[变压器]

变压器绕组匝间短路振动特性分析

文/国网山东省电力公司滨州供电公司　李　勇　李　巍　王　恒　王吉庆　苏同斐

建立电磁耦合模型，分析绕组振动特性，仿真计算变压器在不同负载率下的绕组端口电流、振动特性与短路比例的关系。搭建单相变压器绕组匝间短路动模试验平台，对绕组端口电流及振动参数进行量测，并将量测结果与仿真数据进行对比，验证所得结论的适用性。

变压器在电力系统中承担电压转换、电能分配的作用，其正常运行对整个电力系统的稳定性和可靠性具有重要意义。绕组匝间短路故障是变压器主要内部故障之一，主要由内部线圈之间的绝缘老化或破损所致，具有电流增大、铁心及绕组振动加剧的特点。随着系统电压等级的不断提高，变压器发生匝间短路的概率将增大，进而造成设备烧毁，甚至危及系统的安全稳定。

近年来，国内外学者针对变压器绕组匝间短路问题进行了大量研究。目前，对匝间短路的检测方法主要分为离线检测和在线检测。离线检测法主要包括频率响应法、扫频阻抗法和功率损耗法等，但在离线状态下无法及时有效地发现变压器的内部故障，且检测过程接线复杂，对设备要求较高，因此在实际工程中大多采用在线检测方式。在线检测法包括短路阻抗法、磁通分布法以及绕组形变法等。现阶段，大部分研究仅从单一角度对匝间短路故障进行识别，并未考虑匝间短路引起的端口电流变化及与绕组振动对应关系。

针对上述问题，本文研究单相变压器发生匝间短路后绕组振动规律。基于电磁耦合原理循环迭代求解磁场模型和电路模型实现电磁耦合。在此基础上构建绕组振动谐响应分析模型，对变压器绕组发生匝间短路时的端口电流、振动特性进行仿真分析。搭建变压器匝间短路动模试验平台，监测绕组振动情况，并与仿真结果进行对比。

电磁耦合模型

1．磁场模型

假设某时刻的绕组电流i_k已知，可以采用基于矢量磁位A的能量平衡有限元法（EBFEM）计算该时刻的动态电感矩阵。磁场模型通过伽辽金加权余量公式求解

$$-\iiint_V M_m \times\left(\frac{1}{\mu}\nabla\times A\right)\mathrm{d}V=-\iiint_V M_m\times\left(\frac{1}{\mu}\nabla A\right)\mathrm{d}V+\oiint_S M_m e_n\times\left(\frac{1}{\mu}\nabla A\right)\mathrm{d}S=\iiint_V M_m J\mathrm{d}V \tag{1}$$

式中，μ是磁导率，单位为H/m；J是电流密度矢量，单位为A/m^2；$\{M_m\}$是权函数序列；m是权函数序列通项编号；e_n是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，可求解得动态矢量位函数A，进而计算磁感应强度B(T)、磁场强度H(A/m)等场量。

在时域求解过程中，采用局部线性化方法计算磁场能量。当电流增量为δi时，场量变化为δH、δB，则磁场能量增量为

$$\delta W_2=\frac{1}{2}\delta B\delta H\mathrm{d}\Omega \tag{2}$$

同时，当线圈电流增加δi时，其电路能量变化

$$\delta W_1 = \frac{1}{2} L_{Djk} \delta i_j \delta i_k (j,k = 1,2) \quad (3)$$

由能量平衡原理，磁场－电路耦合能量相等，联立式（2）和式（3），则可计算绕组自感，在此基础上求解绕组各部分互感。

2．电路模型

变压器磁链方程为

$$\psi = L_S i \quad (4)$$

式中，Ψ是模型的磁链向量，单位为Wb；L_S是静态电感矩阵，单位为H，i是电路模型的绕组电流向量，单位为A。

利用变压器内部基本电磁关系，可知时域电路微分方程为

$$u = \left(\frac{\mathrm{d}L_S}{\mathrm{d}i} i + L_S \right) \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = L_{D(i)} \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \quad (5)$$

式中，u是励磁电压，单位为V；L_D是动态电感矩阵，单位为H。

将时域电感参数代入电路微分方程，采用改进欧拉法，由t_b时刻的线圈电流i_b计算t_b+1时刻的电流i_k+1为

$$i_{b+1} = i_b + \frac{h}{2}\left[f(t_b, i_b) + f(t_{b+1}, i_b + hs) \right] \quad (6)$$

式中，h是步长；s是步长内的分段计算斜率列向量。

振动谐响应模型

变压器磁场模型中绕组任一单元电磁力F_e为

$$F_e = \int J \times B \mathrm{d}V \quad (7)$$

式中，J是电流密度矢量，单位为A/m^2；B是磁感强度，单位为T；dV是体积单元。

绕组在电磁力激励下的振动满足动力方程

$$M \overset{gg}{l}(t) + C \overset{g}{l}(t) + Kl(t) = Q(t) \quad (8)$$

式中，M是模型质量矩阵；C是模型阻尼矩阵；K是模型刚度矩阵；$Q(t)$是模型载荷向量；$\overset{gg}{l}(t)$、$\overset{g}{l}(t)$和$l(t)$分别是模型节点的加速度向量（m/s^2）、速度向量（m/s）和位移向量（m）。

对于运行中的变压器，式（8）中的模型载荷向量$Q(t)$为

$$Q(t) = \sum F_e \quad (9)$$

式中，F_e是绕组任一单元电磁力。

根据振动位移可计算振动加速度为

$$g = \frac{\mathrm{d}^2 l}{\mathrm{d}t^2} \quad (10)$$

式中，g是绕组振动加速度，单位为m/s^2。

基于磁场－电路耦合迭代求解变压器状态方程（原理如图2所示），进而计算振动加速度，步骤如下。

1）将磁场模型中某一时刻的电流i_k作为已知量，基于能量平衡有限元法计算时域电感。

2）将时域电感回馈给电路模型中的时域微分方程，采用改进欧拉法计算下一时刻的电流i_k+1。

3）将i_k+1作为下一次磁场模型求解的输入量，进行磁场求解。

4）基于磁场场量，通过振动谐响应模型计算绕组振动加速度。

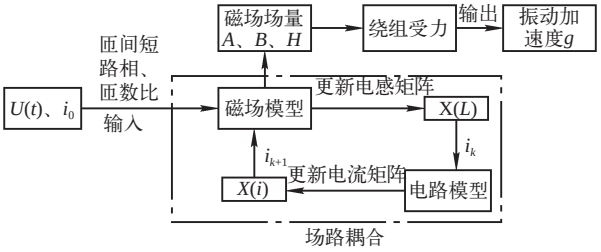


图2　电磁耦合迭代原理

仿真计算

对实际单相三柱式变压器进行建模仿真。模型尺寸与实际比例为1:1，铁心硅钢片的型号为Z10。变压器具体参数如下表所示。

表　变压器参数

铭牌参数	额定值	量测值
容量S_N (VA) /频率(Hz)	300/50	–
高/低压绕组电压U_N/V	220/60	–
空载电流A	–	0.17
铁心尺寸/mm	–	130×65×112
高/低压绕组匝数	396/108	–

利用ANSYS建立变压器绕组匝间短路三维有限元仿真模型，如图3所示。对不同短路比例α（0、1%、3%和5%）及不同负载率β（0、50%和100%）下的匝间短路特性进行仿真分析。

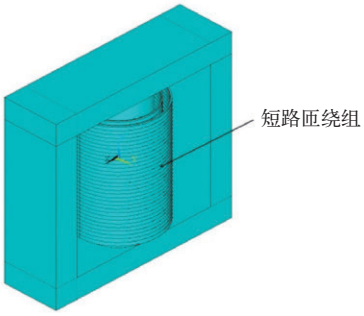
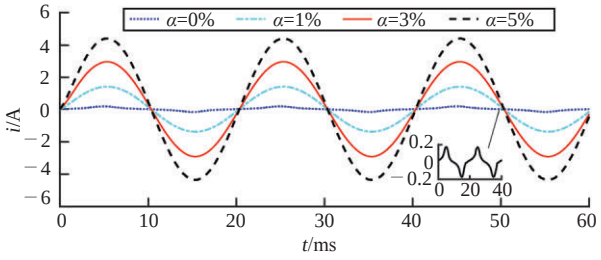


图3　变压器仿真模型

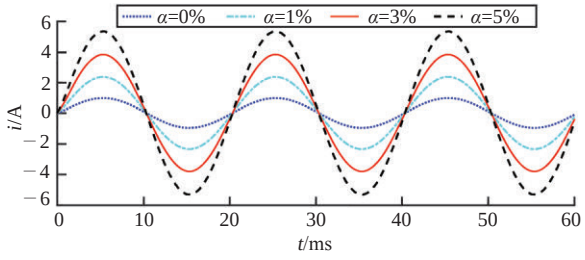
1．不同负载率下端口电流分析

不同的负载率情况下，对变压器高压绕组分

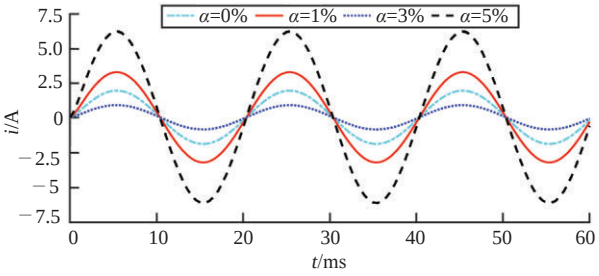
别设置不同比例的匝间短路故障，对其高压绕组端口电流进行仿真，结果如图4所示。



（a） β =0端口电流仿真值



（b） β =50%端口电流仿真值



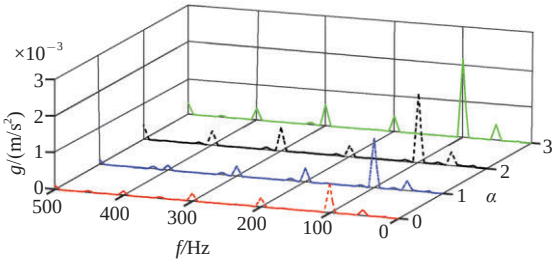
（c） β =100%端口电流仿真值

图4　不同负载率下端口电流仿真值

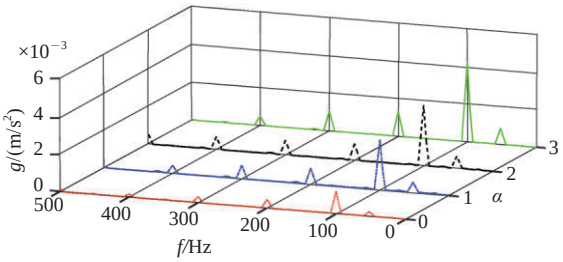
由图4可知，空载情况下，未发生匝间短路（α =0）时，一次绕组电流为尖顶波，即为空载电流，其有效值为0.17 A；当发生匝间短路故障时，绕组端口电流变大且变为正弦波。且随着短路比例的升高，电流不断增大。不同负载率下，绕组端口电流随短路比例的变化规律基本相同，但其大小随着负载率的升高而增大，即负载率越高、短路比越大，端口电流增大越明显。

2．不同负载率下绕组振动分析

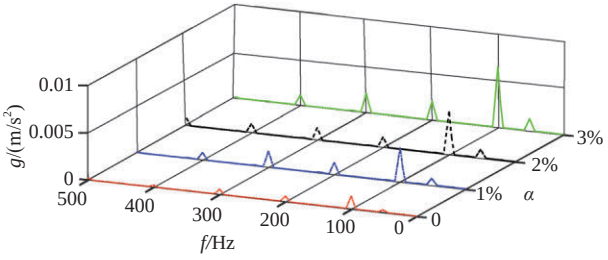
不同负载率下，对不同比例匝间短路对应的绕组振动情况进行仿真，结果如图5所示。



（a） β =0绕组振动仿真值



（b） β =50%绕组振动仿真值



（c） β =100%时绕组振动仿真值

图5　不同负载率下绕组振动仿真值

由图5可知，绕组振动的加速度频谱主要集中在前500 Hz，在100 Hz处振动最剧烈，这主要是由于振动信号以2倍电源频率为基频所致。当绕组发生在间短路时，绕组振动加剧，且随着短路比例的增大而明显增大。比较不同负载率下绕组的振动情况，可以发现其在不同短路比例下振动的变化规律基本一致，负载率越高，振动越剧烈，对变压器运行安全性及稳定性的影响越大。

试验验证

搭建变压器匝间短路试验平台，试验变压器基本参数见表，试验如图6所示。

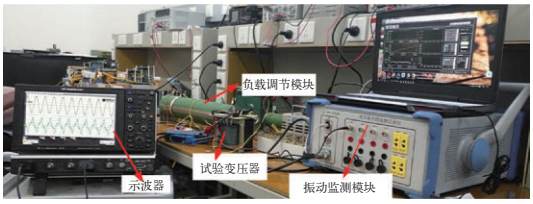
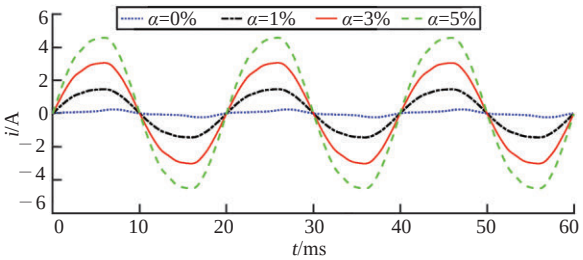


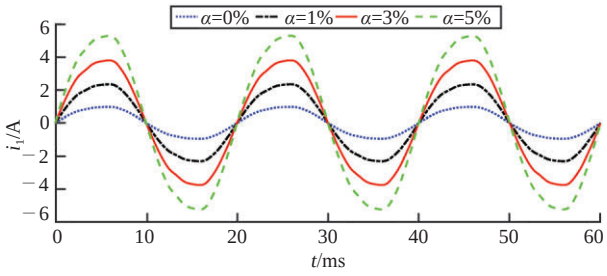
图6　变压器试验

1．端口电流试验结果分析

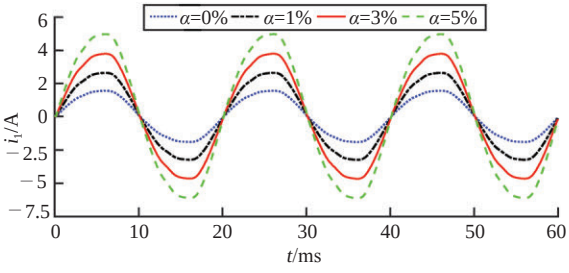
不同负载率下，在变压器的高压侧设置不同比例的匝间短路故障，端口电流试验结果如图7所示。



（a） β =0端口电流试验值



（b）β =50%端口电流试验值



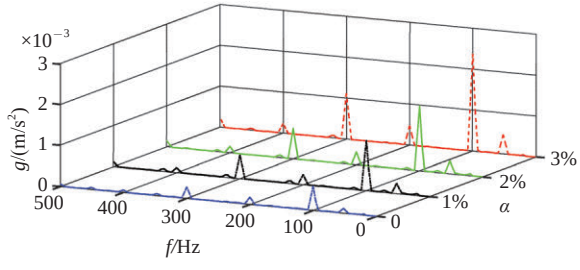
（c）β =100%端口电流试验值

图7　不同负载率下端口电流试验值

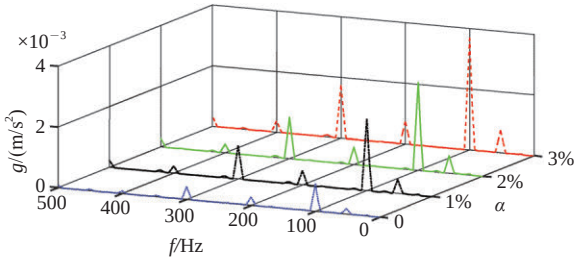
由图7可知，变压器在不同负载率下端口电流试验值与短路比例的对应关系与仿真值基本一致，能够证明模型建立的有效性及准确性。

2．绕组振动试验结果分析

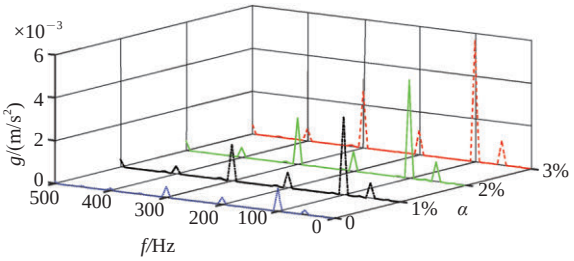
不同负载率下，对变压器不同比例匝间短路故障下的振动情况进行试验量测，结果如图8所示。



（a）β =0绕组振动试验值



（b）β =50%绕组振动试验值



（c）β =100%绕组振动试验值

图8　不同负载率下绕组振动试验值

由图8可知，变压器匝间短路故障会使绕组振动加剧，振动频谱主要集中在前500 Hz，其中100 Hz处的振幅最大。变压器绕组的振动程度随短路比例的升高而增大。除此之外，变压器的负载率与绕组振动成正相关，即满载运行时的振动明显强于空载运行。试验数据验证了仿真结果的准确性。

结束语

基于电磁耦合模型研究单相三柱式变压器在不同负载率下匝间短路绕组振动问题，得出以下结论：

1）绕组匝间短路故障导致端口电流增大，绕组振动明显加剧，进而可能对变压器运行的稳定性及安全性造成影响。

2）对比变压器不同运行方式时的绕组振动情况，匝间短路比例越高，负载率越大，绕组振动问题越严重。EA

（收稿日期：2019.12.03）

（编辑：朱金凤）

公　示

根据国家新闻出版署《新闻记者证管理办法》，我单位《电气时代》编辑部对申领新闻记者证的人员进行严格的资格审核，现将拟申领新闻记者证人员名单进行公示。

申领新闻记者证人员：《电气时代》编辑部乔宇、孙彬。编辑部举报电话：010-88379714，新闻出版管理部门监督举报电话：010-83138953，公开接受社会监督。

公示期：2020年7月10日—2020年8月10日。