

# 电力变压器绕组热点温度软测量技术研究

黄超<sup>1</sup>, 彭道刚<sup>1</sup>, 郑凯<sup>2</sup>

(1. 上海电力学院 自动化工程学院, 上海发电过程智能管控工程技术研究中心, 上海 200090;

2. 国网浙江省宁波市鄞州区供电公司, 浙江 宁波 315100)

**摘要:** 电力变压器是发电系统中最重要的设备之一, 变压器绕组热点温度是影响绕组绝缘寿命和变压器过载运行的主要原因; 传统的热电类比模型忽略了变压器各器件之间的温度差及其在运行中可能出现的冷却系统运行方式的改变, 实际应用中存在一定的误差; 因此, 在热电类比模型和 IEEE 导则推荐的热点温升模型基础之上, 提出了一种软测量模型; 该模型充分考虑了运行中不同的变压器实际操作情况的不同, 添加了辅助变量(油粘度、冷却风扇运行个数等)对主导变量进行计算和优化; 模型的有效性通过与某 ONAN 自然油循环冷却方式的变压器的实际温升数据对比得到了验证, 其仿真结果相比于 IEEE 导则推荐的热点温升模型, 具有更加精确的预测能力和更高的暂态过程准确性。

**关键词:** 变压器绕组; 热点温度; 软测量模型; 热电类比

## Research of Soft-measurement Technology of the Transformer Winding Hot Spot Temperature

Huang Chao<sup>1</sup>, Peng Daogang<sup>1</sup>, Zheng Kai<sup>2</sup>

(1. School of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai Engineering Research

Center of Intelligent Management and Control for Power Process, Shanghai 200090, China

2. State Grid Zhejiang Ningbo Yinzhou District Power Supply Company, Ningbo 315100, China;)

**Abstract:** Power transformer is one of the most important equipment in the power system, the hot spot temperature of transformer winding is the main reason for the winding insulation life and the power transformer overloading capability. Traditional thermoelectricity analogy model ignores the temperature difference between transformer devices and its possible mode change of cooling system in the operation, some errors will be caused by these reasons in the practical application. Therefore, based on thermoelectricity analogy model and the GB/T 15164-1994 loading guide method, a soft measurement model is put forward. The model fully considers different transformers' operation situations and adds auxiliary variables (oil viscosity, the number of cooling fans, etc.) to figure out and optimize the leading variables. The model is proved to be effective by comparing the calculation results of the measured data obtained from a natural oil circulation cooling ONAN transformer. Finally, the simulation results from this model are compared with IEEE guide method results. The comparison proves the model presented is more adequate and has higher accuracy in transient process.

**Keywords:** transformer winding; hot spot temperature; soft measurement model; thermal electric analogy

## 0 引言

电力变压器是电力系统中输变电能的首要高压电气设备, 担负着电压、电流的转换和电能传输的职能。变压器绕组温度, 尤其是绕组热点温度已经成为影响变压器绝缘寿命的决定性因素, 其异常变化是变压器安全运行隐患的重要变形式。因此, 为避免因绕组过热导致变压器故障, 有必要对变压器绕组热点温度进行测量, 从而保证电网安全运行。

收稿日期: 2015-08-28; 修回日期: 2015-09-25。

**基金项目:** 上海市“科技创新行动计划”高新技术领域科研项目(14511101200); 上海市发电过程智能管控工程技术研究中心项目(14DZ2251100); 上海市电站自动化技术重点实验室开放课题(13DZ2273800)。

**作者简介:** 黄超(1991-), 女, 硕士研究生, 主要从事变压器在线监测方向的研究。

彭道刚(1977-), 男, 博士, 教授, 主要从事发电自动化技术、节能发电调度优化技术、电力设备状态监测与健康诊断等方向的研究。

国内外学者们对变压器内部产热散热机理已经进行了一些研究工作, 目前获得变压器内部绕组温度的方法主要有直接测量法和间接计算测量法两种。直接测量法采用直接置入光纤传感器的方法来获得绕组热点温度, 虽然其结果较为直观和精确, 但难度大, 成本高, 且会影响甚至破坏变压器的内部绝缘性能, 因此很少应用。变压器绕组热点温度的间接测量法主要依据的是国际电工委员会 IEEE Std C57. 91-1995 和国标 GB/T15164-1994 中推荐的变压器绕组热点温度计算公式。在文献 [1-2] 这两个标准中, 热点温度等于环境温度, 变压器顶层油温升或底层油温升加上绕组热点温升之和。另外, Swift 在热模型和电路图模型的类比基础上提出了基于变压器顶层油温的绕组热点温度计算模型 [3-4], 该模型从传热学角度出发, 利用电路中的基尔霍夫定律, 建立了含有环境温度、输入电流和顶层油温等变量的热路模型和微分方程。该模型可较为准确地求得变压器绕组热点温度, 但在暂态过程具有中对热点温度计算不准确的特点。文献 [5-6] 在热电类比方法的基础上充分考虑了油粘度、变压器内部损耗等变量随温度

的变化,从而提出了基于顶层油温、底层油温的变压器绕组热点温度计算模型。

本文在热电类比模型的基础上,提出了一种变压器绕组热点温度软测量的方法,即以变压器运行时可测得的变量以及出厂参数为输入量,建立热模型对变压器热特性进行评估和研究。由于在电力系统中不同的变压器实际运行情况都会有所不同,且影响变压器绕组热点温度的变量有很多,有些难以直接测量,因此我们就需要对其进行主元分析,选取与测量变压器绕组温度主导变量相关性较高的几组辅助变量,通过构造某种数学关系,实现对主导变量的估计,最后采用相应建模方法来建立软测量模型,从而完成测量。该模型由于添加了辅助变量对主导变量的计算和优化,通过仿真可知使模型具有了更加精确的预测能力。

## 1 变压器热点温度软测量模型的建立

### 1.1 油浸式变压器产热散热机理研究

油浸式电力变压器运行时的损耗包括空载损耗和负载损耗,可以表示如下:

$$P_r = P_c + P_l \quad (1)$$

$P_r$  为总损耗 (W);  $P_c$  为空载损耗 (W);  $P_l$  为负载损耗 (W)。

从发热角度来看,绕组导线中的负载损耗是造成绕组热点温升的决定因素,其表示如下:

$$P_l = I^2 R + P_w + P_z \quad (2)$$

$I^2 R$  为直流电阻损耗 (W);  $P_w$  是内部涡流损耗 (W);  $P_z$  为其余杂散损耗 (W)。

### 1.2 软测量模型描述

由于传统的热电类比模型忽略了变压器各器件之间的温度差及其在运行中可能出现的冷却系统运行方式的改变,因此实际应用中存在着误差。本文在 IEEE 导则推荐的热点温升模型的基础之上,充分考虑了辅助变量(如油黏度、冷却风扇使用数量等)的影响,建立了变压器绕组热点温度的软测量模型以提高测量准确性。图 1 即为软测量模型的基本结构。

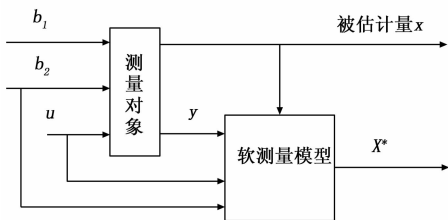


图 1 软测量模型结构图

其中:输入变量  $u$ ,  $b_2$ , 测量对象输出变量  $y$  均为可测得的变量,  $x$  为被估计变量,  $b_1$  为难以准确测得的变量,  $x^*$  的测量值可用于在线自校正。这样即可建立可测得的变量与被估计变量  $x$  之间的相应模型:

$$x = f(b_2, u, y, x^*) \quad (3)$$

在运行中不同的变压器实际操作情况都会有所不同,且影响绕组热点温度的变量有很多,有些数据不可以直接测得,因此需要对其进行主元分析,选取与主导变量相关性较高的几组辅助变量,通过建模来实现对主导变量的估计,最后结合热点

类比理论建立软测量模型,从而实现热点温度的估计。

### 1.3 辅助变量的选择

首先进行主元分析,选取热电类比理论模型中的自变量为主导变量,根据工程运用中的实际情况,可选取与主导变量相关的几组辅助变量如下:

1) 冷却风扇运行个数。计算主导变量负载系数  $K$  的决定因素是变压器的额定电流  $I_{rated}$ , 而不同的风扇投入数量则会对其有一定影响,因此,可选择冷却风扇运行个数为其辅助变量。风冷变压器 (ONAF) 在风扇全停时运行于自冷状态 (ONAN), 而变压器的额定电流在这两种运行状态下是不同的。在自冷状态下运行时,变压器的额定容量只有风扇全部投入使用时的 70% 或 80%。因此,设风冷变压器共风扇总数为  $m$ , 投入使用的风扇个数为  $t$ , 全部运行时变压器 (ONAF) 的额定容量为  $S$ , 则变压器额定容量可调整为:

$$S \times \{1 - [(1 - 0.8)/m] \times (m - t)\} \quad (4)$$

此时的额定电流为:

$$I_{rated} \times \{1 - [(1 - 0.8)/m] \times (m - t)\} \quad (5)$$

这样即可通过辅助变量冷却风扇运行个数实现对变压器运行方式的负载系数计算基数的估计。

2) 散热片运行组数。散热片运行个数也会影响到变压器的散热能力,从而影响到变压器绕组热点温度的计算,因此,我们将其考虑进去作为另一辅助变量。假设变压器共有散热片  $x$  组,其中有  $y$  组投入使用,则式 (4) 可修正为:

$$S \times (y/x) \times \{1 - [(1 - 0.7)/m] \times (m - t)\} \quad (6)$$

3) 变压器有载分接开关的位置。对于配置了有载分接开关调压装置的变压器,当其运行在不同的位置时,相对应的额定运行电流也是不同的。工程应用中应根据有载分接开关所运行的分接位置,确定计算负载系数用的额定电流值,因此也可选择有载分接开关分接位置作为其辅助变量。

4) 油粘度  $\mu$ 。对于主导变量非线性热阻和额定油热容而言,油粘度  $\mu$  与其密切相关,可作为其辅助变量。油粘度  $\mu$  随温度而变化,其值为  $\mu = 0.000\ 001\ 357\ 3 \times \frac{e^{27.973}}{\theta_{oil}^{27.3}}$ , 又有  $\mu$  为额定值  $\mu_r$  与变化量  $\mu_{pu}$  之积,即  $\mu = \mu_{pu} \cdot \mu_r$ 。

由热传导理论可得传热系数  $h$

$$h = \frac{C \times k}{L} \left[ \left( \frac{c_p \cdot \mu}{k} \right) \cdot \left( \frac{L^3 \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta\theta_{oil}}{\mu^2} \right) \right]^n \quad (7)$$

其中:  $L$  为热传导面的尺寸;  $g$  为重力常数;  $k$  为油热传导率;  $\rho$  为油密度;  $\beta$  为油热膨胀系数;  $\Delta\theta_{oil}$  为油的温度梯度;  $\mu$  为油粘度。由于其他物理参数 ( $\rho, \beta, k$ ) 随温度的变化没有油粘度随温度的变化强烈,因此可把其他物理参数近似看作常数,从而求得非线性热阻和额定油热容如下:

$$R_{th-oil} = \frac{1}{h \cdot A} = \frac{\Delta\theta_{oil}}{q} \quad (8)$$

$$C_{th-oil,R} = \frac{\tau_{oil,R}}{R_{th-oil,R}} \quad (9)$$

### 1.4 软测量建模

IEEE Std C57.91 国家标准推荐了变压器顶层油温热点温度模型,根据其指数方程可推出其微分方程如下:

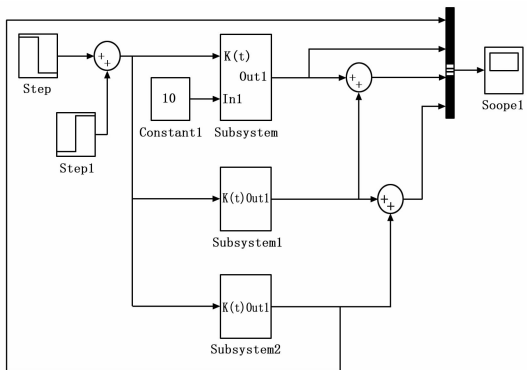
$$\left( \frac{K^2 \alpha + 1}{\alpha + 1} \right)^n \cdot \Delta\theta_{oilR} = \tau_{oilR} \frac{d\Delta\theta_{oil}}{dt} + \Delta\theta_{oil} \quad (10)$$

式中,  $\alpha$  为额定负载损耗与空载损耗之比,  $\frac{q_{cu}}{q_{fe}}$ ;  $K$  为负载系数,  $\frac{I}{I_{rated}}$ ;  $\theta_{oilR}$  为额定顶层油温升值;  $\tau_{oilR}$  为额定变压器油的时间常数。又考虑到环境温度变化对顶层油温变化的影响, 因此引入辅助变量油黏度  $\mu$ , 在热电类比的基础上建立软测量模型, 推出其微分方程如下:

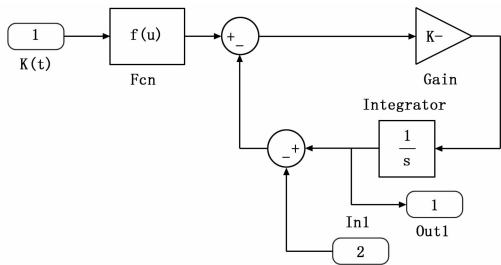
$$\frac{K^2 \alpha + 1}{\alpha + 1} \cdot \mu_{pu}^n \cdot \Delta \theta_{oilR} = \mu_{pu}^n \cdot \tau_{oilR} \frac{d\Delta \theta_{oil}}{dt} + \frac{(\theta_{oil} - \theta_a)^{1+n}}{\Delta \theta_{oil}^n} \quad (11)$$

由热电类比理论可推导得出顶层油温  $\theta_{oil}$  的微分方程:

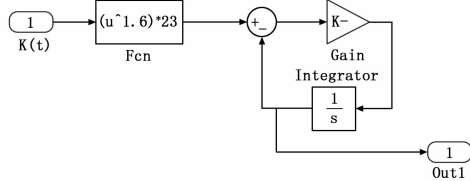
$$q_{cu} + q_{fe} = C_{th-oil} \cdot \frac{d\theta_{oil}}{dt} + \frac{\theta_{oil} - \theta_a}{R_{th-oil}} \quad (12)$$



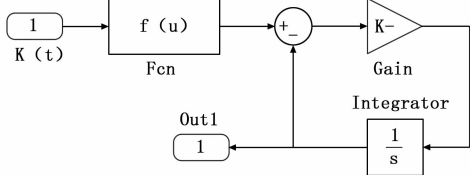
(a) 变压器绕组热点温度软测量模型仿真



(b) 顶层油温软测量值计算模块 Subsystem



(c) 热点温升计算模块 Subsystem1



(d) 顶层油温 IEEE 计算模块 Subsystem1

图 2 模型仿真图

负载的改变会引起变压器内部绕组损耗的变化, 从而改变绕组热点温度, 因此热点温升方程可由如下微分方程表示:

$$K^{2m} \cdot \Delta \theta_{hsR} = \tau_w \cdot \frac{d\Delta \theta_{hs}}{dt} + \Delta \theta_{hs} \quad (13)$$

根据 GB/T 15164-1994 《油浸式电力变压器负载导则》即可得出变压器绕组热点温度:

$$\theta_{hs} = \theta_{oil} + \Delta \theta_{hs} \quad (14)$$

## 2 变压器绕组热点温度软测量模型的验证

### 2.1 软测量系统模型建立

利用 MATLAB 中的 simulink 平台可搭建如图 2 所示的变压器绕组热点温度软测量模型仿真。根据式 (10~14), 分别搭建了 simulink 模型。Subsystem 模块为顶层油温软测量值计算模块, Subsystem1 为热点温升计算模块, Subsystem2 为顶层油温 IEEE 计算模块。

### 2.2 算例

试验变压器采用 ONAN 自然空气冷却方式, 自然油循环, 散热片全部投入使用, 因此由辅助变量可优化得到主变量额定负载电流为:

$$I_{rated} \times (y/x) \times \{1 - [(1 - 0.7)/m] \times (m - t)\} = 0.8 I_{rated} \quad (15)$$

负载试验变压器参数如表 1 所示。其中通过与负载导则 IEEE 中给出的计算方法和从试验得到的实测数据进行比较, 额定负载和变负载情况下, 顶层油温和热点温度验证结果如图 3 和图 4 所示。

表 1 仿真参数

指数	指数	额定负载损耗与空载损耗之比	额定变压器油时间常数	变压器绕组时间常数	额定顶层油温升	额定热点温升
$n$	$m$	2.8	125.19	14.81	55	23
0	0.8					

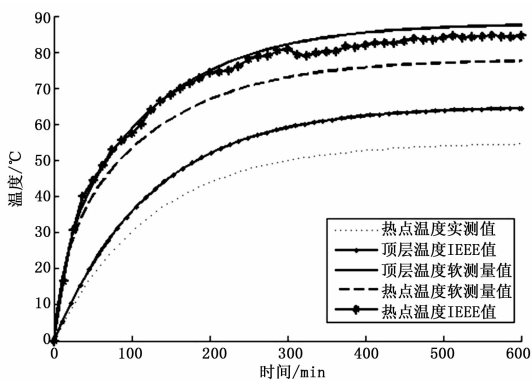


图 3 额定负载下软测量值与 IEEE 值对比验证结果

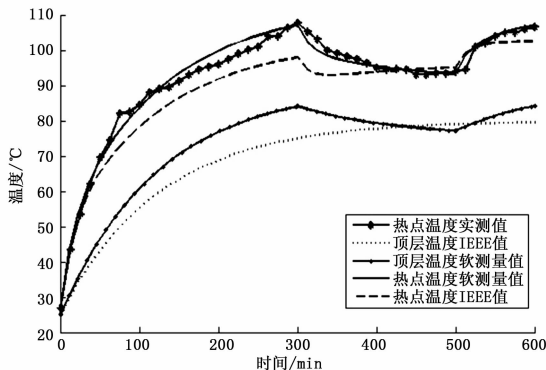


图 4 变负载下软测量值与 IEEE 值对比验证结果