV变压器最近的地铁牵引变电站功率与该变压器中性点直流、振动和噪声进行同步测量、对比分析。考虑到四者的单位不同,首先利用归一化的方法将该变压器中性点直流、振动和噪声数据归一化,比较结果见图13。

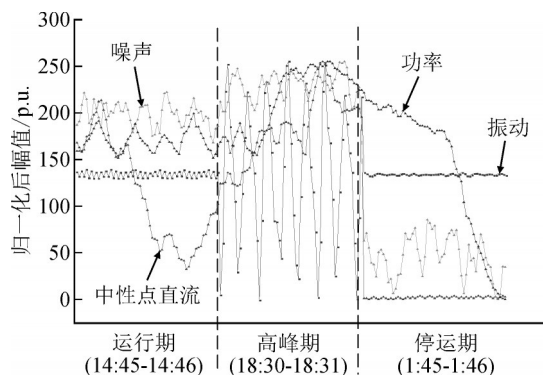


图13 附近轨道交通功率与500 kV变压器中性点电流、振动和噪声同步变化规律图

Fig. 13 Synchronous change of current, vibration and noise near 500 kV transformer

从图13可以看出:在一天之内的特定时间,500 kV变压器的中性点直流、振动和噪声的变化和附近轨道交通负荷功率变化呈一致的变化趋势,即在下午正常运行时间段,轨道交通功率、变压器中性点直流、振动和噪声4个物理量都保持较低的值;

傍晚下班时间,轨道交通功率上升,测试变压器的中性点直流、振动和噪声也随之增加;深夜轨道交通运行停止后各物理量都趋于零或者较小的值。

5 结论

文中对上海市轨道交通沿线的一台 500 kV 自耦变压器在一天之内的不同时间段,正常时间段(14:45-14:46,17:20-17:21)、晚高峰(18:30-18:31)、轨道交通运行停止后(1:20-1:21,1:45-1:46)进行了中性点电流、振动和噪声的多物理量同步测量,研究了轨道交通运行引起的杂散电流对变压器直流偏磁运行的影响,结论如下:

1)轨道交通正常运行、高峰运行和停运后 500 kV 变压器的中性点直流、振动和噪声的变化和轨道交通负荷功率变化呈正相关的变化趋势,排除当天电磁暴和直流输电单极大地运行的影响,可以证明轨道交通运行引起的杂散电流会影响变压器的中性点直流、振动和噪声特性。

2)被测试的 500 kV 变压器中性点直流会因轨道交通负荷的增加而增加,随着轨道交通的停运中性点直流逐步趋于 0,中性点直流呈现和轨道交通运行特点相一致的周期性和冲击性特点。文中所测的变压器流入中性点的直流最高可达 42.8 A。

3)轨道交通运行会导致沿线变压器的振动呈现周期性的偏振现象,且振动加剧。变压器的振动幅值和频谱分布随着轨道交通正常、高峰和停运状态的改变而改变,轨道交通负荷越大,沿线变压器振动越剧烈;轨道交通停运时振动幅值变小,相应直流分量引起的振动频谱消失。

4)轨道交通运行会导致沿线变压器的噪声大幅增加,变压器轨道交通高峰期比停运期噪声值增加了大约 10 dB;变压器 2021 年噪声值比 2020 年投运时增加了约 10 dB,且噪声随着轨道交通负荷的增加而增加。

综上,轨道交通运行引起的杂散电流会造成沿线变压器直流偏磁运行,变压器长期处于周期性、冲击性杂散直流引起的偏振状态下会导致振动噪声加剧、故障隐患增加。

参考文献:

- [1] 熊 洋,李淑庆,许 浩,等.城市轨道交通客流短时预测方法研究[J]. 电子设计工程,2022,30(1):46-50.
XIONG Yang, LI Shuqing, XU Hao, et al. Research on short-term prediction method of urban rail transit passenger flow [J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(1): 46-50.
- [2] 李宏菱.城市轨道交通车辆网络节点重要性分配优化算法研究[J]. 电子设计工程,2022,30(9):57-61.
LI Hongling. Research on optimization algorithm of node importance allocation in urban rail transit vehicle network [J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(9): 57-61.
- [3] 郑力中,李立颖,刘丽萍.城市轨道交通用非晶合金牵引整流干式变压器全寿命周期成本分析与评价[J]. 变压器,2022,59(9):49-53.
ZHENG Lizhong, LI Liying, LIU Liping. Life cycle cost analysis and evaluation of amorphous alloy traction rectifier dry-type transformer for urban rail traffic [J]. Transformer, 2022, 59(9): 49-53.
- [4] 潘卓洪,张 露,谭 波,等.高压直流输电入地电流在交流电网分布的仿真分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(21):110-115.
PAN Zhuohong, ZHANG Lu, TAN Bo, et al. Simulation and analysis of HVDC earth-return current's distribution in AC power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 110-115.
- [5] 李占元,赵 伟,丁 健,等.国华台山发电厂主变直流偏磁问题分析与治理[J]. 电网技术,2009,33(6):33-38.
LI Zhanyuan, ZHAO Wei, DING Jian, et al. Analysis and reformation on DC bias in main transformer of Guohua Taishan power plant [J]. Power System Technology, 2009, 33(6): 33-38.
- [6] 章 彬,黄炜昭,陈 潇.直流偏磁对深圳电网主变压器的影响及抑制措施的研究[J]. 陕西电力,2014, 42(12): 69-72.
ZHANG Bin, HUANG Weizhao, CHEN Xiao. Probe into impacts of DC magnetic bias on main transformer in Shenzhen power grid and its countermeasures [J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(12): 69-72.
- [7] 中国城市轨道交通协会资源经营专业委员会.2017年城市轨道交通资源经营年报[J]. 城市轨道交通,2019(1): 16-29.
Resources Management Professional Committee of China Urban Rail Transit Association. 2017 annual report of urban rail transit resource management [J]. Urban Rail Transit, 2019(1): 16-29.
- [8] 郭志广,贾跟卯,王振刚,等.城轨杂散电流对电缆互联城网变压器的影响与治理[J]. 变压器,2022, 59(10): 16-25.
GUO Zhiguang, JIA Genmao, WANG Zhengang, et al. Urban rail stray current effects and mitigation for transformers of cable interconnected urban power grid [J]. Transformer, 2022, 59(10): 16-25.
- [9] 李永刚,李锦萍,袁慧梅.地铁杂散电流模拟实时监测系统[J]. 中国铁道科学,2005,26(5):119-122.
LI Yonggang, LI Jinping, YUAN Huimei. Study on the real-time monitoring system of laboratory simulation of metro stray current [J]. China Railway Science, 2005, 26(5): 119-122.
- [10] 刘 燕,王京梅,赵 丽,等.地铁杂散电流分布的数学模型[J]. 工程数学学报,2009(4):571-576.

- LIU Yan, WANG Jingmei, ZHAO Li, et al. Mathematical model of the subway stray current distribution[J]. Chinese Journal of Engineering Mathematics, 2009(4):571-576.
- [11] 李 威. 地铁杂散电流的监测与防治[J]. 城市轨道交通研究, 2003, 6(4):48-52.
- LI Wei. The monitor and control system of stray current corrosion in metro[J]. Urban Mass Transit, 2003, 6(4): 48-52.
- [12] 李嘉成. 城市轨道交通杂散电流分布特性及仿真研究[D]. 成都:西南交通大学, 2017.
- LI Jiacheng. Characteristics of stray current distribution of urban rail transit[D]. Chengdu: Southwestern Jiaotong University, 2017.
- [13] 李 强, 叶红枫, 山江川, 等. 直流偏磁对变电站设备的影响分析及抑制方法[J]. 电测与仪表, 2016, 53(13): 75-78.
- LI Qiang, YE Hongfeng, SHAN Jiangchuan, et al. Analysis of DC partial magnetic influence on substation equipment [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53 (13):75-78.
- [14] 肖 华, 吴广宁, 蒋 伟, 等. 基于有限元法的单相变压器直流偏磁仿真研究[J]. 高压电器, 2010, 46(9):39-42.
- XIAO Hua, WU Guangning, JIANG Wei, et al. Simulation of DC bias of single-phase transformer based on FEM[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(9):39-42.
- [15] 刘味果, 周卫华, 叶会生, 等. 长沙地铁轨道交通对交流电网的影响及治理措施的研究[J]. 湖南电力, 2017, 37(1):7-9.
- LIU Weiguo, ZHOU Weihua, YE Huisheng, et al. Research on influence and control measures of metro rail transit on AC network in Changsha[J]. Hunan Electric Power, 2017, 37(1):7-9.
- [16] 谢志平, 姜益民, 魏本刚, 等. 大型电力变压器直流偏磁试验研究[J]. 变压器, 2011, 48(11):23-26.
- XIE Zhiping, JIANG Yimin, WEI Bengang, et al. Test and research on DC bias of large power transformer[J]. Transformer, 2011, 48(11):23-26.
- [17] 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.
- [18] 欧小冬, 方善臣, 李 英, 等. 500 kV 发电机单相变压器直流偏磁噪声试验[J]. 变压器, 2017, 54(4):46-52.
- OU Xiaodong, FANG Shanchen, LI Ying, et al. 500 kV single phase generator transformer DC bias noise level test [J]. Transformer, 2017, 54(4):46-52.
- [19] 韩玉莹, 姚田彪, 孙其凯, 等. 直流偏磁对变压器运行噪声的影响分析[J]. 变压器, 2022, 59(6):65-69.
- HAN Yuying, YAO Tianbiao, SUN Qikai, et al. Analysis on influence of DC bias on transformer operation noise[J]. Transformer, 2022, 59(6):65-69.
- [20] 张长庚, 田亚坤, 李永建, 等. 谐波及直流偏磁下变压器叠片式磁屏蔽杂散损耗模拟与验证[J]. 电工技术学报, 2022, 37(15):3733-3742.
- ZHANG Changgeng, TIAN Yakun, LI Yongjian, et al. Modeling and validation of stray-field loss in laminated magnetic shield of transformer under harmonics and DC bias[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(15):3733-3742.
- [21] 王子昂, 孟润泉, 韩肖清. 微电网与配电网间串联补偿变压器直流偏磁抑制策略研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(1):127-133.
- WANG Ziang, MENG Runquan, HAN Xiaoqing. Research on DC bias suppression strategy of series compensation transformer between micro-grid and distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 127-133.
- [22] 李 雷, 刘楠康, 曾 文, 等. 轨道交通杂散电流在复杂地质条件下的分布[J]. 广东电力, 2019, 32(8):133-140.
- LI Lei, LIU Nankang, ZENG Wen, et al. Distribution of rail transit stray current under complex geological conditions[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(8):133-140.
- [23] 赵小军, 晋志明, 王 刚, 等. 采用复指数的频域分解算法及其在三相变压器非对称直流偏磁分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4):1206-1214.
- ZHAO Xiaojun, JIN Zhiming, WANG Gang, et al. Analysis of three-phase transformer under asymmetrical DC bias by using frequency-domain decomposition based on complex exponential[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4):1206-1214.
- [24] 庞源冰, 李群湛. 城市轨道交通杂散电流研究[D]. 成都:西南交通大学, 2008.
- PANG Yuanbing, LI Qunzhan. Study on stray current of urban rail transit [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [25] ZIRKA S E, MOROZ Y I, HØIDALEN H K, et al. Practical experience in using a topological model of a core-type three-phase transformer: No-load and inrush conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(4):2081-2090.
- [26] BOTELE D H, BRADLEY E. On the interaction of power transformers and geomagnetically induced currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5):2188-2195.
- [27] 师泯夏, 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):20-36.
- SHI Minxia, WU Bang, JIN Yuhui, et al. Review on the influence of DC bias on transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7):20-36.

陈 璐(1987—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为一次设备监测评估与试验研究(E-mail: 9602236@qq.com)。

李晓华(1974—), 女, 工学博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电气设备振动噪声溯源、状态检测、智能治理等研究(通信作者)(E-mail: lixiaohua96@126.com)。