

变压器短路试验绕组电动力研究

罗晓枭, 王谦, 龙英凯, 蒋西平, 李思全, 邓保家, 甘汶艳

国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆, 401123

Research on Winding Electrodynamic Force of Transformer Short-circuit Test

Luo Xiaoxiao, Wang Qian, Long Yingkai, Jiang Xiping, Li Siqian, Deng Baojia, Gan Wenyan

State Grid Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing

摘要: 电力变压器发生短路故障时, 短路电流与漏磁场的共同作用下变压器绕组会承受极大的电动力, 易使绕组发生形变或使变压器绝缘受损, 故有必要针对短路时变压器受力情况展开研究, 分析计算其不同短路及激励方式下所受电动力的大小及分布特性。文章基于一台额定容量为 200 kVA 的配电变压器的结构参数, 通过有限元仿真软件建立三相变压器的三维模型, 利用该模型分析三种不同短路及激励方式下绕组的轴向电动力与辐向电动力, 并将试验结果进行对比分析。仿真结果表明: 当低压侧三相短路、高压侧三相激励或单相激励时的过零合闸相电动力与单相短路时的短路相电动力基本相同, 分析结果对于改进变压器承受短路能力试验具有一定参考价值。

关键词: 配电变压器; 短路方式; 激励方式; 短路电动力

ABSTRACT: In case of short-circuit fault of power transformer, the transformer winding will bear great electrodynamic force under the joint action of short-circuit current and leakage magnetic field, which is easy to deform the winding or damage the transformer insulation. Therefore, it is necessary to research the stress of transformer during short-circuit, analyse and calculate the magnitude and distribution characteristics of electrodynamic force under different short-circuit and excitation modes. Based on the structural parameters of a distribution transformer with a rated capacity of 200 kVA, a three-dimensional model of three-phase transformer is established through finite element simulation software. The model is used to analyse the axial and radial electric forces of windings under three different short-circuit and excitation modes, and the test results are compared and analysed. The simulation results show that when the three-phase short circuit on the low voltage side, the three-phase excitation on the high voltage side or the single-phase excitation, the zero-crossing closing phase electrodynamic force is basically the same as that of the short-circuit phase when the single-phase short circuit occurs. The analysis results have a certain reference value for improving the short-circuit withstand capacity test of the transformer.

KEY WORD: distribution transformer, short-circuit mode, incentive mode, short-circuit electrodynamic force

1 引言

电力变压器作为一种电力系统中承担传输电能和变换电压的电磁转换装置, 是电网中的重要电气设备之一, 变压器的工作状态直接影响到电网是否可以安全稳定运行^[1-3]。当变压器发生短路时, 绕组会流过很大的短路电流, 该短路电流会产生较强的漏磁通, 绕组在短路电流和漏磁场的两者作用下将承受较正常工况下数百倍的电动力, 使得绕组之间产生相互运动, 导致变压器绝缘及结构体受损, 严重时绕组会发生变形、断裂, 甚至出现线圈烧毁的现象。根据国家电网公司近年来对变压器损坏事故的统计数据, 变压器抗短路强度不足所引发的损坏是变压器发生事故的主要原因之一^[4-6]。因此有必要开展针对

变压器在不同短路状态下的绕组受力分布特性研究, 这对于降低变压器发生故障概率, 保证变压器安全稳定工作, 具有重要的实际意义。

国内外许多学者均围绕变压器绕组短路力计算开展了较为深入的研究, 探讨分析变压器承受短路力的相关问题^[7-11]。本文以一台型号 SB13-M-200/10 的长圆形硅钢铁心配电变压器为研究对象, 基于三维有限元模型分析比对变压器高低压绕组的短路电流的大小和分布规律, 进而得出短路时的绕组受力分布特性, 为配电变压器短路试验提供理论分析和计算的技术支撑。

2 短路电流与绕组电动力计算分析

变压器在实际运行工作时, 发生短路故障的形式是多样的, 包括单相接地、两相接地、三相

短路、相间短路等多种情况，其绕组中短路电流的大小与变压器实际的短路情况也密不可分。下文基于三相对称短路和单相短路两种情况，分析其短路时的电流特性，并进行短路电动力计算^[12, 13]。

2.1 三相变压器短路电流分析

2.1.1 三相变压器单相短路电流分析

当变压器低压绕组发生短路时，绕组电流会急剧增加，是正常工作电流的几倍甚至几十倍。因此，有必要计算变压器短路时的短路电流。以下将根据低压绕组的三相短路和单相短路进行短路电流计算。

当发生单相短路时，变压器铁芯中的主磁通量很小，励磁电流可以忽略不计。S13-M-200/10 变压器采用 Dyn11 连接方式。变压器单相短路的简化等效电路如图 1 所示。

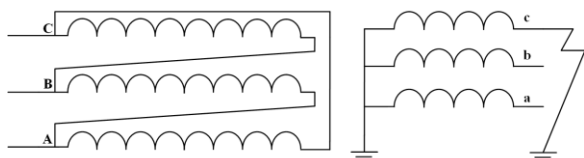


图 1 简化等效电路

Fig.1 Simplified equivalent circuit

当低压绕组短路时，高压绕组的电压等于短路等效电阻和电感上的压降之和，即短路阶段的瞬态短路电流可表示为：

$$i = \frac{U_{1m}}{Z} \sin(\omega t + \theta_0 - \theta) - \frac{U_{1m}}{Z} \sin(\theta_0 - \theta) e^{-\frac{R_d}{L_d} t} \quad (1)$$

上式右侧的第一项是稳态分量。第二项是瞬态分量。 $Z = \sqrt{(\omega L_d)^2 + R_d^2}$ 是短路阻抗 (Ω)。 R_d 和 L_d 是变压器短路时的等效电阻 (Ω) 和等效电感 (H)， $\theta = \arctan \frac{\omega L_d}{R_d}$ 是短路阻抗的相位角， θ_0 是初始闭合角。

2.1.2 三相变压器三相短路电流分析

当三相变压器的低压绕组发生三相短路时，短路的简化等效电路如图 2 所示。

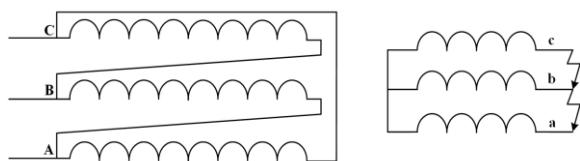


图 2 简化等效电路

Fig.2 Simplified equivalent circuit

由于三相变压器中每个绕组的电压和阻抗是独立的，因此三相绕组中的短路电流也是独立的，这可以看作是三相对称稳态电压对绕组阻抗的独立响应。短路电流可以如下所示：

$$\begin{aligned} i_A &= \frac{U_{1m}}{Z} \sin(\omega t + \theta_0 - \theta) - \frac{U_{1m}}{Z} \sin(\theta_0 - \theta) e^{-\frac{R_d}{L_d} t} \\ i_B &= \frac{U_{1m}}{Z} \sin(\omega t + \theta_0 - \frac{\pi}{3} - \theta) - \frac{U_{1m}}{Z} \sin(\theta_0 - \frac{\pi}{3} - \theta) e^{-\frac{R_d}{L_d} t} \\ i_C &= \frac{U_{1m}}{Z} \sin(\omega t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3} - \theta) - \frac{U_{1m}}{Z} \sin(\theta_0 - \frac{2\pi}{3} - \theta) e^{-\frac{R_d}{L_d} t} \end{aligned} \quad (2)$$

当三相变压器采用单相电源进行短路试验时短路简化等效电路如图 3 所示

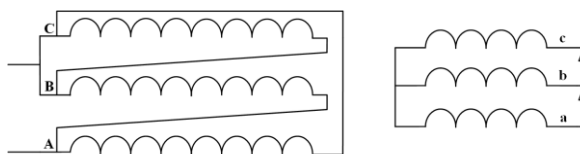


图 3 简化等效电路

Fig.3 Simplified equivalent circuit

使用单相电源进行三相变压器短路试验时，将两相端子之间施加单相电源，第三相端子无接线，其各相短路电流为

$$\begin{aligned} i_A &= \frac{U_m}{\sqrt{3}Z} [-\cos(\omega t + \theta_0) + \cos(\theta_0) e^{-\frac{R_d}{L_d} t}] \\ i_B &= \frac{U_m}{\sqrt{3}Z} [-\cos(\omega t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3}) + \cos(\theta_0 - \frac{2\pi}{3}) e^{-\frac{R_d}{L_d} t}] \\ i_C &= \frac{U_m}{\sqrt{3}Z} [-\cos(\omega t + \theta_0 - \frac{4\pi}{3}) + \cos(\theta_0 - \frac{4\pi}{3}) e^{-\frac{R_d}{L_d} t}] \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 绕组短路电动力分析

当短路电流沿圆周方向流过变压器绕组时，电流会在绕组周围产生轴向漏磁场 B_x 和径向漏磁场。径向力 F_x 由短路电流和轴向漏磁场之间的相互作用产生。根据洛伦兹力公式，可表示为：

$$F_x = BIL = B_{y\max} i_{dm} \quad (4)$$

变压器绕组的轴向短路力是由短路电流和径向漏磁场的相互作用引起的。径向漏磁场主要由以下两个因素引起：一方面，在变压器绕组的上下端附近，存在高磁导率铁磁材料，如铁扼流圈和铁芯柱，使磁力线弯曲，导致绕组端部产生径向漏磁场；另一方面，当内外绕组的轴向高度和安匝分布不平衡时，也会出现径向漏磁场。

$$F_y = BIL = B_{x\max} i_{dm} \quad (5)$$

3 电力变压器仿真分析

本文研究的变压器模型为三相双绕组变压器。具体参数如表 1 所示。

表 1 变压器参数

Tab.1 Parameters of transformer

分类	数值
额定功率[kVA]	200
额定频率 [Hz]	50
额定一次/二次电压 [kV]	10/0.4
抽头范围[kV]	$(10 \pm 2 \times 2.5\%) / 0.4$
空载损耗	240W
负载损耗	2730W
额定一次/二次电流[A]	11.55/288.7
连接方式	Dyn11

变压器的高压绕组为多层圆柱形结构，1、3和 5 抽头的额定匝数分别为 1864、1775 和 1686，低压绕组为铜箔，共 41 匝，实物图如图 4 所示。



图 4 变压器实物图

Fig.4 Photo of transformer

因为变压器的二维模型无法计算绕组沿圆

周不同位置的径向和轴向电磁力。因此，考虑到三维模型的仿真计算步骤比二维模型复杂，有必要建立变压器的三维模型进行短路电磁力计算，它需要长时间的计算，对计算机配置有更高的要求才能达到同样的精度。因此，根据变压器的电磁分布特点和对称性，简化了仿真模型。简化步骤如下：

- 各相结构为轴对称，忽略磁轭、角环和支架对漏磁的影响。
 - 忽略电流中的高次谐波。
 - 对于静态特性分析，磁场和电磁力为稳态值，不考虑铁芯饱和效应。
 - 安匝分布均衡，电流分布均匀。
- 其三维仿真模型如图 5 所示

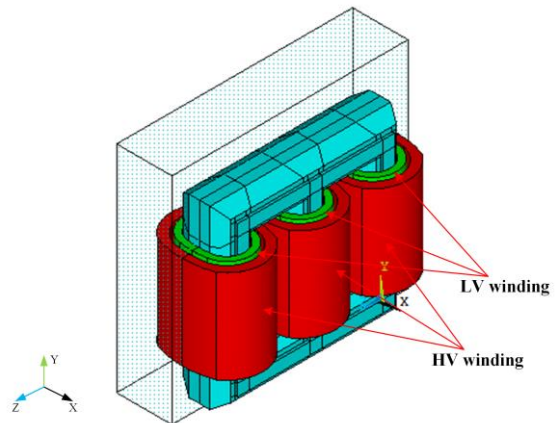


图 5 有限元模型

Fig.5 Finite element model

3.1 变压器短路电流仿真

高压线圈为多层圆筒式结构，1、3、5 分接额定匝数为 1864、1775、1686，低压线圈匝数为 41，对变压器低压侧设置三相短路故障，高压侧设置三相激磁，分别仿真其 1 分接 A 相过零合闸时，高压 A 相的短路电流如图 6 所示；3 分接 B 相合闸时，高压 B 相的短路电流如图 7 所示；5 分接 C 相过零合闸时，高压 C 相的短路电流，如图 8 所示，由图可知，仿真高压 A 相短路电流峰值为 307.0A，仿真高压 B 相短路电流峰值为 322.1A，仿真高压 C 相短路电流峰值为 336.0A，为了保证仿真模型的准确性，根据仿真试验的要求开展变压器实测试验，每相进行 3 次试验并求取均值，其仿真各相短路电流峰值与实

测各相短路电流均峰值如表 2 所示。

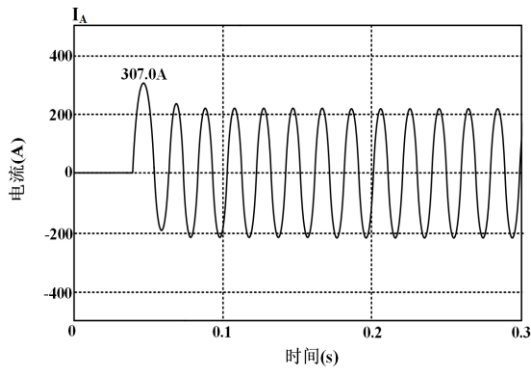


图 6 1 分接 A 相过零合闸时短路电流
Fig.6 Short-circuit current during zero-crossing closing of 1-tap A-phase

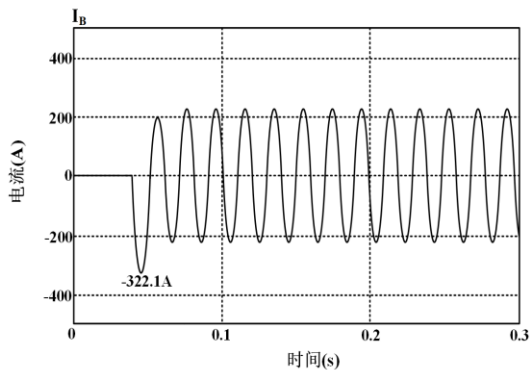


图 7 3 分接 B 相过零合闸时短路电流
Fig.7 Short-circuit current during zero-crossing closing of 3-tap B-phase

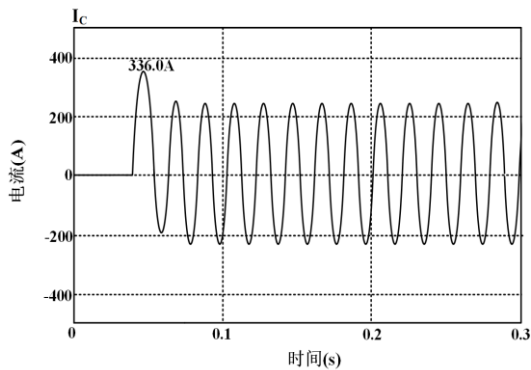


图 8 5 分接 C 相过零合闸时短路电流
Fig.8 Short-circuit current during zero-crossing closing of 5-tap C-phase

表 2 仿真和试验结果

Tab.2 Results of simulation and test

分接位置	过零合闸相	实测短路电流均峰值(A)	仿真短路电流峰值(A)	误差
1	A	311.5	307.0	0.0144

3	B	328.2	322.1	0.0186
5	C	347.6	336.0	0.0334

从上图 6、7、8 与表 2 可知，有限元仿真得到的电流值与变压器实测得到的电流值较为接近，说明基于 ANSYS 建立的 SB13-M-200/10 仿真模型较为合理，可以利用该模型进行绕组电动力分析。

将变压器高压侧使用单相电源激磁，低压侧三相短路，1 分接 A 相过零合闸时，各相短路电流最大值分别为 $I_{Amax}=305.4A$ ， $I_{Bmax}=153.6A$ ， $I_{Cmax}=152.8A$ ；3 分接 B 相过零合闸时，各相短路电流最大值分别为 $I_{Bmax}=319.4A$ ， $I_{Amax}=161.0A$ ， $I_{Cmax}=159.8A$ ；5 分接 C 相过零合闸时，各相短路电流最大值分别为 $I_{Cmax}=334.5A$ ， $I_{Amax}=168.2A$ ， $I_{Bmax}=167.7A$ ，单相与三相载荷下的峰值电流比较如表 3 所示

表 3 不同激磁方式的仿真结果

Tab.3 Simulation results of different excitation modes

过零合闸相	激磁方式	A 相电流峰值(A)	B 相电流峰值(A)	C 相电流峰值(A)
A	单相	305.4	153.6	152.8
	三相	307.0	247.2	268.7
B	单相	319.4	161.0	159.8
	三相	322.1	284.3	261.5
C	单相	334.5	168.2	167.7
	三相	336.0	273.4	298.1

从表 3 中可知虽然使用不同的激磁方式，单相电源与三相电源在同一分接的短路试验中，其过零合闸相的短路电流峰值基本相同。

在进行变压器二次侧发生单相短路仿真时，均使用三相电源激磁，高压侧采用 3 分接方式，将低压 a 相单相短路，低压 b、c 相开路；将低压 b 相短路，低压 a、c 相开路；将低压 c 相短路，低压 a、b 相开路，高压激磁，低压单相短路时的电流值如表 4 所示。

表 4 单相短路电流值

Tab.4 Single phase short-circuit current

序号	测量相	A 相电流有效值(A)	B 相电流有效值(A)	C 相电流有效值(A)
1	高压侧	162.64	1.1699	1.1753
	低压侧	7057.5	0	0
2	高压侧	1.1878	162.27	1.1798

	低压侧	0	7007.8	0
3	高压侧	1.1634	1.1702	162.43
	低压侧	0	0	7021.5

从表 4 中可知 A 相短路时其高、低压绕组中的电流与 B 相或 C 相短路时其对应高、低压绕组中的电流数值大小相近,且各开路高压绕组中电流数值也大小近似。

3.2 变压器绕组电动力仿真

如前文所述,短路试验时绕组所受的电动力有由于短路电流和变压器漏磁通相互作用产生的,可将漏磁通分接为轴向漏磁通 B_z 与横向漏磁通 B_f ,由左手定则可知横向漏磁通 B_f 产生轴向力 F_z ,轴向漏磁通 B_z 产生辐向力 F_f 。

故可将电动力分为轴向分量与辐向分量进行分析,利用三维变压器仿真模型计算当短路电流值达到最大即绕组所受电动力最大时的轴向力与辐向力。以高压侧单相激磁,低压侧三相短路的 3 分接 B 相高低压绕组单元力分布为例,如图 9 所示。

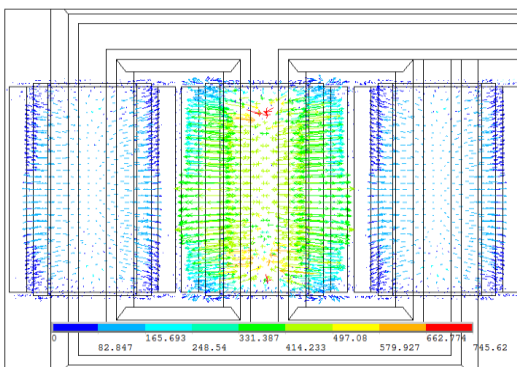


图 9(a) 单相激磁、三相短路轴向单元力矢量图

Fig.9(a) Axial element force vector diagram

Single-phase excitation and three-phase short circuit

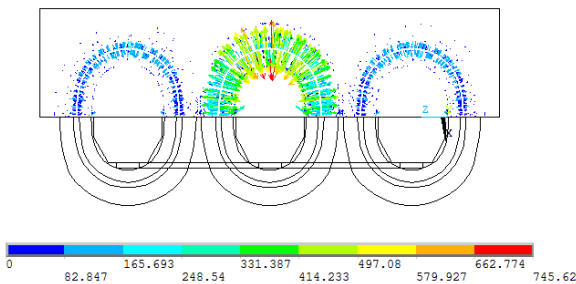


图 9(b) 单相激磁、三相短路辐向单元力矢量图

Fig.9(b) Radial force vector diagram Single-phase

excitation and three-phase short circuit axial

由图可发现,发生短路时,绕组所受轴向方向的电动力最大值位于绕组轴向两端侧,中间受力较小;绕组所受辐向方向的电动力最大值位于绕组中部,其两侧受力较小。

进行单相短路试验时,将 B 相低压侧短路,A、C 相低压侧开路,在三相激磁三相短路试验与单相激磁三相短路试验时,将 B 相作为过零合闸相,其高低压绕组轴向电动力分布如图 10。平行于轴向且方向向上的力,其方向为正,平行于轴向且方向向下的力,其方向为负。

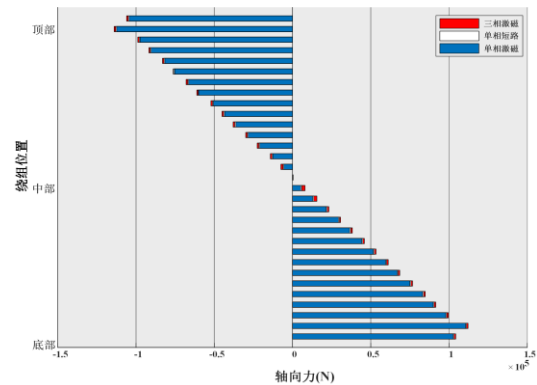


图 10(a) 低压绕组轴向力分布图

Fig.10(a) Axial force distribution diagram of LV

winding

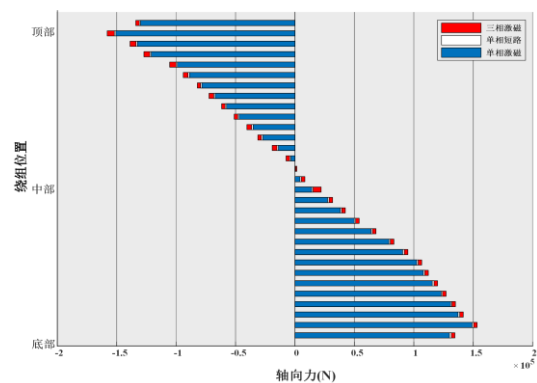


图 10(b) 高压绕组轴向力分布图

Fig.10(b) Axial force distribution diagram of HV

winding

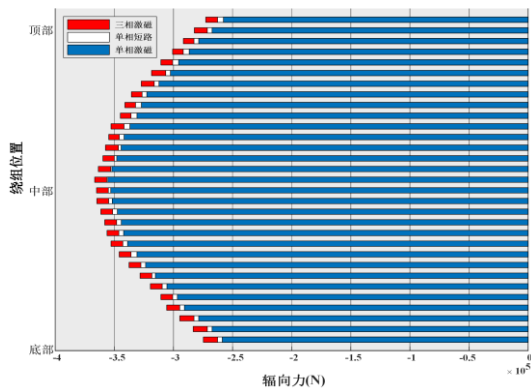


图 11(a) 低压绕组幅向力分布图

Fig.11(a) Radial force distribution diagram of LV

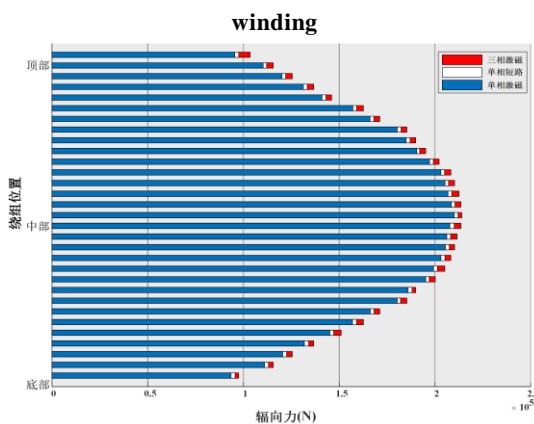


图 11(b) 高压绕组幅向力分布图

Fig.11(b) Radial force distribution diagram of HV

winding

B 相高低压绕组幅向电动力分布如图 11，垂直于轴向且方向向外的力，其方向为正，垂直于轴向且方向向内的力，其方向为负。

通过图 10、图 11 可知绕组所受轴向电动力与幅向电动力与图 9 中单元电动力矢量分布一致。且三相激磁三相短路、单相激磁三相短路时其过零合闸相所受电动力与单相短路时短路相所受电动力大小相近，其过零合闸相与短路相的短路电动力最大值比较如表 5 所示。

表 5 不同模式下的电动力

Tab.5 Electrodynamics force of different modes

激磁短路方式	低压绕组		高压绕组	
	最大轴向力(N)	最大幅向力(N)	最大轴向力(N)	最大幅向力(N)
三相激磁	114035	354866	153241	214059
单相短路	113142	341562	150138	209753
单相激磁	112370	339807	148762	204558

分别将低压绕组与高压绕组的三相短路、三相激磁时的最大轴向力与最大幅向力设为基准值，单相短路时其低压绕组最大轴向力误差为 0.78%，低压绕组最大幅向力误差为 3.74%，高压绕组最大轴向力误差为 2.02%，高压绕组最大幅向力误差为 2.01%；三相短路单相激磁时其低压绕组最大轴向力误差为 1.46%，低压绕组最大幅向力误差为 4.24%，高压绕组最大轴向力误差为 2.92%，高压绕组最大幅向力误差为 4.43%。

4 结论

本文通过对于一台 SB13-M-200/10 配电变压器的仿真计算，得到短路电流变化情况以及各相电流峰值数据，并结合实测数据，证明该三维有限元仿真模型设计的合理性，通过三种不同的激励及短路方式研究变压器高低压绕组的电动力分布特点，并加以比较，可得到以下结论：

(1)当进行变压器单相短路试验时，非短路相低压绕组断路，其对应的高压绕组中有微小的循环电流流过。

(2)高压绕组与低压绕组所受轴向方向的电动力最大值位于绕组轴向两端侧，绕组中部受力较小；所受幅向方向的电动力最大值位于绕组中部，绕组两侧受力较小。

(3)当进行三相短路试验时，单相电源试验的过零合闸相电动力与三相电源试验的过零合闸相电动力大小相近，误差很小。

(4)当进行单相短路试验时，短路相电动力与三相短路试验的过零合闸相电动力大小相近，误差很小。

基于不同激励与短路方式下做短路试验，计算对比变压器绕组短路时的电流大小与力学分布特性，分析得出可使用单相电源短路试验代替三相电源短路试验与单相短路试验，对于改善变压器的抗短路能力有一定的指导作用，为后续改进短路承受能力试验提供了理论和试验依据。

参 考 文 献

- [1] 闫振华, 马波, 马飞越等. 220kV 电力变压器短路动力学性能分析[J]. 高压电器, 2014, 50(03): 79~83
- [2] 于少泽, 咸日常, 李海涛等. SBH15 型非晶合金变压器短路电动力分析及优化措施[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(20): 8187~8192
- [3] 徐永明, 郭蓉, 张洪达. 电力变压器绕组短路电动力计算[J].

- 电机与控制学报, 2014, 18(05): 36~42
- [4] 富强. 突发短路故障造成变压器损坏的原因分析及预防措施[J]. 高压电器, 2008, 44(06): 569~573
- [5] 伍衡, 李中祥, 李俊等. 一起 500kV 变压器短路故障分析及处理[J]. 变压器, 2014, 51(09): 69~72
- [6] 杨洋, 黄文龙. 运行时间较长的变压器短路故障损坏的分析[J]. 变压器, 2012, 49(10): 58~60
- [7] Kumbhar G B, Kulkarni S V. Analysis of Short-Circuit Performance of Split-Winding Transformer Using Coupled Field-Circuit Approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22; 22(2; 2): 936~943
- [8] Ahn H, Oh Y, Kim J, et al. Experimental Verification and Finite Element Analysis of Short-Circuit Electromagnetic Force for Dry-Type Transformer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48; 48(2; 2): 819~822
- [9] Zhao Y, Chen W, Jin M, et al. Short-Circuit Electromagnetic Force Distribution Characteristics in Transformer Winding Transposition Structures[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2020, 56; 56(12; 12): 1~8
- [10] Faiz J, Ebrahimi B 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 Transactions on Magnetics, 2008, 44; 44(5; 5): 590~597
- [11] 欧小波, 汲胜昌, 王春杰等. 基于“场-路”耦合有限元分析法的变压器短路电抗仿真的研究[J]. 高压电器, 2010, 46(03): 59~63
- [12] 关庆罡, 孟杰, 吕祥鹏. 变压器短路试验中电流计算相关理论公式的推导和分析[J]. 变压器, 2020, 57(12): 18~21
- GUAN Qinggang, MENG Jie, LYU Xiangpeng, Derivation and
- [13] 王凯东, 张森鹏, 井永腾. 电力变压器短路力计算方法研究[J]. 变压器, 2019, 56(02): 54-56.
- 作者简介:
罗晓泉 (1993.08-), 男, 重庆市, 硕士研究生, 工程师, 从事高电压与绝缘技术研究。