

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.05.011

# 在运换流变压器噪声特性及噪声预测方法

何国阳<sup>1</sup>, 汲胜昌<sup>1</sup>, 祝令瑜<sup>1</sup>, 张凡<sup>1</sup>, 宋德鑫<sup>1</sup>, 王绿<sup>2,3</sup>

(1. 西安交通大学(电工材料电气绝缘全国重点实验室), 陕西 西安 710049; 2. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 陕西 西安 710199; 3. 国网(西安)环保技术中心有限公司, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 由于谐波的存在, 换流变压器与普通变压器的噪声特性差异较大。目前谐波对噪声的影响机理尚不明确, 因此有必要研究换流站谐波对换流变压器噪声的影响规律。文中研制换流变压器运行工况和辐射噪声的监测系统, 通过理论研究、仿真分析和噪声监测数据分析, 总结换流变压器空载噪声和负载噪声特性; 根据换流变压器在不同负载情况下的噪声数据, 阐明换流变压器在不同负载情况下的噪声变化规律, 基于此规律得出换流变压器的噪声预测方法。研究表明: 与普通变压器噪声相比, 换流变压器特定负载情况下的噪声主要集中在更高频率上; 换流变压器空载噪声的高频分量主要由铁心磁化过程的非线性特性产生, 与电压谐波关系不大; 换流变压器负载噪声的高频分量与电流谐波关系很大, 而人耳对高频噪声更加敏感, 且基于换流变压器模态特性分析可知, 400 Hz 噪声的 A 计权声压级最大; 400 Hz 噪声的 A 计权声压级随电流变化明显且呈正相关, 其他频率噪声的 A 计权声压级变化不明显, 基于此特点得出的噪声预测公式平均误差为 0.23 dB, 能够很好地预测换流变压器噪声。研究结果可为换流变压器噪声试验提供指导, 同时可为在运换流变压器噪声预测提供技术支撑。

**关键词:** 换流变压器; 谐波; 有限元分析; 空载噪声; 负载噪声; 噪声预测

**中图分类号:** TM41

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2025)05-0117-11

## 0 引言

随着负荷需求的增加和能源与负荷逆向分布的凸显, 高压直流输电凭借其大容量和远距离输电的优势得以迅速发展<sup>[1-5]</sup>。其中, 换流变压器作为换流站内的核心电力设备, 在整流和逆变环节起重要作用<sup>[6-9]</sup>。但同时, 换流变压器又是换流站内的主要噪声源, 不仅声功率大而且数量多<sup>[10-11]</sup>, 对换流站的整体噪声水平影响很大。与普通变压器不同, 换流变压器阀侧与大量非线性电力电子设备相连, 要承受更多的谐波电压和谐波电流, 产生的噪声更大且更加复杂<sup>[12-15]</sup>, 因此有必要对在运换流变压器的噪声特性进行研究。

目前, 国内外学者针对普通电力变压器的噪声已经做了大量研究, 包括模型建立<sup>[16]</sup>、空载与短路噪声特性分析<sup>[17]</sup>、仿真研究<sup>[18]</sup>、降噪措施<sup>[19-22]</sup>等方面。同时, 研究了噪声在负载不平衡<sup>[23]</sup>、直流偏磁<sup>[16]</sup>、不同温度<sup>[24]</sup>等条件下的变化规律, 而关于谐波对变压器噪声的影响也逐渐展开研究<sup>[25-27]</sup>。文献<sup>[25]</sup>测试了大连马场 220 kV 变电站一号主变谐波电压和谐波电流, 发现主变低压侧二次谐波电流超过国家标准限制是导致变压器噪声增大的主要

原因。文献<sup>[26]</sup>开展了间谐波激励下铁心噪声试验, 并对间谐波激励下的铁心噪声进行仿真计算, 发现相比于工频激励, 间谐波激励下铁心的噪声值更大。文献<sup>[27]</sup>对变压器施加不同含量谐波电流, 发现谐波负载条件下, 变压器噪声信号频谱特性更加复杂, 噪声水平随负载谐波含量增加而升高。与普通电力变压器不同, 换流变压器绕组中含有大量谐波, 电流总畸变率在 30% 左右<sup>[28]</sup>, 目前换流变压器研究主要集中在振动方面, 针对噪声方面的研究较少。在振动方面, 主要包括铁心振动<sup>[29-31]</sup>、绕组振动<sup>[32-35]</sup>、油箱振动<sup>[36-39]</sup>, 这些研究基本基于仿真和实验室试验, 其施加的激励条件和所用的换流变压器模型与现场运行的换流变压器有较大差异, 仅有文献<sup>[37]</sup>基于现场实测数据开展研究, 结果表明, 与普通电力变压器振动主要集中在 100 Hz 不同, 换流变压器特定位置的振动主要集中在 200 Hz 和 400 Hz。在噪声方面, 文献<sup>[40]</sup>通过试验研究了谐波磁通与换流变压器噪声之间的关系, 认为换流变压器铁心中的谐波磁通是造成其噪声高于电力变压器的主要因素。上述研究表明, 换流变压器的运行工况比普通变压器更加复杂, 谐波是造成其噪声高于电力变压器的主要因素。然而, 谐波对噪声的影响机理以及换流变压器的噪声特性还不明晰, 因此有必要针对现场在运换流变压器开展噪声方面的相关研究。

收稿日期: 2025-01-16; 修回日期: 2025-03-30

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(5200-20223 2087A-1-1-ZN)

为充分研究在运换流变压器的噪声特性,文中研制换流变压器运行工况和辐射噪声的监测系统,基于监测系统测量3个换流站多台换流变压器的运行工况和噪声;分析换流变压器绕组谐波电压、谐波电流特性,结合测量数据、理论和仿真,分析换流变压器空载噪声和负载噪声特性;总结换流变压器在不同负载情况下的噪声变化规律,基于此规律得出换流变压器的噪声预测方法。研究结果对于开展换流变压器的噪声试验具有指导意义。

### 1 换流变压器噪声特性理论分析

换流变压器在运行过程中,其电压、电流不仅包含工频分量,还含有许多不同幅值和频率的谐波分量。这些谐波分量使铁心的磁致伸缩和绕组的电磁力更加复杂,会激发换流变压器产生多种频率的振动,进而带动油箱外表面的空气层,向空气中辐射可听噪声。其中,由铁心磁致伸缩产生的噪声为空载噪声,由绕组电磁力产生的噪声为负载噪声,可见换流变压器噪声的源头为铁心的磁致伸缩和绕组的电磁力。因此,可通过铁心的磁致伸缩特性和绕组的电磁力特性分别分析换流变压器的空载噪声特性和负载噪声特性。

#### 1.1 空载噪声特性分析

在谐波叠加的情况下,换流变压器绕组两端的电压包括基波和谐波,该电压会在铁心中感应出相应的磁通,在磁场的作用下铁心因磁致伸缩而产生振动,并向外辐射声压。铁心辐射声压与电压之间的关系<sup>[10]</sup>如下:

$$p_c(t) = -\frac{m_c \varepsilon_s L}{S_c (NS B_s)^2} \left[ 2 \sum_{i=1}^K \hat{U}_i^2 \cos(2\omega_i t + 2\varphi_i) + \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=i+1}^K \frac{\hat{U}_i \hat{U}_j}{ij} (i-j)^2 \cos((\omega_i - \omega_j)t + \varphi_i - \varphi_j) + \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=i+1}^K \frac{\hat{U}_i \hat{U}_j}{ij} (i+j)^2 \cos((\omega_i + \omega_j)t + \varphi_i + \varphi_j) \right] \quad (1)$$

式中:  $p_c(t)$ 为铁心振动产生的声压;  $m_c$ 为铁心等效质量;  $\varepsilon_s$ 为铁心硅钢片饱和时的磁致伸缩率;  $L$ 为铁心硅钢片原始尺寸;  $S_c$ 为铁心等效受力面积;  $N$ 为绕组线圈匝数;  $S$ 为铁心横截面积;  $B_s$ 为饱和磁感应强度;  $i, j$ 为谐波次数;  $K$ 为谐波总数;  $\hat{U}_i, \hat{U}_j$ 分别为  $i, j$ 次谐波电压幅值;  $\omega_i, \omega_j$ 分别为  $i, j$ 次谐波角频率;  $\varphi_i, \varphi_j$ 分别为  $i, j$ 次谐波相位角。

以基波电压叠加 250 Hz 谐波电压为例,说明由铁心振动产生的声压情况。图 1 为换流变压器空载噪声特性示意,其中  $f_i, f_j$  分别为  $i, j$  次谐波频

率;  $p_w$  为声压。由式(1)和图 1 可知,当网侧绕组承载电压中存在各次谐波时,换流变压器空载噪声的声压非常复杂,声压频率为电压频率的倍频、差频、和频,声压幅值不仅与电压幅值有关,还与谐波次数有关。

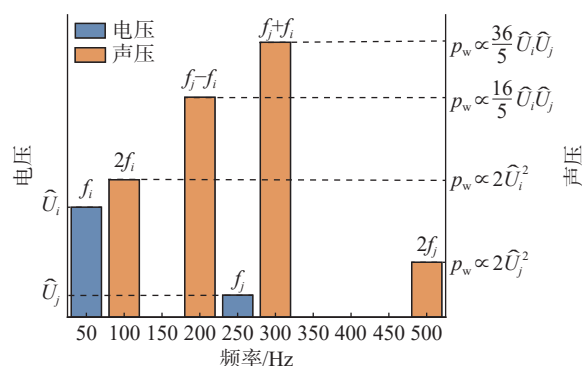


图 1 换流变压器空载噪声特性示意  
Fig.1 Schematic diagram of converter transformer no-load noise characteristics

#### 1.2 负载噪声特性分析

在谐波叠加的情况下,换流变压器绕组流过的负载电流包括基波和谐波,该电流会在绕组附近产生漏磁通,通有交变电流的绕组线圈在漏磁场的作用下会产生电磁力,从而引起绕组振动并向外辐射声压。绕组辐射声压与电流之间的关系如下<sup>[10]</sup>:

$$p_w(t) = \frac{m_w a_w}{S_w} = \frac{m_w k_a k_B}{S_w} \left( \frac{1}{2} \sum_{i=1}^K \hat{I}_i^2 \sin\left(2\omega_i t + 2\varphi_i - \frac{\pi}{2}\right) + \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=i+1}^K \hat{I}_i \hat{I}_j \sin\left((\omega_i - \omega_j)t + \varphi_i - \varphi_j + \frac{\pi}{2}\right) + \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=i+1}^K \hat{I}_i \hat{I}_j \sin\left((\omega_i + \omega_j)t + \varphi_i + \varphi_j - \frac{\pi}{2}\right) \right) \quad (2)$$

式中:  $m_w$ 为绕组等效质量;  $a_w$ 为绕组振动加速度;  $S_w$ 为绕组等效受力面积;  $k_a$ 为绕组加速度系数;  $k_B$ 为绕组漏磁场系数;  $\hat{I}_i, \hat{I}_j$ 分别为  $i, j$ 次谐波电流幅值。

以基波电流叠加 250 Hz 谐波电流为例,说明由绕组振动产生的声压情况。由式(2)可知,负载噪声特性和空载噪声特性类似,当绕组中存在各次谐波时,换流变压器负载噪声的声压非常复杂,声压频率为电流频率的倍频、差频、和频,声压幅值为正比电流的平方或电流的乘积。

### 2 数据和运行工况的获取

为研究换流变压器在不同运行工况下的噪声特性,需要对换流站现场运行的换流变压器噪声信

号和运行工况(如换流变压器的电压和电流、网侧和阀侧绕组的谐波、负载功率)进行长时间的测量和分析,所以有必要研制一套针对换流变压器运行工况和辐射噪声的监测系统。

### 2.1 噪声监测系统介绍

换流变压器运行工况和辐射噪声监测系统由硬件和软件两部分组成。硬件包括工业控制计算机、电能质量分析仪、信号线、电容型传声器。工业控制计算机属于监测系统的核心部分,负责采集噪声信号和处理数据。PW3198型电能质量分析仪具有高精度、宽频带、宽量程、准确测量的优点,可以同时测量功率、谐波和异常现象的全部波形,并记录电流、电压、功率、功率因数、频率、累计功率、谐波等参数,负责监测换流变压器的运行工况,其参数如表1所示。信号线用于连接电容型传声器和工业控制计算机,由同轴电缆制成,具有较强的抗电磁干扰性能。电容型传声器具有轻盈小巧、噪声测量范围广和灵敏度高优势,其参数如表2所示。基于LabVIEW平台搭建的噪声在线监测与诊断系统软件具有信号采集、数据处理、监测诊断、历史数据查看等功能。同时,换流变压器运行工况和辐射噪声监测系统具有较高的稳定性和抗干扰能力,能够准确测量运行工况和辐射噪声数据,从而全面监测换流变压器状态。

表1 电能质量分析仪参数

Table 1 Power quality analyzer parameters

| 参数         | 数值      |
|------------|---------|
| 电压量程/V     | 0~600   |
| 电流量程/A     | 0~5 000 |
| 电压精度/%     | ±0.1    |
| 电流精度/%     | ±0.2    |
| 最高可测频率/kHz | 80      |

表2 电容型传声器参数

Table 2 Capacitive microphone parameters

| 参数       | 数值           |
|----------|--------------|
| 型号       | GRAS-40pp-10 |
| 频率响应/kHz | 10~20        |
| 动态范围/dB  | 33~128       |
| 本底噪声/dB  | <16          |

### 2.2 噪声监测系统的安装与测点的选择

为研究不同联结组别的换流变压器噪声特点以及同一台换流变压器在不同工况下的噪声特点,将换流变压器运行工况和辐射噪声监测系统分别安装在3个±800 kV换流站上。第一个换流站的换

流变压器运行功率较低;第二个换流站的换流变压器运行功率很高;第三个换流站的换流变压器运行功率变化幅度较大。所有换流变压器的传声器布点均相同,如图2所示。在换流变压器的box-in降噪结构内总共布置12个测点,12个测点距离换流变压器轮廓线1 m,在换流变压器油箱高度的1/3和2/3处分别布置6个测点,每个高度的6个测点均匀分布。

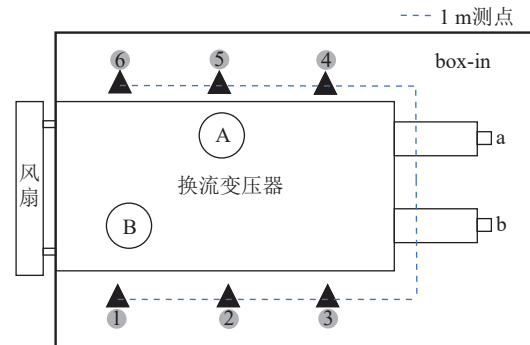


图2 传声器测点分布

Fig.2 Distribution of microphone measuring points

## 3 换流变压器噪声特性

### 3.1 换流变压器电压、电流谐波特性

以第一个换流站的极1高端YY联结A相换流变压器为例,研究换流变压器电压、电流谐波特点。当该换流变压器的运行功率为115 MW、网侧电压为294 kV、网侧电流为448 A时,换流变压器网侧电压、电流波形分别如图3、图4所示。

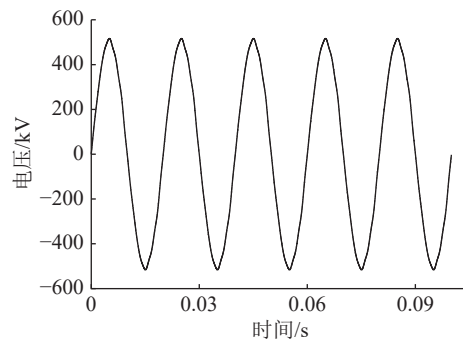


图3 极1高端YY联结换流变A相网侧电压时域

Fig.3 Time domain of phase A grid-side voltage of pole 1 high-voltage YY-connected converter transformer

从图3和图4可知,换流变压器网侧电压畸变率低,接近正弦波,而电流畸变率高,波形呈阶梯形状分布且波形毛刺较多。为进一步了解换流变压器网侧电压和电流的组成,对该波形进行离散傅里叶变换,得到电压、电流的频谱成分,分别如图5、图6所示。

从图5和图6可知,换流变压器网侧电压主要

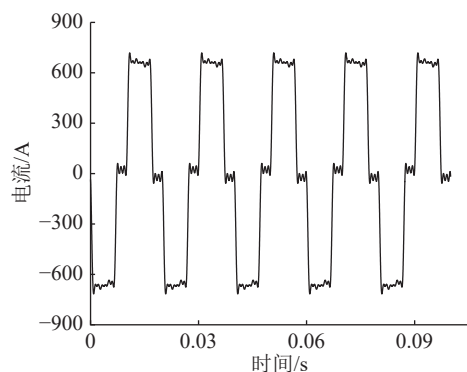


图4 极1 高端 YY 联结换流变 A 相网侧电流时域

Fig.4 Time domain of phase A grid-side current of pole 1 high-voltage YY-connected converter transformer

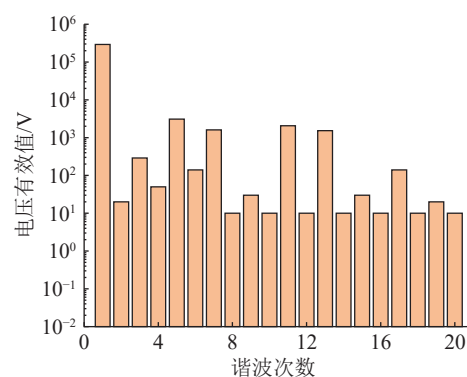


图5 极1 高端 YY 联结换流变 A 相网侧电压频域

Fig.5 Frequency domain of phase A grid-side voltage of pole 1 high-voltage YY-connected converter transformer

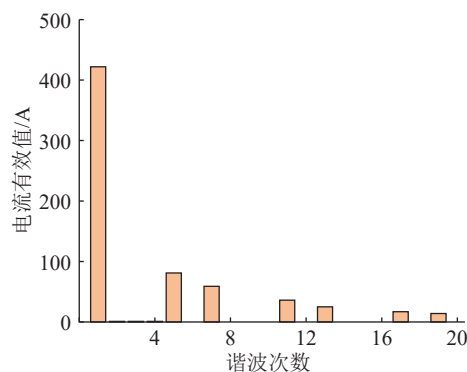


图6 极1 高端 YY 联结换流变 A 相网侧电流频域

Fig.6 Frequency domain of phase A grid-side current of pole 1 high-voltage YY-connected converter transformer

以基波为主, 谐波幅值较低, 谐波中主要含有 5 次、7 次、11 次和 13 次谐波, 其中 5 次谐波大致占基波的 1.06%, 7 次谐波大致占基波的 0.55%; 换流变压器网侧电流谐波含量丰富, 5 次、7 次、11 次和 13 次谐波幅值较高, 但含量依次减小, 其中 5 次谐波含量大致占基波的 20%, 7 次谐波含量大致占基波的 14%。

根据换流变压器噪声特性理论分析可知, 当电压中存在 5 次和 7 次谐波时, 换流变压器的空载噪

声中将会存在 100、200、300、400、500、700 Hz 的频率成分。由于 700 Hz 频率成分的噪声主要由 7 次谐波的倍频产生, 与谐波电流和基波电流相互作用产生的噪声相比较小, 因此 700 Hz 的空载噪声可以忽略不计。当电流中存在 5 次和 7 次谐波时, 换流变压器的负载噪声中将会存在 100、200、300、400、500、700 Hz 的频率成分, 而 7 次谐波本身含量较低, 因此 700 Hz 的负载噪声可以忽略不计。故在研究换流变压器的噪声时, 只需要考虑 500 Hz 及 500 Hz 以下的频率成分, 其他频率成分含量较低, 可以忽略不计。

### 3.2 换流变压器空载噪声特性

第一个换流站负载功率低, 负载率约为 20%, 可以认为换流变压器产生的噪声主要是空载噪声。测量极 1 低端不同联结组别的 6 台换流变压器噪声, 所得结果如图 7 所示。

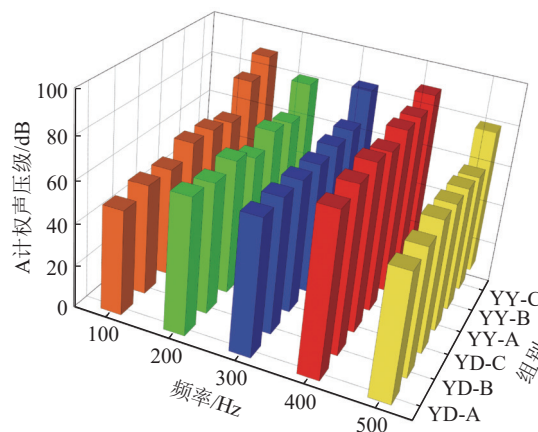


图7 第一个站换流变压器噪声频谱

Fig.7 Noise spectrum of the converter transformers at the first station

从图 7 可知, 不同联结组别的换流变压器噪声频谱基本一致, 100 Hz 的基波分量较低, 400 Hz 的 A 计权声压级最高。为研究换流变压器电压谐波和负载情况对空载噪声的影响, 基于有限元仿真软件, 建立换流变压器仿真模型, 设置不同的边界条件, 如表 3 所示, 通过仿真得到铁心磁通密度分布。不同加载条件下铁心柱某点磁通密度频谱如图 8 所示。

表3 仿真边界条件设置

Table 3 Condition setting of simulation boundary

| 工况       | 电压激励                         | 负载情况/ $\Omega$ |
|----------|------------------------------|----------------|
| 工频       | 76 kV(50 Hz)                 | 100            |
| 工频加谐波大负载 | 76 kV(50 Hz)+15.2 kV(250 Hz) | 100            |
| 工频加谐波小负载 | 76 kV(50 Hz)+15.2 kV(250 Hz) | 10 000         |

从图 8 可以看出, 只添加基波电压激励时, 磁

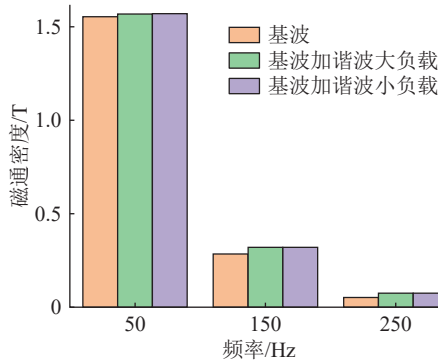


图 8 不同加载条件下铁心柱某点磁通密度频谱

Fig.8 Magnetic flux density spectrum at a certain point of the iron core column under different loading conditions

通密度频谱只包含除 50 Hz 以外的 150 Hz 和 250 Hz 分量,这是因为铁心中的磁通量与磁场强度为非线性关系,该关系使磁通频谱中存在高频分量;在工频和工频加谐波大负载以及工频加谐波小负载条件下,各频率下的铁心磁通密度差异很小。250 Hz 电压产生的 250 Hz 磁通分量远不如因铁心基波电压非线性而产生的 250 Hz 磁通分量,一方面,因为谐波含量相对于基波较小;另一方面,因为在相同大小的磁通密度下,高频率的磁通比低频率的磁通需要更高的电压。以铁心磁通最大值时刻为例,比较不同加载条件下铁心的磁通分布,如图 9—图 11 所示。

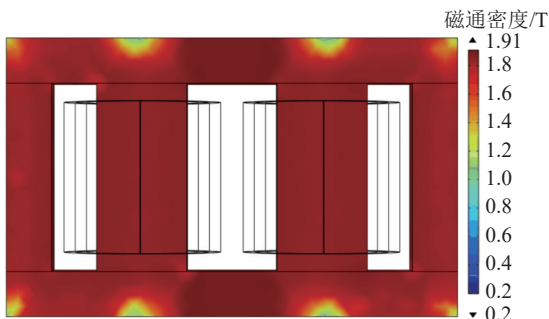


图 9 工频下铁心磁通分布

Fig.9 Magnetic flux distribution of iron core under power frequency

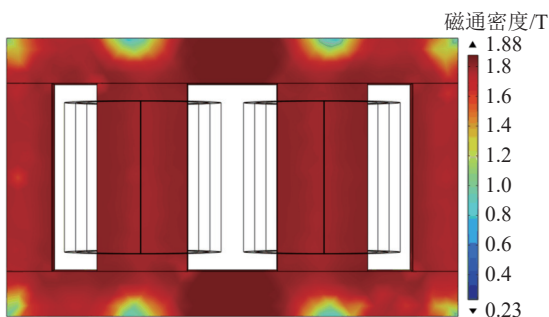


图 10 工频加谐波大负载下铁心磁通分布

Fig.10 Magnetic flux distribution of iron core under power frequency and harmonic high loads

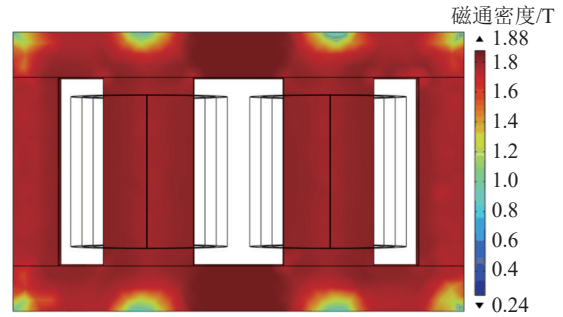


图 11 工频加谐波小负载下铁心磁通分布

Fig.11 Magnetic flux distribution of iron core under power frequency harmonic small loads

从图 9—图 11 可以看出,不同加载条件下铁心磁通分布一致。由于铁心的磁致伸缩与铁心的磁通分布密切相关,谐波电压对换流变压器铁心振动的影响较小,可以忽略。空载噪声中除 100 Hz 以外的其他分量主要由铁心的非线性特性产生。由于换流变压器运行过程中电压基本保持不变,因此可以认为其空载噪声基本不变。

### 3.3 换流变压器负载噪声特性

第二个换流站负载功率高,其工况 1 的负载率约为 90%,工况 2 的负载率约为 100%。第一个换流站的噪声在 78 dB 左右,第二个换流站的噪声在 93 dB 左右,从分贝求和的角度看,相差 10 dB 的 2 个噪声相加,结果基本等于较大的那个噪声值,因此,可认为该站换流变压器的噪声主要是负载噪声。文中测量极 1 低端不同联结组别的 6 台换流变压器在 2 种工况下的噪声,其噪声结果如图 12 所示。图 13 为换流变压器电流频谱。

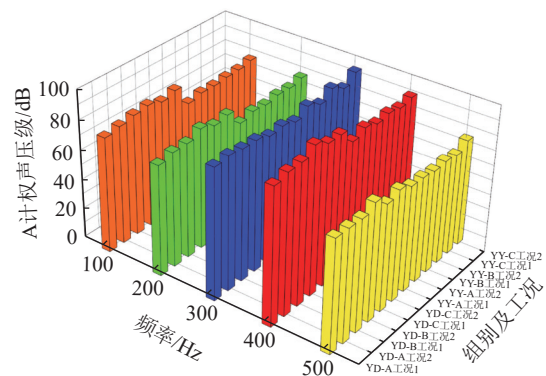


图 12 第二个站换流变压器噪声频谱

Fig.12 Noise spectrum of the converter transformers at the second station

从图 12、图 13 可以看出,电流谐波大小随着基波的变化而变化,5 次谐波大致占基波的 20%,7 次谐波大致占基波的 14%,其他电流谐波含有量极低;400 Hz 的 A 计权声压级最大,换流变压器负载噪声的 A 计权声压的主频率为 400 Hz。为对换流

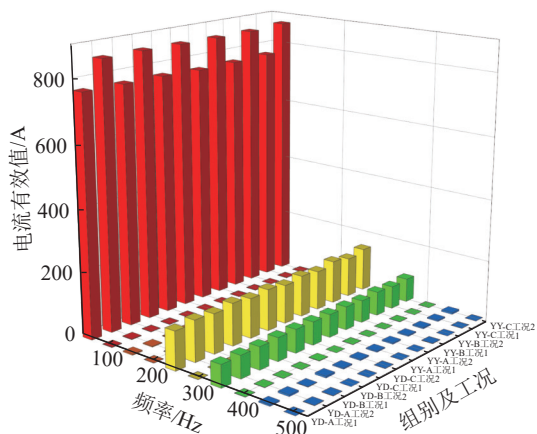


图 13 第二个站换流变压器电流频谱

Fig.13 Current spectrum of the converter transformers at the second station

变压器负载噪声频谱理论进行分析,基于电流谐波的成分以及绕组电磁力理论,得出电流基波和谐波相互作用时的电磁力频率、大小以及相位,结果如图 14—图 16 所示。

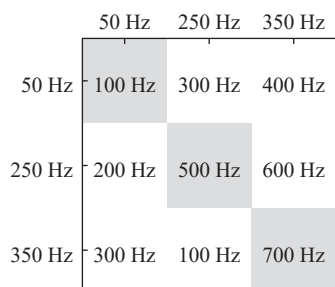


图 14 电流谐波产生电磁力的频率

Fig.14 The frequency of electromagnetic force generated by current harmonics

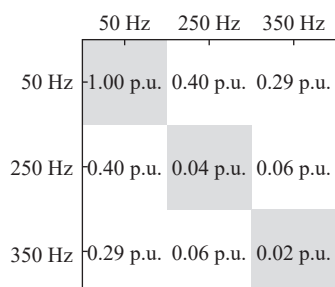


图 15 电流谐波产生电磁力的大小

Fig.15 The magnitude of electromagnetic force generated by current harmonics

图 14—图 16 中,矩阵的主对角线表示某一频率电流产生的倍频电磁力,矩阵的下三角表示某 2 个频率电流产生的差频电磁力,矩阵的上三角表示某 2 个频率电流产生的和频电磁力。图 15 中,电磁力的大小均以 100 Hz 的电磁力为基准进行归一化处理。从图 15 可知,第一行和第一列是电流谐波与基波相互作用产生的电磁力,与其他电磁分

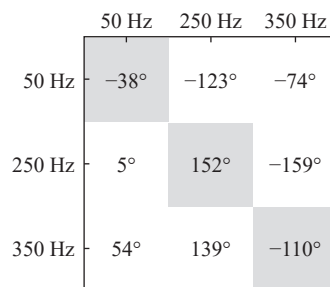


图 16 电流谐波产生电磁力的相位

Fig.16 The phase of electromagnetic force generated by current harmonics

量相比较,将主导相关的负载噪声频谱。由于电流谐波的幅值相对于基波电流较小,谐波电流之间相互作用产生的倍频、差频以及和频电磁力较小,可以忽略不计。100 Hz 的电磁力最大,但 100 Hz 的 A 计权声压级却并不大,主要原因有:一方面,由于人耳对不同频率的噪声敏感度不同,在进行 A 计权时需要对 100 Hz 的声压级减去 19.14 dB;另一方面,在设计换流变压器时,为了避免在 100 Hz 时产生共振,换流变压器的固有频率远离 100 Hz,在这种情况下,即使电磁力很大,产生的振动噪声也比较小。尽管在 200 Hz 处电磁力较大,但 A 计权声压级却并不高,其原因与 100 Hz 处的情况类似。300 Hz 的电磁力分量由 250 Hz 和 50 Hz 的和频以及 350 Hz 和 50 Hz 的差频产生,由图 16 可知,这 2 个电磁力的相位差接近 180°,使得部分 300 Hz 的电磁力被抵消,所以 300 Hz 的噪声并不大。400 Hz 的电磁力不大,在进行 A 计权时其声压级只需要减去 4.77 dB,使 400 Hz 成为负载噪声的主频率。

### 3.4 不同运行工况下噪声变化特性分析

第三个换流站负载变化幅度较大,负载较低时负载率为 20%,负载较高时负载率为 50%,通过测量该站的换流变压器在不同运行工况下的噪声特性,分析其噪声变化特性。文中测量该站极 1 高端 YD 联结换流变 A 相和极 1 高端 YY 联结换流变 A 相 2 台换流变压器的噪声,换流变压器具体参数如表 4 所示。极 1 高端 YY 联结换流变 A 相的噪声结果如图 17 所示。

从图 17 可以看出,在频率 100、200、300、500 Hz 上,A 计权声压级随电流变化不明显;100、200、300 Hz 时的 A 计权声压级差别不大,500 Hz 时的 A 计权声压级较小;在 400 Hz 时,随着电流的增大,A 计权声压级也增大。当电流低于 453 A(负载率为 36.24%)时,400 Hz 的 A 计权声压级较小,当电流高于 453 A 时,400 Hz 的 A 计权声压级逐渐增

表4 换流变压器参数

Table 4 Converter transformer parameters

| 参数          | 数值             |                  |
|-------------|----------------|------------------|
|             | 高端YD<br>换流变A相  | 高端YY<br>换流变A相    |
| 额定容量/(MV·A) | 396.2          | 396.2            |
| 网侧额定电压/kV   | $530/\sqrt{3}$ | $530/\sqrt{3}$   |
| 阀侧额定电压/kV   | 168.1          | $168.1/\sqrt{3}$ |
| 网侧额定电流/A    | 1 249.8        | 1 249.8          |
| 阀侧额定电流/A    | 2 356.9        | 4 082.3          |

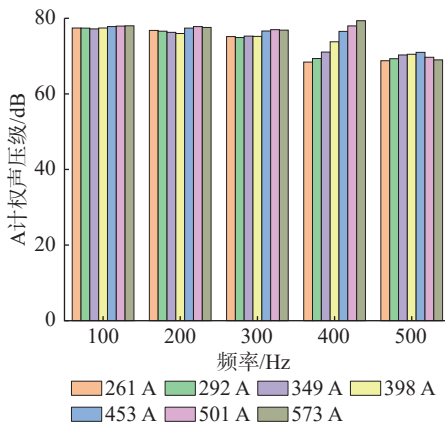


图17 噪声随负载电流变化特性

Fig.17 Characteristics of noise variation with load current 大,成为噪声的主频率。

以极1 高端 YD 联结换流变 A 相和极1 高端 YY 联结换流变 A 相为例,分析不同联结组别下换流变压器的噪声特性。在不同负载电流下,分别测量2 台换流变压器的 A 计权声压级,测量结果如图18 所示。

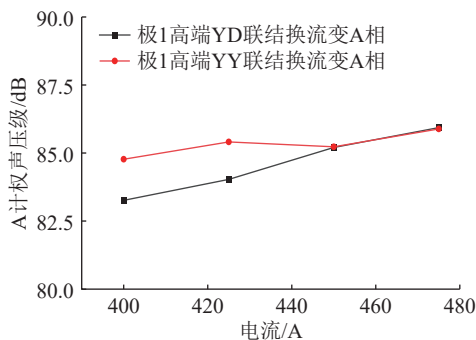


图18 不同联结组别换流变压器的噪声

Fig.18 Noise of converter transformers with different connection groups

从图18 可知,在同一负载电流下,极1 高端 YD 联结换流变 A 相和极1 高端 YY 联结换流变 A 相的噪声水平差异不超过 1.5 dB,且随着电流增大,该差异逐渐减小。因此,不同联结组别换流变压器的噪声差异不大。

## 4 换流变压器噪声预测方法

### 4.1 噪声预测方法

在运换流变压器的噪声包括空载噪声和负载噪声,其表达式为:

$$L_{Af} = L_{Acf} + L_{Alf} \quad (3)$$

式中:  $L_{Af}$  为换流变压器频率为  $f$  时的 A 计权声压级;  $L_{Acf}$  为换流变压器频率为  $f$  时的空载噪声 A 计权声压级;  $L_{Alf}$  为换流变压器频率为  $f$  时的负载噪声 A 计权声压级。

当换流变压器的负载电流分别为  $I_1$  和  $I_2$  时,换流变压器的噪声表达式为:

$$\begin{cases} L_{Af1} = L_{Acf1} + L_{Alf1} \\ L_{Af2} = L_{Acf2} + L_{Alf2} \end{cases} \quad (4)$$

由于换流变压器在不同负载电流下的空载噪声相等,对式(4)求差可得不同频率下电流差与噪声差关系,其表达式为:

$$\Delta L_{Af} = L_{Alf2} - L_{Alf1} \quad (5)$$

式中:  $\Delta L_{Af}$  为换流变压器频率为  $f$  时的 A 计权声压级差。

根据式(5)和第三个换流站的噪声数据,求解得到不同频率下电流差与噪声差之间的关系,如图19 所示。

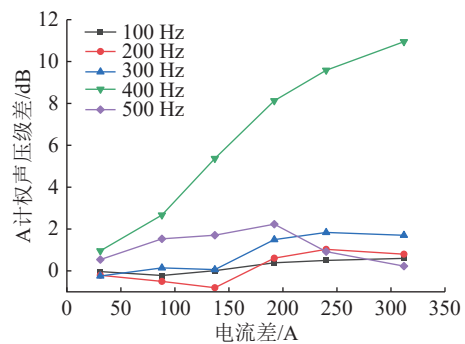


图19 不同频率下电流差与噪声差关系

Fig.19 The relationship between current difference and noise difference at different frequencies

从图19 可以看出,在频率 100、200、300、500 Hz 上, A 计权声压级随电流变化不明显,最大差值不超过 3 dB; 400 Hz 时的 A 计权声压级随电流变化明显且呈正相关。对 400 Hz 时噪声 A 计权声压级与负载率做线性拟合,结果见图20。

从图20 可以看出,决定系数  $R^2$  为 0.98,说明拟合效果很好。400 Hz 时噪声的 A 计权声压级与负载率之间的关系式如下:

$$L_{A400} = a + b\beta = 58.49 + 0.47\beta \quad (6)$$

式中:  $L_{A400}$  为 400 Hz 时的 A 计权声压级;  $\beta$  为负载

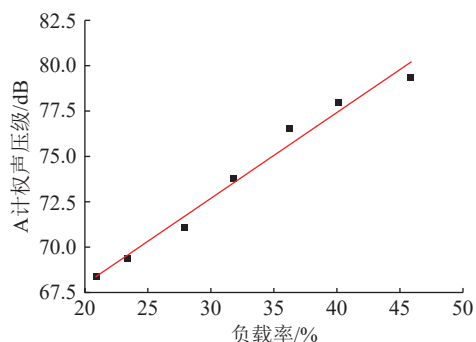


图 20 400 Hz 时噪声 A 计权声压级的负载特性  
Fig.20 Load characteristics of noise A-weighted sound pressure level at 400 Hz

率;  $a$ 、 $b$  为系数。

换流变压器总的 A 计权声压级噪声为各个频率下的叠加, 由于在频率 100、200、300、500 Hz 上, A 计权声压级随电流变化不明显, 取各个电流下的平均值代替, 计算得到换流变压器总的 A 计权声压级  $L_A$  如下:

$$L_A = 10\lg(10^{L_{A100}/10} + 10^{L_{A200}/10} + 10^{L_{A300}/10} + 10^{L_{A400}/10} + 10^{L_{A500}/10}) = 10\lg(1.55 \times 10^8 + 10^{(58.49+0.47\beta)/10}) \quad (7)$$

式中:  $L_{A100}$ 、 $L_{A200}$ 、 $L_{A300}$ 、 $L_{A500}$  分别为 100、200、300、500 Hz 时的 A 计权声压级。

#### 4.2 预测方法验证

为验证预测方法的正确性以及预测误差的大小, 测量该换流变压器在其他工况时的噪声数据。表 5 比较了预测公式计算得到的噪声值与实测值之间的大小关系, 并给出了误差大小。

表 5 噪声预测值与实测值对比

Table 5 Comparison between predicted and measured noise values

| 负载率/% | 预测值/dB | 实测值/dB | 误差/dB |
|-------|--------|--------|-------|
| 25.36 | 82.20  | 81.83  | 0.37  |
| 27.52 | 82.28  | 82.23  | 0.05  |
| 29.36 | 82.35  | 82.27  | 0.08  |
| 32.96 | 82.55  | 82.33  | 0.22  |
| 37.76 | 82.95  | 83.34  | 0.39  |
| 40.96 | 83.31  | 83.56  | 0.25  |
| 42.32 | 83.50  | 83.68  | 0.18  |
| 44.96 | 83.92  | 83.60  | 0.32  |

从表 5 可以看出, 预测值与实测值最大误差为 0.39 dB, 最小误差为 0.05 dB, 平均误差为 0.23 dB, 可见该预测方法能够很好地预测换流变压器噪声。

对于其他容量的换流变压器, 由于系数  $a$  和  $b$  可能不同, 式(6)不再适用。不过, 文献[37]指出, 随着运行功率的增加, 2 种不同容量的换流变压器

的振动主频率会由 200 Hz 变为 400 Hz, 这就意味着 400 Hz 的振动噪声受运行功率的影响变化明显。图 21 给出通过噪声试验得出该预测公式的方法。

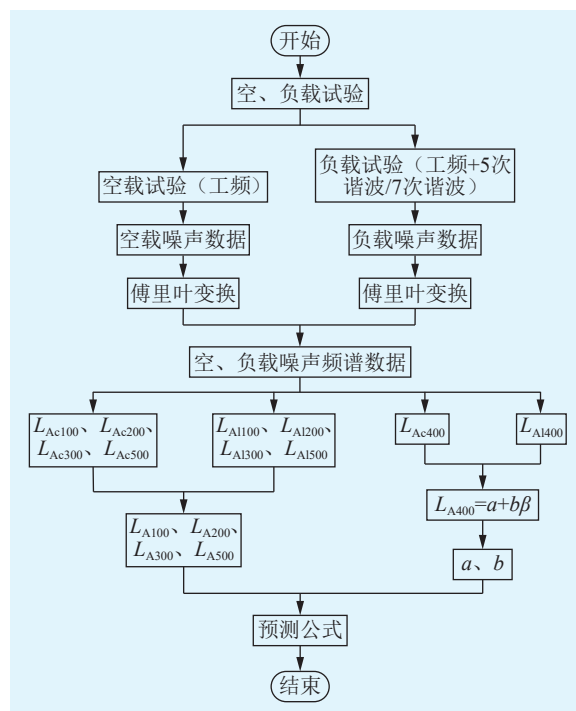


图 21 噪声预测方法流程

Fig.21 Flow chart of noise prediction method

## 5 结论

文中基于换流变压器运行工况和辐射噪声的监测系统, 采集了 3 个换流站的换流变压器运行工况和噪声数据, 分析换流变压器谐波特点、空载和负载噪声特性, 并得出换流变压器噪声预测方法。结论如下:

(1) 换流变压器网侧电压谐波畸变率低, 网侧电流谐波畸变率高, 5 次电流谐波占基波的 20% 左右, 7 次电流谐波占基波的 14% 左右, 根据电压、电流谐波与噪声频率的关系, 推导得到换流变压器的噪声频率主要为 100、200、300、400、500 Hz。

(2) 在所测的换流变压器空载噪声中, 100 Hz 的 A 计权声压级较低, 400 Hz 的 A 计权声压级最高; 仿真结果表明, 换流变压器的空载噪声中除 100 Hz 以外的其他分量主要由铁心磁化过程的非线性特性产生, 与电压谐波关系不大, 换流变压器运行过程中电压基本保持不变, 可以认为在运换流变压器的空载噪声基本保持不变。

(3) 与普通变压器不同, 由于谐波电流的存在, 所测换流变压器负载噪声的 A 计权声压级的主频率为 400 Hz, 100 Hz 的 A 计权声压级较小, 原因如下: 一方面, 人耳对不同频率噪声的敏感度不同, 在



进行 A 计权时需要将 100 Hz 的声压级减去 19.14 dB, 而 400 Hz 的声压级只需要减去 4.77 dB; 另一方面, 换流变压器的固有频率远离 100 Hz, 即使电磁力很大, 产生的振动噪声也比较小。因此对于换流变压器更应该关注 400 Hz 噪声, 而不是 100 Hz 噪声。

(4) 不同负载的换流变压器噪声频谱中, 100、200、300、500 Hz 时的 A 计权声压级随电流变化不明显, 最大差值不超过 3 dB; 400 Hz 时的 A 计权声压级随电流变化明显且呈正相关, 据此得出换流变压器的噪声预测公式, 通过验证发现该公式的预测误差为 0.23 dB, 能够很好地预测换流变压器噪声。

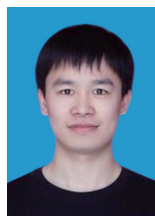
#### 参考文献:

- [1] 吴在军, 谢兴峰, 杨景刚, 等. 直流配电网电压控制技术综述[J]. *电力工程技术*, 2021, 40(2): 59-67.  
WU Zaijun, XIE Xingfeng, YANG Jinggang, et al. A review on voltage control strategies in DC distribution network[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(2): 59-67.
- [2] TZELEPIS D, PSARAS V, TSOTSOPOULOU E, et al. Voltage and current measuring technologies for high voltage direct current supergrids: a technology review identifying the options for protection, fault location and automation applications[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 203398-203428.
- [3] 李康, 黄萌, 查晓明, 等. 高压直流输电系统可靠性分析方法综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(9): 174-187.  
LI Kang, HUANG Meng, ZHA Xiaoming, et al. An overview of reliability analysis methods for an HVDC transmission system[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(9): 174-187.
- [4] 张凤鸽, 文明浩, 刘铁, 等. 特高压三端直流输电线路的动态物理模拟[J]. *高电压技术*, 2020, 46(6): 2064-2071.  
ZHANG Fengge, WEN Minghao, LIU Tie, et al. Establishment of dynamic physical model of three-terminal UHV DC transmission line[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(6): 2064-2071.
- [5] CUI Y, SONG X, ZHAO L X, et al. WSN-based measurement of ion-current density under high-voltage direct current transmission lines[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 10947-10955.
- [6] 杜伯学, 朱闻博, 李进, 等. 换流变压器阀侧套管油纸绝缘研究现状[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(6): 1300-1309.  
DU Boxue, ZHU Wenbo, LI Jin, et al. Research status of oil-paper insulation for valve side bushing of converter transformer[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(6): 1300-1309.
- [7] GAO Y H, LIU G W, LI Y B, et al. Study on electric field characteristics of converter transformer on valve side winding[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 130-134: 1413-1417.
- [8] 张晓宇, 郑超, 莫品豪, 等. 换流变压器阀侧接地故障分析及保护优化[J]. *电力工程技术*, 2021, 40(3): 172-178.  
ZHANG Xiaoyu, ZHENG Chao, MO Pinhao, et al. Analysis and protection optimization of grounded fault in valve side of converter transformer[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(3): 172-178.
- [9] 周秀, 陈德志, 王贺虎, 等. 换流变压器结构件涡流损耗的计算与分析[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(7): 103-108.  
ZHOU Xiu, CHEN Dezhi, WANG Hehu, et al. Analytical calculation of eddy current loss of converter transformer structural parts[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(7): 103-108.
- [10] 王世长, 祝令瑜, 吴书煜, 等. 基于电致噪声频响函数的多谐波工况下换流变压器噪声等效评估方法[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(23): 6525-6538.  
WANG Shichang, ZHU Lingyu, WU Shuyu, et al. Converter transformer noise equivalent evaluation method in multi-harmonic operating conditions based on the electro-induced noise frequency response function[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(23): 6525-6538.
- [11] 阮学云, 李志远, 魏浩征, 等. 换流变压器噪声预测模型及其简化研究[J]. *应用声学*, 2011, 30(3): 235-240.  
RUAN Xueyun, LI Zhiyuan, WEI Haozheng, et al. Studies on noise prediction model and simplification for current convert transformers[J]. *Applied Acoustics*, 2011, 30(3): 235-240.
- [12] 王栋, 詹振宇, 王伟, 等. 换流变压器振动噪声问题研究综述[J]. *电工电能新技术*, 2022, 41(11): 28-42.  
WANG Dong, ZHAN Zhenyu, WANG Wei, et al. Review on vibration and noise of converter transformer[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2022, 41(11): 28-42.
- [13] 陈生栋. 特高压换流变压器绕组谐波特性与结构优化的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.  
CHEN Shengdong. Research on harmonic characteristics and structure optimization of UHVDC converter transformer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [14] 郑欣, 马永超, 禹文静, 等. 一种换流变压器涡流损耗功率频率特性的修正方法[J]. *电测与仪表*, 2025, 62(4): 141-147.  
ZHENG Xin, MA Yongchao, YU Wenjing, et al. A correction method for the frequency dependence of eddy current loss power of converter transformer[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(4): 141-147.
- [15] 汲胜昌, 何国阳, 李丽, 等. 不同叠片接缝形式的换流变压器铁心电磁与振动特性分析[J]. *高压电器*, 2023, 59(10): 110-119, 128.  
JI Shengchang, HE Guoyang, LI Li, et al. Analysis of electromagnetic and vibration characteristics of converter transformer core with different lamination joint forms[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(10): 110-119, 128.
- [16] 潘超, 安景革, 刘闯, 等. 变压器偏磁效应噪声特性的多场耦合分析与抑制[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(18): 5077-5088.  
PAN Chao, AN Jingge, LIU Chuang, et al. Multi-field coupling analysis and suppression for biased magnetic noise in transformer[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(18): 5077-5088.

- [17] MIAO X H, JIANG P, PANG F Z, et al. Numerical analysis and experimental research of vibration and noise characteristics of oil-immersed power transformers[J]. *Applied Acoustics*, 2023, 203: 109189.
- [18] 谢璐佳, 张凡, 刘灿东, 等. 基于分步有限元法的 110 kV 变压器振动与噪声研究[J]. *高压电器*, 2023, 59(8): 22-34.  
XIE Lujia, ZHANG Fan, LIU Candong, et al. Research on vibration and noise of 110 kV transformer based on staged finite element method[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(8): 22-34.
- [19] 王坤, 谢连科, 邢拓, 等. 主变压器噪声特性分析及复合隔声结构设计[J]. *应用声学*, 2024, 43(2): 315-320.  
WANG Kun, XIE Lianke, XING Tuo, et al. Main transformer noise characteristics analysis and composite sound insulation structure design[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2024, 43(2): 315-320.
- [20] KOO J, WANG K P, RUBY R, et al. A 2-GHz FBAR-based transformer coupled oscillator design with phase noise reduction[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2019, 66(4): 542-546.
- [21] 唐志国, 李阳. 基于改进无参尺度空间经验小波变换的变压器高频电流局放噪声抑制研究[J]. *高压电器*, 2024, 60(1): 144-153.  
TANG Zhiguo, LI Yang. Research on partial discharge noise suppression of transformer based on improved parameterless scale space empirical wavelet transform[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(1): 144-153.
- [22] 周晶, 罗日成, 黄军. 基于改进小波阈值—CEEMDAN 的变压器局部放电超声波信号白噪声抑制方法[J]. *高压电器*, 2024, 60(1): 163-171.  
ZHOU Jing, LUO Richeng, HUANG Jun. White noise suppression method of partial discharge ultrasonic signal of transformer based on improved wavelet threshold-CEEMDAN[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(1): 163-171.
- [23] 彭继文, 卢铃, 胡胜, 等. 多工况变压器噪声特性测试系统设计[J]. *高压电器*, 2019, 55(11): 191-196.  
PENG Jiwen, LU Ling, HU Sheng, et al. Design of transformer noise test system for multiple working conditions[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(11): 191-196.
- [24] 唐波, 刘思煜, 白晓春, 等. 基于改进声学有限元法的主变压器室噪声场计算[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(4): 1662-1675.  
TANG Bo, LIU Siyu, BAI Xiaochun, et al. Calculation of noise field in main transformer room based on improved acoustic FEM[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(4): 1662-1675.
- [25] 李冬雪, 崔晓东, 刘涛, 等. 冲击负荷变压器噪声异常分析与优化设计[J]. *变压器*, 2015, 52(8): 32-36.  
LI Dongxue, CUI Xiaodong, LIU Tao, et al. Noise anomalous analysis and optimal design of transformer with impact load[J]. *Transformer*, 2015, 52(8): 32-36.
- [26] 邢琳, 张帅, 李燕, 等. 间谐波激励下铁心振动噪声特性研究[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(22): 78-83, 229.  
XING Lin, ZHANG Shuai, LI Yan, et al. Vibration and noise characteristics of the core of a power transformer under inter-harmonic excitation[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(22): 78-83, 229.
- [27] 吴晓文, 周年光, 彭继文, 等. 电力变压器噪声特性与相关因素分析[J]. *电力科学与技术学报*, 2018, 33(3): 81-85, 146.  
WU Xiaowen, ZHOU Nianguang, PENG Jiwen, et al. Noise characteristic and relevant factors analysis of power transformers[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2018, 33(3): 81-85, 146.
- [28] 赵涛, 刘乐康, 孙建涛, 等. 特高压换流变压器网侧绕组电流检测系统设计及谐波特性分析[J]. *高电压技术*, 2021, 47(4): 1443-1450.  
ZHAO Tao, LIU Lekang, SUN Jiantao, et al. Design of detection system and harmonic characteristic analysis for the grid side winding current of UHVDC converter transformer[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(4): 1443-1450.
- [29] YADAV S, MEHTA R K. Investigation on magnetostrictive behaviour of a converter transformer influenced by dominant harmonics: a FEM and ANN based approach[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2021, 31(8): e12957.
- [30] YADAV S, MEHTA R K. Modelling of magnetostrictive vibration and acoustics in converter transformer[J]. *IET Electric Power Applications*, 2021, 15(3): 332-347.
- [31] 董家睿, 李基民, 魏铭. 谐波激励下电力变压器振动特性[J]. *高压电器*, 2023, 59(8): 35-42.  
DONG Jiarui, LI Jimin, WEI Ming. Vibration characteristics of power transformers under harmonic excitation[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(8): 35-42.
- [32] WU S Y, ZHANG Z Z, LIU H D, et al. Analysis of harmonic current and winding vibration in converter transformer [C]//2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE). Chongqing, China. IEEE, 2022: 1-5.
- [33] 邵鹏飞, 李勇, 肖华. 新型 HVDC 换流变压器绕组振动抑制研究[J]. *电机与控制学报*, 2019, 23(7): 87-97.  
SHAO Pengfei, LI Yong, XIAO Hua. Study on winding vibration suppression of new HVDC converter transformer[J]. *Electric Machines and Control*, 2019, 23(7): 87-97.
- [34] 张施令, 季巧宇, 李玥. 换流变压器绕组及其套管附件结构机械振动特性理论建模及试验验证分析[J]. *电工技术*, 2023(11): 18-24, 29.  
ZHANG Shiling, JI Qiaoyu, LI Yue. Theoretical modeling and experimental verification analysis of mechanical vibration characteristics of converter transformer winding and bushing attachments[J]. *Electric Engineering*, 2023(11): 18-24, 29.
- [35] 翟春雨, 吴书煜, 李颖斌, 等. 基于小波能量占比与时序预测的换流变压器机械状态智能诊断技术[J]. *高压电器*, 2024, 60(11): 68-76, 85.  
ZHAI Chunyu, WU Shuyu, LI Yingbin, et al. Intelligent diagnosis technology of mechanical state of converter transformer

- based on proportion of wavelet energy[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(11): 68-76,85.
- [36] 潘志城, 邓军, 楚金伟, 等. 基于小波包的换流变压器振动信号特征分析方法[J]. 变压器, 2020, 57(11): 21-26.
- PAN Zhicheng, DENG Jun, CHU Jinwei, et al. Characteristic analysis method of vibration signal of converter transformer based on wavelet packet[J]. Transformer, 2020, 57(11): 21-26.
- [37] 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.
- [38] 袁耀, 赵林杰, 杨家辉, 等.  $\pm 800$  kV 换流变压器空载运行振动特性[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(8): 3273-3284.
- YUAN Yao, ZHAO Linjie, YANG Jiahui, et al. Vibration characteristics of  $\pm 800$  kV converter transformer under no-load operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 3273-3284.
- [39] 臧春艳, 曾军, 李鹏, 等. 一种基于 SVM 算法的电力变压器机械故障智能诊断模型[J]. 高压电器, 2023, 59(12): 216-222,229.
- ZANG Chunyan, ZENG Jun, LI Peng, et al. Intelligent diagnosis model of mechanical fault for power transformer based on SVM algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(12): 216-222,229.
- [40] 罗隆福, 郭熙坤, 赵亮, 等. 基于感应滤波技术的换流变压器降噪方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(10): 68-74.
- LUO Longfu, GUO Xikun, ZHAO Liang, et al. Noise reduction method of converter transformer based on inductive filtering technology[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(10): 68-74.

#### 作者简介:



何国阳

何国阳(1999), 男, 硕士在读, 研究方向为电力设备振动噪声以及减振降噪(E-mail: heguoyang19990228@163.com);

汲胜昌(1976), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力设备在线监测以及故障诊断、振动噪声机理及抑制等;

祝令瑜(1988), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力设备振动噪声及电抗器状态监测。

## Noise characteristics and prediction methods of operating converter transformers

HE Guoyang<sup>1</sup>, JI Shengchang<sup>1</sup>, ZHU Lingyu<sup>1</sup>, ZHANG Fan<sup>1</sup>, SONG Dexin<sup>1</sup>, WANG Lyu<sup>2,3</sup>

(1. Xi'an Jiaotong University (State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment), Xi'an 710049, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710199, China;

3. State Grid (Xi'an) Environmental Protection Technique Center Co., Ltd., Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Due to the presence of harmonics, the noise characteristics of converter transformers differ significantly from those of ordinary transformers. Currently, the mechanism through which harmonics affect noise is not clearly understood, necessitating research on their influence patterns in converter stations. To this end, a monitoring system for converter transformer operating conditions and radiated noise is developed. Through theoretical research, simulation analysis, and noise monitoring data analysis, the characteristics of converter transformer noise under no-load and loaded conditions are summarized. Based on noise data from converter transformers under various load conditions, the noise variation patterns of converter transformers under different loads are elucidated, from which a noise prediction method for converter transformers is derived. The research results indicate that, compared to ordinary transformer noise, the noise of converter transformers under specific load conditions is concentrated mainly at higher frequencies. The high-frequency components of converter transformer no-load noise are primarily generated by the nonlinearity of the core magnetization process and have little correlation with voltage harmonics. The high-frequency components of converter transformer loaded noise are strongly related to current harmonics. Due to the human ear's greater sensitivity to high-frequency noise and the modal characteristics of converter transformers, the A-weighted sound pressure level of 400 Hz noise is the highest and varies significantly and positively with current changes. The A-weighted sound pressure levels of noise at other frequencies show insignificant changes. Based on this characteristic, the derived noise prediction formula has an average error of 0.23 dB, effectively predicting converter transformer noise. The research findings provide guidance for converter transformer noise testing and offer a method for noise prediction of operating converter transformers.

**Keywords:** converter transformer; harmonics; finite element analysis; no-load noise; load noise; noise prediction

(编辑 陆海霞)