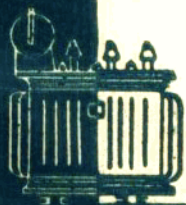


提高变压器出力 的一些问题

水利电力部技术改进局等編



水利电力出版社

內 容 提 要

本書對提高變壓器出力以後所出現的一些問題作了探討，里面談到了變壓器提高出力所產生的影響，對變壓器長期過負荷中的“變壓器溫升標準”“變壓器數據和裕度”“根據綫卷溫度來確定容許過負荷的數值”等問題作了研究。

書中，對變壓器噴霧等技術問題也作了介紹，里面敘述了噴霧研究試驗中的經驗與存在的問題，具體談到試驗方法和在運行中怎樣確定變壓器出力的簡易方法。

提高變壓器出力的一些問題

水利電力部技術改進局等編

*

2130D611

水利電力出版社出版（北京西郊科學路二里內）

北京市書刊出版業營業許可證出字第105號

水利電力出版社印刷廠排印 新華書店發行

*

787×1092 $\frac{1}{2}$ 開本 * 5%印張 * 12千字

1959年8月北京第1版

1959年8月北京第1次印刷(0001—5,110冊)

統一書號：15143·1706 定價(第9類)0.09元

目 录

变压器提高出力的一些

問題.....沈阳变压器厂研究室朱英浩(2)

TM-320 变压器噴霧冷

却試驗.....水利电力部技术改进局(8)

变压器提高出力的一些問題

沈阳变压器廠研究室 朱英浩

随着工农业大跃进的需要，某些地区出现了电力供应比较紧张的情况，各地正在赶建许多发电厂、架设许多新的输电线路，但仍不能满足目前紧迫的电力需要。因此，如何提高现有设备的出力，争取送出更多的电力，是目前具有重大政治、经济意义的任务。提高现有设备的出力，包括发电机，变压器等超过铭牌上规定的容量而使用，是项复杂的工作。现在，要使整个输送电力的系统过负荷，不仅要求过负荷的数值不是3~5%，而且要长期过负荷运行，过负荷的数值高到30~50%。

这里，仅就变压器提高出力的一些問題提出来和大家研究。变压器在过负荷使用时，一般将产生下列几方面的影响：

- (1) 阻抗值将随负荷的增加而有所增加；
- (2) 损耗随负荷的增加而剧烈增加；
- (3) 影响容许短期过负荷的时间（这里指的是时间很短，倍数很大的过负荷）；
- (4) 因为过负荷使温升增加，因此加速了绝缘的老化，缩短变压器寿命，甚至造成变压器由于过负荷而烧毁的事故。为了达到多送电力的目的而过负荷运行，有时可以不考虑损耗，甚至牺牲一些寿命。因为目前能多送出一些电力用于工业，那它所生产出来的价值，将大大超过变压器急速折旧的损失。所以，提高设备出力是值得研究的。

缩短变压器的运行寿命而过负荷使用的問題，究竟能过负荷多少？可否采用人工降温的办法来增加过负荷的数目？这些

問題，已在電力工業系統中進行了廣泛的研究，並得出了顯著的效果。下面擬對變壓器長期過負荷的問題提出幾點來探討。

一、變壓器的溫升標準

根據蘇聯國家標準的規定：一般A級絕緣油浸式變壓器，使用在外圍最大溫度為 $+35^{\circ}\text{C}$ 的地方，其年平均溫度不大於 5°C ，變壓器頂部的變壓器油對空氣的最大溫升為 60°C （溫度計法測量），繞卷對空氣的平均溫升為 70°C （電阻法測量），鐵心表面對空氣的溫升為 75°C （溫度計法測量），這也就是說，當天氣最熱時，繞卷平均溫度可到 105°C （ $70^{\circ}\text{C} + 35^{\circ}\text{C} = 105^{\circ}\text{C}$ ），油面最高溫度可到 95°C （ $60^{\circ}\text{C} + 35^{\circ}\text{C} = 95^{\circ}\text{C}$ ）。經驗證明：繞卷上某些最熱的地方，其最熱點溫度比平均溫度還要高 15°C 左右。這就是說，繞卷的最高溫度可達到 120°C ，油面最高溫度可到 95°C 。

應該特別指出：蘇聯國家標準這樣規定並不是說繞卷一直可以在 120°C 下工作，因為一般來說，絕緣紙在 105°C 時就急劇老化，油在 95°C 以上也將顯著劣化。絕緣紙最熱點的溫度如果維持 95°C ，可用20年；溫度在 120°C 時，僅能用2~3年。蘇聯國家標準規定繞卷最高溫度為 120°C ，這在一年中只有極短的時間範圍內才能達到，因為氣溫不能老維持在 $+35^{\circ}\text{C}$ 。相反的，在一年中有很長一段時間氣溫很低，甚至有些地區低到 0°C 以下。蘇聯國家標準規定的繞卷溫升 70°C ，是指不管外圍氣溫是多少，繞卷永遠只能高出氣溫 70°C 。標準中並沒有規定繞卷經常允許最高溫度為多少，這樣當氣溫較低時，繞卷的溫度就會低於 95°C ，氣溫的自然變化就互相起補償作用，因此蘇聯就認為按照他們的氣溫變化情況，繞卷能維持20年的壽命。

二、我們厂的正常設計数据和裕度

我厂过去是按苏联标准来設計变压器的，外围最大气温采用 $+35^{\circ}\text{C}$ ，綫卷对空气的平均温升采用 70°C ，最高油面对空气温升为 60°C 。从1958年开始，进行了新的系列的产品設計。設計时，考虑到我国大气条件，最高气温可到 $+40^{\circ}\text{C}$ ，綫卷对空气的平均温升訂为 65°C ，而最高油面对空气温升为 55°C 。但这些新的系列产品还只是在小批試制阶段，尚未大量生产。

在变压器設計时，其油对空气平均温升与上层最高油面温升的关系是：

上层最高油面温升 $=1.2 \times$ 油对空气的平均温升 $+$ 散热中心校正。所谓散热中心校正，就是变压器发热中心和散热中心不一致，所以必須加一个校正値。他与油箱的高度有关，一般中小型变压器比校正値取 $5 \sim 6^{\circ}\text{C}$ ，大型变压器取 $8 \sim 10^{\circ}\text{C}$ 。

如果以大型变压器为例，当最高油面温升为 55°C 时， $55^{\circ}\text{C} = 1.2$ 倍油面对空气的平均温升 $+(8 \sim 10^{\circ}\text{C})$

$$\therefore \text{油对空气的平均温升} = \frac{55 - (8 \sim 10)}{1.2} = 35 \sim 37^{\circ}\text{C}$$

綫卷对油的平均温升 $=$ 綫卷对空气的平均温升 $-$ 油对空气的平均温升 $= 65 - (35 \sim 37) = 30 \sim 28$ 。

这些都是我們的設計数据，但是設計一台变压器要滿足很多指标，如阻抗、温升、損耗、短路应力等，均要有一定的标准。而使用的材料也要有一定的标准，如銅綫就有一定的标准截面，散热器有一定的标准尺寸，再加上一些結構上的限制，例如絕緣距离的要求等等，所以往往不能把一台变压器計算得各方面都恰到好处，即以温升数值为例，內綫柱和外綫柱之間，同一綫卷上正常綫段和加强綫段之間，温升均可略有差

別，一般允許彼此間相差 5°C ，而計算中的綫卷對油平均溫升可能比上面說的 $28 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 略低 $1 \sim 2^{\circ}\text{C}$ ，油對空氣的溫升，有時因絕緣距離的限制，油箱無法縮小，或者在根據總耗來計算散熱器時，多用一個又稍多，少用一個又太少，因此就不得不多用一個，結果油對空氣的溫升又可能略低。但一般來說，這種設計中的出入不會太大，上下不過 $2 \sim 3^{\circ}\text{C}$ ，至於設計數值與實際結果，根據我們的試驗，仍是相符的。

按我們設計的一般情況來分析，以前出廠的 TM 型 5600 千伏安以下的產品，在東北地區一段說來，過負荷 $10 \sim 15\%$ 使用沒有什麼太大問題，這只是一般情況。每台變壓器的具體情況，應在使用時根據測量溫度決定；至於大型變壓器，則要按每一台的具體情況來考慮，不能一概而論。

三、根據綫卷的溫度來確定容許過負荷的數值

絕緣老化的 8 度規則，雖不能說完全正確，但仍是可靠的。用 8 度規則折算一下，要希望變壓器能用 5 年，而 5 年內讓其帶最大負荷只要保持不致立即燒毀，那麼可以讓變壓器綫卷最熱點維持在 110°C 左右，而平均溫度在 95°C ，這樣長期工作下去，同時為了使變壓器油不致急劇老化，應維持上層油溫不超過 85°C ，那麼

$$85 = 1.2 \text{ 倍油對空氣平均溫升} + (8 \sim 10) + \text{周圍氣溫}$$

$$95 = \text{油對空氣平均溫升} + \text{綫卷對油平均溫升} + \text{周圍氣溫}$$

周圍氣溫是變化的，夏季高，變壓器過負荷能力小，冬季低，過負荷能力大些，控制過負荷多少，最可靠的辦法是控制綫卷溫度只要能用測量的方法。控制綫卷的平均溫度永遠不大於 95°C ，那麼變壓器最熱點的絕緣是可以渡過 5 年的。

但是要在運行過程中，經常測量綫卷溫度，這是困難的。

除非在綫卷裝有熱偶溫度計。而這種附件，一般在變壓器是不能供給的，運行人員最易觀測的只有上層油溫，因此我們應該想辦法用近似的油面溫度來控制過負荷。

一般來說，綫卷的溫升與負荷的 n 次方成比例

$$\tau = \tau_H \left(\frac{I}{I_H} \right)^n = \tau_H k^n$$

式中 τ_H ——額定電流為 I_H 時綫卷對油的平均溫升。

τ ——任何電流 I 時綫卷對油的平均溫升。

在我們的設計中常採用

油浸自冷式 $n=1.2$

油浸風冷式 $n=1.4$

假定設計時，綫卷對油的平均溫升取 28°C ，周圍氣溫為 20°C ，那麼按上面公式計算，在不同負荷下，綫卷對油的平均溫升可以求出來。同時可以求出必須控制的油對空氣平均溫升和上層油溫，結果可用表及曲綫表示。

由曲綫看來：

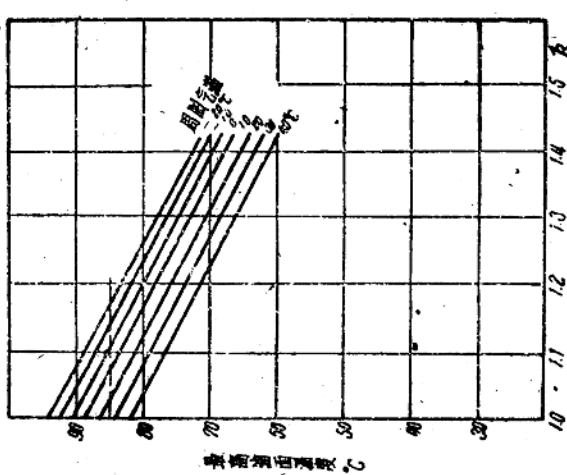
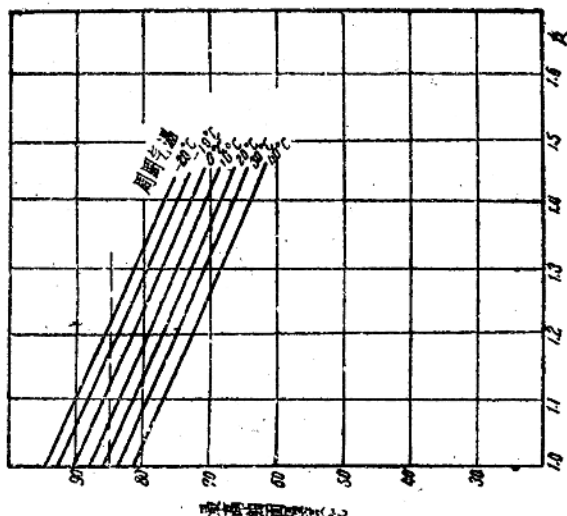
1. 當周圍氣溫較低，如在 -20°C 時，要變壓器過負荷 11.8%，油面溫度才能達到 85°C ，而當周圍氣溫升到 $+30^{\circ}\text{C}$ 時，即使帶額定負荷也需設法將油面溫度降到 83.5°C （此處為長期過負荷的運行方法）。

2. 如果希望變壓器多過載一些，那就要採取措施把油面溫度多下降一些，在某一過載%下，當氣溫為多少度時，應該把油面溫度降低到多少度，這可由曲綫查出。

注：上面曲綫尚未考慮下列一些問題。

1. 過負荷太大時，最熱點溫度比平均溫度可能高出 15°C ，此時 n 值有變化。

2. 未考慮過負荷自然波動的情況，即由於某些時間的過負荷倍數較



a) 油浸风冷式

b) 油浸自冷式

图 1 油对空气平均温升和上层油温曲线

低，而可能使另一些時間过負荷，再多一些就未加考虑。

3. 油粘度对絕緣损坏的影响未考虑，当气温大于 -10°C 时，沒有必要使上层油温降到 $45\sim 50^{\circ}\text{C}$ 以下。如繼續降低油温，反而会使过負荷能力减小(由于油粘度显著增加)。

4. 海拔对温升的影响。

5. 变压器中零組件在过負荷后的情况未加考虑。

周圍气温为 20°C 时不同过負荷下容許油面的温度
(散热中心校正取 9°C)

过負荷 倍数 K	油 浸 自 冷 式				油 浸 风 冷 式			
	$k_{1.2}$	綫卷对油	油对空气	容許油面	$k_{1.4}$	綫卷对油	油对空气	容許油面
		平均温升 ($^{\circ}\text{C}$)	容許平 均温升 ($^{\circ}\text{C}$)	温 度 ($^{\circ}\text{C}$)		平均温升 ($^{\circ}\text{C}$)	容許平 均温升 ($^{\circ}\text{C}$)	温 度 ($^{\circ}\text{C}$)
1	1	28	37	85.5	1	28	47	85.5
1.1	1.12	31.4	43.6	81.3	1.143	32	43	80.6
1.2	1.245	34.6	40.2	77.3	1.292	36.2	38.8	75.6
1.3	1.37	38.4	36.6	73	1.444	40.5	34.5	70.4
1.4	1.497	41.9	33.1	68.7	1.602	44.8	30.2	65.2

TM-320 变压器噴霧冷却試驗

水利电力部技术改进局

随着社会主义建設的高速发展，电力先行工业虽然已經以最高的速度在发展，但仍然赶不上工农业生产的需要。在电力基本建設赶不上需要的情况下，采用各种方法，以提高現有电气設備出力，全国电力系统都在广泛地进行。去年，在全国供电技术會議上，我局提出用噴霧法冷却变压器提高出力的建議

以后,已有好些現場开始采用。但是用噴霧法冷却变压器提高出力,对过負荷出力的确定,以及变压器綫卷各部温度的分布情况等問題,当时由于进行的工作还不多,一时未能較多的介紹这类情况。为了弄清上述問題,使提高变压器出力的工作建立在更科学的基础上,我們对一台TM型320千伏安3000/400伏沈阳变压器厂1954年生产的变压器,进行了較詳細的研究試驗,最后取得了一些結果。下面介紹一下我們的經驗和問題。

I、試驗方法

1. 噴霧器的安装: 沿变压器散热器上部的四周,安装1吋水管,在水管上正对变压器的散热器的每相,隔20公分焊接一个噴霧头(噴霧头的結構見全国供电技术會議文件4提高变压器出力,水利电力出版社出版第10頁),共計使用了18个噴头,耗水量14.2公斤/分(0.85吨/时),水源应用一般的自来水,水压为1.07~2公斤/平方公分。

2. 温度測定: 沿高压綫卷上中下三个部位,安装三个热偶,这三个热偶均系直接焊接在綫卷銅导体上,焊接后用两层白布带包扎,三个热偶引綫間用多层黃蜡布带絕緣后,由低压綫卷中性点套管引出。試驗时,操作人員站在絕緣台上进行測量。由于变压器綫卷不能拆开,因此未能在低压綫卷的导体上直接安装热偶。为了解高低压綫卷間油温分布情况,在高低压綫卷間絕緣筒內側靠低压綫卷油道的上中下部分,分別安装三个热偶。又在低压綫卷与鉄心之間油道內上中下三个部分安装三个热偶。为檢查上层油面溫度計測量出的温度的准确度,因此在油箱內相应的地方,又安装了一个热偶。在离鉄心不远的地方,还安装了一个測量上层油温的热偶,全部热偶的詳細位置如图1所示。

所裝熱偶均系銅和康銅作成，在作成以後，又在實驗室內，用標準溫度計（準確度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ）加以校正。在實際測量時，為了消除熱偶引線電阻所導致的測量誤差，用直流電位計代替毫伏表，試驗時將熱電偶的一端保持 0°C （放在盛有冰水混合液的暖水瓶中）。另一端固定在欲測的油內和直接焊接在欲測的綫卷上，使用這種方法進行測量，可以保證測量的準確度在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以內。

II、試驗結果的分析

圖 1 表示不同負荷時，空氣冷卻與噴霧冷卻沿變壓器綫卷高度溫度變化曲綫可以看出，兩者形狀基本上沒有大的改變，只是當過負荷到 208% 時，綫卷沿高度溫度的變化較大，這是由於噴霧的結果，加速了油的自然循環所致。

由此可以得出結論，噴霧冷卻變壓器，不會使得油自然循環惡化，而只是加強了油的循環。這樣我們就可以利用空氣冷卻時計算綫卷最熱點對上層油溫的溫升，以及上層油溫對噴霧水溫度的溫升的公式來確定不同負荷時的穩定溫度。

1. 綫卷溫升及其指數 $n_{o.s.m}$ 的確定：

一、綫卷溫升計算公式：假定不考慮負荷變化時，綫卷電阻變化和油粘度變化的影響，依照各國發表的資料，不同負荷時，銅油溫差的經驗公式如下：

$$\tau'_y = \tau_y \kappa n_{o.s.m}$$

τ'_y ——不同於額定負荷下綫卷最熱點對上層油溫的穩定溫升；

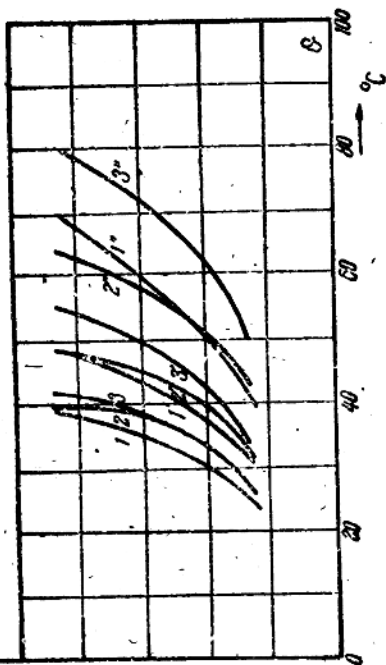
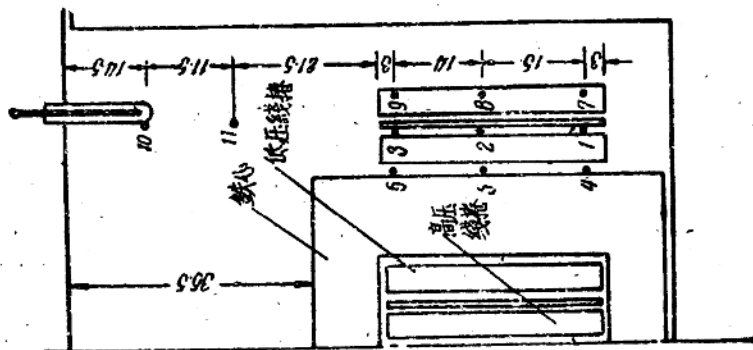
τ_y ——額定負荷時綫卷最熱點對上層油溫的穩定溫升；

κ —— I/I_n ， I_n 為額定電流， I 為相當於 τ'_y 時的負荷電流；

$n_{o.s.m}$ ——綫卷溫升指數。

图 1.2) 空气冷却

1—在頁荷为 80 % 时, 高壓压油速度的分布; 2'—同上頁荷为 100%, 1'—同上頁荷为 129%; 2—頁荷为 80 % 时, 低壓与鉄心油道的温度分布; 2'—同上頁荷为 100%, 2'—同上頁荷为 129%; 3—頁荷为 80 % 时, 高壓绕卷的温度分布; 3'—同上頁荷为 100%, 3'—同上頁荷为 129%。



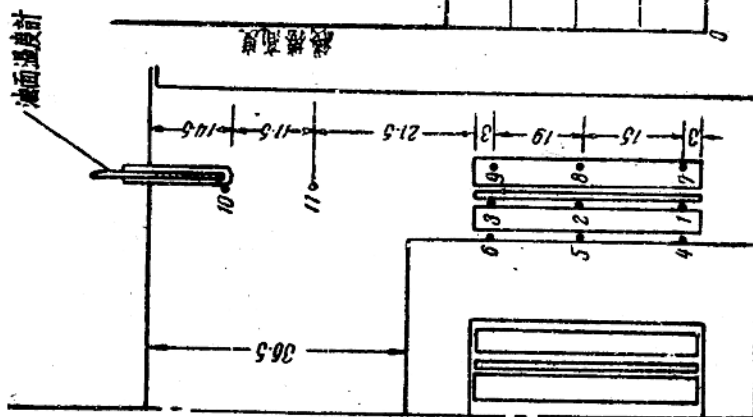


图 1-6) 噴霧冷却

1—在頁荷为104%时, 高低压油道温度的分布; 1'—同上頁荷为154%, 1'—同上頁荷为208%; 2—頁荷为104%时, 低压与鉄心的油道温度分布; 2'—同上頁荷为154%, 2'—同上頁荷为208%; 3—頁荷为104%时, 高压繞卷的温度分布; 3'—同上頁荷为154%, 3'—同上頁荷为208%。

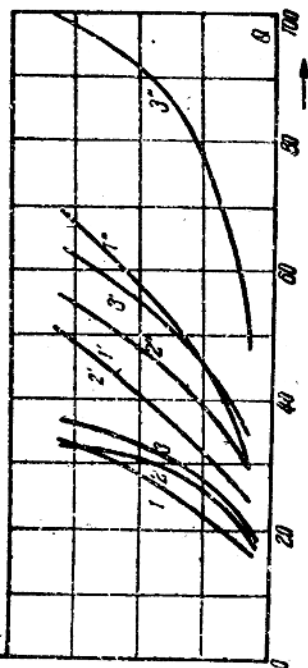


图 1 320 千伏安变压器热偶安装位置及沿变压器
绕卷高度温度的变化

一般文献中，大都采用线卷平均温度对油的平均温度的稳定温升；而我们采用了线卷最热点时上层油温的稳定温升，这是因为考虑到线卷温度在运行现场中不易求得，一般只是通过上层油温来监视变压器的温度，如找出线卷最热点温度上层油温的稳定温升关系，对今后运行中确定变压器的负荷能力有着很大的指导意义。

二、温升指数 $n_{\theta\theta\kappa}$ 确定：根据试验结果，空气冷却和喷雾冷却变压器在不同负荷时，线卷最热点对上油温升列于表1及表2。

表1

空气冷却

负荷倍率 $k=I/I_N$	0.8	1.0	1.285
线卷最热点温度 $\theta_{\theta\theta\kappa}^{\circ}\text{C}$	41	54.5	79.2
上层油温 $\theta_{\kappa}^{\circ}\text{C}$	34	43	61
$\theta_{\theta\theta\kappa}-\theta_{\kappa}=\tau'_{\nu}^{\circ}\text{C}$	7.0	11.5	18.2

表2

喷雾冷却

负荷倍率 $k=I/I_N$	1.04	1.054	1.96	1.78	2.08
$\theta_{\theta\theta\kappa}^{\circ}\text{C}$	36.9	63.2	66.5	79	99
$\theta_{\kappa}^{\circ}\text{C}$	26.4	38.7	4.0	46.3	54.5
$\theta_{\theta\theta\kappa}-\theta_{\kappa}=\tau'_{\nu}^{\circ}\text{C}$	10.5	24.5	26.5	32.7	44.5

注：表中“ I ”试验负荷时的电流，“ I_N ”额定负荷时的电流。

将表1及表2的数据绘成曲线，如图2所示。

从图2曲线1可查得不同的 k 值相应的 τ'_{ν} 值，然后分别代入上式，可得出不同 k 值时的 $n_{\theta\theta\kappa}$ ，计算结果列于表3。

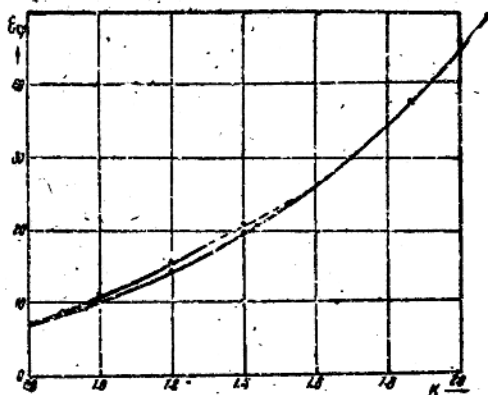


图2 负荷与铜油温差的关系曲线 $t_o = f(k)$

1'—空气冷却; 1—喷雾冷却。

表3

k	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
$n_{o, \theta, \Delta}$	1.91	2.04	2.02	2.06	2.06	2.07	2.07	2.05	2.04	2.04

从上表中可看出 k 值由1.1变到2.0的 $n_{o, \theta, \Delta}$ 值, 始终在2的左右变动不大, 因此在变压器喷雾冷却时, 铜油温差指数 $n_{o, \theta, \Delta}$ 可取为2.0。

在空气冷却的情况下, 依据苏联勒·麦·什尼泽尔著“电力变压器的负荷能力”一书中推荐的数值为1.72。两者比较, 说明在喷雾冷却时, 随着负荷的增加, 铜油温差比在空气冷却时增大了。这是很容易理解的, 因为由于喷雾冷却结果, 加速了油的自然循环, 比较图2中曲线1及1', 可以看出在负荷比较低时, 喷雾冷却后, 铜油温差降低了。而在很大的过负荷时, 却又增大了。我们认为这是铜损显著增加, 由于线卷温度的大大

升高和噴霧冷卻的結果，故加速了油的自然循環。

2. 上层油温时噴霧水的温升及其指数 n_m 的确定:

一、上层油温对噴霧水的温升计算公式: 同样假定不考虑繞卷电阻变化的影响, 依据苏联勒·麦·什尼泽尔“电力变压器負荷能力”一書19頁, 不同負荷时上层油温升的公式为

$$\theta'_{y.m} = \theta_{y.m} \left(\frac{1 + ak^2}{1 + a} \right) n_m$$

式中 $a = \frac{P_K}{P_{x.x.}} = \frac{\text{在額定电流 } I_H \text{ 时的短路損失}}{\text{在額定电压 } U_H \text{ 时的空載損失}}$

根据TM320/6.3的数据 $a = \frac{6070}{1600} = 3.8$

式中: $\theta'_{y.m}$ ——不同于額定負荷时上层油温的稳定温升;

$\theta_{y.m}$ ——額定負荷时上层油温的稳定温升。

二、油温升指数 n_m 的确定: 不同負荷时, 上层油温对噴霧水的温升列于表4。

表4

負荷 $k = I/I_N$	1.04	1.54	1.6	1.78	2.08
上层油面温度 θ_m °C	26.4	38.7	40	46.3	55.7
噴霧水温度 θ_B °C	9.3	9.3	8	9.3	9.0
$\theta_m - \theta_B = \theta_{y.m}$	17.1	29.4	32.0	37	46.7

将表4的数据繪成曲綫, 如图3所示。

从图3中的曲綫可查得不同的 k 值时相应的 τ'_v 值, 然后分別代入上式, 可得出不同 k 值时的 n_m , 計算結果列于表5。

从表5中可以看出, 当 k 由1.2变化到2.0时, n_m 由0.703变化到0.785, 因此 n_m 可取0.8, 并且还有一定的裕度。 n_m 取0.8和“电力变压器的負荷能力”一書中, 空气冷却时数值是一致的。