

电力变压器高对中短路绕组瞬态受力研究

● 李德波 广东电科院能源技术有限责任公司 广州 510060

摘要：

为准确计算电力变压器绕组短路瞬态受力，在Ansys Maxwell软件建立了220kV的油浸式三相电力变压器三相短路的三维磁-结构耦合模型。采用瞬态磁场求解器对高对中短路情况进行了仿真，计算得到变压器绕组的瞬态短路力分布。数值模拟结果表明：绕组的瞬态短路力波形的幅值变化趋势大致跟短路电流保持一致，最大值发生在0.01s时刻，此时也是短路电流达到最大值，瞬态短路力波形过零点时与X轴重合时间随着短路过程的发展逐渐缩短。

关键词：油浸式变压器，短路，磁-结构耦合，Maxwell，瞬态电动力

引言

变压器发生突然短路时，变压器绕组会流经很大的穿越电流。变压器绕组上的电动力由短路电流与漏磁场的相互作用产生，由于短路时绕组中的短路电流很大，绕组上电动力与短路电流的平方成正比，故短路时绕组上的电动力相比于正常情况是很大的^[1-3]。短路的暂态过程持续时间虽然很短，但是如果变压器的短路强度不够，也会遭到严重损坏，造成绕组内部线圈严重扭曲、绕组匝间短路、绝缘结构遭到破坏等一系列故障，致使变压器所处电网瘫痪^[4-7]。因此，国家及国际相关标准均对电力变压器的承受短路能力有相关的要求^[8-10]，要求电力变压器应具有在运行中能够承受各种变压器外部短路事故的抗短路能力，但是解决这类问题首先要解决的是关于电力变压器绕组短路瞬态受力的精确计算。

近年来，随着计算能力的不断提高，研究人员和工程师对电力变压器绕组短路瞬态受力进行了大量的数值模拟^[11-18]。刘文里等人^[11]采用“场-路”耦合方法，以一台220kV/120MVA双绕组电力变压器为例进行了高压绕组的辐向稳定性评估。沈阳工业大学的孙昕博士对一台110kV变压器在突发短路后，断路器快速重合闸动作下变压器绕组受到的冲击电流，分析了该电流冲击下的电磁场和绕组静态电磁力分布^[12]。王欣伟等人^[13]基于电力变压器内绕组的结构参数，通过两种软件的计算，对电力变压器内绕

组辐向抗短路能力的计算结果做了对比和分析，对影响电力变压器内绕组辐向抗短路能力的参数进行了研究和论述。鲁非等人^[14]和孙翔等人^[15]针对短路瞬态力引起的轴向位移故障的诊断方法进行了研究，结合实际应用案例，从检测方式、测试结果的影响因素、检测信息量、检测灵敏度、变形判断方法及检测标准等角度对不同检测方法进行了分析比较。

本文通过ANSYS Workbench15.0有限元分析软件中的Maxwell模块建立变压器三维磁-结构耦合模型，在仿真过程首先将变压器绕组由下到上分成10个等分区域，在静态条件下仿真分析出受力最大分区，然后再在受力最大分区域内，单独建立单匝线圈模型；最后通过拟合高对中短路试验电流作为变压器绕组激励，采用瞬态磁场求解器计算得到单匝线圈在短路的情况下线圈瞬态短路力分布，并总结了对应的规律，这将为对变压器在短路冲击下的累积效应、提高变压器的抗短路强度等相关研究提供工程参考。

1. 计算原理

1.1 电磁场方程

电力变压器绕组的电磁力由局部磁通密度计算，工程上通常采用有限元方法计算绕组区域的漏磁通。变压器绕组的磁场控制方程为^[19]：

$$\begin{aligned} \nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A - \nabla \frac{1}{\mu} \nabla \cdot A \\ + \sigma \nabla V + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = i \frac{n_c}{S_c} i(t) \text{ 在 } \Omega_1 + \Omega_2 \text{ 内} \quad (1) \\ \nabla \cdot (-\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla V) = 0 \text{ 在 } \Omega_1 \text{ 内} \end{aligned}$$

式(1)中, Ω_1 和 Ω_2 分别代表涡流区和非涡流区; A 为矢量磁位; V 为标量电位; μ ; σ ; $i(t)$ 为绕组切向的单位矢量; S_c 为绕组截面积; n_c 为绕组匝数; $i(t)$ 为每匝的电流。

将上述场方程进行单元离散, 整理后, 可得电磁场方程的总体合成矩阵方程为:

$$[K]\{A_v\} + [M] \frac{\partial}{\partial t} \{A_v\} - [C]\{I\} = 0 \quad (2)$$

式(2)中, $\{A_v\} = [A_x \ A_y \ A_z \ V]^T$; I 为支路电流。

利用有限元分析法, 在求得矢量磁位和标量电位的场分布值后, 利用相应的转化关系就可以得到磁场中的其他各种物理量。

1.2 绕组电磁力

将短路电磁力分成辐向分量和轴向分量是比较常见的计算短路力的做法。在强度计算时, 可以考虑分别独立计算, 因为这两种力通常产生不同的应力, 引发不同的、独立的损坏模式。

1.2.1 辐向电磁力

辐向力是由轴向磁通产生的, 轴向磁通矢量的最大值在主空道达到最大值:

$$B_{\max} = \frac{1.256 \times \sqrt{2} \times N \times I \times 10^{-3}}{H_w} \quad (3)$$

式(3)中, 1.256×10^{-6} 为空气磁导率; N 为绕组的电气匝数; I 为绕组中电流的方均根值; H_w 为绕组的几何平均高度。

如果导体绕制很紧, 则在导体间实际可以达到共同负担电磁力, 因此有理由假定所有辐向导体每单位长度承受平均力如下:

$$F_u = \frac{\sqrt{2}}{2} \times B_{\max} \times I_c \quad (4)$$

式(4)中 I_c 是导线中的电流。

如果忽略绕组端部轴向磁通密度的降低, 整个绕组的全部辐向力 F_{rad} 为:

$$F_{\text{rad}} = 1.256 \times \frac{(N \times I)}{H_w} \times \pi \times D_m \times r^2 \times K^2 \times 10^{-6} \quad (5)$$

1.2.1 辐向电磁力

轴向力是绕组端部漏磁通发生辐向弯曲的结果, 受到轴向电磁力的方向主要是从绕组端部向绕组中部。在这种布置时, 靠近铁芯的内绕组(通常是低压绕组), 由于较多的磁通辐向进入铁芯柱闭合, 比外部绕组上有较高的轴向力。每一个柱的绕组的总轴向力计算公式为:

$$\begin{aligned} F_{\text{rad}} = 0.628 \times \frac{(N \times I)^2}{H_w^2} \times \pi \times D_m \times (d + \frac{a_1 + a_2}{3}) \\ \times (2K - 1) \times r^2 \times (k \times \sqrt{2}) \times 10^{-6} \quad (6) \end{aligned}$$

式(6)中, D_m 为内外绕组的平均直径; d 为主空道宽度; a_1 、 a_2 为绕组1、绕组2的辐向宽度; K 为罗果夫斯基系数。

2. 计算模型

2.1 变压器的主要参数和结构

在MAXWELL 3D中建立了220kV三相三柱式变压器数值计算模型, 该变压器部分参数如下, 表1为本算例产品的主要技术参数、表2为算例产品的绕组参数。

表1 变压器的主要技术参数

产品型号	额定容量 (MVA) 240/240
频率 50Hz	联结组号 YNyn0d11
电压组合 (kV) 220 ± 8 × 1.25%/121/11	额定电流 /A 393.6/715.7/2273
铁芯窗高 (mm) 2180	铁芯直径 (mm) 890

表2 变压器的绕组参数

参数名称	高压绕组	中压绕组	低压绕组
绕组内径 (mm)	745.5	562	477
绕组外径 (mm)	866.5	675.5	514
绕组高度 (mm)	1890	1890	1890
线圈上端至上铁轭距离 (mm)	180	180	180
线圈上端至下铁轭距离 (mm)	110	110	110
预压紧力 (N/cm ²)	250-300	250-300	250-300

2.2 物理模型

由于变压器内部几何构造复杂，考虑计算机的计算能力，对建立的变压器三维模型进行如下假设：

- (1) 绕组采用筒状结构，忽略绕组、垫块、撑条、匝间绝缘等结构件的影响；
- (2) 铁芯采用实心圆柱体建模，铁轭采用实心长方体块，忽略压板和夹件的结构，通过加载预紧力等效；
- (3) 近似认为变压器的结构件的材料均匀、各向同性；
- (4) 忽略变压器的油箱及油（采用仿真计算的真空区域代替）。

在MAXWELL软件中建立起三相三绕组式的变压器模型如下图1所示：

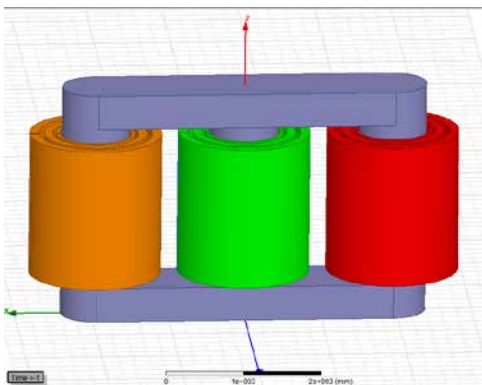


图1 变压器三维仿真模型

2.3 材料参数的选取

模型主要的材料参数如表3所示，图2为变压器铁芯磁化曲线。

表3 变压器各结构件材料参数

材料参数	铁心	绕组
密度 (kg/m ³)	7650	8900
电导率 (S/m)	1.12 × 10 ⁷	5.8 × 10 ⁷
相对介电常数	1	1
泊松比	0.26	0.325
杨氏模量 (Pa)	2.06 × 10 ¹²	1.15 × 10 ¹¹

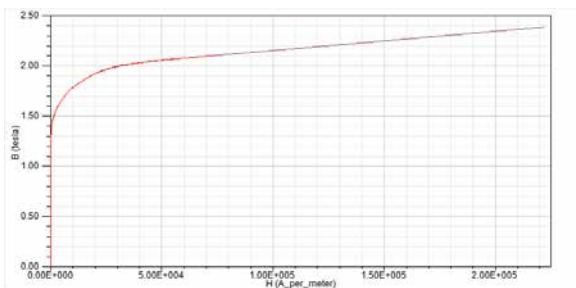


图2 铁芯B-H特性曲线

2.4 激励设置

变压器的短路试验是高压绕组对中压绕组短路试验，实验电压施加于高压线端与中性点之间，中压全短路，低压开路一点接地。通过记录的数据，利用MATLAB拟合对应的短路电流波形作为仿真模型的激励。

高压侧A、B、C三相短路电流公式：

$$I_{HA} = 2450 \sin(100\pi t - \frac{\pi}{2}) + 2450e^{-5t}$$

$$I_{HB} = 2450 \sin(100\pi t + \frac{\pi}{6}) + 2450e^{-5t} \tag{7}$$

$$I_{HC} = 2450 \sin(100\pi t + \frac{5\pi}{6}) + 2450e^{-5t}$$

中压侧a、b、c三相短路电流公式：

$$I_{Ma} = 15565 \sin(100\pi t - \frac{\pi}{2}) + 15565e^{-5t}$$

$$I_{Mb} = 15565 \sin(100\pi t + \frac{\pi}{6}) + 15565e^{-5t} \tag{8}$$

$$I_{Mc} = 15565 \sin(100\pi t + \frac{5\pi}{6}) + 15565e^{-5t}$$

3. 计算模型

3.1 绕组静态受力分析

首先将变压器的绕组在高度上由下往上等分成10分区（由下至上），施加短路电流的峰值作为激励，高压绕组2927A，低压绕组33803.9A，中压绕组开路，进行静态仿真分析，图3和4为仿真得到绕组受力密度矢量图。

计算每个分区绕组受到的合力，即辐向合力和轴向合力。辐向合力为仿真模型坐标系中沿X方向和Y方向中受到的合力，轴向力即为沿Z轴方向的合力。图5和图6分别为绕组辐向和轴向合力分布图。

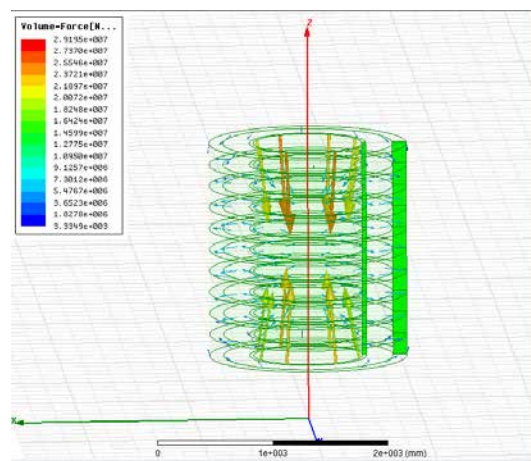


图3 绕组受力密度平视图

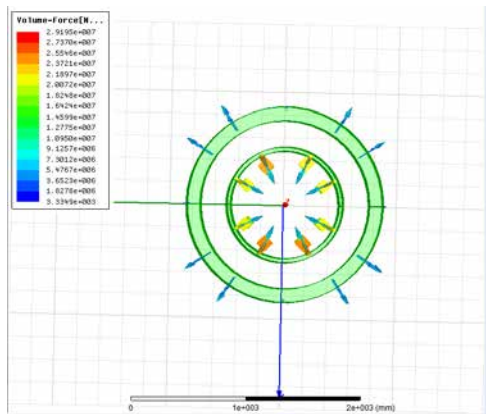


图4 绕组受力密度俯视图

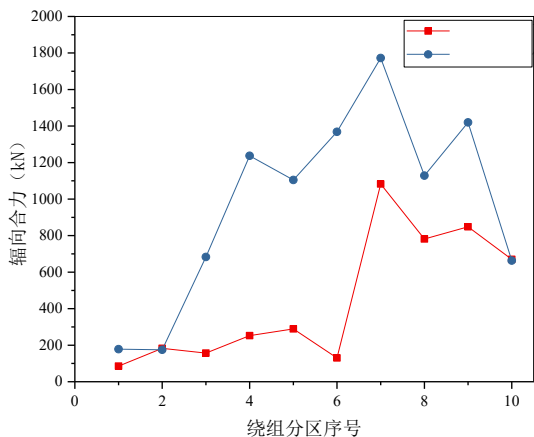


图5 绕组辐向合力分布图

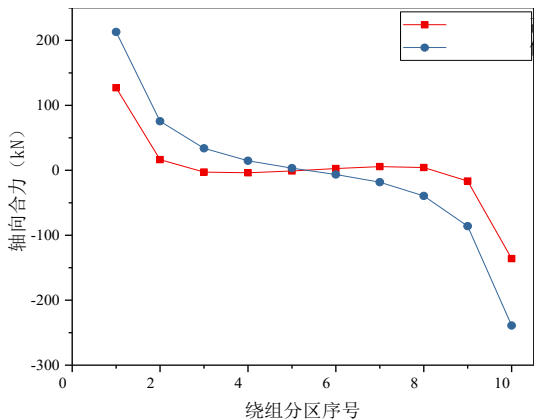


图6 绕组轴向合力分布图

由图3、图4可以看出，高压绕组受到的辐向力是向外的，及相当于往外拉伸力，低压绕组受到的辐向力是向内的，及相当于往里的压缩力；高压绕组和低压绕组端部的轴向力都是往绕组中部方向压缩。

图5和图6表明，低压绕组受到的辐向合力和轴向合力大于高压绕组受到对应的合力；10分区模型的高压绕组和低压绕组都是在第7分区受到的辐向合力最大；10分区模型的高压绕组和低压绕组都是在两端部受到的轴向合力最大。

3.2 绕组瞬态受力分析

由于在对变压器绕组进行瞬态受力分析时，无法做出对绕组每个部位随时间变化的受力曲线，所以针对这些受力比较大的部分进行细化分区，得出这些部位随时间变化的受力曲线。因此，基于上面提到的仿真的思路，在进行瞬态仿真分析之前，对于高压绕组，在绕组上端部单独建立一匝线圈模型，再在第7分区单独建立一匝线圈模型；同样对于中压和低压绕组，在绕组上端部单独建立1个一匝线圈模型，再在第7分区单独建立一匝线圈模型，建立好的模型如图7所示。

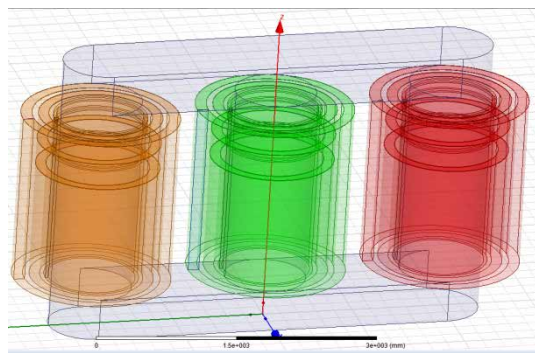


图7 局部细化的三维变压器模型

由于变压器短路时，继电保护的作用时间一般在100ms内，且考虑到计算机计算能力，将仿真时长设置为0.08s，仿真步长为0.0002s。施加高对中短路拟合激励，在ANSYS Maxwell 仿真软件设置完边界约束条件后，得到A相绕组的瞬态受力分析曲线图。

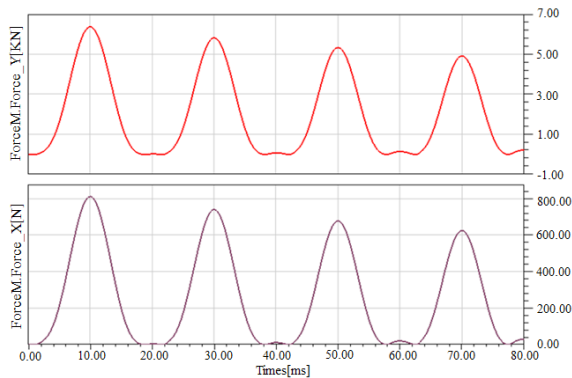


图8 高压绕组上端部（10分区）线圈辐向瞬态受力波形

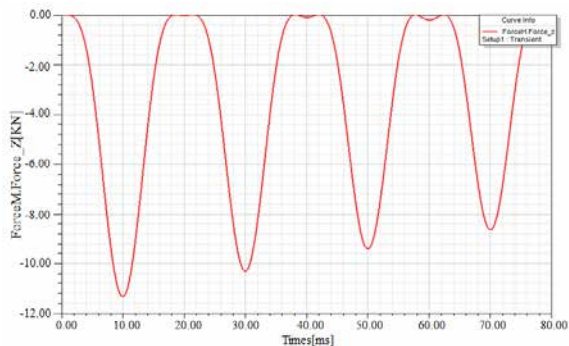


图9 高压绕组上端部（10分区）线圈轴向瞬态受力波形

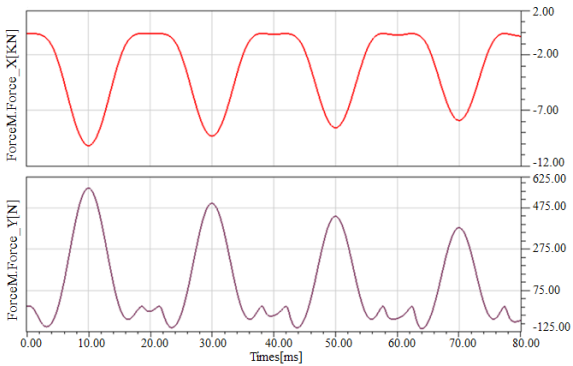


图10 中压绕组上部端部（10分区）线圈辐向瞬态受力波形

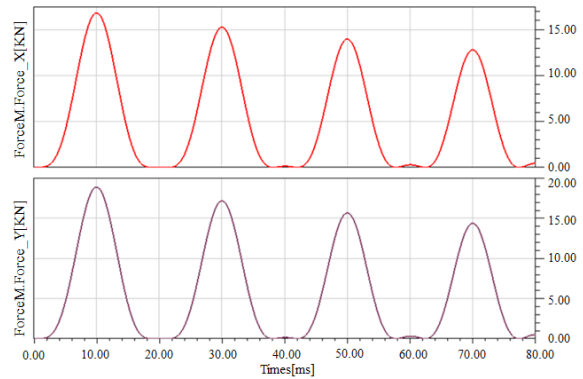


图14 中压绕组第7分区线圈辐向瞬态受力波形

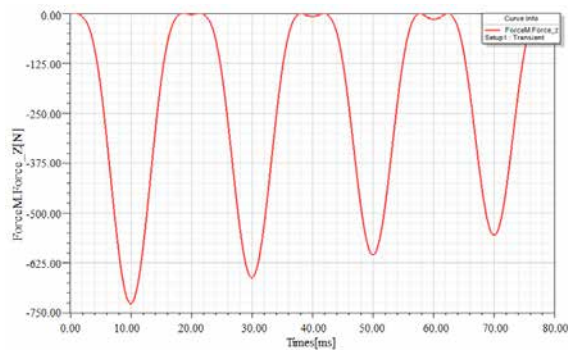


图11 中压绕组上部端部（10分区）线圈轴向瞬态受力波形

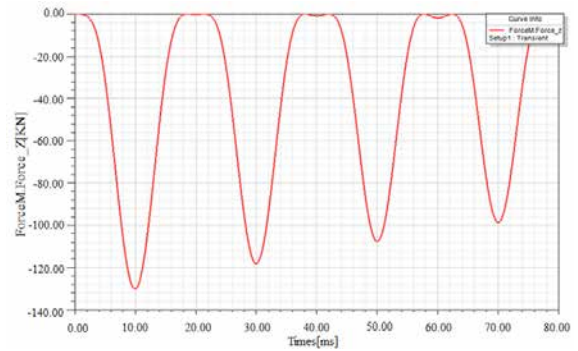


图15 中压绕组第7分区线圈轴向瞬态受力波形

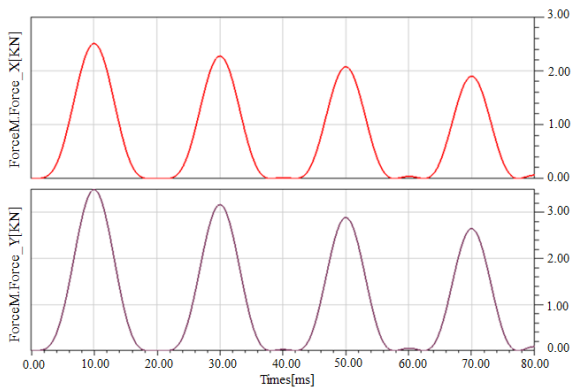


图12 高压绕组第7分区线圈辐向瞬态受力波形

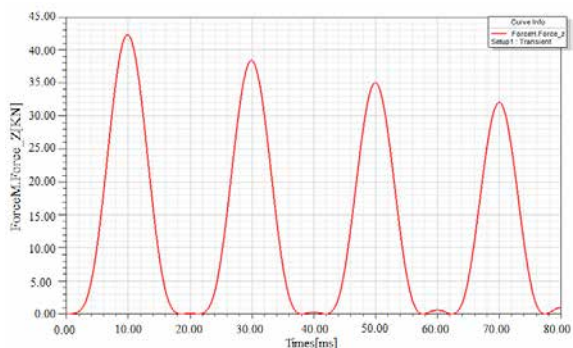


图13 高压绕组第7分区线圈轴向瞬态受力波形

上面波形图是在受力薄弱区域具体位置的一个单匝线圈在辐向和轴向所受合力的波形图。由图8和图10可以看出，高压绕组顶端（外绕组）和中压绕组顶端（内绕组）所受到的辐向力的方向是相反的，外绕组呈现向外扩张的趋势，内绕组是呈现向内坍塌压缩的趋势。由图9和图11可以看出，高压绕组对中压绕组短路试验，高压绕组受到的电磁力都远远小于中压绕组所受的电磁力。由图12、13、14和15可以看出第七分区单匝线圈的所受短路力与顶端线圈基本一致，瞬态受力波形的幅值变化趋势均大致跟短路电流保持一致。但是由于电动力与电流的平方成正比，所以绕组所受到的电动力都是在X轴的上方，当瞬态受力波形第一次过零点时，波形开始与X轴重合，持续时间为0.04s，第二次过零点是，与X轴重合时间变短；越往后面发展，重合时间越短，并且逐渐远离X轴。

4. 结论

本文在ANSYS Workbench15.0有限元分析软件中的Maxwell模块建立了220kV的油浸式三相电力变压器三维磁-结构耦合模型，通过拟合的高对中短路试验电流并作为变压器绕组激励，仿真计算出变压器绕组瞬态受力分布。通过分析绕组瞬态受力波形可以得到如下结论：

高压绕组对中压绕组短路试验，高压绕组受到

的电磁力都远远小于中压绕组所受的电磁力。

在短路电流的冲击下，绕组的瞬态受力波形的幅值变化趋势大致跟短路电流保持一致，但是由于电动力与电流的平方成正比，所以绕组所受到的电动力都是在X轴的上方，当瞬态受力波形第一次过零点时，波形开始与X轴重合，持续时间为0.04s，第二次过零点是，与X轴重合时间变短；越往后面发展，重合时间越短，并且逐渐远离X轴。

高压绕组顶端（外绕组）和中压绕组顶端（内绕组）所受到的辐向力的方向是相反的，外绕组呈现向外扩张的趋势，内绕组是呈现向内坍塌压缩的趋势。

瞬态受力波形的最大值发生在0.01s时刻，此时也是短路电流达到最大值，最大值达到千牛级别，对绕组的垫块、撑条、压板考验巨大。

参考文献:

- [1] 李龙女, 李岩, 井永腾, 等. 电力变压器漏磁场与杂散损耗计算的研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(增刊 2): 122-127.
- [2] 朱占新, 谢德馨, 张艳丽. 大型电力变压器三维漏磁场与结构件损耗的时域分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(9): 156-160.
- [3] 周杰联, 李德波, 冯永新, 等. 油浸式三相变压器短路状态下电磁场数值模拟[J]. 广东电力, 2017, 30(2):97-101.
- [4] 中国电力科学研究院. 国家电网公司变压器抗短路研究报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2006.
- [5] 王梦云. 110kV及以上变压器事故与缺陷统计分析[J]. 供用电, 2007, 24(1):1-5.
- [6] 姜益民. 变压器运行中短路损坏的常见部位及原因分析[J]. 变压器, 2005, 42(4):34-38.
- [7] 王开成, 王昕, 任树杰, 等. 变压器绕组变形测试技术的应用[J]. 黑龙江电力, 2004, 26(2): 143-145.
- [8] GB 1094.5-2008 电力变压器第5部分: 承受短路的能力[S].
- [9] IEEE Std C57.12.00-2010 IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers[S].
- [10] IEEE Std C57.12.90-2010, IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers[S].
- [11] 刘文里, 唐宇, 李赢, 等. 电力变压器高压绕组辐向稳定性评估[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2016, 21(4):90-95.
- [12] 孙昕. 短路与重合闸工况下大容量电力变压器绕组强度研究[D]. 沈阳工业大学, 2015.
- [13] 王欣伟, 连建华, 俞华, 等. 电力变压器内绕组辐向抗短路能力的计算与分析[J]. 变压器, 2013, 50(1):8-11.
- [14] 鲁非, 金雷, 阮羚, 等. 电力变压器轴向位移故障诊断方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(9):2916-2921.
- [15] 孙翔, 何文林, 詹江杨, 等. 电力变压器绕组变形检测与诊断技术的现状与发展[J]. 高电压技术, 2016, 42(4):1207-1220.
- [16] 汲胜昌, 张凡, 钱国超, 等. 稳态条件下变压器绕组轴向振动特性及其影响因素[J]. 高电压技术, 2016, 42(10):3178-3187.
- [17] 李冰阳, 臧春艳, 徐肖伟, 等. 电力变压器抗短路能力校核研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(增刊).
- [18] 杨成. 电力变压器轴向位移故障诊断方法[J]. 科研, 2016(12):00240-00240.
- [19] Tang R, Wang S, Yan L, et al. Transient simulation of power transformers using 3D finite element model coupled to electric circuit equations[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(4):1417-1420.