

文章编号: 1000-582X(2012)05-069-07

# 基于顶层油温的变压器绕组热点温度计算改进模型

陈伟根<sup>1</sup>, 苏小平<sup>1,2</sup>, 周 渠<sup>1</sup>, 潘 翀<sup>2</sup>, 谢 波<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 成都电业局, 四川成都 610017)

**摘 要:** 油浸式电力变压器绕组热点温度是影响变压器绝缘寿命的重要参量, 与变压器顶层油温密切相关。考虑非线性热阻-变压器断路阻抗、油粘滞度以及绕组损耗随温度的变化, 引入粘滞度与损耗关于温度变化的修正因子, 提出一种基于顶层油温的变压器绕组热点温度改进模型。模型参数选用 Levenberg-Marquardt 算法进行估算。对比实验室温升用试验变压器实测数据, 该模型在欠负载(90%)、额定负载(100%)以及过负载(110%)下, 显示了较好的一致性, 特别在动态负载下, 能够较好地描述各暂态温度变化情况, 为变压器绕组热点温度计算提出了一种新方法。

**关键词:** 电力变压器; 绕组损耗; 顶层油温; 热点温度; Levenberg-Marquardt 算法

**中图分类号:** TM41

**文献标志码:** A

## An improved dynamic model of transformer hot spot temperature based on top oil temperature

CHEN Wei-gen<sup>1</sup>, SU Xiao-ping<sup>1,2</sup>, ZHOU Qu<sup>1</sup>, PAN Chong<sup>2</sup>, XIE Bo<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Chengdu Power Supply Company, Chengdu 610017, P. R. China)

**Abstract:** The winding hot spot temperature of the oil-immersed power transformer is an important parameter. It has a great influence on the transformer insulation aging and a close relationship with the transformer top oil temperature. The changes of non-linear thermal resistance, open-circuit impedance, and oil viscosity and winding losses with temperature are also taken into account. An improved model added on the transformer top oil temperature to calculate transformer winding hot-spot temperature by using the viscosity and loss correction factors is proposed. Model parameters are estimated by Levenberg-Marquardt method. In the end, by comparing with the measured data tested under different conditions, the model shows good consistency under underload (90%), rated load (100%) and overload (110%) conditions respectively, and describes the temperature variation more accurately in the dynamic loading profiles.

**Key words:** power transformer; winding losses; top-oil temperature; hot-spot temperature; Levenberg-Marquardt method

收稿日期: 2011-12-10

基金项目: 国家创新研究群体基金资助项目(51021005); 国家重点基础研究发展计划资助项目(973 计划)(2009CB724506)

作者简介: 陈伟根(1967-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事电气设备在线智能监测及诊断技术研究, (E-mail) weigench@cqu.edu.cn.

精确预测电力变压器的顶层油温和热点温度对提高变压器的运行效率至关重要,相比传统方法对于此两种热特征量的保守估计,运用适当的动态模型预测顶层油温和热点温度,在精确可靠的前提下,将温升限制提高 2% 到 3% 都将带来巨大的经济效益。此外,准确有效地预测电力变压器的顶层油温和热点温度,在运行故障发生时,对制定经济有效的应对措施具有重要作用。

电力变压器的热点产生机理异常复杂,且具有不确定性。与组成变压器的各几何结构(如绕组、铁芯、油流通道以及散热系统结构)和材料物理属性(如密度、热导、粘滞度)密切相关<sup>[1-4]</sup>。对绕组热点进行预测和测量至今仍是研究热点和难点。传统方法可以分为以下几种:对于设计制造中的变压器,基于变压器的制造和运行经验,在热点可能出现的地方置入温度传感器,便于在热测试和运行状况下对绕组热点进行监测<sup>[5-10]</sup>;对于业已运行中的电力变压器,考虑到后期置入传感器的复杂程度以及经济耗费,采取基于变压器各种易测得的特征量(如油面温度、底油温度、环境温度以及负载电流等)对绕组热点温度进行预测。如工程上广泛应用的标准导则规定了稳态情况下的自然油循环冷却变压器,任一负载下的最终热点温度等于环境温度、顶层油温升和热点温度对顶层油温的梯度三者之和<sup>[11-12]</sup>;Swift 等人基于传热学,引入集总热容和非线性热阻的概念,建立了顶层油温的热电类比模型,并对绕组热点温度进行了预测<sup>[13-15]</sup>。此外,Pradhan 将绕组简化为简单的几何结构,通过求解一组热传导方程,得出绕组温度分布的近似解析解<sup>[1]</sup>,但是这类几何模型非常简化,而且没有考虑变压器铁芯以及绕组物理属性的各向异性。尽管热电类比方法和基于解析几何与数值模型的方法为热点温度预测开辟了新的思路,但进一步探索和寻求更加准确有效的热点温度预测模型很有必要。

笔者通过分析变压器的损耗与发热机理,考虑绕组损耗以及变压器油粘滞度随温度的变化,引入粘滞度与损耗关于温度变化的修正因子,提出一种基于顶层油温的变压器绕组热点温度改进模型。模型参数选用 Levenberg-Marquardt 算法<sup>[16-18]</sup>进行估算,并与实验室 100 kVA/5 kV 试验变压器热特征量的实测数据对比验证,结果表明:该模型在欠负载、额定负载以及过负载下,均与实测结果吻合得很好,特别在动态负载下,能够较好地描述各暂态温度变化情况,为变压器绕组热点温度预测提出了一种新方法。

## 1 电力变压器动态热模型

### 1.1 变压器损耗与发热机理

电力变压器损耗包括空载损耗(又称铁损)和负载损耗(又称铜损),空载损耗由存在于铁芯中的磁滞损耗和涡流损耗构成,负载损耗由绕组导线中的电阻损耗,涡流损耗以及变压器夹件、油箱等结构中的杂散损耗构成。在变压器内部,铁芯外包有套筒,将铁芯油道与绕组油道隔开,因此负载损耗是造成绕组温度升高的最主要原因。

$$P_T = P_C + P_{LL}, \quad (1)$$

式中: $P_T$  为变压器的总损耗; $P_C$  为空载损耗; $P_{LL}$  为负载损耗,可以表示为

$$\begin{cases} P_C = \delta_h f B_m^2 + \delta_c f^2 B_m^2, \\ P_{LL} = I^2 R + P_{SL} + P_{EL}, \end{cases} \quad (2)$$

其中  $I^2 R$  为绕组导线的电阻损耗,由负载电流和绕组的直流电阻决定; $P_{SL}$  和  $P_{EL}$  分别为绕组中的杂散损耗和涡流损耗。迄今为止,并没有较好的方法单独计算绕组中的杂散损耗或涡流损耗,常用方法是在变压器的阻抗测试中,由变压器的总损耗与电阻损耗相减,得到杂散损耗与涡流损耗之和。涡流损耗和杂散损耗的计算往往运用对直流损耗的经验百分比甚至利用公式计算<sup>[19]</sup>:

$$P_{EL} = P_{EL,R} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[ \frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2, \quad (3)$$

$$P_{SL} = P_{SL,R} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[ \frac{I_h}{I_R} \right]^2 h. \quad (4)$$

绕组导线中的电阻损耗和涡流损耗产生的热量直接作用于绕组,直接引起变压器绕组温度的升高。当变压器运行中负载发生变化时,流经绕组中的电流发生变化,当绕组电流增大时,绕组的电阻损耗和涡流损耗增加,造成绕组热点温度的升高,而此时铁芯损耗产生的热量由于磁通饱和的原因基本不会增大。在油循环过程中,铁芯散热油道并不与绕组的散热油道直接相连,流经铁芯散热油道的热油首先会进入变压器油箱顶部,使顶油温度升高,然后进入散热器循环才会进入到绕组的散热油道,因此铁芯损耗产生的热量对顶油温升会产生直接的影响,对绕组热点温度不产生直接影响,绕组导线中的电阻损耗和涡流损耗产生的热量才是产生绕组热点温升的直接原因。

### 1.2 顶层油温方程

建立在热电类比和传热理论基础上的变压器热模型可以计算出变压器顶层油温和绕组热点温度。IEEE/ANSI C57.115 标准提出变压器顶层油温相

对于环境温度的温升指数模型<sup>[10]</sup>,认为顶层油温的变化是由负载条件和环境温度的变化所引起,如无特殊说明,文中以 $\vartheta$ 表示温度增量,而 $\theta$ 表示温度值,根据其指数方程推出其微分方程如下:

$$\vartheta_{oil,u} = \tau_{oil,R} \frac{d\vartheta_{oil}}{dt} + \vartheta_{oil}, \quad (5)$$

$$\vartheta_{oil,u} = \vartheta_{oil,R} \cdot \left( \frac{K^2 \cdot R + 1}{R + 1} \right)^n, \quad (6)$$

$$\vartheta_{top} = \vartheta_{oil} + \theta_{amb}, \quad (7)$$

其中 $\vartheta_{oil,u}$ 为负载下的最终顶层油温对于环境温度的温升; $\vartheta_{oil,R}$ 为额定负载下的顶层油温升,该变压器顶层油温升模型采用一阶导数模型,然而,此模型方程未能准确反映环境温度变化对顶层油温变化的动态影响,其在在线监测系统中的应用中存在局限性。因此,文献[13]通过引入变压器冷却系统中的两个重要热参数即热容和热导,提出一种由热路模型给出的顶层油温模型,顶层油温可由以下差分方程控制:

$$\frac{K^2 R + 1}{R + 1} (\vartheta_{oil,R})^{\frac{1}{n}} = \tau_{oil,R} \frac{d\vartheta_{oil}}{dt} + (\theta_{oil} - \theta_{amb})^{\frac{1}{n}}, \quad (8)$$

$$D\theta_{oil} = \frac{Dt}{\tau_{oil,R}} \left[ \frac{K^2 R + 1}{R + 1} (\vartheta_{oil,R})^{\frac{1}{n}} - (\theta_{oil} - \theta_{amb})^{\frac{1}{n}} \right], \quad (9)$$

式中 $D$ 为差分算子,代表方程迭代过程中,每一时间步长下顶层油温的微小变量。其中, $K$ 为负载因数,系负载电流 $I$ 与额定电流 $I_{rated}$ 的比值,即 $K = I/I_{rated}$ ;  $\tau_{oil,R}$ 为额定变压器油时间常数; $\vartheta_{oil,R}$ 为额定的顶层油温升值; $R$ 为额定负载损耗与空载损耗之比,一般以铜损 $q_{Cu}$ 与铁损 $q_{Fe}$ 的比值表示: $q_{Cu}/q_{Fe}$ ;  $n$ 为常数,取决于油循环是层流或湍流,在不同的油循环情况下取值不同。

### 1.3 基于顶层油温的绕组热温度计算改进模型

电力变压器绕组热点温度作为衡量绕组设计优劣和影响绝缘寿命的重要参量,与变压器顶层油温密切相关,可以通过环境温度和现场运行负载参量预测的顶层油温计算求得。变压器绕组热点温度是绕组最热区域内达到的温度,是变压器负载关键的限制因数之一。类似于Swift热电类比模型,认为变压器绕组损耗为理想热源,将顶层油温类比于前述模型中的环境温度,为理想温度源,非线性热阻由经典热传递理论给出:

$$R_{th,hs} = \frac{1}{h \cdot A} = \frac{\vartheta_{hs}}{q_{Cu}}. \quad (10)$$

另外,根据传热理论,可得传热系数 $h$ :

$$h = \frac{C \times k}{L} \cdot \left[ \left( \frac{c_p \cdot \mu}{k} \right) \cdot \left( \frac{L^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot \vartheta_{hs}}{\mu^2} \right) \right]^n$$

$$= C_1 \cdot \left( \frac{\vartheta_{hs}}{\mu} \right)^n, \quad (11)$$

式中: $L$ 为特性尺度、长度、宽度或直径; $g$ 为当地重力加速度; $k$ 为油热导率; $\rho$ 为油密度; $\beta$ 为油热膨胀系数; $\vartheta$ 为油温度梯度; $\mu$ 为油的动力黏度。由于油黏度随温度的变化剧烈程度远强于其他物理参数( $\rho, \beta, k$ )随温度的变化程度,因此,变压器油的其他物理属性可用常数代替。定义油黏度 $\mu$ 为额定值 $\mu_\gamma$ 与变化量 $\mu_{pu}$ 之积:

$$\mu_{pu} = \frac{\mu}{\mu_\gamma} = \frac{1.3573 \times 10e - 6 \times e^{279.73/(\vartheta_{oil} + 273)}}{1.3573 \times 10e - 6 \times e^{279.73/(\vartheta_{oil,R} + 273)}} = e^{\left[ \frac{279.73}{\vartheta_{oil} + 273} - \frac{279.73}{\vartheta_{oil,R} + 273} \right]}, \quad (12)$$

热点温度至顶层油温度的非线性热阻可以表示为

$$R_{th,hs,R} = \frac{1}{C_1 \cdot A} \left( \frac{\mu_R}{\vartheta_{hs,R}} \right)^n. \quad (13)$$

其中,额定热点温度对顶层油温的梯度具有如下关系( $g_r$ 为额定条件下平均绕组温度与平均油温之差, $H$ 为热点因子):

$$\vartheta_{hs,R} = R_{th,hs,R} = H \times g_r. \quad (14)$$

同时考虑到绕组损耗随温度的变化关系,由于阻抗的原因,绕组直流损耗随温度上升单调增加,而涡流损耗随温度变化的关系完全相反(其中 $\theta_\Delta = 235$ ,为温度校正因子):

$$P_{w,pu}(\theta_{hs}) = P_{DC,pu} \times \left( \frac{\vartheta_{hs} + \theta_\Delta}{\vartheta_{hs,R} + \theta_\Delta} \right) + P_{EL,pu} \times \left( \frac{\vartheta_{hs,R} + \theta_\Delta}{\vartheta_{hs} + \theta_\Delta} \right). \quad (15)$$

联立式(10)-(15),可得热点温升模型的控制方程如下:

$$\{I^2 \times P_{w,pu}(\theta_{hs})\} (\mu_{pu} \cdot \vartheta_{hs,R})^{\frac{1-n}{n}} = (\theta_{hs} - \theta_{oil})^{\frac{1}{n}} + \tau_{hs,R} (\mu_{pu} \cdot \vartheta_{hs,R})^{\frac{1-n}{n}} \frac{d\theta_{hs}}{dt}, \quad (16)$$

$$\tau_{hs,R} = R_{th,hs,R} \times C_{th,hs}, \quad (17)$$

式中: $\tau_{hs,R}$ 为变压器绕组时间常数; $\theta_{hs}$ 为热点对顶层油温升; $\vartheta_{hs,R}$ 为额定热点对顶层油温升; $m$ 为经验指数,在不同冷却形式下取值不同,表明电阻和油黏度变化的影响。

### 1.4 参数计算

鉴于实际工程应用中的模型大都是非线性的,而Levenberg-Marquardt算法(L-M算法)<sup>[16-18]</sup>作为最有效的非线性模型参数估值的方法之一,通过寻求多变量函数的最小值进行迭代,其有效结合了最速下降法和Gauss-Newton法(G-N算法)的优点,又具有类似于神经网络的特点。笔者采用L-M算法对式(17)描述的绕组热点温度控制方程中的参数

$(\vartheta_{hs,R}, \tau_{hs,R}, m)$  进行最优估计, 令  $\hat{x}$  为绕组热点温度方程中的观测值, 即绕组热点温度的估计值, 而以  $x = (x_1, x_2, x_i, \dots, x_n)$  表示绕组热点温度的实测值。100 kVA 试验测温平台每 4 min 采样一次, 每次实验连续记录 10 h 变压器特征温度以及负载信息和环境信息数据, 对于迭代的各个变量, 分析数据包含总计  $(60/4 \times 10 = 150)$  个数据点。因此实测温度  $x$  中  $n = 150$ 。此外,  $\|\cdot\|$  和  $\|\cdot\|_\infty$  分别表示二范数和无穷范数。令  $f$  描绘参数矢量  $\mathbf{p} = (\vartheta_{hs,R}, \tau_{hs,R}, m)^T, \mathbf{p} \in R^m$  与估计的观测矢量  $\hat{\mathbf{x}} = f(x_i, \mathbf{p}), \hat{\mathbf{x}} \in R^n$  之间的函数关系。文中的最优化参数问题化为利用已知的实测值  $x$  与估计的初始化参数  $p_0$  寻求最适应函数  $f$  的矢量  $\mathbf{p}^+$ , 即最小化欧式距离  $\epsilon^T \epsilon, \epsilon = x - \hat{x}$ 。L-M 算法的基本思想是对函数  $f$  在  $\mathbf{p}$  的领域内做线性近似, 对于一个小量  $\|\delta_p\|$ , 作泰勒级数展开:

$$f(x_i, \mathbf{p} + \delta_p) \approx f(x_i, \mathbf{p}) + \mathbf{J} \delta_p, \quad (18)$$

其中  $\mathbf{J}$  为描述 Jacobi 矩阵  $\partial f(x_i, \mathbf{p}) / \partial \mathbf{p}$ 。与其他任何非线性方法一样, L-M 算法是一种迭代算法, 由初始化的  $p_0$ , 向局部最小的  $\mathbf{p}^+$  收敛, 因此迭代的每一步都需要找出  $\delta_p$  以满足如下式子最小:

$$\|x - f(\mathbf{p} + \delta_p)\| \approx \|x - f(\mathbf{p}) - \mathbf{J} \delta_p\| = \|\epsilon - \mathbf{J} \delta_p\| \quad (19)$$

寻求  $\delta_p$  的过程实为一个线性最小问题, 要满足式(19)中的最小问题, 须使得  $\mathbf{J} \delta_p$  在 Jacobi 矩阵  $\mathbf{J}$  的列空间中正交, 即  $\mathbf{J}^T (\mathbf{J} \delta_p - \epsilon) = 0$ 。所得的  $\delta_p$  正是如下规范方程的解:

$$\mathbf{J}^T \mathbf{J} \delta_p = \mathbf{J}^T \epsilon \quad (20)$$

上式左边的  $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$  近似于 Hessian 矩阵, 实际上 L-M 算法所求解的正是上式的一种变形形式, Levenberg 的贡献在于引入阻尼因子  $\lambda$  将上式变形为增广方程:

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{I}) \delta_p = \mathbf{J}^T \epsilon, \quad (21)$$

其中  $\mathbf{I}$  为单位矩阵, 实现对参数矢量  $\mathbf{p}$  添加增量  $\delta_p$ , 式子左边的  $\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{I}$  是 Hessian 矩阵  $\mathbf{H}$ , 这也是 L-M 算法又称为阻尼最小二乘方法的原因。非负的阻尼因子  $\lambda$  可以改善方程的收敛速度。同时用 Hessian 矩阵  $\mathbf{H}$  的对角矩阵代替单位矩阵  $\mathbf{I}$ , 减小计算机字长带来的累计舍入误差的影响, 可以提高计算结果的精度, 因此, L-M 算法的最终迭代表达式为

$$p_{k+1} = p_k - (\mathbf{H} + \lambda \text{diag}[\mathbf{H}])^{-1} \mathbf{J}^T \epsilon, \quad (22)$$

其中, 下标  $k$  为迭代次数;  $\text{diag}[\mathbf{H}]$  为 Hessian 矩阵  $\mathbf{H}$  的对角矩阵。上式可以看出当阻尼因子  $\lambda = 0$  时, 公式近似为二阶局部收敛的 G-N 算法, 而当  $\lambda = \infty$

时, 公式化为全局收敛的最速下降法。因此, 得到所求问题的最终解。L-M 算法的具体求解步骤如下:

1) 给定初值  $p_0, \lambda > 0, (\lambda = 1e-4), k = 0$  以及  $\xi > 0, (\xi = 1e-5)$ , 由热点温度控制方程式(17)得到  $\hat{\mathbf{x}}$ 。检查迭代终止条件是否满足式(19)最小, 若满足则终止, 否则继续;

2) 构造 Jacobi 矩阵  $\mathbf{J}$  以及 Hessian 矩阵  $\mathbf{H}$ , 求解线性方程组(22)的解  $p_{k+1} - p_k$ ;

3) 若  $\epsilon_{k+1} - \epsilon_k \geq 0$ , 则将阻尼因子增大, 返回步骤 2), 反之继续;

4) 将阻尼因子缩小, 令  $k = k + 1$ , 送入步骤 2);

5) 检验  $|p_{k+1} - p_k| < \xi$ , 若满足则终止, 并输出结果否则返回步骤 2)。

可见 L-M 算法实际上是 G-N 算法和最速下降法的综合, 迭代开始时可以先采用最速下降法提高收敛速度, 最后逐渐减小阻尼因子至 G-N 算法便得到优化后的  $\mathbf{p} = (\vartheta_{hs,R}, \tau_{hs,R}, m)^T, \mathbf{p} \in R^m$ , 通过基于变压器顶层油温的热点温度计算方程可求得各种环境温度不同负载情况下的热点温度。

## 2 模型应用及结果分析

为了验证基于顶油温度的热点温度改进模型的预测精度, 检验其能否有效计算变压器内部绕组和油区域的温度分布, 在实验室搭建的 100 kVA/5 kV 的油浸式温升用试验变压器平台上, 对变压器内部温度实行多点测量与监测。试验变压器额定高压电流为 20 A, 额定低压电流为 250 A。试验时, 将低压输出端短路, 通过改变高压端的输入电流, 模拟各种不同负载。短路温升试验由开始加压一直到温升达到稳定。温度传感器分为热电偶和光线温度传感器, 集成热电偶温度传感器的测温系统, 其采样频率可调, 选取间隔 4 min 记录一次温度。经前期大量试验表明, 不同负载下, 变压器系统内部温升发展后期直至稳态, 其温度较高区域均分布在绕组纵向上半部分。因此, 在高压绕组纵向上半部分每个线饼之间平行布置 3 个传感器, 下半部分每个线饼之间的中轴线上布置温度传感器, 用以记录高压绕组纵向各点的温度以及可能出现的绕组热点温度。同时, 为了提高测量温度的精确度, 选用光纤光栅温度传感器与热电偶结合的方式对温度进行实时监测, 在可能出现温度梯度较大的地方, 置入光纤温度传感器, 测量精度为  $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。试验平台的测温方案如表 1 所示。

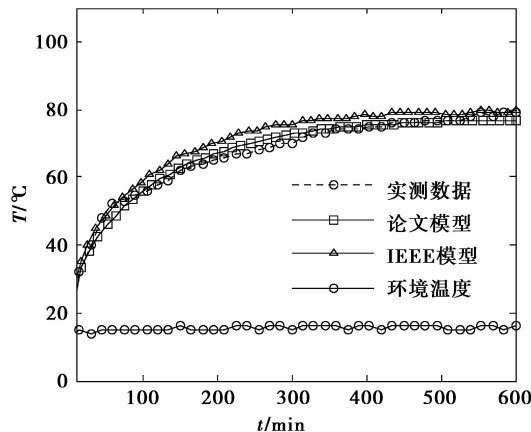
表1 测温方案

测温方案	时间/min	负载系数 K/pu
稳态 负载	0~600	0.9
	0~600	1.0
	0~600	1.1
动态 负载	0~330	1.00
	330~510	0.65
	510~570	1.35
	570~600	0

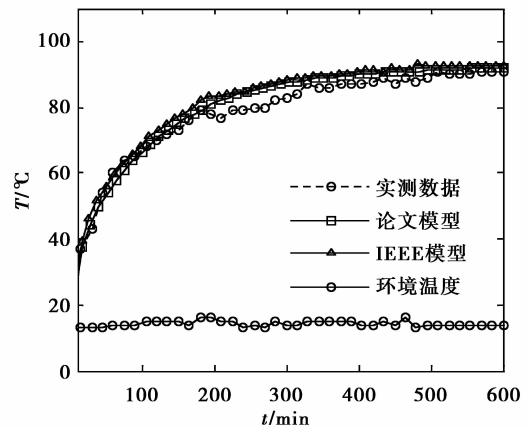
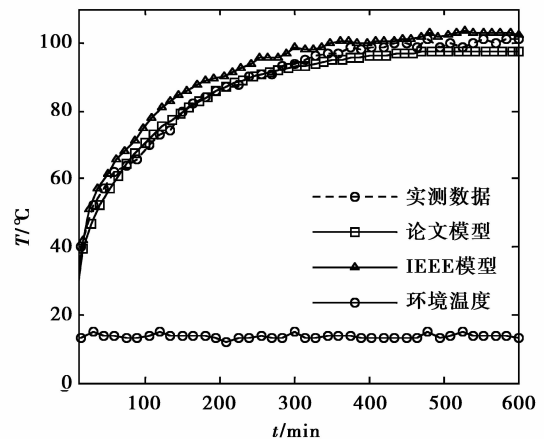
## 2.1 恒定负载情况

在通过环境温度和现场运行负载参量预测的顶层油温基础上,引入粘滞度与损耗关于温度变化的修正因子,提出一种基于顶层油温的变压器绕组热点温度改进模型。模型参数选用 Levenberg-Marquardt 方法进行估算,在欠负载(90%)、额定负载(100%)以及过负载(110%)下,分别应用该改进模型对变压器绕组热点温度进行估算。如图 1-3 分别表示改进模型在不同负载下估算结果与实测结果的对比。发现笔者模型、IEEE 导则推荐模型与实测结果具有较好的一致性。

由图 1 可以看出,在 0.9 倍负载情况下笔者模型较 IEEE 推荐指数模型能更精确地预测变压器顶层油温,说明油粘滞度和损耗的修正因子的引入,为热点温度的预测带来了积极影响,这是由于在油温梯度范围内,变压器油的粘滞度随温度变化较大,非线性热阻、热容以及热时间常数都是与之密切相关的量,在额定顶层油温已知情况下,确定在热油区域温度下,对应的油粘滞度数值大小对热点温度模型至关重要。而 IEEE 导则推荐模型因其未全面考虑油粘滞度以及损耗随温度的动态变化,其对热点温度预测的结果适应能力较弱。

图1 负载系数  $K=0.9$  时的热点温度对比

由图 2 和图 3 还可以看出,在负载系数分别为 1.0 和 1.1 时,笔者模型对变压器热点温度的预测也与实测结果吻合得较好,能够准确描述油浸式变压器各种负载下的温升特性。综合笔者模型对欠负载、额定负载以及过负载情况下的预测表现,说明基于顶层油温度的热点温度改进模型,对稳态情况下的变压器热点预测具有较强的适应能力,同时说明不能简单地将绕组损耗随温度变化带来的影响与粘滞度影响相抵消,在分析变压器的负载热特性时,应充分考虑这些因素在预测绕组热点温度时的影响。

图2 负载系数  $K=1.0$  时的热点温度图3 负载系数  $K=1.1$  时的热点温度

## 2.2 动态负载情况

鉴于运行变压器的日负载、周负载以及年负载都是动态振荡的,因此,衡量一种模型对变压器热点温度预测的精确性、连续性以及一致性,检验其在动态负载情况下的适应能力至关重要。运行变压器的动态负载方案,包含冷启动、降低负载再升高负载以及最后取消负载等过程,可以更全面地验证模型的动态适应能力,如图 4 所示为笔者改进模型的动态负载方案,图 5 为该模型在动态负载下的预测结果。

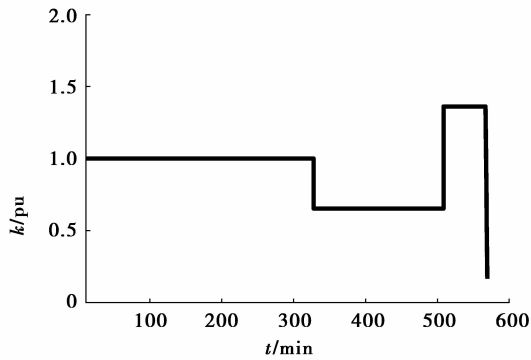


图 4 动态负载方案

图 5 可以看出,在升温初期,变压器绕组热点温度上升迅速。这是因为冷启动状态下,变压器油在初期有较低的温度,其油黏度较高,在无外力驱动情况下,油流由温差带来的热浮力和热重力驱动,相应的油循环需要一段时间才能适应其速度,即油时间常数远小于绕组时间常数,因此热点温度上升迅速,约 63% 的温度变化发生在急速上升过程中。这与 Levenberg-Marquardt 方法估算的绕组时间常数吻合。而在负载降低阶段,如图 5 中所示负载系数  $K=0.65$  阶段,由于不再处于冷启动状态,前一阶段的初始油循环速度较快,温度较高,粘滞度较小,因此表现在变压器油温度将迅速下降,加快了变压器内部绕组发热散热的平衡过程,一旦降低到最终降温的 37% 左右,油速将远远低于负载降低时的速度,温度降低速度开始放缓,绕组热点温度也缓慢降低。至负载系数突然增大到如  $K=1.35$  阶段所示,绕组热点温度具有的短时间常数,使得热点温度迅速升高。最后取消负载时,由于前一阶段时间持续较短,油流还没有充分发展,因此容易出现过冲现象。

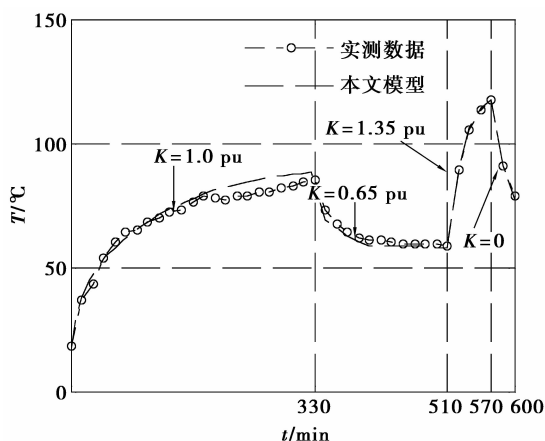


图 5 动态负载时的热点温度对比

此外基于 Levenberg-Marquardt 方法估算的控

制方程参数有可能出现数学上的真根,而不符合实际的情况,不过并不影响笔者模型引入粘滞度修正因子和损耗关于温度变化修正因子带来的积极意义。

综上所述,在不同负载情况下,笔者模型对变压器绕组热点温度的预测值、IEEE 推荐模型估算值和变压器实测值在图中都显示出较好的一致性,同时,笔者模型在动态负载情况下,体现了较好的适应能力,能正确反映热点温度随时间的变化,具有良好的连续性和一致性。

### 3 结 语

通过分析变压器绕组损耗与发热机理,同时考虑到变压器油粘滞度随温度的变化,引入油粘滞度和绕组损耗关于温度变化的修正因子,建立了一种基于顶层油温的变压器热点温度计算改进模型,并与实验室温升用试验变压器热特征量的实测数据进行对比验证,结果表明:

1) 绕组损耗与温度变化相关,由于阻抗的原因,绕组直流损耗随温度上升单调增加,而涡流损耗随温度变化的关系则完全相反,不能简单地将绕组损耗随温度变化带来的影响与粘滞度影响相抵消。

2) 引入粘滞度与损耗关于温度变化的修正因子,提出一种基于顶层油温的变压器绕组热点温度改进模型,模型参数选用 Levenberg-Marquardt 算法(L-M 算法)进行估算。对比不同负载情况以及动态负载情况下试验变压器的实测数据,笔者模型的计算结果与 IEEE 导则推荐的模型预测结果均有较好的一致性,在动态负载下具有更优的精度。

### 参考文献:

- [1] PRADHAN M K, RAMU T S. Estimation of the hottest spot temperature (HST) in power transformers considering thermal inhomogeneity of the windings [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1704-1712.
- [2] PRADHAN M K, RAMU T S. Prediction of hottest spot temperature (HST) in power and station transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4): 1275-1283.
- [3] ZHANG J H, LI X. Oil cooling for disk-type transformer windings-part 1: theory and model development [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1318-1325.

- [4] 尹克宁. 变压器设计原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [5] 陈伟根, 苏小平, 孙才新, 等. 基于有限体积法的油浸式变压器绕组温度分布计算[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 23-27.  
CHEN WEI-GEN, SU XIAO-PING, SUN CAI-XIN, et al. Temperature distribution calculation based on FVM for oil-immersed power transformer windings [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 23-27.
- [6] PIERCE L W. An investigation of the thermal performance of an oil filled transformer winding [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3): 1347-1358.
- [7] PIERCE L W. Predicting liquid filled transformer loading capability [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30(1): 170-178.
- [8] PIERCE L W. Transformer design and application considerations for nonsinusoidal load currents [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(3): 633-645.
- [9] RADAKOVIC Z, KALIC D. Results of a novel algorithm for the calculation of the characteristic temperatures in power oil transformers [J]. Electrical Engineering, 1997, 80(3): 205-214.
- [10] RADAKOVIC Z, FESER K. A new method for the calculation of the hot-spot temperature in power transformers with ONAN cooling [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4): 1284-1292.
- [11] 中国电器工业协会. GB/T 1094.7—2008 油浸式电力变压器负载导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [12] IEEE STANDARDS ASSOCIATION. C57.91-1995 IEEE guide for loading Mineral-Oil-Immersed transformers[S]. IEEE Xplore digital library; IEEE Standards Association, 1996.
- [13] SWIFT G, MOLINSKI T S, LEHN A. A fundamental approach to transformer thermal modeling. I. theory and equivalent circuit[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 171-175.
- [14] 王红宇, 苏鹏声, 王祥珩, 等. 油浸式大型电力变压器表面温度预测模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45(4): 569-572.  
WANG HONG-YU, SU PENG-SHENG, WANG XIANG-HENG, et al. Prediction of surface temperatures of large oil-immersed power transformers [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2005, 45(4): 569-572.
- [15] SUSAN D, LEHTONEN M, NORDMAN H. Dynamic thermal modeling of distribution transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 1919-1929.
- [16] KANZOW C, YAMASHITA N, FUKUSHIMA M. Levenberg-Marquardt methods with strong local convergence properties for solving nonlinear equations with convex constraints [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2005, 173(2): 321-343.
- [17] 李海英, 李渝曾, 张少华. 可中断负荷参与输电阻塞管理的模型与算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10): 17-21.  
LI HAI-YING, LI YU-CENG, ZHANG SHAO-HUA. Model and algorithm of transmission congestion management based on interruptible load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 17-21.
- [18] 周小林, 孙东松, 钟志庆, 等. Levenberg-Marquardt 算法在测风激光雷达中的应用[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(4): 500-504.  
ZHOU XIAO-LIN, SUN DONG-SONG, ZHONG ZHI-QING, et al. Application of Levenberg-Marquardt algorithm in the wind lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(4): 500-504.
- [19] ELMOUDI A A. Evaluation of power system harmonic effects on transformers: hot spot calculation and loss of life estimation [D]. Helsinki: Helsinki University of Technology, 2006.

(编辑 王维朗)