

干式变压器绕组温升计算方法分析

傅华强 2003

1 发热与散热的平衡—绕组的稳定温升

绕组上的损耗功率是绕组温升的热源,这是比较好算的.而绕组的散热则是一个比较复杂的问题.在绕组内部热量通过传导的方式传到绕组的表面,在表面则通过对流和幅射的方式传到外界环境中去.当绕组的发热与散热达到平衡时,就是绕组的稳定温升。

绕组的散热是一个复杂过程。影响绕组散热的主要因素：绕组温度；绝缘层厚；绕组外包绝缘厚；绕组外包绝缘材料的散热性能；散热气道的宽度和长度；气流速度；铁芯和相邻绕组散热的影响等。因而绕组温升计算随其所用绝缘材料和结构的不同而不同。

2 绕组温升计算的数学模型

绕组的稳定温升一般用一个简化的公式进行计算,不同的结构和绝缘材料的绕组所用系数是不同的。公式运用的温度范围也是有限定的。如：

$$\tau = K Q^X$$

$$Q = W / S$$

$$S = \sum \alpha_i S_i$$

式中： τ —绕组温升；

K —系数；

X —与散热效果有关的系数,散热越好 X 的值越小；

Q —绕组的单位热负荷 W/m^2

W —参考温度下的绕组损耗功率 W

S —等效散热面 m^2

S_i —绕组散热面 m^2

α_i —散热系数

2.1 不同结构型式的变压器所用的计算公式是不同的。

2.2 干式变压器的散热主要是对流和幅射完成的,非包封变压器的传导温升

所占比例很小，因而有些计算公式将层绝缘与外绝缘造成的传导引起的温升计算省略了，有些公式还要加上传导引起的温升，如西欧树脂绝缘干式变压器的计算公式。

2.3 黑体面的热量幅射与绝对温度的 4 次方成比例的，在一个不大的温度段，对流和幅射对散热的综合影响造成的温升式中系数 X —与散热效果有关的系数，散热越好 X 的值越小。如油浸变压器层式绕组温升 X 值取 0.8，而强迫油循环时 X 取 0.7，饼式绕组 X 取 0.6。一般干式变压器 X 值取 0.8，当温升在 80K 左右时，由于温度高时散热效率高，在一些计算公式中 X 取 0.75，因而当温升在 100—125K 时， X 的取值应该再小些。

2.4 当温升范围较大时，用一个计算公式会首尾不能兼顾，需要用两个以上的公式，它们的 X 值不同，即斜率不同。实际上是由几条直线组成的近似曲线。

2.5 绕组的单位热负荷 Q 是指在不遮盖的单位散热面上的功率 (W/m^2)，有气道的散热面，则要确定气道的散热系数。

2.6 如果计算所得温升离参考温度很远，由于计算所用绕组损耗功率离实际功率差得太大而误差很大，则应调整计算绕组损耗功率所用的参考温度。

3 确定数学模型的工厂方法

最实用的确定数学模型的方法是通过典型变压器的温升试验。无气道绕组的温升是最基本的，如绕在厚绝缘筒上的外线圈。线圈外部的面积大小就是有效散热面，先算出热负荷 Q 值，由试验所得温升与 Q 值在双对数坐标纸上打点，最少要有 3 个试验数据，即可在对数坐标纸上连成一条合理的直线，从这条直线上确定公式的两个系数 K 和 X 。

$$\tau = K Q^X$$

$$K = \frac{\tau_1}{Q_1^X}$$

$$X = \frac{\text{Lg } \tau_2 - \text{Lg } \tau_1}{\text{Lg } Q_2 - \text{Lg } Q_1} = \frac{\text{Lg } \tau_2 / \tau_1}{\text{Lg } Q_2 / Q_1}$$

式中：

- τ_1, τ_2 ——取直线上两产品的温升
 Q_1, Q_2 ——相应的单位热负荷
 τ ——所求产品的温升
 Q ——所求产品的单位热负荷

确定内线圈和有气道面的等效散热面，先要确定气道的散热系数。算出热负荷 Q 值，由试验所得温升与 Q 值在双对数坐标纸上打点，最少要有 3 个试验数据，做法与上同。

应注意的是这条直线只能在一定的温度段中误差才是可以接受的。超出范围直线的斜率是不同的，实际上是由很多的折线组成的曲线。

另一要注意的是计算的散热面积一定要与实际制造的相符。

4 一些干式变压器温升计算公式

4.1 我国干式变压器温升计算方法（不进行传导温升计算）

内绕组的温升（ τ ）计算公式

$$\tau = 0.33 Q^{0.8}$$

外绕组的温升（ τ ）计算公式

$$\tau = 0.30 Q^{0.8}$$

4.2 西欧树脂绝缘干式变压器的计算公式（进行传导温升计算，不分内外绕组）

以温升 80K 时温升为基础计算的，（温升超过 80K 过多时，可能误差较大，）经换算后公式如下

$$\tau = 0.475 Q^{0.75}$$

此外，两者的气道散热系数不同。

4.4 我国外绕组饼式绕组的温升（ τ ）计算公式

程序中散热面积计算公式

$$SX1W = 3.14159 * D33 * (B1 + 0.3) * M1 * 0.000001$$

$$SX1N = (3.14159 * D11 - CTG * CBG) * (B1 + 0.3) * M1 * 0.000001$$

$$SX1S = (6.28318 * R1 - CTG * CBG) * (A1 + 0.3) * N9 * 2 * M1 * 0.000001$$

程序中气道散热系数计算公式

$KS1W = 1$ ——外表面散热系数

$KS1N = 0.56 * ((CZ / 2 - 1.5) ^ 1.6 / H1) ^ 0.25$ ——内表面散热系数

$KS1S = 1.73 * (1 + C1 / ((A1 + 0.3) * N9) - (1 + (C1 / ((A1 + 0.3) * N9) ^ 2) ^ 0.5))$ ——横向气道宽度散热系数

等效散热面计算公式

$$SY1W = SX1W * KS1W$$

$$SY1N = SX1N * KS1N$$

$$SY1S = SX1S * KS1S$$

$$SY1 = SY1W + SY1N + SY1S$$

单位热负荷 $Q = W / S$ ，具体计算公式为

$$Q1 = (P1 * 1.2258 + PELD / 1.2258) / 3 / SY1$$

程序中的温升计算公式为

$$T1S = \text{Int}(0.31 * Q1 ^ 0.8 * 10) / 10$$

附：两种温升计算方法比较

1 我国干式变压器温升计算方法

我国现使用干式变压器温升计算方法是解放初期沈变所从苏联翻译过来的，以后经过国内的实践对计算公式进行了改进，比较明显的是将温升 $\tau = 0.36 q^{0.8}$ 的系数 0.36 改为内绕组为 0.33，外绕组为 0.30。另外取消了温升校正，即忽略了铁芯和绕组间相互的影响，计算简化，当然计算误差也会大些。

1.1 内绕组的温升 (τ) 计算基本公式

$$\tau = 0.33 q^{0.8}$$

$$q = W / S$$

式中： q —铁心或内绕组的单位热负荷 W/m^2

W —损耗功率 W

S —等效散热面 m^2

1.2 外绕组的温升 (τ) 计算基本公式

$$\tau = 0.30 q^{0.8}$$

1.3 散热表面的散热系数

1.3.1 绕组内部垂直表面散热系数

$$\alpha_i = 0.56 \sqrt[4]{a_i^{1.6}/H_i}$$

式中: a_i — 绕组平均气道宽

H_i — 绕组高

1.3.2 内部绕组水平表面散热系数

$$\beta_N = 1.1 \left[1 + L_N/F_N - \sqrt{1 + (L_N/F_N)^2} \right]$$

式中: L_N — 水平气道高度

F_N — 绕组辐向尺寸

1.3.3 外部绕组水平表面散热系数

$$\beta_W = 1.73 \left[1 + L_W/F_W - \sqrt{1 + (L_W/F_W)^2} \right]$$

式中: L_W — 水平气道高度

F_W — 绕组辐向尺寸

1.4 绕组有效散热面积

1.4.1 层式绕组等效散热面 S_{Yi}

$$S_{Yi} = \sum \alpha_i S_i$$

式中: S_i — 绕组散热面

α_i — 散热系数

1.4.2 饼式绕组等效散热面 S_{Yi}

$$S_i = \sum \alpha_i S_i + \sum \beta_i S_i$$

2 西欧树脂绝缘干式变压器温升计算方法

按热交换的热传导和对流、辐射的方式分别进行温升计算。

2.1 热传导

热传导是假设每层铜导线的温度一样, 通过绝缘层逐层将热量传递到表

面。从内向外绝缘层传递的热量是逐层增加，为此要算出绝缘层的等效厚度。

2.1.1 绝缘层等效厚度 J_d

层数 n 为偶数时

$$J_d = J_w + J (2+4+6+\dots + (n-2)) / n$$

层数 n 为奇数时

$$J_d = J_w + J (1+3+5+\dots + (n-2)) / n$$

2.1.2 热传导温升 τ_1

$$\tau_1 = W / S K J_d \quad (K)$$

式中： W — 绕组中产生损耗 115K (W)

S — 绕组总的散热面 (cm^2)

K — 传导系数的倒数 $K=50$ ($^{\circ}C$ mm/W)

J_d — 绝缘等效厚度 (mm)

2.2 对流/辐射

给出绕组温升 80K 时的外表面的单位热负荷为 $9.3 W/dm^2$ ($930 W/m^2$)。同时给出一组曲线族，可查到不同绕组高度和气道宽度下在 80K 的单位热负荷。首先算出各散热面在 80K 时的热负荷之和，然后与绕组损耗功率比较算出绕组的温升。

$$\tau_2 = (W/W_{80})^{0.75} \times 80 \quad (K)$$

式中： W — 绕组中产生的损耗 (115K) (W)

W_{80} — 各散热面在 80K 时的热负荷之和 (W)

2.3 绕组温升 τ

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad (K)$$

3 两种计算方法比较

3.1 中国的计算方法有温升校正，即对铁心、内外绕组温度的相互影响进行校正，西欧的没有。

3.2 西欧的计算方法有层绝缘造成的传导温升计算，将传导温升与对流/辐射温升两部分相加得出总温升。中国的计算公式中没有考虑绝缘厚度的影响，传导温升与对流/辐射温升没有分开计算。

3.3 外绕组外表面（无遮盖）在 80K 时的表面热负荷西欧计算为 $930 W/m^2$ ，中国按 $0.36 q^{0.8}$ 公式计算为 $860 W/m^2$ 。反之，根据西欧绕组温升 80K 时的外表面的单位热负荷为 $9.3 W/dm^2$ ($930 W/m^2$) 换算公式为

$$80 = K \times 930^{0.75}$$

$$K = 80 / 930^{0.75} = 0.475$$

即

$$\tau = 0.475 q^{0.75}$$

据沈变所技术权威人士刘裕华说：对于大容量产品（750kVA 以上）计算值偏高，实测值偏低。如一台 2000 kVA 干式变压器计算值为 110K，实测值为 80-90K。为此，现在已修改公式，据崔立君说：外绕组改为 $0.32 q^{0.8}$ ，内绕组改为 $0.34 q^{0.8}$ 。

3.4 气道宽度散热系数

4 _____

中国计算公式为 $0.56 \sqrt{a1^{1.6}/H1}$ ，西欧的计算是根据气道宽度(a)与绕组高度(H)查曲线族。将两者经换算后的比较列于下表，从表中可看出，西欧的气道散热系数比中国公式大。

| 绕组高 | 气道宽 | 中国系数 | 西欧系数 | 两者差(%) |
|------|-----|-------|-------|--------|
| 1500 | 15 | 0.275 | 0.29 | 5.4 |
| 1500 | 20 | 0.28 | 0.387 | 38 |
| 1500 | 25 | 0.39 | 0.45 | 15 |
| 750 | 15 | 0.315 | 0.403 | 28 |
| 750 | 20 | 0.33 | 0.468 | 42 |
| 750 | 25 | 0.34 | 0.472 | 39 |

3.5 国外提供按西欧公式计算的温升值和实验值：

树脂浇注干式变压器

1600kVA 6/0.4kV

| | 实测值 | 保证值 | 计算值 |
|------|-----|-----|-----|
| 高压绕组 | 92 | 100 | 86 |
| 低压绕组 | 97 | 100 | 97 |

3000kVA 15/6kV

| | 实测值 | 保证值 | 计算值 |
|------|-----|-----|-----|
| 高压绕组 | 97 | 100 | 80 |

| | | | |
|------|----|-----|----|
| 低压绕组 | 99 | 100 | 92 |
|------|----|-----|----|

3.6 我厂的树脂绝缘干式变压器的温升试验结果与按西欧公式计算的温升值最相近，符合使用要求。

