

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.05.028

局部简化建模法三维有限元仿真与实验研究

赵志刚¹, 史文军², 刘慧敏¹, 赵捷¹, 刘福贵¹

(1. 河北工业大学电磁场与电器可靠性省部共建重点实验室, 天津 300130; 2. 国网冀北电力有限公司检修分公司, 北京 102488)

摘要: 局部简化建模法即在不影响计算结果精度的要求下,在对实物进行建模时适当地做一些简化处理,对所关心的部件进行精细建模,而对其余部件进行简化建模。为验证局部简化建模法的有效性,文中基于TEAM Problem 21 基准族中的P21^a-2, P21⁰-B模型,进行了详细地实验研究与仿真分析。重点考察了不同激励下采用局部简化建模法对变压器结构件(如变压器油箱)中杂散损耗、漏磁通密度计算值与测量值之间的对应关系。计算值与测量值具有较好的一致性,从而验证了局部简化建模法的工程适用性。在计算机资源有限的情况下,如何对装置模型进行简化计算是科学工作者致力于研究的一项重大内容。局部简化建模法对大型电力变压器电磁热模拟的合理建模,高效的仿真计算具有重要的意义。

关键词: 变压器; 简化建模; 仿真计算; 杂散损耗; 漏磁通; 磁性能

3D Finite Element Simulation and Experimental Verification Based on Local Simplified Modeling Method

ZHAO Zhigang¹, SHI Wenjun², LIU Huimin¹, ZHAO Jie¹, LIU Fugui¹

(1. Province-Ministry Joint Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. State Grid Jibei Maintenance Company, Beijing 102488, China)

Abstract: The local simplified modeling method is a calculation way which simplifies the simulation model and can guarantee the computational accuracy. The effects of local simplified modeling method are studied in detail based on TEAM P21^a-2, P21⁰-B under various working conditions, the works are investigated the calculation result of the eddy current loss and the leakage magnetic flux of the transformer structure with the experiment results. The simulation results are in good with the experimental results, namely the local simplified modeling method can be applied in engineering calculation area. On the condition of limited calculation resources, how to simplify the modeling becomes a major content of scientific researchers. The validation of simplified modeling method has important significance for reasonable modeling and effective simulation of large power transformer.

Key words: transformer; simplified modeling method; simulation; stray loss; leakage magnetic flux; magnetic properties

0 引言

电磁研究是电气产品设计的核心,为新型产品研发提供有力的支持,为存在故障和问题的产品研究提供重要的依据。但是在进行对大型的电力变压器产品精细的电磁热场模拟和仿真时,往往会耗费大量的计算资源和占用大量的计算时间,并且很

大程度上依赖于计算机硬件水平^[1]。

事实上,在设计产品的过程中,工程师在关心结构件或者产品整体的电磁性能同时,往往会对产品建模过程做一些简化处理,完全按照产品的实际模型去建模几乎是不可能的。以大型电力变压器的叠片铁心为例,工程师在建立铁心模型时,不会对铁心中每一片硅钢片去单独建模,单独建模计算

收稿日期:2018-10-22; 修回日期:2018-12-27

基金项目:国家自然科学基金(51107026, 51677052, 51237005);天津市科技计划项目(15JCYBJC16400)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51107026, 51677052, 51237005), Tianjin Science and Technology Project(15JCYBJC16400).

精度高但是计算代价巨大。因此往往会对铁心模型做一些简化处理:即把整个铁心建成一个整体对材料的属性做适当的修改,并且根据模型的对称性往往会建二分之一、四分之一、八分之一等,通过这种简化处理可以节省建模时间,降低计算耗时,提高工程效率^[2-4]。在大型电力变压器中,杂散损耗当属倍加关注的重点问题之一,杂散损耗主要分布在变压器油箱和结构件内,包括铁心拉板、夹件以及各类屏蔽等,杂散损耗的研究对节能降耗、避免可能存在的危险的局部过热和提高运行的可靠性具有重大的意义。

在针对大型的电力变压器结构以及各类屏蔽结构件分布的优化仿真过程中,对变压器每一个部件都按照实际的尺寸进行建模往往是不可能^[5-7],这往往会耗费大量的时间,对于变压器制造商而言,这意味着降低生产效率。

然而,对大型变压器结构和屏蔽分布的优化所做的仿真往往是对针对性的,即对所关心的部件是否存在损耗密度集中。这就提出一个问题即能否只对关心的部位精细建模,而对其他部分简化建模。

文中以 TEAM P21^a-2、P21⁰-B 的基准模型为研究对象,使用加拿大 Infolytica 公司的 MagNet 专用电磁场计算软件,基于局部简化建模法做了系统的仿真分析以及实验验证。计算值与测量值具有较好的一致性,这对大型电力变压器设计具有重要指导意义。

1 三维仿真模型

1.1 涡流损耗的计算方法

对于非导磁钢板构件,其涡流区域的损耗可以通过式(1)计算^[8-11]

$$\begin{cases} J_e = -\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \Delta V \right) \\ P_e = \int_v \frac{|J_e|^2}{\sigma} dv \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: J_e 为涡流密度; σ 为电导率; A 为矢量磁位; V 为标量电位; P_e 为涡流损耗。

1.2 TEAM P21^a-2、P21⁰-B 基准模型

TEAM P21^a-2 的直接工程背景是变压器铁心拉板的结构设计,拉板是变压器铁心相连的承重部件^[12-13]。拉板采用导磁或非导磁材料,拉板的结构和尺寸、开槽的形式和数量、是否采用窄条钢板分离的方案、涡流的分布和损耗都需要根据容量进行定量地分析。P21^a有 4 个子模型,分别由 P21^a-0、P21^a-1、P21^a-2、P21^a-3 来表示,定义符中的数字 0~3

指非导磁钢板中开槽的数量。非导磁钢板均被相同的交流绕组所激励,模型中非导磁钢板中裂缝长、宽、高分别为 660、10、10 mm。TEAM P21⁰-B 的工程背景是变压器油箱壁,变压器的油箱采用导磁钢板,P21⁰-B 与 P21^a-2 有相同的激励线圈,不同的是 P21⁰-B 中结构件是导磁钢板,导磁钢板尺寸为 520 mm×360 mm×10 mm。P21^a-2 的结构设计图及实物图见图 1、2。

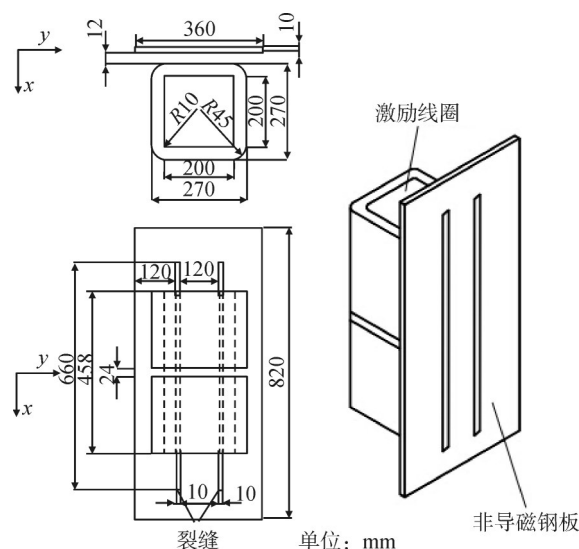


图1 P21^a-2 的结构设计图

Fig. 1 Structural design drawing of P21^a-2



图2 P21^a-2 的实物图

Fig. 2 Model of P21^a-2

1.3 局部简化建模法

P21^a-2 基准模型包括有源和无源两部分,有源部分是由相同反向绕制的两个线圈组成,无源部分是由非导磁钢板组成。导线规格 2.0 mm×6.7 mm,有效截面积 13.04 mm²;每个线圈层数 12 层 300 匝,两个线圈中间空气隙 24 mm。线圈整体建模与线圈单匝建模分别见图 3、4。线圈整体建模即把线圈建成一个整体,设置线圈的总匝数为 300 匝,导线横截面积为 13.04 mm²,在计算过程中软件默认电流在每导体内均匀流动;线圈单匝建模即根据导线横截面积相等,建模时设置导线横截面为 2 mm×6.52 mm 的矩形,对每一根导线进行单独建模;导体之间按照实际的空间间隔进行设计,然后通过外电路将各个线圈进行连接,导体之间相互绝缘。线圈单匝建

模可以考虑交变电流的集肤效应与邻近效应^[12]。

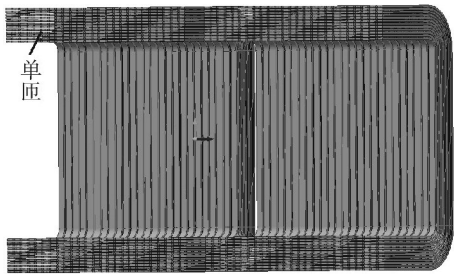


图3 线圈单匝建模
Fig. 3 Model of per coil

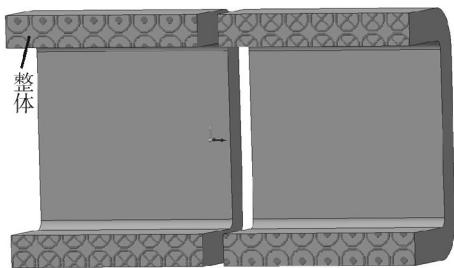
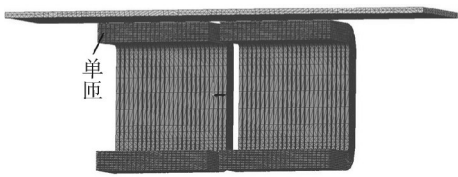


图4 线圈整体建模
Fig. 4 Model of whole coil

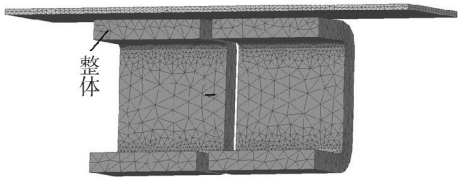
从图3、4对比可以看出,对300匝线圈单匝线圈单独建模工程量是巨大的,需要大量时间完成,而对线圈进行整体建模相比工程量大大减少,在实际工程中人们往往关注变压器结构件中是否存在损耗密度集中,引出问题是否能对结构件按实际模型进行建模而对线圈进行简化建模即使用局部简化建模法。为验证该方法的工程实用性,文中采用P21^a-2基准模型进行仿真和实验对比研究。仿真过程中两线圈采用反向激励即两线圈中通入的电流大小相同但方向相反。采用反向激励,漏磁场在非导磁钢板中部集中。空气包约为模型的3倍,以确定在空气包的边界处磁通值为0,因此空气包设置成切向边界条件。

非导磁钢相对磁导率 μ_r 为1,20℃电导率 σ 为 $1.388\ 9\times 10^6\ \text{S/m}$,在外施磁场50 Hz的交变磁场作用下,非导磁钢板的集肤深度 $d=60\ \text{mm}$,而其厚度为10 mm,因此不需要对非导磁钢板进行分层处理。激励线圈处在自身所激发的交变磁场中,外施磁场的频率50 Hz时,铜的集肤深度 $d=9.42\ \text{mm}$ 。为验证线圈两种建模方法是否可以准确地计算出结构件的杂散损耗,线圈的损耗不是主要关注对象,在对线圈进行剖分时最大网格尺寸设置为默认即可。用两种方法建模,P21^a-2模型剖分图见图5。从图5(a)、(b)对比可以得出,线圈整体建模比单匝建模剖分较为粗略些。采用两种建模法,计算非导磁钢板中涡流损耗与空间指定位置处 $x=\pm 5.76\ \text{mm}$ 的磁

通密度分布并与测量值进行对比。



(a) 线圈单匝建模



(b) 线圈整体建模

图5 P21^a-2的仿真模型
Fig. 5 Simulation model of P21^a-2

2 实验验证

对P21^a模型激励线圈通入工频10 A(rms)的正弦激励,实验电路图见图6,非导磁钢板损耗测量值等于负载损耗减去空载损耗,负载损耗为线圈上放置结构件时模型损耗总的测量值,空载损耗为线圈上未放置结构件时损耗的测量值,由于是非导磁钢相对磁导率近似为1,负载时其对线圈周围空间磁场分布影响可以忽略不计,这种测量方可以满足精度要求。

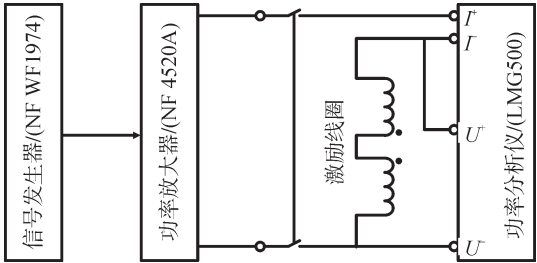


图6 实验电路图
Fig. 6 Experiment circuit

非导磁钢板中涡流损耗的计算值与测量值见表1。

表1 反向激励下非导磁钢板损耗计算值与测量值
Table 1 The measured and calculated loss of non-magnetic steel under reverse incentive

模型	损耗/W		
	线圈整体建模	线圈单匝建模	测量值
P21 ^a -0	9.55	9.54	9.17
P21 ^a -1	3.43	3.42	3.40
P21 ^a -2	1.86	1.86	1.68
P21 ^a -3	1.05	1.05	1.25

激励线圈中通入工频10 A(有效值)反向电流下,使用高斯计对P21^a-2模型非导磁钢板表面指定

位置处即 $x = -5.76 \text{ mm}$, $x = 5.76 \text{ mm}$ (非导磁钢板上表面与下表面) 的法向漏磁通密度进行测量并与计算值进行对比, 两者关系见图 7。

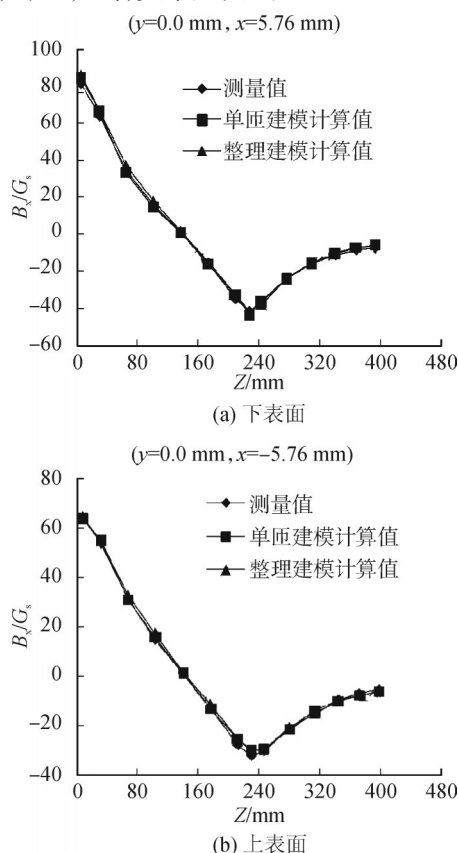


图 7 指定位置处磁通密度测量值与计算值

Fig. 7 Measured and calculated B_z distribution of the designed spots

采用两种建模方法, 非导磁钢板中的涡流损耗计算值与实际测量值一致, 两种方法计算得出指定位置处磁通密度的计算结果与实际测量值相吻合。

采用两种方法计算靠近线圈侧非导磁钢板表面涡流密度分布云图以及磁通密度有效值分布云图 (见图 8、9) 并进行比较, 从图 8、9 可以看出, 两种方法计算出钢板表面的涡流以及磁通密度分布趋于一致, 涡流集中在漏磁密度大的区域。这说明采用两种方法建模, 激励线圈空间磁场分布是一致的, 皆可以准确地计算出非导磁结构件中的杂散损耗。

非导磁钢板相对磁导率 μ_r 近似为 1, 对于导磁钢板其相对磁导率 μ_r 远远大于 1, 为了比较两种结构件对空间磁场分布的影响, 分别对两模型进行了二维仿真, 初步考察了非导磁材料与导磁材料对磁场分布的影响。图 10(a) 中为空载线圈磁通分布图, 图 10(b) 左侧是 P21^a-0 磁通密度分布图, 右侧为 P21⁰-B 的磁通密度分布图。从图 10 中可以看出, P21^a-0 负载与空载工况下此线圈的空间磁场分布近似相同。对 P21⁰-B, 负载与空载工况下线圈的空间磁场发生很

大的变化, 这是因为导磁钢板的磁导率远大于空气, 大部分磁通通过钢板闭合。

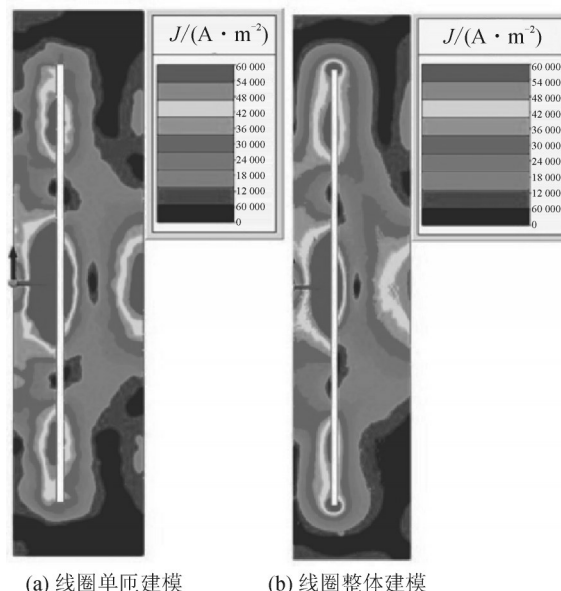


图 8 非导磁钢板表面涡流密度分布云图

Fig. 8 Shaded plot of eddy-current distribution of the non-magnetic steel surface

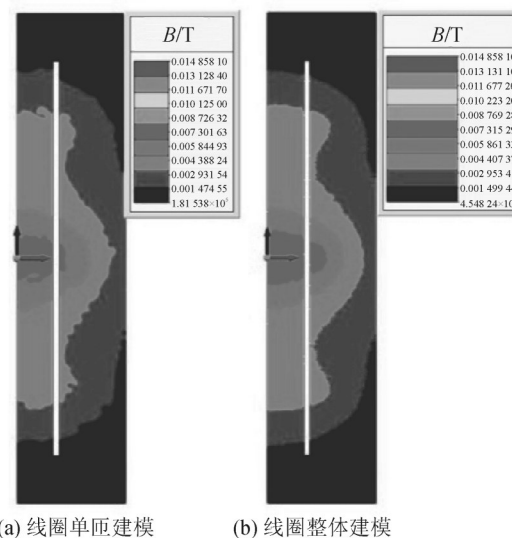


图 9 非导磁钢板表面磁通密度有效值分布云图

Fig. 9 Shaded plot of flux B distribution of the non-magnetic steel surface

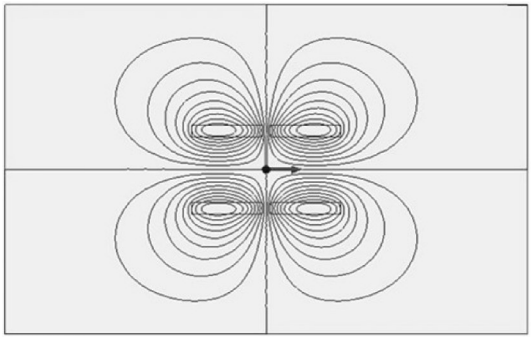
为了验证局部简化建模法对于 P21⁰-B 模型是否有效, 采用局部简化建模法对 P21⁰-B 进行简化建模、仿真计算并与实验测量值进行对比, 验证该方法对非线性导磁材料是否适用。

铁磁材料在交变磁场中产生的损耗包括磁滞损耗和涡流损耗, 可以分别计算^[14-16]。对于导磁钢板中涡流损耗可以用 T - Ω 法进行计算^[17-19]。

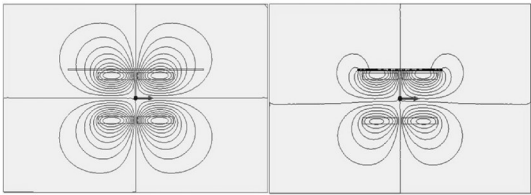
$$\nabla \cdot H = J_b \quad (2)$$

$$H = -\nabla \cdot \Psi + H_b \quad (3)$$

$$\nabla \cdot H_b = J_b \quad (4)$$



(a) 空载



(b) 负载

图 10 空载与负载下激励线圈空间磁场分布
Fig. 10 Flux distribution of model under no-load and load conditions

$$\nabla \cdot B = \nabla [\mu(-\nabla \cdot \Psi + H_b)] = 0 \tag{5}$$

在得到 J_b 后可求得单元的涡流损耗。

对于导磁钢板中的磁滞损耗,可以通过公式法计算。磁滞损耗(W_h)是磁通密度峰值(B_m)的函数,对于材料的 B_m-H_m 可以事先测量得到,如同 $B-H$ 曲线那样。导磁钢(A3) B_m-W_h 曲线见表 2。钢板的电导率 $\sigma=6.484 \times 10^6 \text{ S/m}$ 。

表 2 导磁钢板的 B_m-W_h 曲线
Table 2 B_m-W_h curve of magnetic steel

B/T	$H/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$	$W_h/(\text{W} \cdot \text{kg}^{-1})$
0.049	115	0.02
0.101	171	0.11
0.200	214	0.41
0.299	245	0.98
0.399	279	1.32
0.499	316	1.88
0.700	405	3.21
0.899	528	4.82
1.099	732	6.81
1.300	1 154	9.39
1.499	1 965	11.86
1.600	4 430	14.68
1.800	13 106	17.57
1.850	16 290	17.72

磁滞损耗 W_h 可以由式(6)计算^[20]

$$W_h = \sum_{e=1}^{N^{(e)}} W_h^{(e)}(B_m^{(e)}) \rho V^{(e)} \tag{6}$$

式(6)中: $W_h^{(e)}$ 为单元磁滞损耗, W/kg ; $B_m^{(e)}$ 为磁通密度的峰值; ρ 为钢板的密度; $V^{(e)}$ 为单元体积; $N^{(e)}$ 为单元总数。激励线圈通入工频反向激励电流后导磁钢板中损耗的计算值与测量值见表 3。

表 3 反向激励下导磁钢板中损耗的计算值和测量值
Table 3 The measured and calculated loss of magnetic steel under reverse incentive

电流值/A	损耗/W		
	线圈整体建模	线圈单匝建模	测量值
5	3.34	3.33	3.30
10	12.69	12.67	11.97
15	28.42	30.39	26.89
20	51.87	51.75	49.59
25	85.02	84.81	82.37
30	127.48	127.13	123.70
35	185.25	184.71	179.10
40	254.15	253.39	248.00
45	337.42	336.39	330.00
50	435.81	440.85	423.00

从表 3 中可以看出,线圈整体建模同样可以准确地计算出结构件的损耗,这说明该方法对于计算导磁结构件中的损耗同样适用。

3 结论

文中以 TEAM P21^a、P21⁰-B 为研究对象,基于局部简化建模法进行了三维有限元仿真以及实验验证,所得结论如下:

1) 基于 P21^a 的基准模型,采用局部简化建模法与精细建模法在激励线圈中通入 10 A 工频电流的工况下进行了计算与测量,结果表明,两种方法皆可以准确地计算出空间磁通分布以及非导磁钢板中的涡流损耗。

2) 为进一步验证局部简化建模法对于导磁材料的结构件计算是否适用,采用该方法对 P21⁰-B 模型在工频激励下进行建模、计算以及实验验证。结果表明,在工频激励下局部简化建模法对导磁结构件中损耗计算同样适用。

3) 以上模型仿真以及实验研究表明,局部简化建模法可以准确地计算出结构件中杂散损耗。在计算资源、人力资源有限的前提下,局部简化建模法对提高计算效率,节省人力资源,解决大型、多尺度工程电磁场问题具有重要理论意义和工业应用

价值。

参考文献:

- [1] 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, 2009.
CHENG Zhiguang, TAKAHASHI N, FORGHANI B. Simulation and application of electromagnetic thermal field in electrical engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [2] 赵志刚, 刘福贵, 程志光, 等. HVDC 直流偏磁电力变压器铜屏蔽中涡流损耗分析与仿真[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 990-995.
ZHAO Zhigang, LIU Fugui, CHENG Zhiguang, et al. Eddy-current loss of copper shielding under DC-biased condition in HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 990-995.
- [3] 赵志刚, 赵新丽, 程志光, 等. HVDC 中电力变压器直流偏磁屏蔽效应研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 45-52.
ZHAO Zhigang, ZHAO Xinli, CHENG Zhiguang, et al. Research on the shielding effects of power transformer under DC-biased condition in HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7): 45-52.
- [4] CHENG Z, TAKAHASHI N, FORGHANI B, et al. Effect of variation of B-H properties on loss and flux inside Silicon steel lamination[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(5): 1346-1349.
- [5] 高 丹, 衣丽葵, 党艳阳, 等. 变压器箱沿局部过热的研究[J]. 变压器, 2011, 48(8): 31-32.
GAO Dan, YI Likui, DANG Yanyang, et al. Research on the local overheating of transformer tank[J]. Transformer, 2011, 48(8): 31-32.
- [6] ZHANG Yanli, LIU Yang, LI Yumei, et al. A complex-valued rotating magnetic property model and its application to iron core loss calculation[J]. IEEE Transactions Magnetics Mag, 2014, 50(2): 7009704.
- [7] 张艳丽, 刘 洋, 谢德馨, 等. 一种考虑硅钢片旋转损耗的三相变压器铁心损耗简化计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 126-131.
ZHANG Yanli, LIU Yang, XIE Dexin, et al. A simplified calculation method of core losses considering rotating losses of electrical steel sheets in three-phase transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 126-131.
- [8] 郭满生. 大容量电力变压器杂散损耗的数值分析计算[J]. 变压器, 2010, 37(11): 1-4.
GUO Mansheng. Numerical analysis and calculation of stray loss of large power transformer[J]. Transformer, 2010, 37(11): 1-4.
- [9] 额尔和木巴亚尔, 李 岩, 张霄庭. 电力变压器三维涡流场计算与屏蔽问题分析[J]. 高压电器, 2007, 47(10): 69-73.
Eerhemubayaer, LI Yan, ZHANG Xiaoting. Calculation of 3D eddy current field and analysis of shielding in power transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 47(10): 69-73.
- [10] 赵国峰, 杨世天, 闫增会. 油箱损耗的仿真分析[J]. 变压器, 2014, 51(10): 29-33.
ZHAO Guofeng, YANG Shitian, YAN Zenghui. Simulation analysis of tank loss[J]. Transformer, 2014, 51(10): 29-33.
- [11] 陈起超, 刘文里, 李 航, 等. 变压器杂散损耗的三维有限元分析[J]. 黑龙江电力, 2015, 48(3): 252-255.
CHEN Qichao, LIU Wenli, LI Hang, et al. 3D finite element analysis of stray loss in transformer[J]. Heilongjiang Electric Power, 2015, 48(3): 252-255.
- [12] 王建民, 刘建新, 程志光, 等. 大型变压器拉板涡流损耗的建模与计算验证[J]. 华北电力大学学报, 1998, 25(1): 15-20.
WANG Jianmin, LIU Jianxin, CHENG Zhiguang, et al. Modeling of eddy current loss of core tie-plate in large transformers and its validation[J]. Journal of North China Electric Power University, 1998, 25(1): 15-20.
- [13] 赵志刚, 史文军, 王 振, 等. 不同频率激励下变压器铜屏蔽中涡流损耗的研究[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(3): 58-64.
ZHAO Zhigang, SHI Wenjun, WANG Zhen, et al. Research of eddy-current loss of copper shielding in transformer under different frequencies[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(3): 58-64.
- [14] 杨庆新, 颜威利, 程志光, 等. 磁损耗分离技术的实验研究[J]. 河北工业大学学报, 1999, 28(2): 6-9.
YANG Qingxin, YAN Weili, CHENG Zhiguang, et al. Study of testing method of separation techniques for magnetic losses[J]. Journal of Hebei University of Technology, 1999, 28(2): 6-9.
- [15] 程志光, 胡启凡. 模拟三维杂散损耗的 21 国际基准问题[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(3): 151-154.
CHENG Zhiguang, HU Qifan. TEAM benchmark problem 21 for modeling 3-D stray-field loss[J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(3): 151-154.
- [16] 李 琳, 崔 翔, 程志光, 等. 双标量磁位的表面阻抗法[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(2): 87-91.
LI Lin, CUI Xiang, CHENG Zhiguang, et al. A surface impedance method using two scalar magnetic potentials[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(2): 87-91.
- [17] 杨素梅, 程志光, 朱晓荃, 等. 大型变压器屏蔽涡流场中杂散损耗研究[J]. 高压电器, 2007, 16(6): 451-453.
YANG Sumei, CHENG Zhiguang, ZHU Xiaoquan, et al. Investigation on the stray-field loss of eddy current field by adding shielding in larger transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 16(6): 451-453.
- [18] 臧永利, 王新民. 磁材料涡流损耗的定量分析[J]. 山东理工大学学报, 2003, 17(3): 82-85.

(下转第 193 页)

- regulating mode and harmonic current optimization of controllable reactor of transformer type[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7): 74-82.
- [17] 田铭兴, 柳轶彬, 尹健宁, 等. 变压器式可控电抗器限流电感计算[J]. 电工技术学报, 2017, 32(2): 144-152.
- TIAN Mingxing, LIU Yibin, YIN Jianning, et al. Calculation of current-limiting inductance of controllable reactor of transformer type[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2): 144-152.
- [18] 柳轶彬. 变压器式可控电抗器调节模式及其控制策略研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
- LIU Yibin. Study on control strategy and regulating mode of controllable reactor of transformer type[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015.
- [19] TIAN M X, QING F L. A controllable reactor of transformer type[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1718-1726.
- [20] 田铭兴, 柳轶彬, 尹健宁, 等. 变压器式可控电抗器绕组电流与触发角的关系[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 122-127.
- TIAN Mingxing, LIU Yibin, YIN Jianning, et al. Relationship between CRT winding current and firing angle[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 122-127.
- [21] 原东昇. 变压器式可控电抗器绕组电流计算与参数优化[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
- YUAN Dongsheng. Winding current calculation and parameter optimization of controllable reactor of transformer type[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014.
- [22] 田铭兴. 变压器式可控电抗器的基本理论研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2005: 35-63.
- TIAN Mingxing. Basic theoretical research on controllable reactors of transformer type[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2005: 35-63.
- 李进(1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为变压器式可控电抗器的解耦控制。
- 田铭兴(1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电机电器及控制。
- 柳轶彬(1988—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为变压器式可控电抗器设计及控制。
- 滕青芳(1964—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为控制理论与控制工程、电机驱动系统容错控制等。

(上接第 187 页)

- ZANG Yongli, WANG Xinmin. Quantitative analysis of vortex loss in ferromagnetic materials[J]. Journal of Shandong University of Technology, 2003, 17(3): 82-85.
- [19] 王建民, 景崇友, 张文峰, 等. 大型变压器三维涡流场和结构件杂散损耗的工程研究[J]. 变压器, 2012, 49(2): 28-32.
- WANG Jianmin, JING Chongyou, ZHANG Wenfeng, et al. Engineering research on 3D eddy current field and stray loss of structural parts in large transformer[J]. Transformer, 2012, 49(2): 28-32.
- [20] CHENG Z, HAO R, TAKAHASHI N, et al. Engineering-oriented benchmarking of problem 21 family and experimental verification[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 1394-1397.
- 赵志刚(1981—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为工程电磁场与磁技术。
- 史文军(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为工程电磁场与磁技术。