

[变压器]

环氧浇注干式变压器二维短路电动力研究

文/国网济南供电公司 逯怀东 张同乔

国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司 梁嗣元 王珊珊 顾 然

针对一台处于设计阶段的110 kV环氧浇注干式变压器，为了验证其承受短路电动力的能力，对其进行了二维短路电动力研究。首先，以外加单相电压源为激励，建立了其二维场路耦合模型。在考虑B-H曲线非线性情况下，对二次侧短路时的场-路耦合模型进行了分析计算。通过计算，得到了磁通密度的结果。进而，对该变压器A相不同取点路径下短路电动力进行了分析。

电力变压器是我国输配电系统中大量使用的电气设备，特别是低压配电变压器在居民供电中发挥着重要的作用。干式变压器由于具有防火、防爆、绿色环保等多方面的优势，在配电网中扮演着越来越重要的角色。变压器在负载运行时，一二次线圈均有电流流动，都要受到电磁力的作用。在额定工况下，电磁力一般并不大，线圈本身结构及线圈两端的绝缘垫块、压圈、夹件等固定装置足以承受。但是当变压器二次侧发生突然短路时，电流冲击值可达额定电流的20~30倍。由于电磁力与电流的平方成正比，所以突然短路时的电磁力可达额定工况时的几百倍。

虽然变压器一般有继电保护装置，但常常在断路器自动跳闸之前，变压器线圈已受到此强大的冲击力，将变压器的线圈扭曲、变形、匝绝缘断裂，以致破坏整个主、从绝缘结构，严重时甚至拉断导线。因此，在设计时必须考虑变压器能否承受突然短路电动力问题。

计算原理

当变压器中的一次绕组与电源接通后，就会在铁心中产生磁通。在铁心中由于励磁电压产生的磁通叫主磁通，主磁通的大小取决于励磁电压大小。在额定电压下励磁时产生的主磁通不应使

铁心饱和，即此时的磁通密度不应饱和，主磁通是向量，一般用峰值表示。当变压器中流过负载电流时，就会在绕组周围产生磁通。在绕组中由负载电流产生的磁通叫漏磁通，漏磁通大小取决于负载电流。

要计算绕组所受到的电磁力，可以通过安培力定律的一般形式来求解，如式(1)所示。

$$\vec{F} = \int \vec{J}_v \times \vec{B} dv \quad (1)$$

式中， J_v 为所在体单元的电流密度； B 为体单元处的磁感应强度； J_v 和 B 均可以通过场路耦合的方法求得。

通过上述方法可以得到整个绕组的受力情况，但是由于绕组中磁感应强度分布并不均匀，式(1)得到的结果并不能反映绕组的局部受力情况。为了得到绕组局部所受电磁力的情况，可通过求解不同节点的电磁力，以直观地反映电磁力的分布情况。

变压器场-路耦合模型

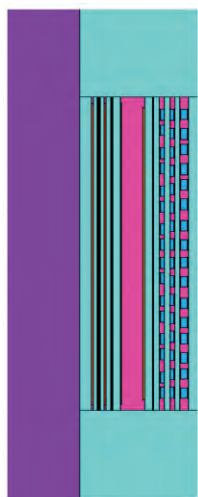
要进行正确的场路耦合分析，需要选择合适的场单元和路单元。由于变压器的三相绕组电气上是对称的，因此可以将三相变压器简化为单相变压器进行分析。对于单相轴对称变压器，可以降低为一个二维轴对称模型进行分析。对于二维

轴对称模型的场路耦合分析来说, 需要选择具有电动势和电流自由度的PLANE53场单元以及可用于耦合PLANE53的路单元CIRCU124。两种单元在该变压器模型中的具体应用如表1所示。

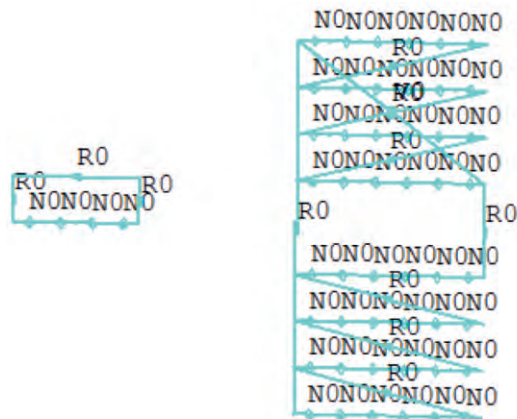
表1 变压器模型网格单元类型

变压器部件	场单元	路单元
高压绕组	电流耦合绞线导体	绞绕组
低压铜箔	电流耦合绞线导体	绞绕组
空气、铁心	磁实体矢量	—
供电电源	—	正弦电压源
短接导线	—	电阻

该环氧浇注干式变压器为三相平面变压器，高压侧采用扁铜线段式绕组，低压侧采用铜箔式绕组。高压侧额定电压为110 kV，低压侧额定电压为10 kV。其中高压绕组分上、下两段（均为Y接线），并以并列的方式进行绕线，而低压绕组为D接线。变压器的二维场—路模型如图1所示。



(a) 变压器有限元场模型图



(b) 变压器有限元路模型图

图1 变压器二维场一路计算模型

上述步骤已经分别建立起来变压器的二维有限元场模型和路模型，接下来需要将场单元的节点与路单元的节点耦合起来，要做到这一点，需要进行如下操作：创造CIRCUI124绞绕组单元（KEYOPT（1）=5）；创造有限元区域对应于高压绕组及低压绕组的PLANE53绞绕组单元（KEYOPT（1）=3），定义绕组实常数；把CIRCUI124绞绕组单元的K节点与对应有限元模型中绕组区域的任意一个节点连接到一起；选择对应于每个绞绕组的PLANE53单元，分别耦合它们的CURR自由度和EMF自由度。

CURR表示绕组每匝的电流, EMF表示通过绕组终端的电势降。因为绕组中的电流是唯一的, 通过绕组终端的电势降是唯一的, 所以需要定义未知的自由度的值是单值, 即耦合其自由度。路单元与场单元的耦合示意图如图2所示。

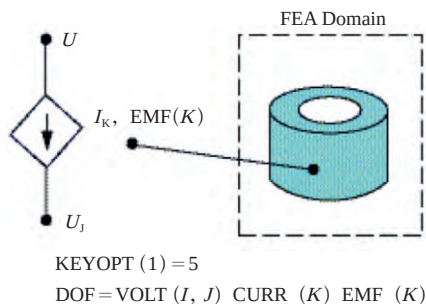
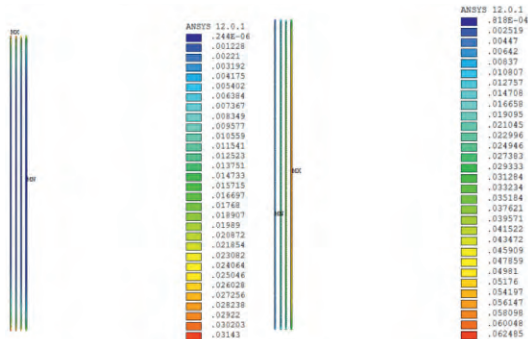


图2 场路单元耦合示意图

短路磁场及电动力分析

1. 短路磁场

在变压器的一次绕组施加额定电压，二次侧组连接额定负载，此时流过变压器两绕组的电流为额定电流。通过时谐场求解，可以得到正常运行情况下的漏磁场分布情况，如图3所示。



(a) 低压绕组幅向磁通密度

(b) 低压绕组轴向磁通密度

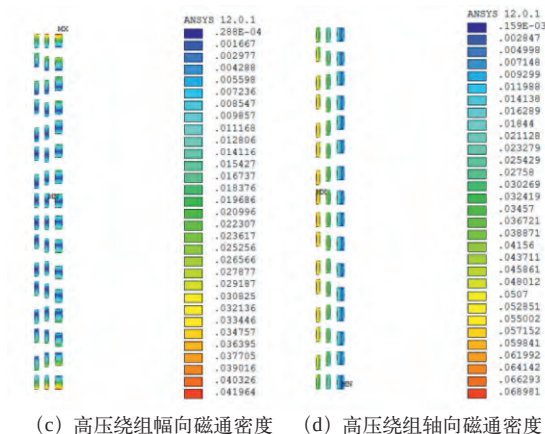


图3 变压器绕组磁感应强度云图

通过式(1),可以得到变压器各绕组的短路电动力,如图4所示。

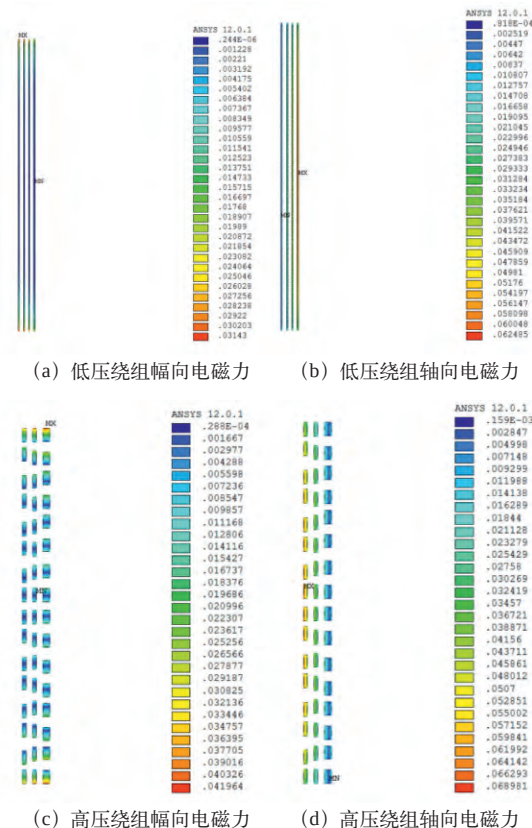


图4 变压器绕组电磁力云图

对于高压绕组和低压绕组的绕组,由于每圈所受电磁力相差不大,从云图上很难看出各匝电磁力的差异,因此有必要对每匝所受电磁力之和进行比较,以获得电磁力在高低压侧各绕组的分布情况。变压器低压绕组内外共有四层,取电磁力最大的第四层,从下往上均匀取32个观察点;分别比较每层观测点的幅向电磁力和轴向电磁

力,并得出其分别规律。低压绕组观察点电磁力如下图5所示。

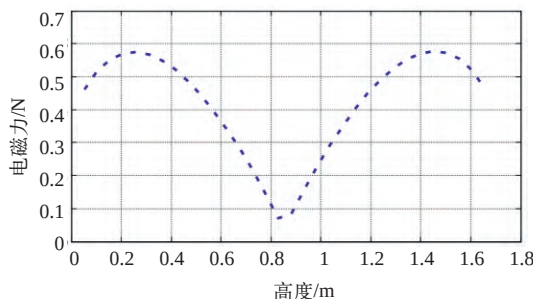
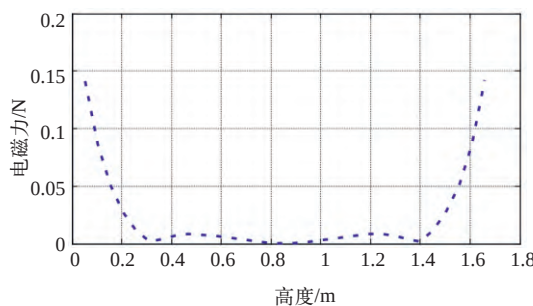
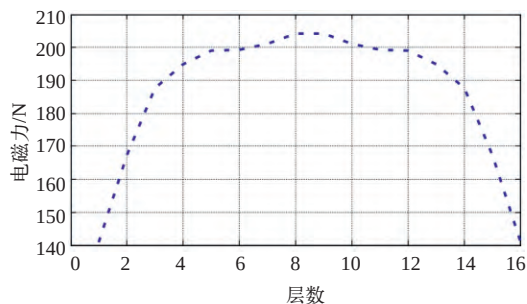


图5 变压器低压绕组电磁力分布图

从上图中可以直观的得到电磁力在低压绕组中的分布规律及大小特征。分析幅向电磁力和轴向电磁力可以发现,幅向电磁力在绕组的中间小范围区域数值较小,其他大部分区域的值都较大;而轴向电磁力恰巧相反,它在绕组的两端小范围区域数值较大,其他大部分区域的数值都很小。

变压器高压绕组内外共有三层,每层从下向上有16个导体块。取电磁力最大的第一层,对每个导体块所有节点幅向和轴向电磁力求和,并得出其分布规律。高压绕组导体块电磁力如图6所示。



(下转第67页)

曲线拟合软件1stOpt的操作界面如图7所示，可以提供各种类型曲线拟合公式，能满足工程计算的精度要求。

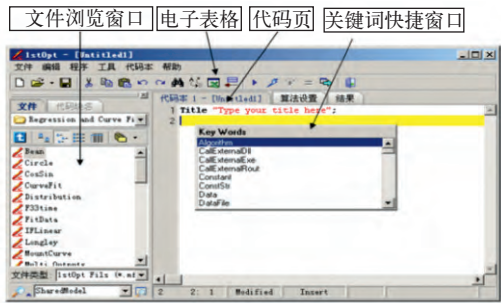


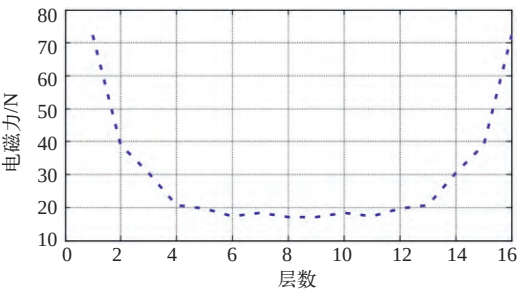
图7 曲线拟合软件1stOpt操作界面

铁心损耗系数的求解过程主要包括以下三个步骤：

- 1) 定义铁心磁通密度最大值 B_m 为自变量，定义单位铁损 P_v 为因变量，定义 k_h 、 β 、 k_c 、 k_e 为参数，以铁损计算公式作为拟合函数。
- 2) 以铁心单位损耗实验测量结果作为已知数据，在这里用50 Hz与60 Hz时的单位铁损值做曲线拟合，输入不同 B_m 对应的 P_v 。
- 3) 使用“标准麦夸特法+通用全局优化法”，修正参数值，进行拟合迭代，不断比较近似度，最后达到设定的收敛标准。

通过软件的曲线拟合得到30Q130型硅钢片参数结果参考值如表6所示，计算得到铁心磁通密度最大值为1.801 T时的单位质量铁心损耗为0.772 3 W/kg，该铁心质量为5 255 kg，故铁心总损耗 $P=0.772\ 3\ \text{W/kg} \times 5\ 255\ \text{kg}=4.058\ \text{kW}$ 。

(上接第62页)



(b) 第一层轴向电磁力

图6 变压器高压绕组电磁力分布图

从上图中可以直观的得到电磁力在高压绕组中的分布规律及大小特征。分析幅向电磁力和轴向电磁力可以发现，其规律和低压绕组不太一样。幅向电磁力在绕组的中间大范围区域数值较大，在两端小部分区域的值都较小；而轴向电磁力恰巧相反，它在绕组的两端小范围区域数值较大，其他大部分区域的数值都很小。

表6 30Q130硅钢片拟合系数参考值

参数	参考值
k_h	$2.618\ 47 \times 10^{-6}$
k_c	$4.443\ 90 \times 10^{-5}$
k_e^+	$8.247\ 15 \times 10^{-4}$
β	10.066 25

3. 变压器损耗

根据变压器二维和三维时谐磁场计算及相应经验公式，本文计算得10 000 kV·A 110 kV环氧浇注干式变压器各结构部件的损耗如表7所示，其中变压器铁心损耗占总损耗的18.2%，而绕组损耗占81.8%。

表7 变压器功率损耗值

变压器结构	损耗值/W
变压器铁心	4.058×10^3
高压绕组	8.874×10^3
上端低压绕组	4.210×10^3
下端低压绕组	5.155×10^3
总损耗	2.230×10^4

结论

本文以10 000 kV·A 110 kV环氧浇注干式变压器为计算对象，采用有限元分析计算了变压器二维和三维时谐磁场，分析了变压器铁心磁通及漏磁分布，并通过后处理及经验公式计算了变压器铁心及绕组损耗。计算结果表明，变压器铁心损耗占总损耗的18.2%，而绕组损耗占81.8%。EA

(收稿日期：2015.04.16)

(编辑：白文亭)

结论

本文通过对一台仍处于设计阶段的110 kV环氧浇注干式变压器进行建模，通过场-路耦合有限元仿真的方法，进行了短路磁场及短路电动力分析，得出如下结论。

- 1) 对于低压绕组，幅向电磁力在绕组的中间小范围区域数值较小，其他大部分区域的值都较大；而轴向电磁力恰巧相反，它在绕组的两端小范围区域数值较大，其他大部分区域的数值都很小。
- 2) 对于高压绕组，幅向电磁力在绕组的中间大范围区域数值较大，在两端小部分区域的值都较小；而轴向电磁力恰巧相反，它在绕组的两端小范围区域数值较大，其他大部分区域的数值都很小。EA

(收稿日期：2015.04.22)

(编辑：白文亭)