

Simulation Study on Torsional Deformation of Large Transformer Helical Winding

Yubin Xu¹, Chongyou Jing^{1,2}, Jianmin Wang², Feng Zhao¹, Dong Zhang²

1. School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China

2. Baoding Tianwei Group Tebian Electric Co., Ltd, Baoding 071056, China

[†]Email: 2573251314@qq.com

Abstract

The short-circuit force of the helical winding will contain a large tangential force when the transformer shorted. The combined action of axial current component and radial leakage magnetic field will produce great torque. This paper established the coupling model of two dimensional and three dimensional magnetic field-structural force field of helical winding and calculated the leakage magnetic field of transformer and the tangential force of helical winding. The tangential force size and distribution law of the low voltage helical winding are obtained. It tested the reliability of the calculation method through the comparison and analysis of two kinds of modeling. On the basis of this, we studied the influence of helical Angle and axial compression force on the tangential displacement of helical winding. The results show the method is efficient for reducing winding tangential displacement in product design.

Keywords: Helical Winding; Tangential Force; Torque; Helix Angle; Axial Compression Force; Tangential Displacement

大型变压器螺旋式绕组扭转变形的仿真研究

许俞彬¹, 景崇友^{1, 2}, 王建民², 赵峰¹, 张栋²

1. 河北工业大学电气工程学院, 天津 300130;

2. 保定天威保变电气股份有限公司, 河北 保定 071056

摘要: 变压器发生短路时, 螺旋式绕组所受的短路电力将包含很大的切向力。轴向电流分量与辐向漏磁场共同作用会产生较大的扭矩。文章中建立了螺旋式绕组的二维和三维磁场-结构力场耦合模型, 对变压器的漏磁场、螺旋式绕组的切向力进行了仿真计算。得到了变压器短路时低压螺旋式绕组的切向力大小、分布规律。通过两种建模结果的对比分析, 检验了计算方法的可靠性。在此基础上, 研究了螺旋角和轴向预压紧力对螺旋式绕组切向位移的影响, 得到了产品设计中减小绕组切向位移的一些应用结论。

关键词: 螺旋式绕组; 切向力; 扭矩; 螺旋角; 轴向预压紧力; 切向位移

引言

随着变压器容量和电压等级的不断提高, 低压绕组电流也随之增大, 有的甚至高达几万安培。对于螺旋式绕组, 线饼沿一小角度螺旋上升, 因此, 不仅有圆周方向的电流, 绕组各处还有轴线方向的电流分量, 即变压器发生短路时, 螺旋式绕组所受的短路电力将包含很大的切向力。大容量变压器低压绕组一般采用螺旋式结构, 因而在这些绕组中存在较大的轴向电流分量, 轴向电流分量与辐向漏磁场共同作用将产生较大的扭转力矩^[1-2]。对螺旋式绕组尤其是对多螺旋式绕组而言, 螺旋角较大, 当绕组线段间或端部绝缘件的摩擦力不能平衡切向力产生的扭矩时, 绕组将产生扭转现象。在短路实验和实际运行损坏的变压器中, 都发生过低压绕组沿相反方向旋转扭动的现象。因此, 对于大电流螺旋式绕组还存在另外一种破坏形式, 就是在扭转力矩作用下的扭转^[3-7]。传统的切向力一般参考经验公式得到, 但是切向力的分布并不能靠解析公式得到。文献^[1]

对大电流螺旋式绕组的扭矩进行了近似估算；文献^[2]提出了一种基于解析法的计算扭矩的方法。这些方法的缺点是无法给出切向力沿绕组的分布规律，同时也不能得到绕组的切向位移。应用仿真技术代替部分实验是高品质、低成本，达到国际先进水平的重要手段。笔者应用 COMSOL 有限元软件，分别以两台具有单螺旋式绕组和双螺旋式绕组的变压器为研究对象，建立了二维和三维的磁场-结构力场耦合的数学模型，得到了低压螺旋式绕组的切向力大小与分布规律，并对两种计算模型的仿真结果进行了对比验证。在此基础上分析了螺旋角和轴向预压紧力对低压螺旋式绕组切向力及扭转变形的影响，研究结果对产品设计中减小绕组的切向位移和采取结构工艺的抑制措施有重要意义。

1 计算方法

1.1 多物理场耦合原理

要计算变压器绕组所承受的短路切向力，首先要对变压器的磁场分布进行计算。仿真中使用的电磁场微分方程为：

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = J - jw\sigma A \quad (1)$$

式中， μ 为磁导率[H/m]； σ 为电导率[s/m]； w 为角频率[rad/s]； A 为矢量磁位[T.m]； J 为绕组源电流密度[A/m²]。

将软件计算得到的螺旋式绕组中的磁感应强度 B 、磁场强度 H 代入到求解域方程中，以实现磁场和结构力场的耦合，计算绕组的受力情况和位移场分布。结构力学方程为：

$$\nabla \cdot s + F_v = \rho a \quad (2)$$

$$F_v = J \times B \quad (3)$$

$$s = c \varepsilon \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(\nabla u + (\nabla u)^T) \quad (5)$$

式中， ρ 为材料密度[kg/m³]； a 为矢量加速度[m/s²]； u 为位移矩阵[m]； s 为应力张量[Mpa]； F_v 为单位体积力[N/m³]； c 为弹性模量[Mpa]； ε 为应变。

模型中铁芯的泊松比设置为 0.3，杨氏模量为 120×10³Mpa，铜绕组的泊松比为 0.3，杨氏模量为 90×10³Mpa。

1.2 切向力和扭矩计算

对于螺旋式绕组，线饼沿一小角度螺旋上升，因此，不仅有圆周方向的电流，绕组各处还有轴线方向的电流分量，轴向电流分量与辐向漏磁场共同作用将产生较大的扭转力矩，电流的轴向分量为：

$$i_z = i * \sin \alpha \quad (6)$$

单位周向长度线饼上切向力密度为：

$$f_\theta = B_r i_z = B_r i * \sin \alpha \quad (7)$$

单位线饼上的切向力和扭矩为：

$$F_\theta = \int_0^{2\pi r / \cos \alpha} f_\theta dl = r \int_0^{2\pi r / \cos \alpha} B_r i * \sin \alpha dl \quad (8)$$

$$M_\theta = F_\theta * r = r \int_0^{2\pi r / \cos \alpha} B_r i * \sin \alpha dl \quad (9)$$

式中， i 是绕组中的电流； α 为螺旋角； r 为低压绕组的平均半径； l 为低压绕组周向方向导体长度； B_r

为辐向磁通密度[T];

2 仿真结果与验证分析

二维仿真计算方法适合求解平行平面场或轴对称场,优点是使用起来非常简单且计算代价低,缺点是不能模拟复杂电工设备的三维电磁场分布。三维仿真计算方法有更高的可靠性,但需要使用者熟练掌握场分析的专业知识且花费的计算资源较多。本文通过对变压器进行必要的简化,建立了两台典型电力变压器的简化二维 1/2 轴对称模型和三维全模型,并对两种仿真结果进行了分析对比。

2.1 简化模型

本文针对两台典型的电力变压器进行了仿真计算。仿真中变压器运行条件为额定工况,分析类型为稳态,求解器中迭代误差为 0.001,其他选项为缺省值。变压器产品 1(平均螺旋角为 0.357°)的低压额定电流为 942.75A,线饼数为 70,短路阻抗 17.98%,单螺旋绕制。产品 2(平均螺旋角为 0.739°)的低压额定电流为 1587.3A,线饼数为 92,短路阻抗 18.76%,双螺旋绕制。对变压器做出如下假设以简化模型:(1)不考虑结构件对漏磁场的影响;(2)对于低压线圈为螺旋式结构的变压器,忽略了轴向电流分量对辐向漏磁场的影响;(3)根据绕组的结构特点,把线饼等效为一个集中的质量块,用圆环形线圈来近似代替螺旋线圈。其中产品 1 装有油箱磁屏蔽,模型对绕组按照实际结构进行了分区并考虑了绕组的安匝平衡、油箱磁屏蔽和线饼间垫块的影响。

2.2 二维仿真结果分析

2.2.1 二维漏磁场分布

变压器在发生短路的情况下,短路电流可达到正常运行电流的几倍或几十倍,绕组导体在漏磁场的作用下,将会承受很大的短路电磁力,因此有必要对变压器漏磁场进行计算。变压器漏磁场分布见图 1。

要得到变压器的短路阻抗,需要知道磁场能量。磁场能量和短路阻抗的计算公式如下:

$$W = \frac{1}{2} \int_v H \cdot B dv \quad (10)$$

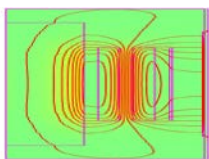
$$U = \frac{4\pi f W}{VA} \quad (11)$$

式中, f—频率, Hz; W—磁场能量, J; VA—变压器单相容量, kVA

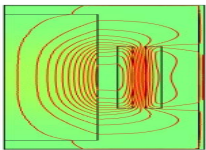
表 1 变压器短路阻抗

变压器型号	计算值(%)	实测值(%)	相对误差(%)
产品 1	17.67	17.98	1.7
产品 2	17.95	18.76	4.8

如表 1 所示,两台变压器短路阻抗的计算值与实测值在 5%以内,从而验证了计算方法的可靠性。两台变压器的低压螺旋式绕组辐向磁通密度分布如图 2 所示。可以看到,低压单螺旋式绕组和低压双螺旋式绕组的辐向磁通密度均在两端部有最大值,其最大值分别为 0.087T 和 0.061T,而在绕组中部辐向磁通密度缩减几乎为零,这与变压器实际辐向磁通密度分布是一致的。

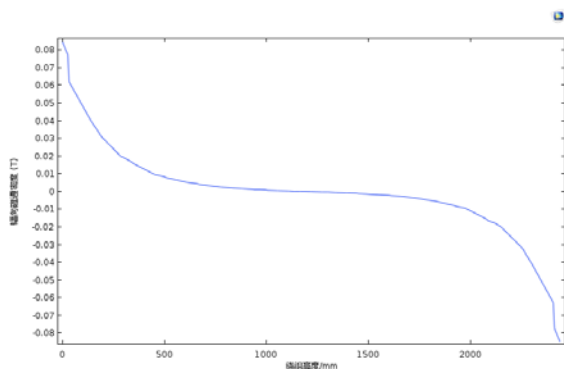


(a) 产品 1

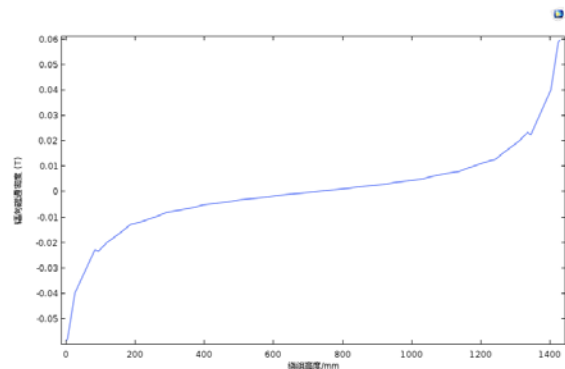


(b) 产品 2

图 1 漏磁场分布图



(a) 产品 1



(b) 产品 2

图 2 低压绕组辐向磁通密度分布

2.2.2 二维切向力分析

变压器短路时，各绕组所受电磁力大小和方向不同，绕组不同高度上的电磁力也可能有较大差异。本文通过对绕组进行磁场-结构力场耦合仿真分析，确定了切向力的大小及分布。标准 GB 1094.5-2008 规定按下面的公式，来计算变压器非对称短路电流的第一个峰值。

$$I_{d\max} = \sqrt{2}KI_d \quad (12)$$

式中， I_d 为稳态短路电流（A,有效值）； $\sqrt{2}K$ 为非对称短路电流的冲击系数。模型中变压器产品 1 和产品 2 的短路电流冲击系数分别为 2.55、2.69。

低压绕组单位周向长度线饼所受最大切向力如图 3 和图 4 所示。在每一安匝区内，线圈有相同的螺旋角，轴向电流的分量基本上是相同的，因而切向力主要决定于相邻线饼间的辐向磁密。绕组端部附近有较大的辐向磁密，因此将会产生较大的切向力。

两台变压器低压螺旋式绕组所受切向力最大值分别为为 59.5N/m 和 108.9N/m。为得到绕组所受切向力，将 F_θ 沿轴向进行线积分直至 $B_r=0$ 。计算得到产品 1 低压螺旋式绕组上部所受切向力为 2801.6N，下部所受切向力为-2856.2N，其所受扭矩为： $M_\theta = F_\theta * r = 2856.2 \times 0.814 = 2324.9\text{N.m}$

同理可以得到产品 2 低压螺旋式绕组上部所受最大切向力为 6652.6N，下部所受最大切向力为-6565.5N，其所受扭矩为： $M_\theta = F_\theta * r = 6652.6 \times 0.382 = 2541.3\text{N.m}$

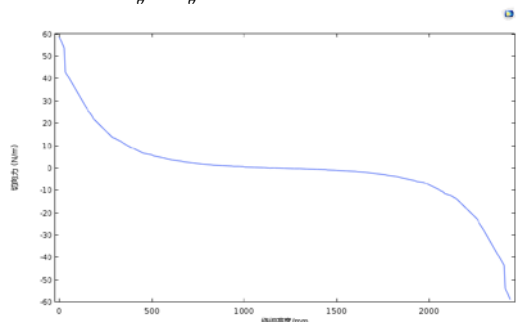


图 3 产品 1 低压绕组单位周向长度线饼切向力

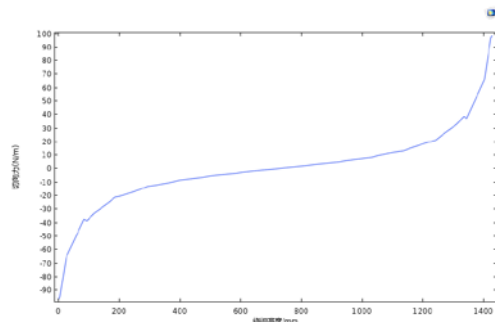


图 4 产品 2 低压绕组单位周向长度线饼切向力

2.3 三维仿真结果分析

为了与变压器的二维计算结果进行验证，本文建立了变压器的三维仿真模型并进行了分析。模型根据变压器计算单中尺寸数据并考虑了垫块和安匝平衡的影响。

2.3.1 三维漏磁场分布

图 5 所示为两台变压器在额定分接下的的绕组漏磁场分布。两台产品的低压螺旋式绕组辐向磁通密度均在两端部附近位置有最大值，其最大值分别为 0.093T 和 0.064T。由此可知，两台变压器的二维、三维绕组

漏磁场分布趋势一致，磁通密度大小吻合较好。

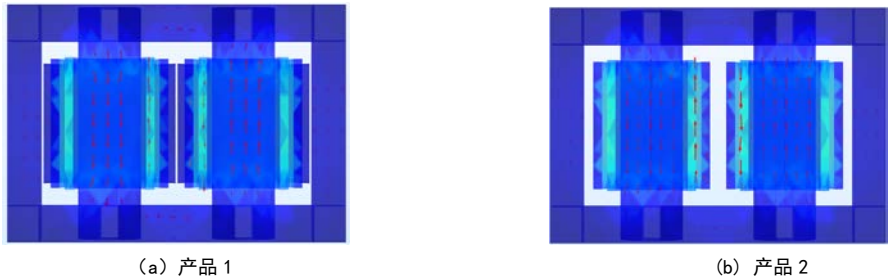


图 5 漏磁场分布图

2.3.2 切向力计算与验证分析

如图 6 和图 7 所示，两台变压器低压螺旋式绕组所受切向力最大值分别为为 63.9N/m 和 116.3N/m。将 F_{θ} 沿轴向进行线积分直至 $B_r=0$ 得到产品 1 低压绕组上部所受最大切向力为 2994.2N，下部所受最大切向力为 -3032.9N，其所受扭矩为： $M_{\theta}=F_{\theta} * r=3032.9 \times 0.814=2485.1 \text{N.m}$

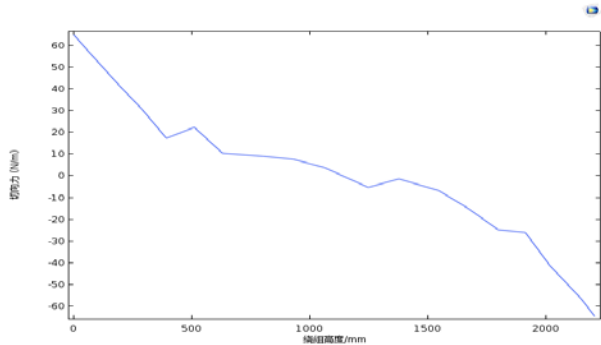


图 6 产品 1 低压绕组单位周向长度线饼切向力

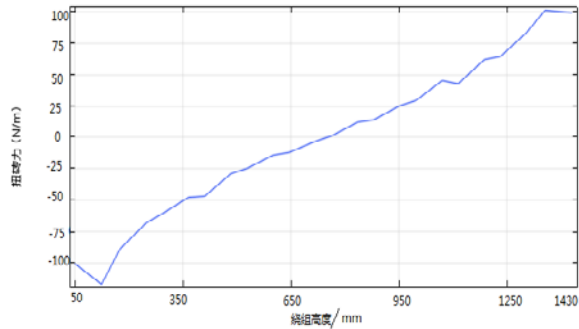


图 7 产品 2 低压绕组单位周向长度线饼切向力

同样的，可以得到产品 2 低压绕组上部所受最大切向力为 7104.7N，下部所受最大切向力为-7011.1N，其所受扭矩为： $M_{\theta}=F_{\theta} * r=7104.7 \times 0.382=2713.9 \text{N.m}$ 。通过与实际变压器的螺旋式绕组辐向磁通密度的对比发现，三维仿真模型相比二维仿真模型更接近实际情况。针对螺旋角不同的两台变压器，这两种仿真模型所得结果相对误差均小于 10%，由此可以证明模型计算方法是可靠的。

2.3.3 螺旋角对切向位移的影响分析

在上述分析结果的基础上，为变压器产品 1 和 2 的低压绕组加载短路电流。

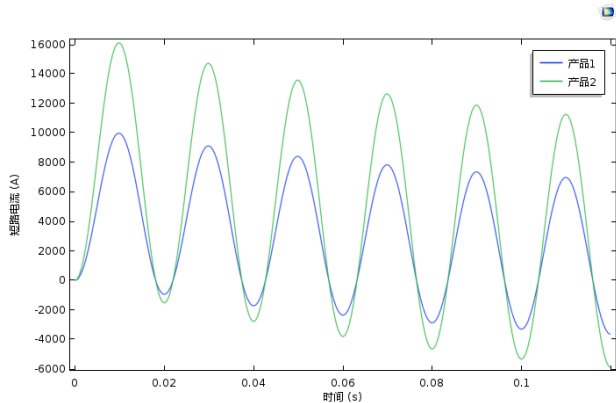


图 8 低压绕组短路电流示意图

由图 8 所示在 0.01s 短路电流有最大值。对三维仿真结果进行后处理得到了低压螺旋式绕组在短路作用下 ($t=0.01s$)xy 切面的位移情况。分析可知,此切面的辐向磁通方向与电流的轴向分量垂直,辐向磁通与电流轴向分量作用产生切向力并将产生切向位移。由图 10 所示可知,两台变压器的低压螺旋式绕组有较大的切向位移,特别是在绕组的端部位置。这是因为绕组在端部的辐向磁通最大而电流轴向分量沿绕组高度均匀分布并且绕组的上端部和下端部辐向磁通方向相反。导致的结果就是绕组将产生扭转现象,绕组半径趋于缩小且绕组端部切向位移较大。

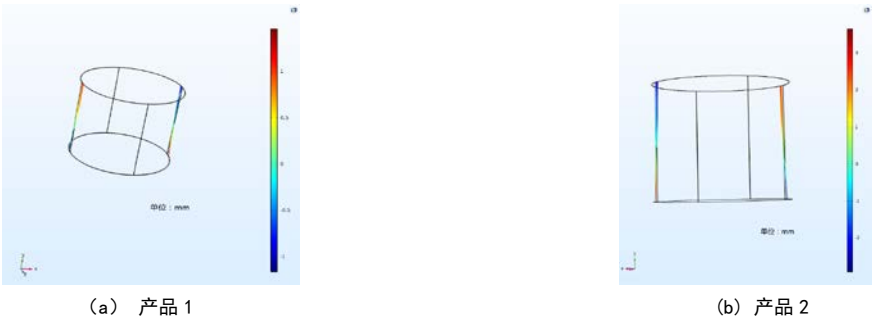


图 9 变压器低压螺旋式绕组切向位移

为了分析螺旋角对绕组变形的影响,仿真中沿绕组高度分别设置了若干观测点以考察该处的切向位移。表 2 和表 3 可以看出,产品 1 (平均螺旋角为 0.357°) 低压螺旋式绕组在短路情况下的最大切向位移出现在高度为 35mm 的位置,最大切向位移为 1.107mm。产品 2 (平均螺旋角为 0.739°) 变压器低压螺旋式绕组短路情况下的最大切向位移出现在高度为 1362mm 的位置,最大切向位移为 3.413mm。两台产品的最大切向位移均出现在距离绕组端部附近 1/4 高度范围内的位置,这与理论分析的结果是一致的。

表 2 产品 1 切向位移

高度位置 (mm)	切向位移 (mm)
35	1.107
110	0.739
809	0.240
1218	-0.036
1851	-0.328
2300	-1.035

表 3 产品 2 切向位移

高度位置 (mm)	切向位移 (mm)
20	-2.81
50	-2.676
429	-0.802
688	-0.173
908	2.141
1387	3.413

可以看出,双螺旋式绕组中切向位移比单螺旋式绕组更大。这是因为低压双螺旋式绕组通常较单螺旋式绕组有更大的螺旋角以至于绕组中有更多的轴向电流分量,因此会导致更为严重的扭转变形。所以在设计制造中,双螺旋式绕组相比单螺旋式绕组需要在结构工艺上采取更加严格的抑制措施。

2.3.4 轴向预压紧力对切向位移的影响

为了确保变压器绕组在动态短路力的作用下仍能安全运行，必须保证绕组的轴向预压紧力始终大于轴向动态短路力。通过增大轴向预压紧力可以使垫块和线饼间的压力变大，从而增加线饼和垫块间的摩擦力以减小相对位移。但是如果施加的轴向预压紧力过大也可能导致线饼坍塌和轴向失稳，进而引起绝缘损坏。为此本文研究了在一定范围内轴向预压紧力对切向位移的影响。

仿真中将 3.5MPa 作为起始轴向预压紧力的基准值并标记为 F_t ，通过增大轴向预压紧力的倍数，分析了两台变压器绕组切向位移的最大值随轴向预压紧力的变化规律。

从图 10 可以知道，低压螺旋式绕组在短路作用下 ($t=0.01s$)，随着轴向预压紧力倍数的增加，低压螺旋式绕组的切向位移呈非线性减小。对于产品 1，轴向预压紧力的倍数增大到 1.3 以后，切向位移的变化斜率变的非常缓慢。对于产品 2，轴向预压紧力的倍数增大到 1.4 以后，切向位移的变化斜率也小到可以忽略不计。因此对于这两台变压器来说，通过施加不超过轴向预压紧力基准值的 1.4 倍可以最大限度地减小切向位移，并且不会引起轴向失稳。

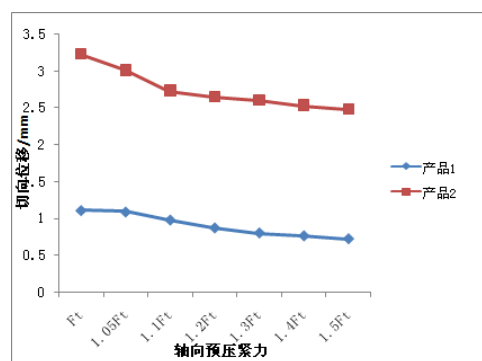


图 10 轴向预压紧力下的切向位移

3 结论

本文分别对具有单螺旋式绕组和双螺旋式绕组的电力变压器二维、三维漏磁场及短路时的切向力进行了仿真研究，得到了变压器短路时低压螺旋式绕组的切向力大小、分布规律和扭转变形。通过两种建模结果的对比分析，检验了计算方法的可靠性；在此基础上，研究了螺旋角和轴向预压紧力对单螺旋式绕组和双螺旋式绕组切向位移的影响，得到了产品设计中减小绕组切向位移的一些应用结论。

REFERENCES

- [1] XU Ji-tai . Torque of High Current Helical Winding under Current Component and Current in Core [J].TRANSFORMER .2012, 49(1): 1-7.
- [2] LIU Shuang, MENG Qing-min, LUO Jun-ting,et al. Analysis of Twist Problem of Helical Winding in Large Transformer [J].TRANSFORMER .2011,48(11) :1-4.
- [3] YANG Jun-hai,ZHANG Yuan-lu. Numerical calculation of mechanical characteristics for transformer in short-circuit and the influence of winding structural parameters on its performances[J]. Transformer, 1997, 34(10): 28-32.
- [4] Zhao Z.R,Wu Y.J,Gu X.J,et al. Multi-physics coupling field finite element analysis on giant magnetostrictive materials smart component[J].Journal of Zhejiang University SCIENCE A,2009,10(5):653-660
- [5] HE Yi-yan. Discussion on strenthening ability to withstand short-circuit of transformer in design, technology, structure and test, etc[J]. Transformer, 1997, 34(10): 1-6.
- [6] Garcíá B,Burgos J.C,Alonso A.M. Transformer Tank Vibration Modling as a Method of Detecting Winding Deformations—Part II :Experimental Verification[J].IEEE Trans.Power Del.,2006,21(1):164-169

- [7] Wang Jian-min, Jia Jian-gang, Liu Lan-rong. Research on Numerical Simulation of Three Dimensional Leakage Magnetic Field and Short Circuit Impedance of Phase ~~2009, 42(4): 971~~, 2009, 42(4): 971
- [8] Anouar Belahcen. Vibration of rotating electrical machines due to Magneto-mechanical coupling and magnetostriction[J]. IEEE Transactions on Magnetices, 2006, 42(4): 971
- [9] Michael E., Hermann L. Investigation of load noise generation of large power transformer by means of coupled 3D FEM analysis [J]. COMPEL, 2007, 26(3): 788-799
- [10] ZHOU Jian-ping, NI Qian-hang, YUAN Hua-ming. Treatment and diagnosis of winding deformation in a power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(10): 89-90.

【作者简介】



¹ 许俞彬（1991-），男，汉，硕士，工程电磁场与磁技术，河北工业大学 2015 级硕士研究生。

Email: 2573251314@qq.com

² 景崇友（1963-），男，汉，保定天威保变电气股份有限公司输变电技术研究

院院长，长期从事变压器新产品与新技术的开发工作。

³ 王建民（1961-），男，汉，保定天威保变电气股份有限公司高级主任工程师、教授级高工，长期从事变压器类新产品与新技术的开发工作。