

设计计算

电炉变压器的温升计算

张懋鲁

(长春三鼎变压器有限公司, 吉林 长春 130052)

摘要: 对绕组发热和冷却的过渡过程进行了分析, 提出了当负载周期性变化时绕组温升的计算和冷却器的选择方法。

关键词: 电炉变压器; 温升; 计算

中图分类号: TM401+.1 文献标识码: B 文章编号: 1001-8425(2008)08-0001-07

Temperature Rise Calculation of Furnance Transformer

ZHANG Mao-lu

(Changchun Sanding Transformer Co.,Ltd., Changchun 130052, China)

Abstract: The transient from heat to cool in winding is analyzed. The methods to calculate winding temperature rise and choose cooler during periodic change of load are presented.

Key words: Furnance transformer; Temperature rise; Calculation

1 概述

为提高冶炼效率, 电炉变压器的单台容量需要不断增加, 以往的小容量电炉变压器已禁止生产。现在的电炉变压器大多数采用强迫油循环水冷 (OFWF), 个别缺水地区用强迫油循环风冷 (OFAF)。因此, 笔者在本文中只叙述强油循环冷却情况下温升的计算。

适应电炉变压器特点的温升计算尚没形成一致见解, 如冷却水的最高温度及年平均温度的规定值、绕组热负荷增量 q 值、负载周期性变化时冷却器容量的选择等。为此, 笔者提出了其计算方法。

1.1 冷却介质温度与温升限值

按照 GB1094.1 《电力变压器 第 1 部分 总则》及强迫油冷却器标准, 当电炉变压器为户内装置时, 冷却介质温度为:

最高气温: +40 ;

冷却水最高温度: +30 ;

空气和冷却水最高年平均温度: +20 ;

环境最低温度: -5 。

按照 GB1094.2 《电力变压器 第 2 部分 温升》及电炉变压器标准, 电炉变压器在连续额定容量稳态下的温升限值为:

顶层油温升: 60K;

绕组平均温升: 65K。

对铁心和绕组外部的电气接线或油箱中的结构件不规定温升限值, 但要求温升不能太高, 通常不超过 80K, 以免与其相邻的部件受到热损坏或油过度老化。

对于等级更高的绝缘系统或浸于难燃液体中的变压器, 其温升限值应按协议规定。

1.2 强迫油循环变压器的油温升

对于强迫油循环非导向 (OF) 冷却的变压器, 流经冷却器中的油绝大部分是在油箱内壁与绕组外侧间流动的。流经绕组的热油与油箱内较冷的分路油流以紊流的方式混合, 绕组顶端的油出口处到油箱顶部间充满了温度比较均匀的混合油, 混合油的温度比刚离开绕组顶端的油要低。

通常测出的顶层油温度就是该混合油的温度, 它与冷却器进口处油温相同。“底部油”的概念是指从底部进入绕组的油, “底部油”的温度用冷却器出口油的温度来表示。油平均温度是计算绕组对冷却介质平均温升的基础, 原则上它应是绕组内部冷却油的平均温度, 这在计算与试验中是很难确定的, 一般将冷却器中油的平均温度当做油箱中油的平均温度。所以, 对强油循环冷却的电炉变压器, 油顶层的

温升等于冷却器进出口处油温差的二分之一与油的平均温升之和。由冷却器标准得知,强油冷却器设计工况点为进口水(或风)温为 30,进口油温为 70。显然,冷却器进口处的油温与水(或风)温之差为 40K,此值即定义为电炉变压器油顶层的温升限值。由大量冷却器的冷却容量试验得知,冷却器进出口处油的温差约为 10K(水冷)和 6K(风冷),所以冷却器内油的平均温升约为:

$$70-30-0.5 \times 10=35\text{K} \text{ (对于水冷)}$$

$$70-30-0.5 \times 6=37\text{K} \text{ (对于风冷)}$$

显然,油平均温升与油顶层温升仅差 5K(对于水冷)和 3K(对于风冷),这比油自然循环时低很多。综上所述,标准中所规定的油顶层温升限值仅适合于油自然循环冷却的变压器,而不适合于强迫油循环冷却的变压器。

1.3 强迫油循环变压器的铜油温差

变压器运行寿命一般为 20 年~25 年,对于油浸变压器所应用的 A 级绝缘材料,与 20 年~25 年相对应的允许最高工作温度约为 98。而冷却介质(水或空气)最高年平均温度为 20,一年之中有高于也有低于 20 的时候。从热老化的观点出发,冷却介质高于 20 时的寿命损失可以由冷却介质低于 20 时寿命损失的延缓来补偿,由此可以认为与一直工作在 20 时是等效的。对于冷却方式为 ON 的油浸变压器来说,绕组最热点温度与平均温度之差约为 13K,而在 OF 方式中大概不超过 10K,但仍用 13K 温差来保证平均热点温度始终低于 98。这样,绕组的平均温升与油的平均温升之差(铜油温差) w_0 的限值为:

$$\text{对于强油水冷: } w_0=98-20-13-35=30\text{K}$$

$$\text{对于强油风冷: } w_0=98-20-13-37=28\text{K}$$

通过以上分析可知,变压器油对冷却介质的平均稳定温升和油顶层温升取决于强油冷却器的技术条件和冷却容量试验数据。所以,温升计算中可以省去油的温升计算,只计算铜油温差 w_0 即可,并使其不超过 30K(水冷)或 28K(风冷),但要按照变压器的总损耗去选择适当的冷却器。

2 额定负载下的温升计算

额定负载是指变压器长期允许的最大输出容量。例如,一炼钢炉变压器的额定容量为 40MVA,要求允许长期超铭牌容量运行 1.2 倍,变压器允许的最大输出容量为 $1.2 \times 40=48\text{MVA}$ 。

2.1 饼式绕组的铜油温差计算

这种绕组一般是用扁导线或组合导线绕制成连

续式、纠结式或内屏蔽式绕组,也包括用扁导线或换位导线绕制成低压用的双饼式或 8 字形绕组。线饼设有纵向及横向油道,线饼四周均与油接触。

绕组表面热负荷计算。

绕组表面热负荷 q 等于计算线段的散热面积除以该线段的损耗值,即:

$$q=\frac{I^2 r_0}{S}, \text{ W/m}^2 \quad (1)$$

式中 I ——线段中流过的电流, A

r_0 ——线段的电阻(75 时),

S ——线段的散热面积, m^2

经变换整理后,式(1)可改写为式(2)。

$$q=\frac{21.35 I N_c J}{L}, \text{ W/m}^2 \quad (2)$$

考虑使线饼损耗增加和散热面积减少的因素,引入一些系数和热负荷增量 q , 则式(2)可改写为:

$$q=\frac{21.35 I N_c J k_1 k_2 k_3}{k_5 L} \left(1+\frac{k_4}{100}\right)+q, \text{ W/m}^2 \quad (3)$$

式中 I ——线饼中流过的电流, A

N_c ——线饼中匝数。高压连续式绕组如是分数匝应进位为整数匝; 低压双饼式绕组为线饼实际匝数; 螺旋式绕组 $N_c=1$

J ——导线电流密度, A/mm^2

L ——线饼的周长, mm

各种饼式绕组 $L=2(n a_1+b_1)$, 当线段内侧垫有 1.5mm 及以下纸条时, $L=2n a_1+1.5 b_1$; 当线段内侧垫有 2mm 及以上纸条时, $L=2n a_1+b_1$ 。其中 n 为线饼中沿辐向的导线总根数; a_1 、 b_1 为绝缘导线的厚度及宽度

k_1 ——超铭牌容量运行倍数

k_2 ——绕组匝绝缘修正系数。当 $a_1 \leq 1.75a$ 时, $k_2=1$; 当 $a_1 > 1.75a$ 时, $k_2=\frac{a_1}{1.75a}$, 其

中 a 为裸导线厚度, mm

k_3 ——线段绝缘修正系数, $k_3=1+0.364(\quad -0.5)$; 为匝绝缘厚加上线段附加绝缘两边厚, mm

k_4 ——因漏磁场在线段中所引起的附加损耗系数, 它包括涡流和环流两部分

k_5 ——线饼的遮盖系数,

$$k_5=1-\frac{\text{沿圆周垫块数} \times \text{垫块宽度}}{\text{线饼的平均匝长}}$$

q ——线段间油道宽度校正值, W/m^2 。它与段间油道宽度与线段辐向尺寸有关, 其推荐值如表 1 和表 2 所示。

表 1 饼式绕组线段间油道宽度校正值 q

Table 1 Corrected width values, q , of line oil duct in disc winding

段间油道 宽度/mm	线段辐向尺寸/mm					
	30	31~40	41~60	61~80	81~105	106~130
3	420	520	—	—	—	—
4	280	380	530	—	—	—
4.5	0	120	240	400	500	—
5	-20	0	80	120	240	300
6	-90	-20	0	20	100	150
7.5	-170	-90	20	0	30	80

表 2 螺旋式绕组线段间油道宽度校正值 q

Table 2 Corrected width values, q , of line oil duct in helical winding

段间油道 宽度/mm	线段辐向尺寸/mm				
	<20	21~30	31~40	41~60	61~80
3	300	370	420	470	520
4	200	270	330	380	430
5	150	220	280	330	380
6	60	120	150	240	300
7.5	-60	0	30	120	180

注: (1) 当相邻线段上下油道宽度不相同, 应取油道小的值;
(2) 此表没有理论依据, 只为经验值推荐使用。

铜油温差 w_0 计算公式为:

$$w_0 = 0.113q^{0.7}, K \quad (4)$$

对于强油水冷变压器, w_0 30K; 对于强油风冷变压器, w_0 28K。在计算各个绕组的铜油温差时, 最好使各绕组的数值都接近, 一般相差 3K 以下为宜, 最大不要超过 5K, 以避免浪费材料。

w_0 也可根据绕组表面热负荷 q 按表 3 直接查出来 [$w_0=f(q)$]。

电炉变压器调压绕组经常选用层式绕组, 其表面热负荷按下式计算。

$$q = \frac{k_1 k_2 P_a}{S_a} \left(1 + \frac{k_4}{100} \right), W/m^2 \quad (5)$$

式中 P_a ——被计算绕组 75 时的直流电阻损耗, W

S_a ——被计算绕组的有效散热面积, m^2

k_1, k_2, k_4 的意义同前

铜油温差按式 (4) 计算, 其中 $q=0$ 。

2.2 强油循环冷却器的选择

2.2.1 强油循环水冷却器的选择

由于水冷却器具有 25% 额定冷却容量的储备, 所以选择冷却器时不必另加裕度, 一般可按下式进

表 3 铜油温差 w_0

Table 3 Temperature difference of copper and oil

$q/W \cdot m^2$	w_0/K	$q/W \cdot m^2$	w_0/K	$q/W \cdot m^2$	w_0/K
1 025~1 070	14.5	1 675~1 720	20.5	2 425~2 480	26.5
1 075~1 120	15	1 725~1 770	21	2 485~2 540	27
1 125~1 170	15.5	1 775~1 830	21.5	2 545~2 600	27.5
1 175~1 220	16	1 835~1 900	22	2 605~2 680	28
1 225~1 270	16.5	1 905~1 970	22.5	2 685~2 740	28.5
1 275~1 320	17	1 975~2 030	23	2 745~2 830	29
1 325~1 370	17.5	2 035~2 080	23.5	2 835~2 900	29.5
1 375~1 420	18	2 085~2 140	24	2 905~2 980	30
1 425~1 470	18.5	2 145~2 220	24.5	2 985~3 060	30.5
1 475~1 530	19	2 225~2 300	25	3 065~3 120	31
1 535~1 590	19.5	2 305~2 370	25.5	3 125~3 180	31.5
1 595~1 670	20	2 375~2 420	26	3 185~3 250	32

行计算:

$$\frac{P_0 + k_1^2 P_k}{k S_{gr} (m-1)} \quad (6)$$

式中 P_0 ——最高二次电压下的空载损耗, kW

P_k ——恒功率输出时最低二次电压下的负载损耗, kW

k_1 ——超铭牌容量运行倍数

S_{gr} ——单台水冷却器额定冷却容量, kW

m ——变压器选择的水冷却器台数, 其中列管式的要有一台备用

k ——修正系数。当冷却水最高温度不为 30 或铜油温差不为 30K 时, 每增加 (或减少) 1, 水冷却器额定冷却容量降低 (或增加) 0.03, 但铜油温差在任何时候不允许大于 32K, 所以:

$$k = 1 - 0.03 \times (a + w_0 + 65 - 30 - 30 - w) = 1 - 0.03 \times (a + w_0 - w + 5) \quad (7)$$

式中 a ——冷却水最高温度,

w_0 ——绕组铜油温差, K

w ——绕组温升限值, 没规定时 $w=65K$

【实例 1】某 90MVA 电炉变压器, 最高二次电压下的空载损耗为 65kW, 恒功率输出时最低二次电压下的负载损耗为 570kW, 绕组温升限值为 55K。变压器拟采用螺旋板式强油水冷却器, 安装地区冷却水最高温度为 35。

螺旋板式强油水冷却器本体没有备用, 只备用一台油泵。从绕组铜油温差计算中可知, 高压绕组铜油温差为 24K, 低压绕组铜油温差为 26K, 选择冷却器时应按较高铜油温差的绕组选取, 以保证任何

一个绕组的温升不超过限值。则有:

$$\frac{65+57}{0.67 \times 500 \times 2} = 0.95 < 1$$

$$k = 1 - 0.03 \times (35 + 26 - 55 + 5) = 0.67$$

所以该台电炉变压器可以选用一组 2 × 500kW 螺旋板式水冷却器。

当工况条件改变, 如果油流量不为额定流量, 水流量不为额定水流量时, 冷却器的冷却容量应相应改变。在这种情况下, 应根据冷却器制造厂提供的冷却器冷却容量曲线来确定不同工况点的冷却容量。如设计时冷却器容量裕度太大, 可根据曲线值建议减少水流量。或者选用某一组冷却器时, 按式(6)计算值略大于 1, 向上选一个规格又显浪费, 这时可根据曲线确定一个新的水流量, 增加的冷却器容量可满足散热要求。图 1 是某厂生产的 YSF-200 型强迫油循环双重管水冷却器冷却容量的试验值。必须注意, 这个曲线对不同的制造厂和不同供货时间的产品是不相同的。

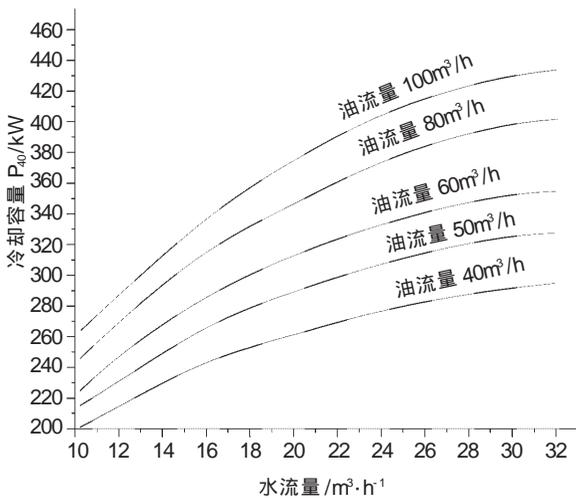


图 1 YSF-200 型水冷却器冷却容量曲线

Fig.1 Capacity curves of YSF-200 water cooler

YSF-200 型水冷却器的设计工况点是: 进口油水温差 40K、油流量 60m³/h、水流量 20m³/h。从图 1 曲线中可看到, 在设计工况点下, 该水冷却器冷却容量的检测结果为 309.9kW, 冷却器的实际冷却能力为 309.9/1.25=247.9kW。

2.2.2 强油循环风冷却器的选择

由于风冷却器只具有 5% 额定冷却容量的储备, 比水冷却器的少了很多, 所以在选用时额外加些裕度, 以应付风道堵塞、散热表面积垢及损耗试验值大于设计值等降低散热能力的影响。一般可按下式进行选择:

$$\frac{1.15(P_0 + k_1^2 P_k)}{S_g(m-1)} \geq 1 \quad (8)$$

式中 S_g ——单台风冷却器额定冷却容量, kW
其他字母含义同式(6)

应当注意, 绕组的铜油温差应小于 28K, 否则绕组温升将超过 65K。特殊情况, 绕组的铜油温差最大可为 30K, 每增加 1K, 冷却器额定容量降低 3%。

3 负载周期性变化时的变压器温升计算

大多数电炉变压器的负载曲线是周期性变化的, 而不是恒定不变的。笔者把每个周期变动的、不规则的负载简化成几个不同的稳定负载, 以便计算绕组和油的稳态温升。

在叙述负载周期性变化时变压器温升计算之前, 应首先了解发热的过渡过程。

3.1 稳定负载的发热过渡过程

在任意两种稳定的热状态之间存在着发热的过渡过程, 在这个过程中温度不断地发生规律变化。假定在一个完全均匀的具有无限大热传导系数的物体内, 在单位时间 dt 内产生的恒定热量为 P, 那么物体的热平衡方程式具有下列形式。

$$Pdt = c m d\theta + k A d\theta dt \quad (9)$$

式中 c ——比热容, J/(kg·K)

m ——物体质量, kg

θ ——物体对周围介质的温升, K

k ——传热系数, 即发热物体高于周围介质的温升为 1K 时, 每平方米的物体面积在每秒钟内所散出的瓦数, W/(m²·K)

A ——物体的散热面积, m²

t ——时间, s

式(9)的左端是在时间 dt 内物体中所产生的热量。右端的第 1 项是物体温度升高 d 所吸收的热量; 第 2 项是在时间 dt 内从物体表面散到周围介质中的热量。

由于在发热的情况下, 随着物体温度的升高, 其温升 θ 也不断升高, 单位时间内散出的热量也在增长, 然而物体的发热量却保持不变。因此, 最终会达到这样一种状态: 所产生的全部热量都散发到周围介质中, 同时物体的温度保持不变。这种状态和温度被称为稳定状态和稳定温度。

在稳定状态下, $d\theta = 0$, 式(9)具有下列形式:

$$P = k A \theta_y$$

即发热与散热相等, 这样一来, 物体稳定温升 θ_y 为:

$$\theta_y = \frac{P}{k A} \quad (10)$$

即稳定温升 γ 正比于所产生的热量, 而反比于物体的散热系数及散热面积。

如果没有热量散出, 式(9)右端的第 2 项等于零, 则式(9)方程式为:

$$Pdt = cm d\gamma$$

假设 P 为常数, 并且 c 值与温度无关, 于是得出:

$$Pt = cm\gamma \tag{11}$$

在没有散热的情况下达到稳定温度所需要的时间被称为时间常数, 并用 T 表示, 这时式(11)变为:

$$PT = cm\gamma$$

或者 $T = \frac{cm\gamma}{P}$

将式(10)代入上式, 求出:

$$T = \frac{cm}{kA} \tag{12}$$

将式(9)各项除以 Ak, 并将式(10)和式(11)代入, 得出:

$$\frac{Pdt}{Ak} = \frac{cmd}{Ak} + \frac{kA dt}{Ak}$$

即: $\gamma dt = T d\gamma + dt$

或者 $\gamma - T = T \frac{d\gamma}{dt}$

此方程的通解具有下列形式:

$$\gamma = Ae^{t/T}$$

积分常数 A 可以根据起始条件求出。在 t=0 瞬间, 把 γ 视为起始值 γ_0 。且有 $e^{t/T}=1$, 则:

$$A = \gamma_0$$

所以 $\gamma = (\gamma_0) e^{t/T} = \gamma_0 (1 - e^{-t/T}) + \gamma_0 e^{-t/T}$ (13)

式(13)就是完全均匀物体在单位时间内产生恒定热量时的发热方程式。

如果起始温升等于零, 即 $\gamma_0=0$, 那么:

$$\gamma = \gamma_0 (1 - e^{-t/T}) \tag{14}$$

为了得出物体的冷却方程式, 此时 P=0, $\gamma_0=0$, 则有:

$$\gamma = \gamma_0 e^{-t/T} \tag{15}$$

根据式(13)~式(15), 在理论上达到稳定的温升要无穷大的时间, 实际上这个时间可以认为等于 4.6T, 因为:

$$e^{-t/T} = e^{-4.6T/T} = e^{-4.6} = 0.01, \text{ 而 } 1 - e^{-4.6} = 0.99$$

绕组和油的时间常数随其质量与时间 t 的不同是变化的, 求起来很复杂。按照 GB/T15164 《油浸式电力变压器负载导则》标准中的规定, 绕组的时间常数很小(5min~10min), 对于 OF 和 OD 冷却方式

的油时间常数为 1.5h。所以变压器绕组达到稳定温度时只需要 20min~30min, 而变压器油则需要 6h~7h 左右。

图 2 是额定稳定状态下的绕组发热和冷却曲线。

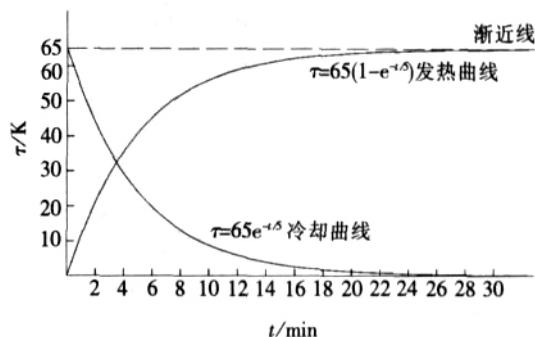


图 2 绕组发热与冷却曲线

Fig.2 Heat and cool curves of winding

图 2 曲线说明:

(1) 发热曲线是设定起始温升等于零, 绕组的时间常数 T=5min, 那么 $\gamma = 65(1 - e^{-t/5})$, 其 30min 的计算结果见表 4。

表 4 起始温升等于零时的温升计算结果

Table 4 Temperature rise data when the initial temperature rise is equal to zero

t/min	/K	t/min	/K	t/min	/K	t/min	/K
0	0	8	51.9	16	62.4	24	64.5
1	11.8	9	54.3	17	62.8	25	64.56
2	21.4	10	56.2	18	63.2	26	64.64
3	29.3	11	57.8	19	63.5	27	64.71
4	35.8	12	59.1	20	63.8	28	64.76
5	41.1	13	60.2	21	64.0	29	64.80
6	45.4	14	61.0	22	64.2	30	64.84
7	49.0	15	61.8	23	64.3		

(2) 冷却曲线是设定起始温升为 65K, 绕组的时间常数 T=5min, 那么 $\gamma = 65e^{-t/5}$, 其 30min 的计算结果见表 5。

3.2 负载周期性变化时变压器的发热与热计算

大多数电炉变压器负载呈周期性变化, 这时可用电流的方均根值代替周期性变化的负载, 这种方法的实质是将周期性变化的实际负载用一个在平均损耗方面与它等效的恒定负载来代替。

但从图 2 绕组发热和冷却曲线可看出, 在 t=4T=20min 时, 绕组离稳定温升只差 1.2K, 如果负载长时间(例如大于 15min)超过额定值, 那么实际温升可能大大超过按电流方均根值计算的温升。计算表明, 只有在周期内大于额定电流的运行时间不超

表 5 起始温升为 65K 时的温升计算结果

Table 5 Temperature rise data when the initial temperature rise is equal to 65K

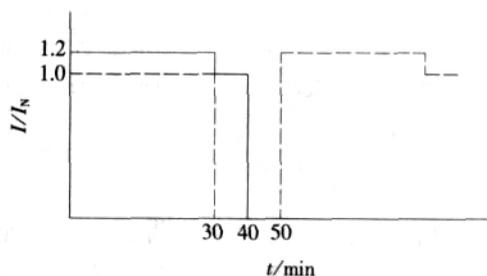
t/min	/K	t/min	/K	t/min	/K	t/min	/K
0	65	8	13.1	16	2.6	24	0.53
1	53.2	9	10.7	17	2.2	25	0.44
2	43.6	10	8.8	18	1.8	26	0.36
3	35.7	11	7.2	19	1.5	27	0.29
4	29.2	12	5.9	20	1.2	28	0.24
5	23.9	13	4.8	21	1.0	29	0.20
6	19.6	14	4.0	22	0.80	30	0.16
7	16.0	15	3.2	23	0.65		

过 10min, 而且电流与额定值之比不超过两倍的情况下, 才允许用方均根值电流去计算绕组温升。然而电炉变压器却满足不了这一条件, 其超铭牌容量运行时间常在 20min~25min 或更多, 这样绕组温升的计算通常只按允许的超铭牌容量运行倍数值计算, 在其他值下的运行只做为寿命的额外增加。

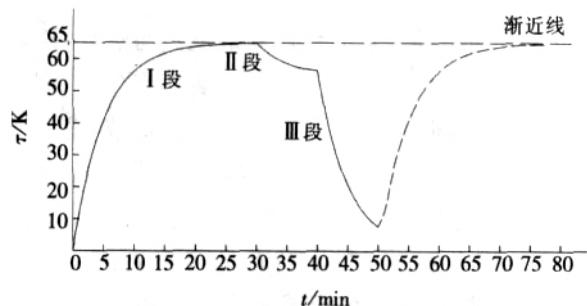
图 3 为一长弧冶炼炼钢电弧炉变压器典型负载曲线及绕组发热、冷却曲线, 这条曲线能反映绕组温升的一般变化规律。

图 3 曲线说明:

(1) 按照图 3a 典型负载曲线, 在冶炼的前 30min 内, 电炉变压器的平均输出电流按 $1.2I_N$ 控制, 此时的绕组稳定温升限值应为 65K。如果绕组时间常数 $T=5\text{min}$, 那么其 30min 内的绕组发热完全同于表 4 的数值, 即为曲线 I 段。



(a) 典型负载曲线



(b) 绕组发热、冷却曲线

图 3 典型负载曲线及绕组发热、冷却曲线

Fig.3 Typical load winding heat and cool curves

(2) 按照图 3a 典型负载曲线, 在冶炼的 30min~40min 内, 电炉变压器的平均输出电流由 $1.2I_N$ 转至 $1.0I_N$ 控制, 此时的绕组稳定温升大概为 55K。这时绕组相当于二种工作状态的合成。一是当 $P=0$, 绕组起始温升为 64.84K, 按照 $=64.84e^{-t/5}$ 的冷却规律变化; 二是在 I_N 作用下, 按照 $55(1-e^{-t/5})$ 的发热规律变化, 二者的代数和即为绕组任意时刻的温升值。其 10min 的计算结果见表 6, 即为曲线 II 段。

表 6 电流由 $1.2I_N$ 降到 $1.0I_N$ 的温升计算结果Table 6 Temperature rise data when current reduces from $1.2I_N$ to $1.0I_N$

t/min	($i_1=64.84e^{-t/5}$)/K	($i_2=55(1-e^{-t/5})$)/K	(i_1+i_2)/K
0	64.84	0	64.84
1	53.1	10.0	63.1
2	43.5	18.1	61.6
3	35.6	24.8	60.4
4	29.1	30.3	59.4
5	23.9	34.8	58.7
6	19.5	38.4	57.9
7	16.0	41.4	57.4
8	13.1	43.9	57.0
9	10.7	45.9	56.6
10	8.8	47.6	56.4

(3) 按照图 3a 典型负载曲线, 在冶炼的 40min~50min 内, 电炉处于出钢、修补炉和上料时间, 电炉变压器停电, $P=0$, 其绕组温升按照 $=56.4e^{-t/5}$ 冷却规律变化, 其 10min 的计算结果见表 7, 即为曲线 III 段。

表 7 停电后 10min 的温升计算结果

Table 7 Temperature rise data after 10min of power failure

t/min	/K	t/min	/K
1	46.2	6	17.0
2	37.8	7	13.9
3	31.0	8	11.4
4	25.3	9	9.3
5	20.7	10	7.6

(4) 当电炉再次起炉时, 前 30min 仍按 $1.2I_N$ 运行, 变压器绕组的起始温升 $\tau_0=7.6\text{K}$, 绕组发热方程式为 $=65(1-e^{-t/5})+7.6e^{-t/5}$, 其前 20min 的计算结果见表 8, 即为曲线虚线部分, 其稳定温升为 65K。

另外, 由于油的时间常数很大, 达到油稳定温升的时间远大于电炉冶炼周期时间, 所以电流的方均根值能准确地反映周期内的变压器损耗, 它也称为等价负载电流, 它与周期性变化的负载对油平均温

表 8 再次起炉后的温升计算结果

Table 8 Temperature rise data after second start of furnace

t/min	$[i_1=65(1-e^{-t/5})]/K$	$(i_2=7.6e^{-t/5})/K$	$(i_1+i_2)/K$	t/min	$[i_1=65(1-e^{-t/5})]/K$	$(i_2=7.6e^{-t/5})/K$	$(i_1+i_2)/K$
1	11.8	6.2	18.0	11	57.8	0.84	58.64
2	21.4	5.1	26.5	12	59.1	0.69	59.79
3	29.3	4.2	33.5	13	60.2	0.56	60.76
4	35.8	3.4	39.2	14	61.0	0.46	61.46
5	41.1	2.8	43.9	15	61.8	0.38	62.18
6	45.4	2.3	47.7	16	62.4	0.31	62.71
7	49.0	1.9	50.9	17	62.8	0.25	63.05
8	51.9	1.5	53.4	18	63.2	0.21	63.41
9	54.3	1.3	55.6	19	63.5	0.17	63.67
10	56.2	1.0	57.2	20	63.8	0.14	63.94

升的影响是等效的。所以, 负载周期性变化的电炉变压器可以用等价负载电流去选择冷却器的额定容量。

传统炼钢炉变压器的典型负载是: 在熔化期和氧化前期, 负载电流按 1.2 倍额定电流控制, 最大允许持续时间为 2.5h; 在氧化后期和还原期, 负载电流按额定电流控制, 持续时间为 1.5h。它的等价负载电流为:

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1.2^2 \times 2.5 + 1^2 \times 1.5}{2.5 + 1.5}} I_N = 1.12 I_N$$

这时, 应当用 $1.12 I_N$ 去计算绕组铜油温差, 用 $1.12 I_N$ 去计算所需冷却器的额定功率。也就是在式 (3) 和式 (5) 中的 $k_1=1.2$, 而在式 (6) 和式 (8) 中的 $k_1=1.12$, 二者并不相等。

因此, 在设计某一电炉变压器时, 必须与用户共同制定一个简化的负载曲线, 它能包容最大的负载要求, 并据此计算绕组铜油温差和冷却器额定功率, 这是十分必要和有意义的。

4 结论

收稿日期: 2007-09-12

作者简介: 张懋鲁(1943-), 男, 山东蓬莱人, 长春三鼎变压器有限公司技术总监, 高级工程师, 长期从事电炉变压器的设计研究工作。

目前常用的两种计算方法均存在不足之处。按超铭牌容量运行倍数计算温升, 冷却器选用的额定容量偏大; 按等价负载电流计算温升, 由于绕组时间常数仅为 5min~10min, 在超铭牌容量运行期间绕组温升已超过限值。笔者通过对绕组发热和冷却过渡过程的分析, 提出了当负载周期性变化时, 应按超铭牌容量运行倍数去计算绕组的铜油温差, 按等价负载电流去选择冷却器。这样, 绕组温升在运行中保证不超过温升限值, 而冷却器的选择也更为科学、节约。因此, 要求在设计某一电炉变压器时, 必须与用户共同制定一个简化的负载曲线。

参考文献:

- [1] [苏]C. 瓦修斯基. 变压器的理论与计算[M]. 崔立君、杜恩田译. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [2] GB/T15164-1994, 油浸式电力变压器负载导则[S].
- [3] GB1094.1-1996, 电力变压器 第 1 部分 总则[S].
- [4] GB1094.2-1996, 电力变压器 第 2 部分 温升[S].
- [5] 崔立君. 特种变压器理论与设计[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1996.

宝钢集团顺利产出首卷合格取向硅钢板卷

日前, 宝钢取向硅钢机组已顺利产出第一卷合格取向硅钢板卷, 这标志着宝钢历经 10 年探索, 终于自主掌握了代表钢铁业顶级制造能力的取向硅钢工艺技术, 实现了中国钢铁业自主集成创新的重大突破。

据介绍, 此次宝钢投产的取向硅钢机组年设计产能为 10 万吨, 采用独特的工艺技术路线, 代表了当今世界先进水平, 部分装备在全世界属首次制造。