



# Analysis of Leakage Magnetic Field and Winding Loss of Deep-sea Transformer

Lei Yang<sup>1,\*</sup>, Fu Gaojin<sup>2</sup>, Guo Hong<sup>3</sup>, Guo Jiangyan<sup>3</sup>, Liu Xushuai<sup>4</sup>

<sup>1</sup>CSIC 719th Institute, Wuhan, China

<sup>2</sup>China Electric Equipment (Jiangsu) Transformer Manufacturing Co. Ltd, Zhenjiang, China

<sup>3</sup>CNOOC Research Institute, Beijing, China

<sup>4</sup>School of Mechanical Science& Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China

## Email address:

leiyang428@163.com (Lei Yang), 8706661@qq.com (Fu Gaojin)

\*Corresponding author

## To cite this article:

Lei Yang, Fu Gaojin, Guo Hong, Guo Jiangyan, Liu Xushuai. Analysis of Leakage Magnetic Field and Winding Loss of Deep-sea Transformer. *Asia-Pacific Journal of Energy and Power Engineering*. Vol. 2, No. 2, 2020, pp. 10-16.

Received: June 27, 2020; Accepted: July 8, 2020; Published: July 17, 2020

**Abstract:** In this paper, taken the deep-sea transformer as the research goal and based on the numerical model method, the finite two-dimensional numerical model of deep-sea transformer is established by ANSYS and the leakage magnetic field and winding loss of the transformer are calculated. Then based on the two-dimensional numerical model, a three-dimensional model is established to solve the winding losses and verify the accuracy of the two-dimensional loss solution results. The analysis results show that the leakage magnetic field distribution and winding loss of the transformer obtained by the three-dimensional numerical model method are similar to the calculation results of the two-dimensional numerical model, which further verifies the accuracy of the finite element numerical calculation method in the calculation of the electromagnetic characteristics of deep-sea transformers With usability.

**Keywords:** Deep-sea Transformers, Electromagnetic Fields, Finite Element

## 深海变压器漏磁场及绕组损耗分析

雷阳<sup>1\*</sup>, 傅高金<sup>2</sup>, 郭宏<sup>3</sup>, 郭江艳<sup>3</sup>, 刘旭帅<sup>4</sup>

<sup>1</sup>中国船舶重工集团公司第七一九研究所, 武汉, 中国

<sup>2</sup>中电电气(江苏)变压器制造有限公司, 镇江, 中国

<sup>3</sup>中海油研究总院有限责任公司, 北京, 中国

<sup>4</sup>华中科技大学机械科学与工程学院, 武汉, 中国

## 邮箱

leiyang428@163.com (雷阳), 8706661@qq.com (傅高金)

**摘要:** 本文以深海变压器为研究目标, 基于数值模型方法, 利用ANSYS软件建立了目标变压器的二维等效有限元模型, 分别对变压器的漏磁场以及绕组损耗进行了计算分析。在二维数值模型的基础上, 进一步建立深海变压器的三维有限元模型, 并在三维数值计算环境下针对相同的分析目标开展研究工作。分析结果表明, 采用三维数值模型法计算得到变压器的漏磁场分布以及绕组损耗情况与二维数值模型的计算结果相近, 进而验证了有限元数值计算方法在针对深海变压器电磁特性计算问题中的准确性与可用性。

**关键词:** 深海变压器, 电磁场, 有限元

## 1. 引言

石油作为世界上的主要能源和重要战略物资,对国家的政治、经济和军事力量发挥着至关重要的作用[1]。为保障石油的开采量,国家采取措施,积极对海洋石油资源进行开采,而海洋石油开采需要大量电力[2],变压器是重要的电力设备,深海变压器应运而生。

绕组是变压器的主要部件,其中的铜损耗约占总绕组损耗量的八成,在变压器内产生很大的热量,此外,漏磁场引发的涡流损耗也对热量贡献有较大作用,这让绕组成为深海变压器中故障多发的部件[3],统计数据指出绕组的故障概率能占到变压器故障事件总和的六到七成。变压器总容量越大,漏磁场也就越强,与此同时由绕组中的导线感应出的涡流就会越强[4],这无疑会增加绕组的涡流损耗。损耗是热源的主要来源,所以损耗的增加会导致变压器温度升高,降低变压器的绝缘使用寿命,使得变压器使用年限大幅度降低。

本文的研究目的是通过分析深海变压器漏磁场,得出变压器二维及三维漏磁场的磁力线分布,进而分析计算绕组漏磁损耗,得出绕组具体的损耗值与具体分布。通过深海变压器的漏磁场及其损耗分析为变压器的热分析提供理论依据,总结出影响变压器热性能的关键因素,指导深海变压器的设计、制造及使用,避免深海变压器的热性能变差,和避免强大的漏磁场引发的极大机械力,提高深海变压器使用寿命[5]。

本文的主要研究问题为深海变压器的二维与三位磁力线分布情况和深海变压器的二维与三维绕组损耗分布情况。

## 2. 漏磁场与损耗分析

变压器工作时,电流流经变压器绕组,产生励磁电流[6],变压器铁芯内产生磁通。铁芯中的主磁通由励磁电压产生,主磁通经铁芯和绕组相交链,其大小在很大程度上受励磁电压的影响。变压器工作的时候,负载电流会在变压器的绕组上发生,变压器的内部不仅仅会有主磁通,还产生了小部分的漏磁通,漏磁通的产生是由于负载电流会和一次、二次绕组相交链然后在空气或油的内部产生回路[7],漏磁通的大小由负载电流的大小决定。

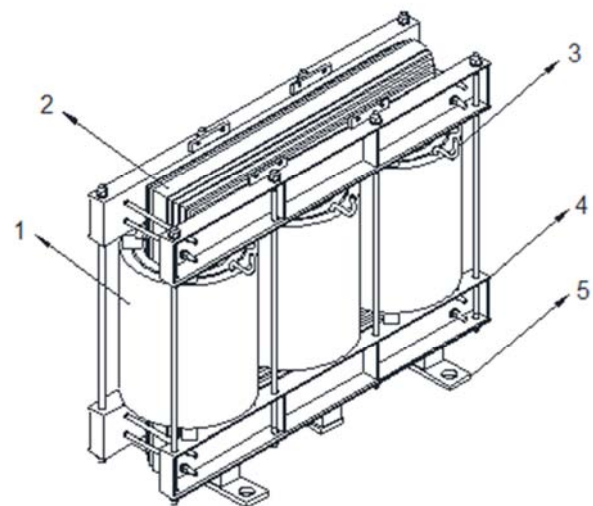
本文根据深海变压器工程图纸及其Pro/E模型,对三维模型进行适当简化,去除对深海变压器漏磁场和温度场影响不大的部件,由变压器结构的对称性,利用ANSYS有限元计算软件建立二维二分之一模型,求解得出深海变压器二维漏磁场磁力线的具体走势,并对其进行分析。二

维漏磁场分析无法得到三相完整的漏磁场情况,故加入三维漏磁场分析。在满足分析要求的前提下,合理简化三维分析模型,求出三维漏磁场磁力线分布情况,并验证二维漏磁场求解的准确性。

其次对变压器的主要损耗即绕组损耗以及电阻损耗和涡流损耗理论计算方法进行介绍。利用ANSYS有限元计算软件建立二维二分之一模型,计算得出绕组的损耗值,得出绕组损耗的具体分布,对损耗在铁芯、低压内绕组、低压外绕组、高压内绕组和高压外绕组的分布进行分析。建立三维模型,对绕组损耗进行求解,验证了二维损耗求解结果的准确性。

## 3. 实例分析

本文研究对象为一台型号为S11-M-800-11-3.3的800kVA三相油浸式变压器,图1为变压器去除外壳后的内部结构图,主要包括绕组、铁芯、夹件、底座和引线等部件,绕组由铜导线绕制而成,铁芯由多片硅钢片叠制而成,绕组绕在铁芯周围,绕组和铁芯用夹件固定在底座上。



1-绕组 2-铁芯 3-引线 4-夹板 5-底座

图1 深海变压器内部结构。

800kVA三相油浸式变压器的各项参数如表1所示,低压绕组和高压绕组中分别有1个宽度为4mm的气道,低压绕组和高压绕组之间有1个宽度为6mm的气道。铁芯柱直径225mm,铁芯高915mm,宽980mm。各部件材料的物理性质,如表2所示。

表1 变压器绕组参数。

部件	相电流/A	绕组匝数	绕组高度/mm	绕组内径/mm	绕组外径/mm
低压内绕组	80.808	258	470	243	273
低压外绕组	80.808	258	470	281	296
高压内绕组	80.808	258	470	308	328
高压外绕组	80.808	258	470	336	369

表2 变压器部件材料属性。

部件	电阻率/ $\Omega\cdot\text{m}$	相对磁导率	密度/ $\text{kg}/\text{m}^3$
铜线	$1.75\times10^{-8}$	0.999991	8900
铁芯	$2.2\times10^{-7}$	3000	7900
变压器油	无穷大	1	970
外壳	$4.2\times10^{-7}$	1.00018	4500

3.1. 深海变压器二维漏磁场计算

漏磁场主要由线圈负载电流、绕组、铁芯和变压器箱体决定，与夹板、底板和引线无关，故在漏磁场分析模型中可忽略[4]。对深海变压器进行二维漏磁场分析时，可对模型做出如下简化：

- (1) 忽略夹板、底板和引线对计算的影响，忽略气道中的撑条等；
- (2) 假设所有材料各向同性；
- (3) 理想化认为所有场量服从时间的正弦变化，不计入谐波影响；
- (4) 不考虑位移电流对计算的影响；
- (5) 除了变压器油的绝缘作用，不考虑其他绝缘条件。

结合以上模型简化的规则，由于绕组中漏磁场分布满足轴对称，同时绕组的损耗分布也基本满足轴对称分布的规律，因此磁场分布和损耗分布的计算可以统一采用图2所示的模型。

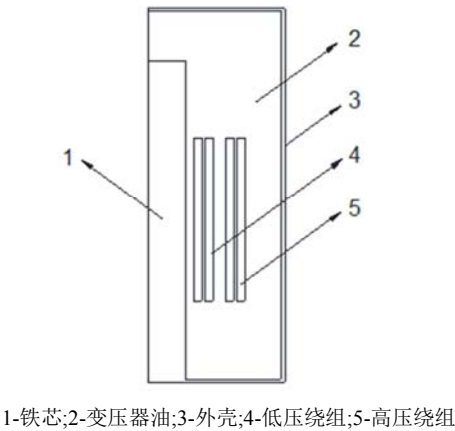
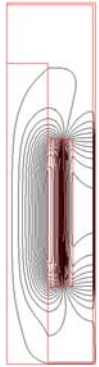


图2 深海变压器二维分析模型简图。



(1) 二维漏磁场分析网格剖分



(2) 二维磁力线分布图

图3 深海变压器二维分析。

使用有限元软件ANSYS进行二维漏磁分析，选用Quad 8 node 53单元，PLANE53单元主要适用于二维静磁场和涡流分析，符合漏磁分析的要求，可以进行漏磁分析，且可以计算出损耗，为下文求变压器损耗打下基础。按照表2给处的变压器各部件赋材料属性，剖分单元采用四边形，剖分结果如图3所示。求解得出二维漏磁场分布的磁力线如图4所示。

外边界磁位为0，采用气球边界，高低压绕组加载额定的平衡安匝，低压内绕组  $IN=1.9715\text{A}/\text{mm}^2$ ，低压外绕组  $IN=1.9715\text{A}/\text{mm}^2$ ，高压内绕组  $IN=1.6739\text{A}/\text{mm}^2$ ，高压外绕组  $IN=1.6739\text{A}/\text{mm}^2$ ，求解得出二维漏磁场分布的磁力线如图4所示。

从图4可以看出，整个区域内，磁力线在上下轴向呈对称分布。铁芯位于变压器中心位置，铁芯轴向的中间部分，磁力线与铁芯轴线平行呈多线分布，在上下端部磁力线弯曲变为与铁芯轴线垂直，最终穿过绕组构成磁力线回路。绕组位于铁芯外部，绕组部分的磁力线分为两部分，一部分往铁芯内与铁芯部分的磁力线构成回路，另一部分向外绕在变压器油或变压器外壳中构成回路。由磁力线分布图可知，磁力线在高低压绕组之间、气隙之间分布最密集。高低压绕组、气隙之间的位置漏磁通最大，变压器外壳上与绕组对应的前后壁上也有一定的漏磁通[9]。在高低压绕组的端部，磁力线发生了很明显的偏析现象，在端部横穿绕组。这与实际的漏磁场分布保持一致，分析结果真实可靠。

3.2. 深海变压器三维漏磁场计算

根据以往的经验理论和，三相的油浸式变压器的漏磁场是由三相共同作用产生的[10]，虽然二维模型可以求出精确的局部场结果，却无法完整地呈现整体的漏磁分布，



故在深海变压器二维分析模型的基础上,通过三维模型来展示漏磁场的整体分布,并验证二维模型的求解结果。

本节研究的主要目的是研究深海变压器漏磁场的空间分布特点,并验证二维模型漏磁分析的结果,深海变压器三相完整模型的结构尺寸相对较大,结构复杂,为了减小计算量,在二维模型简化的基础上,对深海变压器结构做进一步简化,得到深海变压器三维分析模型如图4所示。

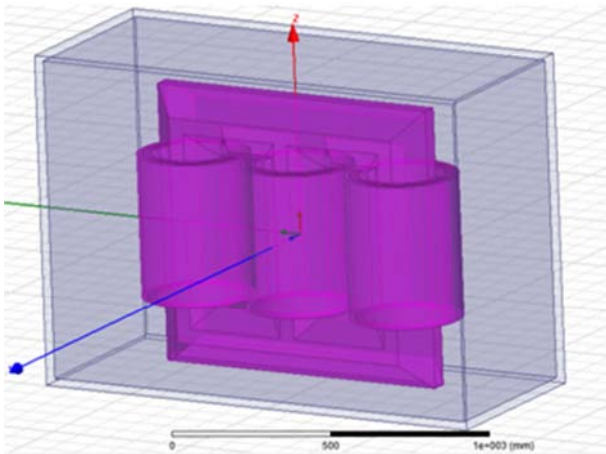


图4 深海变压器三维分析模型图。

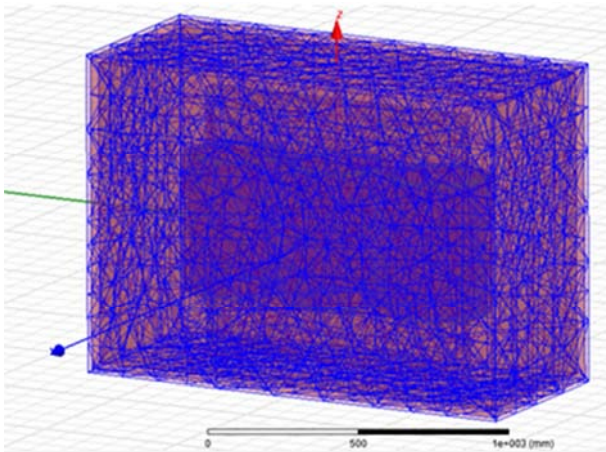


图5 深海变压器三维漏磁场分析网格剖分。

使用ANSYS中的电磁分析软件MAXWELL 3D进行三维漏磁分析,选用实体单元,按表2所给变压器各部件参数赋材料属性,剖分单元采用四面体,限制每个部件单元的最大单元边长,网格剖分结果如图5所示。

求解域采用气球边界,激励源为三相绕组的电流激励,三维绕组线圈的电流激励加载在Section面上,Section面为电流流过绕组线圈的截面,电流类型设置为多股绞线Stranded,高低压绕组加载额定的平衡安匝,低压内绕组  $IN=1.9715 A/mm^2$ , 低压外绕组  $IN=1.9715 A/mm^2$ , 高压内绕组  $IN=1.6739 A/mm^2$ , 高压外绕组  $IN=1.6739 A/mm^2$ 。求解参数设置中,设置电感矩阵,选择所有的线圈作为激励Source,为求解显示三相绕组的电感的分布趋势,把同一个相的绕组归为同一个组别,取

名字为不一样的Winding。设置求解残差,收敛设置为Refinement Per Pass30%,求解设置为Nonlinear Residual 0.001。求解得出三维漏磁场分布的磁力线如图6、图7所示。

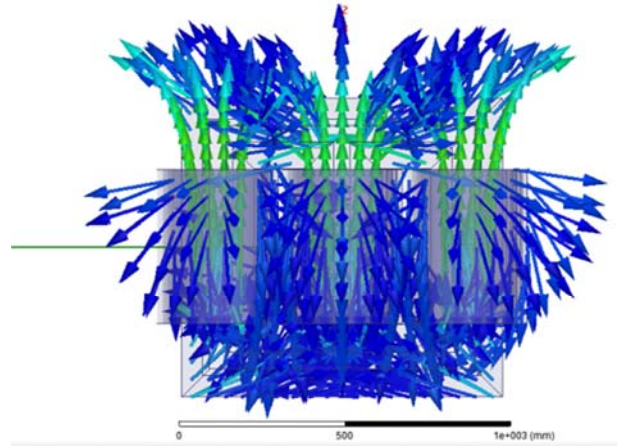


图6 深海变压器绕组三维磁力线分布图。

由图6的磁力线分布趋势,可以看出变压器绕组的漏磁分布与实际情况中的漏磁场分布保持一致,三相绕组的磁力线分布情况整体全部相同,中间轴绕在变压器油或变压器外壳中构成的回路,与二维漏磁场的分布规律保持一致。

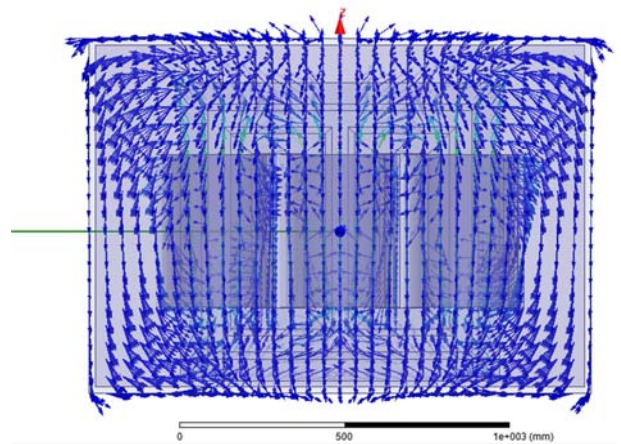


图7 深海变压器整体三维磁力线分布图。

从图7可以看出漏磁场在变压器油中分布稀疏,在绕组端部由轴向变为径向漏磁,变压器外壳上也有漏磁集中,在绕组与变压器外壳之间的漏磁分布与二维模型保持一致。综上所述,可以得出二维与三维漏磁场分析结果与实际情况吻合,漏磁场分析结果正确。

### 3.3. 深海变压器绕组损耗分析计算

变压器正常运行时,损耗主要包括绕组损耗、铁芯损耗和杂散损耗,其中绕组损耗所占比例最大,以绕组损耗为主,绕组损耗主要包括直流电阻损耗和涡流损耗[4]。直流电阻损耗主要为电流流经绕组铜线时,铜导线电阻产生的电阻损耗,这也是绕组损耗的主要来源。涡流损耗是漏

磁场在绕组内引起的损耗错误!未找到引用源。。绕组是变压器主要的损耗产生部位，损耗以热的形式从变压器内部散发出去，所以准确求出绕组损耗对变压器温度场分析及散热处理起着至关重要的作用。

本节主要对绕组损耗中的涡流损耗进行详细分析，进而求解出深海变压器的绕组损耗。求解出的深海变压器的绕组的直流损耗、涡流损耗和总损耗的分布云图如图8所示，结果为单相绕组的损耗值分布情况，从内部到外部分别为低压内绕组、低压外绕组、高压内绕组和高压外绕组的各项损耗分布。

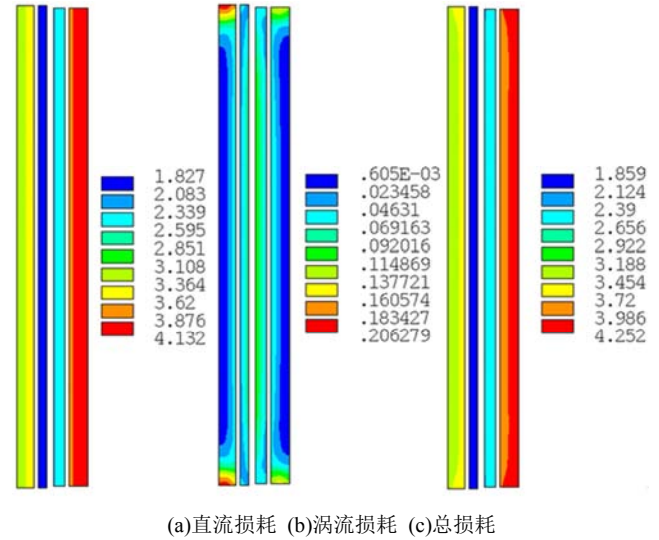


图8 绕组损耗分布图。

从图8(a)可得出，直流损耗分布均匀，由 $P_R = I^2 R$ 可得直流损耗只与电流密度和电阻大小有关，电流密度相同，所以与电阻大小成正比，即线圈截面积越大，直流损耗越大，且可知根据截面积的大小，直流损耗大小由大到小依次为高压外绕组、低压内绕组、高压外绕组和低压外绕组，损耗分布均匀，实际仿真结果与理论相符。

从图8(b)可得出，根据绕组中的涡流损耗分布云图结合漏磁磁力线分布图可看出，涡流损耗在轴向方向上，两端的损耗最大，从两端到中间逐步减小，根据漏磁分析的结果可以看出，涡流在绕组的端部相对集中，中部相对稀疏。低压内绕组左上角和高压外绕组右上角涡流损耗值较大，这是由于漏磁磁力线流经此处并发生弯曲，较大的横向漏磁产生较大的涡流损耗错误!未找到引用源。。由于漏磁磁力线在气隙中分布最密集，故靠近气道的部分涡流损耗值较大错误!未找到引用源。。从图8(c)可得出，绕组的总损耗与直流损耗保持一致，绕组的损耗以直流电损耗为主。

绕组的网格划分如图9所示，每个区域的具体损耗值如图10所示。由于磁场分析采用了轴对称模型，所以损耗的结果为该区域整个圆周内的数值。铁芯损耗只能在瞬态场中求解，主要是利用原材料供应商提供的各种频率下和工作时的磁感应强度等测试数据为基础，使用Steinmetz方程采用插值方法求得，而本文主要是求深海变压器在稳态状态下的损耗情况。

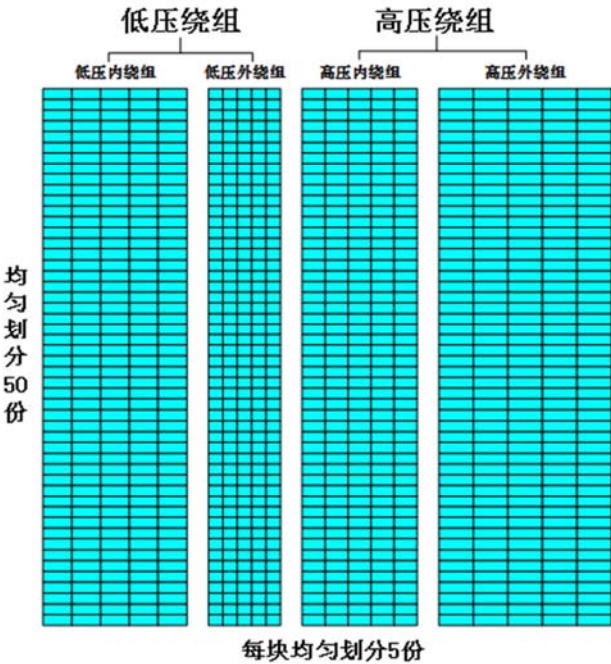


图9 绕组分区示意图。

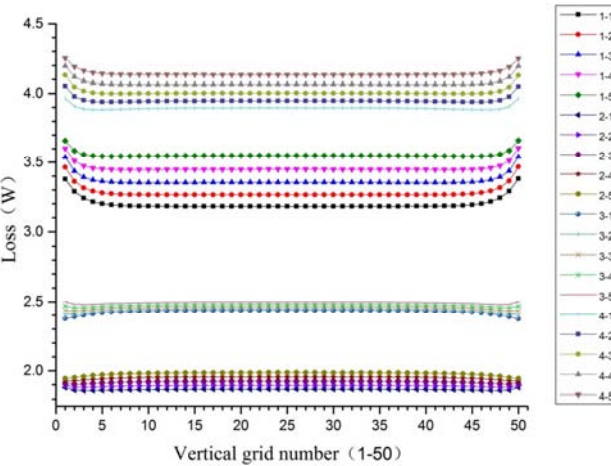


图10 绕组损耗纵向统计折线图。

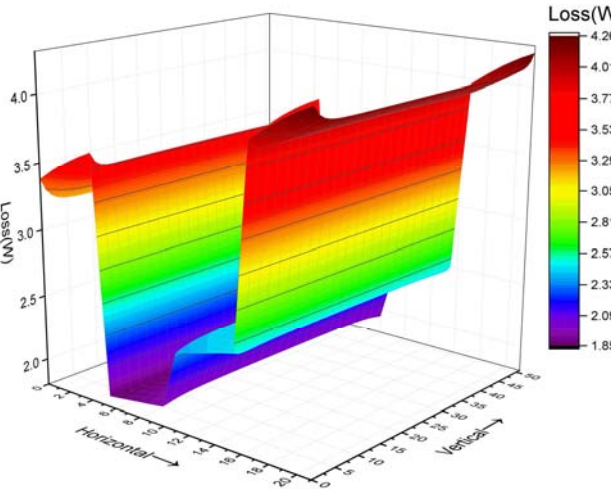


图11 绕组损耗三维统计图。



本文采用变压器的总额定损耗减去求解得到的绕组损耗的方法得到铁芯总损耗,铁芯的损耗分布可以按照铁芯的总损耗除以损耗体积计算[15],这样的处理方式对于温升分布的影响比较小,同时由于变压器对铁芯的温升没有严格的限制,所以这也是通常的处理方式。

在三维漏磁分析的基础上,求出深海变压器单相绕组三维损耗值与二维计算结果对比,以下数据和图示都为单相绕组的结果。

根据三维损耗的计算结果,综合二维模型得到二维与三维模型单相绕组损耗的比较如表3所示。

表3 二维与三维模型单相绕组损耗的比较。

模型	低压绕组损/W	低压绕组总损耗/W	高压绕组损耗/W	高压绕组总损耗/W	绕组总损耗/W
2D	内	842.9936	内	614.9974	2941.9459
	外	480.336	外	1003.619	
3D	内	835.8936	内	611.2547	2933.1987
	外	483.8250	外	1002.2254	

由表3可以看出,低压内绕组损耗三维与二维误差为0.84%,低压外绕组损耗三维与二维误差为0.73%,高压内绕组损耗三维与二维误差为0.61%,高压外绕组损耗三维与二维误差为0.14%。二维损耗结果与三维损耗结果吻合,故绕组损耗分析结果真实可靠。

通过仿真计算得到单相绕组的损耗为2941.9459W,故三相绕组的总损耗为8.8258377kW,铁芯损耗为变压器额定总损耗10kW减去绕组损耗,为1.1741623kW,与理论估算值8.9kW和1.2kW符合,故从理论估算的角度,仿真结果真实可靠。

## 4. 结论

(1) 使用有限元软件ANSYS进行二维漏磁分析时,选用Quad 8 node 53单元, PLANE53单元外边界磁位为0,采用气球边界,高低压绕组加载额定的平衡安匝,低压内绕组  $IN=1.9715A/mm^2$ , 低压外绕组  $IN=1.9715A/mm^2$ , 高压内绕组  $IN=1.6739A/mm^2$ , 高压外绕组  $IN=1.6739A/mm^2$ 。使用ANSYS中的电磁分析软件MAXWELL 3D进行三维漏磁分析,选用实体单元,求解域为气球边界,激励源为三相绕组的电流激励,三维绕组线圈的电流激励加载在Section面上,Section面为电流流过绕组线圈的截面,电流类型设置为多股绞线Stranded,高低压绕组加载额定的平衡安匝,低压内绕组  $IN=1.9715A/mm^2$ , 低压外绕组  $IN=1.9715A/mm^2$ , 高压内绕组  $IN=1.6739A/mm^2$ , 高压外绕组  $IN=1.6739A/mm^2$ 。求解参数设置中,设置电感矩阵,选择所有的线圈作为激励Source,为求解显示三相绕组的电感的分布趋势,把同一个相的绕组归为同一个组别,取名字为不一样的Winding。设置求解残差,收敛设置为Refinement Per Pass30%,求解设置为Nonlinear Residual 0.001。

(2) 由深海变压器的漏磁场分析结果可知,磁力线在上下轴向呈对称分布。由磁力线分布图可知,磁力线在高低压绕组之间、气隙之间分布最密集。高低压绕组、气隙之间的位置漏磁通最大,变压器外壳上与绕组对应的前后壁上也存在一定的漏磁通。

(3) 从深海变压器的绕组损耗计算结果来看,涡流损耗沿绕组的轴向从中间向两端逐渐增大。低压内绕组左上角和高压外绕组右上角和靠近气道的部分涡流损耗值较大。整体的绕组损耗分布相对均匀,径向上在低压内绕组、低压外绕组、高压内绕组和高压外绕组分别集中在一个数值左右;轴向上从上到下主要集中在四个数值左右。

(4) 深海变压器的涡流损耗与漏磁场的分布呈现一定的相关性,漏磁场的大小及分布规律决定着绕组的感抗、附加损耗及变压器金属结构件中的损耗。从漏磁场分析结果和损耗分布分析结果来看,满足深海变压器漏磁及损耗的设计要求。

本文的研究对象虽仅为800kVA深海变压器,但通过联合仿真,可以总结出针对电网变压器、电机、主机等零部件的电磁类问题的研究方法,具有普适性的参考价值。

## 致谢

感谢“十三五”国家科技重大专项“水下生产技术(项目编号:2016ZX05028-003)”给予资金的支持。

## 参考文献

- [1] 周守为.中国海洋石油开发战略与管理研究[D].成都:西南石油学院,2002.
- [2] 常焕辉.新时期海洋石油钻井技术的发展分析[J].当代化工研究,2016(01):54-55.
- [3] 李志刚 安维峥.我国水下油气生产系统装备工程技术进展与展望[J].中国海上油气,2020,32(02):134-141.
- [4] 唐宇.大型电力变压器附加损耗与温度场分析[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2017.
- [5] 周少静.特型变压器绕组漏磁场及特性参数的数值仿真研究[D].天津:河北工业大学,2013.
- [6] 高一飞.直流偏磁对变压器的影响研究[D].济南:山东大学,2010.
- [7] 王菲菲.电力变压器漏磁场研究及绕组温度场分析[D].济南:山东大学,2010.

- [8] L. J. Yang, W. T. Cui, S. W. Gao. Magnetic flux leakage field within the detector unit optimization based on Comsol [A]. Advanced Science and Industry Research Center. Proceedings of the 2015 International Conference on Testing and Measurement: Techniques and Applications (TMTA 2015) [C]. Advanced Science and Industry Research Center., 2015: 5.
- [9] Ting-ting ZHU, Min-fang PENG, Xun WAN, Mei-e SHEN. Diagnosis of Inter-turn Fault in Transformers Based on the Change of Leakage Magnetic Field [A]. Science and Engineering Research Center. Proceedings of 2016 International Conference on Power, Energy Engineering and Management (PEEM 2016) [C]. Science and Engineering Research Center., 2016: 6.
- [10] Imre L. Determination of the Steady State Temperature in Naturally oil Cooled Disc Type Transformers [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 10(2): 123-128.
- [11] 魏澈, 李强, 洪毅, 等. 流花16-2油田电潜泵长距离供电系统仿真分析 [J]. 中国海上油气, 2018, 30(04): 190-195. GAO Yifei. Research on the impacts of DC Magnetic Bias on Transformer [D]. Shandong University. 2010.
- [12] 盛坚, 肖鹏. 影响变压器运行可靠性的因素及对策分析 [J]. 科技与企业, 2013(24): 395.
- [13] 包博, 刘鹏, 王闯, 谢天喜, 李靖, 李旭. 大型电力变压器磁场分布及涡流损耗优化研究 [J]. 变压器, 2012, 49(3): 17-20.
- [14] Chang H C, Bucknall R W. Harmonic calculations of proximity effect on impedance characteristics in subsea power transmission cables [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 2150-2158.
- [15] Monsen B, Rongve K S, Laegreid T, et al. Asgard Subsea Gas Compression-Technology Qualification Testing With High-Speed Vsd and Very Long Step-Out Cable [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(2): 1552-1561.