

[变压器]

110 kV环氧浇注干式变压器磁场有限元仿真计算

文/国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司 宋友肖黎王珊珊
武汉大学电气工程学院 刘超

基于有限元数值分析法建立了110 kV三相干式变压器的三维模型，采用三维时谐磁场计算变压器铁心处的磁通密度分布，进而根据经验公式求解变压器铁心损耗，计算表明变压器铁心损耗占总损耗的18.2%；通过对变压器绕组进行二维磁场实体建模并进行二维时谐磁场计算，从而求解绕组损耗，计算表明变压器绕组损耗占总损耗的81.8%。

环氧树脂浇注干式变压器是根据电磁耦合原理，将某等级的交流电压转变为频率相同的一种或几种电压等级的交流电压，以环氧树脂作为绝缘材料浇注而成的一种电气设备。由于其具有阻燃、无毒、体积小、无渗漏、安装方便等优点，逐渐成为公众聚集区、建筑密度高等场所的主要供电设备。因此，环氧浇注干式变压器电磁设计的合理性及损耗大小与变压器的安全可靠性和密切相关。

变压器磁场分析方法主要包含以下四种：①工程近似法：依据长期工程实践总结出的经验公式和经验系数来计算，只能用于计算相似结构变压器的电磁场，这种方法计算精度不高。②解析法：通过建立变压器数学模型，求解其解析表达式来得到电磁场的方法，主要包括直线法、镜像法、积分方程、保角变换法、综合矢量法等。③试验法：目前国内制造变压器的主要方法，厂家通过试验得到变压器参数，然后绘制出对应的曲线或给出试验的一些结论，该方法具有一定的局限性。④数值计算法：主要包括积分法、有限差分法和有限元法，有限元法具有通用性好、求解精度高，便于编程实现等特点，可用于分析电磁场领域多方面的问题，在工业界得到了广泛的应用。

本文应用基于有限元法的ANSYS软件对110 kV/10 000 kV·A的环氧浇注三相干式变压器进行三维建模，通过三维时谐场理论分析铁心处的磁密分布，计算铁心损耗及绕组损耗。

变压器结构与计算模型

1. 变压器结构参数

本文以10 000 kV·A 110 kV环氧浇注干式变压器为计算对象进行三维磁场分析，计算变压器铁心及绕组损耗。该环氧浇注干式变压器的主要结构包括变压器铁心、高压绕组、低压绕组及其他结构件，其中变压器铁心采用30Q130型硅钢片，铁心叠片总厚度为380 mm，铁心高度为2 120 mm；高压绕组线圈匝数为472匝，线圈内径为309 mm，外径为350.5 mm，线圈截面积为265 mm²；低压绕组分为上、下绕组两部分，绕组线圈匝数分别为51匝和30匝，绕组截面积分别为330 mm²和476 mm²，线圈内径为205 mm，外径为262 mm。

2. 变压器计算模型

根据变压器主要结构参数，忽略绕组环氧浇注及其他结构件，建立变压器三维实体模型，如图1所示。模型中考虑变压器铁心叠片结构，由于本文主要关注变压器磁场分布及损耗分析，变压器模型的简化等效可极大程度提升计算效率，且

对计算结果影响不大。

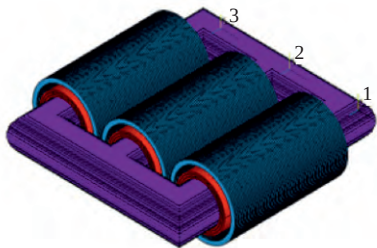


图1 环氧浇注干式变压器三维模型

变压器模型的网格剖分直接影响变压器磁场及损耗计算的准确性，同时需避免网格过细造成计算量过大，因此，变压器有限元模型网格大小也是计算的关键之一。本文采用三维六面体网格对变压器模型进行网格离散，最终离散得到变压器铁心及绕组模型网格数为 3.65×10^6 个，节点数 6.12×10^6 个，铁心及绕组模型的网格离散图如图2所示。

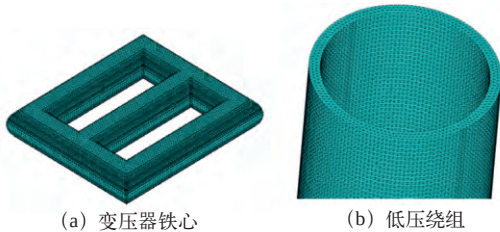


图2 变压器有限元模型网格离散

为计算变压器漏磁场及铁心损耗，建立变压器二维轴对称等效计算模型。为准确计算变压器绕组损耗，二维模型中对绕组进行精确建模，分别建立了高压绕组的476匝、上端低压绕组的51匝和下端低压绕组的30匝绕组。

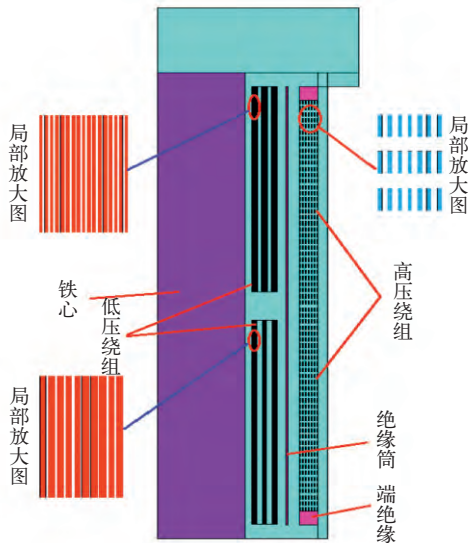


图2 环氧浇注干式变压器二维模型

变压器有限元模型

1. 有限元模型单元类型及材料参数

变压器模型采用Plane53单元进行离散，三维模型采用Solid97单元进行离散，模型中各结构的自由度选择如表1所示，忽略了变压器铁心的涡流损耗。

表1 变压器模型网格单元类型

变压器结构	单元类型及自由度	
	二维Plane53	三维Solid97
高压绕组	AZ, VOLT	AX, AY, AZ
低压铜箔	AZ, VOLT	AX, AY, AZ
变压器铁心	AZ	AX, AY, AZ
空气	AZ	AX, AY, AZ

本文的变压器二维及三维计算模型中主要包括变压器铁心、高压绕组、低压绕组和空气4部分，其中不考虑铁心的涡流损耗，因此铁心只设置相对磁导率，模型各部分的材料参数设置如表2所示。

表2 变压器计算模型材料参数

	电阻率/ $\Omega \cdot m$	相对磁导率
高压绕组	1.79×10^{-8}	1
低压绕组	1.79×10^{-8}	1
变压器铁心	—	$B-H$ 曲线
空气	—	1

2. 变压器磁场加载条件

变压器时谐磁场中的激励加载方式主要分为电流和电流密度加载方式两种。在本文的变压器二维时谐磁场计算中，为考虑绕组线圈的趋肤效应和临近效应对磁场分布及绕组损耗的影响，选择电流加载方式，而在三维磁场中，由于主要考虑变压器铁心磁通密度分布，采用电流密度加载方式。

变压器高压绕组的额定电流为451 A，高压绕组分上、下两部分且均为三角形接线方式，且高压绕组截面积为 26.5 mm^2 ，计算得高压绕组的电流有效值及电流密度有效值分别为65.098 A和 $2.456 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ 。同理，低压绕组的额定电流为922.3 A，上端低压绕组采用三角形接线方式，绕组截面积分别为 330 mm^2 ，计算得上端低压绕组的电流及电流密度有效值分别为532.505 A和 $1.613 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ ；下端低压绕组采用星形接线方式，绕组截面积为 297.5 mm^2 ，求得下端低压绕组的电流及电流密度有效值分别为922.3 A和 $1.938 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ 。计算中，电流及电流密度加载均为

最大值,因此,变压器二维和三维时谐磁场计算的激励及边界条件加载如表4和表5所示。

表4 变压器二维磁场计算加载条件

结构及位置	加载电流/A
高压绕组	$I_1 = 1.414 \times 65.098$
上端低压绕组	$I_2 = 1.414 \times 532.505$
下端低压绕组	$I_3 = 1.414 \times 922.3$
空气边界	AZ = 0

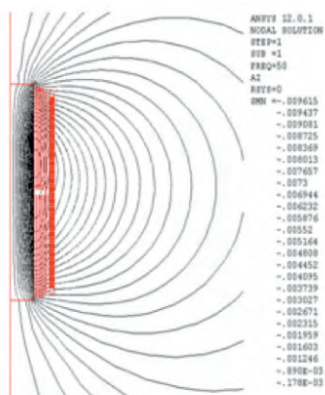
表5 变压器三维磁场计算加载条件

结构及位置	电流密度/(A/m ²)
高压绕组	$J_{s1} = 1.414 \times 2.456 \times 10^6$
上端低压绕组	$J_{s2} = 1.414 \times 1.613 \times 10^6$
下端低压绕组	$J_{s3} = 1.414 \times 1.938 \times 10^6$
空气外边界	AX, AY, AZ = 0

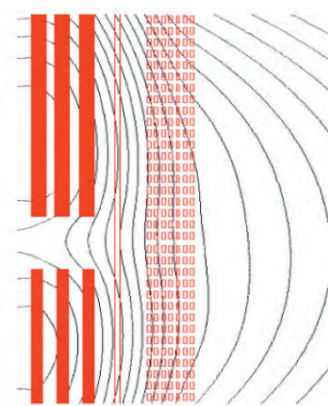
变压器磁场计算结果

1. 变压器二维磁场计算

在对变压器二维计算模型进行网格离散并完成激励和边界条件加载后,采用有限元分析软件对变压器二维时谐磁场进行求解,得到变压器漏磁场分布如图4所示。计算结果表明,变压器漏磁较小,且在靠近铁心处较为密集。



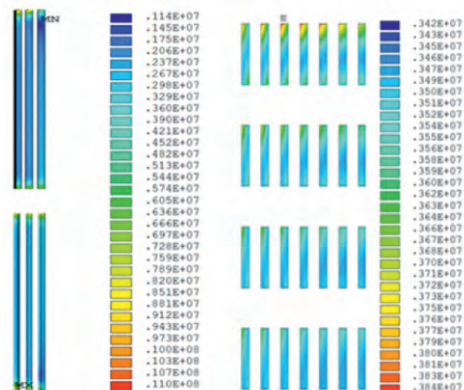
(a) 磁力线分布



(b) 绕组周围漏磁分布

图4 变压器二维磁场计算结果

变压器高、低压绕组电流密度分布如图5所示,可以发现变压器绕组表面电流密度较大,主要是受趋肤效应和临近效应的影响。



(a) 低压绕组

(b) 高压绕组

图5 变压器绕组电流密度分布

对变压器二维磁场结果进行后处理,得到高压绕组损耗为8.874 kW,上端低压绕组的损耗为4.210 kW,下端低压绕组的损耗为5.155 kW,计算值与实际变压器绕组损耗设计值一致。

2. 变压器三维磁场计算

采用有限元分析软件进行变压器三维时谐磁场分析,计算得变压器铁心磁通密度分布如图6所示。从图5中可以看出,铁心三相磁密分布基本一致,而中相的磁密幅值略大于两边相,中相的磁密最大幅值为1.801 T,铁心磁密的最大值出现在铁心的拐角处,其值不具有实际的意义,在此并未显示此处数值大小。

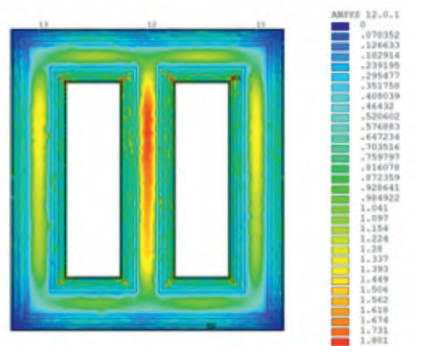


图6 铁心三维磁密分布

铁心损耗主要包括磁滞损耗、涡流损耗和附加损耗3部分,可通过经验公式估算得到,单位质量的铁心损耗计算公式如式(1)所示。

$$P_v = P_h + P_c + P_e$$

$$= k_h f B_m^\beta + k_c f^2 B_m^2 + k_e f^{1.5} B_m^{1.5} \quad (1)$$

式中, P_v 为单位铁损; P_h 为磁滞损耗; P_c 为经典涡流损耗; P_e 为附加损耗; f 为频率; B_m 为铁心磁密最大值; k_h 、 β 、 k_c 、 k_e 分别为损耗系数,可采用曲线拟合软件1stOpt插值计算得到。

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。

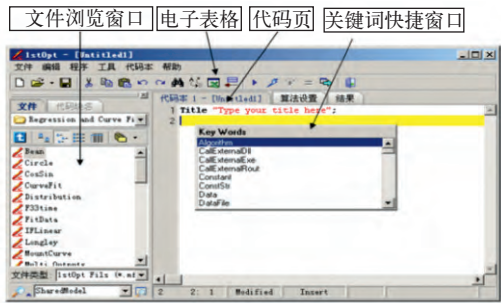


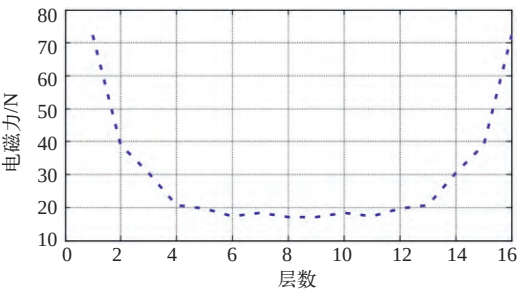
图7 曲线拟合软件1stOpt操作界面

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)