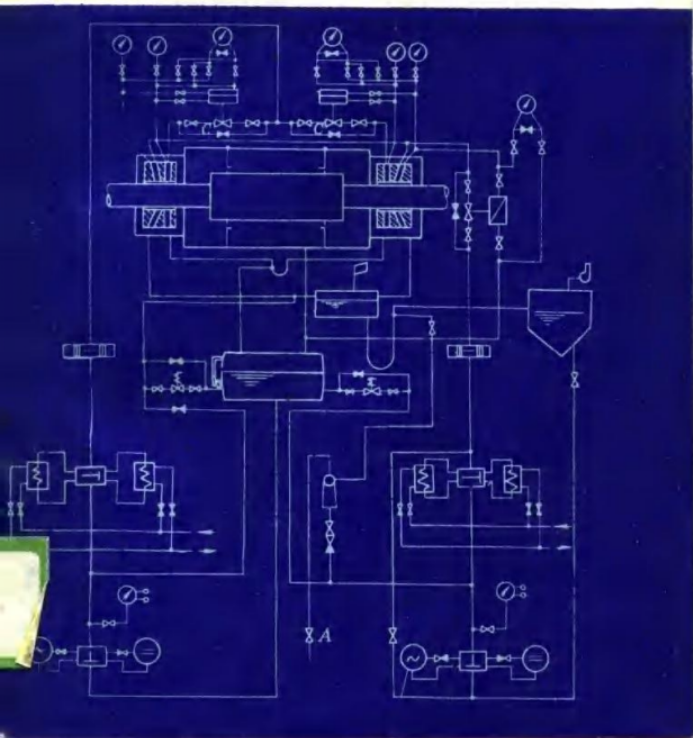


氢冷汽轮发电机的 运行与检修

黄成平



内 容 提 要

本书系统地介绍了氢冷汽轮发电机的结构原理和运行知识，特别对于保证氢冷发电机正常运行的气系统和油系统作了比较详尽的叙述，同时对于保证氢冷发电机气源的制氢设备也作了介绍。

本书可供具有一定经验的电气专业、汽机专业中负责运行或检修的工人、工程技术人员阅读，也可供在电力系统中从事氢冷汽轮发电机运行和设计的有关工程技术人员参考。

氢冷汽轮发电机的运行与检修

黄 成 平

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 14.75印张 328千字

1989年11月第一版 1989年11月北京第一次印刷

印数0001—2410册

ISBN 7-120-00955-9/TM·281

定价9.45元

前 言

为了适应我国电力系统的迅速发展和满足广大电力工人、工程技术人员迫切需要，编者参照有关资料，并结合国内外氢冷汽轮发电机的运行实践，编写了《氢冷汽轮发电机的运行与检修》一书。近期来，随着电力系统容量的发展，投入的氢冷汽轮发电机的台数和它们的单机容量都在日渐增长，这就要求我们系统地总结和深入地研究各种氢冷汽轮发电机在运行和检修中存在的经验和教训，以便进一步提高我国氢冷汽轮发电机的运行水平和检修水平。

全书由原东北电业管理局生技处的韩祖士总工程师校核，前水电部生产司周庆昌总工程师审阅，在收集素材和整理过程中，还得到了其他同志的大力帮助，编者在此表示感谢。

由于编者的理论水平不高，缺乏丰富的实践经验，加上编写时间仓促，所以，谬误在所难免，敬请读者批评指正。

编者

1988年3月

目 录

前 言

第一章 氢冷发电机的概述和结构	1
第一节 氢冷发电机的概述	1
第二节 氢冷汽轮发电机的冷却和一般特点	8
第三节 氢冷汽轮发电机定子结构的特点	20
第四节 氢冷汽轮发电机转子结构的特点	40
第五节 氢冷汽轮发电机的通风系统和冷却水系统	71
第六节 氢冷汽轮发电机的氢、油系统	83
第二章 氢冷发电机的气系统	111
第一节 冷却介质的性能比较	111
第二节 氢爆问题	116
第三节 氢气的纯度	124
第四节 气体分析	131
第五节 氢气湿度和最低入口风温的关系	136
第六节 氢气介质的受潮和干燥	142
第七节 漏氢量的计算	147
第八节 补氢、排污和连续换气	155
第九节 安全阀与自动补氢阀门	159
第十节 发电机在使用氢气冷却时的损耗和效率	166
第三章 氢冷发电机密封油系统中的设备	169
第一节 轴密封系统中设备的概述	169
第二节 密封瓦的结构	173
第三节 密封瓦的允许温度	198
第四节 压差阀和平衡阀	200
第五节 油封装置	212

第六节	净油装置	214
第七节	密封油源和密封油量	215
第八节	氢冷发电机密封油系统中各部件的连接	218
第九节	保证密封油系统安全运行的几项措施	221
第四章	制氢系统	225
第一节	水电解制氢的基本原理	521
第二节	水电解制氢装置	232
第三节	氢气的贮存和安全措施	253
第四节	电解槽的操作与维护	259
第五节	制氢站的防火、防爆	266
第六节	氢气生产中的常见故障及其处理	270
第五章	氢冷发电机的运行准备和气体介质的置换	285
第一节	密封瓦的运行准备	285
第二节	密封油系统的运行准备	288
第三节	气体管路系统的运行准备	290
第四节	氢冷发电机本体的漏风试验	292
第五节	氢冷发电机冷却介质的置换	294
第六节	氢冷发电机起动中的注意事项	305
第六章	氢冷发电机的正常运行方式	307
第一节	额定情况下的运行	307
第二节	氢气温度、纯度变化时的运行方式	313
第三节	电压、频率、功率因数变化时的运行方式	323
第四节	空冷下或氢气压力变化时的运行方式	338
第五节	氢冷发电机正常运行时, 氢、油、水系统主要参数 的规定	346
第七章	正常运行情况下, 对氢冷发电机的监视和 维护	348
第一节	运行中对氢、油、水系统的监视	348
第二节	运行中对转子温度和励磁回路绝缘电阻的监视	352

第三节	对仪表的监视和维护	358
第四节	对氢冷发电机监视和维护的责任划分	360
第五节	氢冷发电机端部构件的发热程度和漏磁场分布情况 的考察	361
第八章	汽轮发电机的异常运行情况及其处理	368
第一节	密封油系统的异常运行情况及其处理	368
第二节	气体系统的异常运行情况及其处理	376
第三节	冷却水系统的异常运行情况及其处理	380
第四节	氢内冷发电机转子的异常运行情况	382
第五节	氢冷汽轮发电机的不对称运行方式	386
第六节	氢冷发电机负荷增长速度与短时过负荷	394
第九章	氢冷发电机的检修	399
第一节	氢冷发电机本体的检修	399
第二节	氢冷发电机氢、油系统的检修	409
第三节	氢冷发电机的找漏	416
第四节	氢内冷发电机转子通风孔的检查	425
第五节	氢内冷发电机运行中存在的几个问题	451
附录		459
参考文献		465

第一章 氢冷发电机的概述和结构

第一节 氢冷发电机的概述

一、汽轮发电机的冷却

发电机在运行中，存在各种损耗，这些损耗转化成熟能会引起各部分温度的升高。但发电机的允许温度决定于绝缘材料的性能，温度太高，绝缘材料容易损坏，发电机就不能安全可靠地运行。因此，除了采用耐热性能好的绝缘材料外，还必须采用冷却措施，使这些热量散发出去，保证发电机的各部分温度不超过允许值。

随着工农业的发展，对电力的需求日渐增大，电网容量也越来越大，这就要求电机制造工业提供更大容量的汽轮发电机组。提高发电机的单机容量不仅可以提高效率，而且还能取得减少材料消耗和降低运行费用等一系列的经济效益。但是制造大容量发电机受到了各种条件的限制。首先是受到汽轮发电机转子和护环锻件的尺寸及其材料性能的限制；其次，定、转子的振动，制造能力以及运输条件等在一定程度上也限制了机组容量的提高。为了增加单机容量，人们只好从增加发电机的单位体积的输出着手，在发电机冷却技术上下功夫。近年来发电机的冷却方式取得了很大进展，主要是采用了冷却效果好的冷却介质（如氢气、油、水等），并发展了把冷却介质引入主绝缘壁内的直接冷却技术，即所谓绕组的内部冷却方式。这样发电机的线负荷及绕组的电流密度比空气（或氢气）表面冷却的发电机可以提高3~4倍，

因此，单机容量就能从过去的100MW提高到目前的1000MW，甚至更高。

最初，汽轮发电机采用的是空气冷却。第二次世界大战前后发展了氢冷技术。50年代末进一步发展了水冷技术，把冷却技术提高到一个新的水平。当前除了小容量(25MW及以下)汽轮发电机仍采用空气冷却外，功率超过50MW的汽轮发电机都广泛地采用了氢气冷却，氢、水冷却介质混用的冷却方式。在冷却系统中，冷却介质可以按照不同的方式组合；归纳起来一般有下面几种：

1) 定、转子绕组和定子铁芯都采用氢表面冷却，即氢外冷；

2) 定子绕组和定子铁芯采用氢表面冷却，转子绕组采用直接氢冷（即氢内冷）；

3) 定、转子绕组采用氢内冷，定子铁芯采用氢外冷；

4) 定子绕组水内冷，转子绕组氢内冷，定子铁芯采用氢外冷，即水氢氢冷却方式；

5) 定、转子绕组水内冷，定子铁芯空气冷却，即水水空冷却方式；

6) 定、转子绕组水内冷，定子铁芯氢外冷，即水水氢冷却方式。

对不同容量的发电机可以根据具体情况，进行技术经济分析，选用不同的冷却方式。

大容量汽轮发电机由于提高了电磁负荷，设计得比较细长，因而，分别带来了端部漏磁引起的杂散损耗和端部发热，定、转子绕组在槽内和端部的固定方式，转子的强度和振动等问题。这些都需要在设计和制造中注意加以解决。

冷却技术的发展，不仅大大提高了发电机的单机容量，

而且使材料的利用水平也得到了很大的提高。材料的利用系数如下式所示

$$C = \frac{S_N}{D_{i1}^2 L_{ef} + n_N} \quad (1-1)$$

式中 S_N ——额定视在功率, kVA;

n_N ——额定转速, r/min;

D_{i1} ——定子内径, cm;

L_{ef} ——铁芯有效长度, cm。

利用系数 C 就是单位转速、单位体积里的视在功率。根据已制成的各种发电机的资料进行统计后, 得出了表1-1的数据。从该表中的数据可知, 随着冷却方式的改进, 不仅使单机容量从3~25MW增大到300~600MW, 而且使反映材料利用水平的利用系数 C 也提高了4~5倍。

表 1-1 材 料 的 利 用 系 数

冷 却 方 式	空气冷却	氢 冷 却	定子氢外冷 转子氢内冷	双水内冷	定子水内冷 转子氢内冷
容量(MW)	3~25	~50	~100	50~300	300~600
利用系数 $C \cdot 10^{-6}$	3~5.3	~7	~10	9~14	15~20

发电机冷却方式的改进为大型发电机的发展 开 阔 了 前 景, 提高冷却效能和开展新的冷却方式的研究, 仍然是今后同步发电机发展的一个重要方面。

二、汽轮发电机的种类和额定参数

按照冷却方式的不同, 汽轮发电机可分为外冷式发电机 (冷却介质不直接与铜导线接触) 和内冷式发电机 (冷却介质直接与铜导线接触) 或称直接冷却式发电机。

我国生产的各种发电机都用汉语拼音字母表示它们的型号，常用的汽轮发电机型号的意义是：

T（位于第一个字）——同步；

Q（位于第一或第二个字）——汽轮；

Q（位于第三个字）——氢外冷；

F——发电机；

S——水内冷；

N——氢内冷；

C——普通空气冷却；

G——改进型。

将这些字母组合起来就得到了各种汽轮发电机的型号：

QF，TQC、TQG等，为空冷汽轮发电机；

QFQ，TQQ等，为氢外冷汽轮发电机；

TQN，QFN，为定子氢外冷，转子氢内冷汽轮发电机；

QFS，QFSS等，为双水内冷汽轮发电机；

QFQS，QFSN，为转子氢内冷，定子水内冷汽轮发电机。

拼音字母后面一般还有两个数字，前一个为发电机容量（单位MW），后一个为发电机极数（TQC型除外）。如TQN-100-2型是容量为100MW的转子氢内冷、定子氢外冷的两极汽轮发电机；QFQS-200-2型是容量为200MW的定子水内冷、转子氢内冷、铁芯氢外冷的两极汽轮发电机。

苏联生产了很多氢冷却汽轮发电机，其主要系列有：

TB系列，容量为63,100,120和200MW转子氢内冷、定子氢外冷。

TBB系列，容量在150MW及以上，转子绕组氢内冷，定子水内冷。

TIB系列，容量为200和300MW，定子和转子绕组均为

氢内冷。

TBM系列，容量为60和300MW，定子绕组油直接冷却，转子水内冷。

每台发电机都在铭牌上标明了该发电机的额定参数。这些参数不但决定着发电机的运行性能，而且对于发电机的各部分结构有重大影响，因此对它们必须有正确的了解。

额定有功功率 P_N 表示发电机的发电能力，单位为kW或MW。为了制造厂生产的方便，国家规定了一定的功率系列，如3000, 6000, 12000, 25000, 50000, 100000, 125000, 200000, 300000, 600000kW等等。制造厂就根据这一功率系列进行生产。

额定定子电压 U_N 一般是指发电机定子的线电压，它表示发电机定子的正常工作电压，单位有V、kV。我国通常使用的发电机定子额定电压有6.3, 10.5, 13.8, 15.75kV等等。某些大型发电机也有额定定子电压为18, 20kV, 甚至更高的。

额定定子电流 I_N 表示发电机定子正常运行中允许的最大相电流，单位为A或kA。

额定功率因数 $\cos\varphi_N$ （亦称力率）表示在额定功率下，定子电压和电流之间允许的相角差的余弦值。 φ 角是用电角度表示的运行中发电机每相定子电压和电流之间的相角差。一般发电机的额定功率因数 $\cos\varphi_N=0.8$ 。也有一些发电机（尤其是远离负荷中心的大型发电机）额定功率因数为0.85, 0.9或以上，这是因为长距离送电，无功电力送不出去，所以大发电机的额定功率因数可以设计得高些。

额定转子电流 I_B 。它表示在额定视在功率时转子激磁绕组通过的直流激磁电流，单位为A或kA。

额定频率 f_N 。我国国家规定电力网的频率为50Hz，所

以，发电机的额定频率也为50Hz。某些国家频率也有采用60Hz的。

额定转速 n 。对于同容量的汽轮发电机，由于其尺寸的大小随转速的升高而减小，所以汽轮发电机都是高转速的。现在生产的汽轮发电机几乎都是3000r/min（转子是一对磁极），只有一些老旧机组和某些原子能电站的大机组是1500 r/min（转子为二对磁极）。

效率 η 。发电机在运行过程中，在把原动机传给功率转换成电能的同时，还有一小部分变成了其他形式的能量，这部分能量称为损耗。它包括铁损、铜损、机械损耗和励磁损耗等。效率是表征发电机经济性能的重要指标。一般发电机容量越大，措施愈完备，效率也就越高，一般为93%~98%，大容量的氢冷发电机的效率都在98%以上。

额定温升。发电机的额定温升是指运行中发电机定子线圈和转子线圈相对冷却气体的入口温度升高的度数，在技术规程中一般不采用允许温度而采用允许温升，因为温升更便于说明发电机本身的运行状况和便于定额，也更便于衡量该台发电机的设计和制造质量。因温升与入口风温无关，它所表示的是发电机内部因损耗引起的发热情况。而发电机各部分的实际温度将随入口风温的不同而不同，无法规定一个在额定出力下的运行温度，故难以定额。额定温升的确定，与该台电机绝缘的等级以及测量温度的方法有关。我国规定的额定入口风温是40℃。定子线圈和铁芯的温度一般用埋入式检温计来测量，转子线圈的温度用电阻法来测量。确定了允许温升后，再加上环境温度（或冷却气体的入口温度）就可以算出发电机定子或转子的最高允许温度。

对于三相发电机 U_N 、 I_N 、 $\cos\varphi_N$ 、 S_N 存有下列关系式：

额定视在功率 $S_N = \sqrt{3} U_N I_N$ (kVA);

额定有功功率 $P_N = \sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N$ (kW)。一般所称的发电机的容量即指额定有功功率。

额定无功功率 $Q_N = \sqrt{3} U_N I_N \sin \varphi_N$ (kVar)。额定无功功率一般仅在调相机上标明。

三、国内外汽轮发电机的发展概况

最初, 汽轮发电机采用空气冷却。但是这种方式冷却能力小, 摩擦损耗大。当机组容量增大时, 各种损耗产生的热量增多, 需要的冷却空气量也更大。因此, 空冷发电机的尺寸也需要做得很大。譬如一台100MW的发电机若采用空气冷却时, 其铁芯尺寸要长达6m。当加快冷却空气的流速时, 是可以提高发电机的冷却效果的, 但加快流速所消耗的功率则等于发电机改善冷却后所提高效率, 这显然是不合算的。据悉世界上最大的空气冷却发电机可以做到150MW, 苏联在1937年曾制造了一台容量为100MW的空冷汽轮发电机。

第二次世界大战前后, 发展了氢冷技术。用氢气代替空气冷却发电机, 其效果要好得多。因为氢气轻, 热容量大, 摩擦损耗又小。但由于在冷却方式上没有新的突破, 仍停留在表面冷却的水平上, 所以即使采用氢气做冷却介质, 也只不过能把发电机的制造容量由100MW提高到150到200MW左右。美国肯斯顿电站曾安装了一台200MW的氢外冷发电机, 这可算是定、转子全部采用氢外冷方式的极限容量。

50年代末期, 汽轮发电机的冷却技术有了新的突破, 直接冷却方式得到了广泛应用。氢气直接冷却首先在转子绕组上采用[目前虽然单机容量已提到百万千瓦级, 却仍以转子氢内冷为主, 并将氢压加大到0.4~0.5MPa(4~5kg/cm²)],

经过一段时间后，才在定子绕组上采用。我国的TQN-100-2型和QFQS-200-2型汽轮发电机就是采用转子氢内冷、定子氢外冷和定子水内冷、转子氢内冷的两种发电机。苏联的TFB-200型和TFB-300型汽轮发电机在定子绕组和转子绕组上都采用了氢气直接冷却。显然，氢气直接冷却比起氢气表面冷却的效果要好得多。在制造容量上也有了大幅度的提高。定子、转子都采用氢气直接冷却的汽轮发电机的单机容量约可达到1000MW；转子绕组氢内冷，定子绕组水内冷，铁芯氢冷的单机容量目前约可达到1200MW。

当然，直接冷却的介质不能局限在氢气上，还可以用水和油。它们在制造1000MW以上的特大容量的汽轮发电机上有着极为广泛的前途。现在世界各国都在加紧有关冷却介质和冷却方式的研究试验和试制工作。

解放后，随着工农业生产的飞速发展，我国已经造出了大容量的汽轮发电机组。1958年哈尔滨电机厂开始试制自行设计的TQN-50-2型50MW转子氢内冷汽轮发电机。1966年试制仿苏TQN-100-2型100MW转子氢内冷汽轮发电机。1972年制成QFQS-200-2型200MW水氢氢式的汽轮发电机，并已相继投入运行发电。现在正在设计和制造600MW的汽轮发电机。可以预见，随着我国工农业生产的发展，电机制造工业将在引进国外先进技术的基础上，总结经验，改进设计，改进工艺，生产出更多的大容量汽轮发电机，以满足我国电力工业日益增长的需要。

第二节 氢冷汽轮发电机的冷却和一般特点

前已说明，提高汽轮发电机单机容量的最有效、最现实

的途径就是改善冷却，其办法是选择良好的冷却介质和先进的冷却方式。实践证明，自从用冷却效能好的氢和水取代了空气，用先进的直接冷却取代了表面冷却以后，制造技术得到了迅速发展，汽轮发电机的单机容量也显著提高。

一、汽轮发电机采用表面冷却时，冷却介质对温升的影响

为了保证汽轮发电机能在绝缘材料容许的温度下长期运行，必须用冷却介质将发电机损耗产生的热量带走。

温升和损耗的关系可以简单表示如下：

$$\Delta t = RP \quad (1-2)$$

式中 Δt ——温升或温差， $^{\circ}\text{C}$ ；
 P ——发热体产生的损耗， W ；
 R ——热阻， $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

在传导散热情况下

$$R = \delta / A\lambda$$

式中 δ ——热绝缘厚度， cm ；
 A ——散热表面积， cm^2 ；
 λ ——绝缘材料的导热系数， $\text{W}/\text{cm}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ 。

在表面对流散热的情况下

$$R = \frac{1}{A\alpha}$$

式中 α ——表面散热系数， $\text{W}/\text{cm}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ 。

这样从发热体到入口冷却介质之间的散热路径上，根据散热方式的不同，可以分成好几个温差段。

譬如在表面冷却方式下，热量从发热体（铜导体）经过绝缘材料到绝缘外表面是依靠传导方式进行散热的，所以，根据公式(1-2)可知在绝缘上的温差为

$$\Delta t_c = \frac{P\delta}{A\lambda} \quad (1-3)$$

从绝缘外表面到冷却介质之间是依靠对流方式进行散热的，仍然根据公式(1-2)，冷却气体流的平均温度相对绝缘表面的温差为

$$\Delta t_b = \frac{P}{A\alpha} \quad (1-4)$$

从冷却介质入口到出口的整个风道上（或冷却沟里），由于介质吸热，而使冷却介质本身产生的温差为

$$\Delta t_a = P/C_p \gamma Q \quad (1-5)$$

式中 P ——热损耗，W；

C_p ——流体的定压（或定容）重量的比热，W·S/kg·°C；

γ ——流体密度，kg/cm³；

Q ——流体的流量，cm³/s。

在表面冷却方式下，在出口处的发热体（铜导体）相对入口冷却介质的温差 Δt_{cu} 为上述三段温差之和，即

$$\Delta t_{cu} = \Delta t_a + \Delta t_b + \Delta t_c = \frac{P}{C_p \gamma Q} + \frac{P}{A\alpha} + \frac{P\delta}{A\lambda} \quad (1-6)$$

一般来讲，这几部分温差大约是 $\Delta t_a = 20^\circ\text{C}$ ， $\Delta t_b = 15^\circ\text{C}$ ， $\Delta t_c = 30^\circ\text{C}$ 。另外应该指出，由于绕组的散热情况比较复杂，往往同时从几个途径“并联”散出，所以定量的计算公式还是比较复杂的，这里引出的公式(1-6)，只是一个定性的、供分析用的式子。

在直接冷却方式下，因为冷却介质与发热体直接接触，热量基本上不通过绝缘层散发，所以发热体相对入口冷却介质的温升就只剩下 Δt_a 和 Δt_c 两项，这样的冷却效果必然会得

到明显改善。

发热铜导体相对入口冷却介质的温升 Δt_{cu} 是有一定限度的，超过了这个限度，就会使与铜导体紧密接触的绝缘材料遭到损坏。从(1-6)式可知，在表面冷却情况下，要想降低铜导体的温升 Δt_{cu} ，除了设法减少损耗 P ，增大散热表面积 A （即增大机组尺寸）和加大冷却介质的流量 Q 外，余下的就是设法改善冷却介质的性能了。譬如采用比热 C 、密度 γ 和散热系数 α 以及导热系数 λ 都较大的冷却介质，就能使铜导体的温升降低。

下面我们把常用的冷却介质空气、氢气、二氧化碳以及氮气的特性关系列成表1-2。应该说明：表中所列的数值均为对空气的相对值，并非绝对值。另外表中所列的散热系数系指冷却气流处在层流情况下的数值，当处于涡流情况时，数值还会稍高一些。

表 1-2 氢气、二氧化碳和氮气的特性参数对空气的相对值

气 体 的 特 性		空气	氢气	二氧化碳	氮气	备 注
热传导率 λ		1	6.69	0.638	1.08	在标准状况 下纯净的氢气
密 度 γ		1	0.0696	1.52	0.966	
从散热表面到气体的散热系数 α		1	1.51	1.132	1.03	
比 热 C	定容容积比热 C_v	1	0.996	1.29	1.02	根据摩尔比 热计算
	定容重量比热 C_v	1	14.3			
	定压重量比热 C_p	1	14.3			

从表1-2中可知：

1) 空气的密度是氢气的14.3倍，二氧化碳是氢气的21.8