

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190652

# 交直流混杂环境下三相变压器绕组振动研究

刘天舒, 苏昊, 潘超

(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)

**摘要:** 针对三相变压器在交直流混杂环境下的直流扰动问题, 研究其绕组振动特性。建立 Y/Δ 变压器直流入侵状态方程, 通过电磁耦合迭代辨识绕组电流, 利用振动谐波响应模型分析绕组振动。仿真计算变压器在不同运行方式下的直流偏磁电磁特性, 研究不同直流扰动时绕组电流的变化及其振动特性, 同时将不同条件下的绕组振动情况进行对比并总结规律。搭建三相变压器动模实验平台, 开展 380 V 变压器空载和负载直流扰动实验, 获取绕组电流与振动信息。利用实验数据验证仿真结果的正确性。

**关键词:** 交直流混杂; Y/Δ 变压器; 绕组振动; 谐波响应; 动模实验

## Research on winding vibration of a three-phase transformer under an AC/DC hybrid environment

LIU Tianshu, SU Hao, PAN Chao

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China)

**Abstract:** Winding vibration characteristics of a three-phase transformer with respect to the DC disturbance problem are studied under AC/DC hybrid operation. The DC invasion state equation of a Y/Δ transformer is established, and the winding current is identified through electromagnetic coupling iteration while the winding vibration is analyzed by a vibration harmonic response model. The DC biased electromagnetic characteristics of the transformer under different operation modes are simulated and calculated to examine the variation of winding current and its vibration characteristics under different DC disturbances. At the same time, the winding vibration under different conditions is compared and the rules are summarized. A dynamic model test platform for the three-phase transformer is built, and a DC disturbance experiment of 380 V transformer under no-load and load operation is carried out to obtain winding current and vibration information. The simulation result is verified by experimental data.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507027) and Science and Technology Development Plan Project of Jilin Province (No. 20190303007SF).

**Key words:** AC/DC hybrid; Y/Δ transformer; winding vibration; harmonic response; dynamic model experiment

## 0 引言

电力变压器在交直流混杂环境中运行将影响设备自身甚至电网的安全与稳定<sup>[1-5]</sup>。(准)直流流入变压器会导致变压器的半波饱和, 使铁心产生偏磁效应, 同时导致工作点偏移、励磁电流畸变、谐波增大、铁心饱和、漏磁增大<sup>[6-9]</sup>, 造成变压器损耗增加、振动加剧, 甚至出现局部烧毁、铁心松动、绕组变形等一系列不良后果<sup>[10-12]</sup>。因此, 铁心-绕组构件抗直流扰动能力已成为变压器设计及运行所关注的重

要方面<sup>[13-14]</sup>。变压器的绕组振动主要是绕组在漏磁场中受到周期作用力而产生的受迫振动<sup>[15]</sup>, 目前, 国内外学者广泛开展了关于变压器绕组振动模型及振动特性的研究工作。文献[16]建立了变压器绕组安匝平衡时轴向振动等效单自由度分析数学模型, 研究了绕组轴向振动动态特性。文献[17]应用相空间重构方法对振动信号进行研究, 实现绕组松动缺陷的识别。文献[18]借助于所建立的换流变压器三维有限元模型, 依据瞬态分析和模态分析, 计算得到了换流变绕组受电磁力激励下的振动波形。文献[19]通过线性拟合的方法分析了温度对绕组和铁心振动产生、合成和传播的影响。综上, 变压器绕组振动问题已备受关注, 但是关于交直流混杂环境下

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51507027); 吉林省科技发展计划项目资助(20190303007SF)

变压器绕组的振动特性还罕有研究。

为了研究交直流混杂环境中三相变压器的绕组振动问题,本文建立 Y/Δ 变压器直流入侵状态方程,采用能量平衡有限元法求解磁场,利用高阶迭代计算时域电路;将求解得到的耦合参数分别代入磁场、电路模型循环迭代实现电磁耦合,并对电流参数进行辨识。在此基础上构建绕组振动响应模型,对不同直流扰动下的变压器进行仿真,研究绕组电流与绕组振动的变化特性,对比不同负载率时变压器遭受直流扰动的影响。搭建变压器动模实验平台,通过电流辨识模块量测绕组电流,同时在线监测绕组振动信号,并与仿真结果进行对比,验证所得结论的正确性。

## 1 变压器交直流混杂模式状态方程

构建变压器直流入侵电磁耦合模型的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{B}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{C}(t)\mathbf{U}(t) \\ \mathbf{Y}(t) = \mathbf{D}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{E}(t)\mathbf{U}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{X}(t)$  为系统状态变量,包含电流矩阵  $\mathbf{i}$  和电感矩阵  $\mathbf{L}$ ;  $\mathbf{U}(t)$  为系统输入变量,包括交流电压激励与直流扰动电压列向量;  $\mathbf{Y}(t)$  为输出变量,主要包含电路参量与磁场场量;  $\mathbf{B}(t)$ 、 $\mathbf{C}(t)$ 、 $\mathbf{D}(t)$ 、 $\mathbf{E}(t)$  为系数矩阵。该状态方程包含电路与磁场两个部分,其求解过程通过时域磁场-电路间接耦合实现。

### 1.1 基于磁场模型的电感计算

假设某时刻的绕组电流已知,可以采用基于矢量磁位  $\mathbf{A}$  的能量平衡有限元法(EBFEM)计算该时刻的时域电感矩阵。磁场模型为

$$\begin{cases} \nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \int \mathbf{J} dV \\ \Gamma: \mathbf{A} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\mu$  为磁导率;  $\mathbf{J}$  为电流密度矢量,表示绕组激励电流的分布情况。

磁场模型通过伽辽金加权余量公式求解,如式(3)所示。

$$\begin{aligned} -\iiint_V \mathbf{M}_m \nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) dV &= -\iiint_V \nabla \mathbf{M}_m \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) dV + \\ \oiint_S \mathbf{M}_m \mathbf{e}_n \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) dS &= \iiint_V \mathbf{M}_m \mathbf{J} dV \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $\{\mathbf{M}_m\}$  为权函数序列,权函数与基函数相同,  $m$  为权函数序列通项编号;  $\mathbf{e}_n$  为边界面单位法向分量。将加权余量方程离散形成代数方程组,求解可

得  $\mathbf{A}$ , 进而计算磁场场量  $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{H}$  等。

根据能量平衡法,由系统能量计算时域电感。某一时刻任意两绕组电流变化为  $di_\eta$ 、 $di_\theta$ , 可将变压器的电磁能量变化与状态变量关联,得到

$$\begin{cases} dW_1 = \frac{1}{2} L_{\eta\theta} di_\eta di_\theta \quad \eta, \theta = A, B, C, a, b, c \\ dW_2 = \frac{1}{2} \int d\mathbf{B} \cdot d\mathbf{H} dV \end{cases} \quad (4)$$

由能量守恒可联立式(4)中方程计算时域电感,以作为电路模型的状态变量。

### 1.2 基于电路模型的电流参数辨识

Y/Δ 变压器直流扰动模型如图 1 所示。

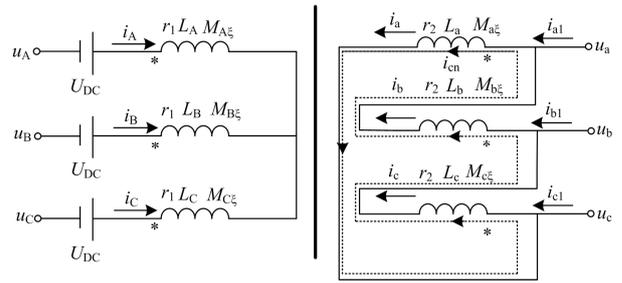


图 1 Y/Δ 变压器直流扰动电路模型

Fig. 1 DC disturbance circuit model of Y/Δ transformer

图 1 中:  $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$  为高压侧绕组电流,  $i_{a1}$ 、 $i_{b1}$ 、 $i_{c1}$  为低压侧端口电流,  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为低压侧 Δ 接绕组电流;  $L$  为自感;  $M$  为互感;  $r_1$ 、 $r_2$  为绕组电阻;  $u_A$ 、 $u_B$ 、 $u_C$  为高压侧电压;  $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  为低压侧电压;  $i_{cn}$  为低压侧环流;  $U_{DC}$  为直流电压源。

推导 Y/Δ 变压器时域电路微分方程,并忽略各绕组自身漏感<sup>[20-21]</sup>:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} r_1 + \begin{bmatrix} L_A & & \\ & L_B & \\ & & L_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \\ \dot{i}_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{Aa} \\ M_{Bb} \\ M_{Cc} \end{bmatrix} \dot{i}_{d\xi} - \begin{bmatrix} U_{DC} \\ U_{DC} \\ U_{DC} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} r_2 + \begin{bmatrix} L_a & & \\ & L_b & \\ & & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{a\zeta} \\ M_{b\zeta} \\ M_{c\zeta} \end{bmatrix} \dot{i}_{d\zeta} \end{cases} \quad (5)$$

若  $t_k$  时刻的电感参数已知,可代入电路微分方程,利用高阶改进欧拉法(HOIEu)由绕组电流  $i_k$  计算  $t_{k+1}$  时刻的电流  $i_{k+1}$ ,如式(6)所示。

$$i_{k+1} = i_k + \frac{h}{2} [f(t_k, i_k) + f(t_{k+1}, i_k + hd)] \quad (k=0, \dots, n-1) \quad (6)$$

式中:  $h$  为步长;  $d$  为步长内的分段计算斜率列向量。

基于电磁耦合的状态方程求解原理如下:

1) 利用能量平衡有限元法计算磁场模型的电感参数, 回馈电路模型计算下一时刻电流;

2) 将电路模型计算得到的时域电流作为磁场模型下一次磁场求解的输入变量。

## 2 振动谐波响应模型

利用上述求解所得参数可进行变压器绕组振动谐波响应分析, 变压器磁场模型中绕组单元的电磁力为<sup>[22]</sup>

$$\mathbf{F}_e = \int \mathbf{J} \times \mathbf{B} dV \quad (7)$$

绕组在电磁力激励下的振动满足动力方程。

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{s}}(t) + \boldsymbol{\varepsilon} \dot{\mathbf{s}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{s}(t) = \sum \mathbf{F}_e \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{M}$  为模型质量矩阵;  $\boldsymbol{\varepsilon}$  为模型阻尼矩阵;  $\mathbf{K}$  为模型刚度矩阵;  $\mathbf{s}(t)$  为模型节点的振动位移向量。

对绕组所受的电磁力进行傅里叶变换, 即可得到各谐波分量, 将其作为简谐激励源, 进行稳态结构谐波响应振动分析。考虑材料刚度与简谐激励的频率, 受力谐波响应原理为

$$\mathbf{F}_1 + j\mathbf{F}_2 = (-\omega^2 \mathbf{m} + j\omega \boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{K})(\mathbf{s}_1 + js_2) \quad (9)$$

式中:  $\omega$  为简谐激励的角频率;  $\mathbf{s}_1$ 、 $\mathbf{s}_2$  分别为振动位移向量  $\mathbf{s}$  的实部、虚部;  $\mathbf{m}$  为质量。

根据振动位移可计算振动加速度  $g$ , 如式(10)所示。

$$g = \frac{d^2 s}{dt^2} \quad (10)$$

基于电磁耦合状态方程的振动谐波响应原理如图 2 所示。

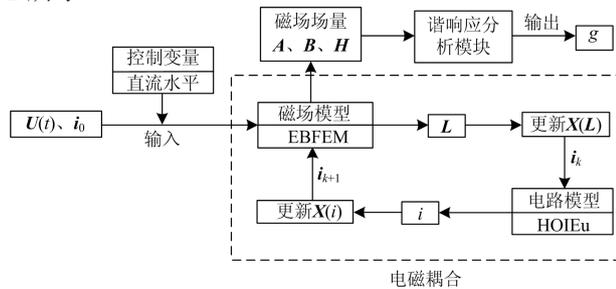


图 2 振动谐波响应原理

Fig. 2 Vibration harmonic response principle

## 3 仿真分析

根据实际三相三柱式 Y/Δ 变压器 BSS-1000 VA 建立仿真模型(参数见表 1), 在一次侧接入直流电流源模拟直流扰动, 计算其电磁特性。

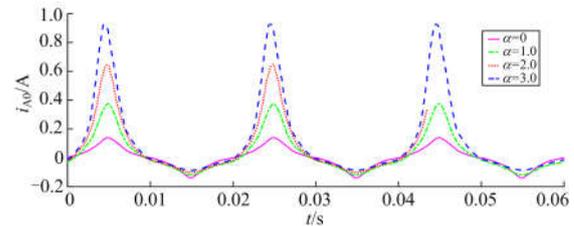
表 1 变压器参数

Table 1 Transformer parameters

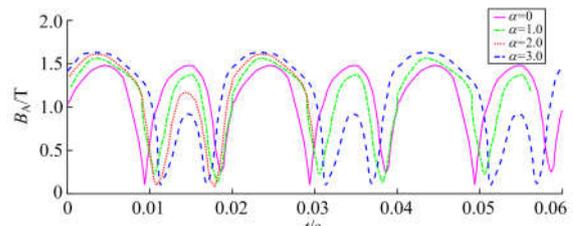
铭牌参数	额定值	量测值
频率/Hz	50	—
容量 $S_N$ /VA	1 000	—
电压 $U_N$ /V	380/100(+10%)	—
空载电流 $I_0$ /A	0.1	0.1
铁心尺寸/mm	—	190×190×44
铁心窗体/mm	—	38×110×44
一/二次侧单相匝数	497/251	—
一/二次侧单相电阻/Ω	—	1.4/0.5

### 3.1 空载运行

一次侧接入直流源产生的直流电流为  $I_{DC}(I_{DC}=\alpha I_0)$ , 其中  $\alpha$  为直流水平系数, 表征直流扰动大小。分别对  $\alpha=0$ 、1.0、2.0、3.0 四种直流扰动下的变压器运行模式进行仿真, 考虑 Y/Δ 变压器的三相对称性, 以 A 相为例, 空载运行(负载率为零)时的一次侧绕组电流  $i_{A0}$  和铁心平均磁通密度  $B_A$  如图 3 所示。



(a) 绕组电流  $i_{A0}$



(b) 铁心磁密  $B_A$

图 3 空载运行不同直流水平下的电磁参数

Fig. 3 Electromagnetic parameters under different DC levels with no load

变压器空载运行时绕组电流与励磁电流基本相同, 由图 3(a)可以看出,  $i_{A0}$  呈现为尖顶波。变压器正常运行时  $i_{A0}$  的波峰、波谷区域均表示变压器励磁处于饱和状态, 零点附近区域表示励磁处于不饱和状态, 如图 3(b)。在交直流混杂模式下, 励磁饱和,  $i_{A0}$  畸变; 随着直流扰动水平升高, 饱和程度加深, 波形呈现“半波畸变、半波衰减”的现象。

结合变压器结构特点, 选取具有代表性的 A、B 相中部、端部绕组线圈作为测试对象(见图 4), 在不同直流扰动下分析其振动特性。

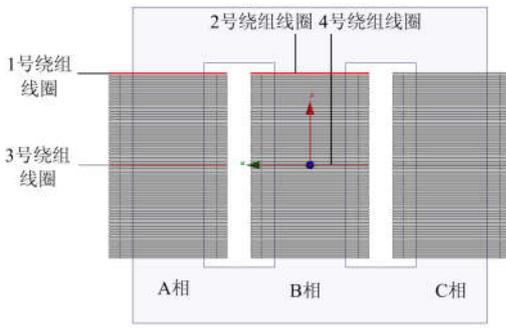


图 4 Y/Δ 变压器铁心-绕组结构

Fig. 4 Core-winding structure of Y/Δ transformer

绕组在不同直流下的振动加速度见表 2。

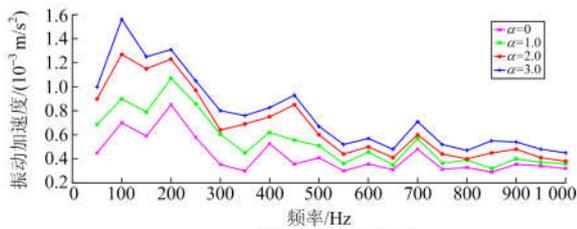
表 2 不同直流扰动下的振动加速度

Table 2 Vibration acceleration under different DC

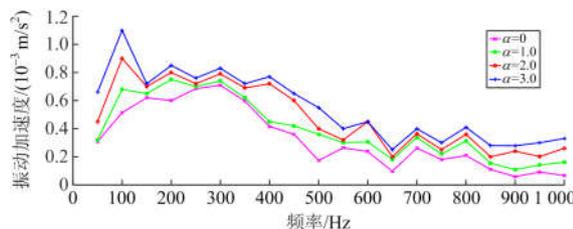
$\alpha$	$g/(10^{-3} \text{ m/s}^2)$			
	1 号线圈	2 号线圈	3 号线圈	4 号线圈
0	2.059	1.448	1.446	1.213
1.0	2.830	2.089	1.972	1.733
2.0	3.606	2.649	2.589	2.297
3.0	4.214	3.261	3.112	2.774

随着直流水平的升高  $g$  逐渐增大。结合图 3 可以看出遭受直流扰动时电流畸变导致变压器铁心饱和,漏磁增大,振动加剧。其中 1、2 号绕组振动加速度分别大于 3、4 号绕组,说明各相端部绕组振动强于中部绕组;1、3 号绕组振动加速度分别大于 2、4 号绕组表明 A、C 相绕组振动强于 B 相,仿真结果与文献[22-23]所得结论吻合。

对 A 相绕组端部和中部绕组线圈的振动加速度进行 FFT 变换,振动频谱结果见图 5。



(a) 1号绕组振动频谱图



(b) 3号绕组振动频谱图

图 5 绕组线圈振动频谱图

Fig. 5 Spectrum diagram of vibration at winding coils

$\alpha=0$  时,振动频谱中出现偶次分量,分析其原因是由于磁滞伸缩效应所引起。绕组振动周期为电源周期的 0.5 倍,故振动信号是以 2 倍电源频率为基频(100 Hz)<sup>[24]</sup>。随着  $\alpha$  增大,各次谐波分量均逐步上升;振动频谱中低频分量( $\leq 500$  Hz)所占比重较大,其中振动信号频谱在 100 Hz 处的变化最为剧烈,说明直流扰动对绕组振动的基频分量影响较大。

### 3.2 负载运行

变压器负载运行(70%负载率)时,不同直流扰动下的一次侧电流  $i_A$  见图 6。

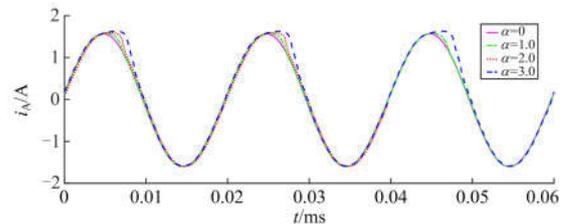


图 6 负载运行不同直流水平下的  $i_A$

Fig. 6  $i_A$  under different DC levels with load

结果表明,随着  $\alpha$  的增大  $i_A$  畸变,但由于其本身数值较大使得变化并不明显。不同直流扰动下绕组振动加速度见表 3。

表 3 不同直流扰动下的振动加速度

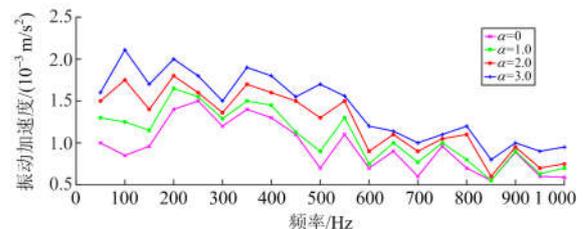
Table 3 Vibration acceleration under different DC

$\alpha$	$g/(10^{-3} \text{ m/s}^2)$			
	1 号线圈	2 号线圈	3 号线圈	4 号线圈
0	4.502	3.663	3.656	2.981
1.0	4.841	3.925	3.894	3.125
2.0	5.204	4.217	4.192	3.464
3.0	5.572	4.656	4.568	3.802

由表 3 可知,负载运行下绕组线圈的振动加速度随直流水平的升高而增大,与空载运行所得规律一致;但其振动幅值明显大于空载运行下的绕组线圈,说明在相同直流水平下,负载率越高,漏磁越大,振动越剧烈。

1、3 号绕组振动加速度频谱图见图 7。

不难看出,随着直流扰动增大,各次谐波分量均逐步上升,变化规律与空载运行类似。



(a) 1号绕组振动频谱图

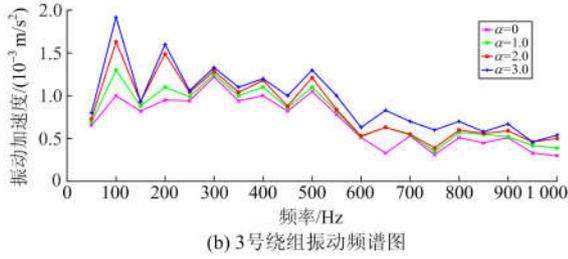


图 7 绕组线圈振动频谱图

Fig. 7 Spectrum diagram of vibration at winding coils

变压器额定运行(100%负载率)时, 不同直流扰动下的一次侧电流  $i_A$  见图 8, 绕组振动加速度见表 4。

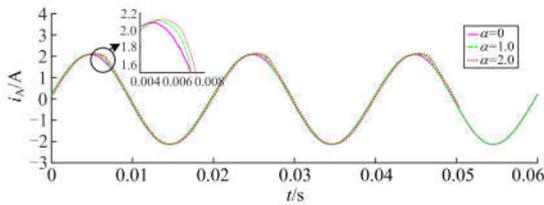


图 8 满载运行不同直流水平下的  $i_A$

Fig. 8  $i_A$  under different DC levels with full load

表 4 不同直流扰动下的振动加速度

Table 4 Vibration acceleration under different DC disturbance

$\alpha$	$g/(10^{-3} \text{ m/s}^2)$			
	1号线圈	2号线圈	3号线圈	4号线圈
0	6.565	5.713	5.690	5.168
1.0	6.722	5.877	5.858	5.304
2.0	6.876	6.011	5.992	5.598

通过分析变压器在不同运行方式遭受直流扰动的绕组振动加速度, 可以归纳其规律:

1) 交直流混杂情况下绕组的振动幅度均随直流水平的提高而增强, 且中部绕组线圈的振动强于端部, A、C 相绕组线圈的振动强于 B 相。

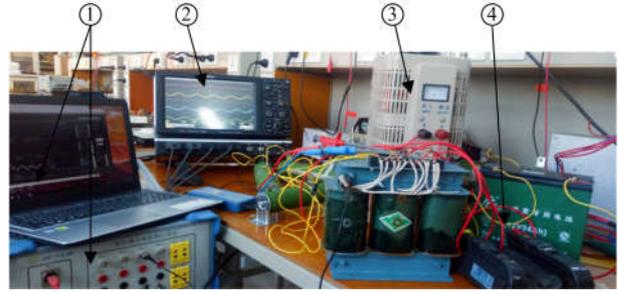
2) 相对而言, 负载运行时绕组振动更为剧烈, 但空载时幅值变化更为明显, 说明随着直流水平升高时, 变压器负载率越低, 所受影响越明显。

#### 4 动模实验

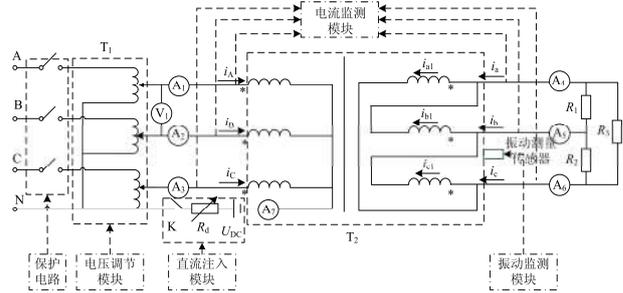
搭建模块化 Y/ $\Delta$  变压器交直流混杂运行实验平台(如图 9(a)所示), 实验变压器参数见表 1。振动实验量测点的选择与仿真测试点分布保持一致, 实验接线见图 9(b)。

图 9(a)中①为振动监测模块, ②为电流监测模块, ③为电压调节模块, ④为直流注入模块。具体实验步骤如下:

1) 在电压调节模块中调节三相调压器  $T_1$ , 使得施加在变压器一次侧的线电压达到 380 V。



(a) 实验平台



(b) 接线原理

图 9 动模实验平台

Fig. 9 Dynamic model test platform

2) 在直流注入模块闭合直流支路开关 K, 通过调节滑动变阻器  $R_d$  改变直流电压源  $U_{DC}$  注入直流的大小。

3) 在电流监测模块记录电压、电流波形。

4) 在振动监测模块采用电压加速度传感器 JF2100-T 测量变压器各部位绕组线圈在正常情况下以及受到不同程度直流扰动时的振动信号。

#### 4.1 空载运行

空载运行时 A 相绕组在不同直流扰动下的空载电流  $i_{A0}$  见图 10。

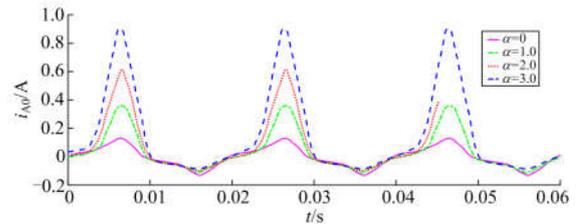


图 10 空载运行不同直流水平下的  $i_{A0}$

Fig. 10  $i_{A0}$  under different DC levels with no load

无直流扰动时空载电流为正弦波, 注入直流后励磁饱和, 波形正半周突变, 负半周衰减, 且直流扰动越大波形畸变越严重, 与仿真所得结果一致。

各测试绕组的振动加速度见表 5, 1 号、3 号绕组的振动频谱见图 11。

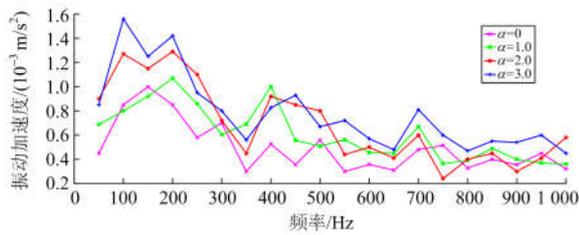
随着直流水平的提高, 各绕组的振动加速度逐渐增强, 且各相端部绕组振动强于中部, A、C 相

绕组振动强于 B 相；通过对振动频谱图进行分析发现振动频谱的低频分量所在比例较大，且 100 Hz 即振动基频受直流扰动的影响最为明显。

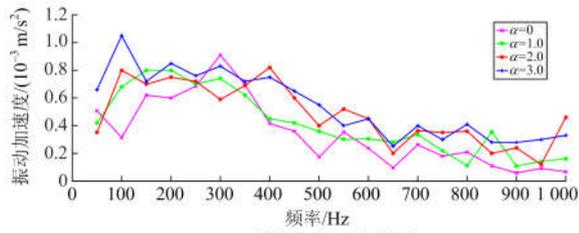
表 5 不同直流扰动下的振动加速度

Table 5 Vibration acceleration under different DC disturbance

$\alpha$	$g/(10^{-3} \text{ m/s}^2)$			
	1 号线圈	2 号线圈	3 号线圈	4 号线圈
0	1.953	1.399	1.516	1.196
1.0	2.766	1.978	2.066	1.697
2.0	3.642	2.601	2.667	2.305
3.0	4.339	3.244	3.180	2.768



(a) 1号绕组振动频谱图



(b) 3号绕组振动频谱图

图 11 绕组线圈振动频谱图

Fig. 11 Spectrum diagram of vibration at winding coils

#### 4.2 负载运行

变压器 70%负载运行时 A 相的一次侧电流  $i_A$  见图 12。

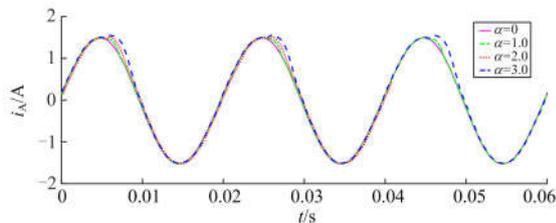


图 12 负载运行不同直流水平下的  $i_A$

Fig. 12  $i_A$  under different DC levels with load

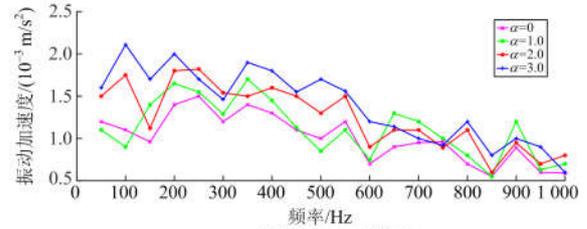
如图 12，发生直流扰动时  $i_A$  畸变，但与空载电流的畸变相比变化程度较小，说明直流扰动对空载运行的影响更为明显，验证了仿真所得结果。

各测试绕组的振动加速度见表 6，1 号、3 号绕组的振动频谱见图 13。

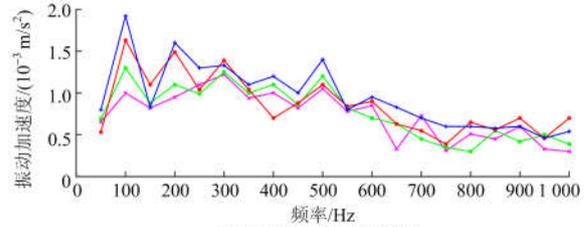
表 6 不同直流扰动下的振动加速度

Table 6 Vibration acceleration under different DC disturbance

$\alpha$	$g/(10^{-3} \text{ m/s}^2)$			
	1 号线圈	2 号线圈	3 号线圈	4 号线圈
0	4.693	3.594	3.609	2.971
1.0	4.901	3.911	3.908	3.106
2.0	5.169	4.196	4.194	3.399
3.0	5.502	4.501	4.488	3.741



(a) 1号绕组振动频谱图



(b) 3号绕组振动频谱图

图 13 绕组线圈振动频谱图

Fig. 13 Spectrum diagram of vibration at winding coils

对比实验与仿真振动频谱，直流扰动下实测频谱较为杂乱，分析其原因，可能是由于其他构件机械约束以及量测误差所致，但总体规律基本一致。

变压器 100%负载运行时 A 相的一次侧电流  $i_A$  见图 14，各绕组振动加速度见表 7。

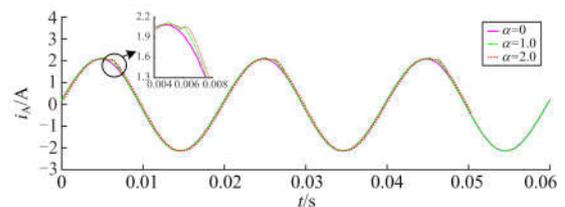


图 14 满载运行不同直流水平下的  $i_A$

Fig. 14  $i_A$  under different DC levels with full load

表 7 不同直流扰动下的振动加速度

Table 7 Vibration acceleration under different DC disturbance

$\alpha$	$g/(10^{-3} \text{ m/s}^2)$			
	1 号线圈	2 号线圈	3 号线圈	4 号线圈
0	6.493	5.552	5.501	4.896
1.0	6.655	5.745	5.704	5.015
2.0	6.801	5.995	5.856	5.301

变压器满载运行时, 随着  $\alpha$  的增大, 振动变得更为剧烈, 当  $\alpha$  未至 3.0 时已发生局部过热, 并伴随出现绝缘烧毁现象。对比空载与负载运行下的绕组电流变化与振动特性发现: 负载率越高, 电流幅值越大, 但畸变程度越小; 无直流时, 变压器负载率越高绕组加速度越大, 振动越明显; 绕组振动加速度以及振动频谱的各次分量均随  $\alpha$  的增大而增强, 但空载运行时的变化更为明显, 说明直流扰动对变压器空载运行的影响更大。

## 5 结论

基于电磁耦合模型研究 Y/ $\Delta$  变压器在直流扰动下的绕组振动问题, 得出以下结论:

1) 变压器在交直流混杂模式下运行时励磁饱和, 电流畸变, 绕组振动加剧; 绕组端部振动强于中部绕组, 同时 A、C 相绕组振动强于 B 相, 说明直流入侵对 A、C 相绕组的结构稳定性影响最大; 随着直流增大, 振动频谱谐波含量升高(主要集中在前 10 次谐波), 直流扰动对振动基频分量的影响最为显著。

2) 对比变压器不同运行方式时的绕组振动, 直流水平越高, 高负载率时的绕组振动问题越严重, 但低负载率时的绕组振动变化更明显。

## 参考文献

- [1] CHAO P, SHUANGYUAN Y, HAO S, et al. Excitation-vibration harmonic response research of transformer in DC biasing operation[J]. IET Electric Power Applications, 2019, 13(3): 410-417.
- [2] 王格万, 潘超, 郑迺丹, 等. 变压器直流扰动下励磁谐波与铁心饱和失稳研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 49-55.  
WANG Gewan, PAN Chao, ZHENG Yidan, et al. Research on excitation harmonics and core saturation instability of transformer under DC disturbance[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 49-55.
- [3] 张也, 曹楠, 章彬, 等. 一种新的三绕组自耦变压器的非线性建模[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 45-51.  
ZHANG Ye, CAO Nan, ZHANG Bin, et al. A new nonlinear model of three-winding autotransformer[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 45-51.
- [4] 尹项根, 张哲, 王友怀, 等. 变压器间及其与电流互感器暂态交互作用分析和保护对策[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 1-9.  
YIN Xianggeng, ZHANG Zhe, WANG Youhuai, et al. Multiple transformers and CTs interactive effect and its impact on the protective relay[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 1-9.
- [5] 翟章良, 周力行. 基于状态量权重的变压器状态评价系统研制[J]. 智慧电力, 2018, 46(9): 88-94.  
ZHAI Zhangliang, ZHOU Lixing. Development of transformer state evaluation system based on state quantity weight[J]. Smart Power, 2018, 46(9): 88-94.
- [6] TANAKA M, MURATA H, HATSUKADE T, et al. Imaging of magnetic nanoparticles using a second harmonic of magnetization with DC bias field[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(2): 1-4.
- [7] 李长云, 刘亚魁. 直流偏磁时变压器铁芯的力学特性分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12): 122-125.  
LI Changyun, LIU Yakui. Analysis of mechanical characteristics of transformer iron core with DC bias[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 122-125.
- [8] 阮江军, 徐闻婕, 丁志锋, 等. 基于场路直接耦合模型的交流电网直流偏磁电流分布研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1333-1340.  
RUAN Jiangjun, XU Wenjie, DING Zhifeng, et al. Study of DC-bias current distribution in AC power system based on direct field-circuit coupled model[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1333-1340.
- [9] LIU C M, LI X H, LI X J. 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.
- [10] 林湘宁, 杨国稳, 翁汉琨, 等. 直流偏磁下变压器无功消耗增多对系统电压的影响分析[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 272-278.  
LIN Xiangning, YANG Guowen, WENG Hanli, et al. Analysis of system voltage impact by transformer reactive power consumption increased under DC bias[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 272-278.
- [11] 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心振动模型[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 intrinsic characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3990-4001.
- [12] 马利洁, 朱永利, 郑艳艳. 基于并行变量预测模型的变压器故障诊断及优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 82-89.  
MA Lijie, ZHU Yongli, ZHENG Yanyan. Research on transformer fault diagnosis and optimization based on parallel variable prediction model[J]. Power System

- Protection and Control, 2019, 47(6): 82-89.
- [13] 张冰, 刘连光, 肖湘宁. 地磁感应电流对变压器振动、噪声的影响[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 900-904.  
ZHANG Bing, LIU Lianguang, XIAO Xiangning. Effects of geomagnetically induced current on the vibration and noise of transformers[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 900-904.
- [14] SABURO T, HAYAKI M, TOMOVA H, et al. Imaging of magnetic nanoparticles using a second harmonic of magnetization with DC bias field[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(2): 1-4.
- [15] 张凡, 汲胜昌, 师榆航, 等. 电力变压器绕组振动及传播特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(9): 2790-2798.  
ZHANG Fan, JI Shengchang, SHI Yuhang, et al. Research on transformer winding vibration and propagation characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(9): 2790-2798.
- [16] 王洪方, 王乃庆, 李同生. 短路条件下电力变压器绕组轴向振动等效单自由度分析[J]. 电工技术学报, 2000, 15(5): 39-41.  
WANG Hongfang, WANG Naiqing, LI Tongsheng. Axial vibration equivalent one-degree analysis of power transformer winding under short-circuit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(5): 39-41.
- [17] 周宇, 马宏忠, 李凯, 等. 基于相空间重构的大型变压器绕组松动的振动特征识别[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(12): 169-175.  
ZHOU Yu, MA Hongzhong, LI Kai, et al. Winding looseness recognition based on phase space reconstruction of large transformer vibration signals[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 169-175.
- [18] SHAO P F, LUO L F, LI Y, et al. Electromagnetic vibration analysis of the winding of a new HVDC converter transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 123-130.
- [19] BELÉN G, JUAN C B, ÁNGEL M A. Transformer tank vibration modelling as a method of detecting winding deformations-part II: experimental verification[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 164-169.
- [20] 索南加乐, 许立强, 焦在滨, 等. 基于磁路特征的三相三柱式变压器励磁参数识别[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 97-104.  
SUONAN Jiale, XU Liqiang, JIAO Zaibin, et al. Identification method for excitation inductances of three-phase three-limb transformer based on characteristics of magnetic circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 97-104.
- [21] 潘超, 金明权, 蔡国伟, 等. 基于漏感辨识的变压器交直流混合运行保护方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 771-780.  
PAN Chao, JIN Mingquan, CAI Guowei, et al. Protection for transformer in AC-DC hybrid operation mode based on leakage inductance identification[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 771-780.
- [22] 王丰华, 段若晨, 耿超, 等. 基于“磁-机械”耦合场理论的电力变压器绕组振动特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2555-2562.  
WANG Fenghua, DUAN Ruochen, GENG Chao, et al. Research of vibration characteristics of power transformer winding based on magnetic-mechanical coupling field theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2555-2562.
- [23] HYUN-MO A H N, YEON-HO O H, et al. Experimental verification and finite element analysis of short-circuit electromagnetic force for dry-type transformer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(2): 819-822.
- [24] 马宏忠, 耿志慧, 陈楷, 等. 基于振动的电力变压器绕组变形故障诊断新方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 89-95.  
MA Hongzhong, GENG Zhihui, CHEN Kai, et al. New method for fault diagnosis of power transformer winding deformation based on vibration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 89-95.

收稿日期: 2019-07-04; 修回日期: 2019-09-07

作者简介:

刘天舒(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 187102637@qq.com

苏昊(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为交直流混杂环境下变压器振动效应研究; E-mail: 379272394@qq.com

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

(编辑 周金梅)