

# 考虑残余应力的大型电力变压器绕组 短路强度计算与分析

王欢, 李岩

(沈阳工业大学 特种电机研究所, 辽宁 沈阳 110870)

**摘要:** 在电力变压器绕组绕制过程中, 绕组截面存在部分残余应力, 会对绕组抗短路强度产生不利的影 响, 现有电力变压器绕组短路强度研究没有对该部分应力予以考虑。推导了圆环形绕组绕制过程中产生残余 应力的计算模型, 以试验变压器为例对内绕组的辐向短路强度进行了仿真计算, 考虑了绕制过程中产生残余 应力的影响, 并采用国家标准中部分强度考核指标进行了对比校验, 结果表明绕制过程中产生的应力同时 包含压缩和拉伸分量, 残余应力对电力变压器抗短路强度有不利的影 响, 对环形压缩应力影响较小, 对辐向 翘曲应力影响较大; 所提变压器绕组短路强度计算模型能够考虑残余应力的影响, 通过对比试验测量值验 证了数值计算模型的准确性。

**关键词:** 电力变压器; 短路强度; 残余应力; 有限元分析

**中图分类号:** TM 41

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.01.015

## 0 引言

随着国家智能电网战略的推进, 电力系统的短 路容量日益增长, 相应的短路电流也随之增长, 大容 量电力系统中的短路电流峰值甚至可达到几十万安 培, 部分电网设计规划做出了针对性的调整, 保证 网架坚强可靠已成为现代电网发展的关键性需求。 电力变压器作为输配电网中的关键设备, 其运行质 量的好坏直接影响电网系统的安全稳定<sup>[1-5]</sup>。因此, 电力变压器应具备足够的抗短路能力, 以应对不同 类型的短路冲击。

电力变压器在电力系统中运行, 遭受突发性短 路是不可避免而又要竭力避免的。变压器突发短路 时, 产生的大小为额定电流几十倍的短路电流与该电 流在绕组区域产生的强大磁场相互作用, 使变压器 绕组承受巨大的轴向及辐向短路电动力, 在如此大 的电动力作用下, 变压器极有可能发生绕组变形, 绕 组的匝绝缘断裂及导线拉断会严重影响绕组的绝缘 性能<sup>[6-9]</sup>。在实际工况中, 屡见变压器产品抗短路能 力不及国家标准要求, 甚至发生投运即遭损毁的事 故。因此, 有必要对变压器抗短路能力进行更加深 入的分析与研究<sup>[10-11]</sup>。

变压器抗短路强度不足一直是引起变压器事 故发生的主要原因, 也是研究的热点问题。最初, 变 压器抗短路静态强度是主要的研究方向。文献<sup>[12]</sup>基 于前人的研究成果, 结合材料力学中的塑性理论, 建 立了变压器绕组的塑性模型, 通过大量试验数据的

分析得出了经验系数; 文献<sup>[13]</sup>分析了变压器绕组 的电磁力及强度问题, 并对变压器的静态特性进行 了分析与研究; 文献<sup>[14]</sup>给出了绕组材料的应力-应 变曲线, 对变压器静态强度及稳定性的计算进行了 较完整的归纳和总结, 为变压器抗短路强度问题的 研究提供了理论基础及参考依据; 文献<sup>[15]</sup>研究了 短路引起的大型电力变压器绕组的形变, 对变压器 绕组的受力情况进行了系统的分析, 并分析了绕组 结构对轴向冷却及匝间绝缘的影响; 文献<sup>[16]</sup>利用 大型变压器短路电磁力计算软件进行了绕组短路力 的分析, 并用场-路耦合的有限元分析方法对变压器 进行了静态强度和动态强度的分析; 文献<sup>[17-18]</sup>概 述了国内外学者研究变压器绕组短路强度问题的多 种理论及提高绕组短路强度的方法。但上述研究均 未考虑绕制过程中产生的残余应力对变压器绕组短 路强度的影响。

本文推导了变压器绕组绕制过程中产生的残 余应力的计算模型, 以试验变压器为例对绕组的辐 向短路强度进行了仿真计算和研究, 考虑了绕制过 程产生残余应力的不利影响, 并采用国家标准中的 部分强度考核指标进行了对比校验。

## 1 机理分析

变压器绕组通常绕制成环形结构, 铜质直导 线在绕制过程中弯曲会在导线截面产生部分应变, 以 致出现导线内表面压缩、外表面拉伸的现象, 如图 1 所 示。这种残余应力很小, 在额定工况下运行时不会对 变压器绕组产生影响, 但发生短路故障时, 巨大的短 路电流流经相关绕组, 漏磁轴向分量与周向短路电 流共同作用在绕组中产生辐向电动力, 外绕组在圆

收稿日期: 2017-03-22; 修回日期: 2017-10-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177103)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177103)

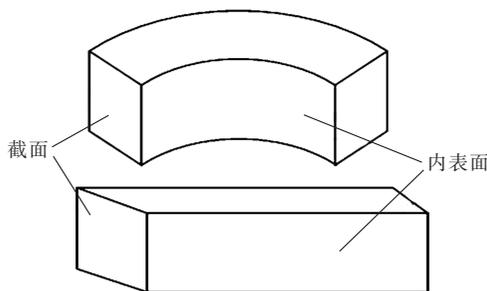


图 1 变压器绕组绕制示意图

Fig.1 Schematic diagram of transformer winding

周方向受张力,即环形拉伸力,有扩大直径的趋势;内线圈在圆周方向受到压力,即环形压缩力,有朝铁芯方向变形的趋势,如图 2 所示。其中内绕组上的环形压缩力与前述残余应力方向相同,变压器抗短路强度设计中没有考虑这种情况,因此,在短路工况下,变压器绕组可能在承受低于预期载荷的冲击时发生破坏。

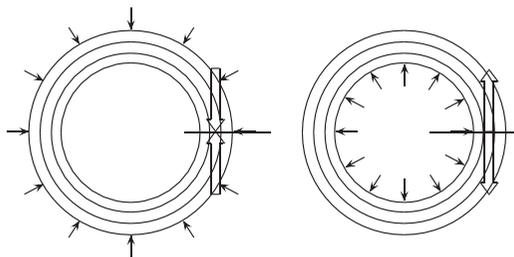


图 2 变压器应力

Fig.2 Stress of transformer

## 2 计算模型

考虑变压器绕组绕制过程产生的残余应力从内向外分布并不均匀,且目前研究成果中未见等效该部分应力的解析表达式,因此,本文将采用能够解决分布问题的有限元数值计算方法对考虑残余应力的变压器绕组短路强度问题进行仿真研究。

### 2.1 残余应力

变压器绕组通常绕制成圆环形结构,绕制过程产生弯矩,使得导线内表面压缩、外表面拉伸,设绕组圆环的轴向为  $Z$  方向,辐向为  $Y$  方向,周向为  $X$  方向。可知绕制前, $XZ$  面为绕组的内外表面, $YZ$  面为绕组的截面, $XY$  面为弯曲变化面,各个面相互垂直。

设绕制前,绕组内外表面  $XZ$  面在弯曲变化面  $XY$  上的投影为线段  $PQ$ 、 $AB$ ,绕组截面  $YZ$  面在弯曲变化面  $XY$  上的投影为线段  $PA$ 、 $QB$ ,则绕制后,线段  $PQ$ 、 $AB$ 、 $PA$ 、 $QB$  变化为  $P^*Q^*$ 、 $A^*B^*$ 、 $P^*A^*$ 、 $Q^*B^*$ ,如图 3 所示。文献[19]的研

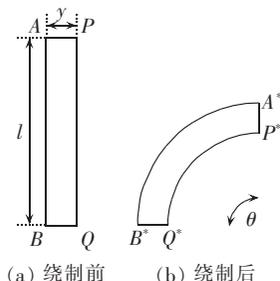


图 3 参数示意图

Fig.3 Schematic diagram of parameters

究中将  $XZ$  面定义为中性面,并指出在中性面上纵向纤维由缩短到伸长逐渐连续变化,必存在不受压且不受拉的中性层,因此,中性面的长度在绕制过程中保持不变,为了推导绕组在绕制过程中各层周向从内向外的变化规律,不妨假设绕组由无数层纵向纤维组成,设  $AB$  为中性面在弯曲变化面上的投影, $PQ$  为靠近中性面的纵向纤维内表面在弯曲变化面上的投影,通过文献[19]中给出的位移测量数据,可以看出绕制过程中辐向变化可忽略不计,则有如下关系。

绕制后有:

$$P^*A^* = PA = Q^*B^* = QB = y \quad (1)$$

则内表面投影  $PQ$  的应变可表示为:

$$v = \lim_{Q \rightarrow P} \frac{P^*Q^* - PQ}{PQ} \quad (2)$$

设绕制前中性面周长为  $l$ ,绕制后内表面周长为  $l^*$ ,则应变表达式可表示为:

$$v = \lim_{l \rightarrow 0} \frac{l^* - l}{l} \quad (3)$$

设绕制后  $A^*B^*$  的圆心角为  $\theta$ ,半径为  $r$ ,则绕制后中性面的周长可表示为:

$$l = r\theta \quad (4)$$

绕制后内表面的周长可表示为:

$$l^* = (r - y)\theta \quad (5)$$

则应变表达式为:

$$v = \lim_{l \rightarrow 0} \frac{(r - y)\theta - r\theta}{r\theta} = -\frac{y}{r} \quad (6)$$

由式(6)可以看出,由绕制过程产生的应变变量是与中性面距离相关的物理量,同心面上的应变变量相同。通过式(6)可以给出绕组上任意一点在绕制过程中产生的初始应变,通过 Ramberg-Osgood 关系可以得到绕组上任意一点在绕制过程中产生的初始应力,如式(7)所示。

$$\frac{v}{v_0} = \frac{\tau}{\tau_0} + \frac{3}{7} \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right)^n \quad (7)$$

其中, $\tau$  为绕组中产生的应力; $v$  为绕组中产生的应变; $v_0$ 、 $\tau_0$  和  $n$  为与材料相关的系数,相关系数的实验测量值分别为 0.000675 m、74.53 MPa 和 12.6;绕组的材料为铜。

### 2.2 电磁力

为了方便与结构场耦合,根据麦克斯韦方程组,采用 A-V 法进行电磁场计算。

电场计算约束方程为:

$$-\nabla \cdot \frac{\partial(\epsilon_0 \epsilon_r \nabla \cdot \mathbf{V})}{\partial t} - \nabla \cdot (\sigma \nabla \cdot \mathbf{V} - \mathbf{J}^e) = 0 \quad (8)$$

其中, $\epsilon_0$  为真空介电常数,通常取  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m; $\epsilon_r$  为相对介电常数; $\sigma$  为电导率; $\mathbf{J}^e$  为电流密度; $\mathbf{V}$  为电势; $\nabla$  为哈密顿运算符。

磁场计算约束方程为:

$$\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}^e \quad (9)$$

其中,  $\mu_0$  为真空磁导率, 通常取  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ;  $\mu_r$  为相对磁导率;  $\mathbf{A}$  为矢量磁位。

本构方程为:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (10)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}^e \quad (11)$$

其中,  $\mathbf{B}$  为磁通密度;  $\mathbf{H}$  为磁场强度;  $\mathbf{E}$  为电场强度。

边界条件为:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{H} = 0 \quad (12)$$

其中,  $\mathbf{n}$  为铁芯表面的法线方向。

电场与磁场通过计算求得的电流密度  $\mathbf{J}^e$  进行耦合, 通过本构方程中材料属性的设置实现电场、磁场的二次耦合。

结构场计算约束方程为:

$$\mathbf{m} \frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2} + \boldsymbol{\zeta} \frac{d\mathbf{u}}{dt} + \mathbf{k}\mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (13)$$

其中,  $\mathbf{m}$  为质量矩阵;  $\boldsymbol{\zeta}$  为阻尼系数矩阵;  $\mathbf{u}$  为位移;  $\mathbf{k}$  为刚度矩阵;  $\mathbf{f}$  为洛伦兹力, 单位为  $\text{N/m}^3$ 。

结构场与电磁场的耦合采用计算力密度的方式实现, 如式(14)所示。

$$\mathbf{f} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (14)$$

将洛伦兹力贡献代入结构场计算:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{f} = \rho \ddot{\mathbf{u}} \quad (15)$$

其中,  $\rho$  为密度;  $\ddot{\mathbf{u}}$  为加速度矢量。

根据胡克定律, 应力、应变之间的关系为:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{E}_t \boldsymbol{\epsilon} \quad (16)$$

其中,  $\mathbf{E}_t$  为弹性模量。

### 3 算例分析

以一台试验变压器为建模对象, 对短路试验中的部分工况进行仿真计算。该试验变压器模拟产品 ODFPS-250000/500 变压器(容量为 250000 MV·A, 一次侧额定电压为 500 kV)绕组中间部分 1/6 总高度的段数, 试验中绕组的线规与产品中压绕组的线规相同, 内、外绕组的径向尺寸与产品变压器中压绕组的径向尺寸相同, 试验变压器其他的基本数据均参考产品变压器的实际数据<sup>[20]</sup>。

如前文所述, 内绕组所受的环形压缩应力与本文提出的残余应力方向相同, 对变压器抗短路能力有不利的影响, 因此选取试验变压器内绕组作为短路强度的仿真计算与分析对象, 计算流程如图 4 所示。

#### 3.1 结果与分析

通过有限元计算结果可以发现, 变压器绕组绕制过程产生的残余应力在单根线匝内辐向呈线性变化, 内绕组上压缩应力与拉伸应力共同存在, 如图 5 所示, 即绕制过程产生的残余应力与内绕组承受电磁

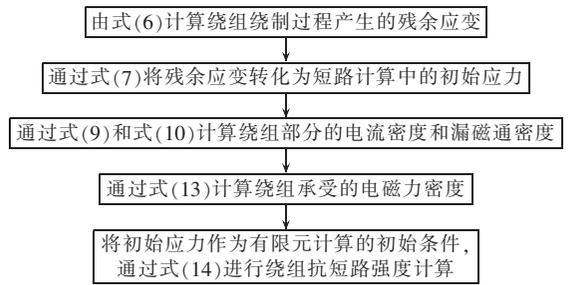


图 4 短路强度计算流程图

Fig.4 Flowchart of calculating short circuit strength

力载荷时的压缩应力方向不完全一致。

绕组由线匝紧密绕制, 线匝各自承载电磁力载荷, 同时又相互影响, 构成了变压器绕组短路强度这个经典又复杂的问题, 对内绕组的残余应力进行计算, 结果如图 6 所示, 可以看出内绕组整体的残余应力分布在辐向呈锯齿形, 如图 7 所示, 而在以往的研究中内绕组部分所受电磁力载荷辐向分布规律为单调线性, 即绕制过程产生的残余应力与内绕组承受电磁力载荷的辐向分布规律不一致。

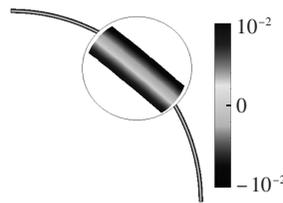


图 5 单根线匝残余应力云图

Fig.5 Residual stress cloud chart of single wire

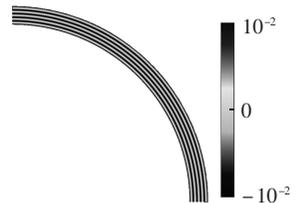


图 6 内绕组残余应力云图

Fig.6 Residual stress cloud chart of inner winding

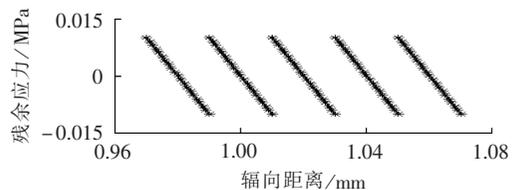


图 7 内绕组残余应力分布

Fig.7 Residual stress distribution in inner winding

产品 ODFPS-250000/500 变压器的额定电流为 1057.9A, 短路电流峰值为 17752.7 A, 采用国家标准 GB 1094.2—2008 中平均环形压缩应力与辐向翘曲应力作为考核指标, 数值计算的结果见表 1。

表 1 考核指标计算结果

Table 1 Calculative results of assessment indicators

有无残余应力	压缩应力/MPa	翘曲应力/MPa
无	60.26	469.91
有	62.44	222.26

变压器绕组绕制过程产生的残余应力对 2 个抗短路强度考核指标均有不利影响, 残余应力与考核指标中平均环形压缩应力方向相同, 但通过数值计算结果可以看出, 在最严重短路工况下, 残余应力对

内绕组环形压缩应力的影响并不明显,相差3%,而残余应力对内绕组辐向翘曲应力的影响很大,相差53%。当变压器绕组承受巨大的短路电磁力载荷时,绕组部分的平均环形压缩应力的幅值较大,残余应力的相对影响并不明显,但绕组在承受电磁力的翘曲过程中处于极限状态,残余应力的存在使得绕组截面部分进入屈服状态,加大了外载荷产生的非线性效应,使绕组过早的发生弹塑性破坏,因此,残余应力对辐向翘曲应力的影响更为明显。

### 3.2 试验与验证

试验变压器内部采用钢筒支撑,串联反接内、外绕组保证绕组在轴向高度安匝平衡,通过控制电抗值,使得试验变压器与产品变压器的抗短路能力具有可比性<sup>[20]</sup>。

通过数值计算可得内绕组轴向磁密最大值为1.49T,试验中测量轴向磁密最大值为1.4T,数值计算误差为6.4%,满足工程需要。试验中通过在绕组线匝间插入电阻式应变片测量径向应力。折算后绕组轴向磁通密度的计算值为1.49T,测量值为1.4T,绝对误差为0.09T,相对误差为6.4%;绕组单位径向力计算值为117.032N/mm,测量值为122.5N/mm,绝对误差为5.477N/mm,数值计算的相对误差为4.7%。

## 4 结论

本文对电力变压器绕组绕制过程中残余应力的产生机理进行了描述,以试验变压器为建模对象,考虑了残余应力对变压器绕组抗短路强度的影响,得出了以下结论:

a. 给出了电力变压器绕组环形绕制过程产生残余应力的计算模型,可以作为变压器绕组抗短路强度数值计算的初始应力条件;

b. 在考虑残余应力的条件下,对试验变压器进行了短路强度的数值计算,结果表明,残余应力在辐向线性分布,绕制后绕组部分压缩应力与拉伸应力共同存在,残余应力与承受电磁力载荷的辐向分布规律不一致;

c. 采用国家标准中的环形压缩应力和辐向翘曲应力进行校核时,残余应力均产生不利影响,对环形压缩应力的影响较小,相差3%,对辐向翘曲应力的影响较大,相差53%;

d. 通过对比试验测量值,验证了计算模型的可靠性。

### 参考文献:

- [1] 程军照,陈江波,张曦,等. 特高压1000kV降压220kV变压器的应用前景分析[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(15):142-148.  
CHENG Junzhao, CHEN Jiangbo, ZHANG Xi, et al. Application prospect analysis for 1000kV/220kV UHV transformer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 142-148.
- [2] 王佳音,白保东,刘宏亮,等. 直流偏磁对变压器振动噪声的影响[J]. 电工技术学报,2015,30(8):56-61.  
WANG Jiayin, BAI Baodong, LIU Hongliang, et al. Research on vibration and noise of transformers under DC bias[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 56-61.
- [3] 李锦彪. 曲折形联结变压器短路阻抗计算的能量法[J]. 电工技术学报,2013,28(2):424-426.  
LI Jinbiao. Calculation of zigzag transformer impedance using energy method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 424-426.
- [4] 李洪奎,井永腾,李岩,等. 超高压双器身结构的变压器设计与电磁分析[J]. 高电压技术,2016,42(7):2322-2328.  
LI Hongkui, JING Yongteng, LI Yan, et al. Structure design and electromagnetic analysis of EHV double-body power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2322-2328.
- [5] 张杰,罗隆福,李勇,等. 基于残量变换法的新型换流变压器短路故障计算[J]. 电力自动化设备,2008,28(12):6-10.  
ZHANG Jie, LUO Longfu, LI Yong, et al. Short-circuit calculation of converter transformer based on remnant conversion[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(12): 6-10.
- [6] 张坤,王丰华,廖天明,等. 应用复小波变换检测突发短路时的电力变压器绕组状态[J]. 电工技术学报,2014,29(8):327-332.  
ZHANG Kun, WANG Fenghua, LIAO Tianming, et al. Detection of transformer winding deformation under sudden short-circuit impact based on complex wavelet algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 327-332.
- [7] 徐大可,张言苍,李彦明. 变压器绕组变形在线监测的研究[J]. 电力自动化设备,2002,22(8):8-11.  
XU Dake, ZHANG Yancang, LI Yanming. Research on on-line winding deformation monitoring of power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(8): 8-11.
- [8] 弓杰伟,马宏忠,姜宁,等. 电力变压器的有限元建模与绕组松动分析[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):78-84.  
GONG Jiewei, MA Hongzhong, JIANG Ning, et al. Finite element modeling and winding looseness analysis for power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 78-84.
- [9] 范竞敏,曹建,丁家峰,等. 电力变压器绕组状态实时监测算法[J]. 电力自动化设备,2010,30(3):81-85.  
FAN Jingmin, CAO Jian, DING Jiafeng, et al. Real-time monitoring algorithm of power transformer windings status[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(3): 81-85.
- [10] 杨理才,孙结中,刘蔚,等. 变压器匝间短路建模及其实际应用[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(8):140-145.  
YANG Licai, SUN Jiezhong, LIU Wei, et al. Transformer interturn short circuit modeling and its application[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 140-145.
- [11] 贺元康,姜山,郑州,等. 高阻抗变压器相间短路后备保护灵敏度的提高[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(3):67-71.  
HE Yuankang, JIANG Shan, ZHENG Zhou, et al. Sensitivity enhancement of backup protection for high impedance transformer phase-to-phase faults[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 67-71.
- [12] 变压器专业委员会. 变压器线圈短路时的机械强度(上)[R]. 北京:变压器专业委员会,1980.
- [13] 瓦修京斯基. 变压器的理论与计算[M]. 崔立君,杜恩田,译. 北京:机械工业出版社,1983:3-15.

- [14] 陈闾琪. 变压器线圈短路强度计算综述[J]. 变压器,1974,21(5):1-19.  
CHEN Langqi. Review of calculation of coil short-circuit strength of transformer[J]. Transformer,1974,21(5):1-19.
- [15] KOZLOWSKI M,PEWCA W. Short-circuit performance of a stretched transformer winding with regard to its actual mechanical characteristics[J]. European Transactions on Electrical Power,1996,6(4):259-65.
- [16] 梁振光,唐任远. 大型电力变压器绕组的短路强度问题[J]. 变压器,2003,40(8):9-12.  
LIANG Zhenguang,TANG Renyuan. Short circuit strength of large power transformer windings[J]. Transformer,2003,40(8):9-12.
- [17] 李文海. 有关变压器承受短路力问题的商讨[J]. 变压器,2005,42(8):8-12.  
LI Wenhai. Discussion on problems to withstand short-circuit force in transformer[J]. Transformer,2005,42(8):8-12.
- [18] KULKARNI S V,KUMBHAR G B. Analysis of short circuit performance of split-winding transformer using coupled field-circuit approach[C]//Power Engineering Society General Meeting. Tampa,FL,USA:IEEE,2007:24-28.
- [19] CRAIG R R. Mechanics of materials[M]. 2nd ed. New York,USA:Wiley,2000:338-345.
- [20] 孟庆民,陈玉红,洛君婷,等. 大容量变压器内绕组辐向失稳特性的模拟研究[J]. 变压器,2010,47(4):32-39.  
MENG Qingmin,CHEN Yuhong,LUO Junting,et al. Simulation research on radial stability of internal winding in large transformer[J]. Transformer,2010,47(4):32-39.

## 作者简介:



王 欢

王 欢(1982—),女,辽宁沈阳人,博士研究生,主要研究方向为变压器漏磁场及短路力(E-mail:huanhuan-0614@163.com);

李 岩(1962—),男,吉林吉林人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为变压器、永磁电机以及工程电磁场问题。

## Calculation and analysis of short circuit strength of large-scale power transformer windings considering residual stress

WANG Huan, LI Yan

(Institute of Special Motors, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** In the process of power transformer conductor winding, some residual stress exists in the winding section, which has unfavorable effects on the anti-short circuit strength of winding. The existing research on the short circuit strength of power transformer winding does not consider this part of stress. The calculation model of the residual stress in the circular conductor winding process is deduced. Taking the test transformer as an example, considering the effects of the residual stress in the conductor winding process, the radial short circuit strength of inner winding is simulated and calculated, which is checked by some strength assessment indicators in the national standard. Results show that the stress in the conductor winding process includes compressive and tensile components and the residual stress has adverse effects on the anti-short circuit strength of power transformer windings: smaller effects on annular compressive stress and greater effects on radial warping stress. The proposed calculation method of short circuit strength of power transformer windings considers the effects of residual stress, whose accuracy is verified by comparison test measurements.

**Key words:** power transformers; short circuit strength; residual stress; finite element analysis