

## 基于振动分析的变压器铁心故障诊断

闫荣格<sup>1,2</sup>, 董正予<sup>1,2</sup>, 焦佩林<sup>1,2</sup>, 谷浩伟<sup>1,2</sup>

(1. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 河北工业大学, 天津 300130;  
2. 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室, 河北工业大学, 天津 300130)

**摘要:** 铁心松动是变压器故障中的一个重要问题, 其诊断方法中振动法具有结构简单、安全性高、造价低等特点, 应用前景良好, 但现阶段研究的振动法均未考虑铁心松动引起的应力对硅钢片磁特性的影响, 并且存在着受电压波动影响大的问题, 容易误判。为此本文测试了在不同压应力下硅钢片的磁化特性和磁致伸缩特性, 构建考虑压应力对硅钢片磁特性影响的变压器电磁-机械强耦合模型, 采用有限元法计算铁心正常和松动状态下变压器振动特性, 提出振幅故障特征值法实现对铁心松动故障的诊断。为有效避免电压波动带来的干扰, 提出将电压和振动幅值故障特征值作为故障诊断条件, 通过计算和实测证明此方法可行性和准确性, 对精确诊断变压器铁心故障有重要意义。

**关键词:** 变压器; 振动法; 铁心松动; 故障诊断

**DOI:** 10.12067/ATEEE2008026

**文章编号:** 1003-3076(2021)01-0055-06

**中图分类号:** TM412

### 1 引言

变压器是电力系统的关键设备, 其可靠性和稳定性很大程度上影响着电网的安全。因此, 对变压器进行监测并及时发现故障, 对变压器安全运行具有重要意义。变压器铁心是变压器的最主要部件之一, 据统计, 因铁心问题造成的故障, 占变压器总事故的比例很大<sup>[1]</sup>, 而铁心的松动在铁心问题中占很大比重<sup>[2]</sup>。近年来, 国内外学者提出了很多诊断铁心松动的方法。目前, 对于变压器铁心的监测方法主要分为离线和在线检测方法。常见的离线方法有短路阻抗法、频响分析法和低压脉冲法等。总体上, 它们都存在着会影响电力系统正常运行和安全性不足的缺点, 其中短路阻抗法的测试灵敏度相对不足, 频响分析法在判断故障时没有确定标准<sup>[3,4]</sup>。常见的在线监测方法有油色谱分析法和振动法等。油色谱分析法检测存在着装置复杂, 使用繁琐, 价格昂贵的缺点。而基于振动法的变压器铁心在线监测系统是通过安装在变压器器身上的位移传感器来测量运行中的变压器的振动信号, 进而实时获得变压器工作状态, 若变压器铁心发生故障, 则通过振动数据对

比能够快速反映出来, 如利用频谱图与基频分量等特征量诊断铁心故障, 且可以实现变压器铁心的故障定位。振动法监测是非接触式的监测方式, 振动信号分析系统与整个电力系统无电气连接, 对整个电力系统的正常运行无任何影响, 具有结构简单、安全性高、造价低等特点。因此, 振动法的众多优势都使得它在变压器监测领域脱颖而出, 受到越来越多的重视<sup>[5-14]</sup>。

由于铁心在正常和松动时的压应力不同, 而压应力的变化又会改变铁心的磁导率以及磁致伸缩, 因此会改变铁心振动, 而正常的电压波动也会导致铁心振动的改变, 但在以前的研究中均未考虑这两方面的影响。

针对以上问题, 本文考虑压应力对硅钢片磁化特性以及磁致伸缩特性的影响, 构建了变压器电磁-机械强耦合模型, 采用有限元法计算了铁心正常和松动状态下的振动特性, 提出了振幅故障特征值法实现铁心松动故障的诊断。为进一步减少因电压波动引起的误判, 本文对提出的铁心故障诊断法进行了改进, 并进行了实验验证。

**收稿日期:** 2020-08-07

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51777054)

**作者简介:** 闫荣格(1969-), 女, 河北籍, 教授, 博士, 研究方向为工程电磁场与磁技术;  
董正予(1994-), 女, 河北籍, 硕士研究生, 研究方向为电工理论与新技术。

## 2 铁心故障诊断的原理

在变压器正常运行时,硅钢片的磁致伸缩效应是变压器铁心产生振动的主要原因。当出现铁心松动故障时,硅钢片所受到的压应力减小,压应力减小会同时导致磁导率以及磁致伸缩的变化,二者又会同时改变铁心的振动。因此可以通过分析振动特性,来诊断变压器铁心松动情况。

实践表明,使用高牌号无取向硅钢替代取向硅钢制作变压器,性能差异不大,但材料成本大幅下降、噪声下降、生产效率明显提高,具有广阔的推广应用价值<sup>[15]</sup>。因此,本文采用高牌号无取向硅钢片 50ww470 作为变压器铁心材料进行研究。

通常对硅钢片施加应力的方向有两种,分别为压应力和叠应力。文献[16]研究了对硅钢片施加叠应力的情况。由于铁心松动主要改变的是其所受压应力,所以本文测试了对硅钢片施加压应力时的情况。测量过程中施加 50 Hz 的励磁电压,得到了硅钢片在不同压应力下的磁化特性以及磁致伸缩特性,分别如图 1 和图 2 所示。可以看出随着外加压应力的减小,即铁心松动状态时,硅钢片磁化特性和磁致伸缩特性都提高了。

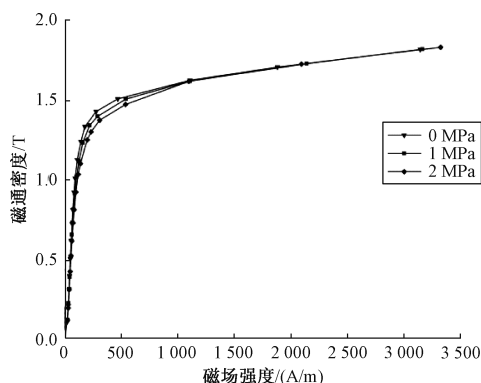


图 1 不同压应力下的磁化曲线

Fig.1 Magnetization curve under different compressive stresses

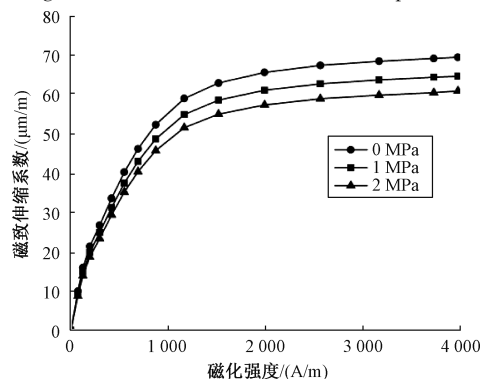


图 2 不同压应力下的磁致伸缩曲线

Fig.2 Magnetostrictive curves under different compressive stresses

## 3 变压器电磁-机械强耦合模型与有限元计算

变压器的总位能包括机械能、外力所做的功、磁场能、电流的位能、磁边界上的位能和磁致伸缩能。因此,变压器系统的能量泛函表示为:

$$I = \int_{\Omega_2} \frac{1}{2} \mathbf{H} \cdot \mathbf{B} d\Omega - \int_{\Omega_2} \mathbf{A} \cdot \mathbf{J} d\Omega + \int_{\Gamma_2} \left( \int_0^{\mathbf{A}} (\mathbf{H} \times \mathbf{n}) \cdot d\mathbf{A} \right) d\Gamma + \int_{\Omega_1} \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma} \times \boldsymbol{\varepsilon} d\Omega - \int_{\Gamma_1} (\mathbf{f}_T \cdot \mathbf{u}) d\Gamma - \int_{\Omega_1} (\mathbf{f}_\Omega \cdot \mathbf{u}) d\Omega + \int_{\Omega_1} (\boldsymbol{\sigma} \cdot d\mathbf{H}) d\Omega \quad (1)$$

式中,  $\Omega_1$  和  $\Omega_2$  分别为电磁场和机械场的分析域;  $\Gamma_1$  和  $\Gamma_2$  分别为面积力和磁场的边界; 模型采用第一类边界条件, 它作为强加边界条件列出, 所以磁边界上的位能为零。  $\mathbf{f}_T$  和  $\mathbf{f}_\Omega$  分别为外力的面密度和体密度;  $\mathbf{B}$  和  $\mathbf{H}$  分别为磁感应强度和磁场强度,  $\mathbf{B}$  是应力的函数;  $\mathbf{J}$  为电流密度;  $\mathbf{A}$  为矢量磁位;  $\mathbf{u}$  为位移矢量;  $\boldsymbol{\sigma}$  为应力;  $\boldsymbol{\varepsilon}$  为应变;  $d$  为磁致伸缩系数, 是应力的函数。

有限元计算流程如图 3 所示。首先假设一个应力  $\sigma_1$ , 然后将图 1、图 2 中此应力对应的  $\mathbf{B}-\mathbf{H}$  曲线和  $\boldsymbol{\lambda}-\mathbf{H}$  曲线代入电磁机械强耦合模型中, 根据文献

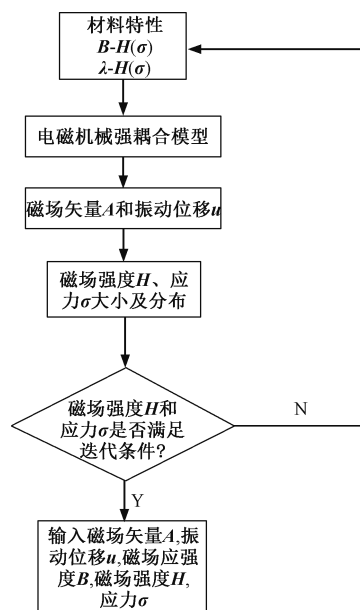


图 3 有限元计算流程图

Fig.3 Flow chart of finite element calculation

[17]中能量泛函变分问题求解的方法,计算出磁场矢量  $\mathbf{A}$  和振动位移  $\mathbf{u}$ ,从而得到磁场强度  $\mathbf{H}$  和应力  $\sigma_2$ ,若此应力  $\sigma_2$  与初始假设应力  $\sigma_1$  不一致,则将图 1,图 2 中应力  $\sigma_2$  对应的  $B-H$  曲线和  $\lambda-H$  曲线代入强耦合模型中,重复此过程。直至假设的应力与最终计算得出的应力一致,则计算终止。

#### 4 铁心故障诊断方法及其验证

##### 4.1 铁心故障诊断方法

本文研究的干式变压器样机模型如图 4 所示,对铁心不同松动状态下变压器的振动特性进行计算。在离散三维场时,本文采用四面体单元,其网格剖分图如图 5 所示。

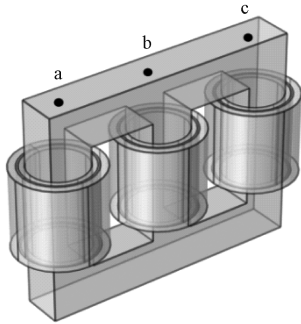


图 4 干式变压器样机模型  
Fig.4 Prototype model of dry type transformer

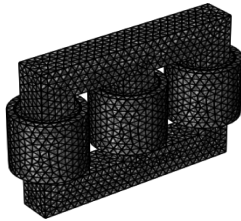


图 5 变压器网格剖分图  
Fig.5 Grid partition of transformer

为使计算模型与实验样机更接近,在改变压应力的同时,分别代入铁心不同松动状态应力下测得的磁化特性和磁致伸缩特性数据。

基于所建的磁-机械强耦合模型,可以得到变压器铁心不同松动状态的振动特性,如图 6 所示。可以看出,三相铁心顶部位置 a、b、c 点的振动位移更大,振动信号更明显,因此选取它们的振动特性作为铁心故障诊断的依据。以测点 a 为例,其铁心正常与松动状态下的振动位移如图 7 所示,可以看出,铁心松动前后,变压器振幅不同。b、c 点与之类似。

因此,可以采用振幅故障特征值  $K_1$  判定铁心故障。

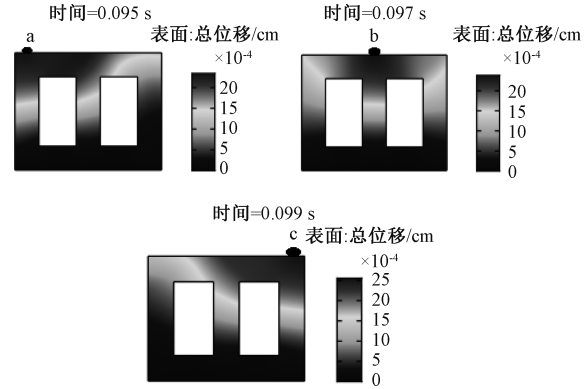


图 6 变压器的振动特性  
Fig.6 Vibration characteristics of transformer

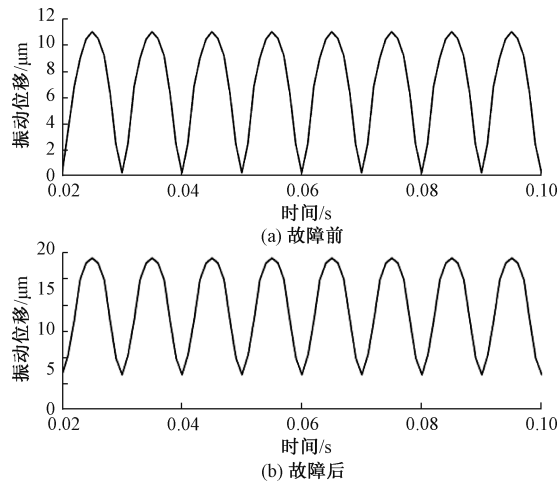


图 7 a 点的振动位移  
Fig.7 Vibration displacement of point a

$$K_1 = \frac{A_L - A_N}{A_N} \quad (2)$$

式中,  $A_L$  为变压器铁心振动幅值;  $A_N$  为变压器正常状态时铁心的振动幅值。

通过计算可以分别得到变压器铁心正常、松动 10% 和 20% 预紧力 a 点的位移值和  $K_1$  如表 1 所示。可以看出随着铁心松动  $K_1$  值增大。因此,可以取 0.2 为警戒阈值,0.25 为故障阈值。当  $K_1$  未超过警戒阈值时,判定铁心未出现松动;当  $K_1$  超过警戒阈值但未超过故障阈值时,则判定铁心出现松动隐患;当  $K_1$  超过故障阈值时,可以判定铁心松动故障。

表 1 a 点不同状态下的位移和  $K_1$  仿真值

Tab.1 Displacement and simulation value $K_1$ of point a in different states			
	正常	松动 10%	松动 20%
位移/ $\mu\text{m}$	22.036	29.756	33.791
$K_1$	0	0.350 34	0.533 45

## 4.2 铁心故障诊断方法的验证

以型号为 SC10-30/10.5 的变压器为例,实验测试系统如图 8 所示,其中位移传感器安装位置与图 6 所示一致。测试时,通过调压器输出所需电压施加于被测变压器,通过数据电缆将振动信号传递至数据采集器。通过依次松动各相铁心柱附近的紧固金具上的螺丝,分别测试变压器铁心正常、松动 10% 和 20% 预紧力时的振动信号。

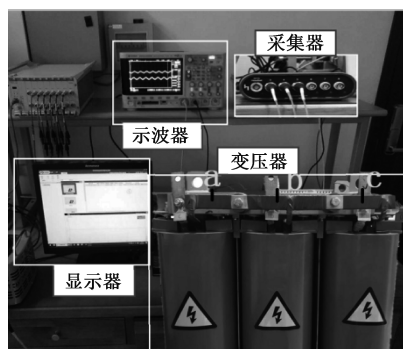


图 8 实验测试系统

Fig.8 Experimental test system

以 a 点为例,分别测得其正常和松动状态沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴位移值如图 9 所示,可以看出  $z$  轴方向位移值改变量最大,因此,应用  $z$  轴位移数据作为诊断铁心松动的依据。

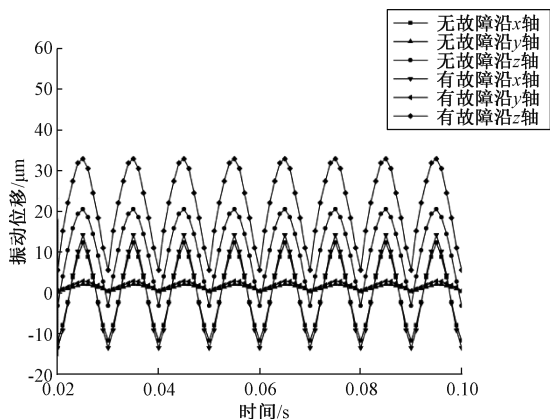


图 9 故障前后  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴位移

Fig.9  $x$ ,  $y$  and  $z$ -axis displacement before and after fault

分别测量不同状态下 a 点  $z$  轴方向的振动信号幅值,如表 2 所示。可以看出,用此方法可以诊断铁心松动故障。b、c 点振动信号与 a 点相类似。

表 2 a 点不同状态下的位移和  $K_1$  实验值

Tab.2 Displacement and experimental value

$K_1$  of point a in different states

	正常	松动 10%	松动 20%
位移/ $\mu\text{m}$	8.096	11.478	12.857
$K_1$	0	0.417 7	0.588 1

## 5 铁心故障诊断法的改进及其验证

由于变压器运行过程中,电网电压的允许波动范围一般不超过额定电压的 10%,尤其是高速铁路的运行会产生更大的电压波动<sup>[18]</sup>。

因此对电压波动下的振动信号进行了测试,测得变压器铁心正常、松动 10% 和 20% 预紧力状态下 a 点的振动信号幅值随电压变化的关系如图 10 所示,计算得到  $K_1$  值如表 3 所示。

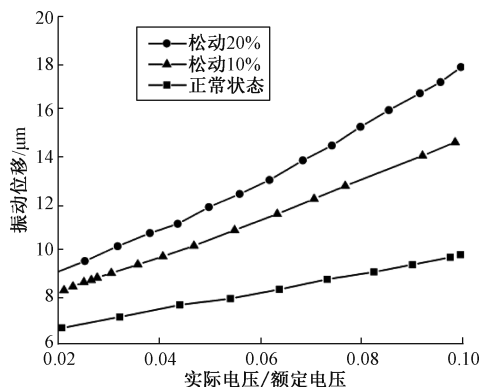


图 10 铁心不同状态下振动幅值随电压变化关系

Fig.10 Relationship between vibration amplitude and voltage in different states of iron core

表 3 电压波动时 a 点不同状态下  $K_1$  实验值

Tab.3 Experimental value  $K_1$  of point a under different states of voltage fluctuation

$U/U_N$	$K_1$		
	正常时	松动 10%	松动 20%
0.9	-0.162 3	0.014 9	0.112 3
0.95	-0.087 9	0.221 5	0.346 5
1	0	0.417 7	0.588 1
1.05	0.086 7	0.579 5	0.822 4
1.1	0.227 4	0.799 2	1.232 3

可以看出,当电压波动时,仅将振幅变化作为铁心松动故障的唯一诊断条件,会给变压器铁心故障诊断带来较大误差,难以保证诊断的准确性。

为了更精准地诊断铁心故障,采用考虑振幅和电压的故障特征值  $K_2$  判定铁心故障。

$$K_2 = \frac{A/U^2 - A_N/U_N^2}{A_N/U_N^2} \quad (3)$$

利用本文所建的变压器电磁-机械强耦合模型,计算不同电压下变压器铁心正常、松动 10% 和松动 20% 预紧力故障下的振动幅值,由式 (3),可分别计算出其振幅和电压故障特征值  $K_2$  如表 4 所示。



表4 电压波动时a点不同状态下 $K_2$ 计算值  
Tab.4 Calculated value  $K_2$  of point a under different states under voltage fluctuation

$U/U_N$	$K_2$		
	正常时	松动 10%	松动 20%
0.9	0.038 2	0.402 3	0.614 2
0.95	0.027 1	0.392 1	0.570 4
1	0	0.350 3	0.533 5
1.05	0.009 2	0.350 2	0.530 3
1.1	-0.018 8	0.340 2	0.512 6

可以看到,在正常情况下, $K_2$  范围为-0.018 8~0.038 2,铁心松动状态下 $K_2$  范围为 0.340 2~0.614 2,因此可以取 0.2 为警戒阈值,0.25 为故障阈值。当 $K_2$  未超过警戒阈值时,判定铁心未出现松动;当 $K_2$  超过警戒阈值未超过故障阈值时,则判定铁心出现松动隐患;当 $K_2$  超过故障阈值时,判定铁心松动故障。

为验证改进方法的有效性,将图 10 中的实验数据代入式(3),得到不同电压下铁心不同压紧状态 a 点振幅和电压故障特征值如表 5 所示。

表5 电压波动时a点不同状态时 $K_2$ 实验值  
Tab.5 Experimental value  $K_2$  of point a under different states of voltage fluctuation

$U/U_N$	$K_2$		
	正常时	松动 10%	松动 20%
0.9	0.034 0	0.304 7	0.418 7
0.95	0.010 4	0.353 2	0.491 7
1	0	0.417 7	0.588 1
1.05	-0.014 5	0.432 5	0.652 7
1.1	0.014 2	0.486 7	0.844 6

可以看出,不同电压下,故障前后的振幅和电压故障特征值区域没有交集,应用此方法能准确地反映变压器的铁心状态。

## 6 结论

本文在分析应力对铁心振动影响的基础上,构建变压器电磁-机械强耦合模型,采用有限元法计算了铁心正常状态和松动状态下的振动特性,提出了诊断铁心松动故障的方法,可以实现对铁心松动故障的诊断。在实验验证过程中发现,当电压波动时,仅将振幅变化作为铁心松动故障的唯一诊断条件,会给变压器铁心故障诊断带来较大误差,难以保证诊断的准确性。而后本文提出将电压和振动幅值故障特征值作为故障诊断的条件,并通过计算和实测

证明了此方法的可行性和准确性。此方法为诊断铁心松动问题提供了一种有效途径,它可以消除电压波动对诊断铁心松动故障带来的不利影响,有效减少误判。

## 参考文献 (References):

- [1] 胡勇,程蕾 (Hu Yong, Cheng Lei). 大型电力变压器故障实例统计分析 (Statistical analysis of large power transformer fault cases) [J]. 电力安全技术 (Electric Safety Technology), 2003, (1): 20-22.
- [2] 梁武刚 (Liang Wugang). 变压器故障的统计分析及预防方法 (Statistical analysis and prevention of transformer faults) [J]. 太原城市职业技术学院学报 (Journal of Taiyuan Urban Vocational College), 2004, (S2): 130.
- [3] Ryder S A. Diagnosing transformer faults using frequency response analysis [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, 19 (2): 16-22.
- [4] 尹相龙 (Yin Xianglong). 基于振动信号的变压器状态监测及状态评估方法研究 (Research on transformer condition monitoring and condition evaluation method based on vibration signal) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2019.
- [5] 李维铮,祝丽花,石永恒,等 (Li Weizheng, Zhu Lihua, Shi Yongheng, et al.). 直流偏磁下变压器铁心搭迭区域电磁振动的分析 (Electromagnetic vibration analysis of transformer core overlap area under dc bias field) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (7): 9-15.
- [6] 李恩文,王力农,宋斌,等 (Li Enwen, Wang Linnong, Song Bin, et al.). 基于改进模糊聚类算法的变压器油色谱分析 (Analysis of transformer oil chromatography based on improved fuzzy clustering algorithm) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2018, 33 (19): 4594-4602.
- [7] 阎秀恪,王振芹,于向东,等 (Yan Xiuke, Wang Zhenqin, Yu Xiangdong, et al.). 基于场路耦合模型的超高压自耦变压器电磁场研究 (Research of electromagnetic field for extra-high voltage (EHV) autotransformer based on magnetic field circuit coupled model) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (11): 43-47.
- [8] 史海涛,王建元,蔡国伟,等 (Shi Haitao, Wang Jianyuan, Cai Guowei, et al.). 变压器电磁耦合模型中动态电感的计算方法 (Dynamic inductance computation in electromagnetic coupled model of transformer) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (8): 69-74.

- [ 9 ] García B, Burgos J C, Alonso A M. Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformations-I: theoretical foundation [ J ]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 ( 1 ): 157-163.
- [ 10 ] Berler Z, Golubev A, Rusov V, et al. Vibro-acoustic method of transformer clamping pressure monitoring [ A ]. Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation [ C ]. 2000. 263-266.
- [ 11 ] 赵峰, 李硕 ( Zhao Feng, Li Shuo ). 基于熵权和灰关联度的变压器故障诊断 ( Fault diagnosis in transformer based on entropy weighted and grey incidence ) [ J ]. 电工电能新技术 ( Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy ), 2015, 34 ( 1 ): 57-61.
- [ 12 ] 朱叶叶, 汲胜昌, 张凡, 等 ( Zhu Yeye, Ji Shengchang, Zhang Fan, et al. ). 电力变压器振动产生机理及影响因素研究 ( Vibration mechanism and influence factors in power transformers ) [ J ]. 西安交通大学学报 ( Journal of Xi'an Jiaotong University ), 2015, 49 ( 6 ): 115-125.
- [ 13 ] 辜超, 杨伟, 张晓星, 等 ( Gu Chao, Yang Wei, Zhang Xiaoxing, et al. ). 基于最大相关最小冗余准则的变压器故障诊断特征选择 ( Feature selection for transformer fault diagnosis based on maximal relevance and minimal redundancy criterion ) [ J ]. 电工电能新技术 ( Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy ), 2018, 37 ( 7 ): 84-89.
- [ 14 ] 汲胜昌, 程锦, 李彦明 ( Ji Shengchang, Cheng Jin, Li Yanming ). 油浸式电力变压器绕组与铁心振动特性研究 ( Research on vibration characteristics of windings and core of oil-filled transformer ) [ J ]. 西安交通大学学报 ( Journal of Xi'an Jiaotong University ), 2005, ( 6 ): 616-619, 658.
- [ 15 ] 饶兴宁, 张正康 ( Rao Xingning, Zhang Zhengkang ). 高牌号无取向硅钢替代取向硅钢制作移相变压器铁心 ( Replacing oriented silicon steel with high-grade non-oriented silicon steel to make phase-shifting transformer core ) [ J ]. 电工钢 ( Electrical Steel ), 2020, 2 ( 1 ): 32-34.
- [ 16 ] Fonteyn K, Belahcen A, Kouhia R, et al. FEM for directly coupled magneto-mechanical phenomena in electrical machines [ J ]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46 ( 8 ): 2923-2926.
- [ 17 ] 闫荣格, 王博文, 曹淑瑛, 等 ( Yan Rongge, Wang Bowen, Cao Shuying, et al. ). 超磁致伸缩致动器的磁-机械强耦合模型 ( Magneto-mechanical strong coupled model for a giant magnetostrictive actuator ) [ J ]. 中国电机工程学报 ( Proceedings of the CSEE ), 2003, 23 ( 7 ): 107-111.
- [ 18 ] 巴合提别克 ( Ba Hetibieke ). 高速铁路电压波动与谐波分析及对策研究 ( Research on voltage fluctuation and harmonic analysis and countermeasures of high speed railway ) [ D ]. 北京: 北京交通大学 ( Beijing: Beijing Jiaotong University ), 2016.

## Fault diagnosis of transformer core based on vibration analysis

YAN Rong-ge<sup>1,2</sup>, DONG Zheng-yu<sup>1,2</sup>, JIAO Pei-lin<sup>1,2</sup>, GU Hao-wei<sup>1,2</sup>

( 1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment,  
Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province,  
Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** Core loosening is an important problem in transformer faults. The vibration signal analysis method has a good application prospect because of its simple structure, high safety and low cost. However, the vibration methods studied at this stage do not consider the influence of voltage fluctuation and compressive stresses caused by core loosening on the magnetic characteristics of silicon steel sheet, which is easy to cause misjudgment. In this paper, the magnetization and magnetostriction characteristics of silicon steel sheet under different compressive stresses are tested, and the electromagnetic-mechanical strong coupling model of transformer considering the influence of compressive stress on the magnetic characteristics of silicon steel sheet is constructed. The vibration characteristics of transformer under normal and core loosening are calculated by the finite element method. The amplitude fault eigenvalue method is proposed to diagnose the core loosening fault. In order to effectively avoid the disturbance caused by voltage fluctuation, the fault eigenvalue considering voltage and vibration amplitude is proposed as the condition of fault diagnosis. The feasibility and accuracy of this method are proved by calculation and measurement, which is of great significance for accurate diagnosis of transformer core fault.

**Key words:** transformer; vibration method; core loosening; fault diagnosis