

文章编号:1001-1609(2003)02-0001-03

研究与分析

基于有限元方法的电缆变压器绕组的热路模型研究

傅晨钊¹, 汲胜昌¹, 王世山¹, 李彦明¹, 颜惠宇²

(1.西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2.西北电力职工培训中心, 陕西 西安 710054)

STUDY OF THERMAL CIRCUIT MODEL FOR THE CABLE TRANSFORMER COIL BASED ON FINITE ELEMENT METHOD

FU Chen-zhao¹, JI Sheng-chang¹, WANG Shi-shan¹, LI Yan-ming¹, YAN Hui-yu²

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Northwest Electric Power Staff University, Xi'an 710054, China)

摘要: 对一个电缆变压器的绕组,通过求解有限元方程,得到其温度场和热气流场的分布。在此基础上,建立其分布参数的热路模型。利用该模型经修正后求解了不同负载条件下绕组的温度分布,并将有限元法计算值和实测值进行了比较,证明了模型的正确性。这种方法为研究该类变压器的温度特性提供了方便。

关键词: 电缆变压器; 温度场; 有限元法; 热路模型

中图分类号: TM83

文献标识码: A

Abstract: In this paper, the distributions of the temperature and flow field are derived for a cable transformer coil by solving the finite element equations. Based on this, the thermal circuit model with distribution parameters is built up. The temperature distribution is provided by using this model corresponding to various loads. The model is also proved to be valid through the comparison between the calculation results and the measurement results. The study provides a feasible way to investigate the temperature characteristics for the cable transformer.

Key words: cable transformer; temperature field; finite element method; thermal circuit model

1 引言

新型干式电缆变压器^[1]利用XLPE电力电缆制作变压器绕组,省却了传统油浸变压器的绝缘油和外金属油箱。显著优点是具有更高的安全性和对环境的保护。但与传统油浸变压器相比,其散热性能会受到一定影响,进而影响绕组机械强度、绝缘老化速度、绝缘寿命等。因此,通过对该类变压器绕组的发热和散热进行研究,掌握其内部温度分布,对进一步研究该类变压器具有重要意义。

传统方法中计算油浸变压器绕组温升的公式是

通过大量试验数据总结得到的。对电缆变压器而言,缺乏足够的试验数据,目前还不能得出相应的经验公式。应用传热学和流体力学的原理建立绕组的温度场和附近热气流场的有限元方程,可求出各点的温度和气流状况,从而得到整个绕组的温度场和热气流场的分布,但该方法较为繁琐费时,不便于实际应用。

在通过求解有限元方程得到温度分布的基础上,建立绕组分布参数的热路模型,利用该模型经修正后可求解不同负载条件下绕组的温度分布。

2 绕组的有限元模型及计算结果

2.1 绕组温度场的有限元模型

制作了一个绕组的物理模型,其中心为直径400mm的环氧筒;电缆轴向每层46匝,径向共14层,层间有10mm的间距用于散热。很显然,绕组温度场和热气流场为轴对称分布,可建立二维有限元模型,见图1。边界 L_1 为对称轴, $L_2 \sim L_4$ 表示远处边界。

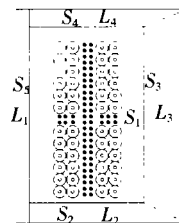


图1 绕组温度场有限元模型

有限元模型的剖分效果直接影响到计算的精度和效率。剖分单元的数量多少并不等同于计算精度的高低。在同样的数量下,考虑到流动边界层的影响,应对绕组附近和气流的出口、入口进行加密剖分,充分体现对流传热的特点,即对面积 S_1 加密剖分,对 $S_2 \sim S_4$ 可适当稀疏剖分。

收稿日期:2002-10-07; 修回日期:2002-12-12

2.2 求解的微分方程和边界条件

绕组的热源主要是线芯的直流电阻损耗和涡流损耗。绕组的散热主要包括电缆、环氧筒对外界空间的辐射散热和电缆、环氧筒与外界空气的对流散热。故必须将绕组温度场问题和热气流场问题联立起来。为简化起见,计算中忽略环氧筒,它所带来的影响可通过适当降低绕组最内层的黑度来补偿。

首先进行4点假设:①XLPE绝缘和绝缘外半导体层的物理特性恒定,可将两者看作一均质材料(以下简称材料XLPE);②外界远离绕组处的空气温度恒定;③绕组线芯发热均匀;④除密度外,空气的物理特性保持恒定。

分析空气的流动和散热,其温度和速度受质量传递、动量传递和能量传递的共同支配,如下列方程组所描述^[2]。连续性方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

x, y 方向的动量微分方程分别为:

$$\begin{cases} \rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) \\ \rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}) = F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}) \end{cases} \quad (2)$$

能量微分方程为:

$$\rho c_p (u \frac{\partial t}{\partial x} + v \frac{\partial t}{\partial y}) = \lambda_1 (\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2}) \quad (3)$$

其中, u, v 为单位体积气流沿 x 和 y 方向的速度分量, ρ 为空气的密度, c_p 为空气的比热, λ_1 为空气的导热系数, t 为单元体积空气的温度, p 为单元体积空气的压强, F_x, F_y 为单元体积空气所受到的 x 和 y 方向上的力的分量, μ 为空气绝对黏度。

将温度场和热气流场问题联立迭代求解,边界条件由各自的边界条件共同组成,见式(4)~(9)。

$$t = t_a \quad (4)$$

$$-\lambda_2 (\frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial t}{\partial y}) = q \quad (5)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \quad (6)$$

$$u_0 = 0 \quad (7)$$

$$p = p_0 \quad (8)$$

$$v = 0, u = 0 \quad (9)$$

其中,式(4)~(6)为温度场边界条件。式(4)表示离绕组较远处(图1中 L_3 和 L_2)温度恒定为 t_a ; λ_2 为XLPE的导热系数, q 为绕组线芯的生热率(由负载电流得到)。式(5)表示电缆内部的热量传递。式(6)表示绕组外层的黑度为 ε_1 ,对内层和外层绕组 ε_1 不同,可通过试验与数值计算的反复比较得到。式(7)~(9)为流场边界条件,式(7)表示对称轴

L_1 上的 x 方向速度分量 u_0 为0;式(8)表示出口(图1中 L_4)相对压强 p_0 为0;式(9)表示静止壁面表面(固体与热气流接触处)的单元体积气流沿 x 和 y 方向上的速度分量 u, v 为0。

2.3 计算结果

将边界条件离散后,带入由式(1),(2),(3)转化而成的变分问题,采用交叉迭代法求解,得到整个绕组温度场的分布,结果如图2所示(为清楚起见,只选图1中 S_1 部分)。

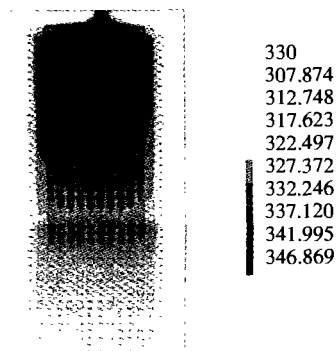


图2 绕组温度场图

图2中明暗代表温度的高低,温度单位为绝对温度K。可以看出,整个绕组的温度分布不均匀。上部温度较高,最高温度位于整个绕组的上半部分,且靠近轴线 L_1 ,其值为346.9K。对电缆变压器而言,若温度超过XLPE的软化温度,绕组机械强度要降低,因此其机械设计的温度上限为363K,连续负载的温度上限为343K。在这些温度下,XLPE电缆的老化均可忽略不计。计算结果表明,在通过负载电流的情况下,最高点温度稍高于文[1]所推荐的连续负载电流的温度上限。适当调整电流值或增加强制通风散热后,即可满足最高点温度小于连续负载温度上限的要求。

3 绕组的热路模型

绕组热特性的讨论,本质上是讨论热流场问题。热流场中各种物理量完全可以与恒定电流场相对应。因此,可借助电流场的分析方法来建立热路模型,讨论热流场问题,其中电位对应于温度,电流对应于热流,电阻对应于热阻^[4,5]。

3.1 单匝电缆的热路模型

电缆的热源为恒定热流源 I ,热流幅值为:

$$I = \rho \cdot V \quad (10)$$

式中: ρ 为体生热率, V 为电缆芯线体积;电缆芯线向电缆外皮的传导热阻 R_c 为固定热阻:

$$R_c = \frac{\rho_r}{2\pi l} \ln \frac{R}{r_c} \quad (11)$$

式中： ρ_r 为XLPE的热阻系数， l 为电缆长度， R 为电缆外径， r_c 为电缆内径；电缆向外界空间的辐射热阻 R_d 为可变热阻：

$$R_d = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{T_i - T_a}{\varepsilon C_0 (T_i^4 - T_a^4) A} = \frac{l}{\varepsilon C_0 (T_i^2 - T_a^2) (T_i - T_a) A} \quad (12)$$

式中： ε 为绕组黑度， C_0 为辐射系数， T_i 为外皮绝对温度， T_a 为外界空气绝对温度， A 为外皮辐射面积；电缆向左右两侧气道对流换热的对流热阻 R_{c1}, R_{c2} 为可变热阻，其值受多种因素影响，可由有限元计算结果推出，如图3所示。

$$R_{c1} = \frac{\Delta T}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{Q_1} \quad (13)$$

式中： T_1, T_2 分别为电缆外皮和左侧气道中心温度， Q_1 为通过电缆外皮向左侧气道散热量的总和，同理可得 R_{c2} 。电缆向上下相邻电缆传导换热的热阻 R_{k1}, R_{k2} ，由于接触面积积极小，其阻值远大于 R_s, R_{c1}, R_{c2} ，实际计算中可视为断路。接地表示外界环境温度。

根据上述分析，可建立单匝电缆的热路模型，如图4所示。

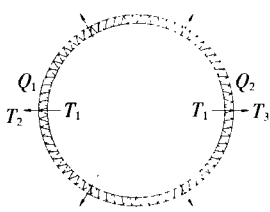


图3 对流热阻计算

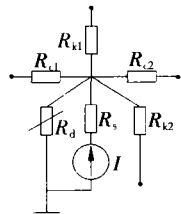


图4 单匝电缆的热路模型

3.2 气道热路模型

与对流换热热阻的计算相似，气道的热阻也是各节点间的温差和流过热流的比值。但因为空气受热导致密度降低，从而向上运动，热量流向温度较高处，所以气道的热阻为负值。

3.3 绕组的热路模型

将单匝电缆的热路模型与气道热路模型综合起来，即形成整个绕组的热路模型。图5所示为局部单元，由两匝电缆的热路模型与它们之间气道的热路模型共同组成，整个模型由许多这样的单元组成。其中，电缆向左右两侧气道对流换热的热阻 R_{c1}, R_{c2} 与气道的热阻 R_{q1}, R_{q2} 受多种因素的影响，负载电流和空气流动的变化直接影响到它们的大小。因此，为准确求解绕组的温度分布，可依据条件变化对热阻进行修正。以负载电流的变化为例：①确定负载电流变化的范围；②在该范围内选取若干点，利用有限元法，求出不同负载电流条件下的绕组热路模型；③拟

合不同条件下各点的对流换热热阻和气道的热阻，形成它们随负载电流变化的曲线；④确定所要计算的负

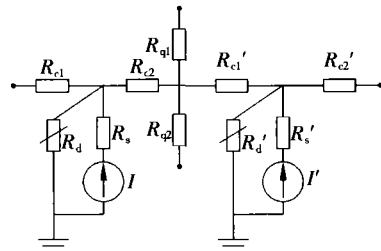


图5 绕组热路模型单元

载电流，通过曲线求得各节点的对流换热热阻和气道的热阻，最终形成该负载电流条件下的热路模型。

3.4 模型的求解

由各节点热阻方程构成的方程组是非线性方程组，可采用线性化的牛顿-拉夫逊(N-R)迭代法求解，对非线性热阻的温升-热流特性在前一次迭代所得的工作点处予以线性化，得到本次迭代下的该热阻N-R友模型，用它替代非线性热阻，形成本次迭代下热路的N-R友网络，求得迭代解。友网络是线性热路，故可用高斯消去法求解其方程。从非线性热阻的初值工作点开始，逐次迭代求解对应的N-R线性友网络，收敛后即得非线性热路的数值解。

4 计算结果的比较

为验证有限元计算和热路模型模拟计算的结果，对绕组进行了温升试验，在绕组上安置了10个温度传感器，传感器尽量靠近气隙内侧绕组表面，可认为测量值为绕组表面温度，传感器位置分布如图6所示，其中1表示由内向外数第1个绕组，⑦表示第7个传感器，①,②测温点在距绝缘筒上端的1/2高度处，③,④,⑤,⑥测温点在距绝缘筒上端的1/3高度处，⑦,⑧,⑨,⑩测温点在距绝缘筒上端的2/3高度处。通过这些传感器，可得到所在位置的瞬时温度值。当10个瞬时温度值的变化均小于0.2K时，认为发热与散热达到热平衡，温度分布不随时间变化，此刻的瞬时温度值认为是稳态温度值，其与有限元计算和热路模型模拟计算结果的比较，如表1所示。

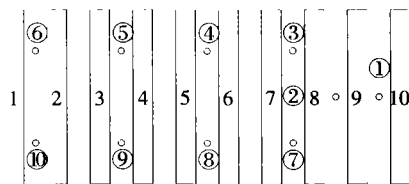


图6 传感器位置图

结果表明，三者基本相符，证明了(下转第6页)

采用频域窄带滤波法^[3]来滤除窄带干扰,如图 1(f)中的信号处理后,信噪比由 22 dB 提高到 31 dB。

实测数据表明,绝大多数检测到的局部放电声信号中,干扰的带宽较宽,性质基本近似于白噪声。因此,简单地采用频域窄带滤波或时域多通带滤波不能对检测到的信号产生明显影响。新发展起来的小波分析技术具有局部时-频域分析能力,能够比较好地抑制白噪声干扰^[4]。

图 2 所示是局部放电声发射初始信号,以及经 7 层小波分解降噪后的信号。小波降噪的效果与基函数以及阈值选取等有关,对电力电容器局部放电声发射信号来说,Haar 小波具有较好的降噪能力。

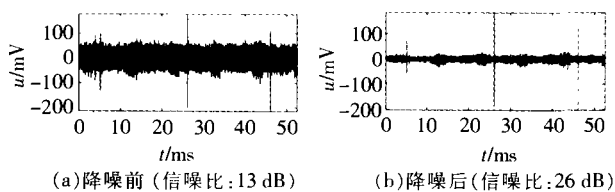


图 2 某局部放电声信号波形采用 Haar 小波降噪前后的波形图

5 结论

(1) 通过现场的电力电容器局放试验和实验室内的模型试验发现,不同类型的局部放电声信号都有自己的特点。因此,可以采用波形特征和频谱特征

来区分各类局部放电。从波形上来区分,电力电容器局部放电声信号大致可以分为 3 类,分别为单脉冲信号、多脉冲信号和脉冲群信号。

(2) 通过对数据的干扰分析和抑制研究表明:窄带滤波能够有效地除去窄带干扰,因而有一定的降噪能力。小波降噪能够比较好地除去各种“白噪声”,因此有很好的除噪效果。对于电力电容器的局部放电声信号,Haar 小波有比较好的降噪能力。

参考文献:

- [1] L Ghirelli, W Koltunowicz, A Pigin, et al. Acoustical Method for Partial Discharge Detection in High Power Capacitors [A]. IEE Conference Publication, Proceedings of the International Conference on Partial Discharge[C], 1993.
- [2] 高胜友, 张 蕾, 谈克雄. 等. 电力电容器局部放电微机化声发射检测装置[J]. 高电压技术, 2001, 27(4): 1-2, 5.
- [3] U Kopf, K Feser. Rejection of Narrow-band Noise and Repetitive Pulses in On-site PD Measurements [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(6): 1180-1191.
- [4] K Arai, M Shibahara, M Fujii. Separation of Noise from Partial Discharge Signals by Wavelet[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials[C], 1997.

作者简介: 虞苍璧(1978-), 男, 江苏无锡人, 在读硕士生, 主要从事电力电容器局部放电的研究。

(上接第 3 页)

有限元计算和热路模型的正确性。

表 1 计算结果的比较

	实测值	有限元计算值	模型计算值
①	328.1	329.2	325.6
②	326.6	329.1	331.5
③	334.1	336.1	331.7
④	333.8	336.0	335.4
⑤	330.5	332.7	333.7
⑥	322.6	320.2	318.9
⑦	320.6	321.0	323.2
⑧	313.7	316.1	315.1
⑨	315.3	316.2	318.3
⑩	314.6	313.7	315.9

5 结论

在通过求解有限元方程得到温度分布的基础上, 可得到绕组对流换热的热阻, 结合传热学中辐

射热阻和传导热阻的解析表达, 可分别得到单匝电缆和气道的热路模型, 将两者结合起来即可建立绕组分布参数的热路模型。该方法为研究这类问题提供了方便。

参考文献:

- [1] M Leijon, et al. A Recent Development in the Electrical Insulation Systems of Generators and Transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2001, 17(3): 10-15.
- [2] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [3] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [4] 程尚模. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [5] G Swift, et al. A Fundamental Approach to Transformer Thermal Modeling I. Theory and Equivalent Circuit[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(2): 171-175.

作者简介: 傅晨钊(1975-), 男, 河南郑州人, 博士生, 主要从事新型变压器的研制开发。

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!