

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240038

考虑地铁杂散电流干扰的电网变压器振动噪声耦合效应

潘超¹, 安景革¹, 刘闯¹, 李载源¹, 石晓博¹, 杜毅²

(1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012;

2. 国网辽宁省电力有限公司大连供电公司, 辽宁 大连 116001)

摘要: 针对城市地铁杂散电流导致电网变压器出现振动噪声异常的问题, 提出一种基于杂散电流变化与本体噪声映射关系的变压器失稳判别方法。首先, 分析杂散电流干扰电网的主要途径与原理, 根据实测数据总结杂散电流的变化特性。然后, 提出考虑杂散电流干扰的变压器多场耦合模型, 将电磁-机械-声耦合划分为电磁干扰域与振动-噪声传播域的耦合。仿真分析不同场景下变压器多物理特征信息, 总结杂散电流突变率、突变时刻对变压器电流、磁通等参数的干扰、传播影响规律。最后, 搭建实验平台, 测量变压器的多物理特征参数, 与仿真对比, 验证所提模型与结论的正确性, 并基于杂散电流突变率与噪声的映射关系制定失稳判据。结果表明, 在杂散电流突变处, 变压器振动噪声异常加剧; 当杂散电流突变时刻与工频激励初始相位的相角差为 90° 时, 该问题最严重, 本体噪声水平升高约 10%。该方法为轨道交通临近电网变压器的态势感知与设备保护提供依据。

关键词: 杂散电流; 突变性; 多场耦合; 振动噪声; 态势感知

Power grid transformer vibration-noise coupling effect considering subway stray current interference

PAN Chao¹, AN Jingge¹, LIU Chuang¹, LI Zaiyuan¹, SHI Xiaobo¹, DU Yi²

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology (Northeast

Electric Power University), Ministry of Education, Jilin 132012, China; 2. Dalian Power Supply Company,

State Grid Dalian Electric Power Co., Ltd., Dalian 116001, China)

Abstract: To address the abnormal vibration and noise in power grid transformers caused by stray currents from urban subways, a transformer instability identification method based on the mapping relationship between stray current variations and inherent noise is proposed. First, the primary paths and mechanisms of stray current interference in the power grid are analyzed, and the characteristics of the stray current variations are summarized based on measured data. Next, a multi-physics transformer coupling model considering stray current interference is proposed, dividing the electromagnetic-mechanical-acoustic coupling into an electromagnetic interference domain and a vibration-noise propagation domain. Through simulation analysis under different scenarios, the interference and propagation patterns of stray current mutation rate and timing on transformer parameters such as current and magnetic flux are studied. Finally, an experimental platform is set up to measure the multi-physics characteristics of transformers, while the correctness of the proposed model and conclusions are verified by comparing experimental and simulation results. Moreover, an instability criterion is established based on the mapping between the stray current mutation rate and noise. The results indicate that the vibration and noise of the transformer intensify significantly at points of stray current mutation, with the problem being most severe when the phase angle difference between the stray current mutation timing and the initial phase of power frequency excitation is 90° , leading to an approximately 10% increase in the inherent noise level. This method provides a basis for situational awareness and equipment protection of grid transformers near rail transit systems.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2400800).

Key words: stray current; mutation characteristics; multi-physics coupling; vibration noise; situational awareness

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB2400800)

0 引言

地铁牵引系统产生的杂散电流(stray current, SC)及电磁场对临近电网的影响具有驱动源复杂、干扰设备多、传播范围广等特点^[1-2]。近年来城市轨道交通系统快速发展,对电力系统带来的影响与问题也日益严重^[3-4]。

杂散电流由接地点注入变压器时,易导致设备出现励磁饱和、电流畸变、谐波增加等问题,并伴随振动、噪声等异常^[5-7]。文献[8]分析了侵入变压器的杂散电流和感应电流的联系与区别,考虑杂散电流的直流分量研究其主要频域分布。文献[9]基于多场耦合原理,分析了三相变压器在遭受直流扰动时的振动特性。文献[10]分析杂散电流对变压器振动的频域影响,研究箱体振动与杂散电流之间的联系。文献[11]研究变压器直流偏磁对铁芯硅钢片的影响,偏磁效应导致磁致伸缩回环失去原有的对称性,使铁芯振动与形变加剧。文献[12]通过 500 kV 单相变压器试验,量测直流扰动下的畸变电流、箱体振动及噪声,并分析变压器电磁、机械参数的变化趋势。综上,多数研究主要考虑杂散电流直流分量的频域影响,关于杂散电流对变压器内部构件造成的振动噪声干扰问题,还罕有系统深入研究。

本文提出一种考虑杂散电流突变的变压器干扰传播耦合模型,基于干扰传播耦合原理研究杂散电流的时域突变性对电网变压器的振动噪声影响。分析杂散电流干扰途径,基于实测杂散电流波形,选取 5 种典型杂散电流突变率和 3 种典型突变时刻作为控制变量,建立三维仿真模型,获取电磁干扰域和机械-声传播域的关键特征信息,总结其变化规律。搭建实验平台,测量不同场景下的振动及噪声参数,与仿真数据对比,验证所提方法与结论的正确性。最后,构建杂散电流突变率与变压器噪声的关联映射关系,实现通过可量测电气信息反映不可(难)量测物理特征。

1 杂散电流干扰途径与变化特性

杂散电流入侵电网主要有两种途径:1) 地铁车站及牵引变电站接地网由电缆铠装及接地扁钢等接地导体连接,地铁贯通接地系统为地铁系统中的杂散电流传播提供低阻路径;2) 地铁变电所与地铁牵引变电站接地网通过电缆铠装连接形成电气贯通结构,并通过电缆铠装与附近电网变电站接地网连接形成电气贯通结构^[13-15]。地铁与电网接地系统为杂散电流入侵接地变压器提供低阻路径,如图 1 所示。

文献[16]表明,在直流分量的干扰下,变压器

铁芯励磁过饱和,叠压硅钢片的磁滞伸缩效应加剧,畸变的绕组电流和漏磁会导致铁芯、绕组的振动加剧,造成内部构件松动、变形或脱落,降低了变压器的机械强度和电气强度,进而缩短了使用寿命。同时,构件振动加剧也会对周边环境造成噪声污染。

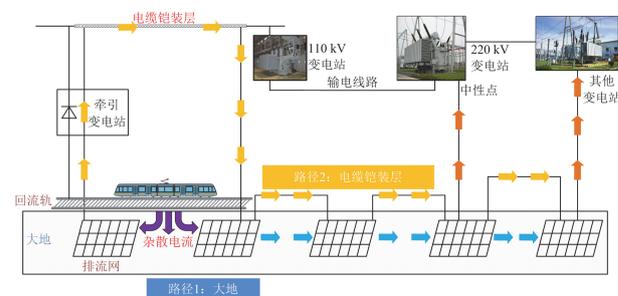


图 1 杂散电流入侵途径

Fig. 1 Stray current intrusion pathway

以我国东北地区某城市地铁 1 号线临近 220 kV 变电站为例,站内共两台 220 kV 主变。2022 年 10 月,中性点接地的 2 号变压器产生异常噪声和振动,现场量测其中性点电流,部分结果如图 2 所示。经分析论证,该主变中性点电流剧烈变化主要由于附近地铁系统泄漏的杂散电流引起。

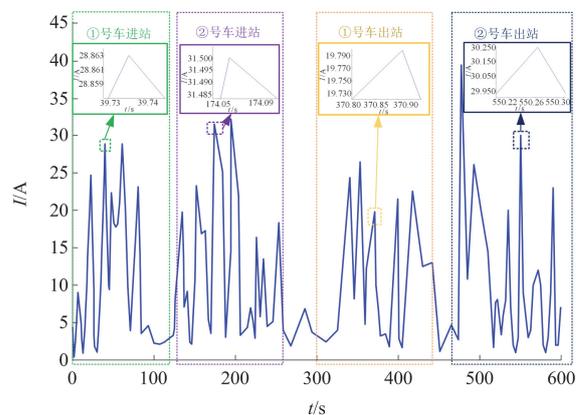


图 2 实测变压器中性点电流

Fig. 2 Actual measurement of transformer neutral point current

选取杂散电流干扰的典型时段分析其时域变化特性,结合列车启停情况将时域波形划分为 4 个工作区间。各区间内杂散电流在列车启停过程中均发生明显波动,在加/减速阶段电流变化剧烈,且呈现出间断性冲击的波动规律。在电流的冲击时段内,均包含区间波形突变的尖顶波。结果表明,干扰变压器的杂散电流含有冲击时段的突变分量和启停间隔的(准)直流分量,且直流分量的幅值和占比远小于突变分量。

进一步观察杂散电流的突变分量,“突变时刻”

两侧电流的变化速率具有较强的不确定性, 针对该特点定义上升速率为 k_u (左侧), 下降速率为 k_d (右侧)。根据实测杂散电流数据, 统计典型突变时刻电流的变化率, 5 种典型杂散电流波形如图 3 所示, 其中 $k_{u1} - k_{u5}$ 为典型杂散电流波形的上升速率, $k_{d1} - k_{d5}$ 为下降速率。为描述杂散电流时域变化的不确定性, 定义杂散电流突变时刻 t_α 与突变率 Δk 为

$$\begin{cases} t_\alpha = \theta + \Delta\theta \\ \Delta k = k_u - k_d \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ 为变压器工频激励初始相位; $\Delta\theta$ 为杂散电流突变时刻与工频激励初始相位的相角差。

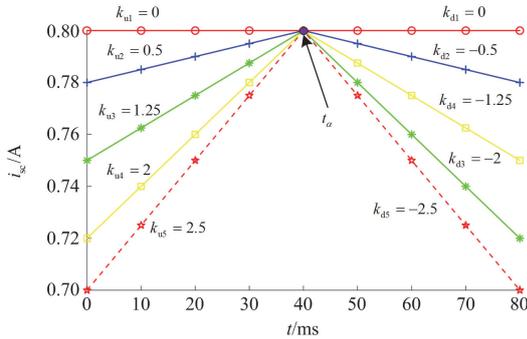


图 3 典型杂散电流波形($\Delta\theta = 0^\circ$)

Fig. 3 Typical stray current waveform ($\Delta\theta = 0^\circ$)

2 干扰传播耦合原理

2.1 电磁干扰域

受杂散电流干扰的三相变压器电路模型见图 4。该模型包含一、二次侧参数(u_A 、 u_B 、 u_C 为一次侧电压, i_A 、 i_B 、 i_C 为一次侧电流, z_1 为一次侧阻抗; u_a 、 u_b 、 u_c 为二次侧电压, i_a 、 i_b 、 i_c 为二次侧电流, i_{a1} 、 i_{b1} 、 i_{c1} 为二次侧端口电流, z_2 为二次侧阻抗)。 i_{sc} 为杂散电流干扰源, i_{cn} 为二次侧环流。

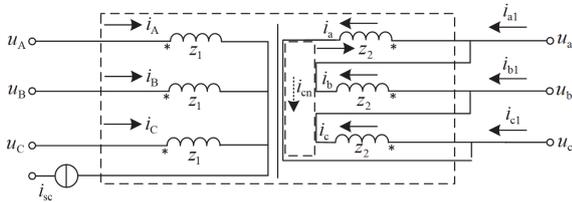


图 4 杂散电流干扰电路图

Fig. 4 Circuit diagram of stray current interference

杂散电流干扰下的绕组电流 $i(t)$ 可表示为杂散电流 i_{sc} 和交流电流 i_{ac} 的叠加, 当杂散电流变化时, 叠加的绕组电流频率偏离 50 Hz。

$$i(t) = i_{sc}(t_\alpha) + i_{ac}(t_\alpha) \quad (2)$$

$$J_{dis} = J_{sc}(t_\alpha) + J_{ac}(t) \quad (3)$$

式中: J_{dis} 为干扰电流密度; J_{sc} 为杂散电流密度; J_{ac} 为工频电流密度; t 为时间。构建杂散电流干扰下的磁场模型, 利用伽辽金余量对其求解^[17]。

$$G_{dis} = \int \nabla \{ \mathbf{M}_m \cdot [\nu \nabla(\mathbf{A})] \} dV - \int \mathbf{M}_m \cdot \mathbf{J}_{sc}(t_\alpha) dV - \int \mathbf{M}_m \cdot \mathbf{J}_{ac}(t) dV - \int \mathbf{M}_m \cdot [\nu \nabla(\mathbf{A}) \times \mathbf{n}] dS \quad (4)$$

式中: G_{dis} 为杂散电流干扰下的磁场伽辽金余量; \mathbf{M}_m 为权函数矩阵, 与基函数相匹配; ν 为磁阻率; \mathbf{A} 为矢量磁位; \mathbf{n} 为法向分量; “ ∇ ” 表示旋度计算函数; V 为体积; S 为面积。离散化 G_{dis} 方程, 计算矢量磁位并进一步求解构件的磁通密度 \mathbf{B} 及磁场能量等参数(见附录 A)。

2.2 机械-声传播域

本文主要研究构件轴向电磁力与振动, 构建绕组轴向电磁力单元模型^[18], 如图 5 所示。

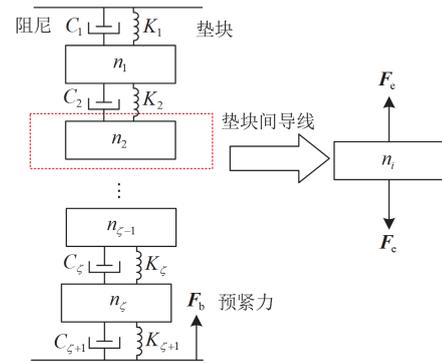


图 5 绕组轴向电磁力单元

Fig. 5 Winding axial electromagnetic force unit

绕组轴向电磁力单元模型中, C 表示阻尼系数, 以刚度为 K 的受压弹簧模拟绕组垫块。绕组末端预紧力为 F_b , 绕组线饼以独立的刚体质量块 n 表示, ζ 表示质量单元的总单元数, n_i 表示第 i 个质量单元。考虑绝缘垫片和绕组线饼刚度特性, 当预紧力为定值时, 其材料参数可视为线性^[19-20]。通过电磁干扰域计算绕组单元电磁力 F_e , 如式(5)所示。

$$F_e = \sum_{\zeta} \int J_{dis} \times \mathbf{B} dV \quad (5)$$

可推导考虑杂散电流干扰时绕组单元电磁力 F_{dis} 为

$$F_{dis} = F_{ac} + F_{sc} = 0.5 B I_m^2 (1 + \cos 2\omega t) + F_{sc}(t_\alpha) \quad (6)$$

式中: F_{ac} 为工频交流电流引起的电磁力; F_{sc} 为杂散电流引起的电磁力; I_m 为工频电流幅值; ω 为角频率。

正常工作状态下, 绕组的电磁力变化频率为 0.5 倍的工频周期; 遭受杂散电流干扰时, 绕组电磁力的变化会包括 2 倍工频分量和突变分量。

变压器运行时铁芯的振动主要由磁致伸缩效应导致^[21-22]。考虑杂散电流干扰时的磁致伸缩效应推导过程见附录 A 式(A6)、式(A7)和图 A1。杂散电流干扰下铁芯振动等效模型如图 6 所示。

$f + df_{dis}$ 表示铁芯单元横截面上的电磁力。铁芯柱体振动方程为^[23]

$$YS_c \frac{\partial^2 s(y,t)}{\partial y^2} + f(y,t) = \rho_c S_c \frac{\partial^2 s(y,t)}{\partial t^2} \quad (7)$$

式中: Y 为杨氏模量; s 为铁芯的轴向位移; $\partial s / \partial y$ 为轴向应变; $f(y,t)$ 为与位置 y 和时间 t 相关的磁致伸缩力; ρ_c 为铁芯密度; S_c 为铁芯横截面积。

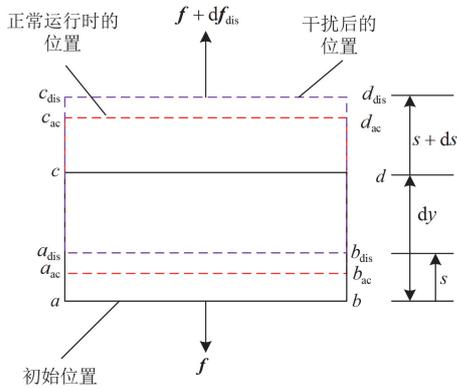


图 6 铁芯振动基本原理

Fig. 6 Basic principles of iron core vibration

图 6 中: a 、 b 、 c 、 d 表示铁芯振动简化单元的初始端点位置; a_{ac} 、 b_{ac} 、 c_{ac} 、 d_{ac} 表示正常运行时简化单元端点位置; a_{dis} 、 b_{dis} 、 c_{dis} 、 d_{dis} 表示受杂散电流干扰时简化单元端点位置。通过机械传播域, 计算遭受杂散电流干扰时的构件振动加速度 g_{dis} 。

$$g_{dis} = d^2 s / dt^2 \quad (8)$$

将 g_{dis} 作为声场模型的传播激励源, 实现声场传播域的耦合计算。

$$\begin{cases} -\mathbf{n} \cdot \left(-\frac{1}{\rho_a} (\nabla p_t - \mathbf{q}_d) \right) = -\mathbf{n} \cdot \mathbf{g}_{dis} \\ p_t = p_b + p \end{cases} \quad (9)$$

式中: ρ_a 为结合空气流体密度; p_t 为总声压; p_b 为背景声压; p 为变压器噪声声压; \mathbf{q}_d 为偶极域源。

利用固体-流体传播原理, 求解杂散电流干扰时

变压器声压级 L_p 。

$$L_p = 20 \cdot \lg \left(\frac{P}{P_{re}} \right) \quad (10)$$

式中: P 为声压有效值; P_{re} 为参考声压, 一般取 $20 \mu\text{Pa}$ 。

考虑地铁杂散电流干扰的振动噪声耦合原理如图 7 所示。

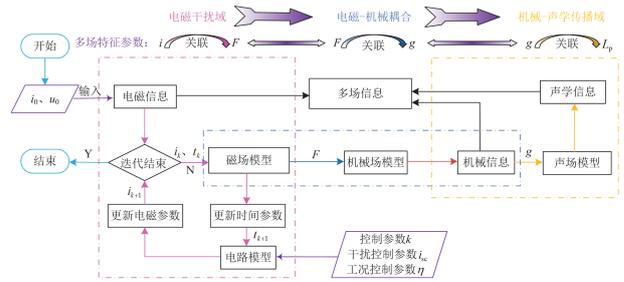


图 7 振动噪声耦合原理

Fig. 7 Vibration noise coupling principle

3 仿真算例

以三相变压器(JSSG-15 kVA, 220 V/110 V)为例, 参数如表 1 所示。

表 1 变压器参数

Table 1 Transformer parameters

铭牌参数	额定参数	量测参数
容量 S_N /kVA	15	—
高/低压绕组电压 U_N /V	220/110	—
空载电流 I_0 /%	4.2	—
铁芯尺寸/mm ³	—	550×116×545
绕组高度/mm	—	370
硅钢片正杨氏模量/ $\times 10^5$ MPa	1.95	1.93
硅钢片泊松比	0.27	0.26
绕组正杨氏模量/ $\times 10^5$ MPa	0.81	0.80
绕组线饼泊松比	0.36	0.35
频率/Hz	50	—

3.1 预处理

在仿真过程中, 为了降低数值计算复杂度, 针对仿真对称性建模, 进行以下简化: 1) 铁芯绕组材料参数通过拉压实验获取, 并线性化处理^[19]; 2) 忽略铁芯拉板、夹件及屏蔽等构件的影响; 3) 忽略绕组垫块、压板、夹件、撑条以及线饼间隙等。

对激励与边界进行以下预处理: 1) 电磁干扰域内, 设置圆形电流激励, 磁场边界为磁力线平行边界条件, 其余设置自然边界条件; 2) 机械振动传播域内, 变压器底座设定为固定约束条件, 其余部分施加银支撑, 即只考虑构件轴向振动; 3) 声学传播域中, 忽略背景声压, 声学求解域边界设定为球面

波辐射条件，即忽略环境噪声的影响。

根据图 3 提取典型杂散电流突变参数，见表 2。

结合图 3 与表 2 的杂散电流波动情况，设定变压器受扰的不同场景，杂散电流波形与图 3 一致。

场景 A：无杂散电流干扰， $i_{sc} = 0$ A(表 2 中 k_0 情况)；

场景 B：列车启停间隔阶段， i_{sc} 主要为直流分量(表 2 中 k_1 情况)；

场景 C：列车加/减速阶段， i_{sc} 主要为突变分量(表 2 中 k_2-k_5 情况)。

表 2 杂散电流突变参数表

Table 2 Stray current distortion parameters

模式		参数		
		k_u	k_d	Δk
正常情况	k_0	—	—	—
	k_1	0	0	0
杂散电流	k_2	0.5	-0.5	1
	k_3	1.25	-2	3.25
突变情况	k_4	2	-1.25	3.25
	k_5	2.5	-2.5	5

选取 B 相为观测对象， i_B 相角为 0° ， i_{sc} 数值按实测数据等比例匹配变压器， i_{sc} 突变时刻相位差 $\Delta\theta$ 分别取 0° 、 $\pm 90^\circ$ ，模拟杂散电流在 B 相电流过零和最大/小时刻的干扰；同时，设置变压器负载率 η 为 0、25%、50%、75%、100%，分析构件在不同场景下的磁场、振动及噪声变化。

结合铁芯与绕组的结构特点，并便于实验对比，选取典型测点，部分测点在 B 相的分布如图 8 所示。

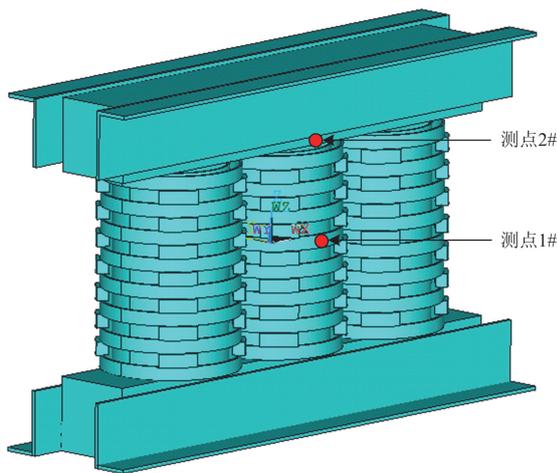


图 8 虚拟仿真模型

Fig. 8 Virtual simulation model

3.2 绕组仿真结果

不同场景中测点 1#的漏磁变化情况如图 9 所示，B 相电流、主磁通的部分结果见附录 B。

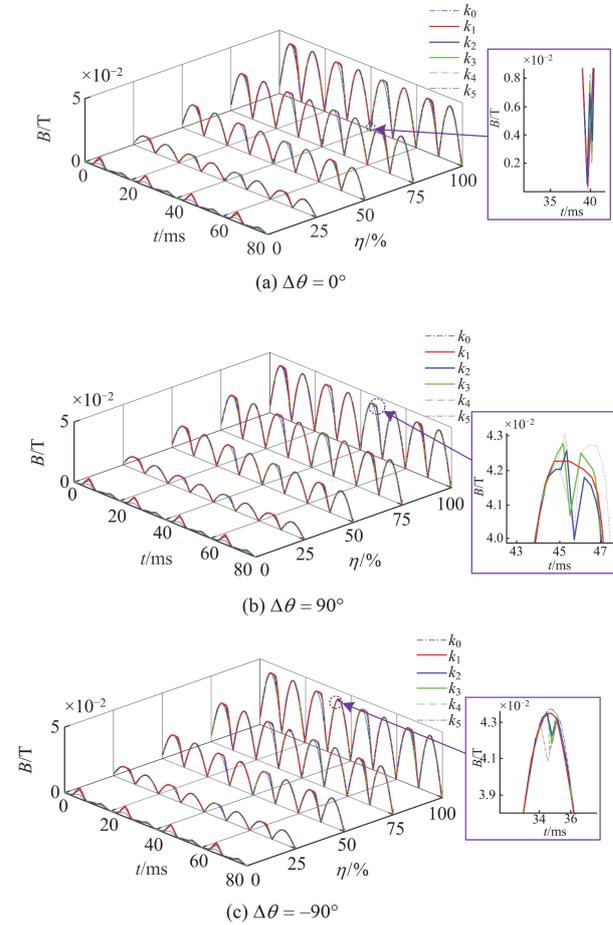


图 9 测点 1#漏磁信息

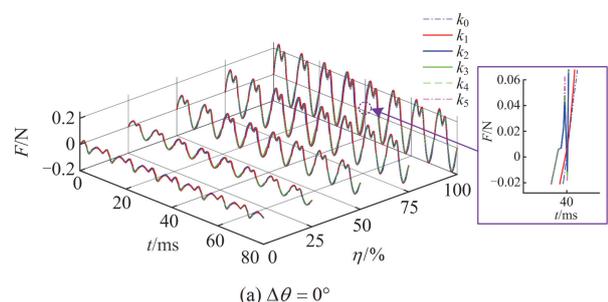
Fig. 9 Leakage magnetic information of measuring point 1#

根据图 9 可知，空载状态下测点漏磁呈现“半波畸变”现象；负载时，随着 η 增大，测点漏磁增大。场景 C 中漏磁的波动周期偏离工频；在 t_α 时刻漏磁明显突变，随着 Δk 的增大，漏磁变化愈加剧烈，当 $\Delta\theta = 90^\circ$ 时， i_{sc} 突变对漏磁的影响最大。分析原因，漏磁主要由绕组交变电流产生，故漏磁变化情况与电流基本一致。

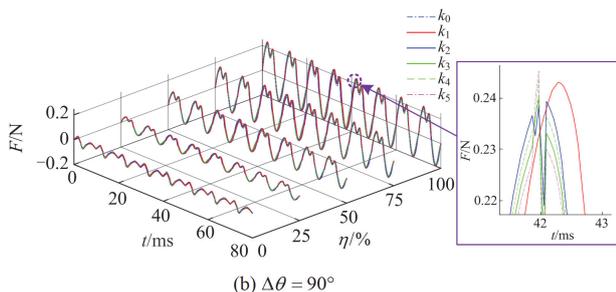
分析测点 1#轴向电磁力、振动加速度的变化，结果分别如图 10、图 11 所示。

图 10、图 11 中场景 A 与场景 B 测点的电磁力和振动加速度变化频率均为 100 Hz；但场景 C 中的电磁力振动加速度的变化频率已偏离 100 Hz。在 t_α 时刻，随着 Δk 的增大，绕组电磁力波动更加剧烈。 $\Delta\theta = 90^\circ$ 时， Δk 对绕组电磁力和振动的影响最大。观察图 9—图 11，绕组漏磁、电磁力、振动皆呈现出相似变化规律。究其原因，绕组振动是其在漏磁

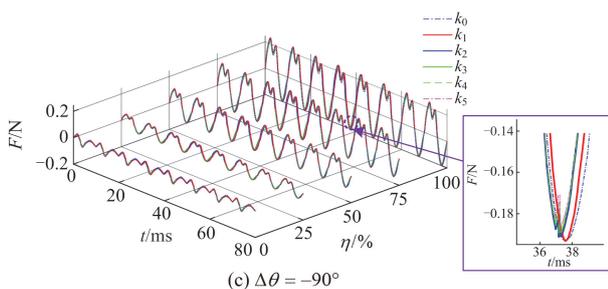
场中受到周期作用力而产生的受迫振动。相较于直流分量, 杂散电流突变分量对绕组的影响更为显著。



(a) $\Delta\theta = 0^\circ$



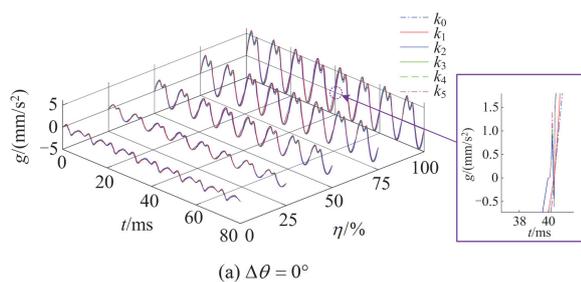
(b) $\Delta\theta = 90^\circ$



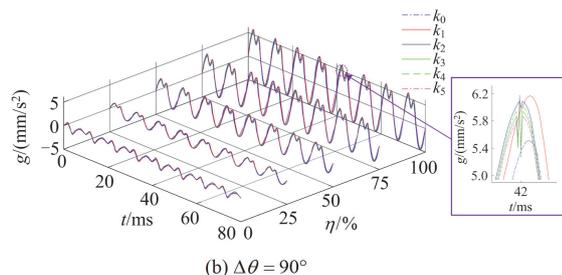
(c) $\Delta\theta = -90^\circ$

图 10 测点 1#电磁力信息

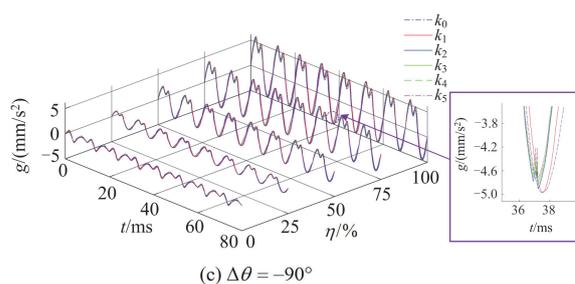
Fig. 10 Electromagnetic force information of measuring point 1#



(a) $\Delta\theta = 0^\circ$



(b) $\Delta\theta = 90^\circ$



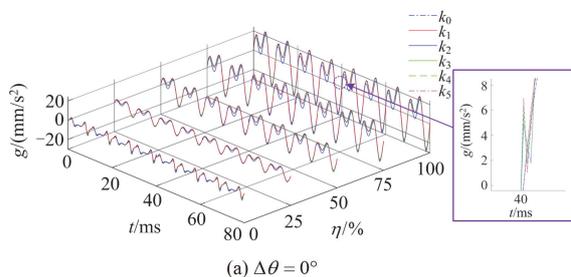
(c) $\Delta\theta = -90^\circ$

图 11 测点 1#振动加速度

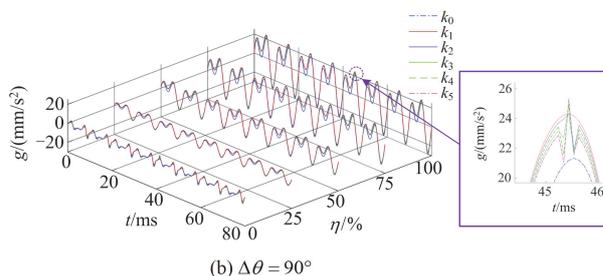
Fig. 11 Vibration acceleration of measuring point 1#

3.3 铁芯仿真结果

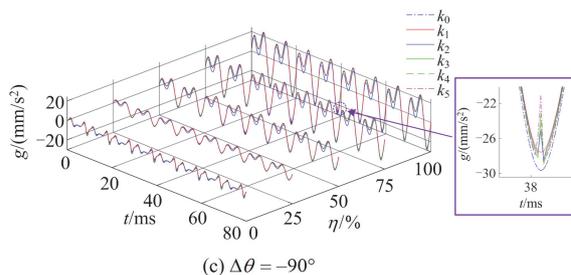
仿真分析不同场景下变压器铁芯的振动变化情况, 结果如图 12 所示。



(a) $\Delta\theta = 0^\circ$



(b) $\Delta\theta = 90^\circ$



(c) $\Delta\theta = -90^\circ$

图 12 测点 2#振动加速度

Fig. 12 Vibration acceleration of measuring point 2#

观察图 12, 铁芯振动比绕组振动更为复杂且剧烈。 η 相同时, 变压器在直流分量干扰下铁芯振动显著增强(场景 A、B 比较); 遭受突变分量干扰时, 振动信号在 t_a 时刻发生畸变(场景 B、C 比较); 随着 Δk 的增大, t_a 时刻的铁芯振动更为严重, 尤其在 $\Delta\theta = 90^\circ$ 时振动信号波动最明显。

3.4 噪声仿真结果

变压器表面最大声压级 $L_{p\max}$ 见表 3—表 5。

表 3 $\Delta\theta = 0^\circ$ 时变压器表面最大声压级

Table 3 $L_{p\max}$ of transformer surface when $\Delta\theta = 0^\circ$

最大声压级	运行场景	负载率 $\eta / \%$					
		0	25	50	75	100	
$L_{p\max} / \text{dB}$	场景 A	k_0	27.9	28.4	28.8	29.8	30.9
	场景 B	k_1	28.8	29.6	30.3	31.4	32.5
	场景 C	k_2	29.2	30.0	30.6	31.8	33.0
		k_3	29.4	30.2	31.0	32.1	33.3
		k_4	29.5	30.4	31.2	32.2	33.4
		k_5	30.2	31.1	31.7	32.7	34.0

表 4 $\Delta\theta = 90^\circ$ 时变压器表面最大声压级

Table 4 $L_{p\max}$ of transformer surface when $\Delta\theta = 90^\circ$

最大声压级	运行场景	负载率 $\eta / \%$					
		0	25	50	75	100	
$L_{p\max} / \text{dB}$	场景 A	k_0	27.9	28.4	28.8	29.8	30.9
	场景 B	k_1	28.8	29.6	30.3	31.4	32.5
	场景 C	k_2	29.1	30.2	30.8	32.2	33.4
		k_3	29.5	30.6	31.2	32.3	33.6
		k_4	29.6	30.8	31.6	32.6	33.8
		k_5	30.2	31.3	32.0	32.8	34.5

表 5 $\Delta\theta = -90^\circ$ 时变压器表面最大声压级

Table 5 $L_{p\max}$ of transformer surface when $\Delta\theta = -90^\circ$

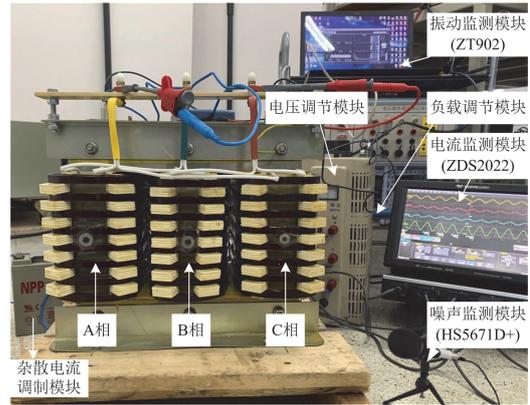
最大声压级	运行场景	负载率 $\eta / \%$					
		0	25	50	75	100	
$L_{p\max} / \text{dB}$	场景 A	k_0	27.9	28.4	28.8	29.8	30.9
	场景 B	k_1	28.8	29.6	30.3	31.4	32.5
	场景 C	k_2	28.9	29.7	30.4	31.8	32.9
		k_3	29.1	30	30.9	32.0	32.5
		k_4	29.1	30.2	31.2	32.2	32.7
		k_5	30.2	31.1	31.4	32.7	33.9

结果表明，变压器受杂散电流影响，本体噪声加重。各场景中变压器表面 $L_{p\max}$ 随着 η 或 Δk 的升高而增大；当 $\Delta\theta = 90^\circ$ 时变压器表面 $L_{p\max}$ 达到最大值，约为正常情况的 1.1 倍。

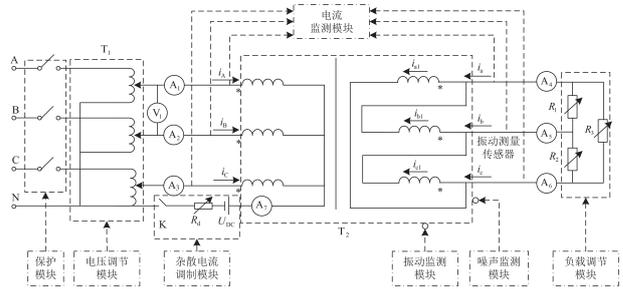
4 实验验证

搭建如图 13 所示的实验平台，实验变压器参数见表 1，输入的杂散电流波形与图 3 保持一致。利用各监测模块分别采集不同场景下的电流、振动和噪声信息。

观察不同场景下 1#、2#测点实验振动结果，如图 14 所示。



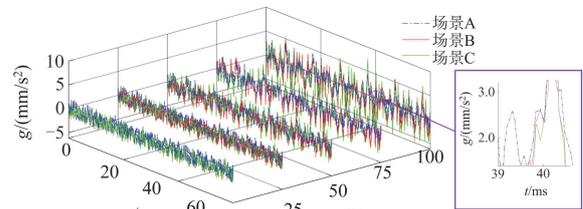
(a) 实验平台



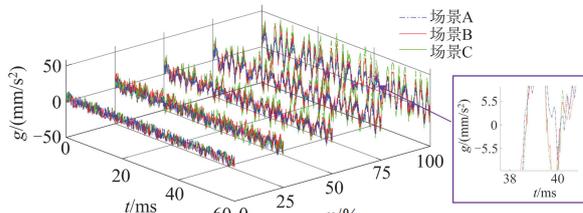
(b) 实验接线

图 13 实验平台

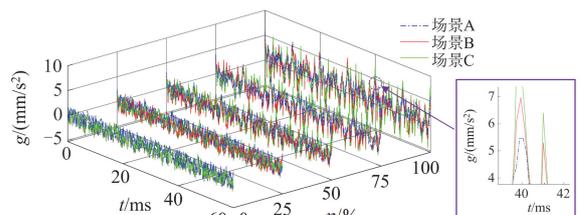
Fig. 13 Experimental platform



(a) $\Delta\theta = 0^\circ$ 测点 1#



(b) $\Delta\theta = 0^\circ$ 测点 2#



(c) $\Delta\theta = 90^\circ$ 测点 1#

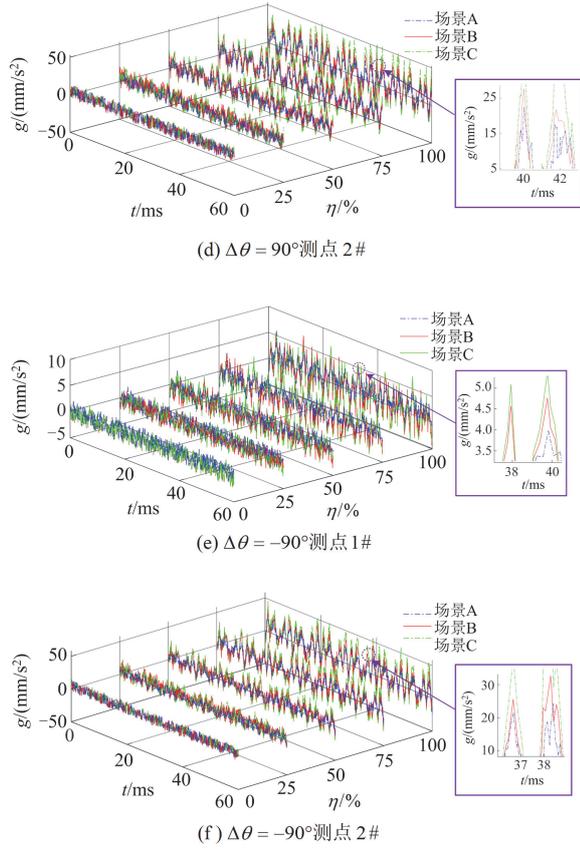


图 14 构件振动加速度

Fig. 14 Component vibration acceleration

变压器实验噪声监测结果如表 6 所示。由图 14 可以看出, 杂散电流突变对铁芯的影响明显。随着 η 增大, 构件振动加剧。实验数据的时空分布与变化相比仿真结果更为复杂, 分析其原因, 铁芯的非线性励磁和磁致伸缩特性导致振动信号中存在较多高频分量, 且由于构件的紧固连动性导致振动互相干扰, 因此实验波形比仿真结果更加复杂和严重。

表 6 变压器实验最大声压级

 Table 6 Experimental $L_{p \max}$ of transformer

最大 声压级	运行场景	负载率 η / %					
		0	25	50	75	100	
$L_{p \max}$ / dB	场景 A	29.4	30.9	31.3	32.5	33.2	
	场景 B	31.3	32.0	32.9	34.0	35.2	
	场景 C	$\Delta\theta = 0^\circ$	32.4	33.7	35.0	35.7	36.8
		$\Delta\theta = 90^\circ$	32.6	33.8	35.2	36.1	37.2
		$\Delta\theta = -90^\circ$	32.7	33.6	35.1	35.4	36.9

结果表明, 在杂散电流干扰下的变压器本体噪声加剧, 且相同条件下, 突变分量对振动噪声的影响大于直流分量, 这与仿真规律相符。结合大量虚/实模拟结果, 构建 Δk 与变压器表面最大噪声的映

射关系, 以 $\Delta\theta = 90^\circ$ 为例, 如图 15 所示。

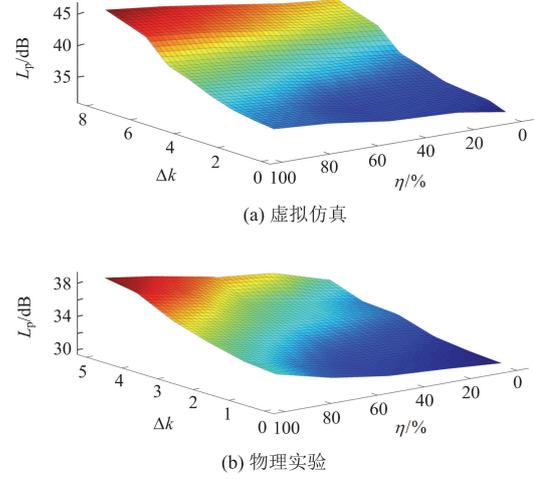

 图 15 L_p - Δk 映射关系

 Fig. 15 L_p - Δk mapping relationship

不难看出, Δk 与噪声的内在关联可以通过数学函数的形式进行描述。以 $\eta = 50\%$, $\Delta\theta = 90^\circ$ 为例, 杂散电流突变率与噪声的函数关系可以进行简单拟合, 且满足虚实一致性校验。

$$\begin{cases} \text{仿真: } L_{pf} = 2.18 \times \Delta k + 30.26 \\ \text{实验: } L_{pe} = 2.33 \times \Delta k + 31.14 \end{cases} \quad (11)$$

式中: L_{pf} 表示仿真声压级; L_{pe} 表示实验声压级。

结合多种场景下的虚实交互信息, 不同 $\Delta\theta$ 与 η 条件下的 L_p - Δk 具有类似的映射关系(见附录 A)。将 Δk 作为关键判据, 结合变压器具体受扰情况, 可制定保护判据, 如式(12)所示。

$$\Delta k = K_{rel} \Delta k_s \quad (12)$$

式中: Δk_s 为突变率的安全阈值; K_{rel} 为可靠系数。

其中, 突变率的安全阈值 Δk_s 取 2.0, 可靠系数 K_{rel} 取 1.1。杂散电流达到一定幅值时, 当 $0 < \Delta k \leq 1.25$, 变压器受 i_{sc} 的影响较小, 变压器可维持稳定运行。当 $1.25 < \Delta k \leq 3$ 时, 构件振动与噪声明显增大, 变压器的电磁兼容性和结构稳定性均受到较为明显的影响, 若变压器持续遭受地铁杂散电流的干扰, 则可能造成绕组变形与振动位移等问题, 应及时采取相关抑制措施; 当 $\Delta k > 3$ 时, i_{sc} 对变压器的影响加剧, 原边电流及振动变化剧烈, 应及时报警并进行处理。

另外, 若绕组结构和铁芯尺寸发生改变, 杂散电流干扰下不同结构变压器的模-态特征存在一定差异(见附录 C)。深入分析其模-态特征变化, 在 Δk 达到 3 时振动噪声异常特征显著变化, 这与失稳判据基本一致。

工程中的变压器负载电流较大,虽然地铁杂散电流入侵后的绕组电流并未发生显著变化,但已对其内部的电磁-机械域造成较大影响,尤其是杂散电流的突变分量会导致构件的振动噪声瞬时加剧,并引起更加严重的机械性危害。由于地铁杂散电流具有持续性、突变性及低频性等特点,使传统治理策略难以适用。基于杂散电流干扰特性分析,可以提出一种新型治理策略。在变压器中性点并联检测控制模块(如图 16 所示),使回路单向接地,实现杂散电流治理目的。

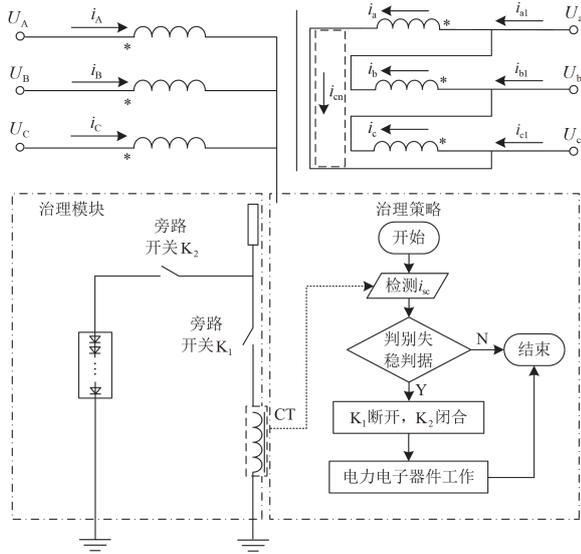


图 16 杂散电流治理策略

Fig. 16 Stray current control strategy

5 结论

基于干扰传播场域耦合原理研究变压器遭受杂散电流干扰的电磁-振动-噪声特性,得出以下结论。

1) 当杂散电流干扰变压器时,构件振动及噪声均发生明显变化。在直流分量影响下,多场特征信息出现“半波畸变”的变化规律;当突变分量干扰时,多场特征信息变化更加剧烈和复杂,其变化频率偏离工频,且突变分量对变压器的影响大于直流分量。

2) 在相同干扰水平下,随着突变率的增加振动噪声加剧,其对铁芯的影响远大于绕组。当突变时刻与交流激励幅值时刻重合时,杂散电流影响最严重;负载率超过 75%时,干扰产生的噪声约为正常情况的 1.1 倍。杂散电流突变性对变压器的电磁兼容性和结构稳定性已造成较大危害。

3) 提出考虑杂散电流突变的变压器干扰传播模型,将变压器遭受杂散电流干扰的物理过程与振动噪声异常特征信息结合,从多角度分析变压器的振动噪声形态特征,利用虚拟映射关系,以可以量

测的电气参数表征其他难以量测的物理特征,为设备态势感知与设备保护提供支持。

附录 A

$$\begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix} = \int_V \begin{bmatrix} \frac{\delta M_m}{\delta x} \left(\frac{\delta A_x}{\delta x} + \frac{\delta A_y}{\delta y} + \frac{\delta A_z}{\delta z} \right) \\ \frac{\delta M_m}{\delta y} \left(\frac{\delta A_x}{\delta x} + \frac{\delta A_y}{\delta y} + \frac{\delta A_z}{\delta z} \right) \\ \frac{\delta M_m}{\delta z} \left(\frac{\delta A_x}{\delta x} + \frac{\delta A_y}{\delta y} + \frac{\delta A_z}{\delta z} \right) \end{bmatrix} dV + \quad (A1)$$

$$\int_V \begin{bmatrix} \frac{\delta M_m}{\delta y} \left(\frac{\delta A_y}{\delta x} - \frac{\delta A_x}{\delta y} \right) - \frac{\delta M_m}{\delta z} \left(\frac{\delta A_x}{\delta z} - \frac{\delta A_z}{\delta x} \right) \\ \frac{\delta y}{\delta x} \frac{\delta M_m}{\delta A_z} - \frac{\delta y}{\delta z} \frac{\delta M_m}{\delta A_y} + \frac{\delta M_m}{\delta x} \left(\frac{\delta A_y}{\delta z} - \frac{\delta A_z}{\delta y} \right) \\ - \frac{\delta M_m}{\delta x} \left(\frac{\delta A_x}{\delta z} - \frac{\delta A_z}{\delta x} \right) + \frac{\delta M_m}{\delta y} \left(\frac{\delta A_z}{\delta x} - \frac{\delta A_x}{\delta z} \right) \end{bmatrix} dV$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (A2)$$

根据能量平衡原理, t_k 时刻由电流激励引起磁场特征参数变化 dW_1 为

$$dW_1 = \frac{1}{2} \int d\mathbf{B} \cdot d\mathbf{H} dV \quad (A3)$$

式中, \mathbf{H} 为磁场强度。

该时刻绕组电流的变化为 di_Y / di_E (Y 为一次侧 A、B、C 三相; E 为二次侧 a、b、c 三相)。

$$dW_2 = \frac{1}{2} L_{ps} di_Y di_E \quad (A4)$$

令 $W_1 = W_2$, 联立磁场能量与电路能量即可求解动态电感 L_{ps} , 将 t_k 时刻的电感参数代入式(A4), 并进一步通过四阶龙格库塔法在电路模型中计算下一时刻的电流 i_{k+1} 。

$$i_{k+1} = i_k + \frac{h}{6} [b_1 + 2b_2 + 2b_3 + b_4] \quad (A5)$$

式中: h 为步长; $b_1 - b_4$ 为分段斜率。

考虑杂散电流干扰时的磁致伸缩效应推导如下: 铁磁性物质初始排列长度为 L , 正弦激励 i_{ac} 导致铁磁性物质增长 ΔL_{ac} , 杂散激励 i_{sc} 导致铁磁性物质增长 ΔL_{sc} , 由此推导杂散电流干扰时磁致伸缩系数 ε_{dis} , 即

$$\varepsilon_{dis} = \frac{\Delta L_{ac} + \Delta L_{sc}}{L} \quad (A6)$$

磁致伸缩效应下, 磁导率 μ 、相对磁导率 $\Delta\mu$ 、应力 σ 、饱和磁通密度 B_m 和应力下的磁通密度 B_f 之间的关系如式(A7)所示。

$$\begin{cases} \Delta\mu = -\frac{2\varepsilon_m \sigma \mu^2}{B_m^2} \\ \mathbf{B}_f = (\mu + \Delta\mu)\mathbf{H} + \varepsilon_{dis}\sigma \end{cases} \quad (A7)$$

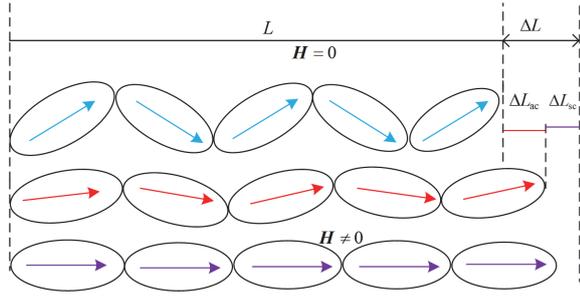


图 A1 磁致伸缩效应

Fig. A1 Magnetostrictive effect

式中, ϵ_m 为磁饱和状态下的磁致伸缩系数。

部分情况下的 L_p - Δk 的映射关系如下:

$\eta = 50\%$ 、 $\Delta\theta = 0^\circ$ 情况下 L_p - Δk 的映射关系:

$$\begin{cases} \text{仿真: } L_{pf} = 2.13 \times \Delta k + 29.39 \\ \text{实验: } L_{pe} = 2.21 \times \Delta k + 30.43 \end{cases} \quad (\text{A8})$$

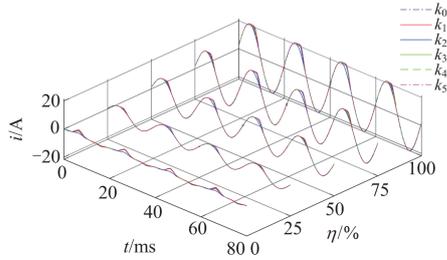
$\eta = 75\%$ 、 $\Delta\theta = 0^\circ$ 情况下 L_p - Δk 的映射关系:

$$\begin{cases} \text{仿真: } L_{pf} = 2.26 \times \Delta k + 30.65 \\ \text{实验: } L_{pe} = 2.35 \times \Delta k + 31.53 \end{cases} \quad (\text{A9})$$

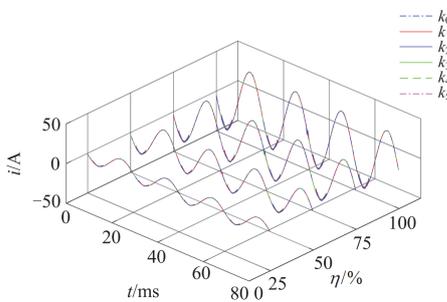
$\eta = 100\%$ 、 $\Delta\theta = 0^\circ$ 情况下 L_p - Δk 的映射关系:

$$\begin{cases} \text{仿真: } L_{pf} = 2.32 \times \Delta k + 31.76 \\ \text{实验: } L_{pe} = 2.48 \times \Delta k + 33.64 \end{cases} \quad (\text{A10})$$

附录 B



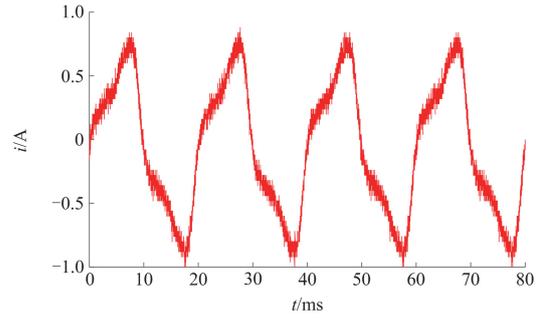
(a) $\Delta\theta = 0^\circ$, 一次侧电流



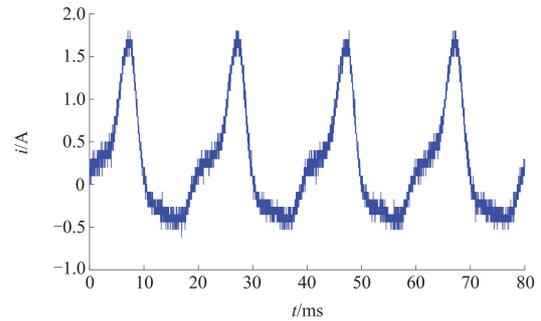
(b) $\Delta\theta = 0^\circ$, 二次侧电流

图 B1 B 相仿真电流数据

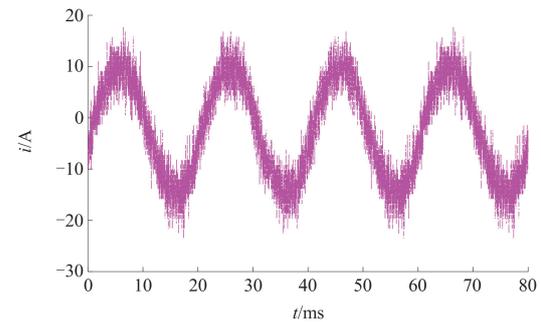
Fig. B1 B phase simulation current data



(a) $\eta = 0$, 场景A



(b) $\eta = 0$, 场景B



(c) $\eta = 50\%$, 场景C

图 B2 B 相部分实测电流数据(滤波前)

Fig. B2 Actual measured current data of phase B (before filtering)

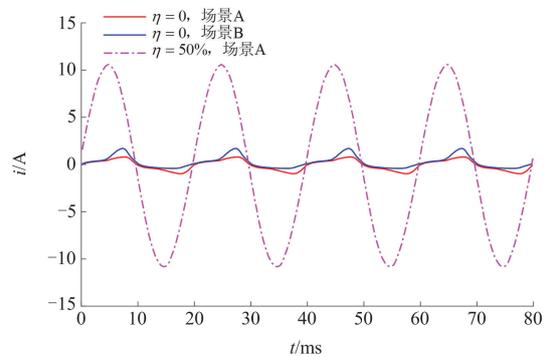


图 B3 B 相部分实测电流数据(滤波后)

Fig. B3 Actual measured current data of phase B (after filtering)

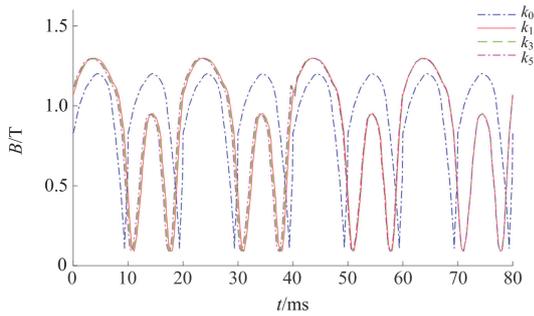


图 B4 B 相主磁通数据 ($\eta = 0$)

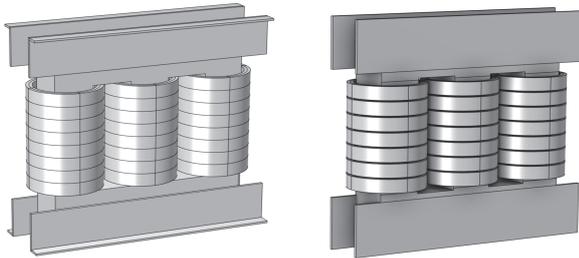
Fig. B4 Main magnetic flux data of phase B ($\eta = 0$)

附录 C

表 C1 相关变压器参数

Table C1 Related transformer parameters

铭牌参数	仿真变压器 A	仿真变压器 B
频率/Hz	50	50
容量 S_N /kVA	15	15
电压 U_N /V	220/110	220/110
空载电流 I_0 /%	4.2	4.2
铁芯尺寸/mm ³	240×60×260	860×260×840

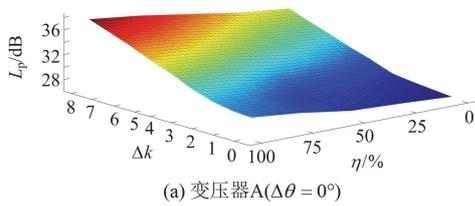


(a) 仿真变压器 A

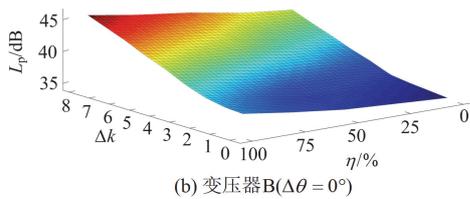
(b) 仿真变压器 B

图 C1 变压器仿真模型

Fig. C1 Simulation model of transformers



(a) 变压器A($\Delta\theta = 0^\circ$)



(b) 变压器B($\Delta\theta = 0^\circ$)

图 C2 虚拟映射关系

Fig. C2 Virtual mapping relationship

参考文献

[1] 张栋梁, 刘娟, 谢业华, 等. 地铁杂散电流动态分布模型研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(4): 67-71.
ZHANG Dongliang, LIU Juan, XIE Yehua, et al. Evaluation and analysis of dynamic stray current in DC metro system[J]. Urban Rail Transit Research, 2017, 20(4): 67-71.

[2] 赵宇辉, 周晓军. 地铁杂散电流分布的数值分析[J]. 城市轨道交通研究, 2009, 12(12): 42-47.
ZHAO Yuhui, ZHOU Xiaojun. Numerical analysis of metro stray current distribution[J]. Urban Rail Transit Research, 2009, 12(12): 42-47.

[3] 夏能弘, 唐文涛, 李怀慎, 等. 地铁轨道局部绝缘损坏下动态杂散电流及地电位梯度建模与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 53-61.
XIA Nenghong, TANG Wentao, LI Huaishen, et al. Modeling and analysis of dynamic stray current and ground potential gradient under partial insulation damage of a metro track[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 53-61.

[4] 李怀慎, 夏能弘, 张俊. 地铁杂散电流影响下的地表电位计算及敏感性因素分析[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(2): 105-113.
LI Huaishen, XIA Nenghong, ZHANG Jun. Calculation of surface potential and analysis of sensitivity factors under the influence of stray current in metro systems[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(2): 105-113.

[5] 潘超, 赵彤, 蔡国伟, 等. 交直流混杂环境下三相变压器绕组电磁-振动特性[J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(1): 45-54.
PAN Chao, ZHAO Tong, CAI Guowei, et al. Electromagnetic vibration characteristics of three-phase transformer windings in AC/DC hybrid environment[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2023, 43(1): 45-54.

[6] LIU Chunming, LI Xiaohan, LI Xinjie. Simulating the vibration increase of the transformer iron core due to the DC bias[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2017, 55(3): 423-433.

[7] LI Zongbo, JIAO Zaibin, HE Anyang, et al. A denoising-classification neural network for power transformer protection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 1-14.

[8] 宁晓雁, 高国强, 尹彩琴, 等. 地铁引起的变压器偏磁电流特征分析[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(5): 125-131.
NING Xiaoyan, GAO Guoqiang, YIN Caiqin, et al. Characteristics of transformer bias current caused by

- metro[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(5): 125-131.
- [9] PAN Chao, WANG Chengjian, SU Hao. Excitation current and vibration characteristics of DC biased transformer[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 7(3): 604-613.
- [10] 李晓华, 褚福源, 时胜寒. 轨道交通对沿线 220 kV 变电站中性点电流及振动影响[J]. 电工技术学报, 2021, 36(2): 423-429, 437.
LI Xiaohua, CHU Fuyuan, SHI Shenghan. Influence of rail transit on neutral current and vibration of 220 kV substation along the line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(2): 423-429, 437.
- [11] 张艳丽, 王佳音, 白保东, 等. 直流偏磁磁场对硅钢片磁致伸缩特性的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4299-4307.
ZHANG Yanli, WANG Jiayin, BAI Baodong, et al. Influence analysis of DC biased magnetic field on magnetostrictive characteristics of silicon steel sheet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4299-4307.
- [12] 李冰, 王泽忠, 刘海波, 等. 直流偏磁下 500 kV 单相变压器振动噪声的试验研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(13): 2801-2811.
LI Bing, WANG Zezhong, LIU Haibo, et al. Experiment on vibro-acoustic characteristic of 500 kV single-phase transformer under DC-bias[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(13): 2801-2811.
- [13] ZHANG Bin, YU Longbin, LI Hui, et al. Influence and analysis of urban subway on DC bias of power transformer[C] // 2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), April 8-11, 2021, Chongqing, China: 955-959.
- [14] 程新翔, 喻锟, 曾祥君, 等. 地铁杂散电流引起变压器直流偏磁抑制方法[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1700-1711.
CHENG Xinxiang, YU Kun, ZENG Xiangjun, et al. Restraining method of transformer DC bias caused by metro stray currents[J]. Power System Technology, 2023, 48(4): 1700-1711.
- [15] 魏光. 牵引变电所主接地网设计研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 181-187.
WEI Guang. Study on the design of a main grounding grid in a traction substation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 181-187.
- [16] 马书民, 夏少连, 熊玮, 等. HVDC/GIC 型直流偏磁的差异性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 55-64.
MA Shumin, XIA Shaolian, XIONG Wei, et al. Difference analysis of HVDC/GIC type DC bias[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 55-64.
- [17] 王洪友, 杨光源, 邵可然. 基于无单元伽辽金法的电机电磁场计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15): 148-154.
WANG Hongyou, YANG Guangyuan, SHAO Keran. Computations for electromagnetic field of synchronous generators based on the element-free Galerkin method[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(15): 148-154.
- [18] AHMAD A, JAVED I, NAZAR W, et al. Short circuit stress analysis using FEM in power transformer on H-V winding displaced vertically & horizontally[J]. AEJ-Alexandria Engineering Journal, 2018, 57(1): 147-157.
- [19] 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, 4747.
PAN Chao, CHEN Xiang, CAI Guowei, et al. Mode-state characteristics of three-phase unbalanced operation winding vibration of transformer based on electromagnetic mechanical coupling principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4695-4707, 4747.
- [20] 刘建锋, 李志远, 周亚茹. 基于漏磁场和 ICOA-ResNet 的变压器绕组早期故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 99-110.
LIU Jianfeng, LI Zhiyuan, ZHOU Yaru. Transformer windings based on leakage field and ICOA-ResNet early fault diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 99-110.
- [21] 张黎, 王国政, 董攀婷, 等. 基于磁致伸缩本征特性的晶粒取向性变压器铁芯振动模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3990-4001.
ZHANG Li, WANG Guozheng, DONG Panting, et al. Study on the vibration of grain-oriented transformer core based on the magnetostrictive intrinsic characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3990-4001.
- [22] 祝丽花, 杨庆新, 闫荣阁, 等. 考虑磁致伸缩效应电力变压器振动噪声的研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 1-6, 19.
ZHU Lihua, YANG Qingxin, YAN Rongge, et al. Research on vibration and noise of power transformer cores including magnetostriction effects[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 1-6, 19.
- [23] 刘行谋. 变压器直流偏磁电-磁-力特征及振动信号时频特征分析研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.

收稿日期: 2024-01-07; 修回日期: 2024-05-29

作者简介:

潘超(1981—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定与电磁兼容; E-mail: 31563018@qq.com

安景革(2000—), 男, 通信作者, 博士, 研究方向为变压器内部故障辨识。E-mail: 1125462364@qq.com

(编辑 张颖)