

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.09.020

电力装备仿真、热与电磁特性分析

纳米晶中频变压器振动来源及非正弦激励下噪声特性研究

朱叶鑫¹, 王娜², 李丽³, 张凡², 汲胜昌²

(1. 广东电网有限责任公司珠海供电局, 广东 珠海 519075; 2. 西安交通大学科技与教育发展研究院, 西安 710049;

3. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510080)

摘要: 针对非正弦激励下纳米晶中频变压器产生的高频噪声问题日益突出, 变压器整体振动来源及噪声特性尚不明确的问题, 文中通过测量空载和短路工况下变压器铁心、绕组及压板的振动, 明确了振动的主要来源及传递特性, 并通过测量不同电压激励下变压器顶面及4个侧面的噪声声压, 确定了主要噪声辐射面, 研究了电压激励对噪声水平及频谱特性的影响。研究表明, 在空载和短路工况下, 变压器铁心振动幅值均显著高于绕组和压板, 铁心是主要振动源, 其振动通过结构耦合传递至绕组和压板; 除铁心外, 绕组和压板也是重要的噪声辐射部位, 铁心振动经结构耦合引发绕组和压板振动并辐射噪声; 局部压紧力分布不均是导致振动噪声信号中基频分量产生的主要原因。

关键词: 中频变压器; 非正弦激励; 振动来源; 噪声特性

Research on Vibration Sources and Noise Characteristics Under Non-sinusoidal Excitation of Nanocrystalline Medium-frequency Transformers

ZHU Yexin¹, WANG Na², LI Li³, ZHANG Fan², JI Shengchang²

(1. Zhuhai Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangdong Zhuhai 519075, China; 2. Institute for Science, Technology and Education Development, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Electric Power Research Institute, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: To address the increasingly prominent issue of high-frequency noise generated by nanocrystalline medium-frequency transformers under non-sinusoidal excitation, and the fact that the overall vibration sources and noise characteristics of the transformer remains unclear, in this paper the vibration measurements on the transformer core, windings, and clamping plates is carried out under both no-load and short-circuit conditions. The primary vibration sources and their transmission characteristics are identified. Furthermore, by measuring the sound pressure levels at the top surface and four side surfaces of the transformer under different voltage excitations, the major noise-radiating surfaces are determined, and the effects of excitation voltages on noise levels and spectral characteristics are analyzed. The research results show that in case of no load and short circuit conditions the vibration amplitude of the transformer core is significantly higher than that of the windings and clamping plate, indicating that the core is the dominant vibration source. The vibrations are transmitted to the windings and clamping plate through structural coupling. In addition to the core, the windings and clamping plate are also important noise-radiating positions, where core vibrations induce structural vibrations and subsequent noise radiation through mechanical coupling. Moreover, the uneven distribution of local clamping pressure is the primary cause of the fundamental-frequency component observed in the vibration and noise signals.

Key words: medium-frequency transformer; non-sinusoidal excitation; vibration source; noise characteristics

收稿日期: 2026-03-09; 修回日期: 2026-05-08

基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目[030400KC23120028(GDKIXM20231462)]。

Project Supported by Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Co., Ltd. [030400KC23120028(GDKIXM20231462)].

0 引言

中频变压器是固态变压器的核心部件,广泛应用于新能源接入的柔性交直流输电系统,能源路由器等新型电力系统中^[1-3]。与传统工频变压器不同,中频变压器的工作频率通常为1~10 kHz,且多运行于方波、矩形波等非正弦激励条件下^[4]。由于非正弦激励中含有丰富的高次谐波成分,变压器辐射噪声的频谱向高频区域扩展,产生更多高频噪声成分。而kHz频段正处于人耳听觉最敏感范围,因此中频变压器产生的尖锐噪声会对处于运行环境中的工作人员产生严重干扰^[5-6]。

噪声主要来源于变压器表面的法向振动。对于中频变压器振动来源,Shuai P^[7]和Chen B^[8]通过有限元仿真比较了铁心有无气隙时的麦克斯韦力。此外,Shuai P还进一步比较了铁心有无气隙时的麦克斯韦力和洛伦兹力^[7]。上述研究表明当铁心存在切割气隙时,磁致伸缩和气隙处的麦克斯韦力对变压器振动的贡献不可忽略,且远大于洛伦兹力的贡献。上述研究从仿真角度比较了中频变压器中不同电磁力的大小及其分布特征,但对各类电磁力在实际变压器中引起的振动响应缺少实验验证,且空载和负载条件下变压器振动来源也缺少系统研究。

中频变压器在实际中常工作在方波、矩形波等非正弦激励下^[4],对于不同电压激励下中频变压器的噪声特性,部分学者展开相关研究。Dou Y^[9]、张鹏宁^[10-11]、Chen B^[8]比较了不同电压激励下铁心表面的声压级,Li Y还比较了不同材料铁心表面的声压级^[12]。上述研究集中于比较不同电压和不同铁心材料时的铁心表面声压级大小,但实际变压器还包括绕组,夹件等结构,其整体噪声来源及辐射特性尚不明确。

基于上述问题,文中开展纳米晶中频变压器的振动来源及非正弦激励下变压器整体噪声特性研究^[13-17]。首先搭建不同电压激励下中频变压器的振动噪声测量平台,该平台可实现正弦、方波、矩形波等波形激励下变压器振动噪声的精确测量。在此基础上,通过测量并比较铁心、绕组和压板在空载及短路工况下的振动响应^[18-21],明确中频变压器振动的主要来源及其传递特性。最后通过测量不同电压激励下变压器顶面及4个侧面的噪声声压,分析变压器主要噪声辐射面,以及不同电压波形对噪声水平和频谱特性的影响,并对中频变压器噪声产

生及声振信号中基频分量形成机制进行分析。研究成果可为中频变压器的设计提供理论依据和实验参考。

1 不同电压激励下中频变压器振动噪声测量平台

1.1 中频变压器振动噪声测量平台

为研究纳米晶中频变压器在非正弦激励下的声振特性,文中搭建的中频变压器振动噪声测量平台见图1。

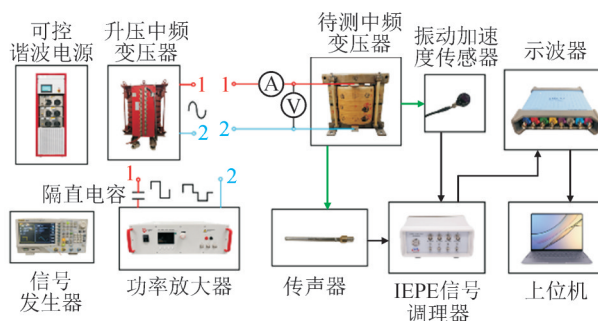


图1 中频变压器振动噪声测量平台

Fig. 1 Vibration and noise measurement platform for medium-frequency transformers

如图1所示,中频变压器噪声测量平台由电源和振动噪声测量系统组成。其中可控谐波电源和升压中频变压器共同组成谐波源,为变压器提供正弦激励。信号发生器、功率放大器和隔直电容共同组成非正弦激励源,可对变压器施加频率和幅值可调的非正弦激励。实验中的待测中频变压器额定容量为70 kW,铁心采用纳米晶切割铁心,叠片系数为0.7,绕组为铜箔绕组,原副边匝数比为18:18。振动噪声测量系统由传声器、压电加速度传感器、IEPE信号调理器、示波器和上位机组成。传声器为GRAS 40PH,频率响应范围为0.01~20 kHz。振动加速度传感器为MMF KS95C100,频率响应范围为0.3~28 000 Hz,满足中频变压器振动噪声特性的测量需求。

实验中,中频变压器在电压激励下产生振动噪声,压电加速度传感器和传声器采集到的振动和噪声声压信号经过IEPE信号调理器后通过示波器同步采集,然后传输至上位机进行后续数据处理。

1.2 实验设置

在大容量双有源桥(dual active bridge, DAB) DC-DC变换器中,中频变压器由全桥电路驱动,空载时激励电压为对称两电平方波^[22-23],激励电压及对应的磁通密度波形见图2。

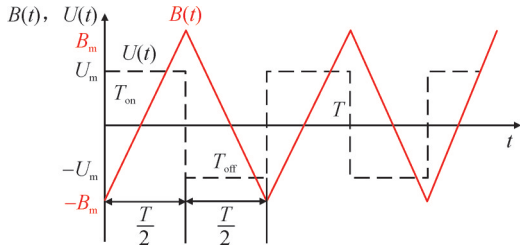


图2 两电平方波激励电压及对应的磁通密度

Fig. 2 Two-level square-wave excitation voltage and corresponding magnetic flux density

在实际功率传输过程中,中频变压器原边电压不再是两电平方波,而是随移相角变化呈现为占空比不同的三电平矩形波^[22-23]。三电平矩形波及对应的磁通密度波形见图3,其中占空比 $D \in [0, 1]$,定义为 $D = (T_{on} + T_{off})/T$ 。

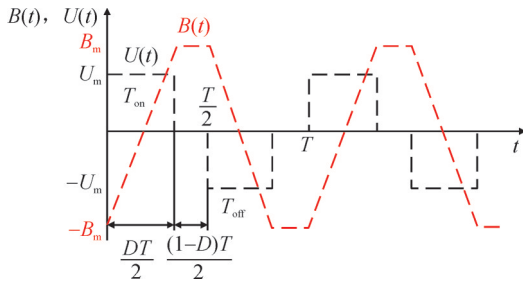


图3 三电平矩形波激励电压及对应的磁通密度

Fig. 3 Three-level rectangular-wave excitation voltage and corresponding magnetic flux density

在正弦、两电平方波和三电平矩形波激励下,变压器空载时的激励电压和磁通密度的关系分别为^[8]:

$$B_{m_sin} = \frac{U_{m_sin}}{4.44NSfK} \quad (1)$$

$$B_{m_squ} = \frac{U_{m_squ}}{4NSfK} \quad (2)$$

$$B_{m_rec} = \frac{U_{m_rec}D}{4NSfK} \quad (3)$$

式(1)-(3)中: B_{m_sin} 、 B_{m_squ} 、 B_{m_rec} 分别为正弦、两电平方波、三电平矩形波激励下的磁通密度峰值; U_{m_sin} 、 U_{m_squ} 、 U_{m_rec} 分别为正弦、两电平方波、三电平矩形波激励下的激励电压峰值; N 为变压器初级绕组匝数; S 为变压器铁心横截面积; f 为激励频率; K 为铁心叠压系数。

文中主要针对纳米晶中频变压器的振动来源及非正弦激励噪声特性开展研究。首先通过振动测试分析变压器主要振动来源及振动传递特性,在此基础上进一步研究不同电压波形激励下变压器的噪声特性及其产生机理。实验中统一将铁心磁通密度控制为0.4 T,以消除磁通密度变化对振动噪声特性的影响。由于正弦激励频谱成分单一,能够避免高次谐波对振动响应的影响,有利于识别变压器主要振动来源及振动传递特性,因此振动测试采

用1 kHz正弦激励。噪声测试主要研究不同电压波形激励下的辐射噪声特性,考虑到非正弦激励源容量限制,在保证铁心磁通密度为0.4 T的条件下,500 Hz能够满足不同电压波形的稳定输出,因此噪声测试采用500 Hz非正弦激励。

根据上述实验方案,首先测量纳米晶铁心、铜箔绕组和变压器顶层压板处的振动,探究变压器振动的主要来源。振动测点布置见图4。测点1布置在铜箔绕组中心,测点2和测点3布置在铁心切割气隙上方,测点4布置在顶层压板中心。

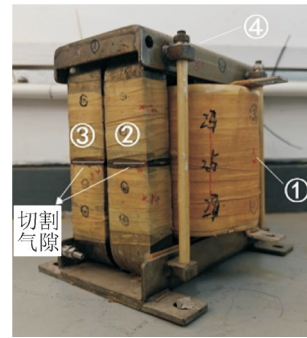


图4 中频变压器绕组和铁心表面振动测点布置图

Fig. 4 Vibration measurement point arrangement on the winding and core surfaces of a medium-frequency transformer

在获得中频变压器振动主要来源的基础上,进一步探究正弦波、两电平方波和不同占空比的三电平矩形波激励下变压器的噪声特性。噪声试验在半消声室内进行,由于待测中频变压器尺寸较小,最大边长不足0.25 m,为保证传声器能够按照统一距离布置,测试过程中将变压器安装在镂空支架上。测点布置见图5,在变压器前、后、左、右及顶部5个面中心,距变压器0.3 m处布置传声器。由于半消声室地面为反射面,测试声场中存在直达声与地面反射声的共同作用。为保证不同激励条件下测试结果具有可比性,所有工况均采用相同的变压器安装方式和传声器测点布置,使地面反射对不同工况测试结果的影响保持一致。

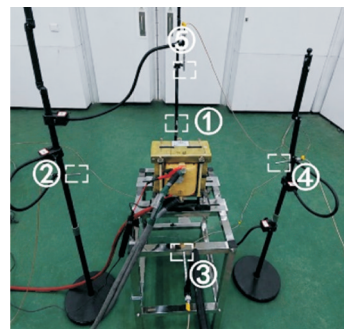


图5 中频变压器噪声测点布置图

Fig. 5 Arrangement of noise measurement points for a medium-frequency transformer

2 中频变压器振动来源

2.1 空载工况

在变压器空载工况时,施加频率为1 kHz正弦激励,磁通密度控制在0.4 T,测量得到各测点振动加速度的时域波形和频谱,结果见图6。

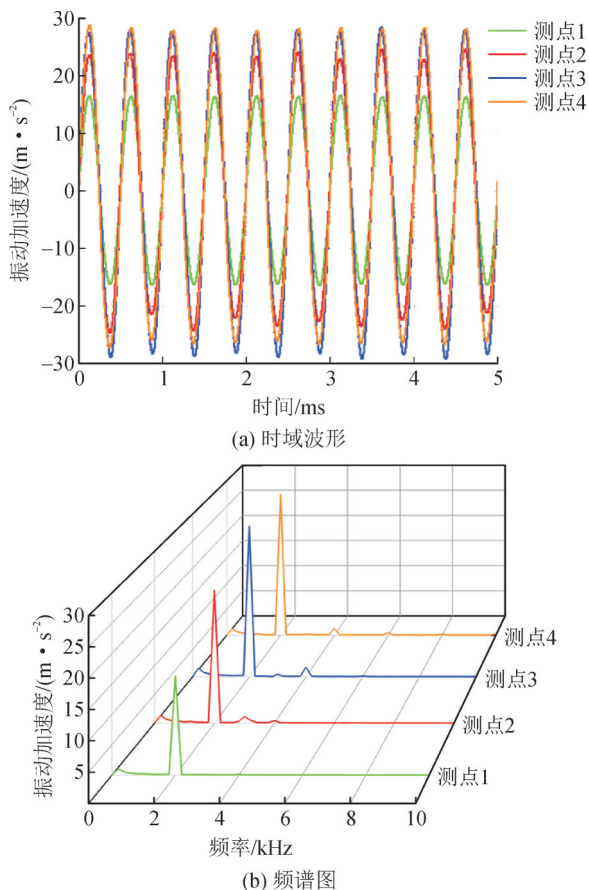


图6 空载时中频变压器绕组和铁心不同测点振动加速度时域波形和频谱图

Fig. 6 Vibration acceleration waveforms and spectra at different measurement points on the windings and core under no-load condition

如图6(a)所示,当变压器空载时,测点3和测点4的振动加速度幅值最大,约为28 m/s²;测点2处次之,约为25 m/s²;测点1处最小,约为16 m/s²,是测点3和测点4振动幅值的57.14%。如图6(b)所示,各测点振动频谱均以激励频率的2倍频为主。

理论分析表明,变压器空载时,变压器的振动主要来源于铁心的磁致伸缩效应和麦克斯韦力,洛伦兹力引起的绕组振动很小。然而试验结果显示,虽然测点1处的振动幅值低于铁心表面对应的测点2和测点3,但其振动水平仍不可忽略;而压板处测点4的振动和铁心处测点3的振动相当。说明空载运行时铁心振动不仅作用于铁心本体,还会通过绕组、压板等结构向外传递,使其产生显著振动。此

外,绕组和压板处的振动频谱与铁心振动频谱相似,均以激励频率的2倍频为主,表明其振动主要来源于铁心振动的传递。

2.2 短路工况

为了验证绕组洛伦兹力对变压器振动的影响,将变压器副边绕组短路,使绕组电流达到额定电流100 A。得到短路时各测点振动加速度的时域和频域图见图7。

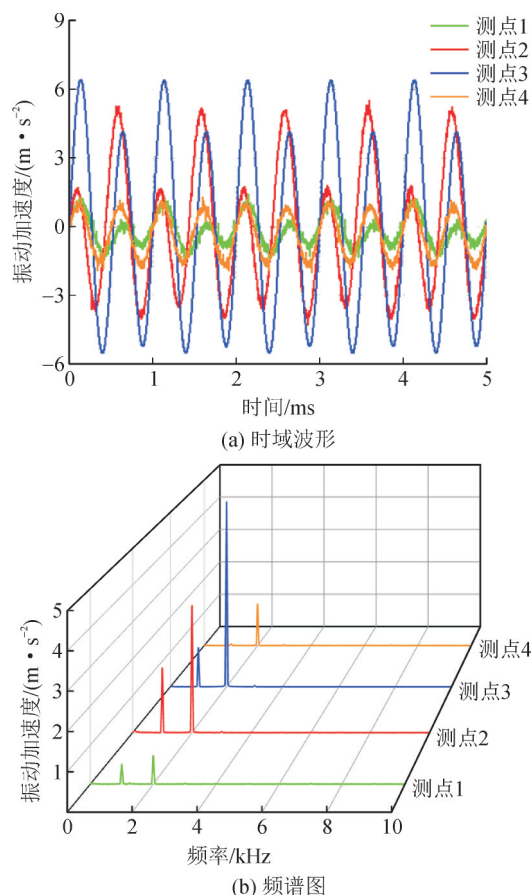


图7 短路时中频变压器绕组和铁心不同测点振动加速度时域波形和频谱图

Fig. 7 Vibration acceleration waveforms and spectra at different measurement points on the windings and core under short-circuit conditions

如图7(a)所示,在变压器短路工况下,测点3的振动加速度最大,幅值约为6 m/s²,测点2次之,测点1的振动加速度最小,幅值为0.95 m/s²,仅为测点3振动幅值的15.83%。由此可见变压器短路时仍然以铁心振动为主,各测点振动加速度均小于空载时。如图7(b)所示,短路工况下各测点振动加速度频谱除了激励频率的2倍频以外,还包含不可忽视的基波分量。

造成上述现象的主要原因是短路工况下虽然绕组中流过较大的额定电流,使得绕组洛伦兹力显著增大,但铜箔绕组具有较高的结构刚度,使得洛

伦兹力引起的绕组振动较小。与此同时,短路电流产生的漏磁场集中分布在铁心的切割气隙附近,形成较大的局部麦克斯韦力,使得铁心气隙附近振动更大。因此,短路工况下振动最剧烈的区域仍位于切割气隙附近,而非绕组表面。

3 不同电压激励下中频变压器的噪声特性

3.1 中频变压器不同激励电压谐波特性

变压器噪声主要来源于结构振动引起的声辐射。当铁心、绕组及夹件等结构受到电磁激励产生机械振动时,其表面振动会引起周围空气压力周期性变化,并以声波形式向外传播。由第2章分析可知,空载和短路工况下铁心均是中频变压器振动的主要来源,其中空载工况下铁心振动更为显著。因此,本章针对空载条件下不同电压激励引起的辐射噪声特性进行研究,分别施加正弦、两电平方波以及占空比分别为0.5、0.6、0.8的三电平矩形波激励,分析不同激励波形对变压器噪声特性的影响。

激励频率为500 Hz,磁通密度为0.4 T时,不同激励电压时域波形和频谱见图8。

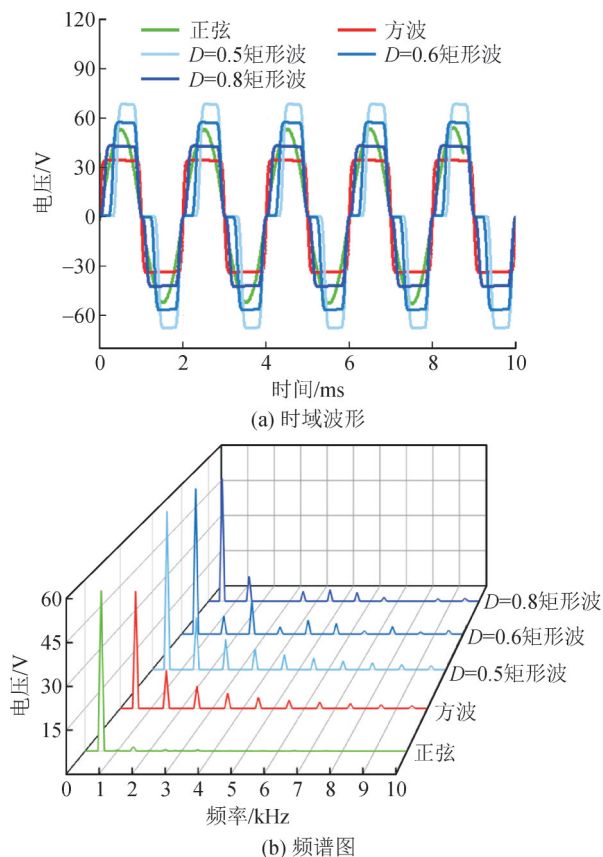


图8 不同激励电压时域波形和频谱图

Fig. 8 Time-domain waveforms and frequency spectra under different excitation voltages

如图8所示,相比于正弦来说,方波和不同占空

比的矩形波仍以基波为主,除此之外还包括不可忽略的3、5、7次等奇次谐波。由于中频变压器空载运行时铁心振动主要来源于磁致伸缩效应,而磁致伸缩应变与磁通密度的平方相关,因此电压激励中的谐波成分会进一步影响铁心振动响应。当激励电压包含多个谐波分量时,磁致伸缩引起的铁心振动不仅包含各谐波对应的2倍频分量,还会由于不同谐波之间的相互作用产生和频与差频分量。由于方波和矩形波中的主要谐波均为奇次谐波,其产生的振动频率主要集中于激励频率的偶次倍频处。因此,不同激励电压中谐波含量的差异将进一步影响变压器振动及辐射噪声特性,后续将对不同激励条件下的噪声幅值和频谱特性进行分析。

3.2 不同激励下中频变压器噪声的主要来源

为了获得变压器的主要噪声辐射面,按照图4布置传声器,得到0.3 m处不同电压波形激励下变压器各测点的A计权声压级见图9。

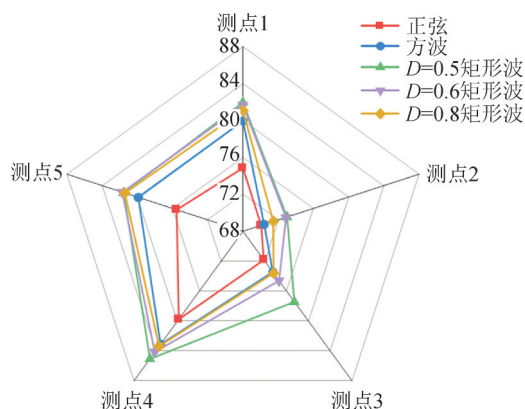


图9 不同电压波形激励下变压器各测点的A计权声压级
Fig. 9 A-weighted sound pressure levels at different measurement points under different voltage waveform excitations

如图9所示,不同电压波形激励下变压器的主要噪声辐射面基本一致,但各测点的噪声水平存在明显差异,表明变压器噪声辐射具有较强的方向性。图9中测点4处的声压级最高,测点2处最低,测点1、测点3、测点5处的声压级介于两者之间,并接近测点4。结合第2章振动测试结果可知,空载工况下铁心切割气隙附近具有较大的振动响应,而噪声测试中铁心侧面测点4对应区域具有较高的声压级,说明铁心振动较强区域具有更强的声辐射能力。同时,铁心磁致伸缩效应和麦克斯韦力引起的振动并非局限于铁心表面,其产生的机械振动可通过结构耦合作用传递至绕组和压板等部件,使绕组和压板产生振动并辐射噪声。因此,空载工况下绕组和压板虽然不是主要振动源,但仍是不可忽略的

噪声辐射部位。

在各电压波形激励下,测点4处的A计权声压级均集中在80~85 dB(A),而测点2处仅为70~74 dB(A),两者相差约10 dB(A)。测点1和测点3处的声压级分别为75~82 dB(A)和72~77 dB(A),由此可见变压器振动响应存在一定的不对称性。这主要是由于切割铁心两侧压紧力和装配应力存在差异,导致局部磁场分布、麦克斯韦力以及振动传递路径不完全一致,从而使各测点的振动与噪声响应表现出明显差异。

此外,占空比为0.5的矩形波激励下变压器噪声声压最大,其次为方波,正弦波激励下声压最低。对于矩形波激励,随着占空比的增加,噪声声压呈下降趋势。这主要是因为不同电压波形的高次谐波含量不同,从而引起铁心振动幅值及噪声水平的变化。

3.3 不同激励下中频变压器噪声频谱特性

为了探究不同电压波形激励下变压器噪声辐射的频谱特性,首先对铁心侧面对应的测点2和测点4在不同电压激励下的噪声频谱进行对比分析,结果见图10。

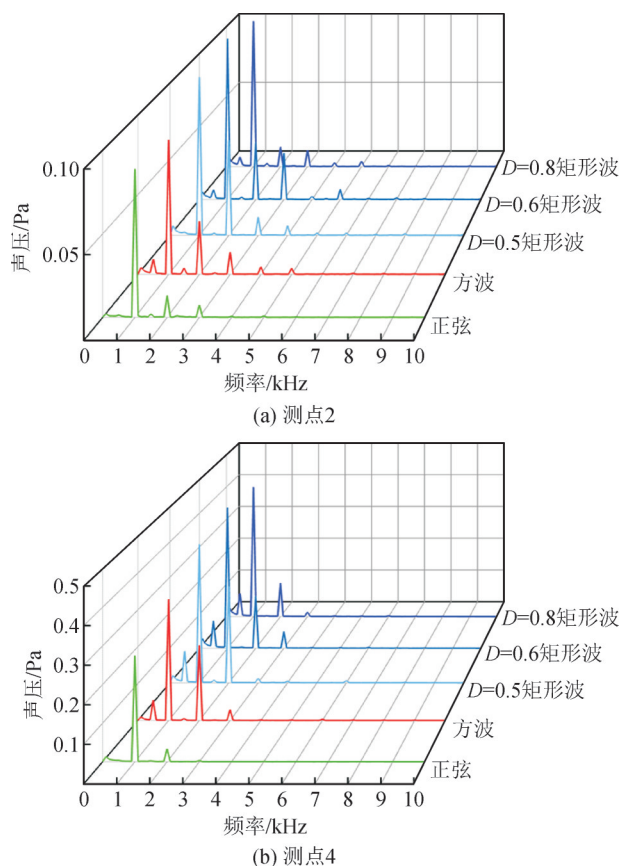


图10 不同电压波形激励下测点2和测点4噪声频谱对比

Fig. 10 Comparison of noise spectra at measurement points 2 and 4 under different voltage waveform excitations

如图10所示,测点4在各电压波形激励下的噪声频谱幅值均明显高于测点2,与图6中测点4处A计权声压级高于测点2的规律一致。另外,测点2在各电压波形激励下的噪声均以激励频率的偶次倍频为主,500 Hz基频分量很少,但测点4在方波、矩形波等非正弦激励下,噪声频谱除了偶次倍频以外,还出现了不可忽略的500 Hz基频成分。

不同电压激励下,铜箔绕组和顶部夹件对应的测点1、测点3、测点5的噪声频谱见图11。

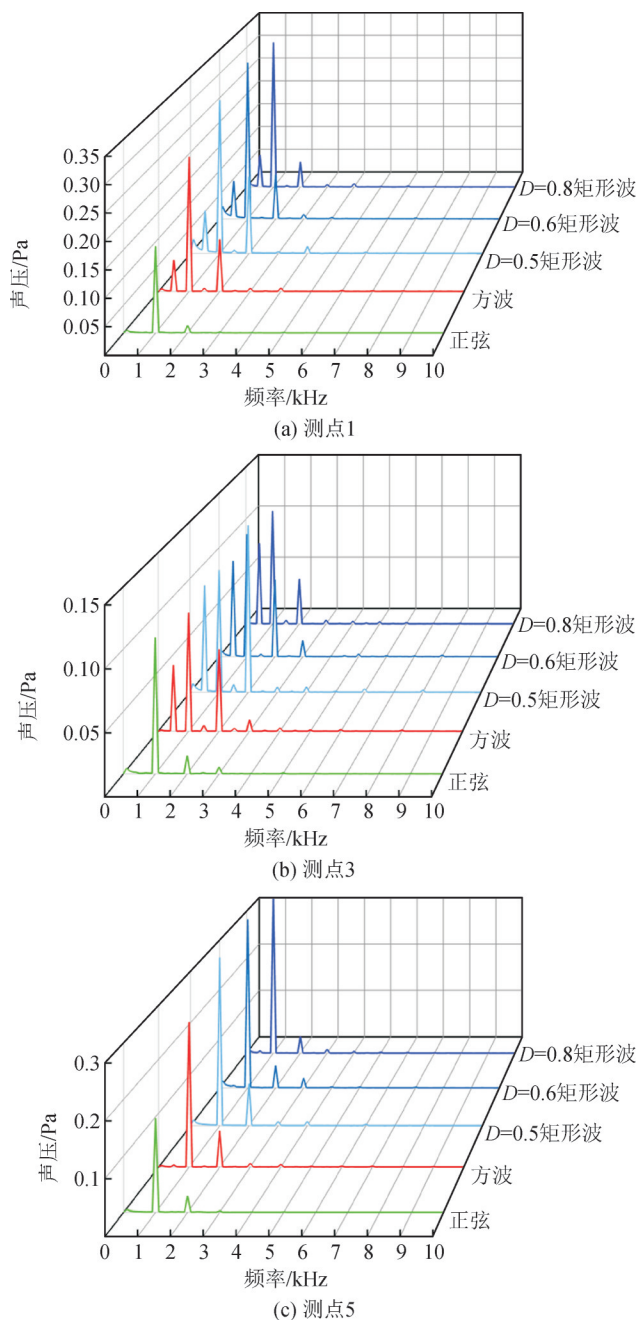


图11 不同电压波形激励下测点1、测点3、测点5噪声频谱对比

Fig. 11 Comparison of noise spectra at measurement points 1, 3, and 5 under different voltage waveform excitations

由图 11 可以看出, 测点 1、测点 3、测点 5 的噪声频谱均以激励频率的偶次倍频成分为主。然而测点 1 和测点 3 除偶次倍频成分外, 还存在明显的 500 Hz 基频分量, 且测点 3 处基频分量明显高于测点 1。这说明绕组侧噪声除了受到铁心 2 倍频振动影响外, 还受到局部结构非对称性的影响。相较于测点 1 来说, 测点 3 对应的原边绕组与测点 4 对应的铁心机械耦合更强, 因此更容易受到测点 4 中基频分量的影响, 从而表现出更明显的基频成分。

相比之下, 测点 5 对应的压板远离切割气隙区域, 频谱中主要表现为偶次倍频成分, 基频分量较弱。因此, 压板辐射噪声能够较好地反映磁致伸缩引起的铁心振动特征, 而绕组侧辐射噪声则同时受到铁心振动传递和局部结构因素的共同影响。

3.4 不同激励下中频变压器噪声产生机理

3.4.1 磁致伸缩引起的铁心辐射噪声

当变压器上激励电压为 $u(t) = U_s \cos \omega t$ 时, 铁心磁通密度呈正弦变化。由于磁致伸缩应变与磁通密度平方近似成正比, 因此由磁致伸缩引起的铁心振动主要表现为激励频率的 2 倍频成分。平行于磁场方向的磁致伸缩振动加速度可表示为^[24]

$$a = -\frac{2L\lambda_s U_s^2}{(N_l AB_s)^2} \cos 2\omega t \quad (4)$$

式(4)中: L 为铁心带材原始长度; λ_s 为铁心带材饱和磁致伸缩率; U_s 为激励电压峰值; N_l 为变压器初级绕组匝数; A 为变压器铁心有效横截面积; B_s 为变压器饱和磁通密度。

在焦耳磁致伸缩的情况下, 铁磁体总体积近似保持不变, 因此垂直于磁场方向会产生与平行方向符号相反的应变。两者关系可表示为^[7]

$$\lambda_t = -\frac{1}{2} \lambda_p \quad (5)$$

式(5)中: λ_p 为平行于磁场方向的磁致伸缩应变; λ_t 为垂直于磁场方向的磁致伸缩应变。

由于变压器辐射噪声主要由铁心表面法向振动产生^[25], 根据声辐射关系, 可得到正弦激励下铁心辐射声压为^[26]

$$p = \rho_0 c_0 v = -\frac{1}{2} \rho_0 c_0 \int a(t) dt = \rho_0 c_0 \int \left[\frac{L\lambda_s U_s^2}{(N_l AB_s)^2} \cos 2\omega t \right] dt = -\rho_0 c_0 \frac{L\lambda_s U_s^2}{2\omega (N_l AB_s)^2} \sin 2\omega t \quad (6)$$

式(6)中: ρ_0 为空气密度; c_0 为空气中声音传播速度。

由式(6)可知, 在正弦激励下, 铁心辐射声压主要集中于激励频率的 2 倍频处, 这与图 6、10 中正弦激励下噪声及振动频谱以 2 倍频为主的实验结果

一致。

方波和不同占空比的矩形波均可分解为基波及奇次谐波的叠加^[12]。为简化分析, 仅考虑幅值较大的 3 次谐波成分, 此时激励电压可表示为

$$u(t) = U_1 \sin \omega t + U_3 \sin(3\omega t + \theta) \quad (7)$$

式(7)中: U_1 为电压基波幅值; ω 为角频率; U_3 为 3 次谐波幅值。

根据式(5)-(7)可得方波和矩形波激励下铁心辐射声压为

$$p(t) = \frac{\rho_0 c_0 L \lambda_s}{(N_l AB_s)^2} \left[\frac{U_1^2}{8\omega} \sin 2\omega t + \frac{U_1 U_3}{4\omega} \sin(2\omega t - \theta) + \frac{U_1 U_3}{8\omega} \sin(4\omega t + \theta) + \frac{U_3^2}{24\omega} \sin(6\omega t + 2\theta) \right] \quad (8)$$

由式(8)可见, 方波和矩形波激励下磁致伸缩引起的铁心辐射声压由 2 倍频项、和频项和差频项组成。方波和矩形波分解后仅包含奇次谐波, 各谐波分量之间自乘及相互作用产生的频率成分均为基频的偶数倍。因此理想情况下磁致伸缩引起的铁心辐射噪声主要分布在 $2f$ 、 $4f$ 、 $6f$ 等偶次谐波频率处, 其中 $2f$ 分量最为显著。

3.4.2 麦克斯韦力引起的铁心振动

对于切割铁心来说, 气隙处的麦克斯韦力也是引起铁心振动噪声的主要原因^[27]。中频变压器铁心为纳米晶卷绕铁心, 铁心所受麦克斯韦力见图 12。

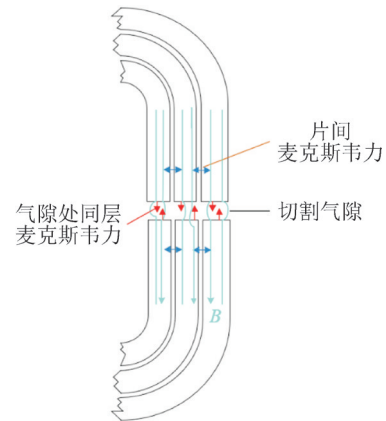


图 12 中频变压器铁心中麦克斯韦力分布图

Fig. 12 Maxwell force distribution in the core of the medium-frequency transformer

图 12 中铁心片间的麦克斯韦力很小, 一般认为可以忽略^[7], 因此麦克斯韦力主要作用在铁心切割气隙区域, 气隙处麦克斯韦力会使气隙两侧铁心相互吸引, 并与磁致伸缩力共同作用, 从而使得铁心振动并辐射噪声。铁心和空气交界面单位面积上的法向麦克斯韦力可表示为^[28]

$$F_{ma} = \frac{B_n^2}{2\mu_0} \quad (9)$$

式(9)中: B_n 为切割气隙处的法向磁通密度; μ_0 为真空磁导率。

由式(9)可见,麦克斯韦力与法向磁通密度平方成正比。因此,在理想条件下,麦克斯韦力引起的铁心振动也应该为偶次倍频成分。

3.4.3 基频分量产生机理

由上述分析可知,理想情况下,磁致伸缩和气隙处麦克斯韦力引起的铁心振动噪声频率应主要为激励频率的偶次倍频。然而,实验结果表明,短路工况下各测点振动出现了明显基频分量,在非正弦空载激励下,测点4、测点1、测点3噪声中也出现了明显的500 Hz基频分量。

这主要是因为实验所用的中频变压器为切割铁心,实际制造和装配时很难使变压器铁心两侧的压紧力保持一致。当铁心某一侧压紧力较小时,在周期性麦克斯韦力作用下,该区域的铁心接触面可能发生微小的压紧与回弹^[29-30],此时铁心接触界面的等效刚度不再为常数,而随时间周期性变化,可表示为

$$k(t) = k_0 + k_1 \cos(\omega t + \beta) \quad (10)$$

式(10)中: k_0 为平均接触刚度; k_1 为刚度波动幅值; β 为相位角。

若铁心本体的主要振动为2倍频振动

$$x(t) = X_2 \cos(2\omega t) \quad (11)$$

式(11)中, X_2 为2倍频振动幅值。

该振动经过局部松动或压紧力不均的接触界面传递后,输出响应可表示为

$$y(t) = k(t)x(t) = [k_0 + k_1 \cos(\omega t + \beta)]X_2 \cos(2\omega t) = k_0 X_2 \cos(2\omega t) + \frac{k_1 X_2}{2} \cos(3\omega t + \beta) + \frac{k_1 X_2}{2} \cos(\omega t - \beta) \quad (12)$$

由式(12)可见,原本仅包含2倍频成分的振动经过铁心局部松动界面传递后,会产生频率为 ω 的基频分量。

正弦激励下切割气隙处电磁力变化较为平滑且周期对称,局部接触状态不易发生明显变化,因此难以激发显著的接触非线性,基频分量较弱。而在短路工况下,绕组电流产生的漏磁场在铁心切割气隙附近局部集中,使麦克斯韦力峰值增大,压紧力分布不均匀引起的接触非线性使得铁心振动出现基频分量。这与第3章图6、7的实验现象一致。

相较于正弦来说,非正弦电压中含有较多高次谐波成分,气隙处麦克斯韦力峰值和波动程度增加,更容易激发局部接触非线性,从而产生明显的基频振动和噪声。因此噪声测点4对应的铁心可能存在压紧力不足的现象,使得3.3节图10中测点4

噪声的500 Hz基频分量最为明显;而测点2对应的铁心压紧状态较好,因此辐射噪声幅值很小且基频分量几乎可以忽略。由于测点1和测点3对应的绕组与铁心之间具有较强的机械耦合,因此图11中测点1和测点3的噪声也表现出较大的基频分量;而测点5的噪声主要来源于铁心顶面的振动,铁心顶面振动主要来源于磁致伸缩,受局部气隙接触非线性影响较小,因此测点5未出现明显的基频分量。

4 结论

文中以纳米晶中频变压器为研究对象,探究了中频变压器振动的主要来源,获得了不同电压激励下中频变压器的主要噪声辐射面,并分析了不同电压波形对噪声幅值及频谱特性的影响。主要结论如下:

1)空载工况下,中频变压器的振动主要来源于铁心振动,且铁心振动会通过绕组、压板等结构向外传递,使顶层压板处的振动加速度与铁心处相当,绕组处振动加速度幅值达到铁心处的57.14%。短路工况下,铁心振动仍占主导地位,绕组处振动加速度幅值仅为铁心处的15.83%。

2)不同电压激励下,变压器绕组和压板辐射噪声不可忽略,其主要来源于铁心振动经结构耦合作用的传递。各测点声压级随激励波形变化呈现一致规律,即占空比为0.5的矩形波激励下噪声最高,其次为占空比0.6和0.8的矩形波、方波以及正弦波。

3)正弦激励下变压器辐射噪声频谱均以激励频率的2倍频成分为主,方波及不同占空比矩形波激励下,频谱中除2倍频外还出现了明显的高阶偶次谐波成分。另外,变压器两侧铁心辐射噪声存在显著不对称,其中一侧铁心及绕组测点的噪声频谱中出现了不可忽略的基频成分。理论分析表明,该现象与铁心局部压紧力分布不均引起的接触非线性有关。

参考文献:

- [1] Dang Y, Zhu L, Liu Z, et al. Multi-stage multi-fidelity optimal design method based on evolutionary computation with dynamic population for high-power high-voltage high-frequency transformers (H3FTs)[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2026, 41(8): 13878-13894.
- [2] 段青,徐嘉超,盛万兴,等. 基于级联高频变压器的多端口直流电能路由器[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2934-2941.
Duan Qing, Xu Jiachao, Sheng Wanxing, et al. Multi-port DC electric energy router based on cascaded high frequency transformer[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2934-2941.
- [3] 刘丰硕,汲胜昌,党永亮,等. 基于C-MOEA/D约束多目标优化

- 算法的中频变压器绝缘结构全局优化设计方法[J]. 高电压技术, 2025, 51(2): 956-966.
- Liu Fengshuo, Ji Shengchang, Dang Yongliang, et al. Global optimal design method for insulation structure of medium frequency transformer based on constrained multiobjective optimization algorithm C-MOEA/D[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(2): 956-966.
- [4] 张鹏宁, 向雪岩, 李伟, 等. 面向电力电子变压器的高频变压器技术[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4996-5011.
- Zhang Pengning, Xiang Xueyan, Li Wei, et al. High frequency transformer technology for power electronic transformer[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4996-5011.
- [5] 刘道生, 钟伟, 李家晨, 等. 非晶合金油浸式变压器振动特性与噪声分析[J]. 变压器, 2022, 59(11): 22-27.
- Liu Daosheng, Zhong Wei, Li Jiachen, et al. Vibration characteristics and noise analysis of amorphous alloy oil-immersed transformer[J]. Transformer, 2022, 59(11): 22-27.
- [6] Villar I. Multiphysical characterization of medium-frequency power electronic transformers[M]. Lausanne, Switzerland: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2010.
- [7] Peng Shuai, Ju Biela. Influence of material properties and geometric shape of magnetic cores on acoustic noise emission of medium-frequency transformers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(10): 7916-7931.
- [8] Chen Bin, Xi Binsheng, Wan Nina, et al. Measurement and analysis of vibration characteristics of nanocrystalline magnetic core under symmetrical/asymmetrical waveforms[J]. COMPEL-The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2023, 42(3): 718-739.
- [9] Dou Yu, Li Yongjian, Chen Tao, et al. Vibration and noise characteristics of nanocrystalline cores under high-frequency and non-sinusoidal excitation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2024, 60(9): 1-5.
- [10] 张鹏宁. 复杂工况下软磁材料磁致伸缩特性与电力设备铁心振动研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- Zhang Pengning. Research on magnetostriction characteristics of soft magnetic materials and core vibration of power equipment under complex operating conditions[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [11] Zhang Pengning, Li Lin. Vibration and noise characteristics of high-frequency amorphous transformer under sinusoidal and non-sinusoidal voltage excitation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020(123): 106298.
- [12] Li Yongjian, Yang Zitong, Zhang Changgeng, et al. Vibration and noise measurement of medium-high frequency transformer cores under non-sinusoidal excitation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(8): 1-5.
- [13] 严兆楠, 汪德华. 在运 500 kV 抽水蓄能主变压器振动噪声特性研究[J]. 变压器, 2025, 62(9): 55-62.
- Yan Zhaonan, Wang Dehua. Study on vibration and noise characteristics of main transformer of 500 kV pumped storage in operation [J]. Transformer, 2025, 62(9): 55-62.
- [14] 潘超, 安景革, 刘闯, 等. 考虑地铁杂散电流干扰的电网变压器振动噪声耦合效应[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(9): 70-81.
- Pan Chao, An Jingge, Liu Chuang, et al. Power grid transformer vibration-noise coupling effect considering subway stray current interference[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(9): 70-81.
- [15] 黄丰, 郭淳, 邱冰兵, 等. 基于电磁-结构场的油浸式变压器振动特性及信号反演研究[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(2): 276-286.
- Huang Feng, Guo Chun, Qiu Bingbing, et al. Vibration characteristics and signal inversion of oil-immersed transformer based on electromagnetic-structural field[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(2): 276-286.
- [16] 何国阳, 汲胜昌, 祝令瑜, 等. 在运换流变压器噪声特性及噪声预测方法[J]. 电力工程技术, 2025, 44(5): 117-127.
- He Guoyang, Ji Shengchang, Zhu Lingyu, et al. Noise characteristics and prediction methods of operating converter transformers[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(5): 117-127.
- [17] 雷翔胜, 余梦泽, 王彦峰, 等. 变压器绕组振动特性的高精度求解与分析[J]. 南方电网技术, 2024, 18(4): 80-87.
- Lei Xiangsheng, Yu Mengze, Wang Yanfeng, et al. High-accurate solution and analysis for vibration characteristics of transformer windings[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(4): 80-87.
- [18] 贾本岩, 范笑佳, 井永腾, 等. 电力变压器多场耦合振动噪声特性研究[J]. 变压器, 2025, 62(5): 32-40.
- Jia Benyan, Fan Xiaojia, Jing Yongteng, et al. Characterisation of multi-field coupled vibration and noise in power transformers[J]. Transformer, 2025, 62(5): 32-40.
- [19] 李国伟, 唐琪, 王俊波, 等. 基于经验小波变换的电力变压器绕组松动故障诊断振动分析[J]. 电子设计工程, 2025, 33(10): 98-102.
- Li Guowei, Tang Qi, Wang Junbo, et al. Vibration analysis of power transformer windings loosening fault diagnosis based on empirical wavelet transform [J]. Electronic Design Engineering, 2025, 33(10): 98-102.
- [20] 谢丽蓉, 严侣, 吐松江·卡日, 等. 基于特征判定系数的电力变压器振动信号故障诊断[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 217-225.
- Xie Lirong, Yan Lü, Tusongjiang · Kari, et al. Power transformer vibration signal fault diagnosis based on feature determination coefficient[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 217-225.
- [21] 李先巧. 不同拉压应力下变压器振动噪声研究[J]. 变压器, 2025, 62(3): 53-58.
- Li Xianqiao. Research on transformer vibration and noise under different tensile and compressive stresses[J]. Transformer, 2025, 62(3): 53-58.
- [22] Qin Zian, Shen Zhan, Blaabjerg F, et al. Transformer current ringing in dual active bridge converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12): 12130-12140.
- [23] Zhao Biao, Song Qiang, Li Jianguo, et al. Full-process operation, control, and experiments of modular high-frequency-link DC transformer based on dual active bridge for flexible MVDC

- distribution; a practical tutorial[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(9): 6751-6766.
- [24] 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.
- [25] 陈晓刚, 陈文通, 张俊杰, 等. 铁心接缝对变压器振动噪声的影响研究[J]. 高压电器, 2026, 62(2): 78-84.
- Chen Xiaogang, Chen Wentong, Zhang Junjie, et al. Study on the influence of core joints on vibration and noise of transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2026, 62(2): 78-84.
- [26] 盛美萍. 噪声与振动控制技术基础[M]. 第4版. 北京: 科学出版社, 2024.
- Sheng Meiping. Fundamentals of noise and vibration control technology[M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2024.
- [27] 陈彬, 席彬晟, 李学宝, 等. 纳米晶铁心中频变压器磁-结构场耦合数值模拟[J]. 高压电器, 2024, 60(1): 172-181.
- Chen Bin, Xi Binsheng, Li Xuebao, et al. Magnetic-structural field coupling numerical simulation of medium-frequency transformer with nanocrystalline core[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 172-181.
- [28] 朋小康. 新能源直流系统电力电子变压器振动研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- Peng Xiaokang. Research on vibration of power electronic transformers in new energy DC systems[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [29] 李沂新, 贾云飞, 杨欣颐, 等. 基于典型振动规律的干式变压器机械状态诊断[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 10-19.
- Li Yixin, Jia Yunfei, Yang Xinyi, et al. Typical vibration laws based diagnostic of dry-type transformer mechanical states[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2023, 42(5): 10-19.
- [30] 王春宁, 耿志慧, 马宏忠, 等. 基于振动的电力变压器铁心松动故障诊断研究[J]. 高压电器, 2015, 51(12): 59-65.
- Wang Chuning, Geng Zhihui, Ma Hongzhong, et al. Fault diagnosis of transformer core loosening based on vibration[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(12): 59-65.
- 朱叶鑫(1986—), 男, 电气高级工程师, 主要从事变电一次设备相关研究(E-mail: slion60@qq.com)。
- 汲胜昌(1976—), 男, 教授, 主要从事电力设备服役特性及其状态评估、交直流设备振动噪声控制与应用等研究(通信作者)(E-mail: jsc@mail.xjtu.edu.cn)。