

Z
N 3789

1972

国际大电网会议论文选译

变 压 器

1972



53

水利电力部科学技术情报室

T-22-53
1
2

国际大电网会议论文选译

(1972)

变 压 器

85.22

水利电力部科学技术情报室

A 842064



前 言

变压器组共有十一篇论文和一篇专业报告(12-00)。还有四个附件,是会议纪要。这十一篇论文,按性质大致可分为三类:

一、关于变压器的设计和运行问题,共有四篇论文(12-02、04、05、10),主要是讨论两个问题:一个是变压器线卷温升及其试验问题,一个是由于变压器杂散损耗引起的温升问题。1971年8月在捷克召开的国际大电网会议变压器会议上,着重讨论了“与变压器各部温升和温度分布有关的设计、试验和运行问题”。会后提出一篇总结报告,从铁芯、线卷、附加损耗和温升试验四个方面归纳了讨论中的各种观点。瑞典的一篇论文着重讨论热点温度和油面温度,论述了为什么在热试验中通常测得的温度不能准确地确定最热点温度。波兰的一篇论文着重讨论大型变压器的杂散损耗问题,讨论了在复杂的线卷排列的情况下,如何确定和分析在油箱和结构部件上的杂散损耗,还讨论了短路时线卷热损耗的轴向不均匀分布效应。葡萄牙的一篇论文着重研究变压器的老化问题。

二、大型变压器的短路强度问题,共有四篇论文(12-01、03、07、09)。1971年9月在捷克召开的变压器会议上对这个问题进行了讨论,并提出一篇总结报告。报告把讨论的意见归纳为四个部分:(1)电动力和相应应力的计算;(2)变压器线卷的设计及热处理;(3)试验;(4)材料的机械特性。美国的一篇论文根据模型和真实电力变压器的一系列短路试验,研究了三个问题:(1)变压器的预应力问题;(2)双轴应力损坏理论;(3)变压器线卷的沿辐内向动态压弯。法国的一篇论文主要是研究大型变压器的短路性能。荷兰的一篇论文主要是研究短路时变压器线卷的动态反应。

三、特高压大型变压器的设计、制造、试验和运输的可能性等问题,共有三篇论文(12-06、08、11)。目前各国运行的超高压系统是750~765千伏级,根据将来电力系统发展情况,下一级输电电压将在特高压(1000~1500千伏)范围之内。变压器组的容量将在100到300万千伏安之间。变压器和并联电抗器是特高压输电的关键元件,需要提前若干年进行研制工作。这三篇论文主要讨论了两个问题:一个问题是绝缘水平和试验要求;多数人倾向选择1200千伏为特高压的第一个等级。大家都认为全波操作过电压和雷击过电压试验很重要。对于截波雷击过电压试验有一些分歧意见。特高压变压器肯定将是单相设计,不再存在相间绝缘问题。另一个问题是单台容量的限额和运输的可能性。苏联的一篇论文论述了容量为200~250万千伏安、电压为1150/500千伏的自耦变压器组的设计和制造问题。铁路运输车的负载重量,苏联可达400吨,西德可达450吨。西德的一篇论文详细叙述了关于1200千伏、80万千伏安单相自耦变压器的设计,一台试验变压器已经制造出来并进行过试验。西德和瑞士共同发表的一篇论文论述了在特高压大型变压器的设计中,如何确定绝缘尺寸并对线卷的预处理和烘干方法进行了探讨。

出 版 说 明

第24届国际大电网会议是1972年8月在法国巴黎举行的。会议共有论文154篇。为了供有关同志了解当前国外高压电网方面的技术动向，我们组织选译了其中大部分，将陆续按专业分专辑出版。参加这一专辑编译工作的，有水利电力部“五七干校”和上海机修总厂的同志。

译文中有错误和不当之处，请批评指正。

1972年国际大电网会议论文翻译小组

1973年9月

目 录

前 言

论 文

与变压器温升和温度分布有关的设计、试验和运行问题 (12-04)	(1)
热点温度和油面温度——修改油浸变压器热标准的建议 (12-02)	(16)
变压器的杂散损耗和局部过热故障 (12-10)	(26)
根据变压器温升和老化的模拟确定运行准则 (12-05)	(37)
大型变压器的短路性能 (12-09)	(48)
电力变压器在短路条件下的动态测量 (12-01)	(60)
大型电力变压器的短路性能 (12-07)	(83)
短路时线卷的动态反应 (12-03)	(98)
特高压电力自耦变压器的设计问题 (12-06)	(112)
1100~1500千伏特高压系统电力变压器 (12-08)	(119)
特大容量变压器的设计和尺寸选定 (12-11)	(132)

附 录

第12专业小组(变压器)讨论纪要 (12-00) 附件	(143)
-----------------------------------	-------

与变压器温升和温度分布有关的设计、试验和运行问题

(12-04)*

1. 引言

本文的主题于1971年8月在捷克马利安斯克-莱尼召开的国际大电网会议变压器会议上讨论过。本文概括了在讨论中发表的各种观点。

在1963年,于上一次国际大电网会议变压器研究会议上[18]讨论过同样的问题。那时,还不能得到关于自流、强流和导流冷却线卷内温度分布情况的清晰概念,从那时以来,导流冷却的应用不断发展,并由于变压器额定容量的急速增长而得到促进。这次讨论的目的是收集近几年来有关这个问题的研究结果。

讨论分为四个部分:铁芯、线卷、附加损耗以及温升试验。

在附录1内列出本文所用的符号表,摘自参考资料[13]。如果将来能固定使用标准符号的话,这样的表是有用的。

附录2对冷却曲线的应用做了说明,目的在于找到验证导流冷却存在的方法。

在附录3中,论述了某些能表示油流的简化线路,目的在于说明负荷条件与温升试验时条件的区别,还包括从测得的数据中试图导出最热点温升时所碰到的某些困难。

附录4是参考资料表。是有关这个问题的广泛资料的选摘。

2. 铁 芯

2.1 由主磁通引起的温升和温度分布

由主磁通引起的铁损分布已能准确的了解。对于现代设计,可能还没有考虑局部热点(在联接部分或螺丝孔附近)问题。

外铁型变压器的铁芯或内铁型变压器柱的水平截面的温度分布能够算出[1,2]。内铁型变压器的轭铁的温度分布也同樣能算出来。关于在垂直方向表面上的温度分布可以参看资料[3]。

问题1. 要求提供大型变压器铁芯温升试验结果。根据这些试验结果,是否在设计阶段就能准确地预测表面温升?

问题2. 能不能把变压器空载试验的结果换算成负荷条件下的结果(不考虑可能的漏

* 作者 C. E. M. DE KUIJPER (荷兰)。

磁影响，参看2.2)?

问题3. 导流冷却是否只能用于线卷，还是同样也可用于铁芯；如果可以的话，那么，应根据什么定额（单柱定额）来使用铁芯的导流冷却？

问题4. 最高表面温度只是限额值，而不是铁芯叠片中的最热点，对这点是否同意？

问题5. 在标准内应不应该给出铁芯表面的温升限额？如果给出，则要求对试验方法及温升的具体限额进行叙述。

在那次讨论过程中提出的试验结果虽然不多，但还是可以得出结论，无论对外铁型或者对内铁型变压器，空载时铁芯表面温升的预测似乎并不重要。值得注意的是三相变压器中柱和轭铁之间的联接点，那里可能出现最高温升。

曾经指出，对于外铁型变压器，以及额定容量接近30万千伏安的内铁型三相变压器，可以把导流冷却用于铁芯。

一致认为，冷却表面最高温度是限额温度而不是铁芯叠片内的温度。一位发言者考虑以75°C作为表面温升限额，但是另一位发言者认为最好选用与线卷温升相同的数值。没有人要求把空载温升的限额引进标准（就是引进用热电偶测定的空载温升试验，至少作为型式试验，并且把试验结果换算为变压器带负荷时的结果）。

2.2 由于漏磁引起的温升和温度分布

在部分漏磁通垂直进入铁芯平面的地方，会产生很高的附加损耗和过热。有几种方法可以防止这种影响，如减少叠片宽度，应用分流磁屏蔽等。对于单相变压器，可以采用特殊的铁芯设计〔4〕。

现在已经能够比较准确地算出垂直进入铁芯平面的部分漏磁和局部磁场强度的分布，不考虑由电流引起的影响；损耗计算方法，可以用模型上和变压器上所进行的试验结果为依据，也可用参考资料〔5、6、7、8、9、10〕所提的方法。

问题6. 对于内铁型和外铁型变压器，应当采用什么方法以防止由于漏磁引起的叠片（和油）局部过热；在什么条件下应用这些方法？

问题7. 在大型变压器的温升试验期间，有没有必要测量铁芯危险点的温度？如有必要，详细说明变压器的容量和型式（外铁型、内铁型、自耦变压器等）。

问题8. 这样的一些温度测量能否代表负荷条件下的状况？（和问题2相比较，例如功率因数的影响）。

问题9. 危险表面的温升限制是什么？

关于问题6，没有给出详细的解答。曾经指出过，当计算进入铁芯的漏磁时，如果有箱壁或者所用屏蔽的影响存在，那就应当把这些因素也考虑在内。

如果设计的安排使铁芯的主磁通和流经铁芯的漏磁相重合，那么总的磁通就和负荷的功率因数有关。模型试验的结果表明，在不同的功率因数下，两种磁通的叠加作用并不很重要，证实了参考资料〔7〕得出的结果。

在试验室内对完整的变压器进行试验时，不可能完全了解两个磁通的叠加。从讨论中可以得出结论，在大型多线卷的三相变压器（额定容量差不多都超过30万千伏安）和在自耦变压器（考虑各种不同的容量）上进行温升试验时，在危险的局部部位必须用热电偶测定温升。这种试验的结果是否在所有的条件下以及对于不同的设计，都能代表负荷条件。

关于这个问题,不可能有肯定的回答,然而对于新的设计,至少应该在做温升试验时,进行这种测量。

曾经提出过这样的意见,当采用自动切换分头装置时[12],对上述两种变压器内的漏磁都有影响。在这种情况下,对上面指出的问题必须加以注意。

关于局部热点的允许温度,提出了130°C的限额,参看[11]。考虑到用测量方法常常不可能找出真正最热点,所以,这个限额是根据实验得出的。

3. 线 卷

3.1 最热点温升的基本公式

最热点温升可以写出如下[13]:

$$\theta_h = \theta_w + k_1(\theta_r - \theta_{mw}) \quad (1)$$

(所用符号,见附录1)。

3.2 水平平面中的温度分布

在线卷底部沿线卷周围水平面上油的温度分布被取作一个常数(温升为 θ_b)。

原则上,线卷的型式可以分为三种:

a. 油从垂直油道进入并从线卷顶部的同一油道流出(层式)。这种型式的线卷采用自流、强流或导流冷却。

b. 通过(许多)水平油道相连的垂直油道(盘式线圈)。这种型式的线卷可采用自流或强流冷却。

c. 油流由几个平行的水平油道导向。这种型式的线卷采用导流冷却,但也可采用自流冷却。

只要有能使垂直油道之间油温差减小的水平油道存在(至少对于自流和强流冷却),就可以把水平平面内导线周围的油温假定为常数。

这点适用于3.2.b,假定也可近似地用于3.2.c。在层式线卷内(3.2.a),由于各层中磁场强度的辐向分量所引起的附加损耗不同,也没有水平油道的平衡作用。在自流、强流和导流冷却的情况下,这种线卷上的一些点(线卷顶部水平面上的)的温度,在不同的油道内各不相同。在同一水平面内不同导线的附加损耗,可以借助于计算机从磁场强度的辐向和轴向分量来计算。如果知道导线周围的油的温升,就可以算出铜(高于油温)的平均和最大温升[15]或者由模拟装置来确定[16,17]。

在国家标准和负荷导则中 k_1 定为1.1,这就是说,在水平平面内允许有2°C或3°C的温度不均匀分布(参看问题12)。

线卷顶部的油温升(θ_w),在同一水平平面内可以假定为常数(对于自流或强流冷却3.2.b,对于自流或导流冷却3.2.c),或者设想为一个垂直油道中的最高油温升(对于自流、强流或导流冷却,见3.2.a)。

3.3 在垂直油道内的温度分布

用电阻法测得的线卷平均温升(θ_r)(高于冷却介质),在变压器标准内是有限额的,

不论变压器采用何种冷却方式，这个温度可以相当准确地测得。对于大型变压器，应该避免使用校正系数法，应该使用从冷却曲线的外推法。

为了求得线卷的平均油温升 (θ_{mw})，可以使用下列两种方法：

a. 从油面温升减去冷却器温度降的一半：

$$\theta_{mw} = \theta_t - 0.5(\theta_c - \theta_b) \quad (2)$$

在变压器的所有线卷上都得到同样数值的 θ_{mw} (参看 1967 年国际电工委员会文件第 76 号，41 条 8.3)。

b. 采用冷却曲线 (测量时油泵继续运行，风扇或水泵停止)，在每个线卷上得出 θ_{mw} 的不同数值)。

考虑到在线卷内部轴向温度分布的非线性影响，引进了一个系数 m [13]，如下：

$$\theta_{mw} = m(\theta_w - \theta_b) + \theta_b \quad (3)$$

如果从测量中得出了特定线卷的 θ_{mw} ，则从经验中可以得出适用于这种型式线卷和采用的冷却方式的系数 m ，就能够把 θ_w 计算出来。另一方面，如果 θ_{mw} 和 θ_w 为已知，那么也可以把系数 m 计算出来；然而，采用一般的试验程序，从直接测量中既不能得到 m ，也不能得到 θ_w 。平均油温升 (θ_{mw}) 的确定对下列各项是很重要的：

— 确定温差值 $g = \theta_r - \theta_{mw}$ ，以达到将温升试验结果校正到负荷状态的目的 (参看 3.4)。

— 根据温升试验确定计算过负荷所需要的温差值。

— 估计最热点温升 (参看 3.5)。

— 证明导流或强流冷却的存在 (参看 3.6)。

— 对设计阶段进行的计算加以校核。

3.4 温升试验 (利用 θ_{mw} 以求得 θ_r)

线卷的平均温升 (θ_r) 可以通过两种不同的方法求得：

a. 在供给变压器全部损耗 (空载和负载损耗之和) 的条件下，确定在线卷内的油面温升和平均油温升。在这以后，在线卷内通过额定电流一小时，然后测定线卷温升 (θ_r ，采用电阻法，利用冷却曲线外推法) 以及在线卷内的平均油温升 (θ_{mw})。然后算出线卷和油的平均温差 ($g = \theta_r - \theta_{mw}$)。这个温差再加上变压器通过总损耗时求得的线卷内平均油温升，就可以得到最后的数值 θ_r 。在总损耗的试验之后，通常不再测定电阻，所以 θ_{mw} 必须用公式 (2) 来计算。在通以额定电流的试验以后，常常测定线卷的电阻，所以可以利用冷却曲线来确定每个线卷的 θ_{mw} ，或者可以应用公式 (2) 求得所有线卷的 θ_{mw} 。如果在通以总损耗的试验以后同样进行电阻测量，就可避免使用公式 (2)。

b. 使变压器带上总损耗。在热量达到平衡以后，测定油面温升、线卷高于油的平均温升 (电阻法) 和在线卷内的油的平均温升。用同样的方法，把电流减少到额定值，再测定平均温差。把降下来的数值加到油和线卷的平均温升上去。由于冷却曲线适用于线卷，所以可避免使用公式 (2)。

问题 10. 是否在自流、强流或导流冷却条件下都允许使用公式 (2)，或者应该使用对一种或更多的冷却方式都适用的冷却曲线，以确定 θ_{mw} 和线卷与油之间的平均温差？

问题 11. 关于 3.4. a 和 3.4. b 所叙述的温升试验方法，在自流、强流和导流冷却方式

的条件下, 应该选择哪一种?

应用公式 (2) (参看 3.3. a), 以及冷却曲线 (参看 3.3. b) 来确定 θ_{mw} 是有缺点的。几位发言者有这样的意见, 在强流冷却的条件下, 用公式 (2) 计算出的数值, 比用冷却曲线推导出来的数值要低得多 (在特殊情况下, 这个差值可能达到 9°C 和 11°C)。从冷却曲线得到的数值可能要准确些。从理论上可以这样解释, 用公式 (2) 所得出的数值, 对于强流冷却有过于偏低的倾向。因此, 从讨论中得出, 在导流冷却的场合, 同样在某些自流冷却的场合, 用两种方法所得到的 θ_{mw} 比较一致。

反对使用冷却曲线的论据在于这个曲线不是指数函数, 此外, 由于在测量电阻过程中的油温变化必须加以修正; 参看资料 [19], 其中有一些关于改进的建议, 还详细分析了不同冷却型式的基础。

只有一位发言者回答了问题 11。他认为两种方法都不太好, 但是, 关于以寻找较好方法为目的的研制工作已经开展。没有提供有关这种方法的详细情况。

3.5 最热点温升

最热点温升 θ_h 不可能测得 (在常规温升试验时), 所以必须用计算确定 θ_h 。应用公式 (1) 的主要困难在于确定 θ_w , 因为各个线卷可能有不同的 θ_w , 而且这些数值也不能直接测得。此外, θ_w 还与 θ_{mw} 有相互关系 (参看 3.3. b)。

为了说明自流、强流和导流冷却的最热点温升的差别, 引进下述假设 (并不建议大家接受并普遍使用这些假设):

$$\text{导流冷却: } \theta_w = \theta_c, \quad m = 0.5 \quad (4)$$

$$\text{自流冷却: } \theta_w = \theta_c, \quad m \neq 0.5 \quad (5)$$

$$\text{强流冷却: } \theta_w > \theta_c, \quad m \neq 0.5 \quad (6)$$

对于冷却系统, 引进系数:

$$\alpha = \left(1 - \frac{\theta_h}{\theta_c}\right) \quad (7)$$

在下述计算中只使用 θ_c 和 α 。因此, 假设冷却系统的轴向温度分布并不影响 θ_h 的结果。这个假定对导流冷却比较正确, 但对自流冷却似乎不一定正确, 因为在后一种条件下, 油的循环与线卷的轴向温度分布有关, 也与冷却系统的轴向温度分布有关。

对于强流冷却, 从公式 (1)、(3)、(6) 及 (7) 可以得出:

$$\theta_h = k_1 \theta_r + (1 - k_1) \theta_c + k_1 (1 - m) \alpha \theta_c + (1 - k_1 m) \left(\frac{\theta_w}{\theta_c} - 1 \right) \theta_c \quad (8)$$

对于自流冷却, 把 $\theta_w = \theta_c$ 引进公式 (8), 参看 (5) 可得出:

$$\theta_h = k_1 \theta_r + (1 - k_1) \theta_c + k_1 (1 - m) \alpha \theta_c \quad (9)$$

对于导流冷却, 把 $m = 0.5$ 引进公式 (9), 参看 (4) 可得出:

$$\theta_h = k_1 \theta_r + (1 - k_1) \theta_c + 0.5 k_1 \alpha \theta_c \quad (10)$$

在温升试验中, 无论公式 (1) 或公式 (8)、(9) 和 (10), 都不能解决测量 θ_h 的问题。

问题 12. 在自流、强流和导流冷却的条件下, 系数 k_1 、 m 、和 $\frac{\theta_w}{\theta_c}$ 的最大和最小值是

多少？（要指出所涉及的是外铁型和/或内铁型变压器；需要时还要对这些数字的选择和使用范围加以说明：例如线卷的布置是盘式或者层式；又如冷却系统的布置是变压器带散热器、在油箱上装散热器或散热管）。

问题13. 关于这个问题，是否还有其他重要的特性？如果有，说明其系数及其限额。

问题14. 对于自流、强流和导流冷却，能否从温升试验所测得的数据中导出最热点温升 θ_h （考虑到上述问题的答案），并把 θ_h 用作保证值？如果对一种或更多的冷却系统的回答是肯定的，请说明每一冷却系统的 θ_h 的限额值。

问题15. 为了简化，把 θ_h 引进国际电工会议制定的适用于强流和导流冷却的负荷导则中去，是否可以接受？如果不能接受，哪些基本改变必须考虑？

从有关问题12的讨论中，不可能得出这些系数的最大和最小值的清晰的概念。

曾经指出过对于小型自流冷却变压器， k_1 可以取1.12（在这种场合，可以不考虑漏磁强度辐向分量产生的附加损耗的影响）。而且也曾经指出这在给定的点上，由于油流的变化会使温度发生变化（像热偶测得的数值所表示的那样）。另一位发言者指出，除了附加损耗的影响以外，系数 k_1 的数值也和沿导线表面的散热作用有关，而这个系数又是油流速度的函数。这点可以从用热偶在盘式线卷上测量的结果中得到说明。对于自流冷却， k_1 是1.16；对于导流冷却，当油流速度为6、12和24厘米/秒时，求出的 k_1 分别为1.24、1.27和1.30。

系数 α 可以从测得的数据（ θ_h 和 θ_c ）中计算出来。对于自流冷却，那里沿冷却器的温度分布可能是非线性的，有关系数 α 的意义，没有人发表过意见。至于系数 m ，一位发言者提出，其数值在0.34和0.37之间；另一个意见是，对于自流冷却（其他冷却方式相同），能近似地使用 $m=0.5$ 。

对于导流冷却，似乎有同意 $m=0.5$ 的趋势。关于系数 θ_w/θ_c 没有人发表意见。本文作者提请注意：对于强流冷却，必须假定 $\theta_w > \theta_c$ 。关于 $\theta_w = \theta_c$ 的假定，对导流和自流冷却比对强流冷却更接近实际，但是，在一个变压器中，不论是导流或自流冷却，也不论是强流冷却，各个线卷的 θ_w 都不会相同。而且进入冷却器的温升为 θ_c 的油是油的混合体，包括从各个线卷中流出的油和沿着（和经过油道）铁芯流过的油，例如，当线卷采用导流冷却，铁芯采用自流冷却时，这一点是重要的。

作者接到一份回答问题13的书面文件，提要如下：

从公式（1）和（3）中消去 θ_w ，得出：

$$\theta_h = k_1(\theta_r - \theta_{mwc}) + \frac{1}{m}\theta_{mw} + \left(1 - \frac{1}{m}\right)\theta_b \quad (11)$$

假设 $m=0.5$ 得出：

$$\theta_h = k_1\theta_r + (2 - k_1)\theta_{mwc} - \theta_b \quad (12)$$

在 $m < 0.5$ 的条件下，引进 $m=0.4$ ，得出：

$$\theta_h = k_1\theta_r + (2.5 - k_1)\theta_{mwc} - 1.5\theta_b \quad (13)$$

在公式（1）内引进 $\theta_w = \theta_c$ 得出：

$$\theta_h = k_1(\theta_r - \theta_{mw}) + \theta_c \quad (14)$$

建议对于导流冷却，采用公式（12），对于强流冷却，采用公式（13），对于自流冷却，采用公式（14）。

这些公式很简单。然而，当把这些公式应用在变压器的全部范围（就是说从很小的到极大的变压器）时，要得到关于使用温升试验的结果（包括 θ_{mu} ）的准确性指标的困难依然存在。

从讨论中可以得出结论，没有人支持把 θ_b 引进标准中作为保证值，无论对于自流和强流冷却，还是对于导流冷却都不适用（参看问题14）。

会上曾分发一项说明在线卷内应用声敏器来测量最热点温度（或线卷内的油面温度）的方法的文件，这个方法是由捷克电工研究所研制成功的，但是，在讨论过程中，没有进一步提供这种方法的实用经验和测得结果的报导。

关于问题15，没有得到答案。

3.6 强流冷却和导流冷却的比较

会上普遍同意，使用导流冷却的线卷平均温升（ θ_r ），比使用强流（或自流）冷却的线卷平均温升，至少可以选高5°C。在使用导流冷却的条件下，许多变压器标准中还没有引用较高的 θ_r 数值，是因为还没有找到一种可以通过试验来证明是否存在导流或强流的较好的方法。已经提出几个能表明这两种冷却方式差别的建议，这里只举出下列几种方法：

a. 采用直流重叠法 [20]。这个方法对一般应用是太复杂了，因此在实际中不会采用。

b. 从许多温升试验的结果中，可以导出下列关系 [13]：

$$\text{对于导流冷却 } \theta_{mu} \leq 1.06\theta_r \quad (15)$$

$$\text{对于强流冷却 } \theta_{mu} > 1.06\theta_r \quad (16)$$

（关于 θ_{mu} 的测量方法，参看3.3. a、3.3. b 和问题10）。

c. 冷却曲线法（参看附录2），基本上根据3.6. a，但可避免采用直流重叠法。

d. 检验设计图纸，不用测量进行校核。

问题16. 为了证明导流冷却的存在，应选用什么方法和准则？

讨论结果指出，用3.6. c 的冷却曲线法要比用3.6. b 的方法优越。然而，在不同的试验室对不同设计的变压器进行了有限次数的试验以后，在所有的场合，冷却曲线法都没有给出正确的答案。

在讨论过程中，对于冷却曲线法，建议采用一种稍微不同的试验程序。根据附录2第一段所指出的电阻测量以后，再接通变压器，而油泵和风扇或水泵也全在运行中。在达到热平衡以后，油泵和风扇或水泵停止运行。再经15分钟以后，切断变压器电源，并测量电阻以求得冷却曲线的第二组数据。如果能够得到为了推导出导流冷却和强流冷却的变压器的最热点温升的可行方法，则对于特定的变压器就没有必要用试验来验证导流冷却或强流冷却是否存在。既然情况并不是这样，所以需要找出能确定导流和强流冷却间区别的方法。这样就可以提出比强流冷却线卷更高的导流冷却线卷的保证温度。国际电工委员会第14技术委员会的工作组正着手解决这个课题。

4. 附加损耗（联系到过热问题）

附加损耗可以细分如下：

4.1 由漏磁或平行股线中的环流所引起的线卷附加损耗

这些损耗能用计算机算出（如漏磁场强的轴向和辐向分量、电抗计算等），计算时考虑到铁芯、轭铁和油箱屏蔽等等的影响。

4.2 铁芯叠片内的附加损耗

（参看2.2）

4.3 由于（一部分）漏磁或载流导线所引起的油箱附加损耗

为了减少这些损耗，以及防止油和加固材料的过热，在大型变压器（至少对于内铁型变压器）中采用两种屏蔽方法〔21、22、23、24、25、27〕。

4.3.1 磁屏蔽

（a）垂直于箱壁的叠片。

（b）平行于箱壁的叠片。

4.3.2 电磁屏蔽

（a）在铁箱内铜或铝的屏蔽。

（b）铝制油箱。

当载流导线通过箱壁或箱盖时，为了减少在附近范围内引起的损耗和过热，可以局部地使用无磁性材料。

问题17. 选择屏蔽方法的决定性的因素是什么，怎样检验所得的结果？（例如在油箱内外测量负荷损耗，在热试验时校核油箱和箱盖外表温度，在热试验前后分析溶在油中的气体）。

曾经指出，对于减少损耗，用磁屏蔽比用 电磁屏蔽 的效果更好。然而，在边界条件下，磁屏蔽的重量可能是不利因素。

当计算线卷的附加损耗，或比较油箱内外测量的有效损耗时，油箱（屏蔽的）对漏磁分布的影响必须加以考虑。在温升试验前后分析溶于油中的气体，似乎还没有很多成熟的经验，这种方法可以看作为进一步研制变压器和对运行中变压器监视的重要方法。

利用红外线照相的方法，可以找出损坏加固材料的热点。

4.4 线卷、铁芯或油箱以外的附加损耗

包括紧固结构、铁轭压梁、提伸柱和环件、静电屏蔽、线卷和套管之间的联接部分，油箱盖等等的附加损耗〔24、25、26〕。不可能对上述各部分的损耗分别进行讨论。以前的讨论曾得出这样的结果〔18〕：必须常常在额定电流下测定负荷损耗，因为这些损耗并不直接和电流的平方成比例。此外，并不是每台变压器都做温升试验，因为温升试验是型式试验（同样参看5.3）。为了保证变压器的可靠性，在每台（大型）变压器线卷内至少通以一定时间的额定电流似乎是必要的。这就有可能在每台变压器上测定额定电流下的负荷损耗，不管这台变压器是不是进行热试验。然而还有困难。在测定负荷损耗的当时，必须知

道线卷的温度，而试验结果还要用75°C的标准温度来校正（参看资料〔18〕）。

问题18. 考虑到在每一台大型变压器上测量负荷损耗的经验，关于把负荷损耗换算到合适的标准温度的问题有什么新的意见？

在会议过程中没有得到回答。

5. 温 升 试 验

1. 在参考资料〔18〕中，讨论了三相变压器降低电流的三相试验以及单相试验的问题。

问题19. 是否同意进行大型三相变压器不减电流的三相激磁试验？如果不，应该给出电流的允许减少值，以及把结果调整到额定条件的计算方法，在三相变压器上作单相试验的情况下，对自流、强流和导流冷却应规定哪些试验程序。

所有的发言者在这个问题上都同意采用三相激磁，但是有些人有这样的意见：在极端的情况下，应该允许省去供给总损耗的试验，但是试验至少应该在额定电流下进行。一位发言者指出，对于大型发电机用变压器，把温升试验的持续时间延长到24小时是可取的。

2. 在常规温升试验中，至少，温升 θ_w 、 θ_c 和 θ_h 可直接测得，而 θ_l 以及 θ_{mw} 是间接求得的。

问题20. 在特大型变压器内，这五个温升数据是否足以保证不会发生局部过热？如果不能，应该进行什么补充测量？（例如用热电偶测定低压线卷端部附近的铁芯叠片的危险热点的温度，分析试验前后油中的溶气。）

在前面的几个问题中已回答了这些问题（例如：用热电偶测定容量超过30万千伏安的三相变压器和自耦变压器的危险热点，油的气体分析），没有其他补充。

3. 认为温升试验是一种型式试验，因此，如果变压器的容量和结构是完全相同的，则只需要在一台变压器上做温升试验。在容量或其他特性差别不大的情况下，在制造者和使用者之间取得协议之后，温升试验也可以省略（参看国际电工委员会76号文件，第二版4.1.1.3的定义和附注）。

问题21. 对于大型变压器的温升试验来说，“容量和其他特性差别不大”这个词怎样考虑？如果决定略去变压器的温升试验，有什么补充的试验或实验必须进行以保证运行的安全？（例如，至少进行一定时间的额定电流试验，参看4.4）。

一位发言者说，对于每一张合同的第一台变压器，温升试验是必要的。另一位发言者认为，对于大型变压器，温升试验应该作为出厂试验。

附录 1 所用符号参看参考资料〔13〕

		温 升		
		顶 部	平 均	底 部
油	线 卷 内	θ_w	θ_{mw}	θ_b
	油 箱 内	θ_t		θ_b
	热 交 换 器 内	θ_c	θ_{mc}	θ_b
线 卷	铜	θ_h	θ_r	

θ_w = 一个线卷内的顶部油温升;
 θ_{mw} = 一个线卷内的平均油温升;
 θ_t = 油箱内的油面温升;
 θ_c = 热交换器内的顶部油温升;
 θ_{mc} = 热交换器内的平均油温升;
 θ_b = 热交换器内的底部油温升;
 θ_h = 线卷内的最热点温升;
 θ_r = 电阻法测得的线卷温升;
 $g = \theta_r - \theta_{mw}$ = 线卷和油的平均温差;
 $D_w = \theta_w - \theta_b$;
 $D_t = \theta_t - \theta_b$;
 $D_c = \theta_c - \theta_b$;
 P = 以瓦为单位的散失功率;
 $a_1, a_2, \dots$ = 线卷内总损耗的比;
 Q = 循环油总量, 公升/分;
 $w_1, w_2, \dots$ = 线卷内循环总油量的比;
 m = 线卷内轴向温升的非线性系数;

$$\alpha = \frac{\theta_c - \theta_b}{\theta_c}$$

附录 2 冷却曲线法 (强流和导流冷却)

1. 在热试验终了时, 切断变压器电源, 这时油泵继续运行, 而风扇或水泵停运。在停电后大约20分钟测定各个线卷的电阻。从这些测定中 (如果必要, 应该考虑平均油温的变化), 可以得到冷却曲线 (参看图1)。这是利用外推法得到线卷 (平均) 温升的常规程序。从冷却曲线可以得出:

线卷 1 的 θ_{da1} 和 τ_{a1} ;

线卷 2 的 θ_{da2} 和 τ_{a2} 。

2. 在按第 1 节所指出的电阻测量以后, 把变压器重新合上, 给线卷通过与第一次试验时相同的电流, 这时油泵和风扇或水泵全停。这样要经过大约15分钟 (或者更长一些时间, 决定于周围温度的高低)。然后再次切断变压器电源, 重复进行电阻测量, 得到第二组冷却曲线, 并求得:

线卷 1 的 θ_{db1} 和 τ_{b1} ;

线卷 2 的 θ_{db2} 和 τ_{b2} 。

3. 从二次试验的结果, 可以确定下列系数:

$$x = \frac{\theta_{da1}}{\theta_{db1}}, \quad y = \frac{\tau_{a1}}{\tau_{b1}}$$

和

$$x = \frac{\theta_{da2}}{\theta_{db2}}, \quad y = \frac{\tau_{a2}}{\tau_{b2}}$$

对于导流冷却 x 和 y 的极限将至少是：

$$x < 1 \text{ 和 } y < 1$$

这些极限值选得越低，导流冷却的标准就越准确。这时建议：

$$x \leq 0.7 \text{ 和 } y \leq 0.7$$

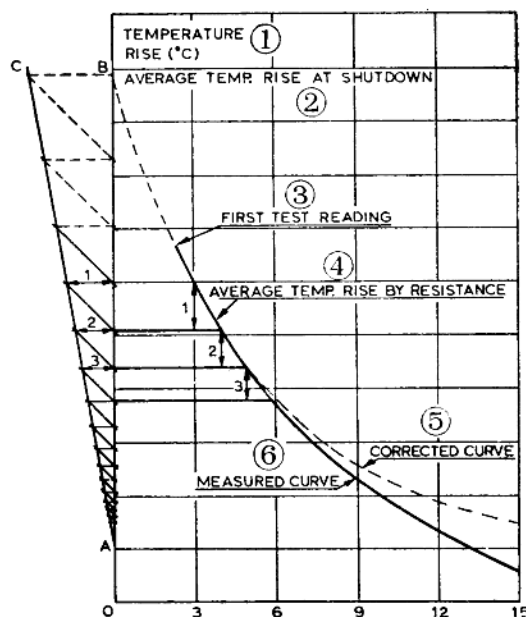


图 1 为确定线卷导流冷却的冷却曲线法

$$AB = \theta_d, ^\circ\text{C}; \quad \frac{AB}{BC} = \tau, \text{分};$$

1—温升；2—切断时平均温升；3—第一个试验读数；4—用电阻法测得平均温升；

5—校正后的曲线；6—测得曲线

4. 作为第二节内所述试验的一个方案，电流通过线卷的时间可以达到 15 分钟或更多，这时油泵、水泵或风扇继续运行。然后油泵和水泵或风扇全停，测量电阻并确定系数 x 和 y 。

附录 3

1. 为了简化，可以把线卷看作油流的一个通道（在导流冷却的条件下，这是一个很确定的通道），而把线卷的外边看作油流的另一个通道，忽略了油箱所散失的热量。

P = 散失总功率，瓦；

$(1-\beta)P$ = 线卷内的负荷损耗，瓦；

βP = 空载损耗, 或线卷以外的损耗, 瓦;

Q = 冷却器内流过的总油量, 公升/分;

$C \frac{P}{Q}$ = 温度差, $^{\circ}\text{C}$ 。

2. 变压器带负荷 (额定电流)

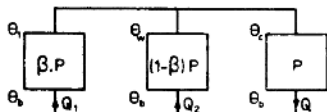


图 2 变压器带负荷的简化回路

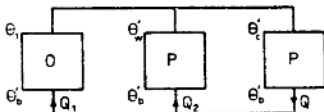


图 3 当变压器通以总损耗时温升试验的简化回路

$$\theta_1 - \theta_b = C \beta \frac{P}{Q_1} \quad (20)$$

$$\theta_w - \theta_b = C (1 - \beta) \frac{P}{Q_2} \quad (21)$$

$$\theta_c - \theta_b = C \frac{P}{Q} \quad (22)$$

$$g = \theta_r - \theta_{mw} \quad (23)$$

$$\theta_{mw} = m(\theta_w - \theta_b) + \theta_b \quad (24)$$

$$\theta_h = \theta_w + k_1 g \quad (25)$$

3. 温升试验

3.1 变压器上通以总损耗

$$\theta'_1 - \theta'_b = 0 \quad (26)$$

$$\theta'_w - \theta'_b = C \frac{P}{Q_2} \quad (27)$$

$$\theta'_c - \theta'_b = C \frac{P}{Q} \quad (28)$$

$$g' = \theta'_r - \theta'_{mw} \quad (29)$$

$$\theta'_{mw} = m(\theta'_w - \theta'_b) + \theta'_b \quad (30)$$

$$\theta'_h = \theta'_w + k_1 g' \quad (31)$$

3.2 线卷内通以额定电流

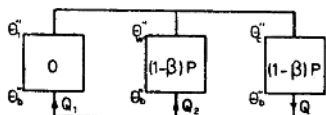


图 4 线卷内通以额定电流的简化回路

$$\theta''_1 - \theta''_b = 0 \quad (32)$$

$$\theta''_w - \theta''_b = C (1 - \beta) \frac{P}{Q_2} \quad (33)$$