

· 旋转电机研究班讲义 ·

旋转电机问题

电力工业部技术司编



· 旋轉电机研究班讲义 ·

旋轉电机問題

電力工業部技術司編

電力工業出版社

內 容 提 要

本書敘述了發電機製造方面的當前任務、高壓電機絕緣結構、同期發電機的主要參數、同期發電的溫昇及過負荷、同期發電機的勵磁、直流電機整流的調整問題和保證廠用電動機的自起動等方面的知識。

本書可以幫助從事旋轉電機工作的專責工程技術人員提高技術水平，研究目前旋轉電機所存在的主要問題，了解現代大型發電機的構造與發展趨勢。

旋 轉 電 機 問 題

電力工業部技術司編

*

479D 176

電力工業出版社出版（北京府右街26號）

北京市書刊出版業營業許可證出字第082號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

*

787×1092¹/₃₂開本 * 6²/₃₂印張 * 134千字 * 定價（第10類）0.90 元

1956年12月北京第1版

1956年12月北京第1次印刷（0001—8,150冊）

序 言

为了提高电力工业系统各单位旋转电机专責工程师的技术水平，研究目前旋转电机中所存在的主要问题，以及了解现代大型发电机构造的特点与发展趋势，并培养和帮助專責工程师能独立研究与解决有关旋转电机的各种重大技术问题起见，电力工业部技术司于1956年6月在北京举办了一次短期旋转电机研究班。研究班这次学习的主要内容是由苏联顧問專家胡达巴舍夫同志及技术司工程师陈德裕同志講解发电机、励磁机和厂用电动机中的若干重要问题，并结合閱讀了其它有关参考资料。

研究班学习結束以后，大家認為收穫很大，不仅了解了旋转电机方面的某些主要问题，而且也摸索到如何进一步研究旋转电机问题的正确途径。这些收益，都将有助于正确地解决我們生产中旋转电机运行和檢修中的許多重大关键问题，为了扩大这种良好的影响，电力工业部决定由各电業管理局分别举办类似的講習班，以提高各該地区旋转电机工程技术人員的技术水平。

为了使即将参加这些講習班学习的同志能够直接讀到这本讲义，同时也为了满足其他曾經向我們索取过这本讲义的同志們的要求，决定將它整理出版。

本書中所列附录一及二系苏联电站部技术司的运行通报和反事故通报，研究班在学习中曾作为自学資料。由于这项資料对于我們現有发电厂厂用电系统的保护有很大现实意义，故也一併列入，作为学习时参考。

本書譯稿是由电力工业部專家工作室的同志們翻譯，并由参加研究班学习的陈錦熙、刘俊凱、葛希文、刘孟平、郝常驥、張紹俊等同志校閱整理，对于本書出版有很大貢獻，特此表示感謝。

同时，由于本書是初次印刷，在內容上难免有不妥当和不完善的地方，希望各單位在使用过程中發現有錯誤和缺点，及时来信告訴我們，以便再版时修正。

电力工业部技术司

一九五六年八月

目 录

序 言

第一講	發电机制造方面的当前任务——胡达巴舍夫專家	3
第二講	高压电机絕緣的結構——胡达巴舍夫專家	20
第三講	同期發电机的主要参数——陈德裕工程师	36
第四講	同期發电机的溫升及过負荷——陈德裕工程师	59
第五講	同期發电机的励磁——陈德裕工程师	71
第六講	直流电机整流的調整問題——胡达巴舍夫專家	88
第七講	保証厂用电电动机的自起动——胡达巴舍夫專家	108
附录1.	苏联电站部技术司运行通报	138
附录2.	發电厂厂用电过电流保护整定值的選擇	
	——苏联电站部反事故通报	154

第一講

發電機制造方面的当前任务

胡达巴舍夫專家

制造特大型發電機对于苏联和中国的電力工業都有很大的意义。我这个报告不想把这个問題的所有資料都詳尽叙述，只是談談在苏联期刊及專業書籍中所談到的一些問題，但是，我希望它能帮助同志們了解这个問題的本質。

虽然有許多問題对隱極电机(汽輪發電機)和显極电机(水輪發電機)是共同的，但由于兩者各有其特点，所以我們仍分別研究汽輪發電機和水輪發電機。

汽輪發電機

目前汽輪發電機制造方面的主要問題是制造容量为30万瓩及以上的發電機。

解决这个問題对于整个汽輪發電機制造有原則性的重要意义，因为解决它也会对一般容量的汽輪發電機的設計和制造有所影响。

制造特大型發電機不是为了追求記錄，而是具有完全一定的經濟目的，因为大家都知道30万瓩發電機的造价和15万瓩發電機的造价相差很少，虽然30万瓩發電機本身的效率比15万瓩發電機的效率低0.5—0.7%，而30万瓩機組的效率(將汽輪機的效率也考慮进去)較15万瓩機組的效率稍高。30万瓩發電機土建部分的造价比15万瓩發電機土建部分的造价也相差很少。生产特大型機組对于縮減發電廠工作人員和扩大电机制造厂的生产能力(按所生产电机的容量計算)，也有很大意义。制造特大型機組需要解决許多問題，其中最主要的問題有下列几个：

一、汽輪發電機轉子尺寸：

轉子在旋轉時引起很大的機械應力，因此要求用質量極好的磁性鋼來制造轉子，這種鋼的機械性能和磁性能都要均勻。套箍的制造在工藝方面也很複雜。

有效部分的最大直徑和長度，現在是由冶金工業的能力來決定，如 50 噸重的鍛件可能最大的屈伏點為 55—60 公斤/平方公厘，最大極限強度為 70—75 公斤/平方公厘。如果飛逸速度為 3600 轉/分時，採用安全係數為 1.8—2，則轉子中心孔表面的應力(最大應力)應不大於 $\frac{60}{1.8} = 33.4$ 公斤/平方公厘。

圖 1-1 中表示在轉速為 3000 轉/分和 3600 轉/分時，轉子中心孔表面應力和轉子外徑關係的曲線，從這些曲線可知，轉子可能最大直徑

$$D \cong 1100 \text{ 公厘 (1070)}.$$

這裡必須指出，設計師設計轉子時總是使齒部最細部分的應力小

公斤/平方公厘

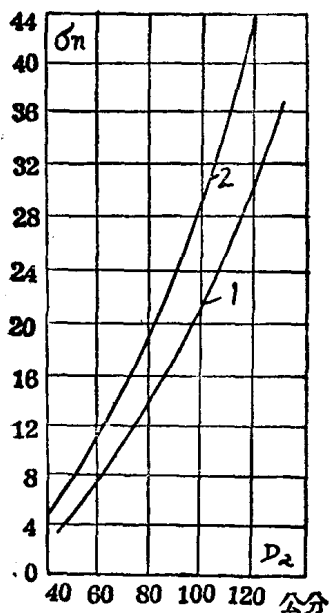


圖 1-1 轉子中心孔表面應力與轉子外徑的關係曲線

1—3000 轉/分； 2—3600 轉/分。

公斤/平方公厘

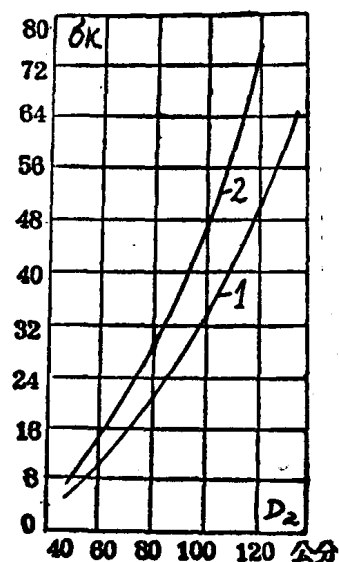


圖 1-2 轉子套箍應力與轉子外徑的關係曲線

1—3000 轉/分； 2—3600 轉/分。

于轉子中心孔表面的应力。

設計和制造轉子套箍所遇到的困难也不小。

轉速为 3000 轉/分时，套箍中的应力大致可按下式計算：

$$\sigma_k = 1.14 \times 10^{-3} D_2^3 + 0.215 D_2^2$$

对于飞逸速度为 3600 轉/分时，这应力应乘以 1.44。

从公式可知，套箍中应力可分成兩部分，第一部分是由轉子端部綫卷所引起的，它和直徑立方成比例；第二部分是由套箍本身重量引起的，它和直徑平方成比例。

圖 1-2 是套箍計算应力和外徑的关系曲綫。

現代的冶金工業还不能制造 0.5 吨重和 1200 公厘的直徑、比例極限大于 90—100 公斤/平方公厘、極限强度大于 110—120 公斤/平方公厘的套箍环。如果安全系数采用 1.8，則套箍中最大应力应不超过 $\frac{100}{1.8} = 58.3$ 公斤/平方公厘，从圖 1-2 可知这个应力于套箍直徑約为 1100 公厘时可达到。

轉子有效鉄的極限長度問題也可以从轉子强度方面来考虑。有效鉄長度为 650 公分时，轉子总長度有 10 公尺，这种長度的轉子靜止时的弯曲約有 2.5 公厘，临界轉速低于工作轉速和轉子經過临界轉速时，其弯曲將更大。轉子長度再增加时，其弯曲將按長度的立方或更大的比例增加。增加長度还会引起制造工艺上很大的困难。

因此，有效部分長度为 650 公分，也应该認為是最大可能長度。

現在根据有效部分長度为 650 公分来看看轉子橫向强度問題。轉子本身重量在轉子本体中心所产生的弯曲应力 σ_c 并不大，約为 2 公斤/平方公厘，这应力并没有什么危險。但轉子本体中除了由本身重量所产生的交变应力以外，尚有下列应力：

$$\sigma_c = \sigma_p + \sigma_t + \sigma_k,$$

其中 σ_p ——鍛件中的殘余应力；

σ_t ——溫度应力；

σ_k ——由于槽楔楔入所引起的应力。

試驗大型鍛件的結果証明，殘余应力可能达到 6 公斤/平方公厘。由轉子內部和表面溫度差所引起的溫度应力在正常运行时为 4—5 公

斤/平方公厘(拉伸应力),而在起 动情况下为 7—7.5 公斤/平方公厘(压缩应力)。由于槽楔楔入所引起的应力是由于槽楔在切綫方向压着齿的端部。这种现象所引起的压缩应力可以采用 9 公斤/平方公厘。

因此,总应力将为如下:

发电机正常运行时:

$$\sigma_{cn}=6.0+4.0+9.0=11 \text{ 公斤/平方公厘.}$$

起 动情况下:

$$\sigma_{cn}=6.0+7.2+9.0=22.2 \text{ 公斤/平方公厘.}$$

由于近表面部分截面变化很大,将引起应力集中,如果这个应力集中系数采用 $k_k=3$,则在正常运行时:

$$\sigma_{cn}=11 \times 3=33 \text{ 公斤/平方公厘.}$$

在起 动情况下:

$$\sigma_{cn}=22.2 \times 3=66.6 \text{ 公斤/平方公厘.}$$

也就是说,在起 动时,应力集中地方的恒定应力将超过屈服点:

正因为如上所述,50 吨锻件的屈服点不超过 55 公斤/平方公厘。

使材料疲劳而损坏的交变应力,可按下列众所周知的公式计算:

$$\sigma_{vso}=\sigma_{vs}\left(1-\frac{\sigma_c}{\sigma_b}\right),$$

其中 σ_{vs} 为材料疲劳极限,约为 35 公斤/平方公厘;

σ_b 为材料极限强度,可采用 70 公斤/平方公厘。

使转子材料损坏的应力为:

$$\sigma_{vso}=35\left(1-\frac{55}{70}\right)=7.5 \text{ 公斤/平方公厘.}$$

如果应力集中系数 $k_k=3$,则转子表面的交变应力:

$$\sigma_{rk}=3 \times 2=6 \text{ 公斤/平方公厘.}$$

这数值和损坏交变应力差不多,因此应该认为,为了解决转子横向强度问题,必需采取下列措施:

1. 降低转子锻件中的残余应力。
2. 提高锻件和加工的质量。
3. 减少应力集中。

4. 相应的运行方面的措施。
5. 提高材料耐疲劳的强度。
6. 有效地监督鍛件材料的质量。

7. 提高找轉子平衡的工作质量，因为振动很大时，在轉子本体中間及本体和軸的交接处較易因疲劳而损坏。

至于，談到發电机其它部件的强度，則必須指出，这种电机鉄因压得不够紧及磁的吸引力所产生的震动問題尚未完全解决。这些問題應該用改善工艺和結構的办法来解决。

二、汽輪發电机冷却問題：

我們所求得的汽輪發电机的極限尺寸，如果用平常的冷却方法，其容量便只能約有 15 万瓩。显然，只有加强电机的冷却，首先是采用內部冷却靜子和轉子繞卷銅繞的方法，才能进一步提高其容量。

1. 轉子繞卷的內部冷却

在汽輪發电机一般結構中轉子繞卷的溫度由下列几种溫差形成：

轉子槽(襯套)絕緣	30°C
沿齿的高度	20°C
由表面到間隙中气体	30°C
間隙中气体的溫升	20°C
冷却气体的溫度	40°C
共計	140°C

如果采用直接冷却銅繞的办法，絕緣襯套和齿中溫差便沒有了，將气体的压力和速度提高，也能使气体和被冷却的銅繞間的溫差減少很多，而在銅繞溫度較低时，可大大地提高电流密度。內部冷却銅繞时，为了有通風道，就得去掉部分銅而使轉子繞卷电流密度和損失提高，使其效率略为減少。但必須說明，这办法还是制造容量 20 万瓩及以上發电机的唯一办法。應該指出直接冷却轉子繞卷的想法并非新的。AEG 厂过去曾用过这方法来制造轉子，但毫無成就。因为空气冷却时这种办法会使風道很快堵塞，絕緣电阻降低并常使电机出故障。用氬气冷却时，堵塞的問題便沒有了，因此有可能再回到这种結構。

很多可能直接冷却繞卷的結構中，最值得注意的如圖 1-3 中所

列的几种結構。

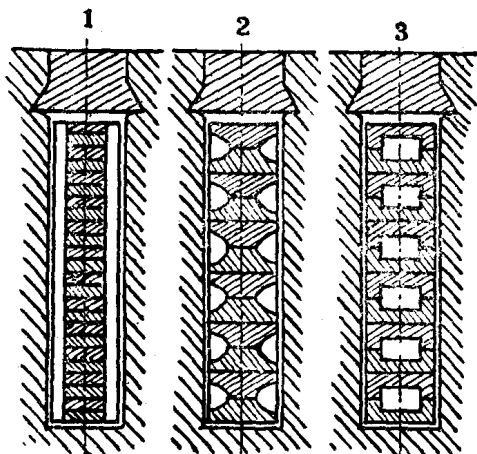


圖 1-3 在轉子繞卷銅內通風道的結構

第一種結構是 AEG 廠首先採用的，第二種結構是阿立斯劍麥斯廠首先採用的，第三種結構是西屋廠首先採用的；第三個方案顯然是較好的，因為它尚能經過絕緣襯套傳熱到轉子本體，此外絕緣襯套不會被冷卻氣體損壞。

計算直接冷卻轉子繞卷銅繞系統的效率及由此而得出結論是有很重大意義的。

如果 S_{2c0} 為全槽填滿時一槽中銅繞的截面積， S_{2cv} 為直接冷卻銅繞時一槽中銅繞的截面積，則銅繞截面填滿係數

$$k_{2s} = \frac{S_{2cv}}{S_{2c0}}.$$

設 I 為流經一槽橫截面中的全部電流，則每一公分長度中銅損為：

$$P = \frac{I^2 \rho}{k_{2s} S_{2c0}}.$$

設銅繞通風道周邊的長度為 l_v 。

槽中銅繞平均溫度和冷卻氣體溫度的差為 ϑ_{sv} ，則氣體所帶出去的損失為

$$P = \alpha_v l_v \vartheta_{sv},$$

其中 α_v 為銅到氣體的傳熱係數。

使上述兩個 P 的公式相等，並解之，則得 I 為：

$$I = \sqrt{\frac{1}{P} \alpha_v k_{2s} S_{2c0} l_v \vartheta_{sv}}.$$

對於沒有內部通風一般結構的繞卷，

$$I_0 = S_2 S_{2c0},$$

I 和 I_0 之比值為:

$$\frac{I}{I_0} = \sqrt{\frac{k_{2s} \vartheta_{sv} l_v \alpha_v}{\rho S_2^2 S_{2c0}}}.$$

这个比值表示, 内部冷却系統能提高轉子磁動勢多少倍。

这个比值中 ϑ_{sv} 、 ρ 及 S_2 (無内部通風的電流密度) 是完全确定了常数。在我們的分析中只要考慮下列數值就行了:

$$\frac{l_v}{S_{2c0}}; k_{2s} \text{ 及 } \alpha_v.$$

繞卷結構的特点可用下列系數表示:

$$k_v = \sqrt{k_{2s} \frac{l_v}{S_{2c0}}}.$$

在圖 1-3 中所列三種結構方面, 这个系數為:

第一種結構的系數為 $k_v = 0.82$;

第二種結構的系數為 $k_v = 1.07$;

第三種結構的系數為 $k_v = 0.98$;

在我們的分析中可讓它等於一。

計算中採用下列數字:

$$\rho = 2.5 \times 10^{-6} \text{ 歐/平方公分};$$

$$S_2 = 400 \text{ 安/平方公分};$$

$$\vartheta_{sv} = 60^\circ \text{C}.$$

採用 $\vartheta_{sv} = 60^\circ \text{C}$ 是根據下列原因:

1. 銅繞容許溫度設為 120°C ;

2. 氣體入口溫度為 40°C ;

3. 冷卻氣體熱到 80°C 。

將上述數值代入 $\frac{I}{I_0}$ 比值中, 則得

$$\frac{I}{I_0} = 12 \sqrt{\alpha_v}.$$

狹而長的通風道的傳熱系數 α_v 可按下列公式計算:

用空氣冷卻時:

$$\alpha_v = 0.0144 \left(\frac{v}{40} \right)^{0.8} p^{0.8} \text{ (瓦/平方公分度);}$$

用氬气冷却时:

$$\alpha_v = 0.0215 \left(\frac{v}{40} \right)^{0.8} p^{0.8} \text{ (瓦/平方公分度),}$$

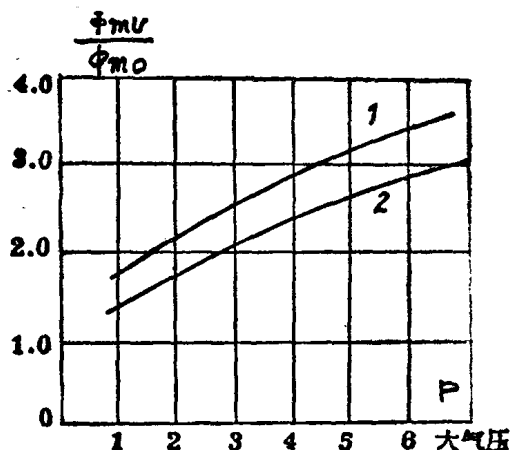


圖 1-4 增加磁動勢與氣體壓力(表壓力)的關係曲線
1—氬氣; 2—空氣。

式中 “ v ” 為通風道中氣體速度(公尺/秒)。

“ p ” 為電機機殼內的絕對壓力。

圖 1-4 是空氣冷卻和氬氣冷卻的轉子磁動勢增加的曲線($k_v = 1$ 時), 從轉子磁動勢曲線可知, 增加一倍二倍是容易辦到, 再往上增長則需要加大冷卻氣體的速度。

計算結果証明, 發電機的容量可用下列近似公式表

示:

$$P_m = 200\,000 \frac{\Phi_{mv}}{\Phi_{m0}},$$

其中 Φ_{mv} 為內部冷卻的轉子磁動勢;

Φ_{m0} 為一般結構的轉子磁動勢。

從這個公式可知, 對於發展到現在的冶金工業及上述轉子極限尺寸, 一般結構的電機 $\left(\frac{\Phi_{mv}}{\Phi_{m0}} = 1 \right)$, 發電機的極限容量為:

$$P_m = 20 \text{ 萬千伏安。}$$

如果採用內部冷卻轉子銅線的辦法, 則略為提高機殼內氣體的壓力, 也就是使 $\Phi_{mv}/\Phi_{m0} = 2$, 便可使極限容量達到

$$P_m = 20 \times 2 = 40 \text{ 萬千伏安。}$$

因此, 採用內部冷卻, 用氬氣冷卻和提高內部壓力便能製造容量為 30—40 萬千伏安及以上的機組。

II. 靜子綫卷的内部冷却:

汽輪發電機靜子的尺寸和轉子尺寸不同，它受一般運輸工具的能力和制造工艺的可能性所限制。

現代汽輪發電機的靜子槽數變化不大，因為轉子的綫負荷（即 4S 安培/公分）變化不大。因此綫棒的高度也變化不大。一般結構的發電機中，轉子是薄弱環節，因而不必採用補充方法來冷卻發電機的靜子。但如果採用內部冷卻轉子綫卷的結構，靜子便成為薄弱環節。在前一節已講到，用內部冷卻轉子綫卷可使轉子磁動勢增加 1—2 倍，因為在一定的發電機運行參數下，轉子磁動勢和靜子磁動勢保持着直綫關係，故很顯然，轉子磁動勢加大了便同時會使靜子磁動勢增加，也就是說，會增加其綫負荷。綫負荷增加便會使綫棒電流增加，這樣如用一般的發電機結構，便會使綫棒的高度增加，而且增加的程度和轉子磁動勢增加的度成正比。因為，它每一槽中有兩根綫棒，則有效鐵的外徑將增到綫棒高度的 4 倍（如果轉子磁動勢增到兩倍），這樣便會使靜子的直徑和重量增到不能容許的程度。

因此，轉子綫卷內部冷卻使靜子綫卷的冷卻也必須加強。唯一能夠加強靜子綫卷冷卻的辦法，是將冷卻氣體通到綫棒內部以直接冷卻靜子綫卷的銅綫。這種綫棒有各種不同的結構，圖 1-5 便是其中一種，即帶內部通風道的結構。

從圖中可以看出，製造綫棒時應裝設防止銅綫接觸和通風道閉塞的隔片，而在浸膠時應採取措施（如通壓縮空氣到綫棒中），以防止壓壞綫棒。

一般汽輪發電機靜子綫棒的高度可按下列公式計算：

$$h_s = I \sqrt{\frac{0.287}{\alpha_i k_s \theta_i \left(\frac{b_n}{b_i} - 1 \right)}}$$

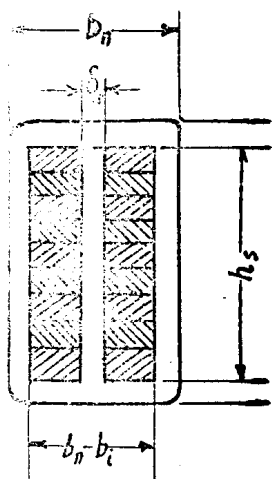


圖 1-5 有內部通風的靜子綫棒

其中 α_i 为絕緣导热系数, 等于 0.0016 瓦/公分 $^{\circ}\text{C}$;

h_s 为綫棒截面填滿系数;

b_n 为槽寬(公分);

b_i 为兩面絕緣的厚度。

在一般数值时:

$$h_s = 4 \times 10^{-3} I$$

如果將一般冷却改为内部冷却, 而槽寬不变, 則有内部冷却的綫棒高度, 可按下列公式計算:

$$h'_s = I \sqrt{\frac{0.575\rho}{\alpha_v K_s \vartheta_{sv} (b_n - b_i - \delta_s)}}$$

其中 α_v 为通風道中由銅綫到气体的散热系数;

ϑ_{sv} 为銅綫和气体間的溫度差;

δ_s 为通風道的寬度。

如果 $\delta_s = 0.7$ 公分, $\vartheta_{sv} = 35^{\circ}\text{C}$, 而 α_v 适合于 $v = 40$ 公尺/秒 和 $P = 1$ 大气压的条件, 則

$$h'_s = 20 \times 10^{-3} I$$

也就是說, 采用内部冷却时只要略为加强冷却, 而保持綫棒高度不变, 便可能容量增加一倍。

实际上冷却要加强得多些, 因为 δ_s 可能和計算值有出入, 同时可能在制造綫棒时漆將銅綫表面弄髒。此外, 必須考虑到發电机可能过負荷, 而在短时期的很大过負荷时, 綫卷溫度实际上是按絕緣过程升高的, 而銅綫溫度按标准必須有一定的安全系数。

III. 冷却气体的参数:

現在我們来研究一下冷却气体的参数(速度 v 和压力 P)对發电机有效部分冷却条件的影响。

如果沒有强行冷却, 則絕緣中的溫度差可按下式計算:

$$\vartheta_i = \frac{Q_{cu} b_i}{8 z_1 h_s l_{s1} \alpha_i}$$

其中 Q_{cu} 为綫卷銅損;

z_1 为靜子槽数;

h_s 为静子綫棒高度;

l_{s1} 为静子綫棒長度;

α_i 为絕緣导热系数;

b_i 为兩面絕緣厚度。

采用强行冷却及电流为 I' 时, 經過絕緣傳出的損失为:

$$Q'_{cu1} = Q'_{cu} - Q'_{cu2} = Q_{cu} \left(\frac{I'}{I} \right)^2 - 4z_1 h_s l_{s1} \alpha_v \vartheta_{sv},$$

其中 Q'_{cu2} 为通風道內气体傳出的損失;

α_v 为通風道表面散热系数;

ϑ_{sv} 为通風道表面与气体之間的溫度差。

强行冷却时, 絕緣中的溫度差为:

$$\vartheta_i = \frac{Q'_{cu1} b_i}{8z_1 h_s l_{s1} \alpha_v} = \frac{Q_{cu} \left(\frac{I'}{I} \right)^2 b_i}{8z_1 h_s l_{s1} \alpha_i} - \frac{b_i}{2} \frac{\alpha_v}{\alpha_i} \vartheta_{sv}.$$

如以 Q_{cu} 值代入上式, 并对 ϑ_{sv} 解之, 則

$$\vartheta_{sv} = \frac{2}{b_i} \frac{\alpha_i}{\alpha_v} \left[\left(\frac{I'}{I} \right)^2 - 1 \right] \vartheta_i.$$

溫度差 ϑ_{sv} 与通風道內气体溫升之和在任何强行冷却方式下都应一样:

$$\begin{aligned} \vartheta_{sv} + \vartheta_{sv} &= \frac{2}{b_i} \cdot \frac{\alpha_i}{\alpha_v} \left[\left(\frac{I'}{I} \right)^2 - 1 \right] \vartheta_i \\ &+ \frac{Q_{cu} 10^4}{2 \cdot 2z_1 h_s \delta_s v p} \left[\left(\frac{I'}{I} \right)^2 - 1 \right] \\ &= \text{const(常数)}, \end{aligned}$$

如果上述之和采用 65°C , 并将極限尺寸發电机的一般数值代入上式, 而对 $\frac{I'}{I}$ 解之, 則得:

$$\frac{I'}{I} = \sqrt{\frac{65}{\frac{71}{(P_v)^{0.8}} + \frac{1600}{P_v}} + 1}.$$

各种不同 Pv 值下, $\frac{I'}{I}$ 比值的数值列于表 1-1:

表 1-1

Pv	40	80	100	150	200	250	300	400
P (大气压)	1	2	2.5	3.75	5	5	5	5
v (公尺/秒)	40	40	40	40	40	50	60	80
I'/I	1.57	1.98	2.15	2.55	2.86	3.15	3.42	3.88

从上表可见, 静子綫卷采用内部冷却是一个极有效的措施。

必须指出, 静子綫卷内部冷却问题, 实际上尚未解决, 在通以冷却气体方面及制造能保证气体在静子綫卷长的綫棒中, 有足够速度的氢气压缩机方面, 在结构上是有一定困难的。

三. 有强行冷却的发电机的效率和稳定性:

我们上面已经说过, 现代的冶金工业能制造极限容量约为 20 万千瓦安的汽轮发电机, 进一步提高单位机组容量只能靠强行冷却的办法。但强行冷却显然会有下列两种缺点:

I. 改善冷却可以加大静子綫卷和转子綫卷中的电流密度, 这样可以提高机器的容量, 但很大的电流密度会使损失增加而降低效率。

II. 因为提高机器容量对其几何尺寸没有多大改变, 电抗的欧姆值也不会有多大改变, 这样会使电抗的相对值增加, 也就是说会使发电机稳定性变坏。

汽轮发电机损失总和为:

$$\Sigma Q = Q_c + Q_{\kappa} \left(\frac{I'}{I} \right)^2 + (Q_r + Q_{v1}) P + 2.23 v^3 P 10^{-3} + Q_e \frac{Q'_e}{Q_e},$$

其中 Q_c 为与强行冷却的程度无关的那部分损失, 是一个常数;

$Q_{\kappa} \left(\frac{I'}{I} \right)^2$ 为与静子电流平方成正比的损失;

$Q_r P$ 为转子与气体摩擦的损失, 它与气体压力成正比;