

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.06.025

基于有限元的电力变压器绕组弹塑性变形分析

张海军¹, 张 华¹, 马 强¹, 刘彦琴², 王曙鸿³

(1. 湖北文理学院纯电动汽车动力系统设计与测试湖北省重点实验室, 湖北 襄阳 441053; 2. 国网四川省成都电力公司, 成都 610023; 3. 西安交通大学电气学院, 西安 710049;)

摘要: 电力变压器绕组受短路电磁力作用后,可能出现可恢复的弹性变形或不可恢复的塑性变形。文中通过电磁-结构耦合有限元分析,对短路电流冲击作用下的变压器绕组弹、塑性变形特性进行理论分析和三维数值模拟,以揭示绕组弹性和塑性变形机理。首先通过有限元电磁计算分析了绕组内部短路电磁力分布,其中绕组线饼的周向电磁力分布不均是导致绕组变形的重要原因。在弹性变形计算的基础上,依据材料学的弹塑性变形分析理论,构建了绕组累积变形的量化分析模型,能够反映多次短路电磁力作用后绕组变形的累积效应。最后,以一台110 kV/25 000 kVA、双绕组电力变压器模型为例,进行绕组弹、塑性变形计算。结果可以为变压器绕组动稳定性能和绕组塑性变形预测研究提供理论参考。

关键词: 电力变压器绕组; 短路电磁力; 弹性变形; 塑性变形; 累积效应; 有限元

Analysis on Elastic and Plastic Deformations of Power Transformer Winding Based on Finite Element Method

ZHANG Haijun¹, ZHANG Hua¹, MA Qiang¹, LIU Yanqin², WANG Shuhong³

(1. Hubei Key Laboratory of Power System Design and Test for Electrical Vehicle, Hubei University of Arts and Science, Hubei Xiangyang 441053, China; 2. State Grid Sichuan Chengdu Electric Power Company, Chengdu 610023, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Subjected to short-circuit electromagnetic force, the recoverable elastic deformation or irreparable plastic deformation in power transformer windings may be produced. In this paper, in order to reveal the elastic and plastic deformation mechanism of the winding, the elastic and plastic deformation characteristics of transformer windings under the impact of short-circuit current are analyzed theoretically and numerically by electromagnetic-structural coupling finite element analysis. Firstly, the distribution of the short circuit electromagnetic force in the winding is analyzed by the finite element electromagnetic calculation, in which the uneven distribution of the circumferential electromagnetic force of the winding disc is the important cause of the winding deformation. On the basis of elastic deformation calculation and elastic-plastic deformation analysis theory of materials, a quantitative analysis model of winding cumulative deformation is constructed, which can reflect the cumulative effect of winding deformation after multiple short-circuit electromagnetic forces. Finally, taking an 110 kV/25 000 kVA double winding power transformer model as an example, the elastic and plastic deformation of the winding is calculated. The results can provide a theoretical reference for the dynamic stability of transformer windings and the prediction of winding plastic deformation.

Key words: power transformer winding; short circuit electromagnetic force; elastic deformation; plastic deformation; cumulative effect; finite element

0 引言

电力变压器是电力系统中的关键枢纽设备,其

安全性和稳定性直接影响电网供电的可靠性。在变压器运行过程中,巨大的系统短路电流是引起变压器绕组变形的重要原因,特别是在变压器出口或

收稿日期:2019-01-04; 修回日期:2019-03-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577140);“机电汽车”湖北省优势特色学科群开放基金资助。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (51577140), the Hubei Superior and Distinctive Discipline Group of Mechatronics and Automobiles.

近区,短路故障更为严重。系统短路可能会使变压器绕组流过的电流增加十几倍,甚至几十倍,进而引起绕组内部电磁力剧烈变化,严重影响绕组结构的机械动稳定性能,甚至导致绕组出现不可恢复的塑性变形而失效或破坏^[1-4]。据统计,绕组变形仍然是直接或间接导致变压器故障的主要原因之一^[5-7]。

现有研究中,主要集中在电力变压器绕组弹性变形分析,而关于绕组塑性变形及其累积效应机理分析的研究还很少。Norris等^[8]在分析运行电力变压器的机械强度中,较早地指出了短路应力的累积效应会对绕组辐向机械强度计算产生重要影响。但没有进行进一步分析和论证。Bai等^[9]基于Miner的线性累积损伤理论研究了变压器的寿命评估方法,其中,提出将机械应力的累积效应作为变压器寿命评估模型重要部分。但作者没有对机械应力的累积效应进行展开研究。姜山^[10]针对变压器绕组在不同次数短路冲击下的累积效应,通过人为改变绕组几何结构的方式来实现形变的累积过程。冯忠信^[11]和张宏博等^[12]分别对循环载荷下金属塑性变形特性和结构中粉细砂在循环荷载作用下的累积变形规律进行了研究。一般情况下,变压器绕组内部线饼所受电磁力分布和变形是不对称的,有必要建立三维变压器绕组模型进行电磁和结构变形分析^[13]。通过电磁和结构耦合分析的数值模拟是获得变压器绕组真实变形状态的主要手段,也可以为实验室进行绕组变形故障模拟提供样本数据参考。

文中对电力变压器绕组受力状态、弹性变形以及塑性变形特性进行了系统分析,在确定短路电磁力的空间分布和动态分布的基础上,基于弹、塑性力学分析原理,建立变压器绕组弹、塑性变形理论变形及变形的累积模型。采用有限元方法对一台110 kV/25 000 kVA、双绕组电力变压器绕组变形特性进行了三维数值计算。

1 绕组短路电磁力学特性

1.1 短路电流计算

当系统突发短路时,流经变压器高、低压绕组中短路电流的大小与短路状态有关,以比较严重的三相同步短路故障为例,变压器绕组的短路电流^[14]为

$$I_k = \frac{U_\phi}{Z_1} \quad (1)$$

变压器动态短路电磁力与短路电流的瞬时值有关^[14]。算例变压器的高、低压绕组的瞬态电流波

形见图1。由图1可以看出:最大瞬时值出现在短路后半周波左右(当 $f=50$ Hz时,时间为0.01 s)。过了变压器绕组短路电流最大值,电流波形会沿指数特性下降和过度,其过渡的快慢和时长主要由系统的电感和电阻决定。

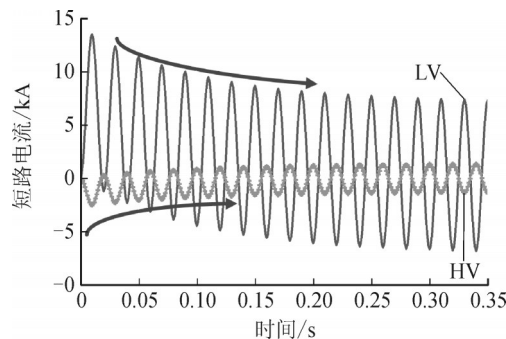


图1 变压器双绕组短路电流波形

Fig. 1 The short circuit current waveform in transformer

1.2 漏磁场分布

基于低频电磁场的麦克斯韦方程组,引入磁矢位函数 A ,关于漏磁场计算的磁矢位泊松方程的边值问题^[15]

$$\begin{cases} \Omega: \frac{\partial}{\partial z}(\nu \frac{\partial A_\theta}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial r}(\nu \frac{1}{r} \frac{\partial(rA_\theta)}{\partial r}) = -J_\phi \\ \Gamma_1: A_\theta = A_{\theta 0} \\ \Gamma_2: \nu \frac{1}{r} \frac{\partial(rA_\theta)}{\partial n} = -H_1 \end{cases} \quad (2)$$

得到任意有限单元节点的磁矢位之后,漏磁场的磁通密度分布为

$$\begin{cases} B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA_\theta)}{\partial r} \\ B_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial(rA_\theta)}{\partial z} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: B_z 为磁通密度的 z 方向分量,T; B_r 为磁通密度的 r 方向分量,T。

1.3 短路电磁力

当变压器绕组线饼导体中通过电流时,根据洛伦兹力原理,导体内将产生电磁力为^[16-18]

$$\begin{cases} F_r = B_z \times J_\phi \\ F_z = B_r \times J_\phi \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: F_z 为轴向电磁力,N; F_r 为辐向电磁力,N。

通常电力变压器中低压绕组受电磁力最大,文中主要对低压绕组进行电磁力计算和分析,见图2。从图2(a)中可以看出:①各线饼所受辐向电磁力大小不同,但总是向里挤压;②在最大分接运行时,低压绕组10号线饼受到的辐向电磁力最大,约为360 kN。从图2(b)中可以看出:①各线饼所受轴向电磁力大小和方向均不相同,线饼自上而下增序编号,其中,电磁力方向向上为正,1-4号线饼受

力为负值,且各值之间变化率较大;6-28号线饼受力为正值,变化率较小;②在变压器联合最小分接运行时,低压绕组1号线饼受到的轴向电磁力最大,约为120 kN。

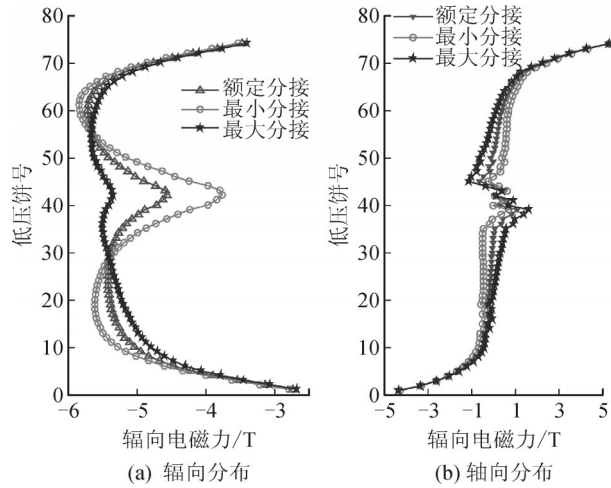


图2 低压绕组各线饼受电磁力分布

Fig. 2 Electromagnetic force distribution of low-voltage winding

此外,各线饼受力是随时间变化的,动态短路电流作用下的瞬态电磁力函数可以表示为

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

式(5)中: f_{im} 为电磁力峰值,N; r_k 与 L_k 分别为绕组电阻和电感参数; ω 为短路电流频率。算例变压器低压绕组某线饼所受电磁力的动态波形见图3。

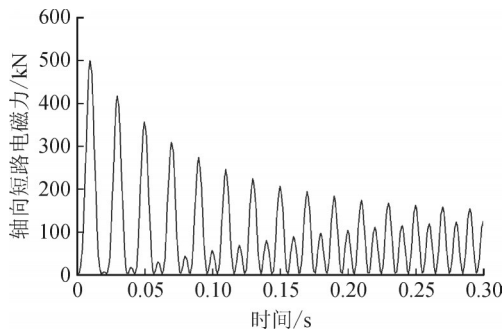


图3 动态电磁力曲线

Fig. 3 Dynamic electromagnetic force curve

2 变压器绕组弹塑性变形分析

绕组受到短路电磁力作用,在其内部可能产生复杂的机械应力分布。当绕组内部应力值小于导体材料(如铜或铝)的屈服强度时,绕组内部只存在可恢复的弹性变形。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^[19],常用铜导线的应力—应变关系曲线见图4。在多次短路电流冲击作用下,塑性变形可

能会出现累积效应。当绕组受到多次短路电流冲击产生巨大的短路电磁力,导致绕组出现大变形破坏、位错或坍塌等现象,增加了变压器发生事故的几率。

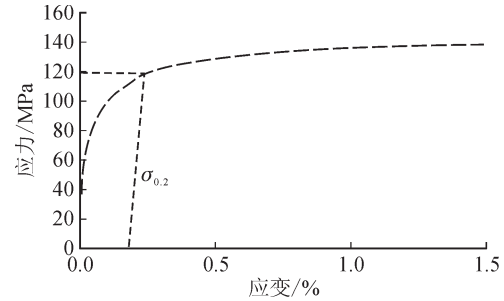


图4 铜导线应力—应变关系

Fig. 4 Stress strain relationship of copper

2.1 弹性变形

根据弹性形变分析理论,应力应变控制方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + f_r = 0 \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} + f_z = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: σ_z 为应力 z 方向分量, $N \cdot mm^{-2}$; σ_r 为应力 r 方向分量, $N \cdot mm^{-2}$; σ_θ 为应力 θ 方向分量, $N \cdot mm^{-2}$; τ_{rz} 为剪切应力分量, $N \cdot mm^{-2}$ 。

几何方程表示为

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r} \\ \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r} \\ \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} \\ \gamma_{rz} = \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: ε_z 为应变 z 方向分量; ε_r 为应变 r 方向分量; ε_θ 为应变 θ 方向分量; γ_{rz} 为剪切应变分量; u_z 为 z 方向位移,m; u_r 为 r 方向位移,m。

本构方程表示为

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)] \\ \varepsilon_\theta = \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \nu(\sigma_z + \sigma_r)] \\ \gamma_{rz} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{rz} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: E 为弹性模量,MPa; ν 为泊松比。

2.2 塑性变形

根据绕组内部应力状态,判断绕组是否发生塑性变形。可以通过求解平衡微分方程组计算绕组内部的应力状态^[20]

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + F_x = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + F_y = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式(7)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 $F(t)$ 分量。

材料力学中的塑性变形的屈服准则用来判断和描述材料的屈服现象, 根据结构内部的应力状态判断屈服起始点, 可以用等效应力 σ_e 来描述所有应力分量的函数。

$$\sigma_e = f(\{\sigma\}) \quad (10)$$

当计算的等效应力值超过了材料的屈服极限 σ_y , 即 $f(\{\sigma\}) = \sigma_y$, 结构内部开始出现塑性应变。

流动准则用来计算材料的塑性变形以及确定塑性应变方向。

$$\{d\varepsilon^p\} = \lambda \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \quad (11)$$

式(11)中: λ 为塑性应变因子, 表示单次加载产生的总塑性应变; Q 为塑性势函数, 决定了塑性应变的变化方向。

强化准则用来描述屈服面中心的运动和屈服面尺寸的变化。当绕组材料发生塑性变形屈服时, 强化准则描述初始屈服准则随着塑性应变的增加, 决定累积变形计算精度。对于多线性随动强化准则, 可以得到:

$$\sigma_e = \left(\frac{2}{3} \{s\}^T [M] \{s\} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$F = \left(\frac{2}{3} \{s\}^T [M] \{s\} \right)^{\frac{1}{2}} - \sigma_k = 0 \quad (13)$$

式(12)-(13)中: s 为应力偏量; σ_k 为等效塑性应力。根据强化准则的作用, 屈服准则表示为

$$F(\{\sigma\}, \kappa, \{\alpha\}) = 0 \quad (14)$$

式(14)中: κ 为塑性能; $\{\alpha\}$ 屈服面平移量; κ 与 $\{\alpha\}$ 为中间变量; κ 定义为整个加载过程的塑性能总和, 表示为

$$\kappa = \int \{\sigma\}^T [M] \{d\varepsilon^p\} \quad (15)$$

式(15)中, $\{\alpha\}$ 与加载历史有关, 表示为

$$\{\alpha\} = \int C \{d\varepsilon^p\} \quad (16)$$

表(16)中, C 为材料参数。

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

对式(7)进行求导计算, 得到

$$dF = \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T [M] \{d\sigma\} + \frac{\partial F}{\partial \kappa} d\kappa + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \alpha} \right\}^T [M] \{d\alpha\} = 0 \quad (17)$$

由式(8)-(9)可分别得到 $d\kappa$ 和 $\{d\alpha\}$, 代入式(11), 得到

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T [M] \{d\sigma\} + \frac{\partial F}{\partial \kappa} \{\sigma\}^T [M] \{d\varepsilon^p\} + \\ & C \left\{ \frac{\partial F}{\partial \alpha} \right\}^T [M] \{d\varepsilon^p\} = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

式(18)中, $\{d\sigma\}$ 可以由应力应变关系得到

$$\{d\sigma\} = [D] \{d\varepsilon^e\} \quad (19)$$

式(19)中: $[D]$ 为应力应变矩阵; ε^e 为弹性应变。

$$\{d\varepsilon^e\} = \{d\varepsilon\} - \{d\varepsilon^p\} \quad (20)$$

式(20)中, ε 为总的应变。综合式(20)可以看出, 塑性应变的增量与总的应变增量、当前的应力状态、屈服形式以及势能面有关。计算塑性应变增量为

$$\{\Delta\varepsilon^p\} = \lambda \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \quad (21)$$

进一步得到等效的塑性应变增量

$$\Delta\varepsilon^p = \sqrt{\frac{2}{3} \{\Delta\varepsilon^p\}^T [M] \{\Delta\varepsilon^p\}} = \lambda \quad (22)$$

在经过 n 次短路电磁力连续冲击作用下, 铜导体材料并经过屈服强化后, 最终的累积塑性应变为

$$\varepsilon^p = \sum \Delta\varepsilon^p \quad (23)$$

可以通过欧拉后向差分方法进行数值计算, 获得绕组内部的塑性应变值和累积变形结果。

3 绕组弹塑性变形的数值算例分析

3.1 算例参数及数据

变压器三维计算模型可以充分考虑轭部铁心对漏磁场的影响。文中采用有限元方法, 利用 Ansoft 15.0 和 Ansys workbench 14.0 软件, 对一台 110 kV/25 000 kVA、双绕组电力变压器进行三维数值模拟。电力变压器主要参数见表 1。

3.2 弹性变形有限元分析与动力学分析

根据算例变压器实际结构及绕组参数, 建立相应的有限元模型。模型中采用四面体单元, 单元数为 201 897 个, 节点数为 142 618。低压绕组线饼和绝缘垫块的几何结构图见图 5。

短路电磁力最大时刻 0.01 s 的低压绕组辐向米塞斯应力分布见图 6。可以看出: 最大应力出现在绕组与撑条相接触的位置。

绕组轴向位移分布分别见图 7。由于变压器绕组采用了端部线饼固定约束, 所以最大位移在中部

成对称分布。

表1 110 kV电力变压器主要参数

Table 1 Main parameters of power transformer

参数	数值
额定功率 低压/ 高压绕组/MVA	25/25
相电压 低压/ 高压绕组/kV	10.5/70
相电流 低压/ 高压绕组/A	794/119
频率/Hz	50
短路阻抗/%	10.7
绕组匝数 低压/高压绕组	141/938
绕组线饼个数 低压/高压绕组	74/80
线饼导体高度 低压/ 高压绕组/mm	10.5/9.3
铁心窗高/mm	1230
铁心截面半径/mm	260
径向绝缘垫块个数(每层)	16
撑条个数	16
预紧力幅值/MPa	2.5
低压绕组线饼内、外直径/mm	276/334
高压绕组线饼内、外直径/mm	371/457

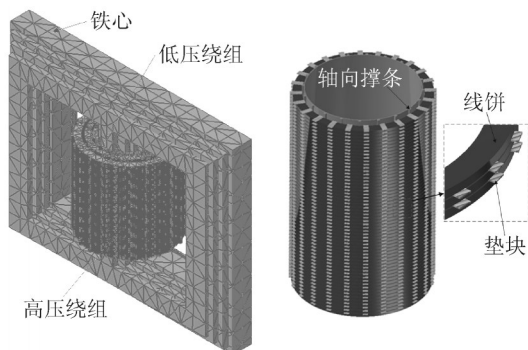


图5 变压器三维有限单元剖分与低压绕组

Fig. 5 Three dimensional finite element analysis of transformer

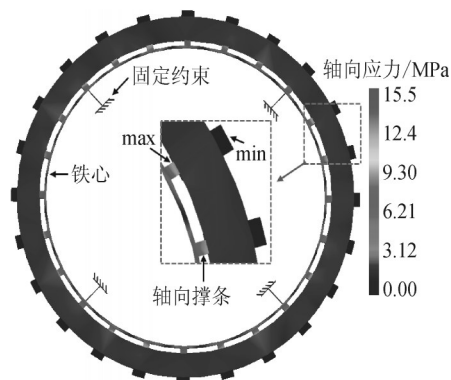


图6 辐向应力分布

Fig. 6 Radial stress distribution

考虑预紧力的加载时间的变压器低压绕组部分线饼的动态位移响应见图8。图8中, T_p 为预紧力

加载到稳定时间(0~0.1 s), T_c 为短路瞬态时间(0.1~0.3 s)。可以看出,不同位置的绕组线饼具有不同的位移响应特性。

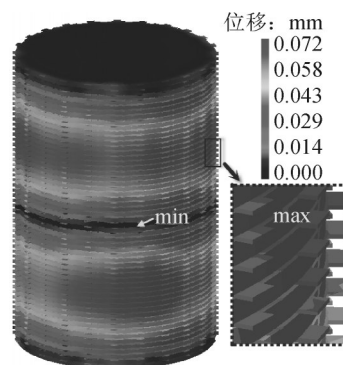


图7 轴向位移分布

Fig. 7 Axial displacement distribution

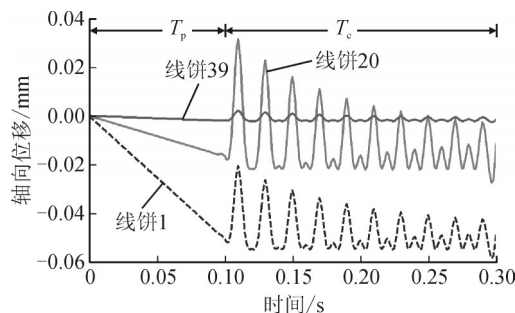


图8 低压绕组各线饼动态位移响应

Fig. 8 Dynamic displacement response of low voltage winding

3.3 塑性变形有限元分析与累积变形

考虑塑性变形计算量比较大,用时较长。文中对绕组模型进行了适当简化,简化后的绕组见图9,可以大大缩减计算量。绕组端部线饼的三维电磁力分布见图10。绕组塑性变形的三维模拟见图11。可以看出:受到三维电磁力分布不均影响,绕组局部线饼很可能出现局部鼓包变形。在设计中,应该考虑如何降低电磁力分布不均的影响。

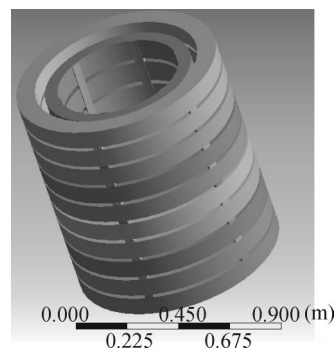


图9 简化的绕组几何结构

Fig. 9 Simplified geometry of winding

文中分析了绕组线饼的弯曲变形,以及撑条支撑对塑性变形的影响。线饼出现的弯曲变形见

图 12。可以看出, 弯曲变形最大值出现在两个垫块之间, 其变形状态沿圆周方向对称分布。

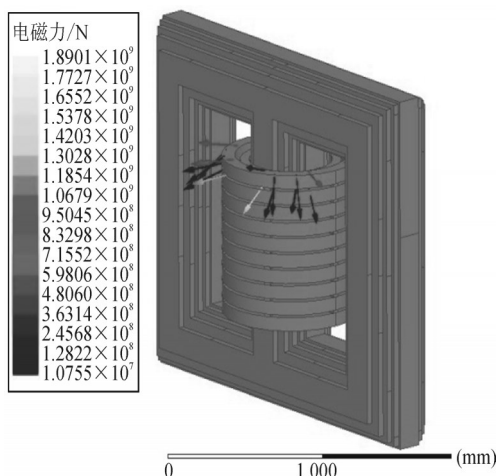


图 10 绕组端部电磁力分布

Fig. 10 Electromagnetic volume force distribution of end winding

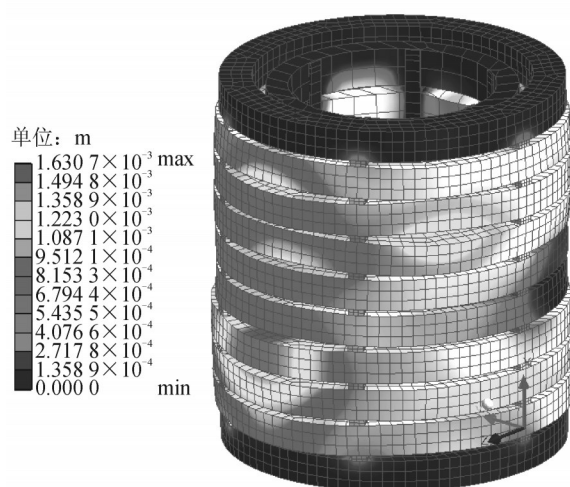


图 11 绕组局部鼓包变形

Fig. 11 Local bulging deformation in transformer windings

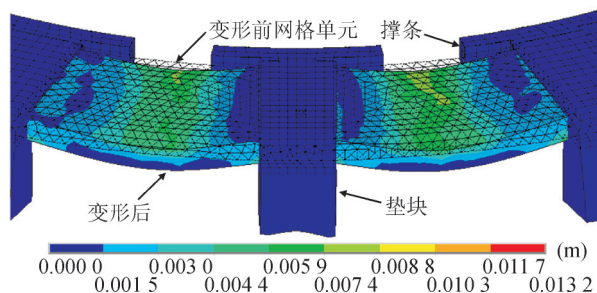


图 12 绕组弯曲变形

Fig. 12 Bending deformation in transformer windings

绕组部分撑条支撑力失效后, 线饼出现了局部凹凸变形见图 13。结果表明: 绕组受到向内的压缩力作用, 受部分撑条失效影响会加剧绕组线饼变形, 出现了局部鼓包变形。

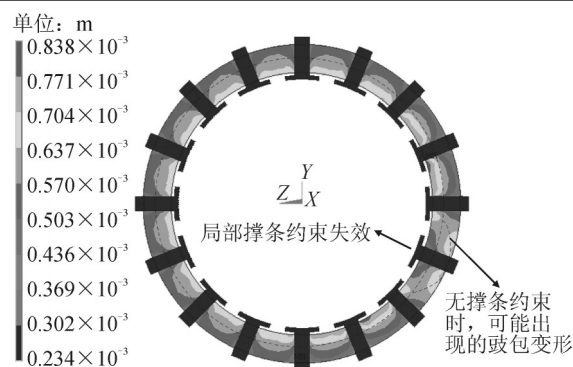


图 13 绕组撑条失效影响

Fig. 13 Spacers failure in transformer windings

多次短路电磁力作用后, 绕组弹塑性应力—应变关系曲线见图 14。可以看出: 多次短路故障后, 绕组内部出现了弹性变形和塑性变形阶段, 塑性变形过程出现了累积效应。可以验证: 在绕组发生塑性变形的破坏过程中, 铜导体出现弹性到塑性变形及变形累积阶段的变化, 而且绕组出现的不可恢复塑性变形会逐渐累积, 直至大变形失效。

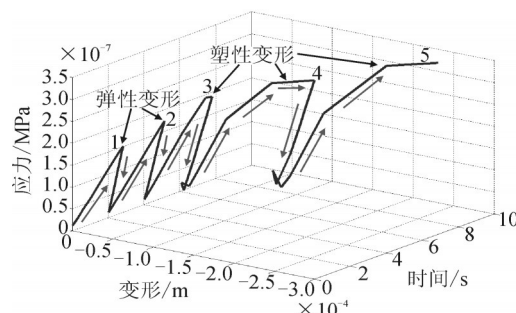


图 14 应力—应变累积变化曲线

Fig. 14 Stress-strain cumulative curve

4 结论

文中通过有限元电磁—结构耦合计算与分析, 对电力变压器绕组受短路电磁力作用下的弹性、塑性变形响应特性进行了研究。

弹性变形分析结果显示: ①绕组两端线饼向绕组中部压缩振荡, 位移最大, 而中部线饼位移较小, 但应力最大。绕组发生弹性变形时, 电磁力消失后, 变形和应力也消失, 其动态响应类似质量弹簧系统的特性分析; ②预紧力与垫块的非线性弹性模量对变压器绕组短路变形和应力分布也有重要影响。在确定预紧力时, 应根据绕组短路电磁力大小选择。

塑性变形分析结果表明: ①受绕组材料老化和外界复杂载荷动态分布的影响, 当绕组内部产生的机械应力值超过材料的屈服强度时, 绕组内部就会出现不可恢复的塑性变形; ②在多次短路电流冲击

下,塑性变形经过累积会逐渐增加,可能导致绕组最终出现大变形破坏或绝缘击穿损坏;③绕组塑性变形分析中需要考虑多种因素影响,如三维电磁力的分布不均性、撑条有效支撑以及预紧力有效性等。

参考文献

- [1] 尹克宁. 变压器设计原理[M]. 北京:中国电力出版社, 2003.
YIN Kening. Transformer design principle[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [2] 李洪奎, 李 岩. 不同预紧力下变压器绕组轴向振动模态分析[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(8): 98-101.
LI Hongkui, LI Yan. Axial vibration modal analysis of transformer windings under different levels of pre-compression [J]. Electric machines and Control, 2010, 14(8): 98-101.
- [3] 郭 健, 林鹤云, 徐子宏, 等. 用有限元方法分析电力变压器绕组轴向 稳定性[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 209-212.
GUO Jian, LIN Heyun, XU Zihong, et al. Analysis of axial stability of power transformer windings using finite element [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 209-212.
- [4] 孙 昕, 李 岩, 李洪奎. 变压器箔式绕组的短路电磁力计算[J]. 变压器, 2010, 47(12): 1-3.
SUN Xin, LI Yan, LI Hongkui. Calculation of short circuit electromagnetic force of foil winding in transformer[J]. Transformer, 2010, 47(12): 1-3.
- [5] 王丽君, 刘 勋. 一起电力变压器绕组变形的综合分析[J]. 变压器, 2011, 48(6): 68-70.
WANG Lijun, LIU Xun. Comprehensive analysis of winding deformation of power transformer[J]. Transformer, 2010, 47(12): 1-3.
- [6] 戴文进, 刘宝彬. 用频率响应法检测变压器绕组的变形[J]. 高压电器, 2004, 24(3): 24-28.
DAI Wenjin, LIU Baobin. Detection of transformer winding deformation by frequency response method[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 24(3): 24-28.
- [7] ZHANG H, WANG S, YUAN D, et al. Double-ladder circuit model of transformer winding for frequency response analysis considering frequency-dependent losses[J]. IEEE Trans. Mag., 2015, 51(11): 8402304.
- [8] NORRIS E T. Mechanical strength of power transformers in service [J]. Proceedings of the IEE-Part A: Power Engineering, 1957, 104(16): 289-300.
- [9] BAI Cuifen, GAO Wensheng, LIU Tong. A preliminary study of transformer life estimation based on linear cumulative damage theory[J]. Int. Trans. Electr. Energ. Syst., 2014, 24 (9): 1217-1231.
- [10] 姜 山. 电力变压器绕组变形的受力分析[D]. 北京:华北电力大学, 2012.
JIANG Shan. Force analysis of winding deformation of power transformer[J]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [11] 冯忠信, 张建中, 杨建军. 金属材料在循环加载下塑性变形的传播特性[J]. 金属学报, 1995, 31(8): 352-355.
FENG Zhongxin, ZHANG Jianzhong, YANG Jianjun. Propagation characteristics of plastic deformation of metallic materials under cyclic loading[J]. Journal of Metals, 1995, 31 (8): 352-355.
- [12] 张宏博, 黄茂松, 宋修广. 循环荷载作用下粉细砂累积变形的等效黏塑性本构模[J]. 水利学报, 2009, 40(6): 651-658.
ZHANG Hongbo, HUANG Maosong, SONG Xiuguang. The equivalent cumulative deformation under cyclic loading sand viscoplastic constitutive model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(6): 651-658.
- [13] FAIZ J, BASHIR M, NOORI T. Three-and two-dimensional finite - element computation of inrush current and short - circuit electromagnetic forces on windings of a three-phase core-type power transformer[J]. IEEE Trans. Mag., 2008, 44 (5): 590-597.
- [14] LI Z, HAO Z, YAN C. Deformation simulation and analysis of power transformer windings[J]. IEEE PES Asia - Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). [s. n.]: IEEE, 2016: 1445-1449.
- [15] ANDERSON O W. Transformer leakage flux program based on the FEM[J]. IEEE Trans. PAS, 1973(92): 682-689.
- [16] AHN H, OH Y, KIM J. Experimental verification and finite element analysis of short-circuit electromagnetic force for dry-type transformer[J]. IEEE Trans. Mag., 2012, 48(2): 819-822.
- [17] HO S, LI Y, WONG H C, et al. Numerical simulation of transient force and eddy current loss in a 720 MVA power transformer[J]. IEEE Trans. Mag., 2004, 40(2): 687-690.
- [18] TANG Y, QIAO J, XU Z. Numerical calculation of short-circuit electromagnetic forces on the transformer winding [J]. IEEE Trans. Mag., 1990, 26(2): 1039-1041.
- [19] ROBERT J C, SELWYN P. Mechanical properties of copper in relation to power-transformer design[J]. Power Engineering, 1987(5): 154-157.
- [20] Ansys Inc. Ansys mechanical APDL and mechanical applications theory reference[M]. USA: Ansys Theory Reference, Release 13.0, 2010.

张海军(1981—),男,博士,副教授,从事于电力变压器绕组变形计算与故障诊断研究工作。