DOI:10.12177/emca.2025.013

冶金谐波入侵变压器的多物理场特性研究

戴宛麟,高盛楠,唐 华* (东北电力大学电气工程学院,吉林吉林 132012)

Research on Multi-Physical Field Characteristics of Metallurgical Harmonic Intrusion in Transformers

DAI Wanlin, GAO Shengnan, TANG Hua*

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: [Objective] To address the issue of component vibration and abnormal noise in transformers caused by harmonic intrusion during metallurgical production, this study investigates the evolution of metallurgical harmonic disturbances in multi-physical fields using a multi-physics coupling approach, combining simulation and experimental methods. [Methods] First, a coupling electromagneticmechanical-acoustic model of the transformer was proposed. taking harmonic disturbances into account. Electromagnetic force and vibration acceleration were selected as the characteristic parameters linking electromagnetic-mechanical and mechanical-acoustic fields, respectively. Based on electromagnetic coupling, the winding current, magnetic flux density, and electromagnetic force of the transformer were solved. The electromagnetic force was then used as the excitation for the mechanical model to calculate the vibration acceleration of the transformer core and windings. Subsequently, the vibration acceleration was used as excitation for the acoustic model to calculate the sound pressure and the variations in sound pressure level, thereby realizing the multifield coupling process across electromagnetic, mechanical, and acoustic domains. The spatiotemporal distributions and variations of each field under various disturbance modes were simulated. The evolution of disturbances in the multi-physical fields was analyzed using the characteristic parameters. The effects of harmonic and interharmonic components' disturbances on the transformer's multi-field parameters were studied through simulation. Additionally, a test platform for dynamic simulation was built to collect vibration and noise signals from the transformer under different disturbance modes. [Results] The results showed that when metallurgical

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB2404000) National Key R&D Program of China (2022YFB2404000) harmonics intruded into the transformer, the multi-field information of the components increased with higher load rate and harmonic frequency. Interharmonic components caused more significant disturbances to the transformer than harmonic components in adjacent frequency domain. The accuracy of the proposed model was verified through simulation-experiment comparisons. [Conclusion] Based on simulation and experimental results, the most significant interharmonic component 97 Hz in metallurgical harmonics is selected as a typical characterization parameter. A mapping relationship between different levels of the 97 Hz interharmonic and the vibration of transformer components is established, and an instability criterion is developed. When the 97 Hz interharmonic content reaches 15%, it causes severe instability in the internal electromagnetic and mechanical environments within the transformer. The identification method provides support for situational awareness and equipment protection for transformers under metallurgical harmonic intrusion.

Key words: harmonic; interharmonic; transformer; multiphysical field

摘 要: 【目的】针对冶金行业生产中谐波入侵变压器导 致其构件振动、噪声异常的问题,基于多物理场耦合方 法,通过仿真和试验研究冶金谐波扰动在多物理场中的 演变过程。【方法】首先,提出考虑谐波扰动的变压器电 磁-机械-声场耦合模型,将电磁力、振动加速度分别作为 电磁-机械、机械-声场的关联特征参数。基于电磁耦合求 解变压器的绕组电流、磁通密度以及电磁力,并将电磁力 作为机械模型的激励,计算变压器铁心及绕组的振动加 速度,然后以振动加速度为声场模型激励求解变压器声 压以及声压级变化,实现变压器电磁-机械-声的多场耦 合。通过模拟多种扰动模式下各场域的时空分布与变 化,利用关联特征参数反映多物理场的扰动演变过程,仿 真分析(间)谐波分量扰动下变压器多场参数变化。同时

搭建动模试验平台,采集不同模式下变压器的振动及噪声信号。【结果】结果表明,冶金谐波入侵变压器时,构件的多场信息均随着负载率和谐波频率的升高而增强。间谐波分量对变压器的扰动比邻近频域谐波分量更为显著。通过仿真-试验对比,验证了本文模型的正确性。【结论】基于仿真试验结果,以冶金谐波中最为显著的间谐波分量 97 Hz 作为典型表征参数,建立不同含量 97 Hz 间谐波与变压器构件振动的映射关系,进而制定失稳判据。 当含量达到 15% 时,97 Hz 间谐波导致变压器内部电磁、机械环境严重失稳。辨识方案为冶金谐波入侵下变压器的态势感知与设备保护提供支持。

关键词:谐波;间谐波;变压器;多物理场

0 引言

随着电力系统的不断发展,冶金行业非线性 负载的大量接入使得谐波在电网中的含量不断增 加^[1-5]。变压器作为电力系统中的重要组成部分, 其性能和可靠性直接关系到整个电力系统的安全 稳定运行^[6-7]。冶金谐波中包含谐波分量和间谐 波分量,两种谐波分量入侵时,易导致变压器出现 励磁饱和、振动噪声异常等问题^[8-10]。

国内外已针对谐波及间谐波入侵电网变压器 开展了相关研究[11-13]。文献[14]提出一种考虑 谐波条件下硅钢片磁性能及损耗性能的换流变压 器漏磁场计算方法,给出了不同谐波励磁下换流 变压器油箱及夹件漏磁场分布及损耗值。文献 [15]提出了变压器磁场-温度场耦合计算方法,分 析了谐波次数和谐波含有率对干式变压器铁心损 耗和温升的影响。文献[16]探讨油浸式变压器 的振动来源和传递过程,进行了谐波入侵下的变 压器振动频域分析。文献[17]对现有绕组温度 计算模型进行了改进,分析了谐波对绕组损耗和 温度分布特性的影响规律。文献[18]提出了谐 波下变压器杂散损耗的测量方法,对比了谐波和 直流偏磁下杂散损耗的分布。文献[19]针对非 线性负载下的谐波效应,讨论电网负荷电流中各 谐波分量对变压器不平衡运行状态的影响。文献 [20]分析了不同间谐波对单相双绕组变压器励 磁电流、磁通以及铁心振动的影响规律,为变压器 铁心振动的相关研究提供参考。文献[21]搭建 变压器振动噪声试验平台,进行间谐波激励下的 铁心振动试验。文献[22]通过仿真软件模拟间

谐波对铁心的扰动,结果表明相较于工频激励,间 谐波激励也会对铁心振动造成较大影响。综上, 现有研究多集中于谐波对变压器物理特性的影 响,对间谐波扰动的研究较少,且主要以变压器单 一构件铁心为分析对象。同时,鲜有研究系统深 入地探讨间谐波扰动在变压器电磁-机械-声场域 的演变过程;另一方面,谐波分量与间谐波分量入 侵变压器时所产生的扰动差异,仍迫切需要展开 更为深入的研究与分析。

针对上述问题,本文基于电磁-机械-声顺序 耦合,提出考虑冶金谐波扰动的变压器多物理场 耦合模型,研究冶金谐波入侵时变压器多场特性 变化。首先,以典型冶金谐波源交流电弧炉负载 系统为例,针对冶金谐波入侵变压器的途径进行 分析,利用实测数据分析冶金谐波特点,重点研究 典型(间)谐波扰动效应。建立变压器三维仿真 模型,基于电磁-机械-声耦合仿真分析不同负载 率、不同(间)谐波激励下变压器的多物理场特 性。同时,搭建动模试验平台,测量变压器振动、 噪声数据,并与仿真结果对比,以证实所提模型和 结论的有效性和正确性。在此基础上,构建典型 间谐波分量与变压器振动的数学映射关系,并形 成失稳判据。

1 电弧炉负载系统冶金谐波特性

交流电弧炉冶炼主要有三个阶段:熔化期、氧 化精炼期和还原期^[2],电弧炉炼钢流程图如图1 所示。





交流电弧炉作为电力系统中极具代表性的冶 金谐波源,在其冶炼进程中产生(间)谐波,主要 归因于其独特的工作原理以及复杂多变的负载特 性。电弧炉借助电极间的电弧实现金属材料的加 热操作^[23],该电弧呈现出非线性与时变特性,致

使电流波形偏离理想正弦波形。当对该畸变电流 波形进行分解时,除获取基波频率整数倍的谐波 (如2次谐波、3次谐波等)之外,还会产生基波频 率非整数倍的间谐波。上述间谐波分量和基频整 数倍谐波分量共同构建了电弧炉的谐波体系,对 电网产生极大负面影响。谐波与间谐波入侵电网 变压器原理如图2所示。



图 2 电弧炉中谐波及间谐波入侵电网变压器路径 Fig. 2 Path of harmonic and interharmonic intrusion from electric arc furnaces into grid transformers

以东北地区某大型冶金企业为例,该企业负 荷电压等级为10 kV。钢厂电弧炉在不同冶炼阶 段中负荷变化较大,导致变压器振动、噪声异常。 结合钢厂实测数据,对电弧炉负载接入后不同冶 炼阶段下的线路电流进行分析。选取典型冶炼阶 段,电弧炉氧化精炼期和熔化期的电流波形如图 3 所示。



相比于氧化精炼期,熔化期的电流变化更为 剧烈。提取所采集的电流数据,利用式(1)进行 傅里叶分解,并进一步通过式(2)转化得到谐波 含量频谱结果图^[24]。相应阶段的谐波含量频谱 结果如图 4 所示。

$$X_{K} = \sum_{n=0}^{N-1} X_{n} e^{-i2\pi K n/N}$$
(1)

式中: X_n 为时域上的信号序列; X_K 为频域上的信号序列,K为频域上的信号序列,K为频率编号(0 < K < N);N为信号长度。

$$I_{h_{-K}}\% = \frac{I_{h_{-K}}}{I_{h_{-50 \, Hz}}}$$
(2)

式中: $I_{h_{LK}}$ 为傅里叶分解后 K 频率下的电流; $I_{h_{-50 \text{ Hz}}}$ 为傅里叶分解后 50 Hz 下的电流; $I_{h_{-K}}$ %为K 频率下的谐波含量。



图 4 谐波含量傅里叶频谱图



频谱分析表明,电弧炉精炼期电流主要为工 频成分,含有极少的谐波成分;而电弧炉熔化期电 流中存在明显的谐波及间谐波分量。其中,谐波 分量以3次、5次等奇次谐波为主,偶次谐波含量 明显低于临近奇次谐波;间谐波分量主要包含 40 Hz、97 Hz 和141 Hz 分量,97 Hz 间谐波分量最 为显著,含量接近10%。因此,本文以波动较为 剧烈的熔化期阶段为研究对象,选取该阶段典型 频率间谐波,具体含量如表1所示。

DAI Wanlin, et al: Research on Multi-Physical Field Characteristics of Metallurgical Harmonic Intrusion in Transformers

表 1	电弧炉主要间谐波含量
-----	------------

 Tab. 1
 Main interharmonic content of electric

arc furnace

间谐波频率/Hz	间谐波含量/%
40	4.5
97	9.9
141	6.4

2 冶金谐波入侵下变压器多场耦合

考虑冶金谐波入侵的三相变压器电路模型如 图 5 所示。图中, U_A 、 U_B 和 U_C 为一次侧电压; I_A 、 I_B 和 I_C 为一次侧电流; U_a 、 U_b 和 U_c 为二次侧电 压; I_{a1} 、 I_{b1} 和 I_{c1} 为二次侧电流; I_{cn} 为二次环路电 流。定义冶金谐波扰动电流为 I_b ,其包含谐波分 量和间谐波分量。



图 5 电路模型

Fig. 5 Circuit model

构建冶金谐波电流注入后的磁场模型,利用 伽辽金加权余量法对磁场模型求解^[25]:

$$\mathbf{G}_{a} = \int_{V} \Box \times \boldsymbol{M}_{q} \cdot \left(\frac{1}{\mu} \Box \times \boldsymbol{A}\right) \mathrm{d}V - \int_{\mathrm{Ve}} \boldsymbol{M}_{q} \cdot \boldsymbol{J}_{\mathrm{AC}} \mathrm{d}V - \int_{\mathrm{Ve}} \boldsymbol{M}_{q} \cdot \boldsymbol{J}_{\mathrm{AC}} \mathrm{d}V - \int_{\mathrm{Ve}} \boldsymbol{M}_{q} \cdot \boldsymbol{J}_{\mathrm{A}} \mathrm{d}V - \int_{\mathrm{s}} \boldsymbol{M}_{q} \cdot \left[\left(\frac{1}{\mu} \Box \times \boldsymbol{A}\right) \times \boldsymbol{n}\right] \mathrm{d}S$$
(3)

式中: M_q 为矢量权函数; μ 为磁导率;A 为矢量磁 势; J_{AC} 为交流激励电流密度; J_h 为冶金谐波电流 密度; G_a 为伽辽金余量;n 为法向分量。

离散化 G_a 方程得到代数方程组,求解可得 A。利用 A 进一步计算磁密 B、磁场强度 H 及磁 场能量 W 等电磁参数,如示(4)所示:

$$\begin{cases} \boldsymbol{B} = \Box \times \boldsymbol{A} \\ \boldsymbol{H} = \frac{\boldsymbol{B}}{\mu} \\ \mathrm{d}\boldsymbol{W} = \frac{1}{2} \int \mathrm{d}\boldsymbol{B} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{H} \end{cases}$$
(4)

以绕组为例,进一步对构件电磁力 F 展开精确计算,如示(5)所示:

$$\boldsymbol{F} = \sum_{n_{\rm r}}^{n_{\rm r}} \int (\boldsymbol{J}_{\rm AC} + \boldsymbol{J}_{\rm h}) \times \boldsymbol{B} \mathrm{d} \boldsymbol{V}$$
(5)

式中:n_r为绕组单元的数量^[26]。

以构件电磁力 F 为机械模型的激励,实现电磁-机械耦合。针对构件的受力振动现象展开系统研究。本文着重聚焦于更为显著的轴向受力情形,绕组及铁心的轴向受力机械模型如图 6 所示。



图 6 变压器绕组及铁心机械模型 Fig. 6 Mechanical model of transformer windings and core

图 6(a)中以刚体质量块替代绕组线饼,以阻 尼器表示线圈阻尼,以弹簧器表示垫片,首末端垫 片预紧力设定为 *F*_y,绕组轴向机械振动数学模 型为^[27]

$$nm\boldsymbol{g}(t) + \sum_{1}^{n} C\boldsymbol{v}(t) + \left[K_{\rm f} + \sum_{1}^{n-1} K + K_{\rm e}\right]\boldsymbol{s}_{\rm w}(t) = \boldsymbol{F}_{\rm w}(t) + \boldsymbol{G}$$
(6)

式中:n 为线饼个数;m 为单个线饼质量;C 为阻 尼系数; K_{Γ} 、K、 K_{e} 分别为首、中、末端垫片刚度系 数; s_{w} 、v、g 分别为绕组节点振动位移、速度、加速 度矢量; F_{w} 、G 分别为变压器绕组电磁力、重力。

由于绝缘垫片和绕组线饼刚度基本不变,因此,当预紧力不变时,其材料参数可视为常数。 图 6(b)为铁心轴向振动等效模型,f+df表示

铁心单元横截面上的受力。依据力学理论得到铁 心柱体振动方程为^[28]

$$\boldsymbol{D} \frac{\partial^2 \boldsymbol{s}}{\partial t^2} + \boldsymbol{C} \frac{\partial \boldsymbol{s}}{\partial t} + \boldsymbol{K} \boldsymbol{s}_{\rm e} = \boldsymbol{F}_{\rm e}$$
(7)

式中:D为质量矩阵;C为阻尼矩阵;K为刚度矩阵; F_{c} 为磁致伸缩力; s_{c} 为铁心的轴向位移。

由振动位移 s 求解振动加速度 g:

$$g = \frac{\mathrm{d}^2 s}{\mathrm{d}t^2} \tag{8}$$

基于电磁-机械耦合模型模拟变压器受冶金 谐波扰动时的振动异常情况,进而构建声学波动 模型研究变压器噪声效应。以电磁-机械模型求 解的振动加速度 g 作为声场模型的激励,从而实 现机械-声耦合。

$$\begin{cases} -\boldsymbol{n} \cdot \left[-\frac{1}{\rho_{k}} (\Box p_{t} - q_{d}) \right] = -\boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{g} \\ p_{t} = p_{k} + \boldsymbol{p} \end{cases}$$
(9)

式中: ρ_k 为流体密度; q_d 为偶极域源; p_t 为总声 压; p_h 为背景声压;p 为变压器声压。

利用声学原理计算绕组与铁心周围声场波动 情况^[29]:

$$\frac{1}{\rho_{k}v^{2}} \cdot \frac{\partial^{2} p_{t}}{\partial^{2} t} + \Box \cdot \left[-\frac{1}{\rho_{k}} (\Box p_{t} - q_{d}) \right] = Q(10)$$

式中:v为声速;Q为单极域源。

通过分析声压变化,计算变压器声压级 L_o:

$$L_p = 20 \cdot \lg \left(\frac{P}{P_{\text{ref}}}\right) \tag{11}$$

式中: P 为声压有效值; P_{ref} 为参考声压, 取 20 µPa。

基于电磁-机械-声的耦合路径,构建冶金谐 波入侵下变压器多物理场耦合模型,如图7所示。

在电磁计算时,绕组激励设置为环形电流密 度,并设置磁场边界为磁力线平行边界条件,其余 设置为自然边界条件。在机械振动求解时,将变 压器底座设定为固定约束条件,并对变压器铁心 及绕组添加辊支撑约束条件,即变压器底座不产 生移动,只考虑其余构件轴向振动情况。在声场 求解域中,背景声压设定为0,声学求解域边界设 定为球面波辐射条件,即认为环境噪声不会对变 压器噪声声压产生影响。

基于电磁耦合求解变压器的绕组电流、磁通 密度以及电磁力,同时将电磁力作为机械模型的 激励,计算变压器铁心及绕组的振动加速度,并以 振动加速度为声学波动模型激励求解变压器声压 以及声压级变化,实现变压器电磁-机械-声的多 场耦合。当绝对收敛范数小于设定的收敛准则 值,或耦合循环达到预设次数时迭代终止。



图 7 变压器多物理场耦合模型



3 算例仿真

本研究选取实际三相三柱式变压器(BSS-1000 VA)作为研究对象,等比例构建其三维有限 元模型,如图 8 所示。材料参数如泊松比、杨氏模 量等由拉压试验测定。变压器一、二次侧绕组联 结方式为 Yd 联结,参数如表 2 所示。



图 8 变压器仿真模型



3.1 预处理

基于图 4 熔化期电流的频谱特性,结合表 1 设置典型间谐波扰动。为便于横向对比不同频率 间谐波的扰动差异,本研究参照最为显著的 97 Hz 间谐波,将各间谐波含量统一设定为 10%。 并设置相同含量的谐波扰动,旨在对比临近频域 谐波分量与间谐波分量的扰动差异,具体参数如 表 3 所示。

表 2 三相变压器参数					
Tab. 2 Parameters	of three-phas	e transformer			
参数名称 额定值 测量值					
频率/Hz	50	—			
容量 $S_{\rm N}/({ m VA})$	1 000	—			
电压 $U_{\rm N}/{\rm V}$	220/110	—			
空载电流 I0/A	0.1	0.1			
铁心尺寸/mm×mm×mm	—	300×150×190			
硅钢片杨氏模量/MPa	—	1.92×10^{5}			
硅钢片泊松比	—	0.27			
绕组杨氏模量/MPa	—	0.8×10^5			
绕组泊松比	_	0.35			

表 3 典型扰动模式参数 Tab. 3 Parameters of typical disturbance modes

扰动模式	间谐波	谐波
M1	40 Hz 10%	无谐波
M2	97 Hz 10%	100 Hz 10%
M3	141 Hz 10%	150 Hz 10%

获取多场耦合关键特征信息时,为便于进行 虚实一致性校验,测点选取必须服从仿真和试验 观测位置一致的原则。动模试验受设备结构及实 际接线所限,振动传感器只能安装在变压器本体



表面裸露且绝缘良好的位置。因此,虚拟仿真测 点分布根据动模试验进行选取。在可供选择的区 域内以部分典型测点为例,对比分析多场物理特 征信息。通过测点①、②对比绕组中部和端部的 多场特征参数;同时选取测点③、④,对比铁心主 心柱和旁柱的多场特征参数。

同时,探究不同负载模式(负载率 β =25%、50%、75%、100%)下, I_h 对变压器的电磁、振动特性的影响。空载模式下,变压器负载侧无谐波电流流入,因此本文重点分析负载运行时构件的电磁-机械信息变化规律。

3.2 绕组电磁-机械仿真结果分析

设置不同扰动模式和负载模式,仿真获取绕 组测点漏磁信息,部分结果如图9所示。

结果表明,变压器负载运行时,间谐波对绕组 漏磁的时域波动影响显著。以变压器满载运行为 例,141 Hz、10%间谐波扰动下①号测点漏磁幅值 约为 150 Hz、10%谐波扰动的 1.13 倍。其他扰动 模式和负载模式下,均呈现出一致的规律,这表明 间谐波分量在相同模式下引起的绕组漏磁变化较 临近频域谐波分量更为剧烈。相同负载率下,漏 磁时域波形幅值呈现周期性规律波动,随着间谐 波频率的增大,漏磁畸变程度更加显著;相同模式



图 9 绕组测点漏磁结果

Fig. 9 Magnetic flux leakage results at measurement points of windings

下,绕组端部漏磁幅值高于中部。

进一步研究绕组受力及振动,部分仿真结果 如图 10 所示。

由图 10 可知,绕组电磁力与振动加速度的变 化规律基本一致。相同模式下,间谐波分量相较 于临近频域谐波分量对变压器受力及振动的扰动 更显著。以β=100%为例,97 Hz、10%间谐波扰 动下①号测点振动加速度幅值约为100 Hz、10% 谐波扰动的1.1 倍。随着扰动频率增大,绕组测 点受力及振动也相应增强,且绕组端部受力及振 动强于中部。结合图9,绕组漏磁、受力及振动变 化规律具有一致性。





measurement points of windings

3.3 铁心电磁-机械仿真结果分析

以变压器满载运行为例,仿真分析不同扰动 模式下铁心 A 相主磁密的时域变化,具体结果如 图 11 所示。

图 11 中,随着谐波和间谐波分量的入侵,主 磁密呈现出"全波畸变"的变化趋势,且随着扰动 频率的升高,主磁密幅值不断增大,铁心饱和程度 不断加剧。相同模式下,间谐波分量相较于邻近 频域谐波分量对主磁密的影响更为显著。

以变压器满载运行, M1、M3 扰动模式为例,

选取 A 相主磁密最大时刻,可得到变压器主磁密 分布云图如图 12 所示。

结果表明,随着扰动频率的升高,主磁密幅值 不断增大;相同模式下,间谐波分量相较于邻近频 域谐波分量对主磁密的扰动更加严重,与主磁密 时域规律相符。

进一步研究变压器受扰时铁心的振动变化。 分别在主心柱(B相)和旁柱(A相)上选取③号 和④号测点,以对比变压器不同位置的振动情况, 部分结果如图13所示。

DAI Wanlin, et al: Research on Multi-Physical Field Characteristics of Metallurgical Harmonic Intrusion in Transformers









图 12 主磁密分布云图



由图 13 可知,变压器铁心振动的时空分布 受间谐波扰动呈现出显著波动,且间谐波频率 越大,振动愈发严重;谐波或间谐波扰动下,主 心柱振动比旁柱更为剧烈。以变压器满载运行 为例,97 Hz、10%间谐波扰动下③号测点振动加 速度幅值约为 100 Hz、10%谐波扰动的 1.13 倍; 141 Hz、10%间谐波扰动下④号测点振动加速度 幅值约为 150 Hz、10%谐波扰动的 1.12 倍,间谐 波分量相较于邻近频域谐波分量对变压器振动 的影响更为显著。对比图 10,铁心比绕组的振 动更为剧烈。

3.4 变压器声场仿真结果分析

基于电磁-机械耦合,进一步研究声场特性变化。仿真获取不同扰动模式和负载模式下的变压器表面最大声压级 L_{amax},如表 4 所示。

表 4 变压器表面最大声压级

Tab. 4 Maximum sound pressure level on

transformer surface

唱士	干扰模式		负载率 β /%			
味尸			25	50	75	100
	M1	无谐波	28.3	29.0	30.2	31.0
$L_{p\rm max}/{ m dB}$	1011	40 Hz 10%	28.6	29.4	30.8	31.5
	M2	100 Hz 10%	28.9	29.8	31.4	31.9
		97 Hz 10%	29.1	30.3	31.9	32.4
	М3	150 Hz 10%	29.5	30.7	32.1	32.8
		141 Hz 10%	30.2	31.0	32.4	33.6

由表4可知,各扰动模式下变压器表面最大 声压级随着负载率的升高而增大;相同模式下,间 谐波分量导致的噪声加剧比邻近频域谐波分量更

为显著,且噪声水平随着频率增大而不断提升,与 振动规律相符。以 β =100%为例,141 Hz、10%间 谐波扰动下 L_{pmax} 相较于无谐波扰动增大约 8%, 97 Hz、10%间谐波扰动下 L_{pmax} 相较于无谐波扰动 增大约 4%,40 Hz、10%间谐波扰动下 L_{pmax} 相较于 无谐波扰动增大约 1%。 仿真分析变压器声压级空间分布,以β= 100%,M2、M3扰动模式为例,噪声水平最高时刻 的声压级分布如图 14 所示。

由图 14 可知,相同模式下,间谐波分量导致 的噪声加剧比邻近频域谐波分量更加严重;铁心 声压级高于绕组,与振动规律相符。



图 13 铁心测点振动结果





图 14 变压器最大声压级分布



通过仿真研究谐波分量与间谐波分量对三相 变压器多物理场特性的影响,可归纳以下规律。

(1)谐波分量或间谐波分量入侵下,变压器 绕组各场域特征信息均受到干扰,绕组漏磁、受力 及振动加速度表现出相似的变化规律。相同条件 下,绕组端部特征信息变化比中部更为剧烈;随着 扰动频率的增大,多物理场特征信息变化加剧。 相同模式下,间谐波分量相较于邻近频域谐波分量对绕组的扰动更为严重。以变压器满载运行为例,141 Hz、10%间谐波扰动下绕组漏磁幅值约为150 Hz、10%谐波扰动的1.13 倍,振动加速度幅值约升高至后者的1.11 倍。

(2)冶金谐波入侵易导致铁心励磁饱和,铁 心振动明显加剧,且间谐波分量的影响更为显 著;随着扰动频率的提升,铁心的振动和噪声也 随之增强。相同扰动水平和相同负载率下,铁 心振动和噪声比绕组更加剧烈,主心柱振动高 于旁柱。

4 动模试验

搭建动模数字化试验平台,变压器参数如表 2 所示,测试系统单元化如图 15 所示。变压器一 次侧与扰动电流调制单元相连,模拟间谐波、谐波 扰动注入;二次侧配有振动、噪声监测单元,采集 不同模式下变压器的振动及噪声数据。具体试验 步骤如下。

(1)将各元件进行连接,接入各监测模块。 通过电压调节单元的调压器 T₁ 使变压器一次侧 电压达到额定电压,通过调节负载调节单元的滑 动变阻器实现变压器不同负载率运行。



(b) 测试平台



Fig. 15 Digital test platform for dynamic simulation

(2)闭合开关 K,接入扰动电流调制单元。扰动电流调制单元中包含信号发生器 DG4102 和滑动变阻器。通过设置 DG4102 信号输出频率控制各模式下扰动电流的波形,并进一步通过调节滑动变阻器控制各模式下扰动电流的幅值。

(3)通过振动监测单元的磁吸式振动传感器 JF2100-T采集振动数据,其中测点的选择与仿真 保持一致。利用噪声监测单元的声级计 HS5671D+对噪声信号进行采集。

变压器振动测点位置与仿真一致,不同模式 下绕组测点的振动信息如图 16 所示。

结果表明,绕组试验振动变化规律与仿真结 果基本一致。由于试验过程中存在结构联动、外 部环境干扰及测量误差等因素的综合作用,导致 测量的振动数据比仿真结果更加复杂。随着扰动 频率及负载率的增加,绕组振动更加剧烈,且绕组 端部振动强于中部;间谐波分量相较于邻近频域 谐波分量对绕组的扰动更为显著。

变压器铁心③、④号测点的振动加速度部分 测量结果如图 17 所示。提取试验振动加速度有 效值,以β=100%、M3模式为例,97 Hz、10%间谐 波分量扰动下③、④号测点的振动加速度约为 100 Hz、10%谐波分量的1.15倍。相同模式下,间 谐波分量入侵下的铁心振动加速度比邻近频域谐 波分量更加剧烈,且变压器铁心振动强于绕组,与 仿真规律一致。





图 17 铁心振动试验结果 Fig. 17 Test results of core vibration

依据声级测定标准 GB/T 1094.10-2022 监测 变压器试验噪声 L_n,具体结果如表 5 所示。

表 5 变压器试验噪声 Tab. 5 Test noises of transformer

唱書	-	干扰模式		负载率 β /%			
嗓户				50	75	100	
	M1	无谐波	30.3	31.5	32.6	33.5	
$L_{\rm n}/{ m dB}$	141.1	40 Hz 10%	30.6	31.9	33.0	33.9	
	M2	100 Hz 10%	31.7	32.4	33.2	34.3	
		97 Hz 10%	32.2	32.8	33.7	34.8	
	МЗ	150 Hz 10%	32.6	33.6	34.3	35.5	
	MI3	141 Hz 10%	33.1	34.1	35.2	36.3	

结果表明,随着扰动频率和负载率的提升,变 压器试验噪声不断增大;相同模式下,间谐波分量 扰动下的试验噪声高于邻近频域谐波分量。对比 表4,由于环境噪声和试验误差影响,导致试验噪 声高于仿真结果,但两者变化规律一致。

5 基于电气-机械信息映射的失稳判据

通过仿真和试验对比,验证了仿真模型的正 确性和有效性。在虚实一致的基础上,进一步研 究多场特征信息映射关系。

仿真和试验表明,冶金谐波入侵时,变压器绕 组和铁心均出现振动、噪声加剧,尤其是间谐波分 量相较于邻近频域谐波分量对变压器构件的扰动 更加严重。因此,基于图4冶金谐波特点,选取电 弧炉熔化期中最为显著的间谐波分量97 Hz 作为 典型表征参数,挖掘不同含量97 Hz 间谐波与变 压器构件振动幅值的映射关系。在原有多场特征 信息库的基础上,针对97 Hz、5%和97 Hz、15%扰 动下变压器的多场特性展开进一步模拟,形成电 气-振动信息映射关系,如图18 所示。

不难看出,变压器不同构件的电气-振动信息 具有相似的分布规律,构件振动幅度随着 $I_{h_97 \text{ Hz}}$ % 的增大而不断提升。以④号测点为例,当 $I_{h_97 \text{ Hz}}$ % 达到 5%时,变压器铁心振动为无扰动时的 1.15 倍,振动加剧并不明显;当 $I_{h_97 \text{ Hz}}$ %达到 10%时,变 压器铁心振动为无扰动时的 1.5 倍,振动加剧已 较为显著;当 $I_{h_97 \text{ Hz}}$ %达到 15%时,变压器铁心振 动为无扰动时的 2.3 倍,振动加剧已十分严重。 进一步挖掘其映射关系,将振动加速度与谐波含 量的非线性映射用数学函数的形式表示。以 图 18 中 β =75% 模式为例, $I_{h_97 \text{ Hz}}$ % 与g的映射

DAI Wanlin, et al: Research on Multi-Physical Field Characteristics of Metallurgical Harmonic Intrusion in Transformers





函数拟合如式(12)所示,非线性映射参数如表 6 所示。

$$g(\beta, I_{h_{97 \text{ Hz}}}\%) = p_1(I_{h_{97 \text{ Hz}}}\%)^3 + p_2(I_{h_{97 \text{ Hz}}}\%)^2 + p_3(I_{h_{97 \text{ Hz}}}\%) + p_4$$
(12)

式中: p_1 、 p_2 、 p_3 和 p_4 为非线性映射参数。

表6 非线性映射参数

Tab. 6 Nonlinear	mapping	parameters
------------------	---------	------------

参数名称	P_1	p_2	Рз	p_4
①号测点	-0.000 3	0.004 7	0.046 3	0.097 5
②号测点	-0.000 6	0.007 3	0.058 3	0.111 7
③号测点	0.003 2	-0.022 7	0.426 3	0.437 7
④号测点	0.003 6	-0.027 5	0.568 8	0.588 3

不同负载模式下,g-I_{h_97 H2}%具有类似的映射 关系。结合设备受扰情况,以 I_{h_97 H2}%作为典型表 征参数制定失稳判据,如式(13)所示:

$$I_{\rm h_{-}97 \ Hz}\% = K_{\rm rel}I_{\rm h0_{-}97 \ Hz}\%$$
(13)

式中:K_{rel}为可靠系数,设定为1.1。

同步进行试验论证,当 $I_{h_{97} Hz}$ %达到15%时, 变压器振动噪声异常严重并出现绝缘烧毁现象, 故安全阈值 $I_{h_{0},97 Hz}$ %取15%。当0 $\leq I_{h_{97} Hz}$ %<5% 时,变压器受扰程度较小,处于稳定运行状态;当 5% $\leq I_{h_{97} Hz}$ %<10%时,虽然变压器能够抵御间谐 波入侵造成的影响,但构件的振动噪声问题已不 容忽视;当10% ≤ *I*_{h_97 H2}% <15% 时,间谐波严重影 响变压器正常运行,应及时报警并采取相关抑制 措施;当 *I*_{h_97 H2}% 达到15% 时,可能导致变压器出 现绝缘烧毁状况。

实际工程中,变压器运行负载率较低,一般低 于 75%。此时虽然冶金谐波扰动下的电流未超 过安全限值,但已对内部构件产生不良影响,若不 及时处理,累积效应易导致设备出现更严重的机 械性危害。本研究通过融合电气-机械信息挖掘 其隐含的映射关系,并结合构件的受扰程度制定 合理失稳判据,实现利用可观测的电气信息表征 难以观测的异常物理特性,为制定风险抵御辅助 决策提供重要依据。

6 结语

针对实际生产中冶金谐波入侵变压器的问题,研究变压器受扰时内部电磁-机械-声多场特 性变化,得出以下结论。

(1)冶金谐波入侵变压器时,构件的多场信 息均随着负载率和扰动频率的提升而增强。间谐 波分量相较于邻近频域谐波分量给变压器带来的 影响更为严重。以变压器满载运行为例,97 Hz、

10%间谐波扰动下主心柱振动约为100 Hz、10% 谐波扰动下的1.15 倍。相同模式下,绕组端部信 息幅值高于中部;铁心的受扰情况比绕组更为严 重,且主心柱振动、噪声高于旁柱。

(2)通过构建变压器多物理场耦合模型,研 究冶金谐波扰动在变压器电磁-机械-声场域的演 变过程,总结谐波分量与间谐波分量对变压器的 扰动差异。基于虚实一致性深入挖掘变压器受扰 时电气-机械信息映射关系,以电弧炉熔化期中最 为显著的间谐波分量 97 Hz 作为典型表征参数制 定合理失稳判据,通过可观测的电气信息表征难 以观测的异常物理特性,为冶金谐波入侵下变压 器的态势感知与设备保护提供支持。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

戴宛麟进行了方案设计、内容总结与论文撰 写,高盛楠进行了仿真与试验分析,唐华参与了论 文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终 稿件的提交。

The scheme design, content summary, and paper writing were carried out by Dai Wanlin. The simulation and experimental analysis were conducted by Gao Shengnan. The manuscript was examined and revised by Tang Hua. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参 考 文 献

- [1] 弓子钧,张博,董婷. 基于谐波电阻的变压器箔 式绕组温升在线修正[J].电机与控制应用, 2023,50(8):18-25.
 GONG Z J, ZHANG B, DONG T. On-line correction for temperature rise of foil winding in transformer based on harmonic resistance [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(8):18-25.
- [2] 方昕玥, 王斌, 喻敏, 等. 交流电弧炉的间谐波检 测及状态判断[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13);

137-143.

FANG X Y, WANG B, YU M, et al. Inter-harmonic detection and state judgment of AC arc furnace [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57 (13): 137-143.

- [3] 赵本强,曾江,谢宝平,等.基于光伏逆变器的电网谐波阻抗测量新技术[J].电机与控制应用,2024,51(3):1-9.
 ZHAO B Q, ZENG J, XIE B P, et al. New technology of grid harmonic impedance measurement based on photovoltaic inverter [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(3):1-9.
- [4] 黄准, 王晓虎, 周密, 等. 可切换智能负载的 T 型 三电平电力弹簧负载电压谐波含量和超调量研究
 [J]. 电机与控制应用, 2024, 51(8): 97-108.
 HUANG Z, WANG X H, ZHOU M, et al. Study on harmonic content and overshoot of load voltage of Ttype three-level electric spring with switchable smart loads [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(8): 97-108.
- [5] 李石强, 王鹤, 于华楠. 基于稀疏字典原子共享的电力系统谐波动态监测方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(24): 9559-9570.
 LISQ, WANGH, YUHN. A dynamic harmonic monitoring method for power system based on sparse dictionary atom sharing [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(24): 9559-9570.
- [6] AHMADZADEH S B, REZAEI Z A. Advanced transformer differential protection under GIC conditions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(3): 1433-1444.
- [7] 朱涛,王丰华. 地磁感应电流作用下大型变压器的温升特性计算[J]. 电工技术学报, 2022, 37(8): 1915-1925.
 ZHU T, WANG F H. Calculation of temperature rise of large transformer, under geometrically induced

of large transformer under geomagnetically induced current [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(8): 1915-1925.

[8] 王亮,曾伟杰,田娟,等. 直流分量和谐波分量对 电流互感器传输特性影响[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(5): 1-8.
WANG L, ZENG W J, TIAN J, et al. Influence of DC component and harmonic component on transmission characteristics of current transformer [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(5): 1-8.

DAI Wanlin, et al: Research on Multi-Physical Field Characteristics of Metallurgical Harmonic Intrusion in Transformers

 [9] 赵志刚,郭莹,刘佳,等.谐波激励条件下铁心损 耗测量与计算[J].仪器仪表学报,2018,39(8): 162-168.
 ZHAO Z G, GUO Y, LIU J, et al. Measurement and calculation of transformer core loss under harmonic

excitation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8): 162-168.

[10] 秦垚, 王晗, 庄圣伦, 等. 海上风电场集电网的高频谐振分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (14): 5169-5181.

QIN Y, WANG H, ZHUANG S L, et al. Analysis on high frequency resonance of collector network in offshore wind farm [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5169-5181.

[11] 葛津铭, 尹贻波, 李赫, 等. 基于直流侧电压等效 补偿的光伏并网系统间谐波电流抑制策略[J]. 电网技术, 2024, 48(12): 4886-4895.
GE J M, YIN Y B, LI H, et al. An interharmonic suppression control strategy in PV system based on

DC-link voltage equivalent compensation [J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 4886-4895.

[12] 陈瑶,张钊源,冯鑫鹏,等.基于复合控制的永磁
 同步电机电流谐波抑制策略[J].电机与控制应
 用,2022,49(7):30-37.

CHEN Y, ZHANG Z Y, FENG X P, et al. Suppression strategy of current harmonic in permanent magnet synchronous motor based on compound control [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(7): 30-37.

[13] 龚育林. 谐波分量对异步电机性能的影响及抑制 方法[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(7): 17-21+ 52.

> GONG Y L. Effect of harmonic components on performance of asynchronous motor and its suppression method [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(7): 17-21+52.

[14] 武炬臻,贺康航,王贵娟,等.谐波条件下硅钢片磁特性及换流变压器漏磁场计算[J].变压器,2024,61(3):52-58.

WU J Z, HE K H, WANG G J, et al. Calculation of silicon steel sheet magnetic characteristics and leakage magnetic field under harmonic condition in converter transformer [J]. Transformer, 2024, 61 (3): 52-58.

[15] 许斌斌,陈畅,张傲宇,等.谐波下干式变压器铁 心磁场-温度场仿真分析[J].电气传动,2024,54 (2): 32-40.

XU B B, CHEN C, ZHANG A Y, et al. Simulation analysis of magnetic field-temperature field about drytype transformer core under harmonics [J]. Electric Drive, 2024, 54(2): 32-40.

- [16] 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 J R, LI J M, WEI M. Vibration characteristics of power transformers under harmonic excitation [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59 (8):35-42.
- [17] 谭又博,余小玲,臧英,等.谐波电流对换流变压器绕组损耗及温度分布特性的影响[J].电工技术学报,2023,38(2):542-553.
 TAN Y B, YU X L, ZANG Y, et al. The influence of harmonic current on the loss and temperature distribution characteristics of a converter transformer winding [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(2):542-553.
- [18] 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 C G, TIAN Y K, LI Y J, 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.
- [19] NOSHAHR J B, BAGHERI M, KERMANI M. The estimation of the influence of each harmonic component in load unbalance of distribution transformers in harmonic loading condition [C] // 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 EEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, Genova, 2019.
- [20] 李慧奇,李金博,杨光. 间谐波激励下变压器励磁-振动特性的实验研究与计算分析[J]. 高电压技术,2022,48(5):1781-1790.
 LI H Q, LI J B, YANG G. Experimental study and calculation analysis of excitation-vibration characteristics of transformer under interharmonic excitation [J]. High Voltage Engineering, 2022,48 (5):1781-1790.
- [21] 李慧奇, 闫长祺, 杨光, 等. 间谐波下变压器铁心振动噪声特性的实验研究[J]. 太原理工大学学报, 2020, 51(6): 874-880.

LI H Q, YAN C Q, YANG G, et al. Experimental research on transformer core vibration and noise under interharmonic excitation [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2020, 51(6): 874-880.

[22] 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 L, ZHANG S, LI Y, et al. Vibration and noise characteristics of the core of a power transformer under interharmonic excitation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(22): 78-83+229.

- [23] 赵锦涛. 间谐波的产生规律及其对变压器励磁性 能影响研究[D]. 保定:华北电力大学,2019.
 ZHAO J T. Study on the generation regularity of interharmonics and its effect on the excitation performance of transformers [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2019.
- [24] 李鑫. 直流偏磁下电力变压器铁心振动噪声研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2024.

LI X. Research on vibration and noise in power transformer iron core under DC magnetic bias conditions [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2024.

- [25] 潘超,石晓博,安景革,等.地铁杂散电流干扰变 压器多场传播模-态分析[J].电工技术学报, 2024,39(15):4613-4629.
 PAN C, SHI X B, AN J G, et al. Multi-field propagation mode-state analysis of subway stray current interference on transformers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(15):4613-4629.
- [26] 潘超,陈祥,蔡国伟,等.基于电磁-机械耦合原 理的变压器三相不平衡运行绕组振动模-态特征
 [J].中国电机工程学报,2020,40(14):4695-4707.

PAN C, CHEN X, CAI G W, et al. Mode-state

characteristics of three-phase unbalanced winding vibration of transformer based on electromagnetic mechanical coupling principle [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4695-4707.

- [27] 张鹏宁,李琳,聂京凯,等.考虑铁心磁致伸缩与 绕组受力的高压并联电抗器振动研究[J].电工 技术学报,2018,33(13):3130-3139.
 ZHANG P N, LI L, NIE J K, et al. Study on the vibration of high voltage shunt reactor considering of magnetostriction and winding force [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(13): 3130-3139.
- [28] 刘行谋.变压器直流偏磁电-磁-力特性及振动信号时频特征分析研究[D].重庆:重庆大学, 2018.

LIU X M. Research on electromagnetic-mechanical properties and time-frequency characteristics analysis of vibration signals for DC biased transformers [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.

[29] 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):1662-1674.
TANG B, LIU S Y, BAI X C, et al. Calculation of noise field in main transformer room based on improved acoustic FEM [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1662-1674.

收稿日期:2024-11-30

收到修改稿日期:2025-01-25

作者简介:

戴宛麟(2005-),女,本科在读,研究方向为变压器内 部故障辨识,daiwanlin05@163.com;

*通信作者:唐 华(2000-),男,硕士研究生,研究方向为变压器内部故障辨识,568431772@qq.com。