

环氧绝缘干式变压器线圈固化过程温度场仿真研究

金涛¹, 刘燕², 刘四维²

(1. 上海交通大学电子信息及电气工程学院, 上海 200240; 2. 广东顺德电气有限公司, 广东 顺德 528300)

摘要: 为了防止生产过程中干式变压器树脂线圈的开裂、缩孔、白斑等问题, 笔者研究了产生开裂等缺陷的形成内因, 并根据干式变压器线圈材料性能随温度变化的特性, 采用非线性分析建立了线圈浇注、固化、冷却过程瞬态温度场、热应力场三维有限元模型, 并确定温度场中初始条件、边界条件, 设计了一种有效模拟干式变压器浇注、固化、冷却过程中三维温度场和应力场分布的方法模拟其内部分布, 从而改进干式变压器的工艺参数和性能并减少开裂等缺陷的产生。实验表明该仿真能够较好地再现线圈固化过程中的温度场和应力场分布。

关键词: 干式变压器; 固化过程; 有限元; 数值模拟

中图分类号: TM403.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)05-0385-04

Numerical Simulation of Temperature Field in Curing Process for Epoxy Resin Dry-type Transformer Winding

JIN Tao¹, LIU Yan², LIU Si-wei²

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Department of Technology Development, Shunte Electric Co. Ltd., Shunde 528300, China)

Abstract: In order to avoid crack faults and shrinkage of winding due to the changes in temperature field and stress field during the production process, a study was put up. By analyzing the reasons for forming faults and considering the performance of the winding material changing with temperature, the nonlinear analysis was adopted to build a 3-D finite element analysis model of transient temperature field and thermal-stress field during casting, curing, and cooling process of the dry-type transformer winding. The initial condition, boundary condition, and latent heat were then determined, thus the model could be applied in simulation of temperature and stress fields distribution in that process. The experimental results indicate that the numerical simulation coincide well with the actual dynamic changes of temperature and stress fields in casting, curing and cooling process of epoxy resin dry-type transformer winding, which will benefit the improvement of transformer performance and the reduction of cracks.

Key words: dry-type transformer; curing process; finite element analysis(FEA); numerical simulation

0 引言

我国于20世纪70年代引进了环氧树脂绝缘干式变压器生产技术, 但发展和应用缓慢。到了20世纪90年代初, 随着城网改造的需要和干式变压器技术的提升, 干式变压器得到了广泛应用与快速发展, 国内干式变压器技术的发展也从消化吸收走向自我开发并达到国际先进水平。在环氧浇注干式变压器的生产中, 耐开裂性是一个非常重要的指标。开裂使产品的电气性能、机械性能、力学性能等急剧下降, 从而导致击穿、脱落等, 使产品的寿命和可靠性受到严重损害。所以如何解决干式变压器浇注、固化、凝固过程中温度场和应力场的变化引起内应力并导致

线圈开裂、缩孔等现象, 一直是困扰干式变压器生产行业的一个难题^[1,2]。笔者在电气实验和温度场实验等实验基础上, 分析了开裂等缺陷产生的原因, 并结合计算机仿真技术, 设计模拟了干式变压器整个浇注、固化、冷却过程中的温度场和应力场变化, 初步探索了环氧树脂绝缘干式变压器开裂的解决办法。

1 干式变压器线圈开裂原因分析

干式变压器线圈生产中用到的环氧树脂是一种高分子的热固性材料, 通过交联反应来形成绝缘物。在干式变压器的生产过程中, 由于化学反应、温度变化以及外部的应力作用等因素的影响, 绕组线圈容易产生白斑、收缩、开裂等现象^[3]。图1是干式变压器线圈浇注、固化、冷却过程中的不同位置形成的开

收稿日期: 2007-11-05; 修回日期: 2008-03-25

基金项目: 中国博士后科学基金资助(20060390151)。

作者简介: 金涛(1976-), 男, 湖北省宜昌市人, 博士, 主要从事电气绝缘、无损检测、数值仿真等方面的研究。

裂、白斑等缺陷实物照片图。

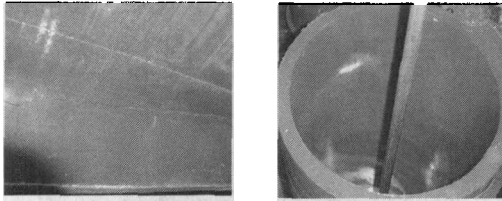


图1 环氧树脂干式变压器线圈缺陷实物图

环氧树脂是含有大分子、链段、链内基团等多重结构单元，其固化机理可以分为级反应机理和自催化反应机理，随着温度的变化树脂绝缘浇注体存在3种状态即玻璃态、高弹态和黏流态。干式变压器线圈浇注、固化、冷却过程中的温度控制非常重要，直接涉及到产品的性能和缺陷的产生。其中最高固化温度和最终固化时间对环氧树脂固化物的影响很大，而玻璃化温度 T_g 与固化反应体系反应集团的转化率密切相关^[4,5]，在不同的加热速率下可得到不同的固化反应程度。

大量工厂生产实验和现有资料表明，引起干式变压器线圈开裂和缩孔的主要原因是固化过程中产生的内应力，引起白斑的主要原因是由固化工艺操作和工艺环境引起。分析环氧树脂干式变压器浇注、固化、冷却过程可知，由于环氧树脂固化反应是放热反应，导致中心部位的固化比边沿部位的固化要快，从而形成残余内应力，同时干式变压器线圈在浇注、固化、冷却过程中，模具、填料、导体等对树脂的固化收缩具有约束力，因而也能形成内应力，又由于树脂的热膨胀系数通常远大于铜材、玻璃纤维的热膨胀系数，温度变化时膨胀系数小的材料将对膨胀系数大的材料产生大的约束力，从而也导致产生内应力，这些内应力都是产生开裂等缺陷的原因。图2是经过长期研究表明的环氧树脂干式变压器线圈在固化过程中的膨胀与收缩示意图^[6]。分析图2可以看出，环氧树脂因固化中的膨胀和收缩产生的应力主要是内部温度分布不均引起的。另外，环境应力也能引起干式变压器线圈的开裂，如切割、打磨、氧化等外部因素引起浇注体产生内应力，在长时间的作用下，即使应力低也能直接发展到脆性破坏导致开裂，但这部分引起的开裂所占的比重很小，并且可以通过工艺改进控制。综合以上分析可知，干式变压器线圈浇注、固化、冷却过程中的开裂、收缩等现象主要与温度有关，有必要对干式变压器内部的温度场和应力场变化进行研究，从而改进环氧树脂干式变压器的工艺参数及性能并减少开裂等缺陷的产生。

2 干式变压器温度场仿真理论研究

干式变压器浇注、固化、凝固过程温度场和应力场的分析严格来讲是一个热结构耦合问题，但是应

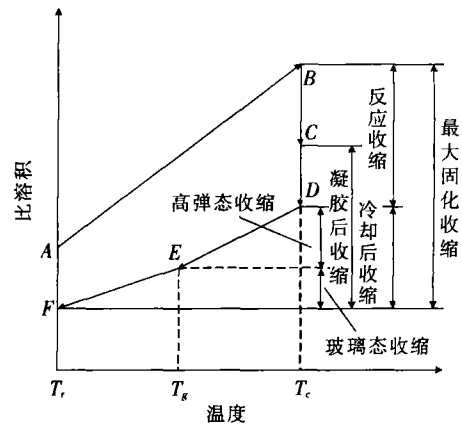


图2 环氧树脂在固化过程中的膨胀与收缩

力变形做功引起的热效应比起温度变化和固化过程中潜热释放的热效应可以忽略不计，所以热过程和应力过程解析可以分别进行，温度场模拟结果作为热载荷施加到结构上求解应力，从而可以简化热、力耦合求解问题^[7,8]。

在线圈的浇注、固化、冷却过程中，热传递主要是传导和对流，热辐射较少，此外还有化学反应及相变产生热量的变化。浇注、固化、冷却过程中的复杂因素很多，分析过程中必须抓住主要矛盾，在分析初始阶段，线圈的浇注、固化、冷却过程中考虑主要因素影响根据实际情况提出以下几个前提：①线圈内部之间只有热传导，无对流和辐射换热；②线圈与线圈外部的空气以及模具间的空气存在对流，此时的空气为自由空气，无强迫换热；③在一定的温度范围内，材料的热性能不随温度变化。

对线圈浇注、固化、冷却过程的温度场数值模拟必须首先建立合理的数学模型。数值模拟的成功与否、精度如何，决定于数学模型对模拟对象的概括表达程度。其中干式变压器温度场基本数学模型就是不稳定导热偏微分方程，可用式(1)表示为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 k \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (k \frac{\partial T}{\partial \phi}) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \phi} \frac{\partial}{\partial \theta} (k \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta}) + \rho Q \quad (1)$$

式(1)中， k 是材料的热传导系数， $W/(m \cdot ^\circ C)$ ； C_p 是比热， $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ； ρ 是密度， kg/m^3 。 k 、 C_p 、 ρ 等均与温度有关。在环氧树脂固化温度场的分析中主要用到以下两种边界条件，其中 h 为界面传热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

$$-k \left(\frac{dT}{dn} \right)_w = f_2(x, \tau) \quad (2)$$

$$-k \left(\frac{dT}{dx} \right)_w = h(T_w - T_f) \quad (3)$$

对流系数的确定一直是温度场仿真研究一个难点问题。对于干式变压器浇注固化来说，烘炉里面摆放的位置不同最后造成的固化效果也很不一样，而且不仅要确定外界空气的对流系数，还要确定液体

树脂内部的对流系数。流体的流动存在着层流和紊流，且此时的对流系数与浇注线圈的高度有关，当 $R_e < 10^9$ 时为层流， $R_e > 10^9$ 边界处于紊流状态。层流和紊流可用瑞利判据决定

$$R_r = G_r P_r = \frac{g\beta L^3 c_p (T - T_\infty)}{\nu \lambda} \quad (4)$$

式(4)中 G_r 为葛拉晓夫数， P_r 为普朗特数， L 为特征长度， β 为流体的膨胀系数， ν 为其运动粘度， λ 为流体热传导系数。对于单包封情况，利用瑞利判据区分出层流和紊流后，在不考虑热辐射时，环氧树脂干式变压器线圈层流及紊流对流系数和高度关系可由局部努赛尔数来判定

$$Nu = \frac{hz}{\lambda} = \left(\frac{P_r}{4 + 9P_r^{1/2} + 10P_r} \right)^{1/5} (G_r^* \cdot P_r)^{1/5} \quad (5)$$

$$Nu = \frac{0.15 (G_r^* \cdot P_r)^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.437}{P_r} \right)^{9/16} \right]^{16/27}} \quad (6)$$

在考虑热辐射时包封表面有 $\varepsilon \delta F_{i,j} (T^4 - T_\infty^4) + h(T - T_\infty) = q$ ，此时可把其等效为只有对流传热。利用式(5)、(6)即可求出考虑到辐射和对流时的层流和紊流等效对流系数。多包封流体对流系数的情况可以根据单包封的情况来推导。

当环氧树脂由液相转化为固相时，由于液相的内能 E_L 大于固相的内能 E_S 而产生潜热 $\Delta E = E_L - E_S$ ，处理该问题可用等效比热法、热焓法等。用等效比热法等效比热可表示为

$$C_E = C_p - L \frac{df}{dT} \quad (7)$$

如果已知固相率 f_s 与温度 T 的关系，则上式可求解。一般把固相率按线性分布或者二次分布来考虑。对于二次分布， $T = T_L - (T_L - T_s) f_s^2$ ，则有

$$\frac{df_s}{dT} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{(T_L - T_s)(T_L - T)}} \quad (8)$$

对于干式变压器线圈内部环氧树脂、固化剂等之间化学反应放出的热量主要通过 DSC 实验来标定，然后作为参数直接加到仿真过程中。

当干式变压器线圈内部的温度场表示出以后，用虎克定律来描述其内部的应力应变关系，对于环氧树脂线圈浇注固化冷却过程来说，把其当作平面问题来研究，则应力应变关系可写为

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] + \alpha \Delta T \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] + \alpha \Delta T \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] + \alpha \Delta T \end{aligned} \quad (9)$$

3 实验分析及讨论

采用如图 3 所示的单包峰 30 kV·A 高压线圈

SC9-30 进行实验和 Ansys 仿真分析，其内径为 107.5 mm，外径为 131 mm，高度为 330 mm，采用 3 段式结构，段间和外部绝缘为玻璃纤维填充，中间为铜导线，向外的部分为凸台。下面主要以温度场仿真研究来说明其仿真模拟过程。



图 3 仿真和实验用 SC9-30 干式变压器线圈结构图

首先利用 Ansys 仿真工具对该线圈进行几何造型，然后输入热物性参数和初始条件，根据先前分析先确定温度场然后再计算应力场。由于干式变压器线圈整个浇注、固化、冷却过程长达 20 多小时，计算量非常庞大，而且外界环境复杂多变，所以不断地根据实验和经验改变仿真参数非常重要。干式变压器线圈绕组的材料主要有导线、箔、环氧树脂、固化剂、增韧剂、玻璃纤维、玻璃毡等。线圈绕组在浇注、固化、冷却仿真中涉及的属性参数主要有密度、导热系数、换热系数、热膨胀系数、刚度系数、比热容、泊松比、杨式模量等。这些参数中不随温度变化或者随温度变化较小的参数可以通过已有的资料或数据给定，对于那些随温度变化比较大的参数则必须通过测试获得。在计算温度场时可首先进行 1 s 的温度场分稳态分析，确定温度场计算的边界条件，然后进行瞬态分析。得到温度场分析的结果后，便可以进行变压器应力场的分析。

图 4 是对于干式变压器线圈浇注过程的一个仿真结果。结果显示在浇注过程中线圈的顶部升温最快，而内表面、底部次之，凸台最慢。这与通常想象的凸台部位升温最快的看法完全不同，后来通过实验也证明了这点。由于浇注过程中线圈内部的树脂在凝胶以前都处于液态，所以此阶段不会产生因内应力引起的开裂等缺陷。

仿真研究表明固化阶段线圈温度不停上升，凸台处的温度始终处于最高，外层凸台温度和线圈内表面最大相差 14 ℃，说明此处容易出现裂缝、白斑等现象。图 5 为线圈某对称点的固化过程及温差比较图。从图中可以看出，排除结构和温升控制方面的因素，结构对称点之间仍然存在着较大的内部温度

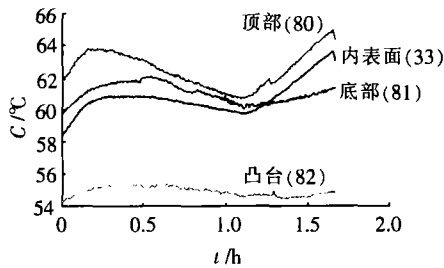


图4 SC9-30 浇注温度场仿真结果图

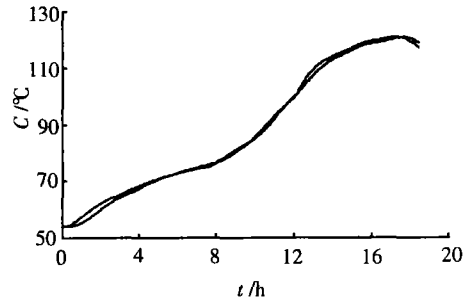


图6 某处固化温度实验仿真对照图

差异,且在 2 h 和 12 h 时温差最大,这说明固化时的摆放位置对固化也有较大的影响。冷却过程仿真表明干式变压器线圈在开始时的温度下降较快,而在 4 h 后下降就较为平缓了,显示了合适的切割时机应在 4 h 以后。

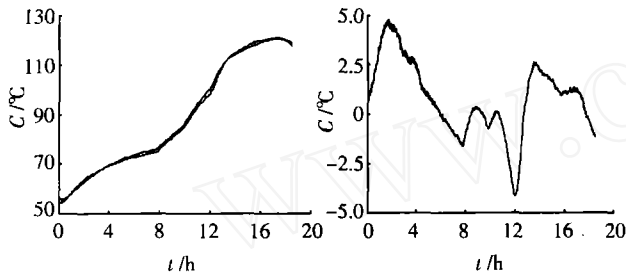


图5 对称点固化过程及温差比较图

为了验证温度场和应力场仿真的有效性,利用热电偶对同型号的干式变压器浇注、固化、冷却过程作了温度场实验,以和仿真结果相对照。多路温度采集处理系统主要实现线圈浇注、凝胶、固化过程中温度的采集并存储。该系统的结构设计采用模块化方法,主要分为传感器阵列、信号调理电路、电源模块、数据采集模块、通讯控制和上位机处理等功能模块。图 6 是 SC9-30 线圈某点固化过程的温度场仿真和实际测试的效果对照图。从图中可以看出,二者整个固化过程非常接近,相差最大处不超过 5°,考虑到固化时间几乎长达 20h,这个结果应该说相当不错了。

4 结语

笔者利用计算机仿真技术模拟线圈在浇注、固化、冷却、运行等状态下的温度场和内部应力场变化,从而研究环氧树脂干式线圈开裂产生的原因及相关防止措施,提高干式变压器的性能和寿命。仿真

分析表明,在不改变现有物料系统的基础上,选择合适的线圈设计结构、固化温度曲线、固化时间长度是减少开裂等缺陷产生的最主要措施。如何进一步完善仿真系统并提高仿真精度,是该课题下一步要研究的内容。

参考文献

- [1] GRADY W, CHAN R, SAMOTYJ M, et al. A PC-based Computer Program for Teaching the Design and Analysis of Dry-type Transformers[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1992, 7(2): 709-717.
- [2] LINDEN W. Thermal Considerations in Specifying Dry-type Transformers[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1994, 30(4): 1090-1098.
- [3] KULKARNI N, JEELANI S, CARLSSON L. Fatigue Failure Mechanism and Crack Growth in Foam Core Sandwich Composites under Flexural Loading [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2004, 23(1): 83-94.
- [4] 王德中. 环氧树脂生产与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [5] OTA N, HAMA O T. Outgassing Characteristics of Electroless Plated Epoxy Resin [J]. Journal of the Vacuum Society of Japan, 2002, 45(3): 142-144.
- [6] 曾庆赣. 树脂浇注干式变压器和电抗器 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [7] HALLER V, WELSCH A. Thermal Modeling of Enclosed Cast Resin Transformers [J]. Elektrizitaetswirtschaft, 1998, 97(10): 39-45.
- [8] PRABU A, ALAGAR M. Mechanical and Thermal Studies of Intercross-linked Networks Based on Siliconized Polyurethane-epoxy/unsaturated Polyester Coatings [J]. Progress in Organic Coatings, 2004, 49(3): 236-243.

《日本高压开关设备技术发展新动态》简介

简 讯

西安高压电器研究所翻译出版的《日本高压开关设备技术发展新动态》一书,详细介绍了日本为满足发展中的电力系统对高电压、大容量、高可靠性及低成本的电力设备的需求,最近两年来在高压开关设备领域中所作的研究和取得的成果。该书从设计技术、试验及检测技术、维护及诊断技术、选相控制技术、替代气体研究等 5 个方面做了介绍。

该文集由西安高压电器研究所有限责任公司信息室编译,联系电话:029-84225623。