

# 变压器绕组振荡波建模及轴向移位故障分析

周利军<sup>1</sup>,周祥宇<sup>1</sup>,吴振宇<sup>1</sup>,林桐<sup>1</sup>,徐肖伟<sup>2</sup>,张陈擎宇<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 611756;2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院,云南 昆明 650217)

**摘要:**从变压器自身属性分析了振荡波的机理,针对一台三绕组变压器搭建了有限元模型得到了绕组电气参数矩阵,基于绕组集总参数电路建立了全电容、电感矩阵参数下的振荡波时域数学模型,通过将仿真曲线与实测曲线进行对比验证了模型的有效性。然后以轴向移位故障为例,分析了轴向移位故障下变压器绕组参数的变化规律及其与振荡波之间的映射关系,重点分析了轴向移位故障下振荡波极值点的变化规律。研究表明:轴向移位故障下电容参数的变化对于振荡波有显著的影响,振荡波极值点幅值偏移量较大;随着故障程度的加深,振荡波的波峰、波谷逐渐向上偏移。

**关键词:**变压器;高压振荡波法;有限元计算;建模;轴向移位故障;极值点偏移量

**中图分类号:**TM 41

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202101029

## 0 引言

变压器是电力系统的核心设备之一,特别是大型电力变压器结构复杂、造价昂贵,一旦发生故障就会导致大面积的停电,造成巨大的经济损失<sup>[1]</sup>。据统计,对于110 kV等级以上的电力变压器,因绕组变形而导致的变压器故障比例为50%~60%<sup>[2]</sup>。

受运输、地震等不可抗拒因素的影响,变压器绕组易发生机械变形。另外由于电力系统运行环境复杂,绕组易发生由绝缘老化、短路故障引起的电气故障<sup>[3-4]</sup>。绕组微小形变对变压器前期正常运行的影响有限,然而随着绕组绝缘的老化,其抗短路能力降低,若再次经受短路电流可能会产生严重变形,准确、有效的变压器绕组变形检测方法对确保电力系统的安全可靠运行至关重要<sup>[5]</sup>。短路阻抗法、频率响应分析FRA(Frequency Response Analysis)是目前应用最为广泛的绕组变形检测方法。近年来,为了能进一步提高现场绕组变形检测的可靠性,国内外学者针对不同的检测方法进行了大量的研究。刘勇等结合频率响应法和阻抗法,提出了扫频阻抗法,通过在实验室模拟绕组故障验证了该方法的有效性<sup>[6]</sup>;姚陈果等提出一种从变压器套管末屏注入脉冲信号在线检测绕组变形的的方法,建立脉冲频率响

应模型研究脉冲频率响应的影响因素,取得了一定的效果<sup>[7-8]</sup>;MITCHELL S D等建立了变压器绕组模型,阐述了不同测试方法对参数变化灵敏性的机理,用于分析频率响应和绕组故障之间的对应关系<sup>[9]</sup>。上述方法对于变压器绕组状态检测有一定的效果,但是由于其输入激励信号等级小,现场环境复杂易受到噪声干扰,需要经验丰富的工程师对绕组故障进行识别。吴振宇等提出了高压振荡波法,通过实验验证了振荡波用于绕组故障诊断的可行性,为了进一步分析故障下绕组参数和振荡波的关联性,需要对振荡波进行建模分析。国内外学者针对变压器绕组进行了大量建模分析:HASHEMNIA N等建立了集总参数电路模型,得到了轴向移位以及径向变形故障下绕组电气参数与频率响应的关系<sup>[11-12]</sup>;SHINTEMIROV A等提出了适用于高、低频的绕组混合多导体传输线模型,分析了高频下频率响应的变化规律,可用于识别绕组轻微变形<sup>[13-14]</sup>;ABUSIADA A针对V-I轨迹绕组在线检测方法,建立了变压器分布式参数电路模型,仿真得到了绕组在不同故障下的V-I轨迹图,验证了该方法能够有效识别绕组故障<sup>[15]</sup>。上述建模方法都忽略了绕组间的耦合电容及互感的影响,对于绕组检测方法的建模精度有一定的限制。

为此,本文基于一种新型变压器绕组故障诊断方法——振荡波法,以一台10 kV的三绕组变压器为研究对象,通过有限元建模计算获得绕组等效电气参数,搭建了绕组全电容、电感矩阵参数状态空间方程,获得振荡波数学模型。最后通过试验验证了本文振荡波模型的有效性,并重点剖析了绕组轴向移位故障下电气参数变化和振荡波之间的关联性,为变压器绕组振荡波建模提供了理论依据,为绕组故障识别提供参考。

收稿日期:2020-04-03;修回日期:2020-11-28

基金项目:国家自然科学基金高铁联合基金资助项目(U183420005);云南电网有限责任公司科技项目(YNKJXM20170729);四川省科技计划项目(青年科技创新研究团队项目)(2020JDTD0009)

Project supported by the High Speed Rail Joint Fund Project of the National Natural Science Foundation of China (U183420005),the Technology Project of Yunnan Power Grid Co.,Ltd.(YNKJXM20170729) and the Science and Technology Plan of Sichuan Province(Youth Science and Technology Innovation Research Team Project)(2020JDTD0009)

## 1 振荡波原理分析

当频率大于1 kHz时变压器绕组可以等效为无源网络,由电阻、电感、电容构成集总参数电路模型<sup>[16-17]</sup>。振荡波是在变压器绕组的一端输入高压直流电源,经高压可控电力电子开关(简称高压可控开关)开断形成暂态激励信号,在绕组另一端获取的高压暂态响应信号<sup>[10]</sup>。振荡波原理如图1所示,在稳态时高压可控开关处于断开状态,高压直流电源通过限流电阻给绕组前端的高压电容充电,变压器绕组相当于短路状态。当高压可控开关闭合时,将形成2个回路,即直流电源经限流电阻和开关形成的直流回路,以及高压电容与变压器绕组之间形成的暂态振荡回路。高压电力电子开关闭合后,高压电容相当于激励,对绕组形成的电阻-电感-电容回路放电,由于绕组电感及电容特性,高压电容不能立即释放电荷,存在一个反复充放电的过程,而又由于绕组的电阻特性,充放电时电压幅值是不断衰减的,从而形成振荡波信号。变压器绕组构成的振荡回路是变压器的固有属性,当变压器绕组状态改变时,振荡波的振荡频率与幅值也会发生相应的改变,两者之间具有一定的映射关系。根据标准IEC60071-2可知,相同激励下的暂态响应(即振荡波)与变压器绕组自身的属性相关,这也验证了振荡波信号的特征可以用于变压器绕组的故障诊断<sup>[18]</sup>。

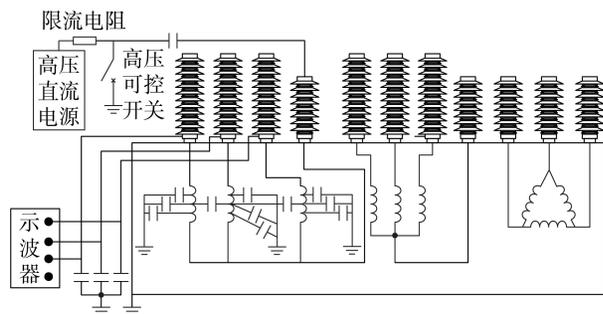


图1 振荡波原理图

Fig.1 Principle diagram of oscillation wave

为了验证变压器绕组振荡波产生的可行性,本文针对一台220 kV的大型三相电力变压器进行了现场试验,见附录中图A1。变压器高压侧三绕组采用Y连接,从高压侧绕组的中性点输入高压暂态激励,在高压侧三相绕组的末屏测试响应信号,测试结果见图2。图中,由上至下3组波形分别对应10、20、30 kV暂态激励的测试结果。

在暂态激励下变压器绕组形成的振荡回路能够获得振荡波,且振荡频率是变压器绕组自身的固有属性,和输入激励的幅值无关。由于三相绕组的结构相同,在不同激励幅值下输出的A、B、C相三绕组振荡波具有良好的重复性,因此利用振荡波识别绕

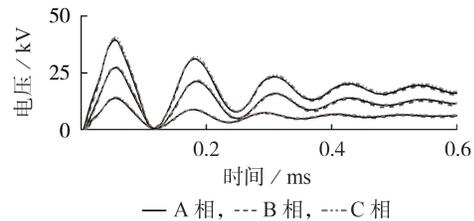


图2 现场试验振荡波形

Fig.2 Oscillation wave obtained from field test

组故障有一定的可行性。

## 2 有限元建模及参数计算

第1节分析了振荡波的基本原理,为进一步研究振荡波和绕组故障之间的关联性,需要对其建模分析。本文以一台10 kV/50 kV·A的三绕组变压器模型为研究对象,绕组结构是分裂式绕组,由串联绕组1( $S_1$ )、公共绕组(C)、串联绕组2( $S_2$ )构成,其主要参数见附录中表A1。变压器绕组可以等效为附录中图A2所示的集总参数电路模型。本文基于图A2,以单个线饼为单元计算变压器绕组的电气参数,每一单元由电阻 $R_b$ 和电感 $L_b$ 以及纵向等值电容 $C_b$ 和电导 $G_b$ 构成,此外三绕组电路单元之间由耦合电容 $C_c$ 、等效电导 $G_c$ 构成,并且考虑 $S_1$ 、C、 $S_2$ 对地电容 $C_k$ 和电导 $G_k$ ,以及每个单元之间的互感 $M$ 。当变压器绕组发生故障时,等效电路模型中的电气参数也会改变,从而影响振荡波。

变压器绕组电气参数计算方法有公式法和有限元数值分析法。但是由于实际的变压器内部磁场分布不均且存在部分漏磁场<sup>[3]</sup>,采用公式法计算所得的电路模型参数精确度不高且计算量大。本文选择Ansoft Maxwell有限元分析软件(下文简称Maxwell软件)对变压器绕组进行等比例建模,从而计算电气参数,所建模型见附录中图A3。

### 2.1 电阻参数的计算

在集总参数电路模型中,每个单元的电阻为绕组每个线饼所有匝串联在一起的总阻值。考虑高频下绕组导线的集肤效应,每个基本单元的阻值为:

$$R = \frac{l}{2(a+b)} \sqrt{\frac{\pi \mu f}{\sigma}} \quad (1)$$

其中, $f$ 为频率; $\mu$ 为导体的磁导率; $\sigma$ 为导体的电导率; $a$ 为导体横截面的径向厚度; $b$ 为导体横截面的轴向高度; $l$ 为单个线饼绕组的总长度。

### 2.2 电感参数计算

利用Maxwell软件的静磁场求解器计算电感矩阵。由于变压器绕组电感仅与变压器绕组材料、尺寸以及导磁媒介有关,而与所加激励无关,本文设置变压器绕组激励源为1 A电流源,利用静磁场能量原理计算变压器绕组电感参数矩阵。

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \int_V HBdV \quad (2)$$

其中,  $W_m$  为每一个线饼单元产生的磁场能量;  $L$  为单个线饼单元的导体电感;  $I$  为绕组输入电流值;  $H$  为每一个线饼单元产生的磁通密度;  $B$  为每一个线饼单元产生的磁感应强度;  $V$  表示变压器模型整个区域空间。由式(2)可以推导出  $L$  为:

$$L = \frac{2W_m}{I^2} = \frac{\int_V HBdV}{I^2} \quad (3)$$

则2个电流回路系统之间储存的磁场能量为:

$$W_m = \frac{1}{2} (L_1 I_1^2 + L_2 I_2^2 + 2MI_1 I_2) \quad (4)$$

故绕组线饼间的等效互感  $M$  为:

$$M = \frac{2W_m - L_1 I_1^2 - L_2 I_2^2}{2I_1 I_2} \quad (5)$$

其中,  $I_1, I_2$  为2个线饼上的电流。

### 2.3 电容参数计算

利用 Maxwell 软件的静电场求解器求线饼间的电容, 在变压器线饼上设置 1 V 电压源为激励, 绕组间和绕组自身的电容参数只与等效介电常数有关, 而与变压器绕组上的激励大小无关。具体计算公式<sup>[19]</sup>如下:

$$W_e = \frac{1}{2} \int_V DEdV \quad (6)$$

其中,  $W_e$  为静电场能量;  $D$  为电通密度;  $E$  为静电场的电场强度。根据有限元计算绕组间总的电场能量进而可以计算电容的大小。通过电容  $C$  与电压  $U$  可将  $W_e$  表示为:

$$W_e = \frac{1}{2} CU^2 \quad (7)$$

则在三维静电场求解器中可以利用式(8)求解  $C_b, C_i, C_k$ 。

$$C = 2W_e/U^2 \quad (8)$$

图3为绕组的对位饼间及错位饼间耦合电容, 包括绕组  $S_1$  和绕组  $C$  的耦合电容  $C_{a(ij)}$  以及绕组  $S_2$  和绕组  $C$  之间的耦合电容  $C_{b(ij)}$ , 其中  $i, j$  分别表示第  $i, j$  个单饼绕组单元, 当  $i=j$  时表示对位饼间耦合电容,  $i \neq j$  时表示错位饼间耦合电容。在 Maxwell 软件的静电场求解器中基于上述饼间电场能量计算公式获得绕组

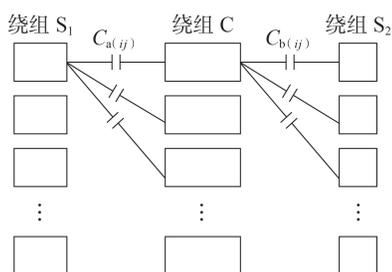


图3 绕组间耦合电容

Fig.3 Coupling capacitance between windings

饼间耦合电容矩阵。通过 Maxwell 软件计算获得绕组正常情况下部分电气参数值如表1所示。

表1 绕组正常情况下的电气参数值

Table 1 Electrical parameter values of normal winding

绕组	$L$ / mH	$C_b$ / pF	$C_i$ / pF	$C_k$ / pF
$S_1$	0.47	28.70	10.49	4.29
C	1.54	30.12	—	4.15
$S_2$	0.38	14.21	4.53	14.68

### 3 振荡波数学模型分析

由于变压器绕组线饼数较多, 为了获得准确的振荡波波形, 基于附录中图 A2, 考虑绕组  $S_1, C, S_2$  对位饼间以及错位饼间的耦合电容和绕组间互感参数, 在 MATLAB 中建立变压器绕组状态空间方程模型, 代入所求电路参数矩阵得到振荡波波形。基于基尔霍夫定律建立以节点  $i$  的电感电流  $I_i$ 、节点电压  $U_i$  为状态变量的状态方程, 根据电路模型得到  $n$  个节点的状态方程为:

$$\begin{cases} TI = C \frac{dU}{dt} + GU \\ T_1 U = L \frac{dI}{dt} + RI \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $T, T_1$  为由  $-1, 0, -1$  组成的系数矩阵, 两者关系可以表示为  $T^T = -T_1$ ;  $C, L$  分别为基于有限元计算所得的全电容、电感参数矩阵<sup>[16]</sup>,  $G$  为电导矩阵,  $G = 2\pi f C \tan \delta$ ,  $\tan \delta$  为导体绝缘介质损耗角的正切;  $R$  为电阻矩阵;  $U, I$  分别为包含所有节点电压、电流的列向量。当激励从某一节点输入  $U_i$  时, 为了计算集总参数模型输出响应将其单独提取出来, 然后对式(9)进行变换后得到状态方程如式(10)所示。

$$\begin{cases} T_2 I = C_1 \frac{dU'}{dt} + G_1 U' + C_i \frac{dU_i}{dt} + G_i U_i \\ P U_i + T_3 U' = L \frac{dI}{dt} + RI \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $T_2$  为  $T$  去掉第  $i$  行后的系数矩阵;  $U'$  为对  $U$  求导后的列向量;  $C_1, G_1$  分别为  $C, G$  去掉第  $i$  行和第  $i$  列后的参数矩阵;  $C_i$  为  $C$  去掉第  $i$  行之后的第  $i$  列向量;  $U_i$  为只包含  $U_i$  的列向量;  $G_i$  为  $G$  去掉第  $i$  行之后的第  $i$  列向量;  $P$  为  $T$  去掉第  $i$  行后的第  $i$  列向量;  $T_3$  为  $T_1$  去掉第  $i$  列向量后的系数矩阵。对式(10)进行变换求解得到:

$$\begin{cases} \frac{dU'}{dt} = \begin{bmatrix} -C_1^{-1} G_1 & C_1^{-1} T_2 \\ L^{-1} T & -L^{-1} R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U' \\ I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -C_1^{-1} C_i \\ 0 \end{bmatrix} \frac{dU_i}{dt} + \begin{bmatrix} -C_1^{-1} G_i \\ P \end{bmatrix} U_i \end{cases} \quad (11)$$

根据式(11)可以化简得到:

$$F' = AF + BU'_i + CU_i \quad (12)$$

$$\begin{cases} F' = \begin{bmatrix} \frac{dU'}{dt} \\ \frac{dI}{dt} \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} -C_1^{-1}G_1 & C_1^{-1}T_2 \\ L^{-1}T & -L^{-1}R \end{bmatrix} \\ B = \begin{bmatrix} -C_1^{-1}C_i \\ 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} -C_1^{-1}G_i \\ P \end{bmatrix} \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $U'_i$  为  $U_i$  的导数列向量。

式(12)是非齐次矩阵常微分方程,求解时域下的矩阵微分方程得到集总参数电路中每个节点的电压列向量函数如式(14)所示。

$$F = e^{At} \int_{t_0}^t e^{-A\tau} (BU'_i(\tau) + CU_i(\tau)) d\tau + e^{-At_0} F(t_0) e^{At} \quad (14)$$

其中,  $\tau$  为积分变量;  $e^{-At_0} F(t_0)$  为初始条件,利用振荡波对变压器绕组进行离线测试时初始条件函数值为0,进行在线测试时初始条件函数值不为0。针对三绕组变压器以单个线饼为单元在 MATLAB 中搭建状态空间方程,变压器的绕组  $S_1$ 、 $C$ 、 $S_2$  通过双饼首尾连接构成单饼,三绕组实际各有16饼,故变压器绕组总饼数为144,在集总参数电路中将每个线饼作为一个电路节点,建立144阶状态空间方程,对其进行解析获得振荡波仿真信号,通过实验验证振荡波模型的正确性。实验采用10 V等级的可控暂态激励源,输出信号为上升沿和下降沿  $1 \mu s$ ,由现场测试获得绕组振荡波信号,实验示意图见附录中图A4。

仿真与实测获得的振荡波时域信号见图4,图中的极值点表示不同时间节点下振荡波的波峰和波谷。从图4中选取4个近似重合的极值点1—4,将其相关信息列在表2中。由表可见,仿真与实测结果的幅值最大相对误差为7.6%,表明时域下仿真和实测的振荡波吻合度较高。

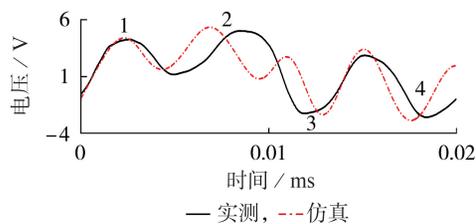


图4 振荡波的仿真与实测结果

Fig.4 Simulative and measured results of oscillation wave

表2 时域下实测和仿真振荡波的极值点对比

Table 2 Comparison of extreme points between measured and simulative oscillation waves in time domain

极值点	实测幅值 / V	仿真幅值 / V	相对误差 / %
1	4.26	4.41	3.52
2	5.06	5.35	5.73
3	-2.30	-2.41	4.78
4	-2.68	-2.89	7.60

为了进一步分析仿真和实测振荡波的吻合程度,从频域的角度分析仿真和实测振荡波频谱特性的差异性,本文通过傅里叶变换将振荡波时域信号转换至频域获得振荡波的频谱特性如图5所示。由图可见,仿真和实测振荡波的频率都主要集中在600 kHz左右;在300~500 kHz范围内,仿真和实测振荡波的频谱幅值均较小,能量分布有一定的差异性。从图5中选取3个相似的频谱特性曲线极值点,相关信息如表3所示。由表可见,在频谱幅值最大的频率点600 kHz处,仿真和实测振荡波之间的频率相对误差仅为1.2%,表明频域下仿真和实测的振荡波吻合度较高。

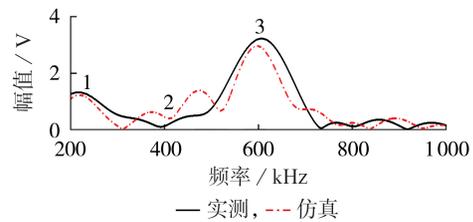


图5 仿真和实测振荡波的频谱特性

Fig.5 Spectrum characteristics of simulative and measured oscillation waves

表3 频域下实测和仿真振荡波的极值点对比

Table 3 Comparison of extreme point between measured and simulative oscillation waves in frequency domain

极值点	实测频率 / Hz	仿真频率 / Hz	相对误差 / %
1	219986	222310	1.05
2	394819	412476	4.47
3	607618	600188	1.20

仿真和实测振荡波之间存在一定的偏差,这主要是由于建立的变压器绕组模型进行了一定程度的简化和等效,有限元仿真获得的绕组电气参数和实际值有一定的偏差。实际的变压器单饼绕组是由双盘线圈首尾相连连续绕制构成的,且每盘绕组由多匝线圈绕制而成,单匝线圈外侧涂有绝缘,而在绕组三维有限元建模中,为了减小计算量将单饼绕组等效为一个整体,不同绕组间设置的等效介电常数和实际值有一定的差异,因此利用有限元计算的绕组饼间耦合电容和实际值会有一定的偏差;在计算纵向等值电容时,实际变压器绕组  $S_1$ 、 $C$ 、 $S_2$  饼间的油道高度会有所不同,为了简化计算,选取饼间油道高度的平均值作为等效油道高度,因此纵向等值电容的计算值会和实际值有一定的偏差。在计算对地电容时,绕组对地电容包括绕组  $S_1$  对油箱壁的电容、绕组  $S_2$  对铁芯的电容,而顶部和底部位置的线饼对地电容同时包含线饼和上侧油箱壁以及铁轭之间的电容,此时电容效应较为复杂,因此利用同轴圆柱电容

计算公式进行简化计算时,所得电容也有一定的误差。由图 5 可看出,振荡波的振荡频率主要分布在 600 kHz 左右,在高频下受铁芯涡流效应,以及导体涡流效应和肌肤效应的影响,绕组电感参数将发生频变<sup>[20]</sup>,因此仿真电感参数和实际值也有一定的偏差。电容和电感参数的计算误差导致仿真振荡波频率和实测结果有一定的偏差。而由于 400 kHz 下,仿真和实测振荡波的频谱能量分布有一定差异,时域下由不同频率谐波叠加构成的振荡波会有一定差异,仿真振荡波会由于和实测振荡波相异的低频谐波叠加而多出现 1 个波峰。

### 4 轴向移位故障下的振荡波仿真分析

#### 4.1 电气参数变化规律分析

变压器绕组处于时变的磁场中,当绕组发生短路故障时,其瞬态电流较大,所受到的轴向电磁力会从几磅增加到吨级别,可能造成绕组的整体轴向移位<sup>[21]</sup>。为探究轴向移位故障下绕组电气参数的变化规律,本文在 Maxwell 软件中针对绕组 S<sub>1</sub> 设置了 1%、3%、5% 轴向移位故障,计算不同故障程度下绕组电气参数矩阵,为轴向移位故障下绕组振荡波的变化规律提供理论依据。图 6 为变压器绕组轴向移位故障示意图,轴向移位百分比 H<sub>as</sub> 的计算公式如式(15)所示。

$$H_{as} = \frac{\Delta h}{h} \times 100\% \quad (15)$$

其中,Δh 为轴向移位的高度;h 为绕组的总高度。绕组 S<sub>1</sub> 的总高度约为 460 mm,1% 轴向移位故障下,绕组轴向移动高度约为 4.6 mm。

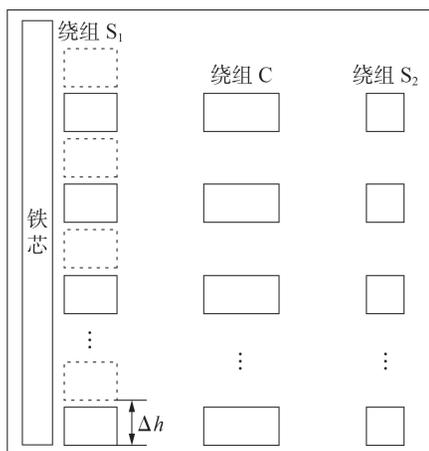
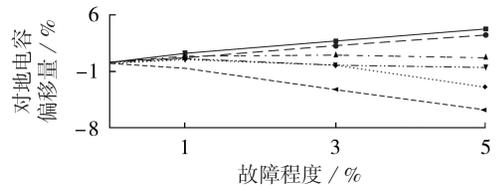


图 6 轴向移位故障示意图

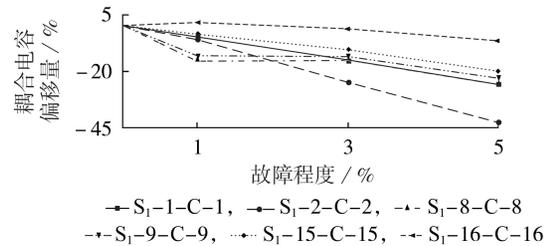
Fig.6 Schematic diagram of axial shift fault

不同程度的轴向移位故障下,绕组电气参数变化规律如图 7 所示。图中,S<sub>1</sub>-1 表示绕组 S<sub>1</sub> 的第 1 饼单元,其他依此类推。由图 7 可知,当绕组发生轴向移位故障时,绕组的电容发生了明显的改变,而电感

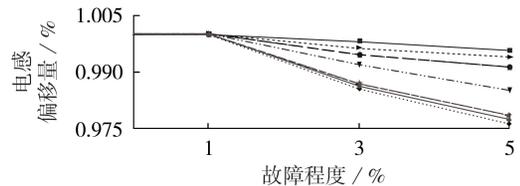
参数变化不大,这是由于发生轴向移位故障时,绕组间的距离发生了改变从而对电容产生较大的影响,而电感与绕组自身材料属性有关,距离变化对于电感变化的影响较小。



(a) 绕组 S<sub>1</sub> 对地电容偏移量



(b) 绕组 S<sub>1</sub>、C 间耦合电容偏移量



(c) 绕组电感参数偏移量

图 7 不同程度的轴向移位故障下,绕组电气参数的变化  
Fig.7 Change of electrical parameters of windings under axial shift fault of different degrees

由图 7(a) 可知,轴向移位故障下,绕组 S<sub>1</sub> 的顶部线饼对地电容呈现增大趋势,底部线饼对地电容逐渐减小,这是由于轴向移位故障下,顶部绕组对油箱的间距减小所以顶部线饼对地电容增大,而底部绕组对油箱的间距增大所以底部线饼对地电容相应减小。中部绕组对于油箱的距离基本不变,所以中部绕组对地电容基本不变。对比图 7(b) 可知,随着故障程度的加深,绕组间耦合电容逐渐下降,且其变化幅度远大于绕组对地电容,表明绕组耦合电容的变化是振荡波变化的主导因素之一。绕组中部第 8、9 线饼耦合电容在 1%、3% 轴向移位故障下的变化相似,这主要是由于绕组 S<sub>1</sub>、C 的油道有一定的高度差,从而形成绕组间的错位,在发生 1%、3% 轴向移位故障时,绕组耦合间距对称变化,其间距基本保持不变,绕组间耦合电容的变化也相对较小。由图 7(c) 可知,当绕组 S<sub>1</sub> 发生轴向移位故障时,绕组 S<sub>1</sub>、C、S<sub>2</sub> 的电感均随着轴向移位程度的加深而减小,但

是其变化幅度较小,其中绕组C的电感在5%轴向移位故障下的减小幅度相对较大,但是其电感值与正常时的电感值也非常接近,两者比值为0.975。不同的绕组以及不同位置的线饼电感变化幅度有一定的差异,这主要是由于发生轴向移位故障时绕组磁场对称性发生了改变,不同位置的磁场强度在轴向移位故障下的变化不一致,因此其电感减小幅度也有轻微的差异<sup>[11]</sup>。

#### 4.2 振荡波变化规律分析

将轴向移位故障下的电容、电感参数矩阵代入本文所建立的振荡波数学模型,可以得到轴向移位故障下的仿真振荡波波形如图8所示。由图可见,随着故障程度的加深,波形整体向上偏移;波峰、波谷的变化趋势相似,均随着故障程度的加深向右上方偏移。当绕组发生轴向移位故障时,绕组间耦合电容随着故障程度的加深逐渐减小,而振荡波的振荡频率主要分布在600 kHz附近,此时电容减小将导致绕组容抗变大,因此输出的振荡波幅值是逐渐增大的。

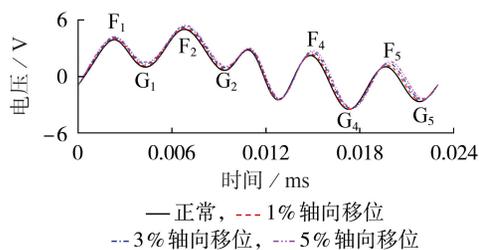


图8 不同程度轴向移位故障下的振荡波

Fig.8 Oscillation waves under axial shift fault of different degrees

根据图7知,随着轴向移位故障程度的加深,绕组电感逐渐减小,与绕组间耦合电容变化一致。电感、电容参数的变化导致振荡波整体波形的振荡频率发生偏移,在时域中体现为振荡波波形整体时间点改变,因此波峰、波谷在时间轴上的偏移方向也是一致的。为了量化轴向移位故障下振荡波波峰、波谷的偏移特征,计算得到振荡波波峰 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_4$ 、 $F_5$ 和波谷 $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_4$ 、 $G_5$ 的幅值和时间偏移量,分别如表4和表5所示。表中, $\Delta T$ 、 $\Delta D$ 分别为时间偏移量、幅值偏移量。

由表4可见,随着故障程度的加深, $\Delta T$ 和 $\Delta D$ 均逐渐增大,验证了振荡波波峰、波谷变化的趋势相似,均是向右上方偏移。当发生1%轴向移位故障时,波峰 $F_4$ 、 $F_5$ 的幅值偏移量相对较大,分别为6.82%和15.45%,波谷 $G_1$ 、 $G_2$ 的幅值偏移量相对较大,分别为14.48%和24.63%,因此1%轴向移位故障下,这4个极值点偏移相对较大,而正常波形的最

表4 轴向移位故障下振荡波波峰、波谷的偏移量

Table 4 Offset of peaks and valleys of oscillation wave under axial shift fault

极值点	故障程度 / %	$\Delta T$ / %	$\Delta D$ / %	极值点	故障程度 / %	$\Delta T$ / %	$\Delta D$ / %
$F_1$	1	0.35	2.62	$G_1$	1	0.47	14.48
	3	1.22	5.70		3	0.61	36.04
	5	1.53	8.39		5	1.14	53.85
$F_2$	1	0.34	2.43	$G_2$	1	0.51	24.63
	3	0.78	5.83		3	0.91	48.89
	5	1.16	8.70		5	1.29	72.59
$F_4$	1	0.47	6.82	$G_4$	1	0.40	0.28
	3	0.74	15.59		3	0.75	-3.20
	5	1.14	23.41		5	1.33	-3.80
$F_5$	1	0.49	15.45	$G_5$	1	0.55	-4.01
	3	0.87	36.04		3	0.87	-7.50
	5	1.31	54.74		5	1.28	-11.10

小偏移量约为7%,这表明针对较小的移位故障振荡波也可以有效检测绕组故障。振荡波频率主要集中在600 kHz左右,但是除了频谱幅值较高的频带,振荡波也包含了幅值较小且频率不一的谐波分量,由傅里叶变换原理可知时域下振荡波曲线可以由600 kHz基波以及不同频率的谐波构成。因此1%轴向移位故障下,振荡波的波峰 $F_4$ 、 $F_5$ 和波谷 $G_1$ 、 $G_2$ 的幅值变化相对较大,这可能是由于在不同的波峰、波谷时间段内不同频率的谐波分量不一致,电容以及电感参数变化在不同谐波分量下响应变化也不一致,在时域中体现在波峰、波谷对于故障响应灵敏性有一定的差异。

## 5 结论

基于变压器绕组振荡波法,本文通过有限元建立了振荡波数学模型,仿真得到了轴向移位下绕组电气参数及振荡波的变化规律,所得结论如下。

(1) 变压器绕组振荡波仿真与实测下的波形相似度较高,仿真下振荡波第1—4极值点与实测相比基本一致,其幅值误差最大为7.6%,验证了模型的正确性及有效性。

(2) 绕组轴向移位下电感参数变化较小,不同位置下绕组对地电容变化规律不同,中部绕组对地电容基本不变,顶部与底部绕组对地电容变化相反;绕组间耦合电容随故障程度加深而减小,顶部耦合电容减小趋势最大。

(3) 基于振荡波模型,仿真得到轴向移位故障下振荡波曲线呈现整体向上偏移的趋势,其波峰极值点偏移量相对较大,针对绕组轻微故障也具有较高的辨识性。基于本文振荡波数学模型,可以获取不同故障下的振荡波变化规律,为绕组故障诊断提供参考。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

### 参考文献:

- [1] 王明林,陈民铀,赖伟,等. 一种改进的配电变压器短路电抗在线检测方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(3):127-132.  
WANG Minglin,CHEN Minyou,LAI Wei,et al. Improved method of online measuring for distribution transformer short circuit reactance[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(3):127-132.
- [2] 孙翔,何文林,詹江杨,等. 电力变压器绕组变形检测与诊断技术的现状与发展[J]. 高电压技术,2016,42(4):1207-1220.  
SUN Xiang,HE Wenlin,ZHAN Jiangyang,et al. Current status and development of test and diagnostic technique of transformer winding deformation[J]. High Voltage Engineering,2016,42(4):1207-1220.
- [3] 周利军,李威,江俊飞,等. 牵引变压器绕组改进型频率响应建模与径向变形故障分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(7):213-218.  
ZHOU Lijun,LI Wei,JIANG Junfei,et al. Improved FRA modeling and radial deformation fault analysis of traction transformer windings[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(7):213-218.
- [4] 邹林,廖一帆,罗兵,等. 基于有限元法探究电力变压器绕组变形频率响应的仿真研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):204-211.  
ZOU Lin,LIAO Yifan,LUO Bing,et al. Simulative research on frequency response to winding deformation of power transformer based on finite element method[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(1):204-211.
- [5] 张重远,王彦波,张林康,等. 基于NICS脉冲信号注入法的变压器绕组变形在线监测装置研究[J]. 高电压技术,2015,41(7):2259-2267.  
ZHANG Zhongyuan,WANG Yanbo,ZHANG Linkang,et al. Research on an online monitoring device for transformer winding deformation using NICS pulse injection method[J]. High Voltage Engineering,2015,41(7):2259-2267.
- [6] 刘勇,杨帆,张凡,等. 检测电力变压器绕组变形的扫频阻抗法研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(17):4505-4516.  
LIU Yong,YANG Fan,ZHANG Fan,et al. Study on sweep frequency impedance to detect winding deformation within power transformer[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(17):4505-4516.
- [7] 姚陈果,赵仲勇,李成祥,等. 基于暂态过电压特性的电力变压器绕组变形故障在线检测[J]. 高电压技术,2015,41(3):873-880.  
YAO Chenguo,ZHAO Zhongyong,LI Chengxiang,et al. Online detecting winding deformation of power transformer based on transient overvoltage[J]. High Voltage Engineering,2015,41(3):873-880.
- [8] ZHAO Xiaozhen,YAO Chenguo,ZHAO Zhongyong. Performance evaluation of online transformer internal fault detection based on transient overvoltage signals[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(6):3906-3915.
- [9] MITCHELL S D,WELSH J S. Modeling power transformers to support the interpretation of frequency-response analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(4):2705-2717.
- [10] 吴振宇,周利军,周祥宇,等. 基于振荡波的变压器绕组故障诊断方法研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(1):348-357.  
WU Zhenyu,ZHOU Lijun,ZHOU Xiangyu,et al. Research on fault diagnosis method of transformer winding based on oscillatory wave[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(1):348-357.
- [11] HASHEMNIA N,ABUSIADA A,ISLAM S. Improved power transformer winding fault detection using FRA diagnostics-part 1:axial displacement simulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2015,22(1):556-563.
- [12] HASHEMNIA N,ABUSIADA A,ISLAM S. Improved power transformer winding fault detection using FRA diagnostics-part 2:radial deformation simulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2015,22(1):564-570.
- [13] SHINTEMIROV A,TANG W H,WU Q H. A hybrid winding model of disc-type power transformers for frequency response analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2009,24(2):730-739.
- [14] ZHANG Z W,TANG W H,JI T Y,et al. Finite-element modeling for analysis of radial deformations within transformer windings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2014,29(5):2297-2305.
- [15] ABUSIADA A,ISLAM S. A novel online technique to detect power transformer winding faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2012,27(2):849-857.
- [16] ZHOU Lijun,JIANG Junfei,LI Wei,et al. FRA modelling for diagnosing axial displacement of windings in traction transformers[J]. IET Electric Power Applications,2019,13(12):2121-2127.
- [17] 唐治平,彭敏放,李光明,等. 基于重复脉冲法的变压器绕组匝间短路故障诊断[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):153-158.  
TANG Zhiping,PENG Minfang,LI Guangming,et al. Diagnosis of inter-turn short circuit fault of transformer winding based on repetitive surge oscillograph[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(10):153-158.
- [18] The International Electrotechnical Commission. Insulation coordination in part 2: application guidelines: IEC60071-2[S]. Geneva,Switzerland:International Electrotechnical Commission,2018.
- [19] 张嘉祥. 变压器线圈波过程[M]. 北京:水利水电出版社,1982:252-268.
- [20] ABEYWICKRAMA K G N B,PODOLTSEV A D,SERDYUK Y V,et al. Computation of parameters of power transformer windings for use in frequency response analysis[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2007,43(5):1983-1990.
- [21] 张博,李岩. 多次冲击条件下的大型变压器绕组轴向失稳[J]. 电工技术学报,2017,32(增刊2):71-76.  
ZHANG Bo,LI Yan. Radial stability of large transformer windings under multiple inrush conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(Supplement 2):71-76.

### 作者简介:



周利军

周利军(1978—),男,浙江萧山人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电气设备状态检测与故障诊断方面的研究(E-mail:zhoulijun@home.swjtu.edu.cn);

周祥宇(1995—),男,安徽淮北人,硕士研究生,主要从事电气设备状态检测与故障诊断方面的研究(E-mail:zhouxiangy@163.com)。

(编辑 任思思)

(下转第188页 continued on page 188)

## Joint operation mechanism of spot electric energy and auxiliary service for wind power market-oriented accommodation

CHEN Qing<sup>1</sup>, WU Mingxing<sup>1</sup>, LIU Yingqi<sup>2</sup>, WANG Yi<sup>1</sup>, XIE Min<sup>2</sup>, LIU Mingbo<sup>2</sup>

(1. Guangdong Power Exchange Center Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In order to stimulate the flexible regulation ability of power generation resources in a market-oriented way, a flexible ramping auxiliary service based on the ramping capacity verification is proposed, and combined with market-oriented frequency regulation and deep peaking auxiliary service, a joint operation mechanism of spot electric energy and auxiliary service for high proportion of wind power is designed. For the frequency regulation service, the mean normalization method based on comprehensive frequency regulation performance is used to adjust the capacity quotation of the unit, which reflects the performance difference of frequency regulation units. For the deep peaking auxiliary service, a segmented quotation mechanism based on the energy consumption characteristics of peaking units is proposed, which fully excavates the peaking capacity of the units while ensures their reasonable benefit. For the flexible ramping auxiliary service, a ramping capacity verification mechanism coupled with the electric energy market is proposed, which improves system ramping capacity through “repeated verification-add constraint” to follow the net load fluctuation caused by wind power uncertainty. A clearing model of joint operation of spot electric energy and auxiliary service is constructed, and the equivalent linearization method is adopted to transform the non-linear model into a linearized model, which improves the solving efficiency of the model. The effectiveness of the proposed market mechanism and clearing model is verified by the actual data of a provincial system.

**Key words:** high proportion of wind power; market mechanism; flexible ramping; frequency regulation; deep peaking

(上接第163页 continued from page 163)

## Oscillation wave modeling and axial shift fault analysis of transformer winding

ZHOU Lijun<sup>1</sup>, ZHOU Xiangyu<sup>1</sup>, WU Zhenyu<sup>1</sup>, LIN Tong<sup>1</sup>, XU Xiaowei<sup>2</sup>, ZHANG Chenqingyu<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

**Abstract:** The mechanism of oscillation wave is analyzed from the properties of transformer itself. For a three-winding transformer, the finite element model is built to obtain the electrical parameter matrix of the windings. Based on the lumped parameter circuit of the windings, the time-domain mathematical model of oscillation wave under parameters of full capacitance and inductance matrix is established, and the validity of the model is verified by comparing the simulative curves with the measured curves. Then, taking the axial shift fault as an example, the variation rules of parameters of the transformer windings and the mapping relationship between parameters of the transformer winding and the oscillation wave are analyzed, and the variation rules of the extreme points of oscillation wave under the axial shift fault are analyzed emphatically. The study results show that the change of capacitance parameters under axial shift fault has significant influences on oscillation wave, and the amplitudes offset of the extreme points of the oscillation wave are large. With the deepening of the fault degree, the wave peaks and valleys of the oscillation wave gradually shift upward.

**Key words:** electric transformers; high voltage oscillation wave method; finite element calculation; modeling; axial shift fault; offset of extreme point

# 附录



图 A1 现场试验验证

Fig.A1 Field test verification

表 A1 变压器绕组基本参数值

TableA1 Basic parameter values of transformer construction

参数	参数值	参数	数值
铁芯半径/mm	53	串联绕组 1 饼数	32
铁芯高度/mm	530	串联绕组 1 单饼匝数	8
线饼高度/mm	20	串联绕组 1 油道宽/mm	10
公共绕组饼数	32	串联绕组 2 饼数	32
公共单饼匝数	16	串联绕组 2 单饼匝数	8
公共绕组油道宽/mm	14	串联绕组 2 油道宽/mm	10.6

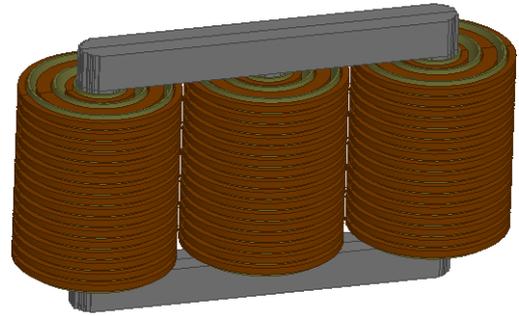


图 A3 变压器三维有限元模型

Fig.A3 Three-dimensional finite element model of transformer

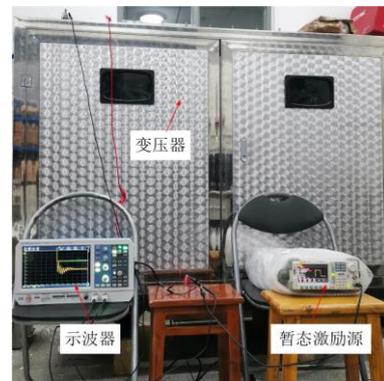


图 A4 振荡波模型试验验证

Fig.A4 Experimental verification of oscillation wave model

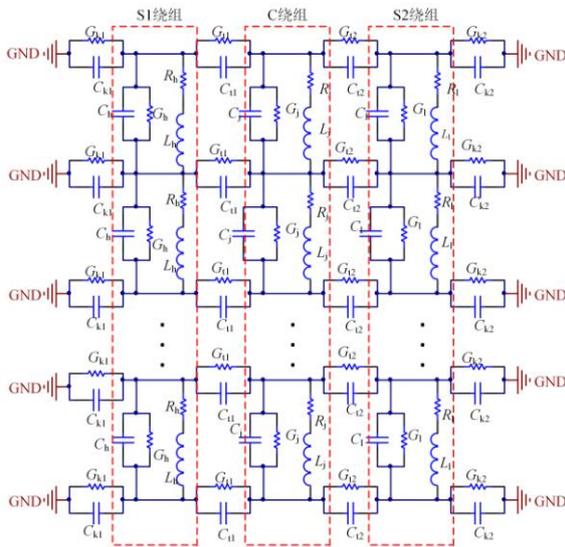


图 A2 绕组等效电路模型

Fig.A2 Equivalent circuit model of winding