

大型电力变压器箱体不同屏蔽方式的屏蔽特性研究

针对大型电力变压器箱体屏蔽与降低箱壳涡流损耗问题,利用三维瞬态有限元法,在考虑箱体材料的非线性和磁屏蔽叠片结构的情况下,计算分析了不同屏蔽方式的屏蔽特性,对磁屏蔽叠片结构采用各向异性材料来近似表示叠片特性。以一台330 kV单相电力变压器为研究对象进行计算分析,分别计算研究了配置箱体前后侧磁屏蔽、增加上下磁屏蔽和增添箱体拐角铜屏蔽三种方案下箱体的磁场及涡流损耗。基于计算结果,总结了不同屏蔽方式的屏蔽特性,为工程设计提供了依据。

杨慧娜 张永帅/华北电力大学电气与电子工程学院



杨慧娜/讲师

近年来,我国电力工业迅速发展,变压器作为电力系统中能量转换的重要装置,其单台容量随之相应提高,漏磁场在变压器箱体中产生的涡流损耗也越来越严重^[1-3],由于考虑到大型变压器运输问题,变压器箱体尺寸不能太大,因此,在大型电力变压器中若不能很好地解决漏磁场问题,就会造成变压器箱体出现局部过热现象,影响变压器的效率和正常运行,长期下去会造成变压器局部绝缘老化,缩短变压器寿命,严重时还会威胁到变压器的安全。解决上述问题的一个有效方法就是给变压器加装屏蔽,磁屏蔽由非线性高导磁性能的硅钢片叠积而成,铜屏蔽由高导电性的铜板构成。

在变压器损耗中,由漏磁场引起的箱体涡流损耗占有相当的比例,并且通过实验的方法几乎不可能将这一损耗进行分离,找到涡流损耗密度较大、可能引起过热的部位更是困难,对于屏蔽设计更多的是依据多年的经验,这就给变

压器的设计带来了挑战和困难。而解决这一难题的有效途径就是采用有限元分析软件进行仿真计算^[4],通过对变压器进行有限元仿真计算,可以得到油箱上的磁场分布、涡流损耗分布,找到涡流损耗密度大的部位,然后通过合理的设计和采取必要的措施降低损耗,如加装磁屏蔽,使得过热现象得以避免,提高变压器的性能。

文献[5]采用Maxwell 3D涡流求解器计算了变压器箱体的漏磁场分布和涡流损耗,文献[6]应用Maxwell 3D涡流求解器对变压器夹件和箱体进行了漏磁场和涡流损耗计算,分析了屏蔽效果的影响因素,但Maxwell 3D涡流求解器中不能考虑材料的非线性,对于非线性问题的分析具有局限性,文献[7-9]采用ANSYS有限元软件对变压器的磁场分布和箱体的涡流损耗进行了仿真计算,没有考虑材料的各向异性非线性特性,而是认为各向同性线性。文献[10]在计算变压器箱体涡流损耗采用了表面阻抗法,但表面阻抗法只是一种近似的计算,并且不能考虑箱体的三维结构和箱体材料的非线性等细节问题^[11]。文献[12]采用三维非线性时谐场计算了变压器结构件的涡流损耗,但时谐场采用的是准非线性解法,严格地说,时谐法只能用于解决线性问题^[13],而在Maxwell 3D瞬态求解模块中可以很好地计及变压器箱体的非线性磁特性和叠片式磁屏蔽板的各向异性非线性特性,这对准确计算箱体在屏蔽情况下的涡流损耗是非常有意义的。因

关键词/Keywords

电力变压器·
三维瞬态场·
漏磁场·
涡流损耗·
各向异性非线性·
屏蔽·

此，本文在验证了Maxwell 3D有限元软件中瞬态求解模块算法准确性的基础上，对电力变压器的漏磁场、涡流损耗计算和屏蔽方法进行了研究，以一台330 kV单相电力变压器为例，对箱体在无屏蔽、配置前后侧磁屏蔽、增添上下侧磁屏蔽以及增设箱体拐角铜屏蔽的情况下分别进行了漏磁场分布和涡流损耗仿真计算，并且根据计算结果研究了各种屏蔽方案的屏蔽效果。

算法准确性验证

由于电力变压器的负载试验只能得到变压器总的杂散损耗，而无法分离出各金属构件的损耗，所以很难对变压器箱体的涡流损耗有限元计算值进行实验验证。对此，本文针对文献[13]中给出的变压器油箱损耗基准模型TEAM Problem 21-B，应用Maxwell软件中的瞬态求解模块进行了漏磁场和涡流损耗的数值计算，与文献[13]给出的该模型漏磁场和涡流损耗的测量值进行对比。图1是本文的磁通密度数值计算结果和文献[13]的测量结果，表1是本文的涡流损耗数值计算结果和文献[13]的测量结果。可以看出本文利用软件得到的数值计算结果和文献[13]给出的实验结果的误差很小，说明本文应用Maxwell软件的瞬态求解模块对变压器进行了漏磁场和涡流损耗的数值计算的准确性。

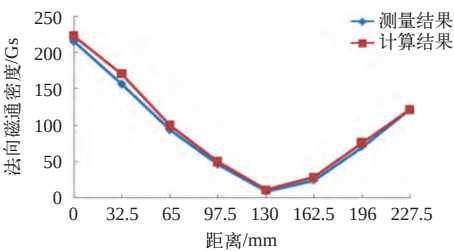


图1 磁通密度测量结果与计算结果对比

表1 涡流损耗测量结果和计算结果对比

模型	测量值/W	计算值/W	误差(%)
TEAM Problem21 B	8.03	8.08	0.62

变压器有限元模型

1. 模型建立

本文以一台330 kV单相电力变压器为研究对

象对变压器箱体的漏磁场及涡流损耗进行了计算研究。由于变压器结构的近似对称性，对变压器的1/8进行建模，以减少对计算机资源的需求、提高网格剖分质量，变压器模型如图2所示。根据此模型，重点研究了箱体在安装屏蔽前后漏磁场和涡流损耗的变化情况。绕组的电流密度近似认为均匀分布，采用等效实体建模；铁心模型简化为实体铁心，并且近似认为铁心柱为圆柱体；磁屏蔽板分块建模；箱体拐角均近似采用直接连接。

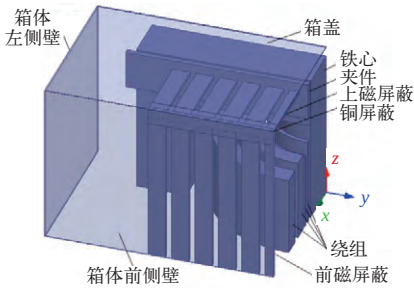


图2 电力变压器计算模型（1/8模型）

2. 材料属性

对模型各个部分材料特性模拟的准确与否，直接关系到计算结果的准确性，文献[13]通过对TEAM Problem 21基准模型的计算，证明变压器箱体材料按线性磁导率处理计算所得的结果与实测值偏差较大的结论。变压器箱体材料的磁导率实际是随着磁场强度的变化而变化的，尤其在饱和点附近磁导率的变化是很大的，在磁场较大的情况下，按线性处理是不合适的，因此本文为了准确计算变压器箱体的磁场分布和涡流损耗，计及了箱体的非线性磁特性；对于叠片式磁屏蔽板，通过设置叠积方向和叠积系数以及给定材料的B-H曲线，充分考虑了磁屏蔽的各向异性非线性磁特性，使得材料的模拟更加准确、计算结果更加可靠。表2给出了变压器各部分的材料属性。

表2 变压器各部分材料属性

	铁心	绕组和铜屏蔽	磁屏蔽	箱体和夹件
相对磁导率	B-H曲线	1	B-H曲线	B-H曲线
电导率(×10 ⁷ S/m)	0.2	5.77	0.222	0.648 4
叠积方向	—	—	V(1)/V(3)	—
叠积系数	—	—	0.97	—

注：前侧屏蔽的叠积方向为V(1)，即X轴方向，上侧屏蔽的叠积方向为V(3)，即Z轴方向。

3. 边界条件与激励源

由于采用了1/8计算模型，因此需要在各对称面添加对称边界条件，在图2模型中给定的坐标系下，在XOZ面和YOZ面磁力线平行于平面，添加奇对称边界，在XOY面磁力线垂直于平面，添加偶对称边界条件。瞬态求解时忽略激励中的谐波，仅考虑正弦基波情况，近似认为绕组的总安匝数平衡。

4. 网格剖分

有限元网格剖分的密度对计算结果有着直接的影响，对于变压器箱体这种大尺寸、低趋肤深度的结构问题，在剖分时应计及趋肤效应。趋肤效应是指导体中的涡流具有去磁效应，磁场进入导体后，其幅值沿导体厚度方向按指数规律衰减。趋肤深度计算公式为

$$d = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

式中， ω 为角频率； σ 为电导率； μ 为磁导率。

通过上式计算得到箱体的趋肤深度约为1 mm左右，远小于箱体的结构尺寸，若对整个箱体进行细致剖分将会带来太大规模的计算量，而实际情况是磁场在垂直箱体表面的方向剧烈变化，而在平行箱体表面的方向上变化并不大，因此可在磁场变化急剧的方向上通过分层加密网格来模拟磁场变化，使得在满足计算准确度的前提下减小计算量。

5. 计算方法

采用T- Ω 法对变压器进行三维仿真计算，T- Ω 法将求解域划分为涡流区和非涡流区，涡流区的控制方程为

$$\begin{cases} \nabla \times \rho \nabla \times \mathbf{T} - \nabla \rho \nabla \cdot \mathbf{T} + \frac{\partial \mu(\mathbf{T} - \nabla \Omega)}{\partial t} = -\frac{\partial \mu \mathbf{H}_s}{\partial t} \\ \nabla \cdot \frac{\partial \mu(\mathbf{T} - \nabla \Omega)}{\partial t} = -\nabla \cdot \frac{\partial \mu \mathbf{H}_s}{\partial t} \end{cases}$$

非涡流区的控制方程为

$$-\nabla \cdot \frac{\partial \mu \nabla \Omega}{\partial t} = -\nabla \cdot \frac{\partial \mu \mathbf{H}_s}{\partial t}$$

涡流密度为

$$\mathbf{J}_e = \nabla \times \mathbf{T}$$

铁磁材料中涡流损耗为

$$P_e = \int_v \frac{|\mathbf{J}_e|^2}{\sigma} dv$$

式中， $\mathbf{H}_s$ 为源电流在无限大空间所产生的磁场强度； $\mathbf{T}$ 为矢量电位； Ω 为标量磁位； σ 为电导率； μ 为磁导率。

无屏蔽时的计算结果

本文所研究的电力变压器的基本结构为单相三柱两旁轭铁心结构，绕组排列方式为由内到外依次是低压绕组、调压绕组、中压绕组和高压绕组。计算的工况为高-中压额定分接运行状态。

尽管各绕组总的安匝数平衡，但由于各绕组在空间上的分离，会在空间产生漏磁，且绕组的安匝数越大，漏磁就越大，一部分漏磁通经绕组外围的箱体形成闭合回路，在箱体中形成感应涡流，产生涡流损耗。

无屏蔽时，变压器箱体内部表面在电流最大时刻的磁场分布如图3所示，前壁的最大磁通密度为1.79 T，主要分布在对绕组中部位置，越靠近绕组中部，磁场汇聚的越多，磁通密度越大。从图3中看出在前壁正对绕组轴线位置较绕组略高处附近，由于不同方向磁场在此聚集，导致该处出现了一个磁场很小的区域。随着与绕组距离的加大，磁场逐渐减小。箱盖内表面的最大磁通密度为1.66 T，最大值出现在绕组正上方的箱盖位置。左侧壁由于铁心旁轭的存在，同时距离绕组也相对较远，其内表面的最大磁通密度为1.49 T，出现在靠近箱体前后侧壁的中部位置，相对于其他箱壁值最小。

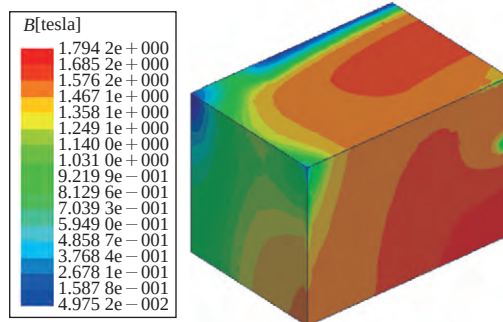


图3 无屏蔽时箱体内部表面磁场分布

变压器箱体内表面在涡流损耗最大时刻的涡流密度分布如图4所示, 涡流密度分布和磁场分布相似, 最大涡流密度出现在前壁对应绕组中部附近, 为 $1.53 \times 10^7 \text{ A/m}^2$, 箱盖的最大涡流密度值为 $9.80 \times 10^6 \text{ A/m}^2$, 左侧壁最大涡流密度值为 $2.46 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ 。可见漏磁场和涡流损耗主要集中在箱体靠近绕组的前后两个侧壁和箱盖箱底上。箱体在一个周期内涡流损耗平均值为146.5 kW。损耗很大, 应该采取屏蔽措施来降低损耗, 避免箱体发生过热。

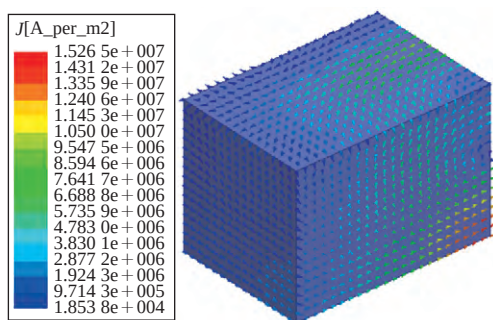


图4 无屏蔽时箱体内表面涡流密度分布

不同屏蔽时的计算结果与分析

1. 屏蔽方案一

由于漏磁通密度和涡流损耗密度的最大值都出现在箱体前后两个侧壁上, 因而首先在箱体的前后两个侧壁上配置磁屏蔽, 由于磁屏蔽板的导磁性能要远高于箱体的导磁性能, 因而磁屏蔽可对进入箱体的漏磁场起到有效的分流作用, 为进入箱体的漏磁通提供了一条低磁阻、低损耗的磁通路径, 从而大大降低了进入箱体的漏磁通, 达到大幅度降低箱体上的涡流损耗, 消除局部过热现象发生的屏蔽效果。

图5为在变压器箱体前后侧壁配置磁屏蔽情况下, 箱体内表面在电流最大时刻的磁通密度分布云图。由图5可知, 配置磁屏蔽后箱体前壁内表面最大的磁通密度从1.79 T下降到了1.55 T, 降低了0.24 T; 箱盖内表面的最大磁通密度从1.66 T下降到了1.54 T, 降低了0.12 T; 左侧壁的最大磁通密度从1.49 T下降到了0.48 T, 降低了1.01 T, 下降最为明显。在箱体的屏蔽区域磁通密度已下降得很

低。屏蔽不仅改变了箱体磁通密度的大小, 还改变了磁通密度的分布, 前壁内表面的最大磁通密度分布在磁屏蔽的端部, 主要是由于磁通在选择磁阻最小的路径时, 从屏蔽板中流出的大量漏磁通会优先选择进入导磁性能远好于空气的箱体, 使得箱体前壁靠近屏蔽板端部和箱盖靠近磁屏蔽板区域的磁通密度变得较为集中。可见采取箱体前后侧磁屏蔽的措施后, 有效地减少了箱体上的磁通密度, 起到了很好的屏蔽效果。

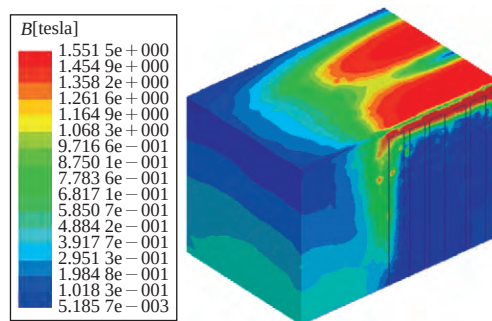


图5 屏蔽方案1箱体内表面磁场分布

箱体前壁屏蔽板表面的磁场云图如图6所示, 越靠近绕组中部的部位磁场就越集中, 最大磁通密度1.68 T, 其中沿着绕组的高度方向, 磁场减小的幅度比较大, 在垂直绕组高度方向上磁场变化的幅度相对较小。

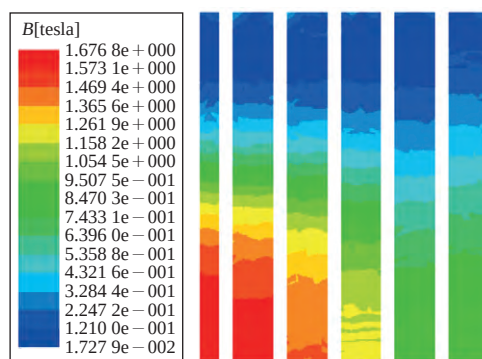


图6 箱体前壁屏蔽板的磁场分布

图7为变压器箱体内表面涡流损耗最大时刻的涡流密度矢量图, 屏蔽后箱体前壁内表面的最大涡流密度由 $1.53 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ 下降到 $6.71 \times 10^6 \text{ A/m}^2$, 下降56.1%, 箱盖最大值由 $9.80 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ 降低到 $6.53 \times 10^6 \text{ A/m}^2$, 下降50.1%, 左侧壁由最大值 $2.46 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ 减小为 $8.19 \times 10^5 \text{ A/m}^2$, 下降

66.7%。在箱体屏蔽区域，涡流密度有明显的下降，箱体涡流密度分布也相应发生了变化，整个箱体的最大涡流密度分布在前侧壁和箱盖壁靠近屏蔽板端部的附近，该部位的磁通密度大导致涡流损耗密度也大，但总体上看涡流密度有了很大的下降。屏蔽后箱体的涡流损耗计算值为11.97 kW，有效地减小了箱体的涡流损耗。可见配置前后侧磁屏蔽后，取得了良好的屏蔽效果，有效遏制了箱体局部过热现象的发生。

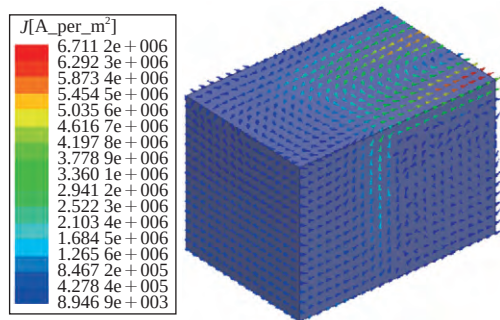


图7 屏蔽方案1箱体内表面涡流密度分布

2. 屏蔽方案二

配置了箱体前后侧磁屏蔽后，箱体的主要涡流损耗集中到了箱盖和箱底上，为进一步减小箱体的涡流损耗，屏蔽方案二在箱盖和箱底内表面增设了磁屏蔽，图8为变压器箱体内表面在电流最大时刻的磁通密度分布云图。

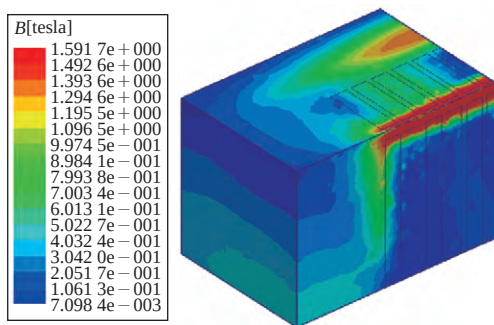


图8 屏蔽方案2箱体内表面磁场分布

图9为涡流损耗最大时刻箱体内表面的涡流密度矢量图，与屏蔽方案一相比，箱盖上被屏蔽区域的磁通密度和涡流密度得到减小，但在箱体拐角屏蔽板端部附近的最大磁通密度和最大涡流密度有所增加，其中最大涡流密度值增大了54.1%，原因是添加上下磁屏蔽后，磁场在箱体拐角靠近

屏蔽板端部的位置更加聚集。箱体总的涡流损耗计算值下降到8.44 kW。尽管此时箱体的损耗值已经很低，但损耗部位却变得更加集中，在屏蔽端部箱体拐角处很有可能会产生新的过热现象。

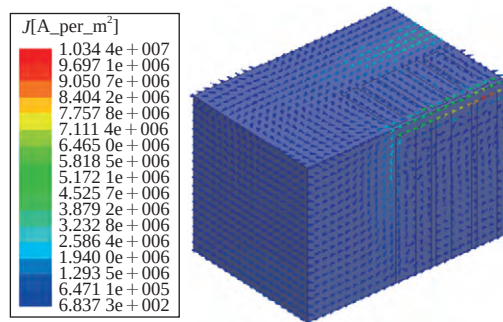


图9 屏蔽方案2箱体内表面涡流密度分布

3. 屏蔽方案三

针对屏蔽方案二中箱体拐角处涡流密度较大，有可能在该部位产生新的局部过热点的问题，屏蔽方案三中，在箱体损耗较大的拐角处增添了铜屏蔽，利用铜板的高导电性，使漏磁场进入铜板后产生的涡流，通过涡流的去磁作用减少进入箱体拐角处的漏磁通，降低箱体拐角处的最大涡流密度值。图10是电流最大时刻箱体内表面的磁通密度分布云图。

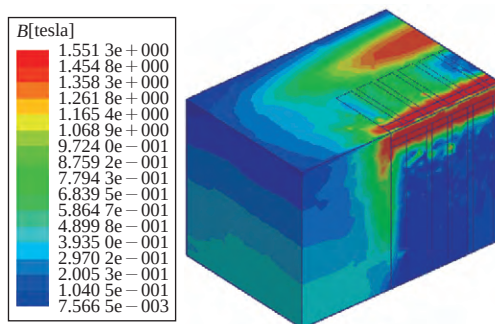


图10 屏蔽方案3箱体内表面磁场分布

图11为涡流损耗最大时刻箱体内表面的涡流密度矢量图，与屏蔽方案二相比，箱体的最大磁通密度和涡流密度都有所下降，其中最大涡流密度值为 6.90×10^6 A/m²，下降了33.3%，有效降低了箱体拐角处发生过热的风险，箱体的涡流损耗为8.56 kW，几乎没发生变化，主要是由于铜屏蔽虽然降低了箱体拐角处的最大涡流密度，但涡流密度较大的部位却有所扩大。

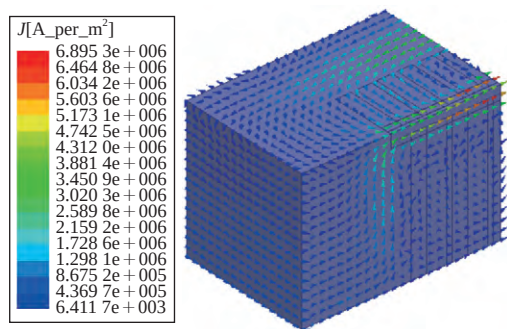


图11 屏蔽方案3箱体内表面涡流密度分布

结束语

本文采用Maxwell 3D有限元仿真软件中的瞬态求解模块,以一台330 kV的单相变压器为例,首先对变压器箱体漏磁场和涡流损耗计算方法进行了分析验证,然后计算分析了未屏蔽情况下箱体的漏磁场分布、涡流密度分布及涡流损耗,最后研究了三种屏蔽方案的屏蔽效果,得出以下结论:

1) 通过对TEAM Problem 21-B变压器油箱损耗基准模型的验算,验证了Maxwell 3D有限元软件瞬态求解模块计算变压器漏磁场和涡流损耗的有效性和准确性。

2) 未采取屏蔽措施时,变压器箱体的涡流密度和损耗值都很大,应当采取屏蔽措施来降低损耗,避免局部过热现象的发生。

3) 箱体的涡流损耗主要集中在靠近绕组的前后侧壁上,在前后侧壁上配置磁屏蔽后,箱体的磁通密度、涡流密度和涡流损耗有了明显的下降,达到了良好的屏蔽效果。

4) 增添箱盖、箱底磁屏蔽后,进一步降低了箱体的涡流损耗值,但屏蔽板端部箱体拐角处的损耗更为集中,易出现新的局部过热点,进而在该位置增添铜屏蔽,将最大涡流密度降低,达到了很好的屏蔽效果。

参考文献

- [1] 郭健,林鹤云,徐子宏,等. 电力变压器附加损耗计算机影响因素分析[J]. 高压电器, 2008, 44(6): 551-554.
- [2] 刘东升,张俊杰,赵峰,等. 特高压大容量变

压器三维涡流场计算和防止局部过热技术的研究[J]. 变压器, 2009, 46(9): 1-5.

- [3] 张文峰,王建民,戈文祺,等. 高压直流换流变压器附加损耗的计算[J]. 高压电器, 2011, 47(7): 18-23.

- [4] 张良县,陈模生,于健,等. 特高压换流变压器涡流损耗计算与屏蔽分析[J]. 变压器, 2013, 50(3): 15-20.

- [5] 耿荣林,谢德馨,李洪友. 变压器箱体涡流损耗的三有限元分析[J]. 变压器, 2008, 45(2): 1-4.

- [6] 额尔和木巴亚尔,李岩,孙昕,等. 电力变压器三维涡流场计算与屏蔽问题分析[J]. 高压电器, 2011, 47(10): 69-74.

- [7] 张卫纯,潘凤明,张新根,等. 基于有限元法的电力变压器金属结构件损耗分析[J]. 高压电器, 2013, 49(11): 55-60.

- [8] 张卫纯,沈向东,张新根,等. 油浸式变压器结构件涡流损耗的有限元计算[J]. 变压器, 2014, 51(2): 25-29.

- [9] 宫丽娜,刘文里,吴明君,等. 变压器油箱涡流损耗的三有限元分析[J]. 黑龙江电力, 2013, 35(2): 147-151.

- [10] Holland S, O Connell G P, Haydock L. Calculating stray losses in power transformers using surface impedance with finite elements[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1992, 28(2): 1355-1358.

- [11] 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(2): 122-127.

- [12] Yan Li, Eerhemubayaer, Xin Sun, et al. Calculation and analysis of 3-D nonlinear eddy current field and structure losses in transformer[C]. 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS).

- [13] 程志光,高桥则雄,博扎德·弗甘尼,等. 电气工程电磁热场模拟与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

(收稿日期: 2015-02-10) EA