

高等学校教材

电力变压器运行

武汉水利电力学院 徐树铨 主编

水利电力出版社

(京)新登字115号

高等学校教材

电力变压器运行

武汉水利电力学院 徐树铨 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市京东印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 7.25印张 158千字
1993年6月第一版 1993年6月北京第一次印刷

印数 0001—5280 册

ISBN 7-120-01756-X/TM·466

定价2.00元

前 言

本书是由能源部电力类教学委员会组织编写的，作为“电力系统及其自动化”专业的选修课教材。

电力变压器是应用极其广泛的主要电气设备。变压器的发热冷却和负荷能力是运行中常遇的问题，确定绕组最热点的温度对运行有重要意义，本书特别加以介绍。对于应用日益广泛的自耦变压器、分裂绕组变压器和全星形变压器，先从理论上对它们特点作了较为详细和深入的阐述，然后讨论运行的有关问题。三绕组变压器并联运行时的负荷分配，调压装置的结构及运行，都是运行人员应该掌握的知识。油的气相色谱分析是发现和判别变压器故障的有效方法，故对其原理及方法作了介绍。变压器的噪声对环境和运行人员都产生不利影响，书中对变压器噪声的产生、影响因素及限制方法也作了介绍。

为了便于自学，每章末附有小结。为了加深理解每章内容和巩固所学知识，每章末还附有思考题和习题。

本教材共分为八章。第三章和第五章由东南大学刘中岳编写，其它各章由武汉水利电力学院徐树铨编写。全书由徐树铨主编，华中理工大学胡能正主审。

本书编写过程中，曾得到不少单位支持，并提供了大量资料和有益的建议，对此表示衷心感谢。

编 者

1990.11.

目 录

前 言

第一章 变压器的冷却系统及发热计算	1
第一节 变压器的冷却系统	1
第二节 变压器的稳定温升计算	2
第三节 变压器的暂态温升计算	5
第四节 变压器绕组最热点的温升计算	8
第五节 确定绕组最热点温升的简单方法	11
第二章 变压器的负荷能力	15
第一节 变压器的绝缘老化	15
第二节 变压器的过负荷能力	18
第三章 自耦变压器的运行	24
第一节 自耦变压器的工作原理	24
第二节 自耦变压器的等值电路	27
第三节 自耦变压器的运行方式	30
第四节 三绕组自耦变压器的功率损耗计算	37
第五节 自耦变压器中性点运行方式与工频过电压	44
第六节 自耦变压器在电力系统中的应用	58
第四章 分裂绕组变压器的特点及运行	63
第一节 分裂变压器的特点	63
第二节 分裂变压器的运行	67
第五章 全星形变压器的运行	70
第一节 概述	70
第二节 全星形变压器的零序阻抗	70
第三节 全星形变压器对系统谐波的影响	73
第四节 全星形变压器对零序电流保护的影响	76
第五节 全星形变压器在系统中的应用	78
第六章 三绕组变压器的并联运行	81
第一节 概述	81
第二节 普通三绕组变压器的并联运行	81
第三节 不满足变压器并联条件的运行	87
第七章 变压器调压装置及其运行	92
第一节 变压器的调压方法与接线	92
第二节 变压器调压分接开关的结构	94
第三节 调压分接开关的维护与运行	96

第四节	有载分接开关的自动控制装置简介	98
第八章	变压器油的气相色谱分析与噪声限制	100
第一节	变压器油的气相色谱分析	100
第二节	变压器的噪声限制	102
参考文献	108

第一章 变压器的冷却系统及发热计算

本章介绍变压器常用的冷却系统，叙述确定变压器各部分运行允许温升的方法，以及在不同负荷下各部分允许温升的计算。通过例题，介绍变压器暂态温升的计算方法。最后还着重讨论变压器绕组最热点温升的确定，除阐述单油流及多油流系统中确定绕组最热点温升的计算方法外，还介绍确定绕组最热点温升的简单方法。

第一节 变压器的冷却系统

冷却系统是变压器的重要组成部分，它保证变压器各部分的温度保持在规定值以内。变压器的冷却系统包括两部分：①内部冷却系统，它保证绕组、铁芯的热散入油中；②外部冷却系统，它保证油的热散入周围介质中。

下面介绍常用的油浸变压器的冷却系统。

一、油自然循环冷却系统

1. 油自然循环空气自然冷却

油自然循环空气自然冷却变压器构造简单，没有冷却的辅助设备，油在变压器内自然循环，并以对流方式将热量传给箱壁，再散入空气中。图 1-1(a) 示出该冷却系统的示意图。这种冷却系统一般用于容量在7500kVA以下、电压在110kV以下的变压器。

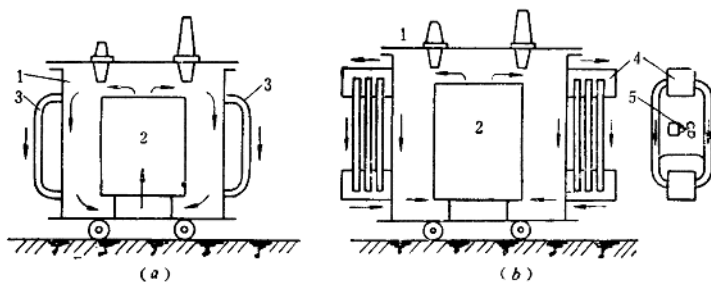


图 1-1 油自然循环冷却系统

(a)油自然循环空气自然冷却；(b)油自然循环强迫空气冷却
1—油箱；2—铁芯及绕组；3—散热器；4—散热器；5—风扇

当容量小于50kVA时，变压器的油箱具有光滑表面，不设冷却器。容量大于50kVA时，为了保证热量顺利地散入周围空气中，则加装冷却器以增大油箱的冷却表面。我国生产的100~1500kVA变压器油箱多采用扁管式冷却器。容量更大的变压器，油箱上安装扁管形散热器，散热器可以拆下，便于运输与检修。

2. 油自然循环强迫空气冷却

10000kVA 以上的变压器, 采用油自然循环空气自然冷却不能满足散热的要求, 因为在绝缘容许的尽可能小的油箱尺寸下, 不能获得必需的散热表面。这时往往采用油自然循环强迫空气冷却。这种冷却系统是在散热器中加装一至二台电风扇, 用空气强迫吹散热器, 其原理图如图1-1(b)所示。采用电风扇吹散热器后, 散热器的散热系数可提高0.5~1倍。这种冷却系统的散热器, 按强迫空气冷却和自然空气冷却时都具有较高散热系数进行设计, 因此容许在电风扇停运时工作, 不过对油温及负荷均有限制。

二、强迫油循环冷却系统

由于大型变压器采用油自然循环冷却系统不能满足散热的要求, 故采用强迫油循环的冷却系统。

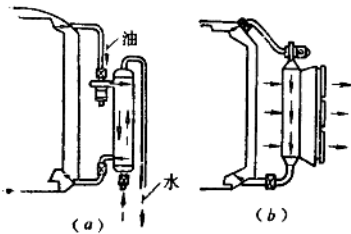


图 1-2 强迫油循环冷却系统示意图
(a)强迫油循环水冷; (b)强迫油循环风冷

1. 强迫油循环风冷

图1-2(b)示出强迫油循环风冷的示意图。在这种冷却系统中, 采用冷却器进行油和空气的热交换, 实现油和空气的强迫循环。冷却器一般装在变压器的基座上。由于油和空气流动速度快, 所以这种系统的散热效率高, 而且结构紧凑。与自然油循环系统相比, 这种系统缩小了变压器的尺寸, 降低了材料消耗和造价, 但是散出1kJ热量所消耗的功率却要增大。

2. 强迫油循环水冷

图1-2(a)示出强迫油循环水冷的示意图。在这种冷却系统中, 采用冷却器进行油和水的交换, 实现油和水的强迫循环。强迫油循环风冷一般用于屋外配电装置, 而强迫油循环水冷既可用于屋外, 也可用于屋内。由于水的散热效率比空气高很多, 所以强迫油循环水冷系统与风冷系统比较: 散出1kJ热量所消耗的材料和造价都低得多; 所需冷却器数量也少得多, 维修工作量大为减少; 散出1kJ热量所消耗的电能也比较少。但是在采用水冷系统时, 需要冷却水源, 而且安装水冷器处环境温度不能低于+1℃, 以防冻结, 因为即使少量水冻结, 也有可能使冷却器损坏。此外, 冷却器的防漏也是一个很重要的问题。

近年来还出现导向强迫油循环风冷或水冷系统。这种系统强迫油流通过绕组内部, 使得绕组的冷却大为改善, 从而减小变压器的尺寸, 它用于特大容量的变压器上。

第二节 变压器的稳定温升计算

一、变压器的温度分布

变压器运行时, 绕组和铁芯中的电能损耗转变为热能, 使变压器各部分的温度升高。在油浸式变压器中, 绕组和铁芯的热量先传给油, 然后通过外壳散到周围介质中。图1-3示出油浸变压器各部分的温度分布。

(1) 曲线1-2表示热量由绕组和铁芯内部传至绕组和铁芯表面, 传热方式为传导。

这部分温差通常只有几度。

(2) 曲线2-3表示热量由绕组和铁芯表面传至变压器油中, 传热方式为对流。这部分温差约为绕组对空气温升的20%~30%。

(3) 曲线4-5表示热量由油传至油箱或散热器内表面, 传热方式为对流。这部分温差不大。

(4) 曲线5-6表示热量由油箱或散热器内表面传至外表面, 传热方式为传导。这部分温差不超过2~3℃。

(5) 曲线6-7表示热量由油箱或散热器外表面传至周围空气中, 传热方式为对流与辐射。这部分温差较大, 约占绕组对空气温升的60%~70%。

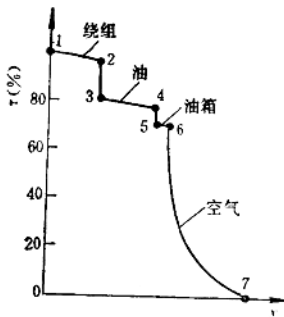


图 1-3 油浸式变压器各部分的温度分布

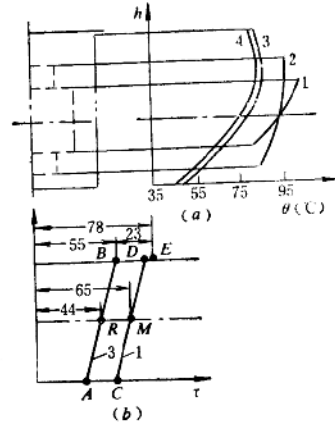


图 1-4 油浸自冷式变压器沿高度的温度分布

(a) 实际变化图; (b) 分析计算图

1—绕组温度; 2—铁芯温度; 3—油温; 4—油箱外表面温度; h—高度; θ —温度; τ —温升

图1-4示出油浸变压器沿高度的温度分布。图是按油浸自冷式变压器处在额定运行条件时作出的。图1-4(a)为实测值, 图1-4(b)为计算值。斜线AB表示油对空气的温升, 上层油的温升最高, 达55℃。油对空气的平均温升约为最大温升的80%, 即44℃。斜线CD表示绕组对空气的温升, 用电阻温度计测出的绕组对空气的平均温升为65℃。斜线AB和CD沿水平方向的差值, 表示绕组绝缘与它附近油间的温差, 图中RM间的温差为21℃。绕组最热处的温升比上层油的温升高23℃, 达到55+23=78(℃)。额定状态下空气的温度为20℃, 所以绕组最热处的温度为78+20=98(℃)。此为绕组能长期运行的最高温度。对于强迫油循环冷却变压器, 沿高度的温度分布与图1-4相似, 只不过斜线的斜率较大。

对于实际的变压器, 绕组最热点的位置与上述情况有些差别。试验表明, 绕组温度最热点在高度方向的70%~75%处, 而沿径向则在绕组厚度(由内径算起)的 $\frac{1}{3}$ 处。

二、变压器的稳定温升计算

为了使变压器能安全经济运行, 变压器国家标准规定了在一定使用条件下各部分的温

升极限。

变压器各部分温升，分别用下列符号表示：

τ_{r-y} ——绕组（或铁芯）对油的温升；

τ_{y-k} ——油对空气的温升；

τ_{r-k} ——绕组（或铁芯）对空气的温升。

下列各式显然成立

$$\left. \begin{aligned} \tau_{r-k} &= \tau_{y-k} + \tau_{r-y} \\ \theta_y &= \theta_k + \tau_{y-k} \\ \theta_r &= \theta_k + \tau_{y-k} + \tau_{r-y} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中 θ_y 、 θ_r 、 θ_k ——油、绕组和空气的温度。

此外，还应区分最大温升与平均温升。绕组或油的最大温升是指其最热处的温升，而绕组或油的平均温升则是指整个绕组或全部油的平均温升。

变压器国家标准的温升极限，是基于以下条件来规定的：变压器在环境温度为+20℃下带额定负荷长期运行，使用期限约为20年，对应的变压器绕组绝缘的最热点温度约为98℃。

对于自然循环和一般的强迫油循环变压器，绕组最热点温度高出绕组平均温度约13℃；而对于导向强迫油循环变压器，则约高出8℃。因此，对于自然油循环和一般强迫油循环变压器，保证正常使用期限内绕组的平均温升极限为98-20-13=65(℃)；同理可求出导向强迫油循环变压器的绕组平均温升极限为70℃。

绕组对油的平均温升又叫铜油温差，它与变压器结构、负荷电流及冷却方式有关。当变压器带额定负荷时，设计上一般应保证下列铜油温差 τ_{r-y} ，

油自然冷却	$\tau_{r-y} = 21^\circ\text{C}$
一般强油冷却	$\tau_{r-y} = 30^\circ\text{C}$
导向强油冷却	$\tau_{r-y} = 30^\circ\text{C}$

为了保证绕组在平均温升极限内运行，变压器油对空气的平均温升 τ_{y-k} 应为

油自然冷却	$\tau_{y-k} = 65 - 21 = 44 (^\circ\text{C})$
一般强油冷却	$\tau_{y-k} = 65 - 30 = 35 (^\circ\text{C})$
导向强油冷却	$\tau_{y-k} = 70 - 30 = 40 (^\circ\text{C})$

在一般情况下，自然油循环的变压器，其顶层油温高出平均油温11℃；一般强迫油循环和导向强迫油循环的变压器则高出5℃。所以为保证绕组在平均温升极限内运行，变压器顶层油对空气温升 τ_{y-km} 为

油自然冷却	$\tau_{y-km} = 44 + 11 = 55 (^\circ\text{C})$
一般强油冷却	$\tau_{y-km} = 35 + 5 = 40 (^\circ\text{C})$
导向强油冷却	$\tau_{y-km} = 40 + 5 = 45 (^\circ\text{C})$

表1-1列出国家标准规定的额定使用条件下各类变压器各部分的使用温升极限。额定使用条件为：最高气温+40℃；最高日平均气温+30℃，最高年平均气温+20℃，最低气温-30℃。

表 1-1

变压器各部分的允许温升 (°C)

	油自然	强油循	导向强油		油自然	强油循	导向强油
	循 环	环风冷	循环风冷		循 环	环风冷	循环风冷
顶层油对空气的温升 τ_{y-km}	55	40	45	绕组对油的平均温升 τ_{i-y}	21	30	30
油对空气的平均温升 τ_{y-k}	44	35	40	绕组对空气的平均温升 τ_{i-k}	65	65	70

表1-1所示的温升是对额定负荷而言。如果变压器的负荷与额定负荷不同, 设实际负荷与额定负荷之比为 $K=S/S_n$, 则油和绕组的温升可用下述公式计算。

(1) 任意负荷下, 顶层油的温升(最大值)为

$$\tau'_{y-km} = \tau_{y-km} \left(\frac{1+dK^2}{1+d} \right)^x \quad (1-2)$$

式中 d ——额定负荷下的短路损耗与空载损耗之比, 约为2~6;

x ——计算油温用的指数, 对于自然油循环变压器, $x=0.8\sim 0.9$; 对于强迫油循环变压器, $x=1$ 。

(2) 任意负荷下, 绕组对油的温升(最大值)为

$$\tau'_{i-ym} = (\tau_{i-km} - \tau_{y-km}) K^{2y} \quad (1-3)$$

式中 y ——计算最热点温升用的指数, 也随冷却方式的不同而不同, 一般可取 $y=x$ 。

(3) 任意负荷下, 绕组最热点对空气的温升为

$$\tau_{i-km} = \tau'_{i-ym} + \tau'_{y-km} = \tau_{i-km} \left(\frac{1+dK^2}{1+d} \right)^x + (\tau_{i-km} - \tau_{y-km}) K^{2y} \quad (1-4)$$

第三节 变压器的暂态温升计算

在实际运行中, 变压器的负荷不断变化, 温升也在不断变化, 处在不稳定的状态下。变压器暂态下的发热近似地可看作均匀导体的发热, 任何瞬间 t 的温升可用下式计算

$$\tau = \tau_s + (\tau_0 - \tau_s)(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (1-5)$$

式中 τ ——变压器绕组或油对空气的温升;

τ_0 —— $t=0$ 时, 变压器绕组或油对空气的起始温升;

τ_s ——稳定温升, 额定负荷时可用表1-1之值, 不是额定负荷时可用式(1-2)~式(1-4)分别计算;

T ——发热时间常数, 变压器油一般为2.5~3.5h, 绕组一般为5~6min。

先研究变压器运行于二段负荷曲线时的暂态温升计算。图1-5示出负荷为 K_1 和 K_2 , 对应时段为 t_1 和 t_2 的二段负荷曲线和变压器各部分的温升曲线。从图中可以看出, 在第二段负荷 K_2 下, 油对空气的温升趋向由 K_2 所确定的稳定温升 τ_{y-k2s} , 但由于时间 t_2 不够长, 油来不及达到稳定温升 τ_{y-k2s} , 而只达到 t_2 段终了时的 τ_{y-k2} 。 τ_{y-k2} 可用式(1-5)求出,

但需知道 t_2 段开始时的 τ_{y-k_1} 。若负荷 K_1 所经历的时间 t_1 足够长，油在 t_1 时间内已达到由 K_1 所确定的稳定温升 τ_{y-k_1w} ，则 $\tau_{y-k_1} = \tau_{y-k_1w}$ 。由此可得到 t_2 段任意瞬间油对空气温升的计算步骤如下：先假定 t_1 时间内油已达到 K_1 所确定的稳定温升 τ_{y-k_1w} ，用式(1-2)求出 τ_{y-k_1} ；再用式(1-2)求出对应于 K_2 的稳定温升 τ_{y-k_2w} ；最后用式(1-5)计算 t_2 段上任意瞬间油对空气的温升，计算时取 $\tau_{y-k_2} = \tau_{y-k_1w}$ ， $\tau_w = \tau_{y-k_2w}$ ， T 等于油的发热时间常数 T_y 。当负荷由 K_2 减至 K_1 时，温升的下降曲线也可用上述方法求出。

图1-5中 τ_{y-k} 曲线是根据油对空气的温升曲线加上相应的绕组对油的稳定温升值绘制而成。由于绕组热容量小并被油很好冷却，绕组的发热时间常数只有5~6min，比油的时间常数小得多，因此，可以认为负荷从 K_1 变到 K_2 时，绕组对油的温升能瞬时跃变，即由 K_1 负荷时的稳定值跃变到由 K_2 负荷时的稳定值。 K_1 和 K_2 负荷下绕组对油的稳定值可由式(1-3)求出。

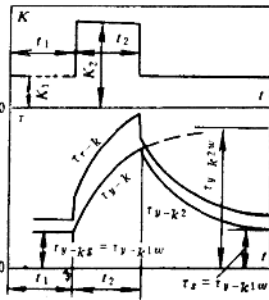


图 1-5 二段负荷曲线和各部分温升变化曲线

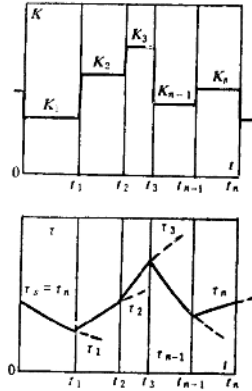


图 1-6 多段负荷曲线和油对空气温升变化曲线

实际的负荷曲线是多段的，图1-6示出多段的负荷曲线及油对空气的温升变化曲线。由于各段时间短，所以每一阶段的温升都达不到稳定值。应用上述方法和式(1-5)求温升曲线是很麻烦的。从假定初始温升 τ_0 出发，依次求出各阶段的温升 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 、...、 τ_n （ n 为阶段数），最后回到 $\tau_n = \tau_0$ ，这得花费不少时间。在这种情况下，宜采用下式进行计算

$$\tau_x = \tau_n = \frac{1}{A_n - 1} \sum_{i=1}^n \tau_{iw} (A_i - A_{i-1}) \quad (1-6)$$

式中 $A_i = e^{-\frac{t_i}{T}}$;

t_1, t_2, \dots, t_i ——从计算段开始的各段时间;

i ——段的顺序号;

n ——段数;

τ_{iw} —— i 段负荷为 K_i 时的稳定温升。

x 段终了时的温升可用下式计算

$$\tau_x = \frac{1}{A_x} \left[\tau_0 + \sum_{i=1}^x \tau_{iw} (A_i - A_{i-1}) \right] \quad (1-7)$$

式中符号含义与式(1-6)相同。

计算可从任何一段开始。知道各段终了时的温升,即可用式(1-5)计算任意瞬间的温升。

【例 1-1】 已知变压器的负荷曲线如图1-7所示,计算并绘制油和绕组的温升曲线。油的发热时间常数为3.5h, 损耗比 $d=5$, 冷却方式为自然冷却($x=0.8$)。

解: 负荷曲线分为6段,各段延续时间为2至8时。最大负荷 $K=1.3$,发生在18至20时;最小负荷 $K=0.2$,发生在22至6时,取负荷突然下降的22时作为开始计算时间,计算结果列于表1-2中。

油对空气的初始温升由式(1-6)求出

$$\tau_o = \frac{1}{A_n - 1} \sum_{i=1}^n \tau_{io} (A_i - A_{i-1}) = \frac{1}{951 - 1} \times 53224 = 56^\circ\text{C}$$

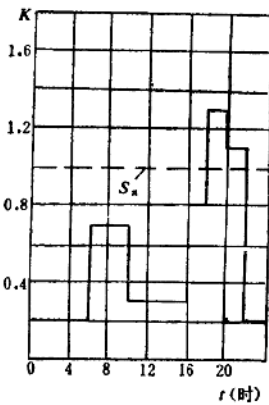


图 1-7 例1-1的负荷曲线

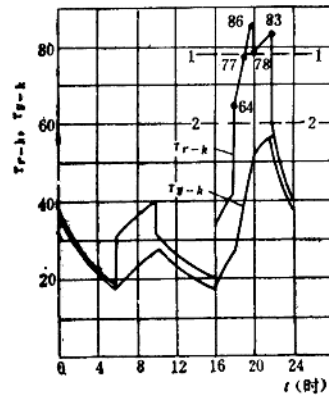


图 1-8 例1-1计算结果得出的温升曲线

表 1-2

例 1-1 计算结果

i	t_i	t_i/T	$A_i = e^{\frac{t_i}{T}}$	$A_i - A_{i-1}$	K_i	τ_{io}	$\tau_{io} \times (A_i - A_{i-1})$	$\sum \tau_{io} \times (A_i - A_{i-1})$	τ_o	$\Delta\tau_r$	$\tau_o + \Delta\tau_r$
0	0	0	1.0	—	—	—	—	—	—	—	—
1	8	2.286	9.8	8.8	0.2	15.2	134	134	15.2	1.75	16.95
2	12	3.43	31	21.2	0.7	35.3	748	882	29.4	13.0	42.4
3	18	5.14	171	140	0.3	17.06	2472	3354	19.75	3.35	23.08
4	20	5.71	303	132	0.8	41.35	5458	8812	29.2	16.1	45.3
5	22	6.286	537	234	1.3	79.1	18509	27321	51	35.0	86.0
6	24	6.857	951	416	1.1	62.57	25903	53224	56	26.8	82.8

这是开始计算的22时的油对空气温升。每段结尾处油对空气的温升可由式(1-7)求出。油和绕组对空气的温升变化曲线示于图1-8中。

由表1-2和图1-8可以看出,在22时,油对空气的最大温升达 56°C ,其它时间均小于额定值 55°C 。绕组最热点对空气的温升大部分时间小于 78°C ,只在晚上最大负荷时才大于

78°C (图中用水平虚线1-1画出)。由绕组最热点对空气的温升加上空气温度 θ_a ，可得到绕组最热点的温度。如果空气温度是 $\theta_a = +20^\circ\text{C}$ ，则20h时绕组的最高温度为 $86 + 20 = 106$ (°C)，超出绕组的额定温度8°C (额定温度为98°C)。

第四节 变压器绕组最热点的温升计算

一、单油流系统

单油流系统是指油只流经绕组外表与油箱壁之间，所以油自然循环冷却系统可近似地看作是单油流系统。这种系统具有下列特点 (图1-9)：

- (1) 油温沿高度线性增加。
- (2) 在绕组所有高度上，绕组线圈对附近油层的平均温升相同。
- (3) 所有绕组出口处的油温相同，等于顶层油温。
- (4) 所有绕组入口处的油温相同，等于底层油温。
- (5) 散热器或冷却器入口及出口的油温分别等于顶层和底层油温。

单油流系统绕组最热点对周围空气的温升 τ_{r-km} 由下式确定

$$\tau_{r-km} = \tau_{y-km} + \tau_{r-ym} = \tau_{r-ym} + b\tau_{r-y} \quad (1-8)$$

式中 τ_{y-km} ——顶层油对空气的温升；

τ_{r-ym} ——绕组最热点对顶层油的温升；

τ_{r-y} ——绕组平均温度对平均油温的温升；

b ——考虑绕组最热点温度与其平均温度差值的系数，对于自然油循环， $b=1.1$ ；对于强迫油循环， $b=1.31$ 。

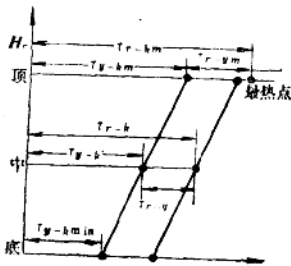


图 1-9 单油流系统变压器温升分布

τ_{y-k} 、 $\tau_{y-k(m)}$ ——中部和底层油对空气的温升；
 τ_{r-km} 、 τ_{r-k} ——绕组最热点和平均温度对空气的温升； H_r ——绕组高度

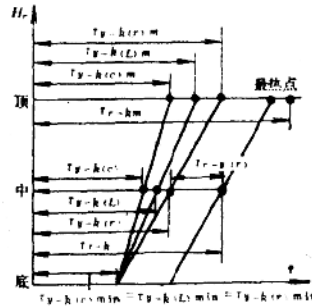


图 1-10 双油流系统变压器温升分布

$\tau_{y-k(r)m}$ 、 $\tau_{y-k(L)m}$ 、 $\tau_{y-k(c)m}$ ——绕组、冷却器、油箱上部的油对空气的温升；
 $\tau_{y-k(r)}$ 、 $\tau_{y-k(L)}$ 、 $\tau_{y-k(c)}$ ——绕组、冷却器、油箱的油对空气的平均温升；
 $\tau_{y-k(r)min}$ 、 $\tau_{y-k(L)min}$ 、 $\tau_{y-k(c)min}$ ——绕组、冷却器、油箱下部的油对空气的温升；
 $\tau_{r-x(r)}$ ——绕组中部油对绕组的温升

二、多油流系统

用单油流系统计算强迫油循环变压器，所得结果误差较大，宜于采用多油流系统来计算。

对于非导向强迫油循环变压器，流经绕组的油流可分为二部分：大部分油流经绕组外表与油箱壁之间；小部分油流流经磁路和绕组纵向冷却槽，这部分油流不大的原因是油的液压阻力很大。第一部分油流在绕组上部油箱中油的温升用 $\tau_{y-k(c),m}$ 表示，流经绕组内部的油流在绕组上部油的温升用 $\tau_{y-k(r),m}$ 表示。这两部分油将在冷却器入口处会合，混合后油的温升为 $\tau_{y-k(L),m}$ 。油箱下部冷却器出口处及绕组中油流入口处的油的温升可认为是相等的，即 $\tau_{y-k(L),min} = \tau_{y-k(r),min} = \tau_{y-k(c),min} = \tau_{y-k,min}$ 。

将油流分为两部分是为了研究方便，并不意味着两股油流完全独立。由于油流中存在旋流，实际的油流分布要复杂得多。

按油流分为两部分得到的变压器温升分布示于图1-10中。此图既适用于强迫油循环变压器，也适用于自然油循环变压器。

对于按双油流系统研究的各种变压器，其绕组最热点的温升可用下式求出

$$\tau_{r-k,m} = \tau_{y-k(r),m} + 1.1\tau_{r-y(r)} \quad (1-9)$$

式(1-8)与式(1-9)之差别，在于式(1-9)用绕组中的油温取代油箱和冷却器入口处的油温，而在单油流系统中认为两者相等。在式(1-8)中，为了考虑两者的差别，对强迫油循环系统采用较大的 b 值。

由式(1-9)可见，计算双油流系统变压器绕组最热点温度时，主要任务在于确定流经绕组内部的油温。这部分油温沿高度上升的特性可用下列系数来计算。

$$m = \frac{\tau_{y-k(r)} - \tau_{y-k,min}}{\tau_{y-k(r),m} - \tau_{y-k,min}} \quad (1-10)$$

式中 $\tau_{y-k(r)}$ ——绕组中部油对空气的温升；

其它符号含义见图1-9与图1-10的注释。

于是得

$$\tau_{y-k(r)} = \tau_{y-k,min} + m(\tau_{y-k(r),m} - \tau_{y-k,min}) \quad (1-11)$$

油温沿绕组高度下降值 $(\tau_{y-k(r),m} - \tau_{y-k,min})$ ，可用油循环所带走的绕组热量的表达式求出

$$p_r = r_y C_y Q_y (\tau_{y-k(r),m} - \tau_{y-k,min}) \quad (1-12)$$

式中 r_y 、 C_y 、 Q_y ——流经绕组油的密度、比热和油量；

p_r ——绕组的损耗。

由冷却系统带走的油的热量可用下式表示

$$p_L = r_y C_y Q_L (\tau_{y-k(L),m} - \tau_{y-k,min}) \quad (1-13)$$

式中 Q_L ——流经冷却系统的总油量；

p_L ——由冷却系统带走的油的热能。

用式(1-12)除式(1-13)得

$$\tau_{y-k(r),m} - \tau_{y-k,min} = \frac{a}{W} (\tau_{y-k(L),m} - \tau_{y-k,min}) \quad (1-14)$$

或
$$\tau_{y-k(r)m} = \frac{a}{w} \tau_{y-k(L)m} - \left(\frac{a}{w} - 1 \right) \tau_{y-kmin} \quad (1-15)$$

式中 w ——相对耗油量, $w = Q_r / Q_L$;

a ——相对损耗,

$$a = \frac{p_r}{p_L} = \frac{p_r}{p_{KZ} + p_{DL}}$$

其中 p_{KZ} 、 p_{DL} ——变压器的空载损耗和短路损耗。

利用式(1-14)和式(1-15)计算时,可取冷却器上部油对空气温升等于油箱顶部温度计测出的温升 τ_{y-km} ,即 $\tau_{y-k(L)m} \approx \tau_{y-km}$ 。

将式(1-15)代入式(1-9)可得到绕组最热点温升的表达式

$$\tau_{r-km} = \frac{a}{w} \tau_{y-km} - \left(\frac{a}{w} - 1 \right) \tau_{y-kmin} + 1.1 \tau_{r-y(r)} \quad (1-16)$$

上式主要适用于制造部门,对于运行部门,宜于用发热试验直接取得的参数来求 τ_{r-km} ,这些参数是 τ_{y-km} 、 τ_{y-kmin} 、 τ_{r-k} 。

由图1-10可得

$$\tau_{r-y(r)} = \tau_{r-k} - \tau_{y-k(r)} \quad (1-17)$$

将式(1-14)代入式(1-11)得

$$\tau_{y-k(r)} = m \frac{a}{w} \tau_{y-km} - \left(m \frac{a}{w} - 1 \right) \tau_{y-kmin} \quad (1-18)$$

将式(1-17)和式(1-18)代入式(1-16)得

$$\tau_{r-km} = 1.1 \tau_{r-k} + \frac{a}{w} (1 - 1.1m) \tau_{y-km} - \left[\frac{a}{w} (1 - 1.1m) + 0.1 \right] \tau_{y-kmin} \quad (1-19)$$

由于 $\tau_{y-k(r)}$ 可以较准确地测出,因此可用它表达 τ_{r-km} 。为此,将式(1-17)和由式(1-18)求出的 τ_{y-km} 代入式(1-16)得

$$\tau_{r-km} = 1.1 \tau_{r-k} + \left(\frac{1}{m} - 1.1 \right) \tau_{y-k(r)} - \left(\frac{1}{m} - 1 \right) \tau_{y-kmin} \quad (1-20)$$

由以上各种求绕组最热点表达式可以看出,主要任务是要求出系数 w 和 m 。不同冷却系统具有不同的 w 和 m 值。

(1) 自然油循环冷却系统

此系统中油的循环主要由绕组和铁芯的发热决定,可以认为 $w = a$,此时从式(1-15)可得 $\tau_{y-k(r)m} = \tau_{y-km}$ 。于是式(1-10)变成

$$m = \frac{\tau_{y-k(r)} - \tau_{y-kmin}}{\tau_{y-km} - \tau_{y-kmin}} \quad (1-21)$$

对于自然油循环系统,由于沿绕组高度的油温上升不均匀,下部增长慢而上部增长快,因此图1-10的 $\tau_{y-k(r)}$ 和 τ_{r-k} 实际上并非直线,而是曲线。根据多次测得的 $\tau_{y-k(r)}$ 和利
用式(1-21)进行计算,可以取 $m = 0.33$ 。

利用双油流系统公式(1-20)计算自然油循环变压器的绕组最热点温升,其结果在规定的左右摇摆,对小容量变压器所得值偏小,对大容量变压器则超过规定值。

(2) 强迫油循环冷却系统

多次试验证明,这种冷却系统中绕组沿高度的温度上升基本是线性的,即 $m=0.5$ 。这种情况下可用式(1-18)求 w

$$w = 0.5a \frac{\tau_{y-km} - \tau_{y-kmin}}{\tau_{y-k(r)} - \tau_{y-kmin}} \quad (1-22)$$

1) 非导向系统:前面已经讲过,在这种系统中,大部分油在绕组与油箱壁间流过,只有一小部分油流经绕组内部。两部分油流的比值与两部分的液压阻力有关,随变压器结构不同而不同。用式(1-22)计算结果表明,对不同变压器 w 值在0.15~0.30之间,平均值可取 $w=0.25$ 。 w 值愈小,绕组的温升愈高。

2) 导向系统:在这种系统中,有相当一部分油流经绕组内部,这部分油流的多少,随变压器结构不同而不同,最佳值是在 $w=a$ 时。由于变压器绕组结构比较复杂,绕组绝缘厚度有较大的容许误差,因此不能准确设计油流路径。不同型式绕组中油流的液压阻力也就难于计算。多次试验的结果表明,大多数情况下 $w>0.5$,平均值是0.61。比较导向与非导向系统的 w 值,可以看出导向系统的优越性。

用双油流系统公式(1-20)计算强迫油循环冷却系统变压器,所得的绕组最热点温升比规程规定值明显偏低。

第五节 确定绕组最热点温升的简单方法

在确定变压器额定容量和过负荷能力时,应该监测绕组最热点的温升,但是由于测量地点存在高电压,此温升很难测定,在一些国家的国标中只能用绕组平均温升加上修正值来解决。前面已经讲过,我国对于A级绝缘自然油循环和非导向强迫油循环变压器,采用绕组最热点温升比平均温升高+13℃。这个数值,对于6.3MVA以下变压器偏大,而对于100MVA以上变压器则偏小。

假若能正确测出绕组最热点温升,则对于确定变压器额定容量和负荷能力,优化变压器结构,计算变压器绝缘老化等方面,都将建立在更可靠的基础上。因此,在变压器出现以后,人们就推出了各种各样的方法来测量绕组最热点温升。这些方法可以归纳成两大类:热模型法和直接测量法。

一、热模型法

目前已有多种热模型,图1-11示出其中的一种。此热模型装在变压器上层油中,它具有两个绕组:发热绕组和测量绕组。发热绕组经中间变流器接到变压器电流回路上,绕组中流过的电流与变压器的负荷电流成正比,中间变流器具有调整抽头,可以选择热模型的工作方式。测量绕组接在测量桥的一臂上,测量绕组的电阻随温度而变化,测量仪表上则用℃标示。

为了使模型正确工作,它应满足下列基本条件:

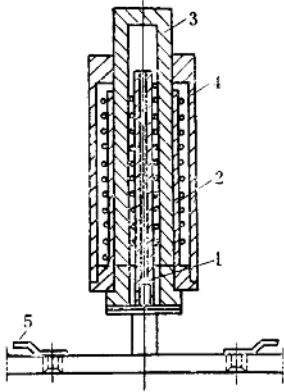


图 1-11 热模型示例

1—带有发热绕组的铁芯；2—带有测量绕组的圆筒；3—可移动的杆件；4—外壳；5—绕组的接线端头

(1) 模型的负荷变化应与变压器的负荷变化相对应。额定负荷时，模型应产生与变压器绕组额定温升相等的温升。

(2) 模型对油的发热时间常数应与变压器绕组相同。

(3) 负荷变化时，模型绕组对油温升的变化特性应与变压器绕组相同。

图1-11所示的热模型用下列方法来实现上述要求：

(1) 模型的温升可用调整变流器分接头来实现。

(2) 模型的发热时间常数的改变用调整可移动杆件的位置来实现。

(3) 绕组温升随负荷而改变的特性要求，可用选择发热绕组的材料来实现。

热模型的测量绕组是根据下列条件来设计的，这些条件对于测量准确度有很大影响。

(1) 测量绕组的温升及冷却特性应与变压器绕组一致。

(2) 绕组的发热时间常数不随变压器负荷变化。

(3) 绕组温升随变压器负荷而变化的特性应保持不变。

此外，发热时间常数的准确与否，变压器绕组最热点温升与上层油温升间差值的准确与否，也对模型的测量准确度有很大影响。

但是上列条件仍不完全符合变压器的真实条件，这是因为：

(1) 冷却特性曲线并不完全与反向的发热特性曲线吻合，所以热模型不宜用在负荷经常变化的场合。

(2) 由于油的粘度随油温而变化，因此油中绕组的发热和冷却的时间常数不是不变的，它是油温的函数。

(3) 由于油的粘度存在，以及绕组的电阻随负荷而变化，所以负荷变化时变压器绕组温升的变化特性也不同于理想情况下的特性。

尽管热模型法还存在缺点，但是由于还未找到简单而可靠的测量绕组最热点的方法，所以在不少国家还在广泛应用。

二、直接测量法

直接测量法又可分为电量测量和非电量测量两大类。

1. 电量测量

电量测量中用作温度传感器的敏感元件，常用热电偶或无感的热敏电阻。一般传感器直接装在电压相对不高或接地处的绕组上。热敏电阻接在直接测量电路或带补偿的桥式电路中，可以用一只热敏电阻测量，也可以用多个热敏电阻分别测量绕组几个地方的温度。测量系统可以是连续的，也可以是断续的，信号可以是放大的或不放大的。