

# 汽輪發電機冷卻問題

第一集

轉子部分

中國科學技術情報研究所

1958年12月

## 前 言

为全力支援國家电力事業的飛躍發展,配合本專業工程技術人員,研究人員的生產,研究工作,向他們提供必要的論文資料,研究綫索,特以分集分類形式,彙編成本專題綜述。它是以結合本專業題目所需要的國內外雜誌,論文,報告为主,並力求全面彙總,內容丰富。

限於編者水平,加之集收的資料尚欠完善,难免有不佳之处。

为此,敬請讀者提出要求,批評和指正。

編者1958.12

# 目 錄

|                          |        |
|--------------------------|--------|
| I、汽輪發電機強行冷卻的必要性          |        |
| 1. 氬氣冷卻                  | ( 1 )  |
| 2. 內部直接冷卻                | ( 2 )  |
| II、轉子繞組內部冷卻              |        |
| 1. 氣體內冷效果                | ( 4 )  |
| 2. 氣體內冷結構                | ( 6 )  |
| 3. 液體內冷                  | ( 10 ) |
| III、勵磁損耗                 | ( 12 ) |
| VI、蘇聯汽輪發電機的冷卻原則及其製造的發展遠景 | ( 13 ) |
| V、蘇聯汽輪發電機標準化一些問題         | ( 16 ) |
| 參考文獻                     | ( 17 ) |

# I. 汽輪發電機強行冷卻的必要性

## 1. 氫 氣 冷 却

汽輪發電機是高速旋的电机，它具有相当大的空气摩擦损失，其結構的嚴密与緊湊，使風路系統流体阻力增大。为保證足够的空气量，需要有很高压头，而它与空气摩擦损失成正比，後者又与冷却介質密度成正比。空气冷却汽輪發電機通风损失佔總损失的40%之多。

一般汽輪發電機的冷却系統是以气体循环为基础，冷却介質經過电机壳内部，帶走电机產生的熱量，現代汽輪發電機進一步採取了更有效的气体、液体内部直接冷却系統。

通风损失決定於冷却介質的重量，越輕损失越小。假如以很輕的气体代替 $0^{\circ}\text{C}$ 时，比重为1.3公斤/米<sup>3</sup>的空气，則比空气輕幾倍，损失就小幾倍。在所有的气体中，最輕的气体是氫气。考慮到氫气制取的可能性及其一系列的優點，認為以氫气作为冷却介質，减少汽輪發電機通风损失，从而提高發電機單位機組的極限容量是合理的。

表一、空气、氫气、二氧化碳性質

| 气 体 性 質      | 空 气 | 氫 气    | 二 氧 化 碳 |
|--------------|-----|--------|---------|
| 導 熱 性        | 1   | 6.69   | 0.638   |
| 密 度          | 1   | 0.0696 | 1.52    |
| 由表面到气体的導熱係數* | 1   | 1.51   | 1.132   |
| 体積熱容量        | 1   | 0.996  | 1.29    |

\*这是在層流情況下，如果是在紊流即湍流的情況下，此值还要高些。

在 $0^{\circ}\text{C}$ 及760公厘水銀柱的重量（克/米<sup>3</sup>）：

空气——1293；

氫气——89.87；

二氧化碳——1977。

由以上知，氫气比空气輕14倍，因此通风损失可减少14倍，就对混合气体的应用，通风损失照例减少8—10倍\*。如果空气冷却的大型汽輪發電機總损失为2.6%，則通风损失佔總損35—50%；作为氫冷时，發電機效率由於通风损失减少而提高0.7—1.0%，特别是对巨型汽輪發電機（150000瓩以上的）尤为顯著。

\*一般要求机壳中氫气纯度在94—96%範圍內。在运行条件下，当入口气体温度为35—40 $^{\circ}\text{C}$ 时，机壳中气体混合物成份如下：

氫气96%——78克/米<sup>3</sup>

空气及湿氣4%——52克/米<sup>3</sup>

气体混合物比重——132克/米<sup>3</sup>

这些气体重量比氦重得多，但比重比空气仍小8.4倍。

氦气不但重量小，导热系数比空气大1.51倍，混合气体大1.35倍。其体积热容量与空气比可以认为相同，因此用氦气冷却时，能保持原来通风系统结构尺寸。

氦气冷却的优点：

- 1) 提高电机的效率；
- 2) 当绕组温升达到空气冷却水平时，电机容量提高将近25%。
- 3) 氦不助燃，因此防止了电机内部的燃烧及电量。
- 4) 在氦气中减少了定子绕组绝缘间隙的游离现象。
- 5) 大大减少通风摩擦损失。

6) 由空气冷却改成为氦气冷却时，尺寸不变容量可增大20%或者容量不变电机节约20—30%的有效材料。

在提出氦气冷却的当时，运行人员曾产生过一定的恐惧。因为它是在某种条件下可能发生爆炸的气体。但这是多余的，至今多年的运行已证明了这一点，只要使电机内部氦气压力经常保持300公厘水柱左右，即高于大气压力0.03—0.05表压就不会发生任何问题。在往电机内充氦时，首先注入二氧化碳，然后再用氦赶走二氧化碳，於是，充氦时，就免除了氦气与空气的直接接触或者先把机壳抽真空达0.2绝对大气压，这时氦和空气混合无爆炸可能。空气与氦气混合气体中氦气含量为5—76%时有爆炸危险。混合气体成份应使氦气96%；氧气1%；惰性气体3%。如果比例变化，则以吹氦法改变混合气体比例。

## 2. 内部直接冷却

从前认为3000转/分汽轮发电机的极限容量为50,000瓩，近30年来又认为100,000瓩，而到今天容量为150,000瓩的汽轮发电机已在运行，现在考虑的是200,000瓩300,000瓩以至600,000瓩或更大容量的汽轮发电机，这种巨型发电机在目前技术条件下有可能完全付诸实现。

为制造这些巨型发电机，首先应解决的是冷却问题，因为就目前技术条件，决定汽轮发电机有效部分极限尺寸的是转子的机械强度，在高速旋转的转子材料中引起很大的离心机械应力以及交变弯曲应力，因此转子材料必须以特殊高质磁性的，并具有均匀成分和高机械性能的合金钢制成。尽管如此，在现代冶金技术水平下也只能使汽轮发电机转子尺寸限制在直径为1.1米，有效长度为6.5米的极限值以下。这些数据是目前系列制造的依据。然而它的极限容量也只能达到150,000瓩。

致力于尽可能大的巨型汽轮发电机容量的制造是由于一系列中小容量汽轮发电机所不及的重大的经济优越性及大容量电网的需要。

近年来动力系统如此增长，致使200—300兆瓦容量汽轮发电机显得不够大，而最新加强励磁的高速切断调节的应用，足以保证系统中巨型机组工作的稳定性。

装备巨型机组的电站的基本优点：

- 1) 提高了电站效率；
- 2) 机组数量减少，运行人员可作适当精简；

### 3) 縮小电站基建面積:

虽然單个的300,000瓩汽輪發電机的效率比150,000瓩汽輪發電机的低0.5—0.7%,但是就配备这种发电机机组的汽輪机而言,效率仍是高的。比如,容量为250,000瓩汽輪机的效率比容量为150,000瓩的高1.5%,於是机组效率由於採用了巨型大容量汽輪机,而提高0.8—1.0%,这已是很可观的数字了。

当容量由150,000瓩增加到300,000瓩时,机组数虽然未变,容量却加倍了,而发电机尺寸实际也能作到不加大,这样,电站机房佔地差不多也未变。

大容量巨型汽輪發電机的制造,已成为現代汽輪發電机制造业明确的发展方向。

新技术的发展,要求用一种最好的冷却方式使单位机容量,獲得更大的提高。

内部冷却这一概念的提出,使电机制造业进入了新的发展阶段,内部冷却是冷却介质(气体或液体)直接与發熱体相接触,於是發熱体,如定子、轉子的銅產生的熱量可不經過有很高溫度降,从而影响电机容量的絕緣,直接由冷却介质帶走。应用这种冷却方法,发电机的極限容量可突破40万瓩,進而達到60万瓩或更高值。

液体,包括絕緣油及純水,是巨型汽輪發電机定子、轉子内部冷却最有效的冷却介质。

比較:

- i) 在大气压力下,氬气冷却比空气冷却提高容量10—20%;
- ii) 定子空气冷却、轉子水冷却,提高容量25—50%;
- iii) 在大气压力下,定子氬气冷却,轉子水冷,提高容量20—35%,純水内部冷却相当轉子銅在3个絕對大气压下氬气冷却时的效果。

冷却介质一般应用氬气、絕緣油或純水。

对冷却液体的要求:

- 1) 導熱性高; 2) 熱容量大; 3) 熱穩定性、燃點及沸點要高; 4) 冰點低; 5) 流動阻力低; 6) 加熱不沉澱,与被冷却物体不起作用; 7) 有优良的絕緣特性及高的电气强度。

冷却电机廣泛应用的冷却介质,是純水及变压器油。

表二、与空气相比較的各种气体和液体冷却介质的特性:

| 冷 却 介 質           | H <sub>2</sub><br>2大气压 | H <sub>2</sub> | He    | CO <sub>2</sub> | 空 气 | H <sub>2</sub> O | 油     |
|-------------------|------------------------|----------------|-------|-----------------|-----|------------------|-------|
| 比 重               | 1/7.2                  | 1/14.4         | 1/7.2 | 1.52            | 1   | 860              | 750   |
| 導熱率               | 7.1                    | 7.1            | 5.8   | 0.62            | 1   | 23               | 5.3   |
| 熱容量(每公斤)          | 14.1                   | 14.1           | 5.2   | 0.84            | 1   | 4.1              | 1.9   |
| 熱容量(每立方米)         | 2                      | 1              | 0.7   | 1.3             | 1   | 3500             | 1400  |
| 在同一速度下的 $\alpha$  | 2.75                   | 1.7            | 1.34  | 1.02            | 1   | 570              | 22.2  |
| 在同一 $\alpha$ 下的速度 | 1/4                    | 1/5            | 0.72  | 0.91            | 1   | 1/3100           | 1/60  |
| 在同一 $\alpha$ 下的阻力 | 1/8                    | 1/2            | 0.91  | 0.72            | 1   | 1/6200           | 1/520 |

初看起來，覺得上述液體的冷卻特性比鹽、氫差。它們比重數值高，因此摩擦損耗大。但，仔細研究一下，發現它們有着很大的熱容量及導熱系數 $\alpha$ 。為了獲得與氣體冷卻時相應的冷卻條件，只需要不大的冷卻液體體積。冷卻液體就可能以較低的速度運動，從而在同一導熱系數條件下，散熱效果不變，流動阻力相應減小。

廣泛採用與提高電機容量，運行性能、質量有關的新技術，除內部液體冷卻外，還使用性能優良的硅有機絕緣、硅有機漆，冷硅軋鋼片等耐高溫及高導磁電工材料。

## II 轉子繞組內部冷卻

### 1. 氣體內冷效果:

一般汽輪發電機結構的轉子繞組溫度由下列溫度降組成:

|                    |       |
|--------------------|-------|
| 轉子絕緣套筒的溫度降.....    | 30°C  |
| 沿轉子槽高度的溫度降.....    | 20°C  |
| 由表面到氣體中氣體的溫度降..... | 30°C  |
| 氣體中氣體溫升.....       | 20°C  |
| 到電機中去的气体溫度.....    | 40°C  |
| 共計.....            | 140°C |

溫度降的數值可能有所改變，但總的說，對現代巨型汽輪發電機是有代表性的。

當轉子繞組銅直接冷卻（沒有中間導熱過程）時，則在絕緣套筒中，沿槽高度溫度降以及氣體中空氣的溫升完全不存在。應用在繞組通風道中的高速冷卻介質和機殼中的高壓冷卻介質可以顯著減少銅表面到冷卻介質的溫度降，並且當銅的溫度較低時，具有更高的散熱能力。

首先近似假定所有轉子繞組產生的熱量均在通風道中被氣體帶走。

槽內銅的填充系數： $K_{zs} = S_{2cuv} / S_2Cu0$ ，這裡..... (1)

$S_2cuv$ ——導體內有通風道的轉子槽內銅截面；

$S_2Cu0$ ——導體內無通風道的轉子槽內銅截面；即槽中全是銅。

如果經過槽橫截面的電流用  $I'_2$  表示，則轉子本體每公分長度的損失：

$$P_2 = \frac{(I'_2)^2 \rho}{K_{zs} S_2cu0} \dots\dots\dots (2)$$

如果轉子槽銅中通風道周邊長為  $lv$ ，通風道中氣體與槽中銅平均溫差  $\theta_{sv}$ ，由銅到氣體的導熱系數  $\alpha_v$ ，則轉子本體每公分損失：

$$P_2 = \alpha_v lv \theta_{sv} \dots\dots\dots (3)$$

恒等以上兩式，求出  $I'_2$  得：

$$I'_2 = \sqrt{\frac{1}{\rho} \alpha_v K_{zs} S_2cu0 lv \theta_{sv}} \dots\dots\dots (4)$$

一般無內部冷卻銅導體的繞組，流經槽截面的電流：

$$I_2 = j_2 S_2cu0, \dots\dots\dots (5)$$



这里  $I_2$  是转子绕组电流密度。

解 (4) (5) 式得:

$$\frac{I_2'}{I_2} = \sqrt{\frac{K_s p s v l v \alpha v}{\rho_2^2 S_{2 \text{ cuo}}}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

公式 (6) 说明, 与一般系统比较导体内冷系统可提高转子磁化力若干倍, 铜的结构特点在公式 (6) 中表现在系数  $K_v$  上:

$$K_v = \sqrt{\frac{K_s}{S_{2 \text{ cuo}}}} \frac{l v}{S_{2 \text{ cuo}}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

对图 9 (见 9 页) 结构方案, 系数  $K_v$  可以採取 1。为数字计算, 取  $p = 2.5 \cdot 10^{-3}$ ,  $\bar{r} = 400$  安/公分<sup>2</sup>,  $\theta_{sv} = 60^\circ$ 。温度降由以下部分组成: 铜平均允许温度  $120^\circ$ , 气体到电机中的入口温度  $40^\circ$  和冷却气体在通风道中的温升  $80^\circ$ 。

对以上叙述可以列出近似关系式:

$$\frac{I_2'}{I_2} = 12 \sqrt{\alpha v} \quad \dots\dots\dots (8)$$

对狭长通风道的导热系数  $\alpha u$  可按下列式计算:

$$\alpha v = 0.0215 \left( \frac{v}{40} \right)^{0.8} P^{0.8} \quad \dots\dots\dots (9)$$

这里  $v$ —通风道中的速度米/秒;  $P$ —气体在电机中的绝对压力, 系数 0.0215 与氩气纯度有关。

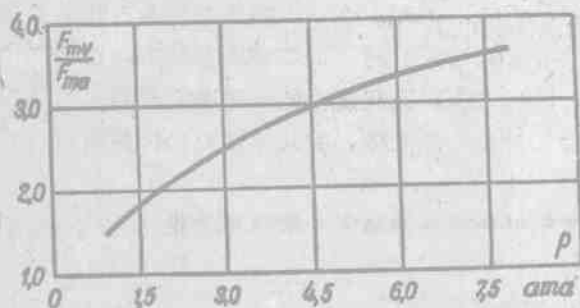


图 1 转子磁势与定子壳中 40 米/秒速度气体压力的關係曲线。取一般冷却系统中磁势值为一个单位。由图看出, 内部冷却时, 提高转子磁势 2 至 3 倍。磁势的继续增加, 靠冷却气体的速度增长。

容易証明, 当空载磁势与短路磁势之比为常数时, 即汽輪发电机并联工作时的稳定参考为常值时, 它的容量与转子磁势成比例, 数值统计结果可使得我們寫出汽輪发电机电視在功率近似公式:

$$P_m = 200000 \frac{F_{mv}}{F_{mo}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

这里,  $F_{mv}$ —内部通风时转子的磁势。

$F_{mo}$ —一般結構轉子的磁势。

由公式 (10) 看出, 在现代有效部分極限容量尺寸及一般轉子冷却系統条件下, 即当  $F_{mv}/F_{mo} = 1$  时, 極限容量为 200,000 瓩。当应用内部冷却, 使比值  $F_{mv}/F_{mo}$  加倍时, 汽輪发电机極限容量  $P_m = 200,000 \times 2 = 400,000$  瓩。

这些近似計算指明, 依靠轉子内部冷却的汽輪发电机容量可大大增高。



2、气体内冷結構：正如前述，提高汽輪發電機容量是依靠轉子繞組銅氣直接冷却系統的应用，由圖2、3看出各种冷却系統繞組中溫度降情况：

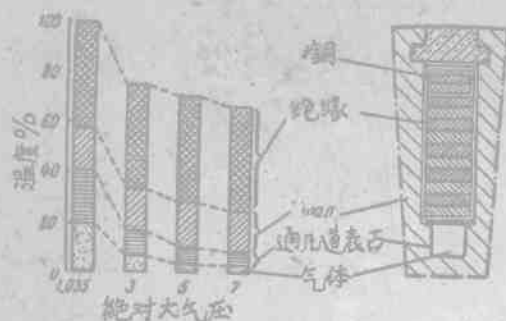


圖2. 标准結構轉子中溫度降

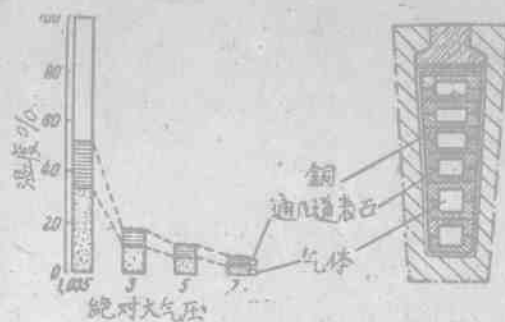


圖3. 銅直接冷却的轉子中溫度降（各部分損失与一般电机槽中的損失相等）

在現有的兩極汽輪發電機結構中轉子冷却問題曾是限制發電機單位容量增長的焦點。容量在200,000—225,000瓩以下的高压氫氣冷却汽輪發電機只应用轉子銅直接冷却和靠降低定子繞組电压，增加並联支路數目可以達到目的。然而对今後容量的繼續增長，必須使定子銅也進行直接冷却。

目前皆知的是轉子銅直接冷却的汽輪發電機結構。

根据通风系統，可被分成：

a、單方向軸向通风（圖4）

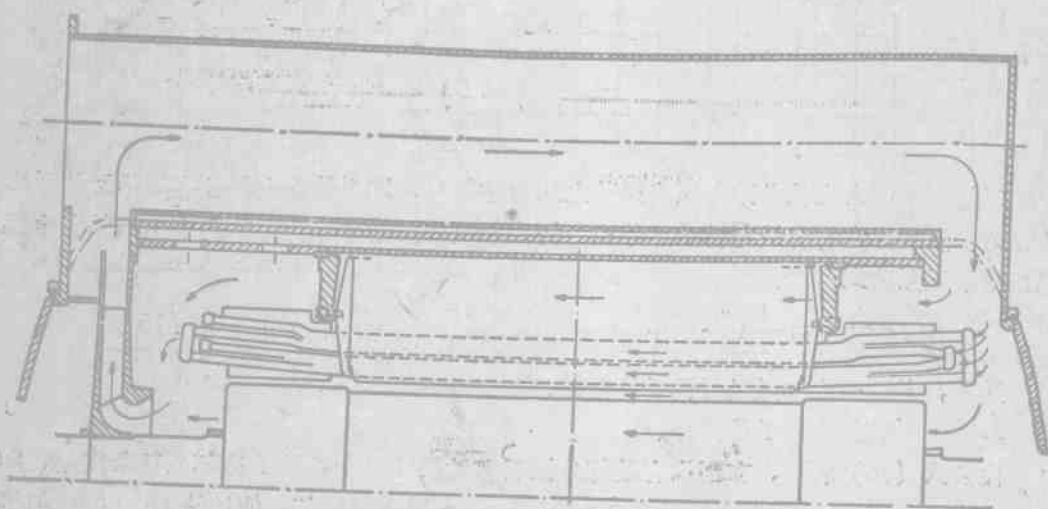


圖4. 汽輪發電機軸向通风系統圖

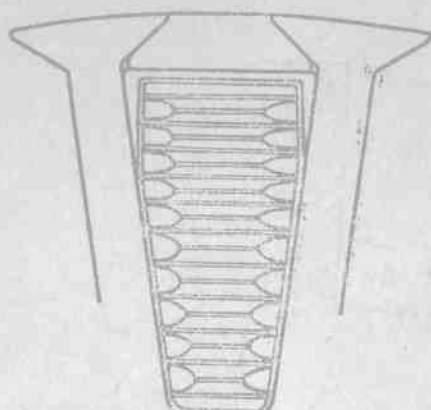


圖5. 定子槽断面

## 6. 双方向轴向通风 (圖6)

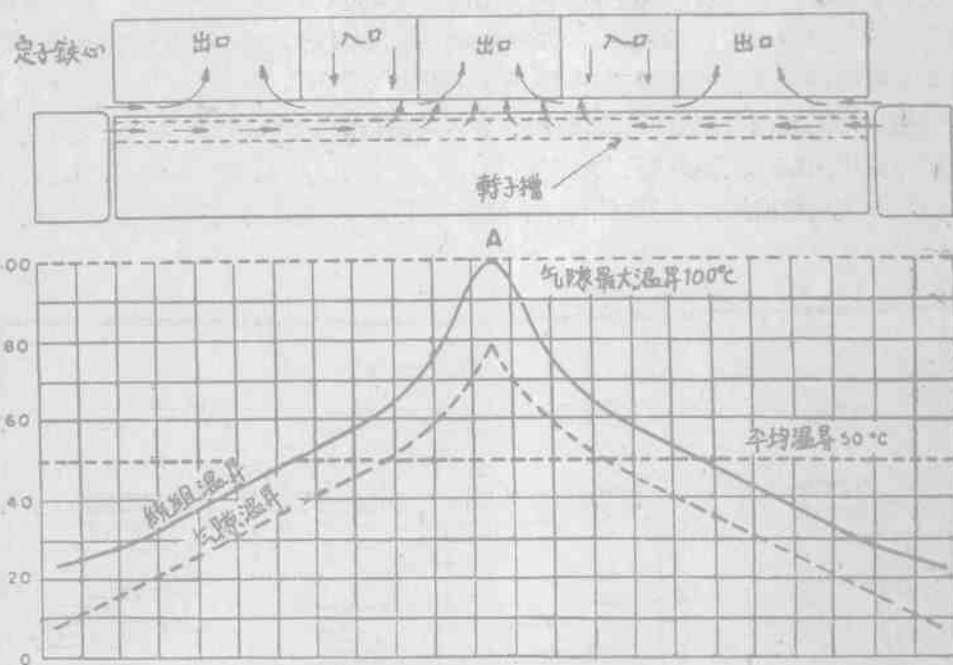


圖6. 双方向轴向通风圖及沿轉子軸繞組溫度分佈圖

—— 沿轉子軸向繞組溫度分佈曲綫。

..... 沿轉子軸向氣體溫度分佈。

## 8. 多流式通风 (圖7)

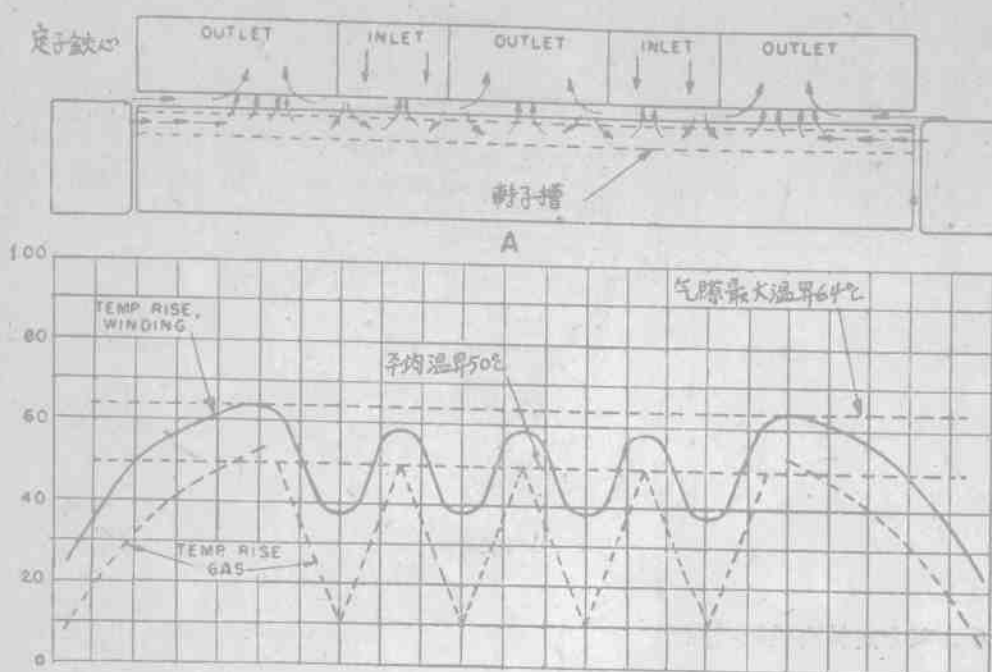


圖7. 多流式通風圖及沿轉子軸向溫度分佈圖

—— 沿轉子軸向繞組溫度分佈曲線  
 ..... 沿轉子軸向氣體溫度分佈曲線

与这些冷却系統相對应的曲綫（圖6，7）表示了沿轉子繞組長度的溫度分佈。在多流式通風系統中溫度分佈很為均勻。這就可能在同樣的銅最大溫度條件下，取得繞組更高的平均溫度。困難在於製造保證氣體在繞組中做複雜循環的轉子本体通風構結。（圖8）

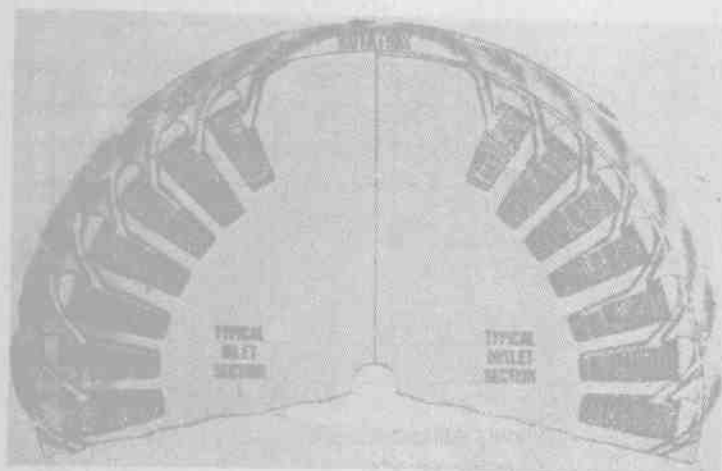


圖8. 多流式通風轉子槽  
 斷面  
 左半面圖視是繞組  
 進風口；  
 右半面圖視是繞組  
 出風口。（轉子順  
 時針轉）

在軸向通風系統中，氣體的運動決定於轉軸上風扇產生的壓頭（見圖4）。既然壓力和風扇的性能可在很大範圍內改變，因而總可取得所需的冷卻氣體消耗量。

在雙方向通風系統中，沿電機長度的斜率不大，但在電機中部，由轉子逸出的熱

气体提高了空隙中冷却气体的温度，从而使定子绕组局部过热。不过，这种危险性可借助于直接冷却的氟气吹向定子绕组得以减少。

从上述结构的转子绕组电气绝缘可靠性观点出发，偏重于轴向系统（见图4）因为在带栅形及从间隙逸出的冷却气流结构中（图8）的套筒绝缘，在槽高中部开有气体出风孔及进风孔，破坏了绝缘的完整，此外，在多流式通风系统中，转子齿槽孔降低了转子的机械强度，制造工艺，也很复杂。

从工艺观点出发，在单方向轴向通风系统中，偏重于转子绕组的利用，因为这个方案不在转子本体表面开气孔。

为了能经受离心力引起的局部压力及风化作用，铜直接冷却的转子绕组结构需要採用新式高强度薄塑料绝缘（無論套筒式还是連續式）。

转子绕组铜直接冷却的汽輪发电机通风系统，必須保证气体在很大空气动力阻抗的导体通风道中有很高的速度。

足够高的气体压头可以借安装在汽輪发电机转轴上的离心式风扇或轴向多级风扇产生，这些风扇在汽輪发电机端部空间的安装大大复杂了结构师的任务，並需要進行專門研究。

在这种情况下，轴向冷却时，需要通风的容量与原有各系统比較將增加若干倍，而风扇的效率又要維持現有數值。

强力冷却汽輪发电机的制造工艺与現在根本不同，特別是绕组制造方面。

直接冷却转子绕组铜的通风道制造是一很困难的工艺课题。在制造过程中，必須保持绕组绝缘水平，它的绝缘强度和耐久性。这种绕组制造的工艺特征表现在导体和新式绝缘材料的应用上，表现在绕组绕圈和单独绕圈制造的高度精確及装配的仔細上。为保证內冷导体通风道的正常尺寸，这种结构要求应用微塑性变形的特种铜料。

在转子上梯形槽（图5）的应用，給予增加槽內用铜量——从而提高转子容量，又不降低转子机械强度造成可能性，但是由於槽截面的形状及导体尺寸的变化，使转子加工的劳动量过分增加。

圖9引用的三种转子绕组内部直接冷却结构方案。

第一方案，冷却气体滑过铜导线侧面，这种结构造成工艺上的頗大困难，当转子下綫後熱压时，不易保持各导体的同心度，以致影响通风道的通风冷却。第二方案，在铜导体及绝缘套筒相鄰空間形成通风道，每个通风道由兩根导体共有，輻向通风孔分佈在转子中部。冷却繞圈端部的气体絕大部分進入繞槽通风道，风压損失不大，效率很高。第三方案，空心导体內冷，是由凹形导体組合成空心截面，冷却介質由導

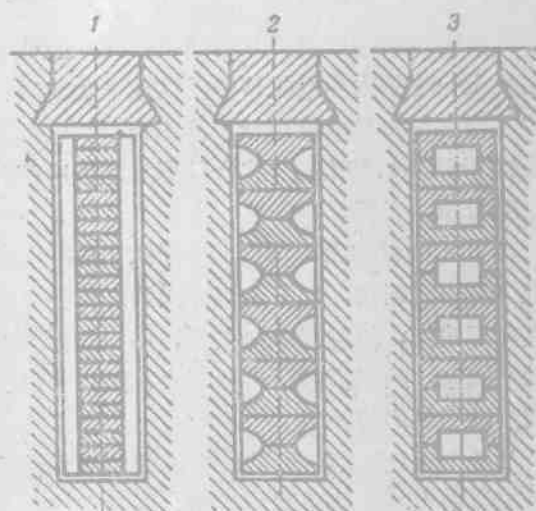


圖9. 轉子內冷槽断面

体中心穿过。这一方案可以大大提高气体的导热效力，並保留了普通的由銅經过絕緣套筒傳給轉子齒的導熱系統。

瑞士 BBC 公司於1954年生產了第一台150,000瓩——(187,500仟伏安)的汽輪發電机。

發電机工作时，机壳內氬气压力为1表压。当提高氬气压力时，發電机容量可提高到200,000仟伏安，該公司認為，內冷的应用必須在大容量(150,000瓩以上)下，小容量發電机轉子熱量的傳導还可採取轉子齒中的附加冷却通风溝。

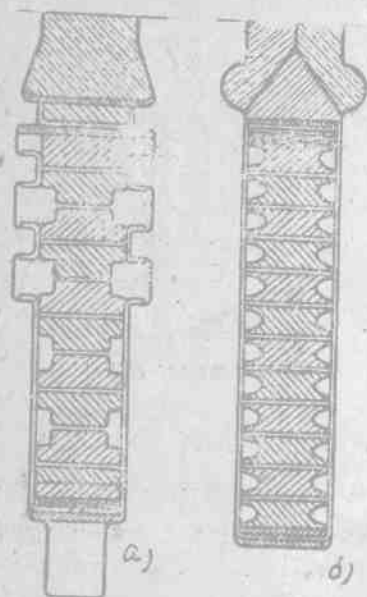


圖10. a) BBC 內冷却轉子槽形 b) AEG 內冷却轉子槽形

大容量發電机轉子槽形已相当复雜(如圖10a,)，導桿双排为一組，具有与轉子齒側的小通风溝相对应的溝槽，組成氬气內冷风道，高速度的氬气可帶走將近75—80%繞組銅及齒鋼中放出的熱量。

轉子槽底開有冷却风道，当氬气由轉子內部槽底通过时，使長轉子的溫度分佈均匀。

轉子繞組絕緣套管反包在齒側小通风道凸緣上，以利气体直接与齒鋼接觸。

AEG 公司於1953年生產的第一台容量为64,000瓩內部冷却汽輪發電机。導体在槽內的截面如圖10.6，側面內冷风道由繞組銅導桿兩側組成。这种結構很难使熱量經過槽絕緣傳給齒鋼。

氬气由轉子兩端進入，並通过繞組风道，然後从轉子中部通风孔逸出。

轉子繞組內部冷却的应用效果是相当顯著。

由圖11曲綫1, 2, 3 看出，在同一直徑下容量大一倍的内冷电机轉子長度僅增加到1.1倍，相反，如果电机尺寸保持不变，到它的容量級增大到1.89倍。这个計算考慮到冷却介質压力達二表压。

BBC 公司生產的187,500 仟伏安汽輪發電机的轉子(圖12, 13)为組合式的。轉子本体是环形鍛件，經過仔細加工後，用長螺桿由兩軸端拉緊，該环形鍛件尺寸不大，因而可以制成無缺陷的均匀軸料。

各个單独环形端面的嚴密接觸，可使轉子在工作中完全保持堅固的整体鍛制結構。

3. 液体冷却。在槽或導体直接冷却下，唯有銅中的熱損耗被帶走(圖14)。



圖11 一般的及內冷的發電机轉子繞組中容量与氬气压力關係  
1—內部冷却理論曲綫;  
2—內部冷却实际曲綫;  
3—一般冷却实际曲綫。

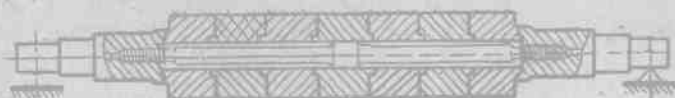


圖12. 組合轉子結構圖

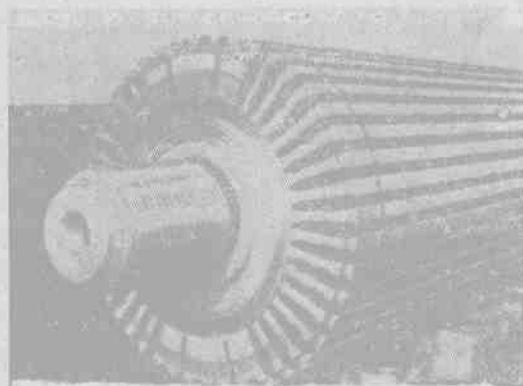


圖13. 無繞組軸端的187,500仟伏安發電機轉子外形



圖14. 轉子槽液體直接冷卻

氣體冷卻轉子導線的結構類型：1. 側面通風；當採用長方形斷面的導體時，在導體和槽壁間便形成了側面冷卻溝道（圖9, 1）。2. 空心導線：銅導體由二個U形的斷面組成；氣體從導線內部通過（圖9, 3）。3. 冷卻氣體由氣隙進入空心導線。

為了使液體冷卻更有充分利用定子的可能，在氣壓為3表壓情況下，轉子必須採用氫的直接冷卻，並限制轉子溝道長度為60公分。這樣，沿着整個轉子長度，就得到12—17段溝道。由於巨大的離心力作用，液體直接冷卻轉子導體是很困難。但用液體冷卻齒較易，並且，由於水有較小的流動阻力，因此最好採用水冷卻。

水由上部的分配貯存室經空心軸a（圖15）而流動。從空心軸出來，流入分配室b，再從這裡到徑向溝道c，最後到齒溝道。這樣水流到轉子另一端，經徑向溝道進入貯水室，這貯水室經過空心軸與造成低壓離心泵連接（線路圖在水力模型中已研究成功）。根據計算得知，轉子內損耗為334瓩的100兆伏安的發電機（其中80瓩屬於繞組端部損耗）冷卻水溫度的提高，當水耗量為210公升/分時，僅17.6°。水力消耗約11.7瓩。

水由軸流到分配室b去的時候必須的加速度是由溝道的相應形狀保證的，否則水將停滯在b室。假使少量液體經徑向溝道c流向四周，而它又要轉入軸向溝道，結果產生強力阻塞，流向周圍速度降低。此處得到的渦流，阻礙了液體的流動。假使出入孔呈圓形，則渦流可減少。

由前表二知，每立方米水的熱容量比同狀態下的空氣大3500倍；油的熱容量則大1400倍。在同樣流速下，水的導熱係數比空氣大570倍；油的，大22.2倍；而在大氣壓力下，氫氣的導熱係數比空氣大1.7倍，在2大氣壓力下為2.75倍。但，用液體冷卻時，液體阻力很大，因而流速約縮小十倍。

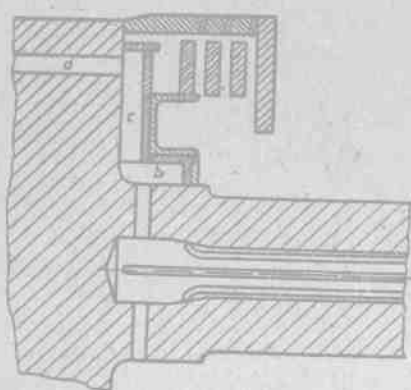


圖15 轉子的液体供給草架：a—空心軸；  
b—分配環；c—徑向槽；d—軸向槽

彼此間發生故障性短路或與轉子鉄心發生故障性短路。因此對極限容量汽輪發電機，這種結構不能被接受。發電機容量是取決於轉子，因此超容量巨型汽輪發電機的製造必須從解決銅導體液體內部冷卻着手。

容易看出，就導熱係數言，油冷卻並不比氫冷卻有利，而用水冷卻，導熱係數較大（57倍）。當水冷卻系統獲得進一步改善，純水質量不斷提高時，採用水冷卻，尤其銅直接冷卻將大大提高汽輪發電機極限容量。圖16是一間接水冷卻的汽輪發電機轉子結構。熱量經過絕緣，由轉子齒傳出來為冷卻水帶走。這種結構有一定缺陷，由於強烈的冷卻，使銅和鉄心間的溫差提高了，達 $50^{\circ}-60^{\circ}$ 左右，結果加大銅和鉄心間的相對伸長，很易引起銅導體的殘餘變形，遭到絕緣破壞，最後造成繞圈

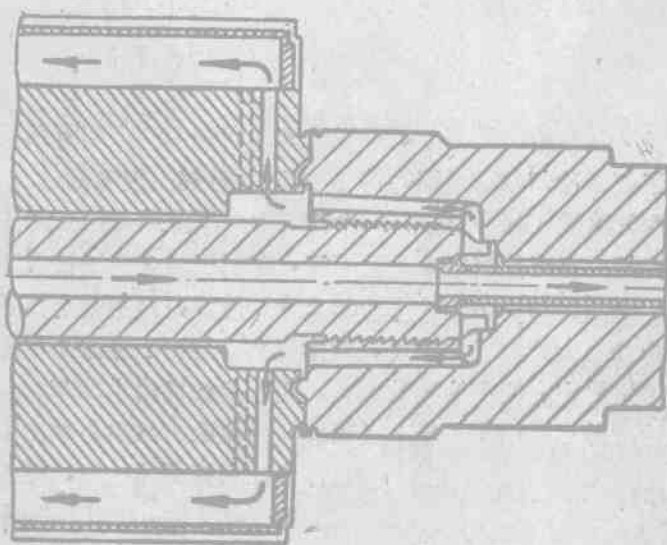


圖16

### III、强行冷却的汽輪發電機中勵磁損耗

强行冷却汽輪發電機損失與無强行冷却汽輪發電機損失之比：

$$\frac{Q'e}{Qe} = \frac{\left(1 + \frac{F_0}{F_a} f w_2 \sin^2 \psi'\right)^2 + \left(\frac{F_0}{F_a}\right)^2 f w_2 \cos^2 \psi'}{\left(1 + \frac{F_0}{F_a} f w_2 \sin^2 \psi\right)^2 + \left(\frac{F_0}{F_a}\right)^2 f w_2 \cos^2 \psi} \quad \dots\dots\dots (11)$$



这里  $F_0$ —空载 H.C 与电枢反应 H.C 之比:

$f_{w_2}$ —轉子繞組係數:

$$\sin \psi' = \frac{\sin \psi + \frac{I'}{I} x_p}{\sqrt{(\sin \psi + \frac{I'}{I} x_p)^2 + \cos^2 \psi}}$$

$$\cos \psi' = \frac{\cos \psi}{\sqrt{(\sin \psi + \frac{I'}{I} x_p)^2 + \cos^2 \psi}}$$

$$\sin \psi = \frac{\sin \psi' + x_p}{\sqrt{(\sin \psi' + x_p)^2 + \cos^2 \psi'}}$$

$$\cos \psi = \frac{\cos \psi'}{\sqrt{(\sin \psi' + x_p)^2 + \cos^2 \psi'}}$$

利用 (11) 式計算, 令

$$\frac{F_0}{F_a} = 0.975, f_{w_2} = 0.767, x_p = 0.12, \cos \psi = 0.85.$$

計算結果列於表三, 由这里看到勵磁損失的增長比定子繞組中損失慢的多。

|                       |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\frac{I'}{I}$        | 1.57 | 1.98 | 2.15 | 2.55 | 2.86 | 3.15 | 3.42 | 3.88 |
| $\frac{Q'_{re}}{Q_e}$ | 1.76 | 2.57 | 2.94 | 3.94 | 4.8  | 5.67 | 6.6  | 8.25 |

轉子繞組導體中冷却通风道的結構迫使繞組導體面積增大, 相应的槽中匝數減少, 与此有關的勵磁電流與容量非正比增強, 並達到很高的數值。例如, 西屋公司的汽輪發電機強力容量 110,000 瓩, 勵磁電流達 2900 安培。這樣高值的電流由高速勵磁機整流器上取得是不可能的, 因此引起了這樣一個問題, 即設計可靠供給及快速動作的新式勵磁系統問題。這個系統可以是離子勵磁的也可以是整流器式的。這種勵磁系統的設計和製造是生產超容量汽輪發電機關鍵的問題。

當設計容量為 200,000—300,000 瓩—汽輪發電機時, 考慮到各種結構的優缺點蘇聯“電力”工廠批判地學習了外國各公司的先進經驗, 進行了許多, 特別是利用各種模型的試驗, 各種結構部件的研究; 製造以及中小容量產品的試驗, 目的在於創制運行中更可靠及製造上簡單的結構。

在設計過程中使用了蘇聯科學院各個研究所以及 МЭИ 各個研究所研究的許多資料。為了設計新的材料及成套設備也曾組織了其他許多部所等單位。

## VI 蘇聯汽輪發電機新的冷却原則及其製造的發展远景

汽輪發電機按尺寸計算, 極限容量是 150,000 瓩—, 因此, 今後汽輪發電機單位容

量的增長要求擬定新的冷卻原則。在1953年“電力”工廠便投入了這項工作。但是由於科學研究基地的薄弱，這項工作在工廠中一開始就很緩慢，直到1955年蘇共中央委員會六月全體大會之後才全面開展。

根據第六個五年計劃，預見到汽輪發電機產量的迅速增長，於1960年將達到10,000兆瓦。

為完成這項決定，在“電力”工廠進行了實驗室條件下的大量實驗和全面展開設計工作。在研究過程中，曾學習和使用了本範圍內的現代發展趨勢。

這項工作進行的結果，創造了汽輪發電機轉子冷卻的獨特結構，並製成容量30,000瓩強行冷卻試驗汽輪發電機。這台汽輪發電機供設計容量300,000瓩汽輪發電機基本原則校核用。它有2表壓氬氣壓力的轉子繞組新式冷卻系統，並採用了3表壓氬氣供應系統的新式儀器設備以及新式勵磁系統。

轉子結構使得轉子繞組沿不與發電機有效長度相關的全長均勻冷卻。

考慮到沿轉子長度均勻冷卻的優越性及大容量發電機冷卻的發展方向，“電力”工廠設計出特種的轉子結構（圖17）。當轉子進行強行冷卻時，電機的勵磁容量大大提高，而勵磁電壓下降。最大容量電機的勵磁電流由從前的700安培達到3000安培。在這種參數下，應用直流勵磁機實不可能保證勵磁。為此，採用了新式帶乾整流器整流的增高頻率交流發電機的勵磁系統。

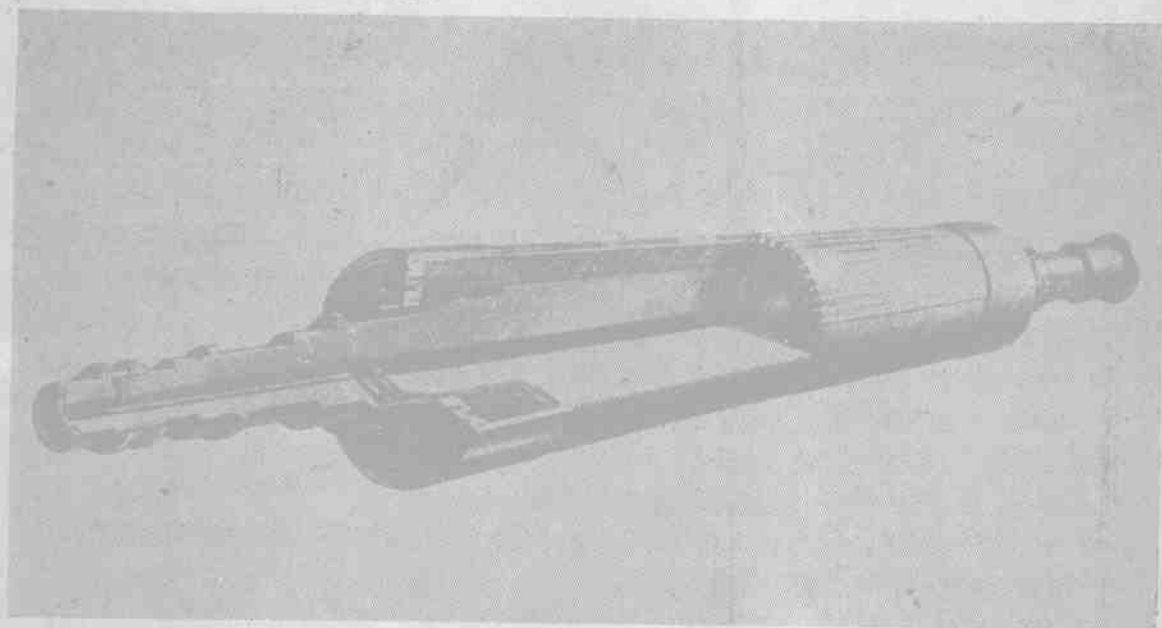


圖17 繞組直接內冷的200,000瓩汽輪發電機轉子

汽輪發電機試驗證實了超高容量發電機製造的可能性，其中包括容量為200,000和300,000瓩發電機在內（圖18）。容量為30,000瓩的電機轉子冷卻問題的解決，可以很容易轉移到無附加、複雜和高價的其他容量電機實驗中去。

在蘇聯哈爾柯夫電力牽引工廠中設計了軸向氣體冷卻的冷卻系統，該廠在1957年製造容量330,000瓩3000轉/分的試驗發電機。其中預料到定子、轉子導體直接冷卻的