

基于 Ansoft 的移相整流变压器分析与研究

周 凌, 周 翔

(湖南工业大学, 湖南 株洲 412008)

摘 要: 介绍了 Ansoft 电磁场仿真软件 Maxwell 2D/3D 对 ZTSG-530/6 移相整流变压器的建模与仿真, 对变压器的空载特性作了仿真分析, 其结果与试验值和设计值基本吻合。同时在瞬态场中根据原副边的实际结构及负载参数的改变, 分析了线圈在空载和短路情况下的受力情况。通过仿真分析, 其结论为改善变压器性能提供了一定的理论参考。

关键词: Maxwell 2D/3D; 移相整流变压器; 空载特性; 瞬态场

中图分类号: TM422

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2009)03-0066-04

The Analysis and Research of Phase Shift Rectifier Transformer Based on Ansoft

Zhou Ling, Zhou Xiang

(Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

Abstract: Introduces Ansoft electromagnetic field simulation software Maxwell2D/3D for the modeling and simulation of ZTSG-530/6 phase-shifting rectifier transformer and makes simulation analysis of the no-load characteristics of the transformer. The results tallies with the values of experiments and design. At the same time in accordance with the structure of primary winding and secondary side and the change of load parameters in the transient field, analyses the forces of the coil under the no-load and short-circuit. Through the simulation analysis, the result provides a certain theoretical reference to improve the performance of the transformer.

Keywords: Maxwell2D/3D; phase shift rectifier transformer; no-load characteristics; transient field

静磁场、瞬态场和温度场等方面的研究, 是讨论变压器中电、磁、力、热各种因素及其相互作用的基础。对于大容量的变压器和特种变压器而言, 如果设计不当, 就可能会增加成本, 甚至会导致线圈产生变形, 其局部或整体受到破坏, 从而出现安全问题, 因此, 使用仿真软件对设计的变压器进行分析是十分必要的。

本文介绍了 Ansoft 电磁场仿真软件 Maxwell 2D/3D 对 ZTSG-530/6 移相整流变压器的建模与仿真, 并对其三维瞬态场等进行了仿真分析。同时根据原、副边的实际结构及负载参数的改变, 重点分析了线圈在空载和短路情况下的受力。

1 Ansoft 电磁场仿真软件 Maxwell 简介

Ansoft 电磁场仿真软件 Maxwell 2D/3D 可对存在电磁现象的各种产品进行设计分析, 它具有功能强大, 方便易用的静电场、静磁场、涡流场、瞬态场和温度场等分析模块。可以用来分析电机、变压器、传感器等电磁装置的静态、稳态、瞬态、正常工况和故障工况的特性。它所包含的自上而下执行的用户界面、领先的自适应网格剖分技术、用户定义材料库等特点, 使得 Maxwell 2D/3D 在易用性上遥遥领先。同时 Maxwell 2D/3D 具有高性能矩阵求解器和多 CPU 处理能力, 提供了最快的求解速度^[1]。

收稿日期: 2009-03-27

作者简介: 周 凌 (1982-), 男, 湖南娄底人, 湖南工业大学教师, 硕士, 主要研究方向为电力电子与电力传动,

E-mail: zhouling1982@126.com

Maxwell 2D/3D采用图形输入界面和AutoCAD输入转换接口, 绘制图形极其方便, 可以建立各种各样的模型。Maxwell 2D/3D采用自适应有限元分析方法, 图形输入完成后, 给定正确的介质材料和问题的边界条件, 只要给定求解精度, 不需要人工干预, 即可自动完成分析计算^[2]。

2 Ansoft 电磁分析过程及结果

2.1 变压器模型建立及求解设置

建立变压器模型是进行变压器电磁场分析的第一步, 只有保证了变压器模型的准确, 才能保证变压器电磁场仿真的准确。由于只分析变压器瞬态场和线圈的电动力, 而不关心变压器的涡流, 因此可将夹件、油箱、套管等附件忽略不计。具体建模及求解设置过程如下:

1) 确定变压器的结构尺寸, 画出变压器模型。变压器主要参数如表 1, 其三维模型如图 1 所示, 图中铁芯柱最外面的是低压线圈, 里面的是高压线圈^[3-4]。

表 1 ZTSG-530/6 变压器的主要技术参数

Tab. 1 The main technical parameters of the ZTSG-530 / 6 transformer

一次额定电压 /V	二次额定电压 /V	一次额定电流 /A	二次额定电流 /A	额定容量 /kVA
6 000	450	51	36	530
高压绕组匝数	移相绕组匝数	主绕组匝数	0° 绕组匝数	铁心截面面积 /cm ²
346	9	31	26	298.45
铁心质量 /kg	铁心直径 /mm	脉波数	窗高 /mm	绝缘半径 /mm
1 021.65	207	18	935	520

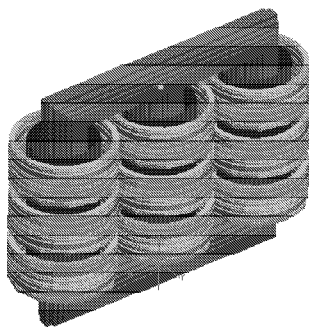


图 1 移相整流变压器仿真模型

Fig. 1 The simulation model of phase shift rectifier transformer

2) 确定变压器材料属性。Maxwell 2D/3D除了有自带的材料库之外, 还允许用户自己添加材料。因此对该变压器的线圈材料采用材料库中的铜线, 而铁芯材料则是自己添加的, 其型号为 30QG120, B-H 曲线如图 2 所示。

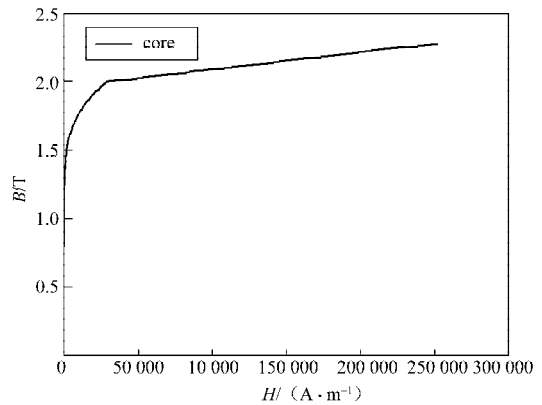


图 2 铁芯硅钢片的 B-H 曲线

Fig. 2 The B-H curve of core silicon steel sheet

3) 确定有限元计算的边界条件和激励参数。边界条件和激励源的设定是 Ansoft 求解的关键。Maxwell 3D 瞬态分析中的激励源可定义为函数 (时间的任意函数), 有 6 种不同的组合: 电流、电压和外电路, 每一种都可以定义为实体或线圈导体。定义该变压器的高压线圈为余弦电压激励源, 幅值是高压线圈的电压值, 每相依次相差 120° 相角, 并给定高压线圈的匝数。定义低压线圈为电流源, 给定其匝数, 并在 Edit External Circuit 中给低压线圈外加电感和负载, 联结方式为 Y 联结。负载 R 的值设置为 20 GΩ, 模拟变压器的空载电路。改变外电路的连接方式及负载的阻值, 可模拟变压器在负载和短路等状态下的运行情况^[2]。

2.2 变压器网格划分

Maxwell 2D/3D 有一个最大的优点就是采用自适应网格分析, 系统进行迭代求解, 对最大误差存在的区域进行网格细化, 得到较高的网格密度, 从而生成更加准确的解。在每次迭代时, Maxwell 2D/3D 会计算系统的总能量, 由求解误差得到能量百分比, 因而检查能量百分比来确定求解是否结束, 或误差百分比和最近 2 次误差百分比的变化量是否达到指定值。其变压器生成的网格如图 3 所示。

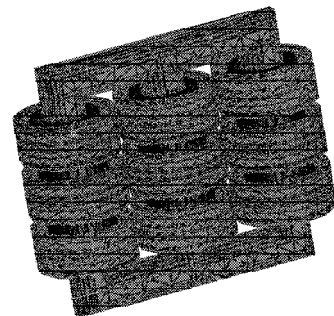


图 3 变压器网格划分图

Fig. 3 The transformer mesh map

2.3 瞬态求解及结果分析

2.3.1 空载损耗计算

在求解完成后，通过 Transient Data，可以得到转矩、电流、反电动势、铁芯损耗、速度等随时间变化的图形。图 4 给出了铁芯损耗随时间变化曲线。从图中可以看出，铁芯损耗的值为 1 092.915 8 W。

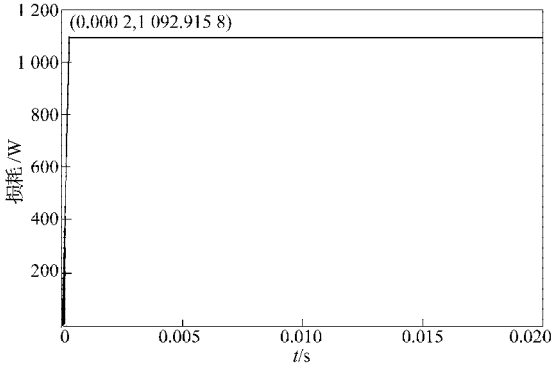


图 4 铁芯损耗曲线图
Fig. 4 The curve of core loss

根据工程计算理论可得，对于给定的硅钢片，在一定频率下，每单位重的损耗（即铁心单位损耗 p_1 ）取决于磁通密度，当得到铁芯质量及磁通密度后，可算出变压器的空载损耗。空载损耗由 2 部分组成，即空载电流 i_{10} 在流经一次绕组时，在绕组电阻 r_1 上的有功损耗和磁通在铁芯中产生的损耗。前者由于 i_{10} 很小，故可忽略不计。可以认为变压器在空载运行时空载损耗即为磁通在铁芯中的损耗。

$$\text{空载损耗: } p_0 = k_1 p_1 G_F, \quad (1)$$

式中： p_1 —铁芯单位损耗， $p_1=0.866 \text{ W/kg}$ ；

G_F —铁芯质量，单位 kg；

k_1 —附加系数，此处 $k_1=1.25^{[5]}$ 。

可以算得该变压器空载损耗的设计值为 1 105.941 W，空载损耗试验值为 1 108 W^[3]。由于空载损耗基本就是铁芯损耗，因此可以看出三者得到的值基本相等。

2.3.2 空载特性分析

空载特性是变压器的基本特性之一，通过空载特性可以了解变压器的磁路设计是否合理。根据前面建立的仿真模型，利用 Maxwell 所具有的“磁-路”耦合功能，自动生成空载回路，如图 5 所示。图 5 中从上到下依次按正延边三角形联结—星形联结—反延边三角形来连接，低压线圈上都接一个电压表，用来测量三相电压。同时为了模拟变压器的空载运行，给低压绕组接了一个阻值很大的电阻（ $2 \times 10^{10} \Omega$ ）。由于进行三维的有限元分析，运算量十分庞大，为了节约时间及保护计算机，仿真中只计算了 0.02 s 的时间。图 6 为瞬态下输出的三相低压线圈电压波形图。图中标出其幅值为 457.978 V，与试验值 450.8 V，设计值 450 V 基本

相等^[3]。

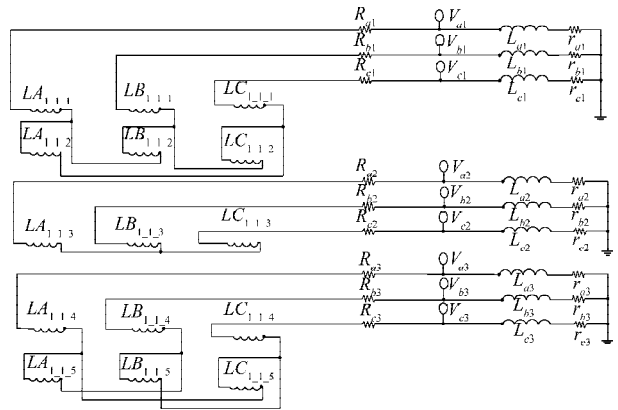


图 5 Transient 下建立的空载电路图
Fig. 5 The no-load circuit under Transient

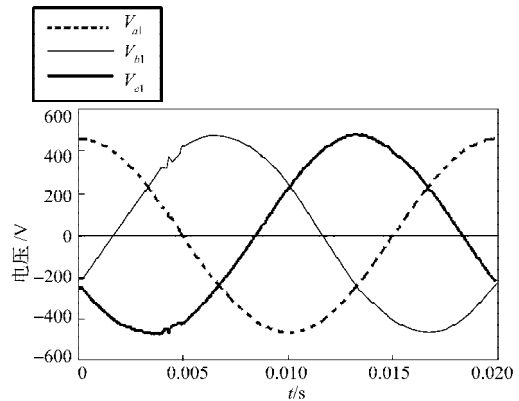


图 6 Transient 下三相低压线圈电压波形图
Fig. 6 The voltage wave of the three-phase low-voltage wire under Transient

2.3.3 线圈绕组电动力分析

移相整流变压器绕组载流以后，在它们所在的空间及其所包络的空间介质 μ_0 中将建立起漏磁场，电流和磁场相互作用会产生力。处于这个磁场中的绕组会受到力的作用，力矢量与电流矢量和磁通密度矢量满足右手螺旋法则。这种电流与磁场的作用力称为洛伦兹力或称为电动力，其表达式为：

$$F(t) = \int_V J(t) \times B(t) dV, \quad (2)$$

平均力是瞬时力的积分：

$$F_{AV} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(t) d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\int_V J(t) \times B(t) dV \right) d(\omega t), \quad (3)$$

式中： J 为导体内的电流密度；

B 为磁感应强度；

dV 是导体的体积^[1]。

经过对移相整流变压器进行仿真分析求解，结果表明，原边线圈径向受到的力为正值，表明该力为张力，而副边线圈径向受到的力为负值，表现为压力。把 $R_{a1}(R_{a2}, R_{a3})$ 、 $R_{b1}(R_{b2}, R_{b3})$ 、 $R_{c1}(R_{c2}, R_{c3})$ 统一称为 R ，当改变图 5 中 R 的值时，就可以模拟不同的负载。当

$R \rightarrow \infty$ 时, 可以认为变压器为空载, 实际取值 $R = 20 \text{ G}\Omega$ 。图 7 为空载状态下高压和低压的径向受力曲线, 图中 high_x 为高压线圈的径向受力曲线, low_x 为低压线圈的径向受力曲线。当 $R \rightarrow 0$ 时, 可以认为变压器处于短路状况, 实际取值 $R=1\text{E}-025 \Omega$ 。图 8 为短路状态下高压和低压的径向受力曲线。从图 7 和图 8 对比中可以看出, 在短路情况下, 电动力急剧增加, 其峰值约是空载时的 8 倍。在这种情况下就有可能使变压器发生故障^[6]。

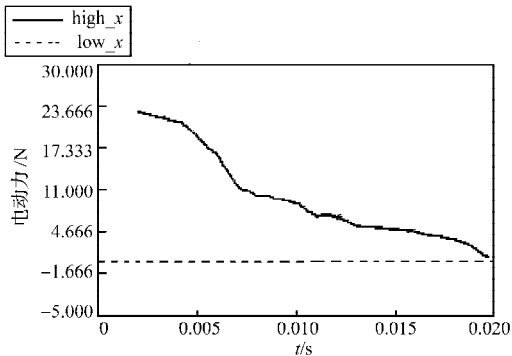


图 7 空载状态下高压和低压的径向受力曲线
Fig. 7 The radial force curve of high-voltage and low-voltage under no-load

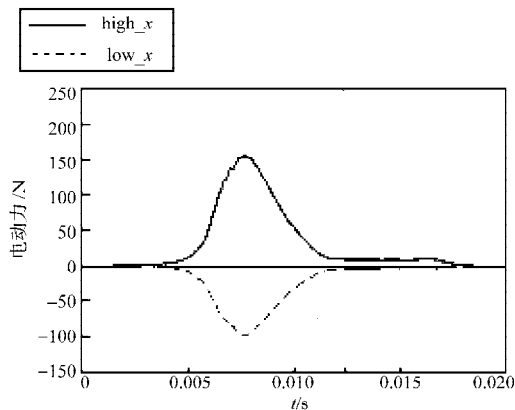


图 8 短路状态下高压和低压的径向受力曲线
Fig. 8 The radial force curve of high-voltage and low-voltage in short-circuit

3 结语

1) 有限元软件 Ansoft 对移相整流变压器磁场分布的仿真结果与理论分析相符, 说明分析与仿真方法的

正确性。

2) Ansoft 软件在进行瞬态场时, 可利用“磁-路”耦合方法来考虑负载、空载和短路等各种运行情况, 对分析某些电力设备的电磁场问题非常快速、有效。

3) 通过仿真分析可以看到每个变压器线圈在不同的时刻将受到不同的电动力, 根据分析结果可用来判断变压器设计的合理性, 并进行优化。

4) Ansoft 软件除了可以用来分析变压器瞬态场外, 还可以分析静磁场和温度场、静电场、涡流场等, 因此在实际应用中可以用它来对变压器的特性作深化研究, 这对大容量和特种变压器设计来说有着非常重要的作用。

参考文献:

- [1] 刘国强, 赵凌志, 蒋继娅. Ansoft 工程电磁场有限元分析 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
Liu Guoqiang, Zhao Lingzhi, Jiang Jiya. The Finite Element Analysis of Ansoft Engineering Electromagnetic Field [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [2] Ansoft Corporation. Maxwell 3D Transient [M]. Pittsburgh: Ansoft Corporation, 2001: 21-61.
- [3] 周凌, 黄守道, 陈湘令, 等. 基于 VC++ 的移相整流变压器电磁计算软件设计 [J]. 电气应用, 2007, 26(8): 53-56.
Zhou Ling, Huang Shoudao, Chen Xiangling, et al. Software Design of Electromagnetic Calculation in Phase Shift Rectifier Transformer Based on VC++ [J]. Electrotechnical Application, 2007, 26(8): 53-56.
- [4] 崔立君, 张茂鲁, 张洪, 等. 特种变压器理论与设计 [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1996.
Cui Lijun, Zhang Maolu, Zhang Hong, et al. The Theory and Design of Special Transformers [M]. Beijing: Science and Technology Literature Publishing House, 1996.
- [5] 刘传彝. 电力变压器设计计算方法与实践 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002.
Liu Chuanyi. The Calculations and Practice of Power Transformer Design [M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 2002.
- [6] Ansoft Corporation. Getting Started: A 3D Magnetic Force Problem [M]. Pittsburgh: Ansoft Corporation, 2002: 32-53.

(责任编辑: 罗立宇)