

Calculation and Analysis of Additional Loss of HV Converter Transformer

Zhang Ping, Zhang Hongwei, Li Ting, Wang Yiling

Hebei University of Technology, School of Control Science and Engineering, Tianjin 300130, China

Abstract

With the development of State Grid, It requires better performance of HV converter transformer, calculated accurately the additional loss of HV converter transformer structural components is important subject. Firstly, considering the skin effect in the transformer structural components, author use the impedance boundary condition in the structural components loss calculation, and verify this method through TEAM 21 model; Secondly, aim at the characteristic of high harmonics, analysis the methods and chose the IEC61378 2 as the harmonic additional loss calculation method; Lastly, a 500Kv high converter transformer model was built and solved, then structural components loss and short circuit impedance loss and harmonic winding eddy loss was received by second development, compared with experimental value, the errors of measured values and calculated values in 7.0%, which fully demonstrated the validity of the used methods, this transformer model is proposed to reduce the loss, which has important engineering significance for high voltage converter transformer design.

Keywords: Converter Transformer; Impedance Boundary Condition; TEAM 21; 3D Modeling; Harmonic Loss

高压换流变压器附加损耗的计算与分析

张 萍, 张宏伟, 李 婷, 王奕玲

河北工业大学控制科学与工程学院, 天津 300130

摘 要: 随着国家电网建设的飞速发展, 对高压换流变压器性能要求越来越高, 准确计算其附加损耗成了一个重要课题。首先, 针对器件中的趋肤效应影响, 笔者将表面阻抗法用于导磁钢结构损耗的计算, 通过 TEAM 21 模型验证了该方法的可靠性; 然后, 针对高压换流变压器高次谐波特点, 选取国际标准 IEC61378-2 法作为高次谐波损耗的计算方法; 最后, 对一台型号为 ZZDPZ-321100/500 的 500Kv 高压换流变压器进行三维建模求解分析获得了结构件损耗结果, 并通过二次开发获得短路阻抗和绕组涡流损耗, 通过与试验值进行对比, 结果表明误差小于 7.0%, 证明了该模型的正确性, 并对该模型提出降低附加损耗的改进方案, 为高压换流变压器设计提供了思路。

关键词: 高压换流变压器; 表面阻抗法; TEAM 21; 三维模型; 谐波损耗

引言

随着我国电网建设的飞速发展, 对超(特)高压直流换流变压器需求量不断增大, 超(特)高压换流直流变压器在运行时的基波和高次谐波产生的漏磁场在导线周围产生的杂散损耗, 使换流变压器内部产生局部过热, 这在换流变压器的设计过程中必须予以考虑, 所以超(特)高压直流换流变压器漏磁场损耗分析计算一直是工程师们致力研究的领域^[1-5]。

资料表明, 有限元法与工程解析法和等效电路法相比, 计算高压换流变压器损耗, 不仅计算精度高, 而且能直观有效的反映损耗分布。针对高压换流变压器油箱等器件在趋肤效应下浅透入三维涡流场问题, 采用一般的矢量位和变量的有限元方法, 求解时需要大量的网格单元, 因此占据很大计算机内存。采用表面阻抗法时不需要剖分涡流损耗介质内部, 这样可以减少计算内存和缩短计算时间。高压换流变压器具有高次谐波特点, 而且谐波损耗计算方法多样, 各有优缺点, 目前主要采用国际标准 IEC 61378 2 和

IEEE1158- 1991 作为各次谐波计算方法, IEC 通过假定绕组中谐波涡流损耗与频率的 2 次方成正比, 金属构件中杂散损耗与频率 0.8 次方成正比, IEEE 方法中基于换流变压器有效电阻与电流大小无关, 通过测量谐波损耗频率特性来计算运行负载^[6-8]。

本文首先通过对国际公认的 TEAM 21 中 P21-B 模型进行了仿真计算, 证明了趋肤效应下表面阻抗法不仅比分层法运行占据内存小、求解时间快, 而且计算精度在工业要求以内的特点, 确定了表面阻抗法作为高压换流变压器导磁钢结构器件损耗分析方法; 然后对高压换流变压器各种谐波损耗方法分析, 并确定应用 IEC 61378 2 方法作为本文中损耗计算方法; 文章最后对保定天威集团提供的一台型号为 ZZDPPZ 321100/ 500 的 500Kv 高压换流变压器进行了建模, 采用上述方法进行求解分析, 并将仿真值与试验值进行对比, 验证了文中所述方法的正确性, 最后对该型号高压换流变压器进行改进, 并对改进后结果进行分析。

1 利用 TEAM 21 模型验证剖分方法

1.1 分层法与表面阻抗法的介绍

变压器金属结构件的三维杂散场仿真计算中, 需要考虑到结构件的趋肤效应, 铁磁构件的趋肤效应深度与外加磁场频率、铁磁构件的电导率和磁导率有关。铁磁构件的趋肤深度 d_s , 表示磁场由铁磁构件表面到内部 d_s 深度处, 其磁场幅值衰减为表面幅值的 $1/e$ 。

磁场在铁磁构件中传播时趋肤深度 d_s 见公式 (1) :

$$d_s = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu_0 \mu_r}} = 503 \sqrt{\frac{1}{\sigma \mu_r f}} \quad (1)$$

式 (1) 中, ω 为电源的角频率, σ 为导体的电导率; μ_0 为真空磁导率; μ_r 为相对磁导率; f 是电源频率^[9-10]。

1.1.1 分层法

将涡流区按场值等梯度的原则进行分层, 则距铁磁体表面 x 处涡流密度:

$$J_{\max} = J_{mo} e^{-x/d_s} \quad (2)$$

J_{mo} 铁磁体表面涡流密度, x 考虑位置距表面距离, d_s 趋肤深度, 由于在距离导磁钢板表面 $x = 5 d_s$ 深处, 磁场和涡流场的幅值已经减小到表面处场值似认为衰减为零。取 A3 钢线性段相对磁导率 $\mu_r = 500$, 电导率 $\sigma = 6.484 \times 10^6 \text{ S/m}$ 频率 $f = 50 \text{ Hz}$, 可以计算得到趋肤深度 $d_s \approx 1.25 \text{ mm}$ 。根据上述公式求得内壁开始各层深度分别为: 0.275 mm, 0.363mm, 0.513mm, 0.863mm, 4.24mm。

1.1.2 表面阻抗法

表面阻抗法是将导体阻抗边界作为一种对边界条件进行有限元分析求解的方法。当导体中出现平面波时, 可以对导体进行半无限大导体简化。半无限大导体平面的电磁波简化需要满足 2 个条件: 一是导体上包含电磁波的部分尺寸远小于导体电磁波波长; 二是导体本身尺寸远大于导体内的电磁波的波长, 这个假设可以保证导体内的折反射波极小, 在分析时可以忽略。换流变压器金属结构件满足以上条件, 因此对换流变压器可以采用该方法进行分析计算^[11-14]。

1.2 P21-B 模型建立

国际 TEAM Problem 21 基准族中 P 21-B 用来分析导磁钢三维非线性涡流-磁滞问题, 基准模型的激励源是两个相同规格的激励线圈, 线圈中电流的流向相反, 每个线圈 300 匝, 电流为 10A。模型的参数特征见图

1、图 2 和表 1，模型图如图 3，图 4 所示。

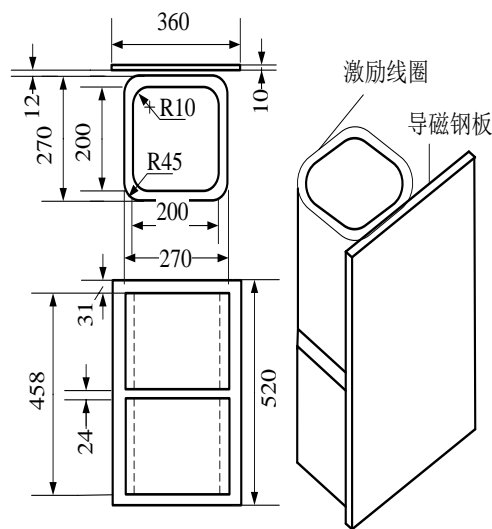


图 1 P21-B 结构和尺寸示意图

FIG 1 SIZE OF PROBLEM 21 MODEL B

表 1 基准模型各个部分的材料属性

TAB 1 MATERIAL PROPERTY OF BENCHMARK MODELS

构件	材料	电导率(S/m)	磁导率
线圈	铜	5.7143×10^7	$\mu_r=1$
导磁钢板	A3 钢	6.6484×10^6	$B-H$ 曲线
屏蔽	铜	5.7143×10^7	$\mu_r=1$

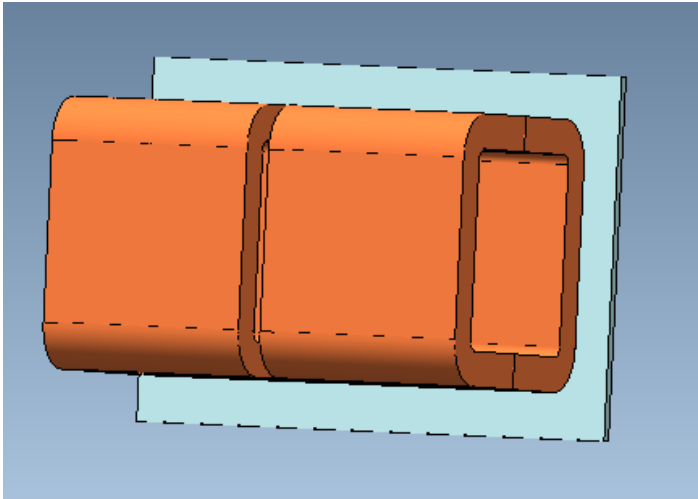


图 3 P21-B 计算模型

FIG 3 THE MODEL OF P21-B

1.3 分层法与表面阻抗法结果分析

1.3.1 漏磁场计算结果的比较与验证

为了证明两种方法的正确性与有效性，当测量点 $X=12\text{mm}$ ， $y=0\text{mm}$ 时，分别用两种方法对 P21-B 钢板中心线到磁通密度进行计算并与实际测量值进行比较。磁通密度的值是用 Magnet 获得磁场强度的有效值

$RMS|H|*\sqrt{2}$ 得到。

表 2 P21-B 基模型磁通密度 (Bx) 计算结果对比

TAB 2 THE Bx RESULT OF MODEL P21-B

位置 z(mm)	测量值 /Gs	表面阻抗法		分层法	
		计算值 (Gs)	误差 (%)	计算值 (Gs)	误差 (%)
0	215.67	212.13	-0.02	210.88	-2.22
32.5	156.7	159.80	1.97	159.88	2.03
65	93.62	92.5	-1.20	91.72	-2.03
130	8.96	14.3	5.95	8.80	-1.83
162.5	-24.18	-24.5	0.01	-25.22	4.32
196	-70.56	-72.06	2.1	-71.62	1.50
227.5	-122.47	-116.41	4.9	-116.41	-4.95

由上表可知分层和表面阻抗法测量磁密结果其误差都在 6% 以内，证明两种方法的可行性与正确性。应用两种方法分析时，钢板磁通密度如图 4 和图 5 所示。

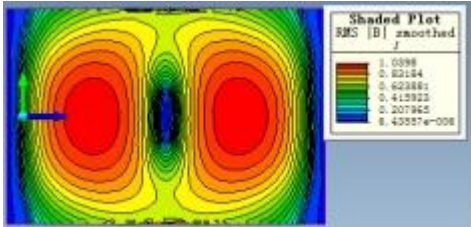


图 4 分层法磁密分布图

FIG4 DISTRIBUTION OF RMSH|B| OF MODEL B

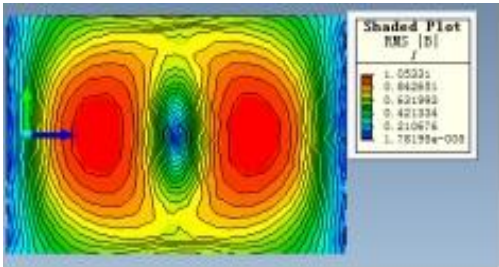


图 5 表面阻抗法磁密分布图

FIG 5 DISTRIBUTION OF RMSH|B| OF MODEL B

1.3.2 对 P 21-B 模型杂散损耗结果的比较与验证

通过以上方法对 P 21-B 模型的损耗计算结果如表 3 所示。

表 3 P21-B 模型的计算结果

TAB 3 RESULT OF MODEL P21-B

P 21-B	杂散 损耗	相对误差 (100%)	计算 内存	计算时 间
表面阻抗	12.73	0.66	224M	48s
分层	12.97	2.52	1.7G	14835s

通过这两种方法对 TEAM 21 模型的计算与分析，表明表面阻抗法在剖分计算方面对计算机运行内存要

求较低，而且运行时间较分层法有很大的缩减，对工程实际应用方面表面阻抗法优于分层法，因此笔者在程序中采用表面阻抗法对三维换流变压器模型进行剖分求解^[15-17]。

2 高压换流变压器模型建立与附加损耗计算

2.1 高压换流变压器模型建立

高压换流变压器三维计算模型包括铁芯、油箱、夹件、绕组、屏蔽、空气盒等结构件。对一台型号为 ZZDPZ-321100/500 的 500Kv 高压换流变压器建立有限元仿真模型，将此换流变压器模型进行合理的简化处理：

- (1) 根据模型对称性，绘制的模型沿铁芯长轴方向是全模型的 1/2；
- (2) 铁芯和油箱磁屏蔽按非线性，各向同性材料计算，忽略铁芯磁滞损耗和涡流损耗影响；
- (3) 对漏磁场损耗计算，选用时谐场，不考虑谐波电流和引线电流对漏磁场影响；
- (4) 电流密度在绕组内均匀分布。

该型号高压换流变压器的 1/2 三维模型(隐藏了油箱和屏蔽)，如图 6。

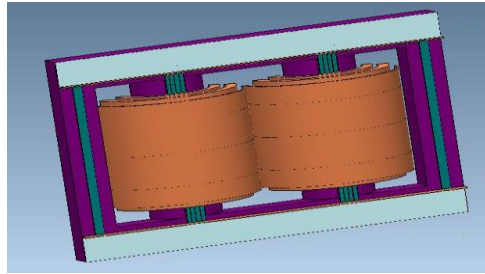


图 6 换流变压器模型

FIG 6 THE MODEL OF CONVERTER TRANSFORMER

2.2 高压换流变压器损耗计算

绕组涡流损耗分横向和纵向涡流损耗,文中通过对 Magnet 二次开发获得磁通密度后计算得到绕组涡流损耗，横向涡流损耗、纵向涡流损耗及绕组总的涡流损耗计算公式见公式 (3)-(5)：

$$P_{eri} = \frac{1}{24\rho} \omega^2 b^2 B_{ri}^2 V_i \quad (3)$$

$$P_{ehi} = \frac{1}{24\rho} \omega^2 d^2 B_{hi}^2 V_i \quad (4)$$

$$P_e = \sum_{i=1}^N P_{ei} = \sum_{i=1}^N (P_{eri} + P_{ehi}) \quad (5)$$

式(3)-(5)中：B_{ri} 和 B_{hi} 分别是第 i 个单元的横、纵向磁通密度(T)；ρ 为材料电阻率(Ω·m)；ω 为角频率(rad/m)；b 和 d 分别为导线横截面的长和宽(m)；V_i 是第 i 个单元的体积(m³)；N 为绕组总的单元数。

结构件涡流损耗一般通过计算公式(6)计算：

$$P_e = \int_v \frac{|J|^2}{\sigma} dv \quad (6)$$

公式中，P_e 是单位涡流损耗，J 是电流密度，v 是单元体积，σ 是导体电导率。

利用表面阻抗法计算的涡流损耗公式(7)计算

$$P = \sqrt{\frac{\omega\mu}{8\sigma}} \iint_S H_1 H_1^* ds \quad (7)$$

H1 为计算损耗表面的磁场强度切向分量；H1* 的共轭。

磁滞损耗是损耗幅值 Bm 的函数，根据有限元后处理过程中获得的磁密幅值 Bm，通过查询磁滞损耗与磁密幅值对应曲线获得磁滞损耗由公式（8）计算所得：

$$W_h = \sum_{i=1}^N W_h^i(B_m^{(i)}) \rho V^{(i)} \quad (8)$$

公式中，p 是材料密度，v(i)是单元体积；Wh (i) (Bm(i))是单元损耗。

在换流变压器附加损耗计算中的谐波损耗不可以直接获得，本文中选取 IEC61378-2 提供的工程计算方法计算高次谐波电流在绕组和金属结构件中产生谐波杂散损耗的方法。见由公式（10）和（11）：

$$P_{rh} = p_{r1} \cdot k_h^2 \cdot h^2 \quad (10)$$

$$P_{sh} = p_{s1} \cdot k_h^2 \cdot h^{0.8} \quad (11)$$

公式中，pr1 是谐波电流在绕组中的基波涡流损耗，prh 是各次谐波下绕组涡流损耗,ps1 是基波电流在结构件中的杂散损耗，psh 是各次谐波电流的杂散损耗，Kh=Ih/I1 是谐波电流系数，h=fh/f1 是谐波频率系数 [18-21]。

由保定天威特变电工技术研究所提供的各次谐波在基波电流中所占比值如表 4 所示：

表 4 各次谐波分量在基波中比值

TAB 4 RATIO OF THE HARMONIC TO THE BASIC WAVE

次数	5	7	11	13	17	19	23	25
含量（%）	17.9	11.4	4.9	3.5	0.9	0.55	0.79	0.84
次数	29	31	35	37	41	43	47	49
含量（%）	0.96	0.54	0.23	0.15	0.24	0.27	0.27	0.22

2.3 磁场分布图和损耗计算结果

该程序是运行在天威保变输变电技术研究所工作站 T7500，进行求解计算过程中材料类型设置为非线性，最大牛顿迭代次数是 200，多项式次数是 2，牛顿最大公差是 0.1%，CG 迭代最大公差是 0.002%，工作频率是 50Hz。在工作站上运行 2 小时 20 分钟，占用内存 6.7G，获得绕组磁通密度以及结构件磁通密度分布云图和电流密度矢量图如图 7 - 10 所示。

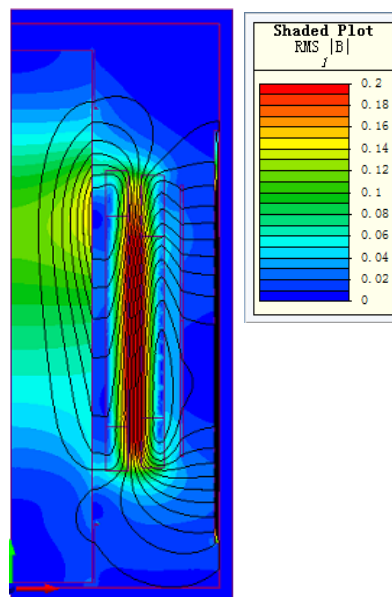


图 7 磁通密度分布图

FIG 7 DISTRIBUTION OF B IN WINDING

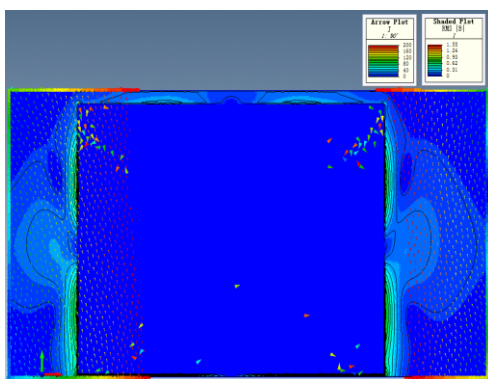


图 8 油箱内壁磁密与涡流损耗密度图

FIG 8 DISTRIBUTION OF B AND LOSS IN FUEL TANK

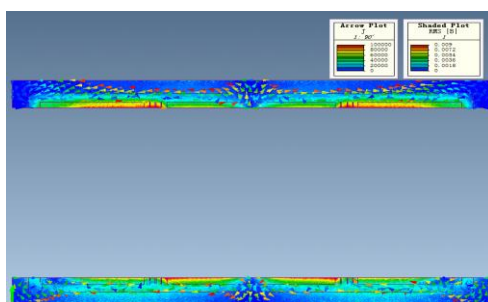


图 9 夹件磁密与涡流损耗密度图

FIG 9 DISTRIBUTION OF B AND LOSS IN CLAMP

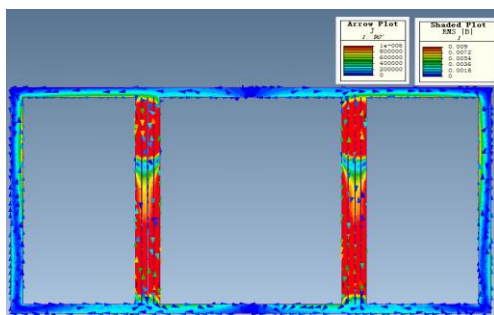


图 10 拉板磁密与涡流损耗密度图

FIG 10 DISTRIBUTION OF B AND LOSS IN PULLING PLATE

换流变压器由于有屏蔽层所以大部分漏磁通集中在屏蔽层上，油箱壁上漏磁较少；夹件上漏磁通集中在靠近铁芯部分；拉板上主柱上漏磁通较大，旁轭和上下轭漏磁通较少。根据公式（10）和（11）获得绕组和金属结构件基波与各次谐波损耗结果见图 11 和 12 所示。

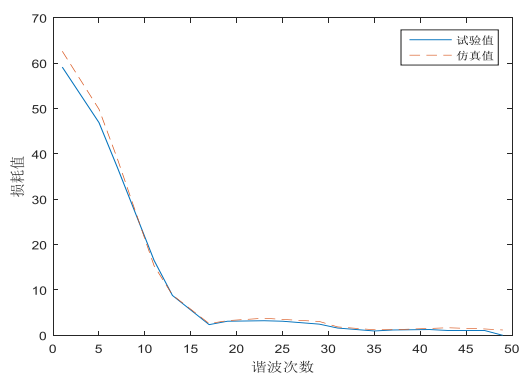


图 11 各次谐波电流下绕组涡流损耗分布(kw)

FIG 11 EVERY HARMONIC EDDY-CURRENT LOSS OF WINDING

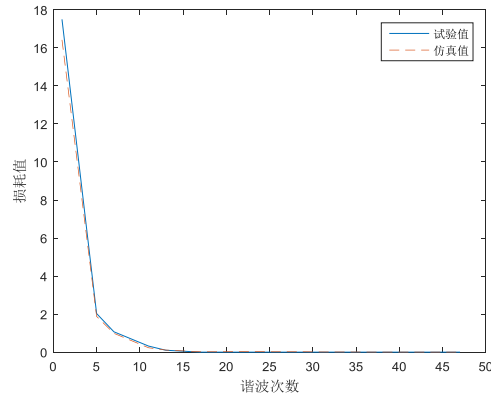


图 12 各次谐波电流下结构件涡流损耗分布(kw)

FIG 12 EVERY HARMONIC STRUCTURAL COMPONENT LOSS

试验得到的测量值和计算得到的仿真值计算结果见表 5。

表 5 谐波损耗值对比

TAB 5 RESULT OF HARMONIC CURRENT LOSS

损耗	涡流损耗	结构件损耗	短路阻抗
试验值	189.84kw	21.02kw	18.03%
仿真值	201.98kw	19.80kw	18.64%
误差	6.39%	5.80%	3.3%

分析计算结果，各次谐波电流下仿真值和试验值曲线接近，而且绕组涡流损耗和结构件杂散损耗的仿真值和试验值最大误差不超过 6.5%，短路阻抗最大误差是 3.3%，证明了计算方法的正确性。

文章最后对该型号的高压换流变压器进行了通过增加肺叶磁屏蔽进行改进，肺叶磁屏蔽形状及安装位置见图 13，增加肺叶磁屏蔽后基波下损耗分布结果见表 6。

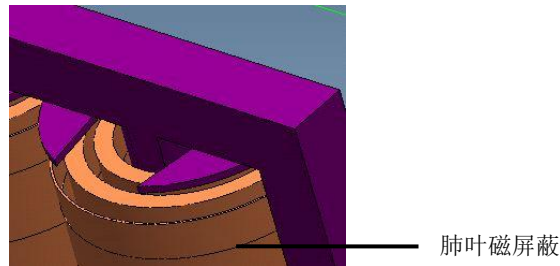


图 13 肺叶磁屏蔽安装位置

FIG 13 THE INSTALLATION LOCATION OF LOBE SHIELDING

表 6 增加肺叶磁屏蔽后损耗分布对比

TAB 6 RESULT OF INSTALLATION LOBE SHIELDING

损耗	涡流损耗	结构件损耗
未安装值	201.98kw	19.80kw
安装后值	203.56kw	15.45kw
变化	0.782%	21.97%

增加肺叶磁屏蔽以后，对绕组涡流损耗影响不大，对结构件杂散损耗影响较大，使结构件损耗得到明显下降，充分证明了安装肺叶磁屏蔽的合理性。

3 结论

针对换流变压器油箱等结构件浅透入深度的三维涡流场问题，使用表面阻抗法代替传统分层法，利用国际通用 Team 21 模型验证该方法具有占据内存小、计算时间短和计算精度高的特点，更符合工程实践应

用。通过二次开发 Magnet 软件计算绕组涡流损耗, 考虑到换流变压器高次谐波特点, 在获得绕组和结构件基波损耗基础上完成了高次谐波漏磁损耗计算。文章最后对一台真实的换流变压器模型 ZZDPPZ 321100/1500 进行建模求解计算分析, 计算了该换流变压器中结构件的高次谐波损耗, 为该变压器的进一步分析采取的有效措施减少局部过热提供了参考依据。

4 参考文献

- [1] 景崇友, 王建民, 陈志伟等. 换流变压器绕组瞬态漏磁场与谐波损耗的分析[J]. 变压器, 2007, 44 (4):1-4
Jing Chongyou, Wang Jianmin, Chen Zhiwei, etc. Analysis of transient leakage field and harmonic losses in windings of converter transformers [J]. Transformer 2007, 44(4):1-4
- [2] 韩晓东, 翟亚东. 高压直流输电用换流变压器[J]. 高压电器, 2002, 38(3):5-6
Han Xiaodong, Zhai Yadong. Cinverter transformer used for HVDC transmission [J]. High Voltag Apparatus2002, 38(3):5-6
- [3] 景崇友, 王建民, 王永青等. 大型变压器漏磁场及特性参数的工程仿真软件研发[J]. 变压器, 2008, 45(4):1-5.
Jing Chongyou, Wang Jianmi, et al. Development of engineering simulating software of leakage field and characteristic parameters in large transformer[J].Transformer,2008,45(4): 1- 5
- [4] 张萍, 王柳, 张文峰, 王建民等. 高压换流变压器附加损耗计算程序[J]. 高压电器, 2015, 51(3): 55-64
Zhang Ping, Wang Liu, Zhang Wenfeng, Wang jianmin, etc. Additional Loss Calculation Program of HV Converter Transformer [J]. Transformer, 2015 ,51(3) 55-64
- [5] 耿荣林. 电力变压器漏磁场及箱体涡流损耗的有限元分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2008.
Geng ronglin. Finite element analysis of the transformer leakage field and its oil- tank eddy current losses[D].Shenyang: University of Technology,2008
- [6] 程志光, 高桥则雄, 博扎德弗甘尼. 电气工程热场模拟及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Cheng Zhiguang, Norio Takahashi, Behzad Forghani. Eletromagnetic and thermal field modeling and application in electrical engineering [M]. BeiJing: Science Press, 2009
- [7] Zhiguang CHENG, Norio TAKAHASHI etc. TEAM Problem 21 Family (V.2009) 1-15.
- [8] 张文峰. 换流变压器漏磁场分析与附加损耗计算[D]. 天津: 河北工业大学, 2011
Zhang Wenfeng. Magnet leakage field analysis and additional loss calculation of converter transformer [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2011
- [9] 耿荣林, 谢德馨, 李洪友. 变压器箱体涡流损耗的三维有限元分析. 变压器. 2008, 45(2):1-4
Geng Ronglin,Xie Dexin,Li Hongyou. The 3D finite element analysis of transformer tank [J]. Transformer. 2008, 45(2):1-4
- [10] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京:高等教育出版社,2006
Fen Cizhang, Ma Xikui. Theory of electromagnet fields [M]. Beijing: Higer Education Press, 2006
- [11] 刘华, 刘锐等. 基于阻抗边界法的换流变压器箱壳谐波损耗计算[J]. 高电压技术. 2015, 41(9):3172-3176
Liu Hua, Liu Rui etc. Calculation of harmonic loss in converter transformer tank shells based on the impedance boundary condition [J]: High Voltage Engineering.2015, 41(9):3172-3176
- [12] 周伟, 李岩, 井永滕, 韩芳旭. 换流变压器谐波损耗的分析与计算[J]. 高压电器, 2012, 48(8):18-23
Zhou Wei, Li Yan, Jing Yongteng etc. Calculation and analysis of harmonic loss in converter transformer [J].High Voltage Apparatus, 2012, 48(8):18-23.
- [13] 韩芳旭,换流变压器谐波损耗及热问题分析[D].沈阳: 沈阳工业大学: 2011,21-2
Han Fangxu. Calculation ananalysis of harmonic loss and thermal problems on convert transformer [D]. Shenyang, China:Shenyang Universityof Technology 2011: 21-23.
- [14] Olivares-Galvn J C, Georgilakis P S, Ocon Valdez R. A review of transformer losses [J]. Electric Power Components and Systems, 2009, 37(1): 1046-1062

- [15] Zhu Zhanxin, Xie Dexin etc. Computation of 3D Magnet Leakage field and stray losses in large power transformer[J] IEEE TRANSACTION ON MAGNETICS, 2012: 48(2), 739-742
- [16] J.P. Webb B. Forghani DC current Distributions and Magnetic Fields using the T-Omega Edge-Element Method [J] IEEE Transaction on Magnetics. 31(3)
- [17] Zhiguang Cheng, Norio Takahashi, etc. Loss Spectrum and Electromagnetic Behavior of Problem 21 Family. IEEE Transactions On Magnetics. 2006 42(4): 1467-1470
- [18] Youhuang Wang, Wenfeng Zhang etc. Stray loss calculation of HVDC converter transformer[J] Ieee Transaction On Applied Superconductivity, 2012: 22(3) 1051-1054
- [19] 张树兵, 戴红等. Visual Basic 6.0 入门与提高[M]. 北京: 清华大学出版社 2000.
Zhang Hongbing, Dai Hong, etc. Introduction and Improvement of Visual Basic 6.0[M] Beijing: Tsinghua Press 2000.
- [20] 李茉. 基于阻抗边界法的变压器箱壳涡流损耗计算[D]. 北京: 清华大学, 2012: 18-21.
LI Mo. Calculation of eddy current loss in transformer tank shells based on the impedance boundary condition [D]. Beijing, China: Tsinghua University, 2012: 18-21
- [21] 李金忠, 张丹丹, 张书琦等. 换流变压器负载损耗计算方法分析对比[J]. 高压电器: 2015, 51(12): 84-95
Li Jinzhong, Zhang Dandan, Zhang Shuqi etc. Analysis and comparison on the calculation methods of converter transformer [J] High Voltage Apparatus: 2015, 51(12): 84-95

【作者简介】

张萍（1979-），辽宁大连人，女，副教授，主要研究方向是大型变压器的暂态分析，电话 13672008480，022-60204335。