

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

周利军,李 威,江俊飞,高仕斌,严静荷

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 611756)

摘要:以一台 QYS-R-(31500+25000)/220 牵引变压器为研究对象,提出一种基于集总参数电路的考虑绕组间全电容参数的改进型频率响应模型,通过与实测曲线进行对比,验证了模型正确性;然后对变压器的牵引绕组和高压绕组分别进行了向内的曲翘变形和向外的鼓包变形这 2 种径向变形故障仿真,重点分析了不同变形故障对电容参数的影响;最后通过对变化的频率响应曲线进行分析。分析结果表明:牵引变压器牵引绕组和高压绕组发生径向变形故障时,特征诊断频带不同,但在各自的特征频带内频响曲线呈现相同的变化规律,即随着故障程度的增加,频率响应曲线向低频方向移动,并且幅值不断增大。

关键词:牵引变压器;集总参数;频率响应分析;径向变形;电容

中图分类号:TM 922.73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.032

0 引言

牵引变压器故障严重影响牵引供电系统的稳定性和可靠性^[1]。由于牵引供电系统的特殊性,牵引负荷波动性较大,当绕组遭受大电流冲击时,可能发生各种变形,其中,径向变形是变压器常见故障之一^[2-5]。因此,对变压器绕组状态进行准确的诊断,可以及时发现故障、安排检修,防止变压器进一步损坏,造成严重的经济损失。

频率响应分析 FRA(Frequency Response Analysis)法由于其能够有效检测变压器绕组的机械变形而被国内外学者广泛使用^[6-7]。该方法是通过频率响应曲线横向或纵向比较寻找某些关键性的差异特征来识别变压器绕组的机械缺陷^[8]。但是由于不同变压器之间的结构差异较大,其发生故障时所表征的特征也不相同,因此一般需要经验丰富的专家来诊断绕组可能发生的故障^[9-10]。

国内外学者对利用 FRA 法诊断绕组故障进行了大量的研究,Ludwikowski 在小模型变压器上开展绕组径向鼓包变形试验,利用频率响应曲线特征频率带诊断绕组变形^[11];Zhang Z W 提出以饼为单元的混合多导体传输模型,提出利用有限元仿真绕组径向变形故障下模型参数的变化及其对频率响应的影响^[12];Yousof M F M 利用多导体传输线模型,仿真了导体的倾斜和弯曲故障,并利用频率响应曲线的奈奎斯特图诊断故障类型^[13];Hashemnia 通过仿真变压器绕组径向变形,量化了变形程度与等效电路参数之间的映射关系^[14];邹林等人基于有限元软

件分析了绕组不同变形类型和变形程度对频率响应曲线的影响^[3]。上述方法对变压器绕组变形仿真建模及分析均是基于简化后的单绕组或者双绕组模型,未考虑绕组间复杂的耦合关系,与实际变压器有一定的差异性,特别是对于大型三绕组变压器,绕组线饼数量多,绕组间线饼不对称性较大,3 个绕组间的耦合关系更为复杂,需考虑绕组间线饼的交叉电容。

为此,本文以一台型号为 QYS-R-(31500+25000)/220 牵引变压器作为研究对象,考虑绕组间的交叉电容对传统集总参数电路模型进行改进,并开展了绕组的径向变形故障研究:通过有限元法,计算得到有效的集总参数,然后建立相应的状态空间方程,借助 MATLAB 仿真得到 1 kHz~1 MHz 下的频率响应曲线,通过对比实测与仿真频率响应曲线,验证了模型的准确性;基于该模型,仿真了牵引绕组和高压绕组不同程度的径向变形故障,重点分析了不同变形对电容参数的影响,通过对变化的频率响应曲线进行分析,得到诊断的特征,为牵引变压器的径向变形故障诊断提供参考。

1 模型构建

本文所选取的研究对象为一台型号为 QYS-R-(31500+25000)/220 的卷铁芯变压器,该变压器为组合式 V/X 接线牵引变压器,由 2 台单相双柱三绕组变压器置于同一油箱组成。该变压器的每个芯柱由牵引绕组(T 绕组)、馈电绕组(F 绕组)和高压绕组(H 绕组)构成。本文以其中的 25 MV·A 的单相变压器为研究对象,其主要参数如表 1 所示。

表 1 待研究变压器的主要参数

Table 1 Main parameters of transformer to be studied

绕组	高度/mm	内半径/mm	外半径/mm	段数	匝数
T	1 280	410.0	471.0	70	199
F	1 280	496.0	560.5	70	199
H	1 280	635.5	742.0	82	1 676

收稿日期:2018-06-27;修回日期:2019-04-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577159);四川省科技计划项目(2016JY0004)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577159) and the Science and Technology Program of Sichuan Province(2016JY0004)

1.1 有限元模型

基于牵引变压器的实际结构尺寸和材料特性,在 Ansoft Maxwell 软件中搭建变压器有限元模型,如图 1 所示。由于卷铁芯的横截面非常接近整圆,其截面填充系数可达 0.95~0.96,所以将铁芯截面等效为圆形,不会影响铁芯柱中的磁通分布。由于垫块、纸筒等对电感的计算影响较小,建模时忽略线饼之间的垫块以及线圈之间的绝缘纸筒和撑条。因为卷铁芯叠装方向与叠铁芯不同,将铁芯分为芯柱、铁轭和拐角 3 个部分,每个部分分别设置参考方向不同的磁导率和电导率,以获得最优的磁路。T 绕组和 F 绕组均由 35 个双线饼构成,H 绕组由 41 个双线饼构成。

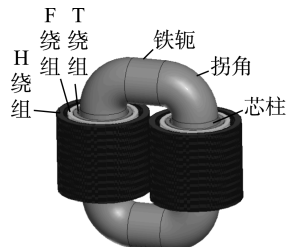


图 1 变压器有限元模型

Fig.1 FEM model of transformer

在 Ansoft Maxwell 软件中利用三维静电场分析,得到绕组的电感矩阵 L 为:

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & M_{12} & \cdots & M_{1n} \\ M_{21} & L_{22} & \cdots & M_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{n1} & M_{n2} & \cdots & L_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, n 为单元数量; L_{ii} 为第 i 个单元的自感, M_{ij} 为第 i 个单元与第 j 个单元之间的互感,自感和互感分别基于式(2)、(3)所示的静电储能原理。

$$L_{ii} = 2W_{ii}/I_i^2 \quad (2)$$

$$M_{ij} = 2W_{ij}/(I_i I_j) \quad (3)$$

其中, W_{ii} 为对第 i 个单元施加电流 I_i 后的磁场储能; W_{ij} 为第 i 个单元与第 j 个单元之间的储能。

求解绕组的电容时,将求解区域的介电常数设为绕组间的等效介电常数。利用三维静电场分析得到绕组间电容 C_{ij} :

$$C_{ij} = 2W_{ij}/U_{ij}^2 \quad (4)$$

其中, U_{ij} 为第 i 个单元与第 j 个单元之间的电势差。

1.2 改进型集总参数电路模型

由于牵引变压器高压绕组有 41 个双线饼,低压绕组只有 35 个双线饼,绕组间的线饼具有明显的不对称性,无法直接利用传统的集总参数电路模型进行建模分析^[3,14]。如果将高压绕组简化为 35 个双线饼,则与实际变压器结构存在较大差异,并且绕组间的耦合关系也会发生改变,所以本文考虑绕组间的交叉电容参数,对传统模型进行改进,建立如图 2 所示的改进型集总参数电路模型对绕组频率响应进行仿真分析。

图 2 所示的电路模型以双线饼为基本单元,由

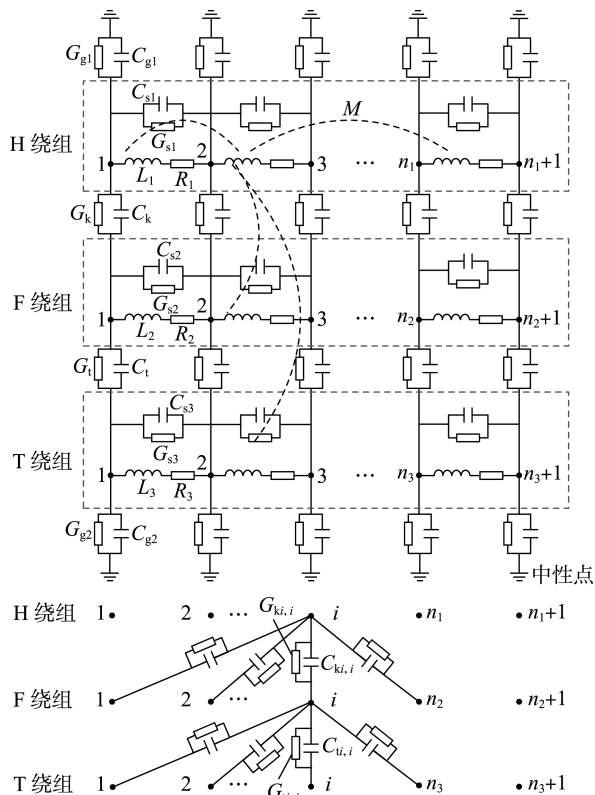


图 2 改进型集总参数电路模型

Fig.2 Improved lumped parameter circuit model

一系列的基本单元组成。图中, L_1 — L_3 为双线饼的自感; M 为双线饼之间的互感; R_1 — R_3 为双线饼的电阻; C_{s1} — C_{s3} 、 G_{s1} — G_{s3} 分别为双线饼的纵向等值电容、电导; C_{g1} 、 G_{g1} 分别为 H 绕组对油箱壁的电容、电导; C_{g2} 、 G_{g2} 分别为 T 绕组对铁芯的电容、电导; $C_{ki,i}$ 、 $G_{ki,i}$ 分别为 H 绕组与 F 绕组的交叉电容、电导; $C_{ti,i}$ 、 $G_{ti,i}$ 分别为 T 绕组与 F 绕组的交叉电容、电导。

1.3 状态空间方程

根据图 2 所示的牵引变压器改进型集总参数电路模型,建立以电感电流和节点电压为状态变量的多端口状态空间方程分别如式(5)和式(6)所示。

$$\mathbf{\Gamma} \mathbf{I} = \mathbf{C} \frac{d\mathbf{V}}{dt} + \mathbf{G} \mathbf{V} \quad (5)$$

$$-\mathbf{\Gamma}^T \mathbf{V} = \mathbf{L} \frac{d\mathbf{I}}{dt} + \mathbf{R} \mathbf{I} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{\Gamma}$ 为系数矩阵,由 1、-1 和 0 组成; $\mathbf{I}$ 和 $\mathbf{V}$ 分别为电感电流向量和节点电压向量; $\mathbf{L}$ 和 $\mathbf{R}$ 分别为电感矩阵和电阻矩阵; $\mathbf{C}$ 和 $\mathbf{G}$ 分别为电容矩阵和电导矩阵,矩阵 $\mathbf{C}$ 可通过式(7)构造得到。

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_H & \mathbf{C}_{HF} & \mathbf{O}_1 \\ \mathbf{C}_{FH} & \mathbf{C}_F & \mathbf{C}_{FT} \\ \mathbf{O}_2 & \mathbf{C}_{TF} & \mathbf{C}_T \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{C}_{HF}$ 为 H 绕组与 F 绕组的全电容矩阵; $\mathbf{C}_{FH}$ 为 $\mathbf{C}_{HF}$ 的转置矩阵; $\mathbf{C}_{FT}$ 为 F 绕组与 T 绕组的全电容矩

阵; C_{TF} 为 C_{FT} 的转置矩阵; O_1 和 O_2 为零的矩阵; C_H 、 C_F 、 C_T 为三对角矩阵,其构造分别如式(8)~(10)所示。

$$C_H = \begin{bmatrix} \ddots & & & & \\ \cdots & -C_{s1} & C_{g1} + 2C_{s1} + \sum_j C_{HF}(i, j) & -C_{s1} & \cdots \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \ddots \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$C_T = \begin{bmatrix} \ddots & & & & \\ \cdots & -C_{s3} & C_{g2} + 2C_{s3} + \sum_j C_{TF}(i, j) & -C_{s3} & \cdots \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \ddots \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$C_F = \begin{bmatrix} \ddots & & & & \\ \cdots & -C_{s2} & 2C_{s2} + \sum_j (C_{FH}(i, j) + C_{FT}(i, j)) & -C_{s2} & \cdots \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \ddots \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, $\sum_j C_{HF}(i, j)$ 表示对 C_{HF} 的第 i 行求和; $\sum_j C_{TF}(i, j)$ 表示对 C_{TF} 的第 i 行求和; $\sum_j (C_{FH}(i, j) + C_{FT}(i, j))$ 表示对 C_{FH} 和 C_{FT} 的第 i 行求和。

当在外部给节点 k 注入一个电压 V_k 时,有:

$$FI = C \frac{dV}{dt} + GV + QV_k \quad (11)$$

$$PV_k - F^T V = L \frac{dI}{dt} + RI \quad (12)$$

其中,矩阵 P 由矩阵 F 去掉第 k 行后的第 k 列元素构成;矩阵 Q 由矩阵 C 和矩阵 G 去掉第 k 行后的第 k 列元素相加再乘以 $j\omega$ (ω 为角频率)构成。

通过式(8)和式(9),可得式(13)。

$$\begin{bmatrix} dV/dt \\ dI/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C^{-1}G & C^{-1}F \\ -LF^T & -L^{-1}R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -C^{-1}Q \\ L^{-1}P \end{bmatrix} V_k \quad (13)$$

对式(13)进行拉普拉斯变换,得到所有节点电压和电感电流相对于施加电压的传递函数 $H(s)$ 如式(14)所示。

$$H(s) = \begin{bmatrix} V(s) \\ I(s) \end{bmatrix} / V_k(s) = \left(sE - \begin{bmatrix} C^{-1}G & C^{-1}F \\ -LF^T & -L^{-1}R \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} -C^{-1}Q \\ L^{-1}P \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中, E 为单位对角矩阵; s 为拉普拉斯算子。

1.4 实验验证

目前,被广泛使用的FRA测量连接方式端电压比、输入导纳、转移电压比^[15]3种。为验证模型的正确性,本文对型号为QYS-R-(31500+25000)/220的牵引变压器的单柱上的3个绕组使用端到端电压

比连接方式分别进行FRA测量,测量接线图如图3所示。入波 T_1 测量 O ,得到T绕组的频率响应曲线;入波 F_1 测量 O ,得到F绕组的频率响应曲线;入波 A 测量 B ,得到H绕组的频率响应曲线。通过式(15)得到输出电压 U_o 与输入电压 U_i 之间的比值与频率 f 的关系曲线。

$$H(f) = 20 \lg \frac{U_o(f)}{U_i(f)} \quad (15)$$

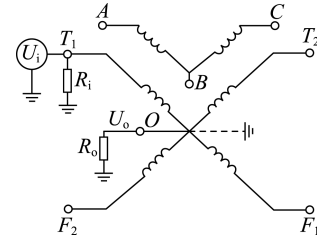
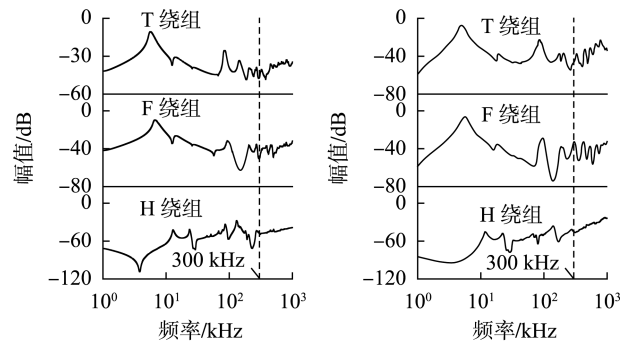


图3 FRA测试接线

Fig.3 Wiring diagram of FRA measurement

图4为牵引变压器3个绕组仿真频率响应曲线与实测曲线的对比图。由图可见,仿真结果与实验结果吻合程度较高,尤其在虚线所示的300 kHz以下的谐振点较为接近。在高频下,频率响应曲线受外部接线及杂散电容的影响较大,并且变压器所建模型与实际结构参数有一定的偏差,所以与实测曲线相比,仿真曲线在谐振频率点会出现漂移和消失的现象。



(a) 仿真结果

(b) 测量结果

图4 不同绕组的频率响应曲线

Fig.4 Frequency response curves of different windings

2 绕组径向变形的FRA

变压器发生短路时,对绕组产生的电磁力将达到正常运行时所承受电磁力的400~900倍,当变压器绕组的径向强度不足以克服电磁力所产生的径向分量的冲击时,绕组就会发生径向变形。附录中的图A1为牵引变压器发生短路故障后的磁场分布图,由图可知,变压器发生短路故障后,漏磁通为主要磁通,磁密几乎只在H绕组和F绕组空道中,这2个绕组间空道的磁场强度最大。由毕奥-沙瓦定律可知,位于磁场中的电流元所受电磁力为:

$$dF = B \times idl \quad (16)$$

变压器绕组中每个双线饼在磁场中的受力情况如图 5 所示,轴向的磁场分量在导体上产生的电力为径向力,径向力使 H 绕组受到向外的拉力,使 T 绕组和 F 绕组受到向内的压力,为了研究这 2 种径向变形对频率响应曲线的影响,以 H 绕组和 T 绕组典型径向变形故障为例,仿真计算了不同故障程度下的绕组电气参数变化以及对应的频率响应曲线。

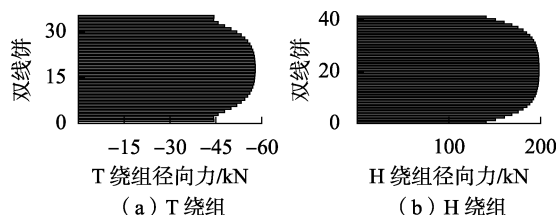


图 5 绕组径向受力图

Fig.5 Radial forces diagram of windings

2.1 T 绕组径向变形故障分析

当 T 绕组受到径向的电磁力时,导体向内发生曲翘变形的方向可能是 1 个或者多个。为了仿真 T 绕组的径向变形故障,设置了 4 种不同程度的曲翘变形,如图 6 所示。

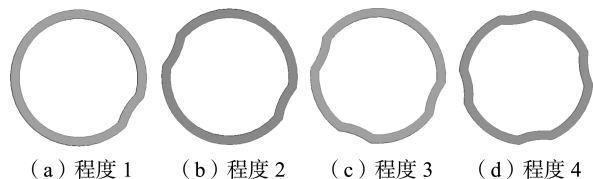


图 6 T 绕组 4 种不同曲翘程度的径向变形

Fig.6 T winding radial deformations of four different degrees

通过有限元仿真计算得到变形后的电气参数,本文着重考虑对地电容、绕组间的耦合电容以及纵向等值电容的变化,如表 2 所示。仿真纵向等值电容时,取 T 绕组的 1 个双线饼为研究对象,以匝为单位进行建模分析,得到不同变形程度下的匝间电容 C_{z3} 以及饼间电容 C_{d3} ,基于能量法计算得到双饼的纵向等值电容 C_{s3} [16] 如式 (17) 所示。

表 2 T 绕组径向变形时的电气参数变化

Table 2 Variation of electrical parameters under T winding radial deformation

电气参数	正常值/pF	参数变化/%			
		程度 1	程度 2	程度 3	程度 4
C_{g2}	21.800 00	2.750	6.56	10.09	12.39
$C_{i1,1}$	70.592 00	-3.860	-7.91	-11.54	-15.64
$C_{i1,2}$	16.210 00	-1.050	-2.47	-3.56	-9.07
$C_{i1,3}$	0.312 54	-3.416	-14.70	-23.28	-32.65
$C_{i1,4}$	0.007 33	-5.330	-13.52	-27.59	-34.87
$C_{i1,5}$	0.000 21	-6.960	-14.59	-23.33	-30.71
C_{z3}	546.130 00	2.440	10.43	15.69	20.15
C_{d3}	783.820 00	0.770	1.37	1.52	1.74
C_{s3}	583.230 00	0.940	2.31	2.99	3.66

$$C_{s3} = \frac{N-2}{N^2} C_{z3} + \frac{2}{3} C_{d3} \quad (17)$$

其中, N 为 1 个双线饼的匝数。

由表 2 可以看出,当 T 绕组发生不同程度的曲翘变形时,T 绕组对铁芯的电容 C_{g2} 会随着故障程度的增加而增大,而 T 绕组与 F 绕组之间的耦合电容会随着故障程度的增加而减小。由于发生变形后,匝间电场畸变较大,且绕组的等效半径发生了变化,所以匝间电容 C_{z3} 的变化程度较大,而饼间电场畸变小,饼间相对面积和距离都没有发生改变,所以饼间电容 C_{d3} 的变化程度小,基本可以忽略;由于 T 绕组的双饼的匝数少, C_{z3} 的增加导致纵向等值电容也增大。

将 T 绕组径向变形后的电气参数代入状态空间方程中,得到不同曲翘程度的频率响应曲线如图 7 所示。由图可知:当频率低于 30 kHz 时,故障频率响应曲线与正常频率响应曲线几乎完全重合,但是在中频段和频段内,故障频率响应曲线与正常频率响应曲线有较大差异,特别是在中频段内差异最为明显;当频率接近 100 kHz 时出现了 1 个明显的特征偏移带。计算特征频率带内的谐振点在不同变形程度下的频率偏移 (IFD) 和幅值偏移 (IAD),如表 3 所示。从表 3 可以看出,IFD 和 IAD 随着 T 绕组径向变形程度的增加而降低,即随着径向变形程度的增大,故障频率响应曲线呈现出向低频方向移动的趋势,并且谐振点的幅值不断增大。

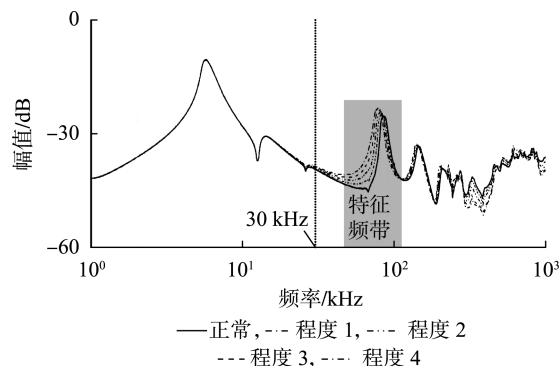


图 7 T 绕组径向变形的频率响应曲线

Fig.7 Frequency response curves of T winding radial deformation

表 3 T 绕组发生径向变形时的谐振点偏移

Table 3 Resonance point deviation under T winding radial deformation

曲翘变形程度	IFD/%	IAD/%
1	-2.728	-2.147
2	-4.725	-3.828
3	-6.034	-6.165
4	-7.963	-8.645

2.2 H 绕组径向变形故障分析

当 H 绕组受到径向的电磁力时,导体会受到向

外的拉应力而发生鼓包变形。为了仿真 H 绕组的径向变形故障,建立了如图 8 所示的径向变形模型,为了保持变形前后长度不变,利用抛物线等效替代变形部分,使得抛物线的长度等于原来圆弧的长度。为衡量向外鼓包变形程度,本文定义

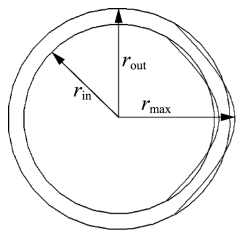


图 8 H 绕组径向变形模型

Fig.8 Model of H winding radial deformation

$$D = \frac{r_1 - r}{r} \times 100\% \quad (18)$$

其中, r 为 H 绕组正常情况下的平均半径, $r = (r_{out} + r_{in})/2$; r_1 为 H 绕组发生鼓包变形时的最大平均半径, $r_1 = (2r_{max} - r_{out} + r_{in})/2$ 。

本文选取 1%、3%、5% 这 3 种故障程度进行分析,通过有限元仿真计算得到变形后的对地电容和绕组间的电容以及纵向等值电容参数如表 4 所示。由表 4 可以看出, H 绕组发生不同程度的鼓包变形时, H 绕组对油箱壁的电容 C_{g1} 和匝间电容 C_{z1} 会随着故障程度的增加而增大,而 H 绕组与 F 绕组之间的耦合电容会随着故障程度的增加而减小,并且由于 H 绕组与 F 绕组的饼数不对称,相邻交叉电容的数值较大。由于 H 绕组的双饼的匝数较多, C_{z1} 的增加对纵向等值电容影响可以忽略。

表 4 H 绕组径向变形时的电气参数

Table 4 Variation of electrical parameters under H winding radial deformation

电气参数	正常值/pF	电气参数变化/%		
		D=1%	D=3%	D=5%
C_{g1}	2.253 00	1.390	2.490	6.550
$C_{k1,1}$	13.082 00	-3.440	-5.750	-5.890
$C_{k1,2}$	6.532 00	-2.410	-4.720	-11.510
$C_{k1,3}$	2.002 30	-3.734	-12.735	-18.912
$C_{k1,4}$	0.415 17	-5.824	-14.452	-22.183
$C_{k1,5}$	0.101 51	-5.256	-17.491	-26.601
C_{z1}	721.590 00	0.725	2.223	5.737
C_{d1}	2 159.210 00	0.123	0.270	0.445
C_{s1}	1 423.070 00	0.116	0.263	0.384

H 绕组发生不同程度的径向变形时的频率响应曲线如图 9 所示。由图 9 可知, H 绕组发生径向变形时,故障频率响应曲线与正常频率响应曲线在 10 kHz 及以下的频带基本重合,但是故障情况对中低频段的频率响应曲线有较大影响。在 10~30 kHz 的频段内,出现了一个明显的特征频率偏移带,在该特征频带内,3 个谐振点呈现出明显的偏移现象。计算 15 kHz 附近的谐振点在不同变形程度下的 IFD 和 IAD,如表 5 所示。从表 5 可以看出, IFD 和 IAD 随着 H 绕组径向变形故障程度的增加而减小,即随着 H 绕组径向变形程度的增加,频率响应曲线呈现

出向低频方向移动的趋势,并且谐振点的幅值不断增大。

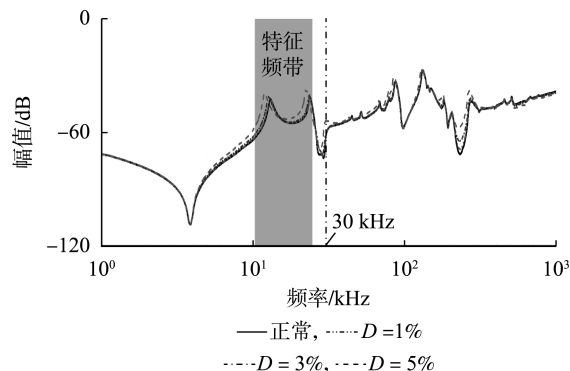


图 9 H 绕组径向变形的频率响应曲线

Fig.9 Frequency response curve of H winding radial Deformation

表 5 T 绕组发生径向变形时的谐振点偏移

Table 5 Resonance point deviation under H winding radial deformation

D/%	IFD/%	IAD/%
1	-1.373	-0.822
3	-2.728	-3.063
5	-8.597	-6.896

3 结论

本文基于改进型集总参数电路模型,对牵引变压器绕组发生不同径向变形,进行了频率响应仿真分析,得出的主要结论如下。

(1)牵引变压器 3 个绕组的仿真曲线与实测曲线吻合程度较高,验证了所建模型的正确性。基于该模型,能够对牵引变压器绕组发生径向变形时频率响应特性的变化进行有效的分析。

(2)径向变形对饼间电容的影响较小,但是匝间电容会随着径向变形故障程度的增加而增大。低压绕组发生径向变形时,由于其双饼匝数较少,需要考虑纵向等值电容的变化,而计算高压绕组时,可以忽略纵向等值电容的变化。

(3)牵引变压器 T 绕组和 H 绕组发生不同径向变形时,特征诊断频带不同,但在各自的特征频带内频率响应曲线呈现相同的变化规律,即随着故障程度的增加,频率响应曲线向低频方向移动,并且幅值不断增大。

附录见本刊网络版 (<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] DAI Chenxi, LIU Zhigang, HU Keting, et al. Fault diagnosis approach of traction transformers in high-speed railway combining kernel principal component analysis with random forest[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2016, 6(3): 202-206.
- [2] 李莉,朱永利,宋亚奇. 变压器绕组多故障条件下的振动信号特征提取[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 140-146.

- LI Li, ZHU Yongli, SONG Yaqi. Feature extraction for vibration signal of transformer winding with multiple faults[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 140-146.
- [3] 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.
- [4] 张博, 李岩. 多次冲击条件下的大型变压器绕组辐向失稳[J]. 电工技术学报, 2017, 32(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(2): 71-76.
- [5] 郑含博, 翟进乾, 李哲, 等. 大型电力变压器内绕组辐向抗短路能力评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 154-158.
- ZHENG Hanbo, ZHAI Jinqian, LI Zhe, et al. An assessment of ability to withstand radial short circuit of large power transformer inner windings[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 154-158.
- [6] 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.
- [7] HOLDYK A, GUSTAVSEN B, ARANA I, et al. Wideband modeling of power transformers using commercial sFRA equipment[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(3): 1446-1453.
- [8] 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.
- [9] PHAM D, PHAM T, BORSI H, et al. A new diagnostic method to support standard frequency response analysis assessments for diagnostics of transformer winding mechanical failures[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2014, 30(2): 34-41.
- [10] LIN Huan, ZHANG Ziwei, TANG Wenhui, et al. Equivalent gradient area based fault interpretation for transformer winding using binary morphology[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1947-1956.
- [11] LUDWIKOWSKI K, SIODLA K, ZIOMEK W. Investigation of transformer model winding deformation using sweep frequency response analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(6): 1957-1961.
- [12] ZHANG Ziwei, TANG Wenhui, JI Tianyao, et al. Finite-element modeling for analysis of radial deformations within transformer windings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2297-2305.
- [13] YOUSOF M F M, EKANAYAKE C, SAHA T K. Frequency response analysis to investigate deformation of transformer winding[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(4): 2359-2367.
- [14] HASHEMNIA N, ABU-SIADA 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.
- [15] JAYASINGHE J A S B, WANG Zhongdong, JARMAN P N, et al. Winding movement in power transformers; a comparison of FRA measurement connection methods[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(6): 1342-1349.
- [16] 张嘉祥. 变压器线圈波过程[M]. 北京: 水利水电出版社, 1982: 252-268.

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);

李威(1993—),男,湖南益阳人,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。

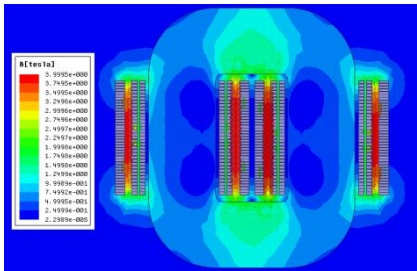
Improved FRA modeling and radial deformation fault analysis of traction transformer windings

ZHOU Lijun, LI Wei, JIANG Junfei, GAO Shibin, YAN Jinghe

(College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: Taking a QYS-R-(31500+25000)/220 traction transformer as the research object, an improved frequency response model based on lumped parameter circuit considering full capacitance parameters of windings is proposed. The correctness of the proposed model is verified by comparing with the measured curves. Then two kinds of radial deformation faults, i.e. inward warpage deformation and outward drum deformation, are respectively simulated for the traction winding and the high voltage winding of transformer. The influence of different deformation faults on capacitance parameters is mainly analyzed. The results show that when the traction winding and high voltage winding have radial deformation faults, their characteristic diagnostic frequency bands are different, but in their respective characteristic frequency bands, the changes of frequency response curves are the same, that is, with the increase of the fault degree, the frequency response curves move towards low frequency, and the amplitude increases.

Key words: traction transformer; lumped parameter; frequency response analysis; radial deformation; capacitance



图A1 变压器低压侧发生短路故障时磁场分布图
Fig.A1 Magnetic flux density distribution in short-circuit fault of transformer