

全国供电技术会议文件

4

提高变压器出力

全国供电技术会议秘书处编

水利电力出版社

內 容 提 要

本書是全国供电技术會議的技术文件，內容介紹用噴霧冷却电力变压器的方法和电力变压器裝用噴水冷却的实际运行經驗。

本書可供电力系统供电方面的工人和工程技术人员閱讀。

* * * *

全国供电技术會議文件

- | | |
|---------------|------------------|
| 1. 全国供电技术會議文件 | 6. 提高供电網的运行水平 |
| 2. 綫路升压 | 7. 送电綫路的串联电容补偿 |
| 3. 提高开关遮断容量 | 8. “兩綫-地”制电力網的試驗 |
| 4. 提高变压器出力 | 9. 农村供电網 |
| 5. 供电網的基建设計 | |

全国供电技术會議文件

4

提高变压器出力

全国供电技术會議秘書处編

*

1848D526

水利电力出版社出版 (北京西苑科學路二號樓)

北京市書刊出版業登記許可証出字第106号

水利电力出版社印刷厂排印 新华書店发行

*

850×1168 $\frac{1}{2}$ 开本 * 1 印張 * 26千字

1958年12月北京第1版

1958年12月北京第1次印刷(0001—10,100册)

統一書号: 15143·1453 定价(第9类)0.16元

目 录

I、关于加强冷却提高变压器出力的总结	3
II、用喷雾法冷却电力变压器	3
一、电力变压器加强冷却的方法	5
二、用喷雾法冷却电力变压器	8
三、电力变压器加强冷却后的出力问题	13
四、运行中测定电力变压器绕组温度	16
五、结束语	20
III、5,000 千伏安变压器装用喷水冷却运行	20
一、水冷却装置的构造	20
二、温升试验情况	21
三、对温升试验情况的讨论	28
四、目前对 5,000 千伏安变压器允许过负荷的规定	31
五、使用上存在的问题	31
IV、青岛市电业局供电所主变压器水冷却降温措施介绍	32

I、关于加强冷却提高变压器出力⁰⁰⁰⁰⁴²⁵⁸

全国供电技术會議提高变压器出力專題小組

(見1958年全国供电技术會議文件1第20頁)

II、用噴霧法冷却电力变压器

水利电力部技术改进局

社会主义建設的总路綫要求我們多快好省地发展电力工业，自从鋼鐵元帥升帳以后，担任着先行工业責任的电力工业，呈現了空前未有的緊張狀況。要使电力工业从目前落后的形势跃居到真正先行之列，最根本的办法是加快电力工业的建設速度，但是这需要時間，这里不但是指电力工业建設所需要的時間，而且也包括为电力工业提供設備所需要的時間。

時間是寶貴的，对于我們电力工业工作者說来，除了爭取更多的新設備更早地投入运行以外，應該积极地創造出立竿見影的办法，在現有的設備上进行較小的改进及研究，使現有設備為我們提供更多的出力。这是我們运行工作者当前最迫切的任务。

說到超銘牌提高出力运行的問題，一般总連想到降低設備的寿命的問題。实际上我們實現超銘牌运行的时候，决不是盲目的无限制地提高出力，而是依照試驗的結果科学地进行的。在这一天等于二十年的时代里，設備寿命的概念恐怕也不能再和以前一样，所以即使經過超銘牌运行以后减少一些寿命，也可以考虑一般电气設備的經濟寿命过去是按照二十五年設計計算的，我們暫且不說有很多設備已經运行了三、四十年而沒有损坏，就拿二十

4

年來說，對我們這樣一個快速建設的國家說來也不算短了。首先我們可以看到到1962年的時候，我們現有設備的容量已經是總容量的很小部分，差不多是九十分之一，真是微乎其微，相當於一般的備用容量。另一方面如果我們能夠馬上多提供20%的電能，支持到1962年，這20%的容量在這快速發展的第二個五年建設計劃中所生產的價值完全可以抵償這些設備降低壽命（即使是全部在1962年損壞也沒有太大問題，因為這只是重繞絕緣的問題）所遭受的損失。

可以估計到在開展超銘牌工作時會發生個別的事故，如果我們能夠正確地科學地加以掌握，這種個別的事故是可以避免的，在電氣設備超銘牌運行中的主要問題是發熱問題，而發熱超過限度以后的主要損害是降低設備的絕緣壽命，這樣的損害是逐漸發生和積累的，所以不會立即和同時發展成為事故，而且在經過科學地研究試驗和分析以後，再有限制地確定過負荷容量的話，我們有把握把這種事故，在最近幾年內發生的可能性減到最小。

在所有的電氣設備中提高出力的潛力最大的是電力變壓器，所以我們先從電力變壓器著手。提高電力變壓器的出力只要加強變壓器的冷卻便可以達到目的。加強冷卻的方法很多，我們估計運用最簡單而又經濟的加強冷卻的方法，完全有可能在不損害變壓器絕緣壽命的條件下，提高變壓器的出力30%以上。

現有變壓器上加強冷卻的方法中比較成功的一種是淋水冷卻，這種方法已經在好些地方被採用著，但是這種方法冷卻效率比較低，耗水量比較大，在水源比較缺乏的地方不能大量採用。

噴霧冷卻變壓器是在淋水冷卻的基礎上進一步提高的冷卻方法，經過初步試驗證明這種加強冷卻的方法符合於多快好省的原則。它比淋水冷卻有好些優點，首先是冷卻效率比較高，因為是霧，它能夠受熱蒸發，有一部分可以利用蒸發熱冷卻，同時噴在空氣中的霧能夠把周圍空氣的溫度降低，而且接觸變壓器冷卻器和外皮的霧及水珠也比較均勻和普遍，可以充分利用冷卻面；其次是耗水量大大減少了，這對於供水不便的變電站特別有利。

按照某水力发电厂利用很低温度的水进行淋水冷却試驗的結果，变压器上层油温在不用風扇的条件下，淋水与不淋水相差 5°C ；同样利用風扇时，二者相差 10°C ；一般淋水冷却降温在 20°C 上下。按照我們試驗的結果在不用風扇的条件下，噴霧和不噴霧相差 20°C 以上，耗水量也小得多。

虽然我們对于現有变压器提高出力的問題提出了可行的办法，但是由于我們的工作还做得很不够，对有些問題还没有得到具体的試驗結果，象如何确定出力問題，目前还只能利用經驗曲綫，而不能建立我們自己的規定，冷却效率是否还可以提高、噴霧器是否还可以改进、現有的农药噴霧器的噴霧效率很低，噴出的大部分还是水，以及变压器冷却管漆皮脫落問題等。关于这些，我們將进一步加以研究，希望各現場进行这一工作时也加以注意，并将运行試驗結果随时告送我們，以便共同提高。

一、电力变压器加强冷却的方法

国内現有电力变压器的冷却方式大致有下列几种：

1. 油循环空气自然冷却，这是最普遍的一种，其中包括有冷却器和沒有冷却器的两种。

2. 油循环强力空气冷却，这是在冷却器上加裝强力通风裝置，这也是普遍使用的一种。

3. 强迫油循环水冷却，这是使油經過油泵强迫在冷却器內循环，增加流速，或者把油从变压器內抽出来，經過冷却器，由水冷却后再打入变压器。这种型式的冷却裝置在国内还使用得不多，上海电机厂也供应过这种冷却方式的变压器，由于油泵的防漏問題比較复杂，到目前为止这种方法在国内还处在研究阶段。

4. 强迫水循环冷却，这是把冷却器安裝在变压器內通水冷却，这种方法在上海几台美国出品的变压器上使用着，但是这种方法有好些缺点，因为是水循环，油流速度并不增加很多，所以冷却效率要比强迫油循环低得多，同时冷却器安裝在变压器箱內占据相当大的地位，对变压器的結構发生不利的影响，再加以万

一冷却器漏水則油的絕緣將迅速下降，有造成絕緣事故的危險。

5. 淋水冷却，这并不是正規的产品的冷却方式，而是由于負荷緊張，所以好些运行單位自己进行了这种改进。因为沒有很好的設計和試驗，在有些淋水冷却的地方还存在着一些問題，有的从頂蓋上直接淋水流下，这种办法虽然看起来很有效（因为油面溫度降低最多），但是实际上这种淋水法很可能会破坏油的循环系統，产生不可允許的局部过热。變壓器的最高溫度从油面下降下去，而指示油面溫度的溫度計再也不能指示油的最高溫度。也有的只淋在桶皮上，而不淋在冷却器上，也有好些地方淋了以后看不出效果，也有的使丸形溫度計的引綫淋上了水，所以看起来指示的溫度特別低。这些都必須加以改进。

任何變壓器在現有冷却方式的基础上加上其他冷却方式或改进其原有冷却方式，都可以使變壓器降低溫度提高出力。有的變壓器由于安裝地位破坏了它原有的冷却方式，因此可使溫升过高，例如我們曾經在屋子內进行汉沽变电站一台變壓器的无負荷溫升試驗，結果不帶負荷的溫升已經达到攝氏20多度，和运行中帶60%負荷的同样變壓器（在室外）溫升也差不多。这是因为在室內破坏了自然通风的条件。同样的情况也发生在东北鞍山变电站的變壓器上，由于變壓器安裝在防空屋內，在夏季必須限制出力才能够保持油面的正常溫度，在加强通风以后溫度下降了 10°C ，这一問題也就解决了。

所以加强冷却的最簡單的方法是加强通风，这也可以加裝風扇或改进風扇結構来实现。一般說來帶有風扇的强迫通风變壓器在合上和切断風扇时，變壓器的額定出力可以相差約 $1/3$ 。風扇安裝的方法也可以影响其冷却作用，有些風扇开动后，不但不能降溫，反而使油面溫度升高。

在已經具有强力通风的變壓器上，加强冷却的办法必須是进一步加快油流速度，因为單純的加强表面冷却，只能降低油的溫度，而当油溫降到一定程度时，油的粘度增加以致降低油流速度，增大變壓器綫卷銅綫和油的溫差，起不到冷却的作用。

强迫油循环便是加快油流速度的具体措施。过去一般使用的是强迫油循环水冷却方式，这是把变压器油抽出，由另装的冷却器把变压器油冷却后送回到变压器里去。最近有些国家采用了强迫油循环自然冷却或强力通风冷却的方式，这是在变压器的冷却器和桶体连接的地方加装一个小的电动油泵，这种方法比较简单，所需的功率也较小，而效果却比较显著。

但是这种强迫油循环的装置中存在着一个最大的困难是油泵的漏油和漏气问题，解决这个问题的办法一般是在油泵的轴上加装油封，但这是很困难的。现在国内正在研究将原动机和油泵一起密封在油道内，只剩下三根导线引出来，这种办法在国外是常用的，估计在现在新型绝缘材料大量出现的条件下，完全有可能解决这方面的困难。技术改进局已为此设计了一种转子在油道内，静子在油道外的电动油泵，经过试验证明这种结构是可用的，只是在电动机出力的利用以及励磁电流上存在着不可克服的浪费。

对于已经运行的旧有变压器，绝大多数不能应用上述加强冷却的方法，但是社会主义建设的形势又要求我们对这些变压器提出又多又快又好又省的提高出力的方法，这便是大家已经熟知的淋水和喷雾加强冷却的方法。这是一种土办法，不需要很多投资，也没有什么高深的技术，但是在使用这种办法以后，增加出力30%以上而不损失绝缘寿命的效果完全可以达到。

在变压器加强冷却方面很多地方还在作进一步的努力，有的地方已经开始试制和试验内冷变压器的工作，开始是水内冷，因为水的绝缘性能较差而且有漏入油内的危险，所以后来改用油内冷，并且据说已经成功，增加出力数倍。我们觉得这种办法是可行的，但是制造运行维护都比较复杂，而且按照目前变压器的铜油温差只有 $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ 左右，油水并不最大，对于高压变压器是否必须应用这么复杂的办法尚可考虑。

干式变压器用氟炭化合物等介质进行蒸发冷却的研究工作也在进行中，如果能够配合氧化铝绝缘的铝绕组变压器使用蒸发冷却，那必然能够达到很高的冷却效果。依照所收集的資料看来，

这种冷却方式可以提高出力10倍以上。

所以总的說来，从改善冷却方面着手，提高变压器出力方面的潜力还是很大的，在新变电站的设计中如何考虑备用及事故过负荷容量问题，可能会由于加强冷却问题的提出而作根本性的修正。在那种情况下限制变压器出力的因素不再是热的問題，而是变压器的效率以及电压调整率高低的問題了。

二、用噴霧法冷却电力变压器

1. 噴霧冷却电力变压器的优点

前面已經提到对于旧有运行中的变压器加强冷却的方法中以噴霧冷却最为优越，因为：

(1) 需要安裝的噴霧裝置非常簡單，可以在变压器不停止运行的条件下加裝。

(2) 投資費用非常少，在有自来水的地方，只需用水管及农藥用的噴霧头。一个变压器只要几十元便可以安裝好噴霧冷却。沒有自来水的地方也只要加裝小水泵。

(3) 运行维护也非常簡單，巡視时只要看一下噴霧头是否有堵死現象，如有堵死可以单独将个别噴霧头拆下进行清理。

(4) 因为是噴霧而不是淋水，冷却效率較高，霧能够随风及气流飞散，所以分布比較普遍而均匀，接触变压器的霧的蒸发热較水升高温度所吸收的热要大得多，同时在空气中的霧也使变压器周围的空气温度下降。因此噴霧冷却的耗水率比淋水要低得多，按照我們測定的結果一台 2600 千伏安的变压器降低 20°C 所需的水量每小时只有 1 吨多。对于缺水的地区更为有利，而且也不需要解决下水道的問題。

(5) 这一方法的采用不單可以解决大跃进中电气设备过负荷的关键問題之一，而且对新变电站的设计也提出了挑战，是不是要用新的考虑来解决变压器的备用和事故过负荷容量問題。

2. 霧的产生及噴霧器的簡單結構

按照冷却效率的要求，霧的細度應該越細越好，但是这要求

比較高的水壓力和設計良好的噴霧頭，而且為了保證足夠的冷卻能力及均勻分布，噴霧器的數目必須相應增加。

在進行試驗時，我們盡量採用了土的方法，水用的是北京市的自來水，大約只有1~2個大氣壓力，噴霧頭用的是普通農藥用噴霧頭；所以噴出來的大部分還是水，估計有1/5~1/10是能夠隨風飄揚的霧。大部分水還是沿着變壓器的冷卻管往下流。如果能夠改進一下噴頭結構，一定可以得到比較好的結果。

噴霧頭的結構如圖2-1所示，它分為六部分，喇叭頭部分和進水管相連接，在喇叭頭的廣口上蓋有薄片，薄片上有二個旋水孔，使喇叭頭內的水在經過薄片後產生旋轉，旋轉着的水沖進薄片和喇叭蓋之間的小室，然後由喇叭蓋中心的小孔噴出，為了壓緊薄片在喇叭蓋和薄片四周之間墊有橡皮圈。調節薄片上旋水孔及喇叭蓋中心孔的製造直徑可以得到粗細不同的霧。

3. 噴霧器組的安裝

沿變壓器的四周安裝1吋或6/8吋的水管，在水管上正對變壓器冷卻器的部分，相隔20公分左右焊接一個噴霧頭，噴霧頭基本上和變壓器冷卻器相對，二者的距離約20公分上下。水管的高度由噴霧器噴出的霧的細度來決定，如果噴出的大部是水，則因為水能順冷卻器流下，而噴頭的位置以安裝在冷卻器的上部為好，如果噴出的大部是霧，則因為霧能隨氣流上升，而噴頭的位置以安裝在冷卻器的中下部為好。總之噴頭安裝的相對位置應使霧或水能夠均勻地分布在變壓器冷卻器上為目的，同時應該注意不使冷卻的油有倒回的可能，在變壓器冷卻器上部連接部分及桶皮上不直接接觸冷卻水為好。有些單位在進行淋水冷卻時看不到效果的原因可能是由於噴射的位置破壞了冷卻器的正常工作，以致不但起不了冷卻作用，相反減少了冷卻器的油流速度，特別在變壓器桶蓋或桶皮上直接淋水是十分有害的。

所以加強冷卻以變壓器冷卻器的垂直部分直接接觸冷卻物質最為有效，冷卻管內油溫降低後比重增大，內外油柱的壓力差也增大，而這一壓力差可以全部用來增加油流速度。

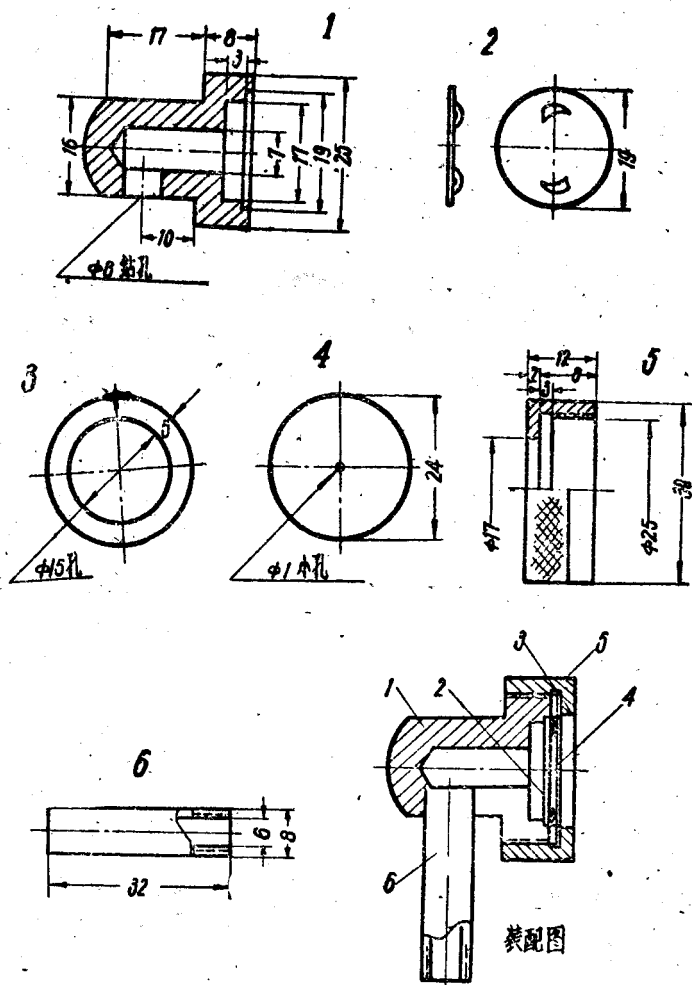


图 2-1 噴霧头結構图

1—黃銅喇叭头；2—薄黃銅旋水片；3—2公厘厚的橡皮墊圈；
4—薄黃銅片噴出口；5—黃銅螺盖；6—進水管。

如果使用其他水源，为了避免喷雾头的堵死，在管路内应加装过滤网，一般的自来水比较洁净可以不加过滤网，以免损失水压。

我們在一台 2,600 千伏安变压器上所安裝的噴霧組的大致情况可以从图 2-2 中看出来。

4. 噴霧冷却电力变压器的試驗結果。

我們进行試驗的变压器是安裝在北城变电站的三台 2,600 千伏安帶有風扇的強力通风冷却的变压器，由于風扇是水平吹风，

所以据变电站同志介紹風扇的作用很坏，当使用風扇吹风时油面温度不但不下降，相反略有增加，因此在进行噴霧冷却試驗时沒有用過風扇。

首先我們进行了帶相同負荷时噴霧和不噴霧变压器各部分温度的比較試驗，为了得到比較可靠的結果，在噴霧的变压器（4 相）油面上加裝了酒精溫度計，同时在此变压器桶皮二側沿不同高度安設了九支溫度計，以記錄其温度分布并在噴霧后加以比較，因为另外二相（B 及 C 相）油面溫度計均已損坏，故在頂盖下相应于 4 相桶皮側面最高溫度計的位置加設酒精溫度計各一支。

这組变压器在早上八时前的負荷各为 500 安（为額定值的 63.0 %），八时后升为 650—700 安，九时五十分开始記錄其結果如下：

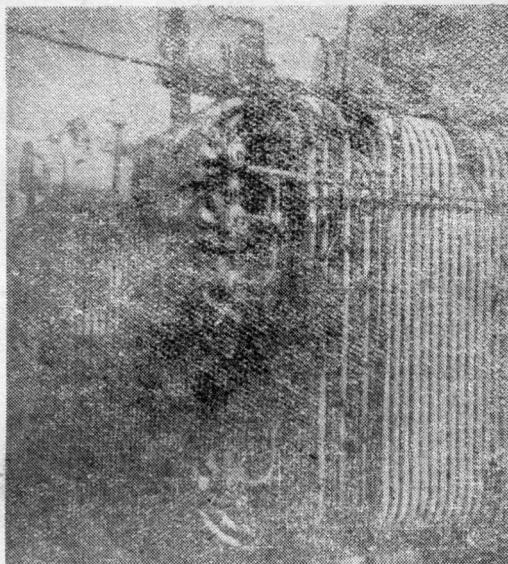


图 2-2 噴霧裝置的安裝位置及其运行照片

时 間	負 荷	周圍溫度 °C	A 相油面溫度 °C	頂蓋下部溫度 °C A 相 R 相 C 相			備 注
9 50	650—700	26	59	54	57	53	天气晴朗
11:05	650—700	27	61	57	60	56	"
12 00	負荷降到 500 安培上下, A相开始噴霧						
13:00	負荷开始上升						
13:30	600	26	54	39	60	57	天气晴朗
14:20	600—650	25	41	37	60	57	"
16:00	700	25	41	37	60	58	"
17 00	700	24	39	36	59	57	"

噴霧前后桶皮二側溫度分布如下:

溫度計所在位置占桶皮高度的%	20	40	60	80	100
11:05时(噴霧前)低压側	42	47	52	54	57
高压側	42	48	52	55	
17:00时(噴霧后)低压側	25	28	32	33	36
高压側	24	28	31	34	

从上述試驗記錄可以得出下列几点結論

(1) A 相油面溫度下降 $59^{\circ}\text{C} - 39^{\circ}\text{C} = 20^{\circ}\text{C}$, 負荷前后略有增加, 虽然在12时前后負荷曾有下降, 但13时到17时已有四个小时, 溫度已經达到稳定(在这期間周圍溫度略有下降)。

(2) A 相頂蓋下部溫度也同样下降了 20°C 以上, 也可以証明这一点。

(3) A 相及 C 相頂蓋下部溫度的差別也同样証明了这一点, 未噴霧以前二者相差为 1°C , 噴霧以后二者相差为 21°C 。

(4) 噴霧前后的溫度分布情况保持正常, 可以認為基本沒有破坏內部油的循环。

(5) 在这一試驗中共使用噴霧头28个, 水压力为 $2 \sim 2.5$ 大气压力, 每小时的耗水量为 1 吨左右。

(6) 从溫度下降的时间可以看出, 在噴霧开始的一小时内, 油面溫度下降不多, 在第二小时内才有显著下降, 所以在使用噴霧

冷却作为尖峯時間过負荷的冷却方式运行时，必須在尖峯到来以前1小时以上投入噴霧冷却裝置。

按照上述試驗結果，我們在这三台变压器上都安裝了噴霧裝置，并进行了过負荷25%的試驗，試驗持續時間为二小时多，噴霧前的負荷約为額定值的90%，当尖峯負荷过去后，变压器油面温度較过負荷前只上升了5°C(油面温度为50°C)，这表示变压器的温度还存在着相当大的裕度，过負荷的能力还可以超过25%。

5. 几个問題

由于我們的試驗工作还做得很不彻底，到目前为止还没有能够得出对变压器加强冷却后提高出力的最后意見，为了更好地推广这一經驗，我們認為还必须下列几个問題上作进一步的努力。

(1) 噴霧器还可以繼續改进，以求得最有利的霧水比例，發揮最大的冷却效能，使缺水的地方也能够經濟合理地使用这一方法。

(2) 噴霧器組安裝位置还可以作进一步的研究，以求得适用于各种型式冷却器的各种安裝位置。

(3) 噴霧冷却的效能和油温的关系問題还有必要作进一步的研究，在气温特別低的条件下，噴霧冷却的作用可能由于油的粘度增加而减小甚至起反作用。同时在气温达到零下时噴霧器能否正常工作也是一个問題。

(4) 空气中的湿度对于霧的蒸发产生直接的影响，所以湿度对噴霧冷却作用的影响也应该加以研究。

(5) 在加强冷却提高出力的工作中，最關鍵性的問題是如何确定加强冷却后的出力問題，解决这一問題的方法很多，下面一节將專題討論，但是有一点必須提出，不管用什么方法确定出力，必須不增加运行人員的困难，并且也不應該加裝很多复杂的設備而必須停止变压器的运行。

三、电力变压器加强冷却后的出力問題

在我們开始討論這一問題以前，首先声明一点，我們所提到

变压器的发热都是均匀的，其中不包括由于設計不周，运行中油道堵死以及接头接触不良等所引起的綫卷的局部过热，因为这种局部过热所造成的絕緣损坏事故在目前条件下可以看作是偶然的事件，必須用加强設計、制造、运行维护的工作来防止。

均匀发热的变压器的出力問題决定于二方面的考虑，一方面是对变压器提出切合当前国家建設需要的运行寿命，另一方面是在这一运行寿命所决定的变压器銅导綫最高温度的限制下，如何更經濟合理地加强冷却。

因此在确定电力变压器过負荷出力的时候，最可靠的办法是控制变压器导綫最热点的温度。如果我們認為变压器要在正常的运行年限，例如20或25年內連續服务，那末我們必須保持变压器导綫最高温度不超过 115°C 左右，如果我們認為，为了解决特殊需要而可以牺牲一些运行寿命的話，那末我們可以提高这一温度，按照各国的試驗和經驗得出一般所謂的“八度規則”的經驗公式，这就是导綫最高温度每增加 8°C 寿命牺牲約为一半。按照这一公式便可以得出在牺牲某些运行寿命的条件下的过負荷出力。

在晝夜負荷曲綫有变化的条件下，变压器的最大过負荷还可以按照寿命增减的相互关系，增大在尖峯負荷时的出力。在这后面的两种情况下，导綫的最高温度不再是 115°C ，而是要高出很多。

在实际运行中測定变压器导綫的最高温度是相当困难的，通常是由变压器的油面温度控制变压器的出力。这就要求我們能够預先知道銅油温差，以便在运行中用監視油面温度的方法来确定变压器的允許最大过負荷。

依照各国发表的資料，从实驗中得出了一个經驗公式，这一公式如下：

$$\tau_y' = \tau_y \cdot k^n, \text{ 其中 } k = \frac{I}{I_{\text{НОМ}}}$$

式中 τ_y' 为不同于額定負荷下的銅油稳定温升；

τ_y 为額定負荷下的銅油稳定温升；

I 为相当于 τ_y' 时的电流， $I_{\text{НОМ}}$ 为額定电流；

$$\eta = 1.72.$$

图 2-3 所示为这一公式在 5、10、15、20 及 25°C 额定负荷温差时的曲线。

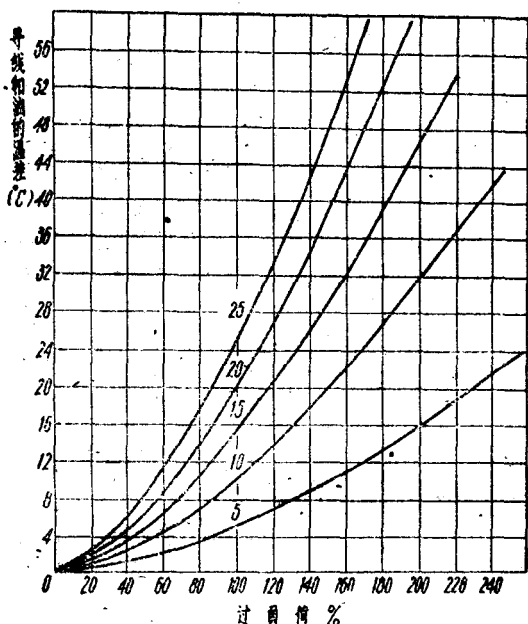


图 2-3 导线和油的温差与过负荷的关系

例：有一台变压器设计额定负荷下的铜油温差为 25°C，在过负荷 40% 时，其铜油温差由曲线查得为 43°C，如果限制变压器最高温度为 120°C，则油面温度应为 120°C - 43°C = 77°C；如高于 77°C，则铜的温度将高出 120°C。

在应用上述公式时，必须首先知道在额定负荷下的铜油温差，这一数据可以由制造厂提供，但是从过去运行的变压器中这一数据大都无据可查，按照各国设计经验这一数值大致介于 5°C ~ 25°C 之间，一般英美的变压器在 10°C ~ 20°C 上下，国产沈阳变压器厂的变压器设计数据在 25°C 上下。要得到肯定的资料必须进行每一型式变压器的实测试验，测定的方法将在下节加以叙述。

除了充分利用变压器各部温升的裕度或者牺牲一部分运行寿