

引用格式:刘君,陈沛龙,吕黔苏,等.考虑累积效应的电力变压器绕组弹塑性形变分析[J].电力科学与技术学报,2024,39(4):255-262.

Citation: LIU Jun, CHEN Peilong, LÜ Qiansu, et al. Elastic-plastic deformation analysis of power transformer windings considering cumulative effect [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 255-262.

考虑累积效应的电力变压器绕组弹塑性形变分析

刘君^{1,2}, 陈沛龙¹, 吕黔苏¹, 艾文灏², 林晓青², 李旭², 李堃¹, 肖宁¹

(1. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550000; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 短路导致的绕组形变是引发变压器故障的关键因素之一。为探究变压器绕组在多次短路冲击下的弹塑性形变规律, 以一台型号为 SFZ7-31500/110 电力变压器作为研究对象, 构建变压器三维有限元仿真模型。通过磁场-结构场耦合计算, 获取短路过程中变压器的漏磁场分布及绕组所受电动力大小, 系统分析绕组在多次短路冲击下的形变特性及其累积效应。结果表明, 在短路冲击下, 高、低压绕组的形变方向相反, 且低压绕组的形变量明显大于高压绕组。此外, 受到铁芯结构的影响, 同一绕组位于铁芯窗内和窗外的受力和变形呈现出显著的不均匀性, 窗内的绕组形变量较大。随着短路次数的增加, 低压绕组上的塑性应变逐渐累积, 初期增长迅速, 但随后因材料硬化效应, 形变累积速度逐渐减缓并趋于稳定; 相反, 高压绕组在整个过程中均保持弹性变形, 未出现塑性形变。研究结果对变压器绕组动稳定性分析具有一定指导意义。

关键词: 短路特性; 累积效应; 弹塑性形变; 电力变压器

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.04.028 中图分类号: TM863 文章编号: 1673-9140(2024)04-0255-08

Elastic-plastic deformation analysis of power transformer windings considering cumulative effect

LIU Jun^{1,2}, CHEN Peilong¹, LÜ Qiansu¹, AI Wenhao², LIN Xiaoqing²,
LI Xu², LI Kun¹, XIAO Ning¹

(1. Electric Power Science Research Institute, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550000, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The deformation of windings caused by short circuits is one of the key factors leading to transformer failures. To explore the elastic-plastic deformation law of transformer windings under multiple short-circuit impacts, a SFZ7-31500/110 power transformer is taken as the research object to construct a three-dimensional finite element simulation model of the transformer. Through magnetic field-structure field coupling calculation, the leakage magnetic field distribution of the transformer and the magnitude of the electromotive force on the windings during short circuits are obtained. The deformation characteristics and cumulative effects of windings under multiple short-circuit impacts are systematically analyzed. The results show that under short-circuit impacts, the deformation directions of high- and low-voltage windings are opposite, and the deformation of low-voltage windings is significantly greater than that of high-voltage windings. In addition, due to the influence of the iron core structure, the force and deformation of the same winding located inside and outside the iron core window show significant inhomogeneity, and the deformation of the winding inside the window is larger. As the number of short circuits increased, the plastic strain on the low-voltage windings gradually accumulate. It grows rapidly in the early stage, but the deformation accumulation speed gradually slows down and tends to stabilize due to the material hardening effect. On the contrary, the high-voltage windings maintain elastic deformation throughout the process and does not show plastic deformation. The research results have

收稿日期: 2023-08-28; 修回日期: 2023-10-11

基金项目: 贵州电网有限责任公司重点项目(066600GS62200006); 国家自然科学基金(51977063)

通信作者: 艾文灏(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事高电压与绝缘技术研究, E-mail: aiiwenhao0221@163.com

certain guiding significance for the analysis of the dynamic stability of transformer windings.

Key words: short-circuit characteristics; cumulative effect; elastic-plastic deformation; power transformer

电力变压器是电力系统中重要的设备之一,其可靠性直接关系到电网的安全稳定运行^[1-2]。根据2022年调研数据显示,绕组损坏是变压器发生故障的主要因素之一,占全部事故的21%~45%^[3]。一旦出现短路故障,变压器绕组可能受到巨大的短路电流冲击,从而发生形变,绕组的抗短路能力下降,进而对变压器本体乃至局部电力系统造成威胁^[4-6]。因此,研究变压器绕组在多次短路电流冲击后的电磁特性、形变规律及累积效应具有重大意义。

目前,国内外学者针对变压器短路后磁场与电力的分布及绕组形变研究有了较大进展。文献[7]对一台500 kV单相变压器建立了三维有限元仿真模型,在短路和空载2种情况下,分析了绕组电压过零时合闸的磁场和电动力分布特性;文献[8]对变压器三相短路故障进行仿真分析,得到了短路后漏磁场和电动力在时间和空间上的分布规律;文献[9]采用ANSYS软件进行多物理场耦合仿真,在二次绕组某时刻发生单匝短路故障后,研究了变压器电磁、机械及温度等多物理参数变化特征及分布规律;文献[10]以一台110 kV变压器为例,建立二维轴对称与三维变压器仿真模型,比较了不同建模方式对变压器力学特性和机械应力的整体分布计算的影响;文献[11]提出并论证了关于变压器绕组形变的数学模型,且通过绕组的拆解检查验证了其仿真结果;文献[12-13]以一台220 kV变压器为例,在ANSYS软件中建立了三维磁—结构耦合分析模型,分析了中压侧对称短路时变压器绕组形变情况。

近年来,国内外学者对多次短路下电力变压器绕组变形累积效应的研究逐渐深入。文献[14]开展了多次110 kV变压器短路试验,研究了变压器绕组在多次短路冲击的累积效应影响下逐步机械形变问题,分析了历次短路过程中振动偏离和加权时频谱熵的变化趋势;文献[15]建立了绕组的塑性变形模型,得到了塑性形变、短路冲击强度和频率之间的定量关系;文献[16]对绕组在多次大电流短路冲击下产生的塑性形变进行研究,发现随短路冲击次数的增加,绕组的形变量从迅速增大到材料硬化作用下趋于稳定;文献[17]研究了不同短路与接地故障对变压器多次冲击后绕组状态的影响,考虑了温度对绕组材料属性的影响;文献[18-19]针对多次短路冲击的累积效应,采用考虑初始缺陷的屈曲分

析方法,对多次短路辐向失稳问题进行了研究。

尽管已有众多学者对变压器短路后绕组的形变进行了分析研究,但考虑铜材料的弹塑性和硬化特性对形变产生的影响以及多次短路冲击后绕组塑性应变的累积研究尚属较少。针对上述问题,本文构建变压器的三维模型,通过磁场—结构场直接耦合计算,对短路后的漏磁场、绕组上电动力和形变进行仿真分析,研究绕组在多次短路后的形变规律,获取每次短路电流冲击后的残余形变量,对比分析多次短路电流冲击后高、低压绕组所产生的弹塑性形变和累积情况。

1 变压器磁场—结构场耦合理论分析

基于低频电磁场的麦克斯韦方程组,引入磁矢位函数 A ,磁场控制方程为

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = \frac{i_{kt}}{s} \quad (1)$$

式中, μ 为磁导率,H/m; s 为导线的截面积, mm^2 ; i_{kt} 为瞬时短路电流,A。

根据洛伦兹法则,绕组受到的短路电动力为

$$F(\Delta u, t) = J \times B \quad (2)$$

式中, J 为电流密度, A/m^3 ; B 为磁通密度,T。

在有限元仿真中磁场—结构场耦合满足以下约束条件:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \nabla \cdot \sigma = F_v \quad (3)$$

$$\epsilon = \frac{1}{2} [(\nabla u) + (\nabla u)^T] \quad (4)$$

$$\sigma - \sigma_0 = C: (\epsilon - \epsilon_0 - \epsilon_p) \quad (5)$$

式中, ρ 为铜导线密度, kg/m^3 ; u 为微元体位移, σ 为其应力张量,Pa; F_v 为作用在微元体上的力密度, N/m^3 ; ϵ 为应变张量; ϵ_0 为初始应变; ϵ_p 为塑性应变张量; σ_0 为初始应力,Pa; C 为四阶弹性张量。

在短路过程中的各个时刻,绕组中的应力和应变可通过应力场方程确定:

$$\begin{cases} \sigma_{ij,j} + f_i = 0 \\ \epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \\ \epsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \delta_{ij} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\sigma_{ij,j}$ 为铜绕组有限元单元的应力张量,Pa; f_i 为铜绕组中有限元单元瞬态电磁体积力密度, N/m^3 ;

i, j, k 为三维指标,均取值 1、2、3; ϵ_{ij} 为应变张量; σ_{ij} 、 σ_{kk} 为应力分量, Pa; δ_{ij} 为克罗内克尔符号, $\delta_{ij} = 1 (i=j)$, $\delta_{ij} = 0 (i \neq j)$; $u_{i,j}$ 、 $u_{j,i}$ 分别为不同方向的位移张量, m; ν 为铜的泊松比; E 为铜的杨氏模量。

在计算绕组的累积效应时, Von Mises 准则用于判断铜导线是否进入塑性阶段。当等效应力和等效应变达到一定值时,材料进入屈服阶段,其满足 Von Mises 准则,即

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (7)$$

$$\epsilon_e = \sqrt{\frac{2}{3}} \times (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2) \quad (8)$$

式中, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为主应力, Pa; $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 为主应变; σ_e 为等效应力, Pa; ϵ_e 为等效应变。

2 变压器三维有限元仿真

2.1 变压器三维模型的构建

本文以一台型号为 SFZ7-31500/110 电力变压器为研究对象,该变压器部分技术及结构参数如表 1 所示;电流参数如表 2 所示;建立的变压器模型如图 1 所示,模型结构包括变压器油、绕组及铁芯。

表 1 变压器的部分技术及结构参数

Table 1 Part of the technical and structural parameters of transformer

parameters of transformer				mm
铁芯直径	铁芯高度	高压绕组高度	低压绕组高度	
540	1 480	1 270	1 270	
高压绕组内径	高压绕组外径	低压绕组内径	低压绕组外径	
772	958	578	694	

表 2 变压器电流参数

Table 2 Current parameters of transformer

额定电流		短路电流周期分量有效值	
高压侧	低压侧	高压侧	低压侧
165.3	945.5	1 523.8	8 797.7

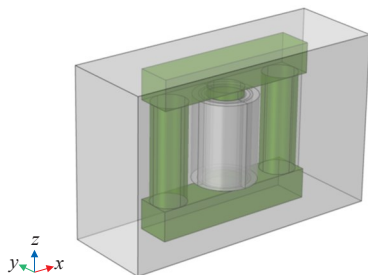


图 1 变压器三维有限元模型

Figure 1 3D finite element model of transformer

考虑实际变压器结构较为复杂,为减少有限元仿真计算量,本文假设:

- 1) 忽略铁芯硅钢片堆叠结构,使用无损铁磁材料替代铁芯;
 - 2) 因电力变压器三相对称,故选取中间相绕组进行建模分析,忽略绕组之间的相互影响;
 - 3) 圆筒作为实际绕组的近似模型,忽略撑条、垫块和匝间绝缘等对漏磁场分布影响较小的构件;
 - 4) 忽略电流热效应的影响,不考虑短路温升。
- 短路全电流的瞬时表达式为

$$i_{kt} = \sqrt{2} I_{pt} \cos \omega t + i_{np0} e^{-t/T_a} \quad (9)$$

式中, I_{pt} 为 t 时刻短路电流周期分量有效值, A; i_{np0} 为短路电流非周期分量起始值, A; T_a 为短路电流非周期分量衰减时间常数, s。

忽略短路电流周期分量的衰减,短路全电流瞬时值为

$$i_{kt} = \sqrt{2} I' (\cos(\omega t + \varphi_0) - e^{-t/T_a} \sin \varphi_0) \quad (10)$$

式中, I' 为短路电流周期分量有效值, A; φ_0 为短路电流初相角。

本文考虑初相角 $\varphi_0 = \pi/2$ 时最不利于绕组动稳定性的短路电流,根据式(10)计算得到高压绕组上短路电流 i_1 和低压绕组短路电流 i_2 为

$$i_1 = \sqrt{2} \times 1 523.8 \times [\cos(100\pi t + \pi/2) - e^{-t/0.2} \sin(\pi/2)] \quad (11)$$

$$i_2 = -\sqrt{2} \times 8 797.7 \times [\cos(100\pi t + \pi/2) - e^{-t/0.2} \sin(\pi/2)] \quad (12)$$

根据 GB 1094.5—2008, II 类和 III 类变压器短路试验持续时间可选取为 0.25 s^[18]。由式(11)、(12)可得高、低压绕组在 0.00~0.25 s 时的短路电流波形,如图 2 所示,当 $t=0.01$ s 时,通过高、低压绕组的短路电流达到最大值,流经高、低压绕组电流的最大值分别为 -4 420.4、25 521.6 A。

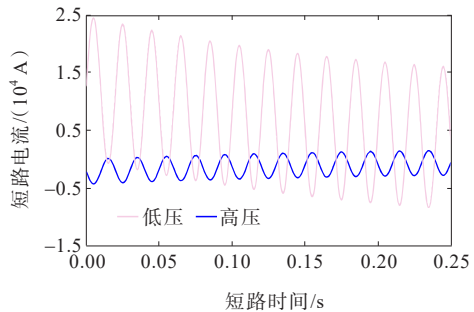


图 2 0.00~0.25 s 时的短路电流波形

Figure 2 Short-circuit current waveform from 0.00 s to 0.25 s

2.2 变压器短路仿真结果及绕组磁力特性分析

在 COMSOL Multiphysic 有限元仿真软件中进行有限元瞬态磁场仿真,得到短路后 0.00~0.25 s 时的最大磁通密度计算结果,如图 3 所示,最大磁通密度出现在短路后 0.01 s 时,达到 2.49 T。该时刻绕组区域磁通密度分布如图 4 所示,可以看出磁通密度最大值分布在两绕组之间的间隙部分。

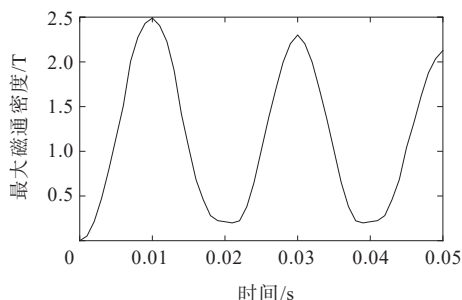


图 3 短路后最大磁通密度—时间

Figure 3 Relationship between maximum value of magnetic flux density and time after short-circuit fault

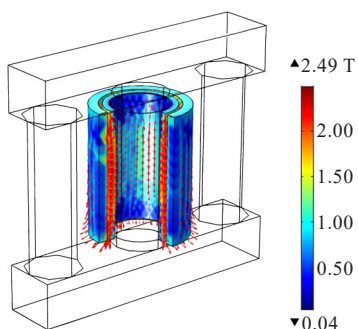


图 4 短路后 0.01 s 时绕组区域磁通密度模

Figure 4 Magnetic flux density module of winding at 0.01 s after short-circuit fault

为了更直观地分析短路绕组的漏磁场分布,选取低压绕组位于铁芯窗内、外处自顶端至底端的 2 条截线,所取截线如图 5 所示。提取截线上的数据,绘制沿该路径的磁通密度模曲线,短路后 0.01 s 时刻磁通密度模沿绕组高度分布如图 6 所示,可知绕组中部的磁通密度较大,从绕组中部靠近上、下端时磁通密度逐渐减小。

此外,位于铁芯窗内的漏磁通相较于位于铁芯窗外的漏磁通更大一些。由于铁芯窗内的漏磁通路径经过上、下铁轭,而铁轭的磁阻相对于变压器油和绕组小很多,铁芯窗内侧的漏磁通所经路径上的磁阻相较于经过其他路径闭合的磁阻小,故在相同磁势作用下,绕组位于铁芯窗内的漏磁通更大。

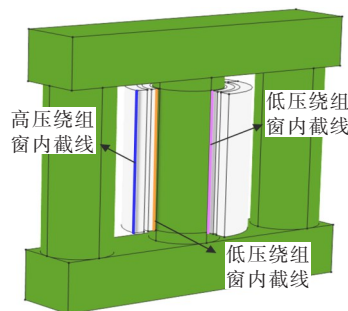


图 5 铁芯窗内截线和铁芯窗外截线

Figure 5 Cutting lines inside and outside core window

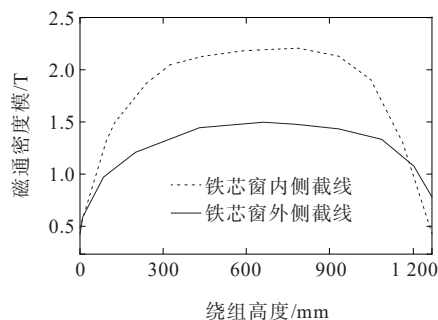


图 6 短路后 0.01 s 时刻磁通密度模沿绕组高度分布

Figure 6 Magnetic flux density module along winding height at 0.01 s after short-circuit fault

短路电流和漏磁通最大值均在短路后 0.01 s 时出现,选择此时刻的结果分析电动力。为排除不同漏磁密度的影响,提取图 5 中铁芯窗内高压绕组外侧边和低压绕组内侧边的 2 条截线上的数据,分别研究在短路后 0.01 s 时沿绕组高度轴向和辐向电动力大小及分布情况,得到高、低压绕组的辐向和轴向短路电动力沿绕组高度的分布,分别如图 7、8 所示。辐向短路电动力由轴向漏磁场和短路电流共同产生,轴向漏磁场在绕组中部的磁通密度较大,越靠近绕组两端处的磁通密度越小。

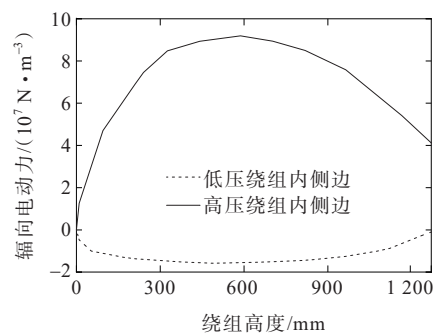


图 7 短路后 0.01 s 时辐向电动力沿绕组高度分布

Figure 7 Radial electromagnetic force along winding height at 0.01 s after short-circuit fault

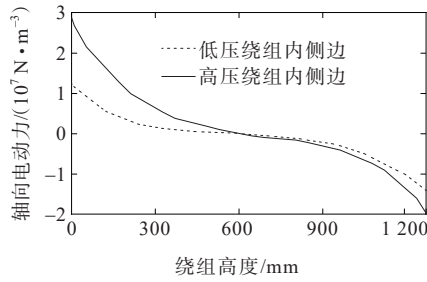


图 8 短路后 0.01 s 时轴向电力沿绕组高度分布
 Figure 8 Axial electromagnetic force along winding height at 0.01 s after short-circuit fault

从图 7 中可以看出,高、低压绕组的辐向电力分布与轴向磁通密度分布一致,呈现两边低中间高的分布特点。高、低压绕组上的辐向电力方向相反,低压绕组受到向内挤压的辐向力,而高压绕组受到向外扩张的辐向力,高、低压绕组所受辐向电力存在显著差异。从图 8 可以看出,高、低压绕组上所受轴向电力总体呈现出上下两端大、中间小的分布,根据受力方向,轴向力均从上下两侧向中部挤压绕组。

3 绕组变形及累积效应算例分析

3.1 单次短路后的绕组形变结果

以型号为 SFZ7-31500/110 的电力变压器为研究对象,本文建立变压器的磁场—固体力学场耦合模型。短路电力导致绕组发生形变,而变化的结构场又会影响磁场的分布。在同一模型下求解磁场和结构力学场,磁场中求解的短路电力是磁场—结构场双向耦合的源载荷,计算得到绕组上的应力、位移和应变,实现磁场—结构场的直接耦合仿真。短路后绕组形变量随时间的变化如图 9 所示,在短路过程中绕组形变随短路电流波形依次衰减。

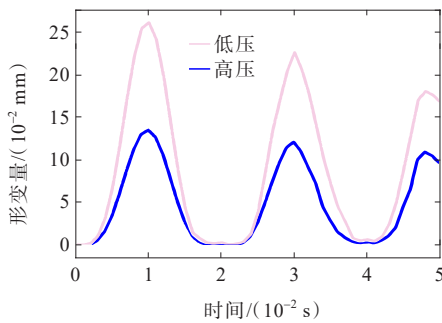


图 9 短路后绕组形变—时间
 Figure 9 Relationship between windings deformation and time after short-circuit fault

短路后 0.01 s 时绕组形变的分布如图 10 所示,可以看出,绕组形变主要出现在绕组中部。受铁轭的影响,同一绕组上位于铁芯窗内部分的形变量大于铁芯窗外部分的形变量。

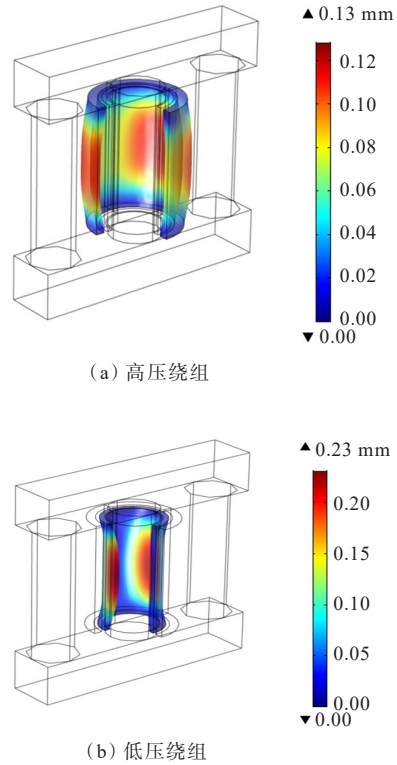


图 10 短路后 0.01 s 时绕组的形变
 Figure 10 Windings deformation at 0.01 s after short-circuit fault

3.2 多次短路后的绕组弹塑性形变过程

铜是一种典型的弹塑性材料,其应力—应变关系如图 11 所示,其中 $\sigma_{0.2}$ 代表屈服极限,是材料在产生 0.2% 残余变形时所对应的应力值。铜导线内部的应力在达到其初始屈服应力之前,其应力—应变关系遵循胡克定律,表现为弹性形变。然而,一旦应力增大至超过初始屈服应力,材料便会进入塑性变形阶段。

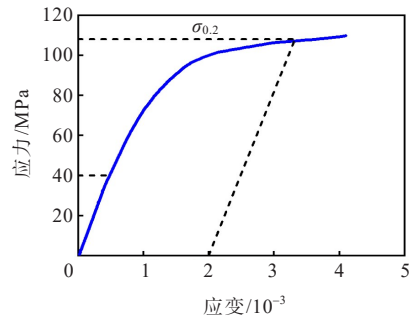


图 11 铜的应力—应变曲线
 Figure 11 Stress-strain curve of copper

本文采用连续加载短路电流的方式模拟6次短路电流冲击过程,加载的电流载荷如图12所示。参考GB 1094.5—2008《电力变压器第5部分:承受短路的能力》,设置单次短路电流冲击持续时间为0.25 s,相邻2次冲击电流的间隔为0.75 s,该时间段内变压器按照额定电流运行。在每一次仿真短路电流冲击结束后,提取该次仿真研究结束时刻的残余应力,并在下一次短路电流冲击时使用上一次短路后的残余应力修正结构场的边界条件,继承前一次研究的解,观察绕组上应变的累积情况。

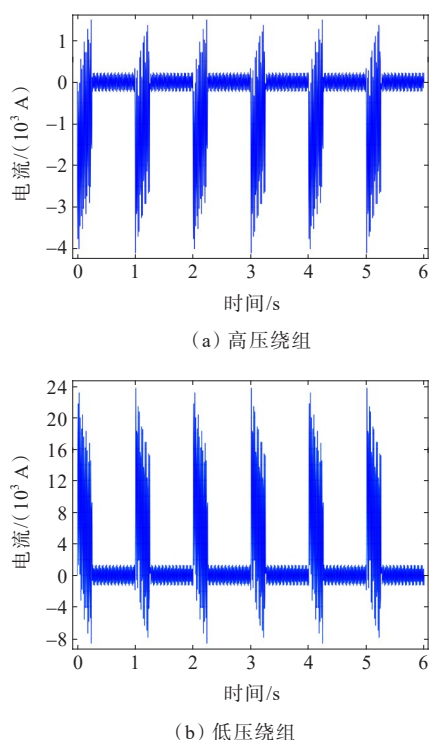


图12 多次短路电流冲击及额定电流波形
Figure 12 Waveforms of multiple short-circuit current surges and rated current

高、低压绕组在每次短路冲击之后的形变如图13所示,其中总形变包括弹性和塑性形变,其最大值取决于加载短路电流的首个峰值^[20]。从图13(a)可以看到,高压绕组在每一次短路冲击结束后均恢复至原状态,未出现塑性形变。因此,6次短路冲击下未发生形变累积。由图13(b)可知,在第3次短路电流冲击前,低压绕组的变形在冲击电流卸载后恢复原状,属于弹性形变;第4次短路过程中出现塑性应变,短路后残余总形变增加;第5次短路过程中塑性应变进一步加大,残余总形变也呈现出累积的特征,随后塑性应变趋于稳定,残余总形变也停止增加,与设置的铜绕组材料应力—应变曲线相似。

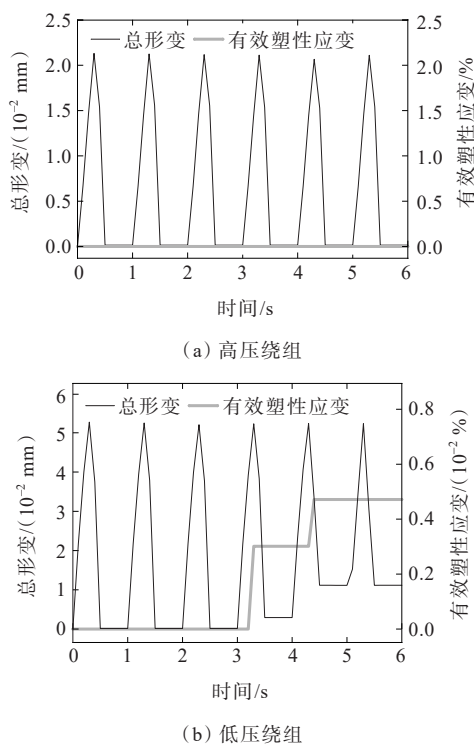


图13 绕组上的形变—时间
Figure 13 Relationship between windings deformation and time

3.3 低压绕组上的塑性形变累积分析

在同一次短路过程中,低压绕组所承受的电力是高压绕组的数倍以上。由于这种强烈的电力作用,低压绕组内部应力远远超过了绕组材料的初始屈服应力,因此发生了塑性形变。相比低压绕组,高压绕组在短路过程中则始终保持在弹性变形阶段,未发生永久性的形变。选取低压绕组对其累积效应展开进一步分析,每次短路冲击结束后绕组上的残余形变(塑性形变)最大值如表3所示,在前3次短路冲击过程中,低压绕组上并未产生显著的塑性形变,塑性形变随着短路次数的增加并未出现明显增长;当绕组承受第4、5次短路冲击时,绕组上的塑性形变出现了显著增加,而在第6次短路后,绕组的塑性形变增量减小。

表3 各次短路后低压绕组塑性形变最大值

Table 3 Maximum plastic deformation of low voltage winding after each short circuit mm			
短路次数	低压绕组塑性形变最大值	短路次数	低压绕组塑性形变最大值
0	$1.052\ 11 \times 10^{-6}$	4	0.002\ 739\ 54
1	$1.489\ 13 \times 10^{-4}$	5	0.011\ 034\ 50
2	$1.495\ 78 \times 10^{-4}$	6	0.011\ 039\ 00
3	$1.488\ 20 \times 10^{-4}$		

直观反映绕组变形的累积过程及硬化现象如图14所示。当变形进入塑性阶段,绕组材料上的应变不仅与当前的应力有关,还取决于应力的加载历史。在绕组形变达到一定程度时,随着应变的增加,绕组变形进入了硬化阶段,此时再施加相同大小的应力,塑性形变将不再进一步增加。

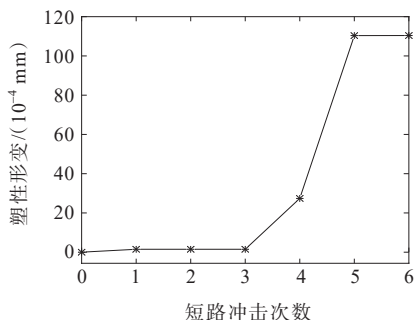


图14 低压绕组塑性形变—短路次数

Figure 14 Relationship between plastic deformation and short-circuit impacts on low-voltage winding

4 结语

本文从磁场—结构场耦合角度,采用COMSOL Multiphysics软件对变压器短路后高、低压绕组上的漏磁通、电动力和累积形变进行了仿真计算。

1) 建立仿真模型的高、低压绕组所受幅向与轴向电动力分布符合一般性规律,验证了仿真模型的正确性。

2) 高、低压绕组形变方向相反,且低压绕组大于高压绕组形变量。受铁芯影响,绕组在窗内和窗外的受力和变形不均匀,同一绕组位于铁芯窗内部的形变量大于位于铁芯窗外部的形变量。

3) 在本文算例中,随着短路次数的增加,变压器低压绕组上的塑性应变逐渐累积。起初低压绕组上的残余塑性应变呈现出急剧的增长趋势,然而随着材料的硬化效应逐渐显现,形变的累积速度逐渐减缓并最终趋于稳定状态。相比低压绕组,高压绕组始终处于弹性变形阶段,未发生塑性形变及其累积效应。

4) 本文目前侧重于考虑累积效应的电力变压器绕组弹塑性形变分析,后期将增大短路次数进一步研究累积效应对绕组失稳的影响。

参考文献:

[1] 韩孟媛,赵仲勇,于跃强,等.同步电机定子绕组匝间短路前后的温度及力学响应仿真分析[J].电测与仪表,2023,60(4):48-56.

HAN Mengyuan,ZHAO Zhongyong,YU Yueqiang,et al. Simulation analysis of temperature and mechanical response of synchronous machine stator winding before and after inter turn short circuit[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2023,60(4):48-56.

[2] 周楠,王昕,杨海龙.基于超声合成孔径扫描联合算法的变压器绕组故障检测方法[J].电力科学与技术学报,2022,37(5):198-206.

ZHOU Nan,WANG Xin,YANG Hailong. Fault detection method of transformer winding based on combined algorithm of ultrasonic synthetic aperture arc scanning [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022,37(5):198-206.

[3] ABBASI A R. Fault detection and diagnosis in power transformers: a comprehensive review and classification of publications and methods[J]. Electric Power Systems Research,2022,209:107990.

[4] 郑玉平,龚心怡,潘书燕,等.变压器匝间短路故障工况下的漏磁特性分析[J].电力系统自动化,2022,46(15):121-127.

ZHENG Yuping, GONG Xinyi, PAN Shuyan, et al. Analysis on leakage flux characteristics of turn-to-turn short-circuit fault for power transformer[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(15):121-127.

[5] 郝艳,咸日常,冷学冰,等.基于电压、电流不平衡度差值的干式变压器匝间短路故障识别方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(4):12-21.

HAO Yan, XIAN Richang, LENG Xuebing, et al. Identification method for an inter-turn short circuit fault of a dry-type transformer based on voltage and current imbalance difference[J]. Power System Protection and Control,2023,51(4):12-21.

[6] 徐建源,陈彦文,李辉,等.基于短路电抗与振动信号联合分析的变压器绕组变形诊断[J].高电压技术,2017,43(6):2001-2006.

XU Jianyuan, CHEN Yanwen, LI Hui, et al. Transformer winding deformation analysis based on short-circuit reactance and vibration signal analysis[J]. High Voltage Engineering,2017,43(6):2001-2006.

[7] POPOV I V, EVDOKUNIN G A, SYUTKIN A V. Computation modelling of electrodynamic forces in transformers and reactors[C]//IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering(EIConRus),Petersburg and Moscow,Russia, 2020.

[8] 穆龙,陈伯根,蔡锋,等.电力变压器三维瞬态漏磁场及电动力仿真分析[J].哈尔滨理工大学学报,2021,26(5):104-113.

MU Long, CHEN Bogeng, CAI Feng, et al. Simulation and analysis of 3D transient leakage magnetic field and electromotive force of power transformer[J]. Journal of

- Harbin University of Science and Technology, 2021, 26(5):104-113.
- [9] 张冰倩, 戚日常, 于洋, 等. 匝间短路故障下电力变压器绕组的物理特征分析[J]. 高电压技术, 2021, 47(6):2177-2185.
ZHANG Bingqian, XIAN Richang, YU Yang, et al. Analysis of physical characteristics of power transformer windings under inter-turn short circuit fault[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6):2177-2185.
- [10] 周秀, 朱洪波, 马云龙, 等. 不同模型下变压器绕组短路力学特性对比分析[J]. 高压电器, 2022, 58(1):148-154.
ZHOU Xiu, ZHU Hongbo, MA Yunlong, et al. Comparative analysis of short-circuit mechanical characteristics of transformer winding under different models[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(1):148-154.
- [11] LI Z, HAO Z, YAN C, et al. Deformation simulation and analysis of power transformer windings[C]//IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Xi'an, China, 2016.
- [12] 王楠, 刘宝成, 臧春艳, 等. 基于磁—结构耦合场的变压器绕组形变分析[J]. 高压电器, 2016, 52(1):94-100.
WANG Nan, LIU Baocheng, ZANG Chunyan, et al. Analysis transformer winding deformation based on magnetics-structure coupled-field[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1):94-100.
- [13] 王薇, 王松, 曾鑫海, 等. 变压器绕组梯形等效电路频率响应的稀疏列表算法研究[J]. 智慧电力, 2023, 51(7):102-107.
WANG Wei, WANG Song, ZENG Xinhai, et al. Sparse tableau algorithm for frequency response of transformer winding ladder equivalent circuit[J]. Smart Power, 2023, 51(7):102-107.
- [14] 律方成, 汪鑫宇, 王平, 等. 基于振动偏离及加权熵的多次短路冲击下变压器绕组机械形变辨识[J]. 电工技术学报, 2023, 38(11):3022-3032.
LÜ Fangcheng, WANG Xinyu, WANG Ping, et al. Mechanical deformation identification of transformer winding under multiple short-circuit impacts based on vibration deviation and weighted entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(11):3022-3032.
- [15] WANG S, ZHANG H, WANG S, et al. Cumulative deformation analysis for transformer winding under short-circuit fault using magnetic-structural coupling model[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(7):0606605.
- [16] YAO S, HAO Z, SI J, et al. Dynamic deformation analysis of power transformer windings under multiple short-circuit impacts[C]// IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP), Xi'an, China, 2019.
- [17] 王胜辉, 许育帅, 孙凯旋, 等. 多物理场耦合下不同短路与接地故障对变压器绕组状态影响的仿真研究[J]. 高电压技术, 2023, 49(6):2397-2408.
WANG Shenghui, XU Yushuai, SUN Kaixuan, et al. Simulation study on the influence of different short-circuit and ground fault on transformer winding state under the coupling of multiple physical fields[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6):2397-2408.
- [18] 张博, 李岩. 多次冲击条件下的大型变压器绕组辐向失稳[J]. 电工技术学报, 2017, 32(S2):71-76.
ZHANG Bo, LI Yan. Radial stability of large transformer windings under multiple inrush conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S2):71-76.
- [19] 张文杰, 吕世轩, 高启瑄, 等. 基于固态变压器的交直流混合配电系统协调运行控制策略[J]. 电力建设, 2023, 44(4):103-112.
ZHANG Wenjie, LÜ Shixuan, GAO Qixuan, et al. Coordinated operation control strategy of AC/DC hybrid distribution system based on solid-state transformer[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(4):103-112.
- [20] 李继攀, 刘宏领, 郭奇军, 等. 基于功率因数角的接地变压器匝间短路故障辨识[J]. 供用电, 2023, 40(9):50-57.
LI Jipan, LIU Hongling, GUO Qijun, et al. Identification of inter turn short circuit fault of grounding transformer based on power factor angle[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(9):50-57.