

一种计算变压器绕组温度的在线算法*

AN ON-LINE ALGORITHM FOR PREDICTING THE TEMPERATURE OF POWER TRANSFORMER WINDINGS

文 安 叶 一 麟

Wen An Ye Yilin

(重庆大学电气工程系)

摘 要 提出了一种根据负荷电流计算变压器绕组平均温度的实时算法,该算法涉及了负荷电流的整个历史过程和环境温度的变化。通过监控绕组温升,从而使得变压器能够最大限度地发挥其过载潜力同时又保证必要的寿命。在假定的未来负荷和油温的条件下,该算法还能预报未来时刻的绕组温升/时间特性和绕组达到最高允许温度的时间。

关键词 电力系统; 继电保护; 变压器; 微机应用

中国图书资料分类法分类号 TM771

ABSTRACT The paper presents an on-line algorithm for predicting the average temperature of power transformer winding according to its load current. The algorithm has accounted for the whole history of load current and variations of ambient temperature. The overload capabilities of transformer can be increased by monitoring and controlling the winding temperature and the necessary durability of the transformer can be ensured. The algorithm can also forecast the future winding temperature and the time of reaching the max, permitted the assumed future load current and oil temperature.

KEY WORDS electric power system; relaying protection; transformer; micro-computer application

0 前 言

在过去20几年里,如何提高变压器过负荷能力,特别是在紧急事故状态下的短时间过负荷能力,一直是人们十分感兴趣的课题^[1,2]。在现有的变压器过负荷保护中,一般是采用反时限的过流保护,即近似认为变压器绕组的温升与负电流平方成正比,与时间成正比。此过流保护未计及变压器环境温度的变化,对负荷电流也只计及了部分历史过程,因此难于和变压器绕组温升/时间特性相配合。这往往使得在绕组温度还未达到最高允许值时,保护就可能已发出跳闸命令,从而不必要或过早地失去了负荷。

变压器的过负荷能力主要决定于绕组线圈的温度。根据国际电工委员会(IEC)推荐的变

* 收文日期 1990-06-15

压器运行规程,变压器绕组的最高允许温度为140℃。变压器绕组线圈温升是一个复杂的热动态过程。它除了与现时刻的负荷电流有关外,而且还和此时刻以前的负荷历史过程有关,同时也与变压器类型、铁芯材料、绝缘材料、几何尺寸、冷却方式、环境温度等有关。在现有的绕组温升算法中,大多是利用有限元法[3]计算在热稳态情况下的绕组最热点的位置和温度。对于热暂态情况下的最热点位置和温度,计算将变得很复杂。文献[1]在国际电工委员会推荐的变压器温升模型基础上,将变压器分为绕组、铁芯、油和其它非带电体三部分来建立变压器的热平衡方程。该模型如下:

$$\begin{cases} G_1 C_1 \frac{dT_1}{dt} + S_1 a_1 (T_1 - T_3) = P_1 \\ G_2 C_2 \frac{dT_2}{dt} + S_2 a_2 (T_2 - T_3) = P_2 \\ G_3 C_3 \frac{dT_3}{dt} + S_3 a_3 (T_3 - T_4) - S_1 a_1 (T_1 - T_3) - S_2 a_2 (T_2 - T_3) = P_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中 T ——平均温度; P ——损耗; S ——换热表面积; a ——换热系数;
 G ——质量; C ——比热; T_4 ——变压器的环境温度;

下标 1、2、3 分别表示绕组、铁芯、油。

该文给出了一台250MVA 升压变压器的参数如下:

$$\begin{aligned} P_1 &= 520\text{kW}, & P_2 &= 300\text{kW}, & P_3 &= 80\text{kW} \\ G_1 C_1 &= 13.8 \times 10^6 \text{WS}^\circ\text{C}^{-1}, & S_1 a_1 &= 26 \times 10^3 \text{W}^\circ\text{C}^{-1} \\ G_2 C_2 &= 48.4 \times 10^6 \text{WS}^\circ\text{C}^{-1}, & S_2 a_2 &= 12 \times 10^3 \text{W}^\circ\text{C}^{-1} \\ G_3 C_3 &= 122.9 \times 10^6 \text{WS}^\circ\text{C}^{-1}, & S_3 a_3 &= 25.7 \times 10^3 \text{W}^\circ\text{C}^{-1} \end{aligned}$$

本文在文献[1]提出的离线算法基础上,提出了一种计算绕组平均温度的在线算法。该算法只须大约80个乘法和80个加法即可根据变压器的铜耗计算出绕组的平均温度。根据实时计算出的绕组温度值,可以实现对变压器冷却系统的控制和过负荷保护。

1 基本原理

1.1 稳态情况下的热平衡方程

在热稳态情况下,绕组温度恒定,绕组不吸收热量。铜耗产生的所有热量都传导到油中。在此状态下的绕组热平衡方程式为:

$$\begin{cases} \Delta T_s = \frac{1}{a_1} \cdot \frac{P_1}{S_1} \\ \Delta T_r = \frac{\delta}{\lambda} \cdot \frac{P_1}{S_s} \\ \Delta T_w = \Delta T_r + \Delta T_s \end{cases} \quad (2)$$

式中 ΔT_s ——绕组绝缘表面的平均温度与油平均温度的差值; ΔT_r ——温度在绕组绝缘材料中的降落; ΔT_w ——导体平均温度与油平均温度的差值; λ ——绝缘材料的导热系数; δ ——绝缘材料的厚度; S_s ——绝缘材料的传热表面积。

方程组(2)中的换热系数 a_1 与绕组类型、几何尺寸、热交换方式以及绕组温度等有关。要精确计算此系数比较困难,一般是根据实验数据和经验公式进行计算。文献[2]给出了不

同绕组类型在非定向对流条件下的 α_1 计算公式。

1.2 暂态情况下的热平衡方程

文献[1]给出的暂态热平衡方程[方程组(1)]没有计及温度在绕组绝缘层中的降落。在计及绝缘层中的温度降时,可以近似认为在绕组温升过程中绝缘材料所吸收的热量与导体所吸收的热量相比可以忽略。因此可建立如下的绕组热平衡方程式:

$$\begin{cases} G_1 C_1 \frac{dT_1}{dt} + S_1 \alpha_1 (T_s - T_3) = P_1 \\ T_1 - T_s = \frac{\delta}{\lambda} \cdot \frac{S_1 \alpha_1 (T_s - T_3)}{S_k} \end{cases} \quad (3)$$

式中 T_1 ——绝缘材料与油接触的表面的平均温度。

将此方程组经消元,整理可得:

$$G_1 C_1 \frac{dT_1}{dt} + S_1 \alpha_k (T_1 - T_3) = P_1 \quad (4)$$

其中

$$\alpha_k = \frac{S_k \lambda \alpha_1}{S_k \lambda + S_1 \alpha_1 \delta}$$

可见方程(4)与方程组(1)中的绕组热平衡方程式有相同的形式。

在下面的分析中,以方程组(1)中的绕组热平衡式为例进行讨论,对于方程(4)有相同的结论,只是将 α_1 替换成 α_k 即可。重写方程组(1)中的绕组热平衡方程式如下:

$$G_1 C_1 \frac{dT_1}{dt} + S_1 \alpha_1 (T_1(t) - T_3(t)) = P_1'(t) \quad (5)$$

令: $\Delta T(t) = T_1(t) - T_3(t)$, 则上式可写成:

$$G_1 C_1 \frac{d\Delta T(t)}{dt} + S_1 \alpha_1 \Delta T(t) = P_1'(t) - G_1 C_1 \frac{dT_3(t)}{dt} \quad (6)$$

令:

$$\begin{aligned} P'(t) &= P_1'(t) - G_1 C_1 \frac{dT_3(t)}{dt} \\ &\approx P_1'(t) - G_1 C_1 \frac{T_3(t) - T_3(t-k)}{k} \end{aligned} \quad (7)$$

式中 k ——微小时间段。

则式(6)可写成:

$$\frac{d\Delta T(t)}{dt} + \frac{S_1 \alpha_1}{G_1 C_1} \Delta T(t) = \frac{P'(t)}{G_1 C_1} \quad (8)$$

从上式可见,只要已知了变压器绕组的铜耗和平均油温,就可利用式(8)求出 $\Delta T(t)$ 。为了求得变压器绕组最热点的温度,采用 IEC 推荐的近似计算公式:

$$T_k = T'_{\omega} + 1.1 \Delta T \quad (9)$$

式中, T'_{ω} 为变压器的上部油温,在变压器运行中,此油温能够方便地测得。由于已经测得了变压器的上部油温,因此在实现变压器过负荷保护时,可用此油温的变化率近似代替变压器平均油温的变化率。

1.3 实时算法

在式(8)中,当 P' 为常数时,在 $\Delta T(0) = 0$ 的条件下,求出 $\Delta T(t)$ 的解析式为:

$$\Delta T(t) = P' \frac{1}{S_1 \alpha_1} (1 - e^{-\frac{S_1 \alpha_1}{G_1 C_1} t}) \quad (10)$$

$$\text{令: } r(t) = \frac{1}{S_1 \alpha_1} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \tau = \frac{G_1 C_1}{S_1 \alpha_1}$$

$$\text{则: } \Delta T(t) = P' r(t) \quad (11)$$

当 P' 为如图1所示的方波时,应用叠加原理可以求得在一给定时刻 t_4 的 ΔT 为:

$$\Delta T(t_4) = P(1)r(t_4) - P(1)r(t_4 - t_1) + P(3)r(t_4 - t_2) - P(3)r(t_4 - t_3)$$

若: $t_1 - t_0 = t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = t_4 - t_3 = \dots = k$

则上式为:

$$\begin{aligned} \Delta T(t_4) &= P(1)[r(4k) - r(3k)] + P(3)[r(2k) - r(k)] \\ &= P(1)R(1) + P(2)R(2) + P(3)R(3) + P(4)R(4) \\ &= \sum_{n=1}^4 P(n)R(n) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{式中 } R(1) = r(4k) - r(3k) \quad R(2) = r(3k) - r(2k) \quad R(3) = r(2k) - r(k) \\ R(4) = r(k) - r(0) \quad P(2) = 0 \quad P(4) = 0$$

当 P' 为任意波形时,可以近似认为在一小区间时段 k 内的波形为一矩形波,其幅值为该小时间段内的平均功率值.因此可以得出与式(12)相同形式的 $\Delta T(t)$ 表达式为:

$$\Delta T(t) = \sum_{n=1}^{W/k} P(n)R(n) \quad (13)$$

式中 $R(n) = r[nk] - r[(n-1)k]$; $P(n)$ 在时间段 $-nk < t < -(n-1)k$ 内的 P' 的平均值; k ——每一个 $P'(n)$ 的宽度; W —— $r(t)$ 达到稳态的时间。

由于 $r(t)$ 的时间常数 τ 一般都在 15 ~ 30 分钟左右[4],如果取 k 值为一常数(例如 0.16 秒),那么式(13)就可能上万项,这在实时计算中难以实现.从 $r(t)$ 的表达式知, $r(t)$ 的增量随着 t 的增大而减小,如果在不同的时间区间内采用不同的 k 值,即当 t 较小时采用较小 k 值,当 t 较大时采用较大 k 值,这样可以大大减少式

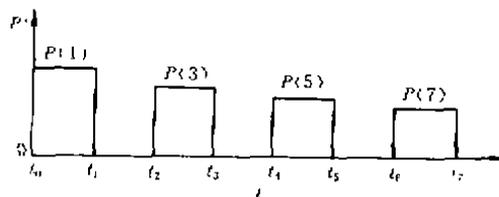


图1 功率方波

(13) 的项数,使得该算法在实时处理中能够加以实现.因此重新将式(13)改写成:

$$\begin{aligned} \Delta T &= \sum_{n=1}^{W_a/k_a} A(n)R_a(n) + \sum_{n=1}^{W_b/k_b} B(n)R_b(n) + \sum_{n=1}^{W_c/k_c} C(n)R_c(n) \\ &+ \sum_{n=1}^{W_d/k_d} D(n)R_d(n) + \sum_{n=1}^{W_e/k_e} E(n)R_e(n) \end{aligned} \quad (14)$$

式中, $A(n), B(n), C(n), D(n), E(n)$ 分别为在时间段 $-nk_a < t < -(n-1)k_a, -[W_a + nk_b] < t < -[W_a + (n-1)k_b], -[W_a + W_b + nk_c] < t < -[W_a + W_b + (n-1)k_c], -[W_a + W_b + W_c + nk_d] < t < -[W_a + W_b + W_c + (n-1)k_d], -[W_a + W_b + W_c + W_d + nk_e] < t < -[W_a + W_b + W_c + W_d + (n-1)k_e]$ 的平均功率值。

$R_a(n), R_b(n), R_c(n), R_d(n), R_e(n)$ 分别为在上述时间段内 $r(t)$ 的增量值。

k_a, k_b, k_c, k_d, k_e 分别为每一 $A(n), B(n), C(n), D(n), E(n)$ 的宽度, W_a, W_b, W_c, W_d, W_e 分别为 $A(n), B(n), C(n), D(n), E(n)$ 区间的宽度。

1.4 变压器的铜耗

变压器的铜耗由两部分构成[6]:

(1) 流过绕组线圈电流 I 所引起的损耗: I^2R

(2) 漏磁在导体中引起的涡流损耗: P_{ed} , 要用公式计算 P_{ed} 较困难, 在实际工程中, 一般是加上一个 I^2R 的百分数, 即令: $P_{ed} = I^2R\eta\%$

式中 η 的取值取决于不同的变压器类型和运行经验, 因此: $P_{Cu} = (1 + \eta\%)I^2R$

上式未计及绕组电阻 R 随温度变化的因素。

1.5 未来时刻绕组温升/时间特性的预报

由于绕组和油均有一定的热容量, 因而在突然过负荷的条件下, 变压器绕组温度不是马上就达到稳态值, 而是要经过相当长一段时间以后才能达到稳态。因此利用这一温升迟后特性, 在假定的未来负荷和油温的条件下, 可以向主控室预报绕组达到最高允许温度的时间, 以便主控室提前采取转移负荷措施, 保证该变压器对负荷的连续供电。

利用式(14)、(9)可以在任意假定的未来负荷和油温的条件下, 计算出未来任意时刻的绕组温度。要计算出绕组达到最高允许温度的时间, 须经多次试算, 计算量很大。本文考虑最简单的情形, 即在假定未来负荷、油温与现时刻负荷、油温相等的条件下, 向主控室预报绕组将在那一时间范围内达到最高允许温度。该预报框图如图2所示。

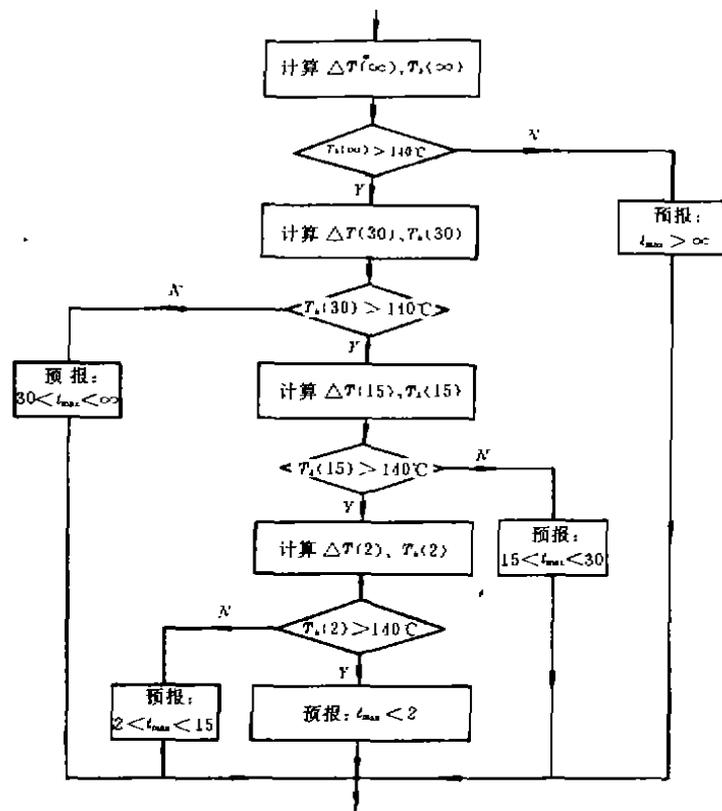


图2 预报逻辑框图

注: t_{max} 表示绕组达到最高允许温度的时间, 框图中时间的单位为分。

1.6 变压器的寿命记录

在求得了绕组温度的条件下,还可方便地记录变压器所耗掉的寿命。根据文献[7]指出,变压器的绝缘在最热点为98℃时以正常速度老化,当温度每升高6℃时,老化速度增加1倍。按照这一原则,绝缘在98℃以上的老化速度为:

$$r = r_0 2^{\frac{\theta}{6}}$$

式中 $\theta = T_h - 98^\circ\text{C}$; r_0 ——正常老化速度。

因此可以求出绝缘在过负荷条件下($T_h > 98^\circ\text{C}$)所耗掉的寿命为:

$$L = r_0 2^{\frac{\theta}{6}} \cdot t$$

2 仿真计算

为了和文献[1]中离线计算出的结果相比较,本文采用文献[1]提供的变压器参数,即:
 $P_1 = 250\text{kW}$, $G_1 C_1 = 13.8 \times 10^6 \text{WS}^\circ\text{C}^{-1}$, $S_1 a_1 = 26 \times 10^3 \text{W}^\circ\text{C}^{-1}$

假定测得的变压器油温如下式所示。

$$T_3(t) = 35 + 34.543521e^{-0.113342 \cdot 10^{-3}t} - 2.453678e^{-0.404056 \cdot 10^{-3}t} + 1.997069e^{-2.132974 \cdot 10^{-3}t}$$

应用本文提出的在线算法[式(14)]计算出 $\Delta T(t)$,再加上 $T_3(t)$ 得出的绕组平均温度如图3曲线1所示。图中曲线3为曲线1与文献[1]计算出的结果相比较的误差。

在式(14)中,整定的参数为(单位,秒):

$$k_0 = 0.16 \quad k_1 = 1.28 \quad k_2 = 10.24 \quad k_3 = 81.92 \quad k_4 = 655.36$$

$$W_0 = 1.28 \quad W_1 = 10.24 \quad W_2 = 81.92 \quad W_3 = 655.36 \quad W_4 = 5242.88$$

图4示出了在假定测得的变压器油温如图中曲线2所示的条件下,变压器额定负荷运行 4×10^3 秒后,过负荷40%运行 6×10^3 秒,应用式(14)计算出 $\Delta T(t)$,再加上图中所示油温得出的绕组平均温度。

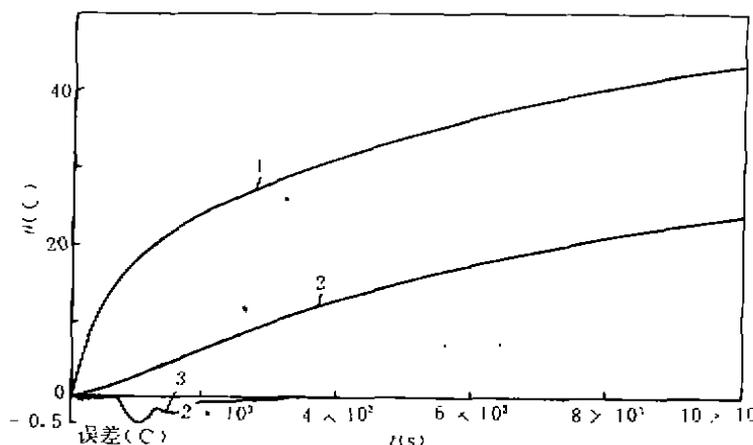


图3 变压器额定负荷运行时的绕组温升曲线

1——绕组平均温度 2——平均油温 3——曲线1与文中式(3)相比较的误差

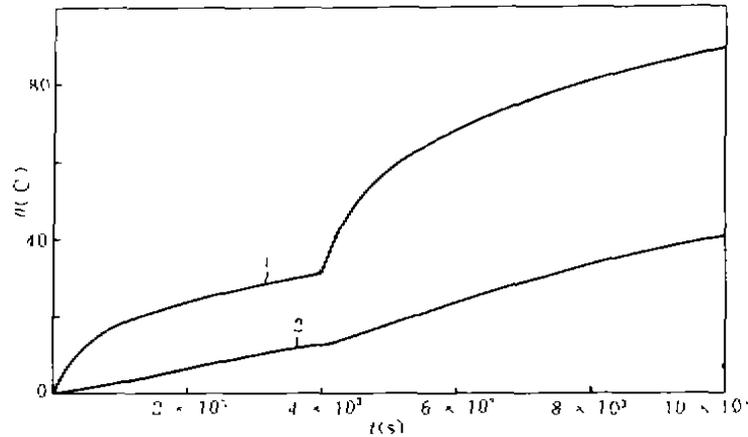


图4 变压器过负荷运行时的绕组温升曲线

1——绕组平均温度 2——平均油温

3 结 论

1) 本文在现有计算变压器绕组温升离线算法的基础上,提出了一种计算绕组平均温升的在线算法。该算法只须大约80个乘法和80个加法就可根据变压器的铜耗计算出绕组的平均温度。由于采用变宽度的损耗方波,减少了计算量,节约了微处理器的运算时间和内存。

2) 本算法计及了整个负荷历史过程和环境温度的变化。根据计算出的绕组温度值实现对变压器冷却系统的控制和对变压器的过负荷保护,能够有效地提高变压器的过负荷能力,同时又保证变压器的必要寿命。在假定的未来负荷和油温的条件下,该算法还能预报未来时刻的绕组温升/时间特性。

3) 本实时算法与文献[1]的离线算法相比,在文中所给定的变压器参数条件下,绕组温度误差在0.5°C之内。

4) 变压器寿命曲线的记录,为变压器的更换、维修提供了较为可靠的定量依据。

参 考 文 献

- 1 Kiss K, Szita I, Ujhazy G. Some characteristic Design Problems of Large Power Transformers. In: CIGRE, 12-07. France, 1974
- 2 Mikhailovsky Y A et al. Methods of Temperature Rise Calculations of Power Transformer Windings. In: CIGRE, 12-16. France, 1984
- 3 Venkateswalu P, Prasad A R. Numerical Prediction of The Temperature Distribution In The Coils of A Transformer Winding. In: CIGRE, 12-04. France, 1984
- 4 Renchon R et al. Protection And Automation Keeping Effective Overload Capabilities of Lines And Transformers. In: CIGRE, 34-02. France, 1970
- 5 Burton P J et al. Recent Developments By CEGB To Improve The Prediction And Monitoring of Transformer Performance. In: CEGRE, 12-09. France, 1984
- 6 Franklin A C, Franklin D P. The J&P Transformer Book. England, Butterworth, 1988
- 7 Hochart B. Power Transformer Handbook. England, Butterworth, 1987
- 8 Wen An. Development of An Algorithm For Diode Overload Protection. Progress Report. England, UMIST, 1989