

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.02.026

变压器绕组变形与等效电参数变化对应关系研究

毛辰¹, 吴经锋¹, 段玮¹, 韩彦华¹, 张璐¹, 刘强¹, 王曙鸿²,
王爽², 张海军², 王松², 郭泽²,

(1. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 西安 710100; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 变压器绕组变形与等效电参数变化的对应关系对变压器绕组变形诊断精度有重要影响。通过建立变压器绕组等效电路模型,得到了绕组结构与等效电参数之间的对应关系。在此基础上,以某变压器为例,运用电磁—结构耦合有限元方法,根据弹塑性力学原理,计算了变压器绕组在短路电磁力作用下发生的塑性变形状态、应力分布及绕组的轴向和辐向位移;然后,运用能量法计算得到了不同类型和程度的绕组变形与绕组等效电路电参数之间的对应关系。研究结果可以为从等效电路参数变化的角度诊断变压器绕组变形状态提供依据,从而提高变压器绕组变形诊断精度。

关键词: 变压器; 绕组; 变形; 等效电参数; 对应关系

Research of Corresponding Relationship Between Transformer Winding Deformation and Variation of Equivalent Electrical Parameters

MAO Chen¹, WU Jingfeng¹, DUAN Wei¹, HAN Yanhua¹, ZHANG Lu¹, LIU Qiang¹, WANG Shuhong², WANG Shuang², ZHANG Haijun², WANG Song², GUO Ze²

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710100, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The corresponding relationship between the transformer winding deformation and the variation equivalent electrical parameters has important influence on the accuracy of diagnosis of transformer winding deformation. The corresponding relationship between the winding structure and the equivalent electrical parameters is obtained by establishing the equivalent circuit model of transformer winding. On this basis, one transformer is taken as an example and the plastic deformation state, stress and the axial and radial displacement of the transformer winding under the action of short circuit electromagnetic force are calculated respectively using the electromagnetic-structure coupled finite element method, according to the elastic-plastic mechanics principle. The energy method is used to calculate the winding equivalent circuit electrical parameters of the different type and level of winding deformation, and thus the corresponding relationship between the different type and level of winding deformation and winding equivalent circuit electrical parameters is achieved. The research results can provide reference for diagnosis of deformation state of transformer winding based on the change of equivalent circuit parameters, so as to improve the diagnostic accuracy of transformer winding deformation.

Key words: transformer; windings; deformation; equivalent electrical parameters; corresponding relationship

0 引言

变压器在运行中不可避免地会遭受各种短路电流的冲击,短路电流产生的短路电磁力是导致变

压器绕组变形和位移的主要原因。虽然轻微的绕组变形,变压器仍能正常工作,但变形后其抗短路能力会受到严重影响,再次发生短路时,有可能造成绕组屈曲、失稳、垮塌等严重事故^[1-2]。因此对变压器绕组变形程度、变形位置进行准确检测,及时

掌握变压器内部绕组的健康状态,尽早发现变压器故障隐患和实现变压器状态检修显得尤为重要。在变压器绕组变形检测方法中,频率响应分析(简称FRA)法是目前应用最为广泛的方法之一^[3-6]。该方法的基本原理为绕组变形或发生位移后将导致其阻抗发生变化,进而使FRA曲线的特征发生变化^[7-9]。由于目前对变压器绕组变形与等效电参数的对应关系没有完全研究清楚,缺乏根据绕组变形前后FRA曲线特征的变化对绕组变形进行量化分析的导则,使得该方法所能达到的检测效果受到了限制。

针对变压器故障类型与等效电参数对应关系问题,已有国内外学者通过实验或仿真进行了部分研究,并获得了一些重要成果:特别是文[10-12]通过大量的试验总结了变压器故障类型与等效模型参数变化的关系,研究结果表明线圈变形、局部击穿会引起漏电感发生变化,线圈位移、机械力扭曲将导致一次侧和二次侧几何电容发生变化,线圈短路折断、局部放电将导致电阻 R 发生变化。文[13]也对变压器绕组类型与等效参数关系问题进行了研究,得到了绕组变形和局部击穿将导致绕组电感发生变化,绕组对地电容主要受绕组位移和机械扭曲的影响较大,绕组绝缘老化主要影响绕组纵向电容的大小。当变压器发生绕组变形、移位或扭曲故障时,主要是绕组电感 L 和对地电容 C 发生变化;并从绕组频率响应中辨识模型等效电参数来诊断变形故障,尤其是大致估计到绕组故障的部位。文[12, 14-15]持续对绕组变形类型在等值电路中的等效问题进行了深入研究。得出:变压器绕组线饼变形、铁芯变形、短路故障会引起电感参数变化;线饼位移、弯曲变形、预紧力不足等故障会引起纵向电容参数的变化。此外,文[16-17]对变压器绕组变形类型与等效参数变化之间的对应关系进行了细化研究,精细到线饼的位移与变形故障。变压器绕组辐向变形可以通过对地等效电容参数进行模拟,而可以忽略电感的影响。文[18-19]给出了单相变压器绕组不同辐向变形程度对应的电容参数变化。主要是针对绕组整体变形和集中参数进行的分析,没有考虑绕组局部变形,并且没有考虑绕组变形对纵向电容参数变化的影响。

尽管各国学者对绕组变形引起等效电参数变化的规律问题进行了广泛探讨,并对某些典型对应关系进行了研究,但大部分仍属于定性的范畴,而无法定量地描述变压器绕组变形状态如变形位置、变形程度等对参数变化状态的影响。为此有必要

对变压器绕组变形类型与等效电参数的对应关系进行定量研究^[20-21],为建立绕组变形诊断判据提供依据,在此基础上,若从测量的绕组频率响应偏差数据中求解出电参数的变化状态,则可以更加准确地估计绕组变形状态,从而提高变压器绕组变形诊断精度,具有重要的理论意义和实际应用价值。

1 绕组等效电路参数计算

1.1 绕组等效电路模型

将变压器铁心、绕组导体和绝缘介质部件等效为相应的等效分布电参数,如等效接地端、电阻、电感(自感和互感)和电容(饼间电容和对地电容),建立变压器绕组的等效电路模型。当变压器绕组某些线饼发生变形或位移后,与这些线饼对应的等效电感 L 、电容参数 C 等将发生变化。

变压器绕组等效电路模型见图1。忽略电导的影响。图1中变压器绕组等效模型的高压绕组和低压绕组各有10个线饼单元($n=10$)。以高压绕组线饼为例,每个线饼的等效单元由电阻参数(R_H)、电感参数 L_{hs} 、互感参数 M_{ij} 和 $M_{i:j}$,纵向电容参数 C_{sh} 、对地电容参数 C_{gh} 以及与低压绕组间的电容参数 C_{ih} 构成。其中,对地电容 C_{gh} 表示高压绕组对铁心之间的电容, C_{gl} 表示低压绕组对铁芯之间的电容。

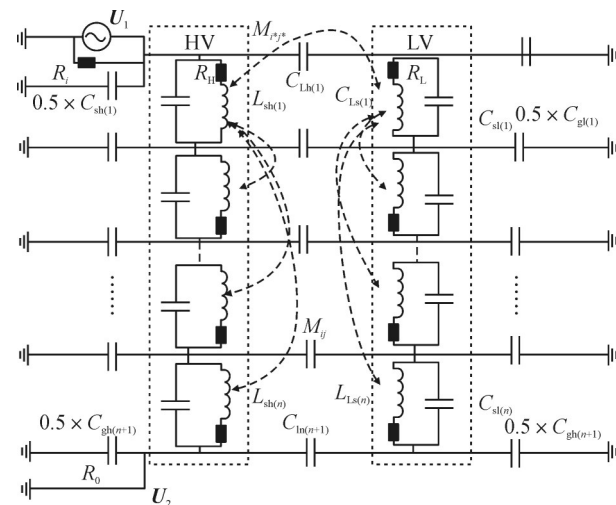


图1 变压器绕组等效电路模型

Fig. 1 Equivalent circuit model of transformer windings

1.1 绕组等效电参数计算方法

在MAXWELL软件中,建立变压器绕组三维模型,见图2。运用能量法计算绕组等效电路中的电容和电感矩阵,从而得到对应变压器绕组模型对应的电参数值。两个导体之间电容储存的电场能量为

$$W_{ij} = \frac{1}{2} \int_{\Omega} D_i \times E_j \cdot d\Omega \quad (1)$$

式(1)中: W_{ij} 为电场中的能量; D_i 为与导体 i 的电通密度; E_j 为与导体 j 的磁场强度。

导体 i 和导体 j 之间的电容为

$$C = \frac{2W_{ij}}{U^2} = \frac{1}{2} \int_{\Omega} D_i \times E_j \cdot d\Omega \quad (2)$$

平均磁场能量为

$$W_{AV} = \frac{1}{4} \int_V B \times H dV \quad (3)$$

式(3)中: B 为磁通密度; V 为导体的体积。根据平均磁场能量 W_{AV} 和峰值电流 I_{peak} , 可用式(4)计算出电感。

$$L = \frac{4W_{AV}}{I_{peak}^2} \quad (4)$$

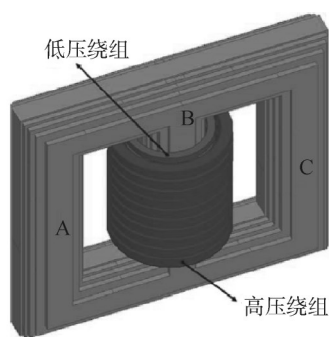


图2 变压器三维模型

Fig. 2 Three dimensional model of the transformer

2 变压器绕组变形计算

2.1 绕组变形形式

绕组在受到短路电磁力作用在内部产生复杂的机械应力分布。绕组在受到不同大小的应力作用时可能发生两种变形, 即弹性变形和塑性变形, 当绕组内部应力值超过导体材料(如铜或铝)的屈服强度时, 就会出现不可恢复的塑性变形, 这种变形是永久变形, 反之将发生弹性变形, 绕组的弹性变形将随着所受荷载消失而恢复到原来的状态。

由于变压器绕组出现的塑性变形状态一般比较复杂, 通常表现为不规则的几何形状。文中选取典型的绕组变形状态进行等效电参数计算。不同的绕组辐向变形见图3。图3(a)为绕组无辐向变形, 即正常绕组; 图3(b)为高压绕组鼓包变形; 图3(c)为低压绕组受撑条约束作用下的凹陷变形; 图3(d)为低压绕组无撑条约束下的局部鼓包变形。几种典型的绕组轴向变形见图4。图4(a)为正常绕组; 图4(b)为轴向垮塌; 图4(c)为轴向弯曲或位移。图3、4中: RD 表示辐向变形量; AD 表示轴向变形量。

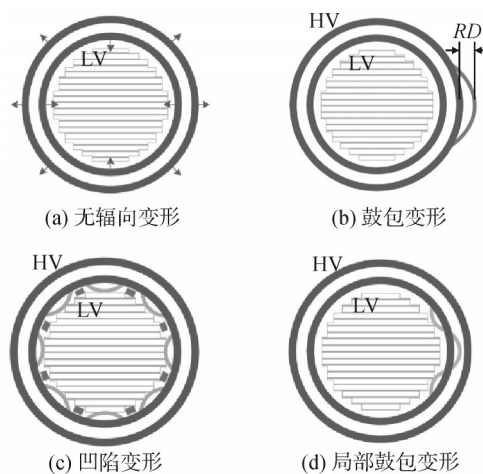
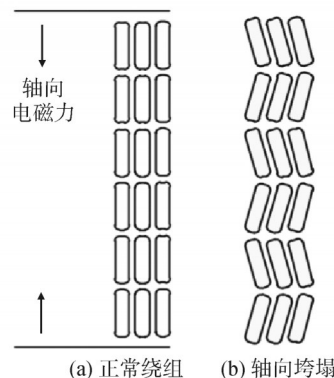
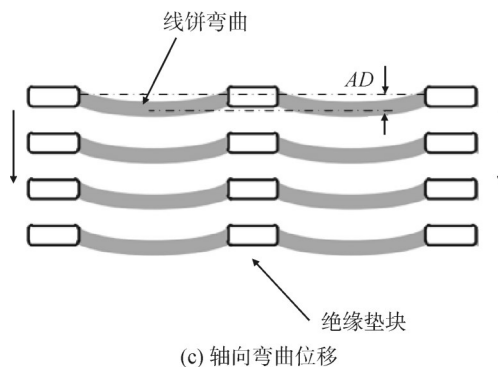


图3 绕组辐向变形形式

Fig. 3 Radial deformation of windings



(a) 正常绕组 (b) 轴向垮塌



(c) 轴向弯曲位移

图4 绕组轴向变形和位移

Fig. 4 Axial deformation and displacement of windings

2.2 绕组变形力学计算模型

变压器复杂的绕组结构增加了对变压器内部漏磁场和绕组受力状态计算的难度。当系统出现短路故障时, 尤其是变压器出口短路故障, 绕组承受的短路电流峰值可能为原来的十几倍甚至几十倍(几万安), 由此而产生的短路电磁力也会增加数百倍。根据洛伦兹力原理可以分别计算得到轴向电磁力和辐向电磁力分量。短路电磁力的表达式见式(5)。可见短路电磁力的动态变化频率为短路电流频率的两倍, 即为 100 Hz。

$$F(t) = \frac{1}{4} f_{im} (e^{-2at} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\omega t - 2e^{-at} \cos \omega t) \quad (5)$$

式(5)中: f_{im} 为电磁力峰值; a 为时间常数,与变压器短路电阻和电感值有关。

绕组中的铜导体是典型的塑性材料,文[22]研究了变压器中绕组铜材料的机械力学特性。常用铜导线的应力—应变关系曲线见图5。

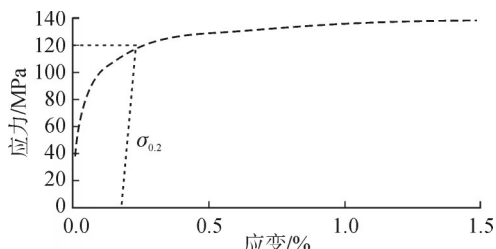


图5 铜导线应力—应变关系

Fig. 5 Stress-strain relationship of copper wire

基于弹塑性力学原理,通过三维磁耦合分析,确定绕组总的塑性应变量与短路冲击强度的定量关系。通过求解平衡微分方程组计算绕组内部的应力状态,三维应力—应变方程^[23]为

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + F_x = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + F_y = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 σ_{xy} 、 σ_{yz} 、 σ_{xz} 分别为绕组导体内部某点的应力状态分量; F_x 、 F_y 和 F_z 分别为电磁力的各个分量。

2.3 绕组变形力学计算实例

运用 Maxwell 和 Ansys 软件,建立了变压器绕组三维模型,高、低压绕组及绝缘垫块、撑条的结构图见图6。高、低压绕组匝数分别为141匝和938匝,低压绕组内径和外径分别为276 mm、334 mm,高压绕组内径和外径分别为371 mm、457 mm,铜导线的弹性模量为115 GPa,泊松比为0.33,垫块的弹性模量取8 GPa,泊松比为0.25。

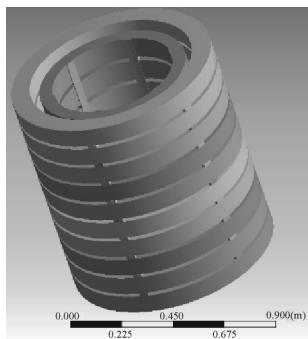


图6 变压器绕组三维模型

Fig. 6 Three dimensional model of transformer windings

变压器绕组轴向鼓包变形见图7。变压器低压绕组线饼塑性变形计算得到的弯曲变形和局部鼓包变形分别见图8、9。沿圆周由垫块支撑的饼式绕组,轴向电动力达到一定程度时,垫块间的导线作为受力的梁,因弯矩过大而产生永久变形,这种变形通常沿圆周是对称的,如图8所示。

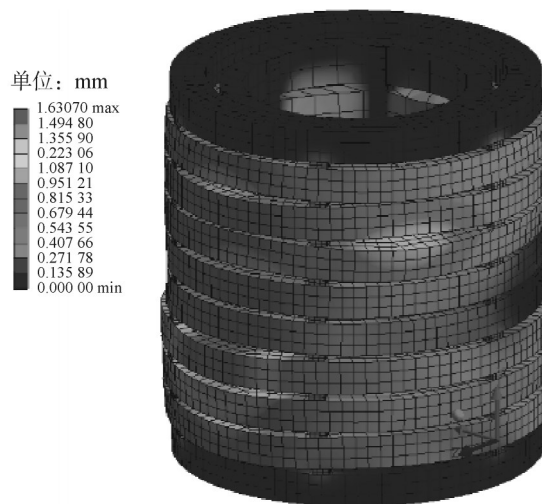


图7 绕组鼓包变形

Fig. 7 Winding bulging deformation

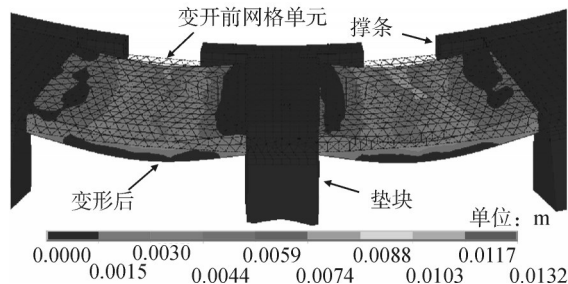


图8 轴向弯曲变形

Fig. 8 Axial bending deformation

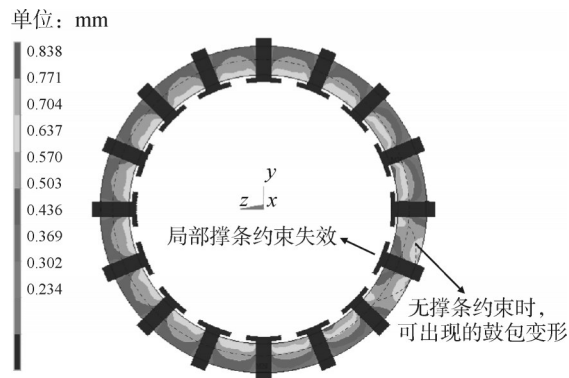


图9 单线饼局部鼓包变形

Fig. 9 Local bulging deformation of single disk

辐向电动力作用于内绕组时,导线受到压应力。绕组内壁是由撑条支撑的,压应力达到一定程度时,两撑条间的导线作为受力的梁,因弯矩过大而发生弯曲变形,如图9所示,低压绕组受到向内的压缩力作用,部分撑条失效导致绕组线饼出现局部

鼓包变形。

3 绕组变形与电参数的对应关系

通过电磁—结构耦合分析模型计算了不同绕组变形类型、不同变形程度对应的等效电参数变化,在对大量数据进行分析和提炼的基础上,得到了绕组变形状态与等效电参数的定量对应关系,见图10。电感的和电容参数的变化量均可根据式(7)计算^[20-21]。

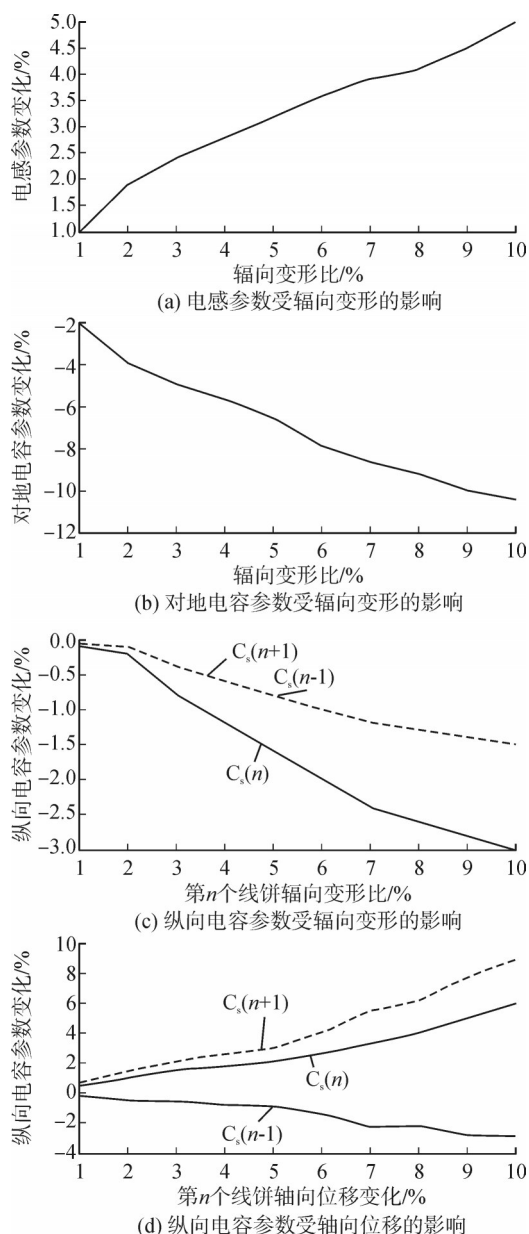


图10 绕组变形或位移对电参数变化的影响

Fig. 10 Influence of windings deformation or displacement on electrical parameters

$$\Delta x = \frac{x_1 - x_2}{x_1} \times 100\% \quad (7)$$

式(7)中: Δx 为电感或电容参数的变化量; x_1 、 x_2

分别为绕组变形前、后的电感或电容值。

如图10(a)、(b)、(c)所示,绕组发生辐向变形后,电感参数、对地电容、纵向电容都发生了变化,辐向变形增大,电感参数变化和对地电容参数变化均增大,辐向变形对对地电容参数的变化影响比较大。如图10(d)所示,绕组线饼轴向位移对纵向电容变化的影响比较大。此外,绕组线饼的变形状态对与之相邻的线饼单元的等效电参数变化也有微小影响,尤其是对纵向电容参数的影响比较明显,如图10(c)所示。量化的绕组变形与电参数变化对应关系数据,为从电路参数变化的角度诊断变压器绕组变形状态研究提供了依据。

4 结语

通过建立变压器绕组等效电路模型,得到了绕组结构与等效电参数之间的对应关系。在此基础上,以某变压器模型为例,运用电磁—结构耦合有限元方法,根据弹塑性力学原理,计算了变压器绕组在短路电磁力作用下发生的塑性变形状态、应力及位移分布,分别得到了绕组的轴向和辐向位移,据此,运用能量法计算得到了不同类型和程度的绕组变形与绕组等效电路电参数之间的对应关系。结果显示:绕组出现变形或位移后,辐向变形对对地电容参数的变化影响比较大,而轴向位移对纵向电容变化的影响比较大。绕组线饼的变形状态对与之相邻的线饼单元的等效电参数变化也有微小影响,尤其是对纵向电容参数的影响比较明显。绕组变形与电参数变化对应关系数据结果可以为从电路参数变化的角度诊断变压器绕组变形状态研究提供依据,从而提高变压器绕组变形诊断精度。

参考文献:

- [1] 闫振华, 马波, 马飞越, 等. 220 kV 电力变压器短路动力学性能分析[J]. 高压电器, 2014, 50(3): 79-87.
YAN Zhenhua, MA Bo, MA Feiyue, et al. Dynamic performance analysis of winding for 220 kV power transformer with short circuit[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(3): 79-87.
- [2] 高树国, 张 扬, 陈志勇, 等. 一起220 kV 变压器绕组短路损坏事故分析[J]. 高压电器, 2012, 48(4): 115-118.
GAO Shuguo, ZHANG Yang, CHEN Zhiyong, et al. Analysis of a 220 kV transformer windings breakage fault caused by short-circuit [J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(4): 115-118.
- [3] 曹小龙, 胡春梅, 曹小虎, 等. 变压器频率响应法测试结果

- 的影响因素分析及改善[J]. 高压电器, 2012, 48(7): 81-87.
- CAO Xiaolong, HU Chunmei, CAO Xiaohu, et al. Influencing factors on deformation diagnosis of transformer windings[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(7): 81-87.
- [4] 秦家远, 刘兴文, 申积良. 电力变压器频率响应分析法综述[J]. 湖南电力, 2009, 29(4): 60-62.
- QIN Jiayuan, LIU Xingwen, SHEN Jiliang. Power transformer frequency response analysis method[J]. Hunan Electric Power, 2009, 29(4): 60-62.
- [5] RYDER S A. Diagnosing transformer faults using frequency response analysis[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, 19(2): 16-22.
- [6] 电力变压器绕组变形频率响应分析法: DL/T 911—2004 [S]. 2005.
- Frequency response analysis on winding deformation of power transformers: DL/T 911—2004[S]. 2005.
- [7] 张 鑫. 基于频响法的变压器绕组变形专家诊断系统[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- ZHANG Xin. The expert diagnosis system of transformer winding deformation based on frequency response method [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [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] 武剑利. 频响分析法检测变压器绕组变形的理论研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- WU Jianli. Study on frequency response analysis method in diagnosing transformer winding deformation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.
- [10] ISLAM S M, COATES K M, LEDWICH G. Identification of high frequency transformer equivalent circuit using Matlab from frequency domain data[C]//IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. New Orleans: IEEE, 1997: 357-364.
- [11] ISLAM S, LEDWICH G. Locating transformer faults through sensitivity analysis of high frequency modeling using transfer function approach[C]//IEEE International Conference Record of the Symposium on Electrical Insulation. Montreal, Canada: IEEE, 1996: 38-41.
- [12] ISLAM S. Detection of shorted turns and winding movements in large power transformers using frequency response analysis[C]//IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Singapore: IEEE, 2000: 2233-2238.
- [13] 朱明林. 频响分析法及其模型辨识检测和诊断变压器绕组变形的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2001.
- ZHU Minglin. Research on detection and diagnosis of transformer winding deformation using frequency response analysis method and its model identification[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, Doctoral Dissertation, 2001.
- [14] ABU-SIADA A, HASHEMNIA N, ISLAM S. Understanding power transformer frequency response analysis signatures[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2013, 29(3): 48-56.
- [15] ABU-SIADA A, ISLAM S. A novel online technique to detect power transformer winding faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27 (1): 849-857.
- [16] 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 (1): 2705-2717.
- [17] RAHIMPOUR E, JABBARI M, TENBOHLEN S. Mathematical comparison methods to assess transfer functions of transformers to detect different types of mechanical faults [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 2544-2555.
- [18] WANG M, JOHN A, SRIVASTAVA K. Improved detection of power transformer winding movement by extending the FRA high frequency range[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 1930-1938.
- [19] CHRISTIAN J, FESER K. Procedures for detecting winding displacements in power transformers by the transfer function method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 214-220.
- [20] HASHEMNIA N, ABU-SIADA 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.
- [21] 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.
- [22] ROBERT J C, SELWYN P. Mechanical properties of copper in relation to power-transformer design[J]. Power Engineering, 1987, 1(3): 154-157.
- [23] Ansys, Inc.. Ansys mechanical APDL and mechanical applications theory reference[H]. [S.l.]: Ansys Theoretical Analysis Manual, Release 13.0, 2010.
- 毛 辰(1983—), 男, 工程师, 工程硕士, 长期从事高电压绝缘的试验与监测研究。