

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209548

非晶合金变压器铁心碎片产生机理及 对绝缘影响的研究*

柳佳雯

(三峡大学国际文化交流学院 宜昌 443000)

摘要: 针对非晶合金变压器运行时铁心产生碎片引起绝缘故障的现象,通过电磁-结构多场耦合计算理论和静电场计算理论,建立非晶合金变压器三维模型,计算不同工况下非晶合金变压器铁心的形变。计算结果表明负载电流越大,导致铁心的形变越大,铁心形变超过非晶合金材料碎裂极限后将有碎片产生。尤其在单相短路工况下,铁心产生大幅度形变引起大量碎片形成。通过计算主绝缘结构中存在碎片引起的电场畸变,得出了不同尺寸、数量以及碎片与绕组所成不同角度对电场畸变幅度的影响规律,从而得出铁心振动产生的碎片对绝缘存在影响的结论。

关键词: 非晶合金变压器;铁心形变;非晶合金碎片;电场畸变;绝缘故障

中图分类号: TM301 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4014

The mechanism of amorphous alloy core debris generation and the influence on insulation

Liu Jiawen

(College of International Exchange and Cooperation, Three Gorges University, Yichang 443000, China)

Abstract: To deal with the insulation fault caused by debris produced by amorphous alloy core, firstly, the amorphous alloy transformer 3-D model was established, then the deformation of the core was calculated, the results demonstrated that bigger load current caused bigger vibration displacement. The debris is produced when vibration displacement exceeds the ultimate strength of amorphous alloy. Particularly, when the short circuit occurs, lots of debris was produced due to significantly vibration displacement. Then electric field distribution when debris exists was calculated, the impact of different size, quantity and the angle between debris and windings on electric field distribution were also obtained, And it is concluded that the debris generated by the iron core vibration has an influence on the insulation.

Keywords: amorphous alloy transformer; deformation of the core; amorphous alloy debris; electric field distortion; insulation fault

0 引 言

非晶合金变压器的铁心采用新型材料非晶合金带材卷制而成,能显著降低空载损耗,因而非晶合金变压器正逐渐取代传统 S 系列配电变压器^[1]。但非晶合金材料具有高硬度、对机械应力灵敏、冲击强度差、断裂极限小等特性^[2],导致非晶合金铁心容易发生断裂,从而引起非晶合金铁心产生非晶碎片落入到绝缘油中,金属性质的碎片会引起电场的畸变,当畸变的数值超过位置的放电起始场强,就会引起局部放电,导致变压器的绝缘故障^[3-4]。

非晶合金变压器在运行过程由于非晶合金材料磁致伸

缩效应引起铁心振动^[5]。目前相关文献主要涉及非晶合金材料的磁致伸缩效应以及非晶合金铁心振动研究方面,对于磁致伸缩引起的振动,国内外学者大多采用的是磁-机械耦合方法进行数值计算,主要是通过磁导率计算磁致伸缩力^[6-7]。芬兰学者 Fonteyn 等在此虚位移法基础上提出了磁-机械耦合模型。比利时学者 Delaere 等、沈阳工业大学韩雪岩等、河北工业大学祝丽花等、中科院杨毅等在弹性力学方法的基础上提出了铁芯磁-机械耦合模型,采用有限元方法来计算,通过建立非晶合金永磁电机磁-结构耦合模型,计算了电磁力与磁致伸缩力对非晶合金铁心振动的影响,但是变压器与永磁电机的结构以及铁心受力方式存在

收稿日期:2022-04-10

* 基金项目:国家自然科学基金(52007103)项目资助

较大差异^[8-13]。文献[14]提出了一种基于磁致伸缩理论压磁方程构建的非晶合金铁芯振动解析模型,实验测试了不用加工工艺下非晶合金铁芯的磁化特性,给出了几种确定非晶合金铁芯振动计算修正系数的方法。文献[15]指出非晶合金的材料磁致伸缩率与外界作用力及生产工艺紧密相关。

非晶合金材料对应力敏感,且磁致伸缩应变相对于传统硅钢片要高 10% 左右,说明非晶合金变压器在运行过程中由于磁通变化更易引起铁心形变。通过建立非晶合金变压器模型,计算变压器的在共振频率附近的振幅,并提出一些抑制振动的措施,但实际运行工况下由于负载电流不断变化,仍然需要对不同负载系数下铁心的振动进行分析。通过传统的环样法和单片法两种检测方法对非晶合金带材的磁性进行了测量和分析,通过实验验证,给出了环样法测试能够得到试样的平均值,波动小,性能较为稳定,但环行试样制作过程繁冗,局部差异难以体现,磁路长度易受环行试样的内外半径比值的影响;单片法相比于环样法,其试样制作简单,通过对试样任意部位的测试分析,更易反应试样的局部差异,测试结果较环样法更为准确;文献给出环样法的测试结果更贴合实际卷铁芯,单片法适合大批量局部测试。因此针对变压器铁心振动仍需进一步研究。

针对非晶合金变压器在运行过程中由于碎片引起的绝缘故障^[16],本文基于电磁-结构耦合原理,计算不同情况下磁致伸缩引起铁心形变,结合非晶合金材料的断裂特性,判断该种情况碎片能否产生以及产生部位,依据静电场的计算方法,在非晶合金变压器绝缘油道中加入碎片计算碎片所引起的电场畸变,进而分析碎片不同数量、尺寸、位置引起电场畸变的规律,以期得出不同尺寸,数量以及碎片与绕组所成不同角度对电场畸变幅度的影响规律。

1 电磁-结构多场耦合及静电场计算理论

1.1 电磁-结构多场计算理论

在非晶合金变压器运行过程中,受到力的作用与铁心的磁通密度大小紧密相关,因此需要变压器铁心的磁通进行求解计算,依据麦克斯韦方程组,非晶合金变压器铁心磁感应强度控制方程如式(1)、(2)所示。

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_s - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (2)$$

式中: μ 表示非晶合金材料的磁导率; \mathbf{A} 表示矢量磁位; \mathbf{J}_s 表示电流密度; σ 表示电导率; \mathbf{B} 表示磁感应强度。

磁致伸缩力与非晶合金材料的振动位移通过材料的磁通相关,因此需要考虑电磁-结构场耦合关系,由于磁致伸缩力与压电效应作用原理相似,因此根据压电方程式(3),列出可以压磁方程如式(4)所示。

$$\begin{cases} \Delta \boldsymbol{\sigma} = c^E \Delta \boldsymbol{\varepsilon} + e^T \Delta \mathbf{E} \\ \Delta \mathbf{D} = e \Delta \boldsymbol{\varepsilon} + k^s \Delta \mathbf{E} \end{cases} \quad (3)$$

其中: c^E 为弹性系数; e 为压电系数; k^s 为介电常数。

$$\begin{cases} \Delta \boldsymbol{\sigma} = c^H \Delta \boldsymbol{\varepsilon} + h^T \Delta \mathbf{H} \\ \Delta \mathbf{B} = h \Delta \boldsymbol{\varepsilon} + \mu^s \Delta \mathbf{H} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}$, $\Delta \boldsymbol{\sigma}$, $\Delta \mathbf{H}$, $\Delta \mathbf{B}$, h , c^E 和 μ^s 分别表示应变、应力、磁场强度、磁通密度的变化量、压磁系数、弹性系数和磁导率。从形式上看,就是电学量与磁学量的等效:

$$\begin{cases} c^H \Leftrightarrow c^E \\ h \Leftrightarrow e \\ \mu^s \Leftrightarrow k^s \end{cases} \quad (5)$$

因此,电磁-结构场耦合作用控制方程如式(6)所示。

$$\begin{bmatrix} [\mathbf{M}] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\ddot{\mathbf{U}}] \\ [\ddot{\mathbf{A}}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{C}] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\dot{\mathbf{U}}] \\ [\dot{\mathbf{A}}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{K}] & [\mathbf{K}^m] \\ [\mathbf{K}^m]^T & [\mathbf{K}^h] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\mathbf{U}] \\ [\mathbf{A}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{F}] \\ [\boldsymbol{\Phi}] \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $[\mathbf{M}]$ 为系统的质量矩阵, $[\mathbf{C}]$ 为系统的阻尼矩阵, $[\mathbf{K}]$ 为系统的弹性系数矩阵, $[\mathbf{K}^m]$ 为系统的压磁系数矩阵, $[\mathbf{K}^h]$ 为系统的磁导率矩阵, $[\mathbf{U}]$ 为振动位移矩阵, $[\mathbf{A}]$ 为系统磁矢量矩阵, $[\mathbf{F}]$ 为系统外力矩阵, $[\boldsymbol{\Phi}]$ 为系统磁通矩阵。

1.2 静电场计算理论

针对非晶合金变压器绝缘主空道中的电场随时间做周期性变化的情况,考虑到其频率仅为 50 Hz,这里可以近似的认为非晶合金变压器绝缘主空道的电场分布符合静电场分布规律,因此,本文选用静电场的理论和方法,进行非晶合金变压器碎片引起的电场畸变的静电场数值分析,其静电场的控制方程式可以由式(7)表示:

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (7)$$

式中: ϕ 表示标量电位, ρ 表示介质中的自由电荷密度, ε 表示介质介电常数。

2 非晶合金变压器计算模型建立

本文选取 SBH15-M-400/10 型非晶合金变压器为研究对象,此型号非晶合金变压器的运行参数如表 1 所示,非晶合金材料的参数如表 2 所示。

表 1 非晶合金铁心材料参数

材料参数	数值	材料参数	数值
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 300	电阻率/($\mu\Omega \cdot \text{mm}$)	14.8
弹性模量/MPa	$1.42e^5$	叠片系数	80
导电率/($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	$7.69e^5$	硬度/Hr	950
饱和磁通/T	1.47	磁导率	$3e^5$

为了便于进行电磁-结构与静电场计算,本文在建模时作如下假设:

1) 忽略夹具,变压器油等结构对于铁心形变的影响,认为外力为绕组形变产生的作用力与铁心的重力。

表 2 非晶合金变压器性能参数

性能参数	数值
额定容量	400 KVA
额定电压	10 000 V/692 V
连接组号	Dyn11
额定电流	23 A/333 A
短路阻抗	4%
空载电流	0.5%

2) 忽略绕组的层间油道及相应绝缘, 仅考虑高低压绕组间以及端部绝缘。

根据以上假设, 建立的非晶合金变压器模型如图 1 所示; 图 2 为高低压绕组间绝缘结构示意图。

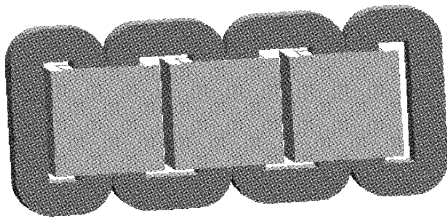


图 1 非晶合金变压器模型

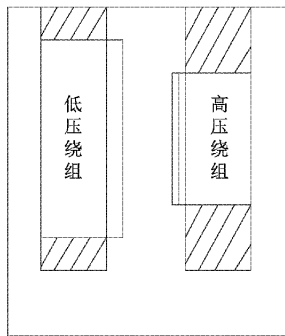


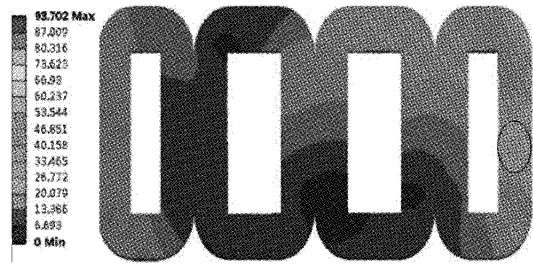
图 2 高低压绕组间绝缘结构

此型号非晶合金变压器的绝缘布置从低压绕组到高压绕组之间依次为 1.03 mm 厚菱格胶绝缘纸 (DDP), 5 mm 厚油隙, 1.6 mm 厚皱纹纸 (CRP) 以及 1.04 mm 厚菱格胶绝缘纸 (DDP)。

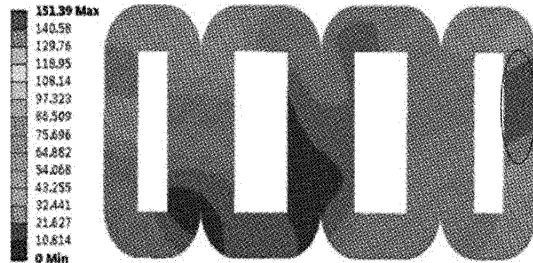
3 非晶合金变压器仿真结果分析

非晶合金变压器在实际运行过程中负载系数是不断变化的, 负载电流的大小决定了铁心的振动强度, 因此本文计算了负载系数为 1 与 1.2 工况下非晶合金铁心的形变, 结果如图 3 所示。

如图 3(a) 所示, 负载系数为 1 工况下非晶合金铁心变压器铁心的最大形变为 $93 \mu\text{m}$, 出现在 C 相 (右一环) 小铁心中部, 由于非晶合金材料的弹性形变极限为 $70 \mu\text{m}$, 它的塑性形变很小, 一般情况下大约只有其自身弹性形变量的 $1\% \sim 3\%$ 左右, 因此一般认为非晶合金材料的断裂极限就



(a) 负载系数为 1 时铁心形变



(b) 负载系数为 1.2 时铁心形变

图 3 铁心形变分布

是它的弹性形变极限, 满载工况下非晶合金铁心部分位置出现的形变已经超过了材料的碎裂极限, 有碎片产生, 但是此时大部分位置的形变在 $66 \mu\text{m}$ 以下, 并未超过材料的碎裂极限, 因此, 在满载工况下铁心仅有可能产生少量碎片。

图 3(b) 表示负载系数为 1.2 时非晶合金铁心的最大形变, 铁心最大形变的值达到了 $151 \mu\text{m}$, 大约非晶合金材料碎裂极限的两倍, 并且 AC 两相 (左一环和右一环) 铁心大部分形变都已经超过了 $75 \mu\text{m}$, 与负载系数为 1 工况下相比, 1.2 负载系数下由于振动加剧引起碎片的数量大幅增加, 由此可以推断, 随着负载系数的增大, 振动不断加剧, 将会有更多的碎片产生。

为了计算非晶合金变压器发生单相短路时铁心的形变, 对 A 相绕组施加 25 倍额定电流的短路电流, BC 相 (左二环和右二环) 绕组电流保持不变, 非晶合金铁心形变如图 4 所示。

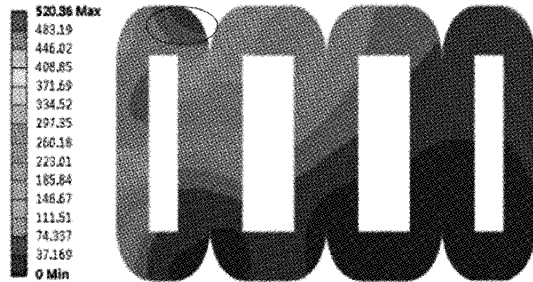


图 4 短路情况下铁心形变

在 A 相 (左一环) 短路情况下, A 相铁心发生了巨大形变, 并且受 A 相铁心形变的影响, B、C 两相的铁心也比负载系数为 1 工况下的形变要大。由于此时发生的形变最大值已经达到 $520.36 \mu\text{m}$ (图中圈出部分), 已经远超出非晶

合金材料的最大弹性形变量,因此在短路故障时,非晶铁心由于剧烈振动导致大量碎片的产生。

4 静电场仿真结果分析

4.1 非晶合金碎片引起的电场畸变分析

变压器油道中电场分布由绝缘结构、工作电压以及相关材料属性等因数共同决定,本节首先计算了正常情况下非晶合金变压器绝缘结构电场强度分布,为了便于显示,本文取电场强度的分贝图。由图 5 可知,电场主要集中在高低压绕组油道间隙中,达到了油道中电场强度最大分贝数为 127 dB(图中圈出部分),换算成电场强度为 2.6 kV/mm,配网变压器油的耐压强度为 18 kV/mm,局部放电的起始场强为 10~14 kV/mm,正常情况下,非晶合金变压器有充足的绝缘裕度,不会发生局部放电。

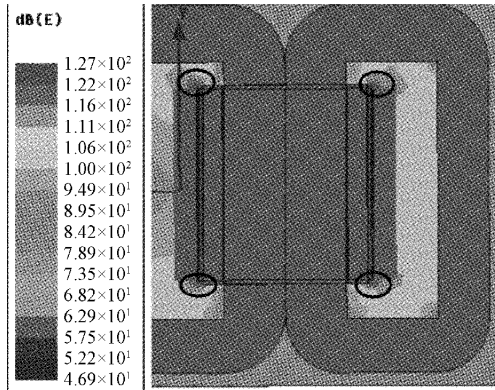


图 5 正常情况下电场分布

因为高低压绕组间油隙为电场密集位置,当此位置存在非晶合金碎片引起的电场畸变最大,因此本文在高低压绕组油道间加入一片长为 4 mm,厚度为 0.1 mm 的非晶合金薄片,碎片距离上铁轭的距离为 10 cm,边界与高低绕组绝缘纸板之间的距离为 0.5 mm,碎片附近电场强度分布如图 5 所示。

如图 6 所示,当碎片存在时,金属性质的碎片中并不存在电场,绕组与碎片之间的电场强度最大值达到了 12 kV/mm(图中圈出部分),出现在碎片端部与电极接近的位置,且超过了绝缘油放电起始场强,说明高低压绕组间绝缘油隙中存在碎片会引起局部放电引起绝缘故障。

4.2 不同角度碎片对绝缘结构电场的影响

非晶合金碎片在油道中下落时由于油流的作用,同一碎片与电极之间呈现不同的形态,如图 7 所示,当碎片角度 θ 发生变化时,电场也会发生变化,本文计算了 θ 为 0、 $\pi/6$ 、 $\pi/3$ 与 $\pi/2$ 情况下沿主绝缘结构电场分布如图 8 所示。

图 8 表示主绝缘结构电场大小随着位置的变化关系,电场强度最大位置总是出现在碎片的端部附近,而碎片为导体,其内部场强为零,因此在碎片端部附近电场强度的变化率较大,易于引起局部放电的发生,在当 θ 处于 0~ $\pi/2$

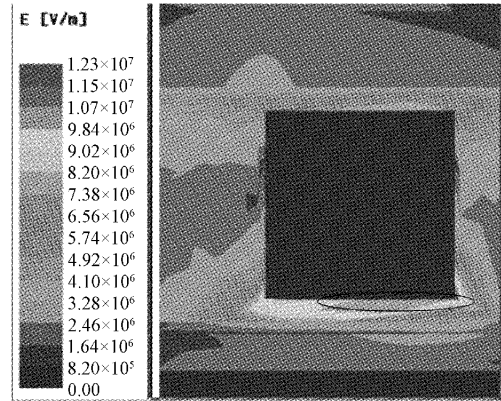


图 6 存在碎片情况下高低压绕组电场分布

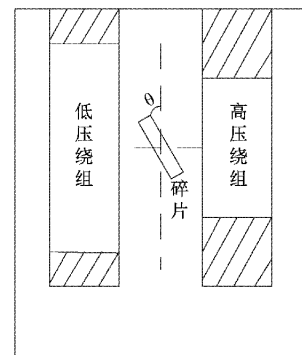


图 7 碎片与绕组间角度示意图

区间内时,同一碎片引起电场畸变随 θ 的增大而增大,因为 θ 越大,碎片两端与高低压绕组距离越小,引起的电场畸变增大。

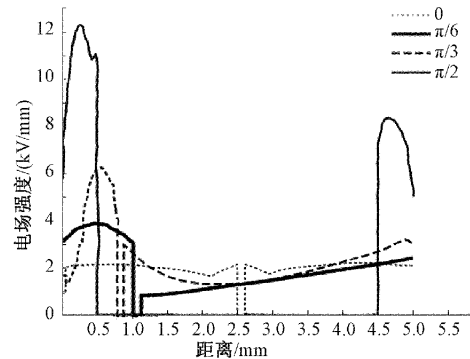


图 8 不同角度情况下电场分布

4.3 不同尺寸碎片对油隙电场分布的影响

由于铁心产生的碎片尺寸都不相同,因此本文选取了长宽分别为 1、2、3、4 mm 的碎片计算主绝缘结构的电场分布如图 9 所示。

由图 9 可知,当碎片尺寸在 1 mm(左四右四曲线)时,绝缘主结构电场强度大小与正常情况下基本一致,小于 3 kV/mm。说明引起局部放电的碎片主要为大尺寸碎片,因为碎片尺寸越大,对于绝缘结构的距离削减越大,当碎片

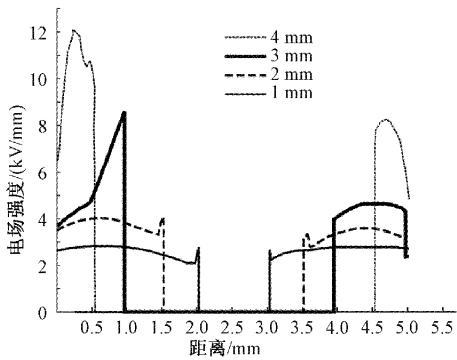


图 9 不同尺寸情况下电场分布

尺寸为 4 mm 时,绝缘介质长度仅为 1 mm(左一右一曲线),这就导致了电场畸变幅度变大,可能会引起局部放电。

4.4 不同数量碎片对油隙电场分布的影响

由于铁心振动会产生数量众多的碎片,因此选取了高低压绕组油间隙碎片数量为 5、10、20 片的情况,令碎片的长宽为 4 mm,厚度为 0.1 mm,计算得到主绝缘结构电场分布如图 10 所示。

如图 10(a)~(c)所示,当主绝缘结构中存在多片碎片时,电场强度最大的位置出现在碎片间的油间隙中,因为本文将碎片设置成悬浮电极的形式,相邻碎片会形成新的高低电压电极,引起碎片间电场强度偏大,此时局部放电的位置最大可能出现在碎片之间,并且碎片数量越多,碎片间电场

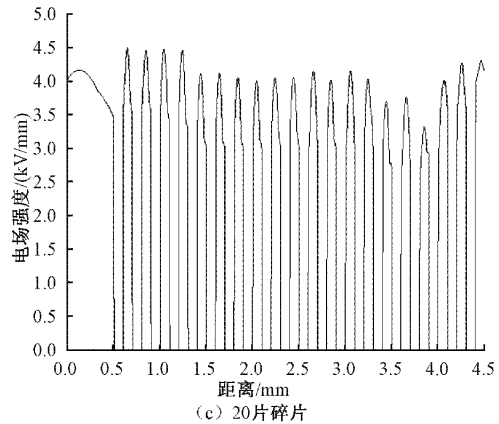


图 10 不同数量情况下电场分布

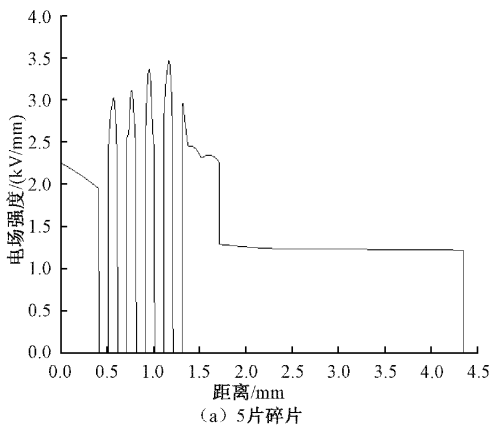
强度越大,引起局部放电现象的概率越大。

5 结 论

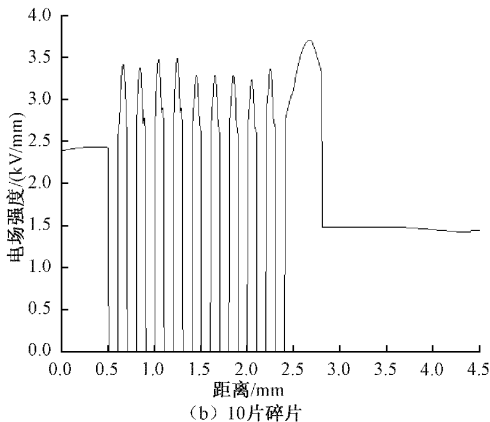
本文通过对非晶合金变压器进行电磁-结构多场耦合以及静电场计算分析,建立了非晶合金变压器三维模型。当变压器发生单相绕组短路和非晶合金铁心部分位置形变超过材料的碎裂极限时,铁心将有大量碎片产生。并通过在非晶合金变压器高低压绕组间加入碎片方式来计算碎片引起的电场畸变,仿真结果表明:同一碎片与电极所成的不同角度引起的电场畸变程度不同,角度越大,引起的电场畸变幅度越大;对于尺寸不同的碎片,尺寸越大的碎片,引起的电场畸变幅度越大;对不同数量的碎片,数量越多,引起的电场畸变幅度越大。本文给出了铁心振动产生碎片的机理以及碎片对绝缘存在影响规律,对非晶合金变压器稳定运行研究提供了一定的参考价值。由于本文主要考虑了铁心碎片对非晶合金变压器的绝缘影响,未来将进一步研究影响非晶合金变压器主绝缘结构的其他因素。

参考文献

- [1] 樊尚春,陶泽辉,邢维巍. 非晶/超微晶合金电子变压器谐波失真实验研究[J]. 仪器仪表学报,2011,32(5):6.
- [2] 周建平,林爱弟,吴劲晖,等. 电力变压器振动监测的测点位置选择[J]. 电子测量与仪器学报,2012,26(12):8.
- [3] 刘秉安. 漏感与分布电容对单激式变压器输出波形影响[J]. 国外电子测量技术,2012,31(4):53-56.
- [4] 萧宝瑾,安永东,龚泽云,等. 变压器局部放电在线监测技术的改进[J]. 电子测量技术,2012,35(3):132-135.
- [5] 祝丽花,杨庆新,闫荣格,等. 考虑磁致伸缩效应电力变压器振动噪声的研究[J]. 电工技术学报,2013,28(4):1-6.
- [6] ZHU L H, YANG Q X, YAN R G, et al. Magnetoelastic numerical analysis of permanent magnet synchronous motor including magnetostriction effects and harmonics [J]. IEEE Transactions on



(a) 5片碎片



(b) 10片碎片

- Applied Superconductivity, 2013, 46(1): 1-4.
- [7] 王雨虹,王志中. 基于 RFRFE 与 ISSA-XGBoost 的变压器故障识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(12):142-150.
- [8] 李学斌,于在明, 韩洪刚. 非晶合金变压器典型故障原因分析[J]. 东北电力技术, 2014, 35(5):31-34.
- [9] 刘道生,杜伯学,肖萌. 紧凑型非晶合金油浸式变压器主绝缘结构设计[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3199-3206.
- [10] 韩雪岩, 赵森磊, 周挺,等. 非晶合金电机振动噪声影响因素的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 531-538.
- [11] 张朝龙,何怡刚,杜博伦,等. 基于深度学习的电力变压器智能故障诊断方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1):81-89.
- [12] 赵志刚,马习纹,姬俊安. 基于 AFSA 与 PSO 混合算法的 J-A 动态磁滞模型参数辨识及验证[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1):26-34.
- [13] 杨毅,徐晓冉,刘雅琳,等. 基于离散二进制粒子群优化随机森林的平面变压器寄生参数预测模型[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(4):37-41.
- [14] 李岩,高延超,韩芳旭,等. 三相五柱型非晶合金变压器振动噪声的计算分析[J]. 变压器, 2015, 52(7):1-6.
- [15] 吴胜男,唐任远,韩雪岩,等. 磁致伸缩引起的非晶合金铁心振动解析计算及影响因素[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20):73-82.
- [16] 刘行谋,薛金鑫,杨永明,等. 变压器铁芯搭接区磁热等效及温升影响研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 187-196.

作者简介

柳佳雯, 硕士研究生, 主要研究方向为电气工程电磁场与磁技术等。

E-mail: 283386237@qq.com