

DAGONGLU
QILUN FADIANJI
JIQI YUNXING

西安电力学校 张道纲 曹广恩 朱松健

大功率 汽轮发电机 及其运行

上册

水利电力出版社

内 容 提 要

《大功率汽轮发电机及其运行》一书，主要结合国产100~300 MW机组介绍了大功率汽轮发电机的结构、原理、励磁系统以及几个运行问题。全书共计四篇二十一章，分上、下两册出版。本书是上册，包括第一篇大功率汽轮发电机本体结构和第二篇汽轮发电机原理。

本书俱具有国产100~300MW汽轮发电机的火力发电厂电气专业技术人员 and 工人阅读。对电力部门和其他行业的电力专业技术人员、师生，也有参考价值。

大功率汽轮发电机及其运行（上册）

西安电力学校 张道纲 曹广恩 朱松健

*

水利电力出版社出版

（北京三里河路6号）

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 11.25印张 252千字
1986年10月第一版 1986年10月北京第一次印刷
印数0001—3040册 定价2.35元
书号 15143·5991

前 言

为了适应国民经济对电力与日俱增的需要, 国产100~300MW汽轮发电机已相继在我国各电力系统中投入运行, 尤其是200MW汽轮发电机已逐渐成为各电力系统中的主力机组。为了进一步提高国产大功率汽轮发电机的运行水平, 加快四个现代化的进程, 我们编写了《大功率汽轮发电机及其运行》一书。本书的主要读者是具有国产100~300MW汽轮发电机的火力发电厂电气运行、检修技术人员及工人。他们可以通过本书进一步了解和掌握国产大功率汽轮发电机的结构特点、设计意图和必要的参数, 以及同轴交流励磁机的励磁系统和有关运行问题。本书在编写中, 力求通俗易懂、联系实际, 并有针对性, 因此, 本书具有较大的实用价值。

在编写本书过程中, 得到哈尔滨电机厂、东方电机厂、北京重型电机厂、上海电机厂、水利电力部电力科学研究院电网调度研究所、华东电管局中心试验所、西北电管局试验研究所、北京电力试验研究所、京西电厂、清河电厂、闵行电厂、闸北电厂、秦岭电厂、谏壁电厂、西北电力设计院、华东电力设计院等单位热情帮助, 提供资料。为了提高书稿质量, 曾请水利电力部电力科学研究院电网调度研究所李德基、毛国光、方思立、张春江同志, 辛店电厂栾仁训同志, 以及东方电机厂唐松年同志审阅了初稿, 提出了宝贵的意见, 对本书定稿起了很大的作用。在此, 一并表示感谢。

本书第一、二篇及第三篇中第十三章第二、三、五、六节由曹广恩同志编写; 第四篇由朱松健同志编写; 其余部分由张道纲同志编写, 并担任全书统稿工作。由于我们的专业水平有限, 又缺乏编写经验, 书中不可避免地会存在错误和不妥之处, 望广大读者批评指正。

编 者

一九八三年四月

目 录

前 言

第一篇 大功率汽轮发电机本体结构

第一章 概述	1
第一节 大功率汽轮发电机的有关数据	3
第二节 单机容量的提高和冷却技术	5
第三节 短路比和功率因数对发电机的性能和体积的影响	9
第二章 静止部分	11
第一节 机座	12
第二节 端盖	14
第三节 轴封	16
第四节 定子铁芯	22
第五节 弹性隔振装置	34
第六节 定子绕组	37
第七节 电刷及刷架	65
第三章 旋转部分	69
第一节 转子本体	70
第二节 转子绕组	75
第三节 转子引线及滑环	78
第四节 槽楔和阻尼绕组	82
第五节 护环和心环	85
第六节 氢内冷转子	88
第七节 水内冷转子	94

第二篇 汽轮发电机原理

第四章 定子绕组电势	105
第一节 汽轮发电机的转子磁通分布波形	105
第二节 定子绕组电势的大小和波形	106
第五章 定子绕组磁势	113
第一节 单相绕组磁势	114
第二节 三相绕组磁势——旋转磁势	118
第六章 汽轮发电机的电枢反应	124
第一节 空载运行及空载特性	124
第二节 三相负载对称时的电枢反应	124

第三节 三相负载不对称时的电枢反应	127
第四节 汽轮发电机在对称负载时的电势相量图	129
第七章 汽轮发电机的特性	132
第一节 特性曲线	132
第二节 汽轮发电机在对称负载下各参数的求法	135
第三节 汽轮发电机的电压调整率	138
第八章 汽轮发电机的并联运行	139
第一节 并联条件及方法	139
第二节 汽轮发电机的电磁功率及功角特性	142
第三节 并联运行发电机间的无功功率调节	146
第九章 汽轮发电机不对称运行的分析	149
第一节 不对称运行时同步发电机各相序阻抗	150
第二节 发电机的不对称稳定短路	153
第十章 同步发电机的突然短路	158
第一节 超导体回路的概念	158
第二节 突然短路的物理过程	160
第三节 三相短路电流及时间常数	168
第四节 突然短路对发电机的影响	170
参考书目	173

第一篇 大功率汽轮发电机本体结构

第一章 概 述

电能是现代化建设和人民生活最必需、最重要的一种二次能源。各种能源资源都用来发电，但现代电力系统中的正弦交流电，主要来自水力发电和火力发电。在一些先进工业国家，原子能发电现在已占相当比重。无论水力发电、火力发电还是原子能发电，都采用同步发电机发电。水轮发电机和汽轮发电机虽然都是同步发电机，但由于它们的原动机不同，转速相差很大，所以在结构、性能和主要参数等方面存在较大差别。大型火力发电厂都采用二极隐极式汽轮发电机，转速为3000r/min，而原子能电站则采用四极隐极式汽轮发电机，转速为1500r/min。

我国水力和煤炭等资源都很丰富。从1949年新中国诞生到1983年，我国电力工业在党的水火电并举、因地制宜的正确方针指导下，取得了巨大发展，无论水电建设还是火电建设都实现了高速度。全国总装机容量，1949年只有185万kW，1983年达到了7644万kW，三十五年增加了40.3倍，其中水电增加150倍，火电增加30倍以上。在1983年全国总装机容量中，火电机组为5228万kW，占68.4%；水电机组为2416万kW，占31.6%。火电比例仍然大于水电。这同目前世界各国总的情况是一致的，就世界范围来说，火电比例约达75%~80%，美、苏、日、法、西德等国的火电比例都大于水电，见表1-0-1。

表 1-0-1 各国火电比例表

国 名	美 国	苏 联	日 本	英 国	法 国	西 德	全 世 界
火电比例	84.6%	81%	70.1%	96.4%	60.6%	90%	75~80%

随着电网容量不断增大，电网中单机容量也迅速增大。在电网内发展大容量机组，其建设速度和社会经济效益，都比发展小容量机组优越。但是单机容量过大时，不仅事故停机影响大，平时安排检修也有困难，所以，系统中一台大机组的经济容量和该系统总容量之间应保持一定的比例关系，见表1-0-2。

表 1-0-2 大机组的经济容量和系统容量的比例

系 统 容 量 (万kW)	小于100	100~1000	大于1000
$\frac{\text{大机组经济容量}}{\text{系统容量}} (\%)$	4~6	6~10	10~20

对于二极隐极式汽轮发电机而言，发展大容量机组在制造、基建和运行的经济性方面具有下列优点：

(1) 可降低电机造价和材料消耗率。根据国外资料，如一台80万kW机组比一台50万kW机组单位成本降低17%。一台120万kW机组比一台80万kW机组单位成本降低15%~20%。材料消耗率亦随单机容量的增大而降低，见表1-0-3。

表 1-0-3 10~60万kW汽轮发电机的材料消耗率

汽轮发电机单机容量(万kW)	10(氢外冷)	20(内冷)	50~60(内冷)
材料消耗率(kg/kVA)	1.0~1.5	0.85~1.0	0.6

(2) 可降低电厂基建安装费用。一个电厂单位造价随着单机容量的增大而降低，其关系见图1-0-1。图中以20万kW机组电厂单位造价为100%。由图中看出，50万kW机组电厂单位造价可降低15%，100万kW机组电厂单位造价可降低25%。

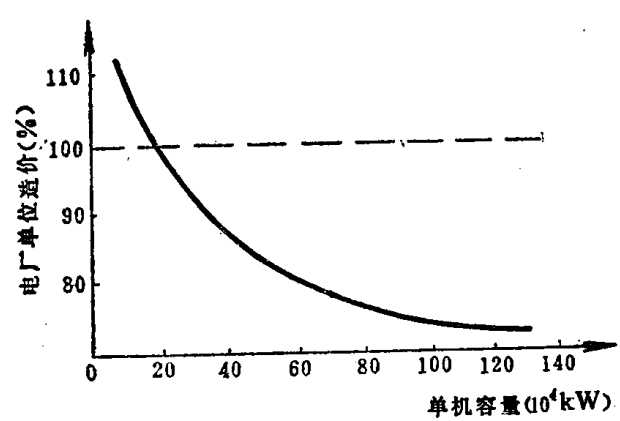


图 1-0-1 单机容量与电厂造价关系

(3) 可降低运行费用，减少煤耗及单位千瓦运行人员和厂用电率。

(4) 可减少电厂布点，有益于环境保护；减少污染。

近几十年来，世界各国汽轮发电机的单机容量都不断增大，发展速度都很快。在五十年代，单机容量为10~20万kW；六十年代，单机容量就发展到30、50和60万kW；七十年代，单机容量又发展到80和120万kW级水平。近些年来，由于出现能源危急现象，核技术和核动力又得到发展。据报导，世界上核燃料资源要比矿物燃料资源多28倍，所以，今后原子能发电是有发展前途的。目前世界上核电站中已投运的最大发电机组，有美国的110万kW四极汽轮发电机和西德的131.2万kW、27kV、双水内冷、四极汽轮发电机。

三十五年来，我国电网发展迅速，电网中单机容量增大的速度也很快。目前电网中的主力机组已经是10~30万kW机，这些机组大多数是我国自己制造的。国产汽轮发电机单机容量增长情况，见表1-0-4。从表中可知，解放前我国还没有电机制造能力，1952年开始制造出空冷3000kW机，到1972年就造出了20万kW定子水冷、转子氢内冷和30万kW双水内冷汽轮发电机。仅20年时间，就把单机容量提高了近百倍，这主要靠掌握了新的冷却技术在大型汽轮发电机上的应用。近几年来，我国正积极引进新技术、新工艺，并设计和研制更大容量的汽轮发电机。

目前，上述国产大型汽轮发电机都已投网运行，通过运行，在电机制造和运行方面都积累了不少经验，为进一步提高现有大功率汽轮发电机运行技术水平和继续制造更大容量汽轮发电机，打下了良好基础。

表 1-0-4

国产汽轮发电机单机容量增长速度

年	解放前	52年	54年	57年	58年	59年	60年	69年	70年	72年
型 号	0	QF-3-2	QF-6-2	QF-12-2	QFS-12-2 QF-25-2	QFQ-50-2	TQN-100-2	QFS-125-2	QFQS-200-2 QFSS-200-2	QFS-300-2
容量万kW	0	0.3	0.6	1.2	1.2 2.5	5	10	12.5	20	30
冷却方式		空 冷	空 冷	空 冷	双水内冷 空 冷	氢外冷	氢 外 冷	双水内冷	定子水冷转子 氢 内 冷 双水内冷	双水内冷

第一节 大功率汽轮发电机的有关数据

国产的大功率汽轮发电机根据各厂产品型号、容量、电压、冷却方式的不同，现已形成不同的系列，如 TQN、QFQS、QFSS、QFS 和 SQF 等系列。前三个系列中，第一、第二个字母 TQ 表示同步汽轮发电机，QF 表示汽轮发电机；第三个字母 N 表示氢冷；Q 表示转子氢内冷，S 表示转子水内冷；第四个字母 S 表示定子水内冷。后两个系列中，第一和第三个字母 S 都表示双水内冷；QF 表示汽轮发电机。国产及部分进口大容量汽轮发电机主要参数见表 1-1-1。

大功率汽轮发电机的容量等级各国繁简也不一。如美国从 10 到 40 万 kW 机组，容量等级分为 12 级；日本从 16 到 80 万 kW 机组，容量等级分为 11 级；法国为 12.5、25 和 60 万 kW 三级；意大利为 16、32 和 66 万 kW 三级；英国为 20、35、50 和 66 万 kW 四级；苏联为 16、20、30、50、80 和 120 万 kW 六级。我国 10 万 kW 以上机组，目前有 10、12.5、20 和 30 万 kW 四级。根据国际电工委员会推荐：大容量汽轮发电机容量增长系数 R 应选取 $R_{10} = \sqrt[10]{10} = 1.25$ （根号内数字为功率比，根号外数字为功率等级或分段数目），这样可使汽轮发电机容量等级标准化，品种简单统一，设计制造方便，技术成熟快，辅机品种少，适于成批生产。

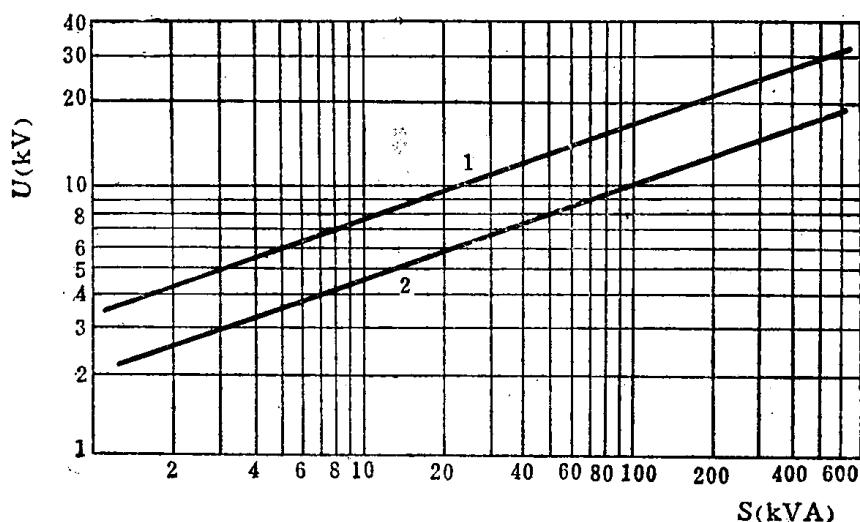


图 1-1-1 额定电压和汽轮发电机容量关系

表 1-1-1

国产及部分进口汽轮发电机主要参数

名 称	厂名或进口国 型 号	哈尔滨电机厂			东 方 电机厂	上海电机厂		北京重型 电机厂	意大利	法国	日本	苏联
		TQN -100-2	QFSS -200-2	QFQS -200-2	QFQS -200-2	QFS -125-2	QFS -300-2	SQF -100-2				
额定容量 P_n (kW)		10万	20万	20万	20万	12.5万	30万	10万	32万	30万	25万	21万
额定电压 U_n (kV)		10.5	15.75	15.75	15.75	13.8	18	10.5	20	15	15	15.75
额定电流 I_n (A)		6475	8625	8625	8625	6150	11320	6470	10868	14170	11321	9050
额定功率因数 $\cos\varphi_n$		0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
频率 f (Hz)		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
额定转速 n_n (r/min)		3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
接 线		双Y	双Y	双Y	双Y	单Y	双Y	双Y	双Y	双Y	3Y	双Y
冷却方式: 定子 转子 铁芯		氢外 氢内 氢	水内 水内 空	水内 氢内 氢	水内 氢内 氢	水内 水内 空	水内 水内 空	水内 水内 空	水内 氢内 氢	水内 氢内 氢	水内 氢内 氢	水内 氢内 氢
机座外径(cm)		401	370	385		330	330	312	246.5	264		
机座长(cm)		550	565	781	847	345	547	303.2				
定子外径(cm)		240	227.5	227.5	227.5	235	240	214	246.5	264		
定子内径(cm)		112.8	115	115	115	114	126	104	120.4	132	121.9	127.5
定子铁芯长(cm)		310	542	537	537	345	542	303	558.8	415	530	500
转子外径(cm)		100	100	100	101	100	110	91	104	115	104.1	107.5
转子铁芯长(cm)		325	540	547	547	350	540	300	558.8	415	540	510
单边气隙(cm)		6.4	7.5	7.5	7	7	8	6.5	8.2	8.5	8.9	10
机座重(t)		33.88	31.01	63		14	31.5	11.6				
定子重(t)		111	123	189	188	96	157	71.5	217	249	233	210
转子重(t)		29.3	46	42.8	43	32	60	24.7	47	44	48	48.1
总重(t)		862.5	1178	1068	1068	927.5	1243	841.5		330		
定子槽数 Z_1		60	54	54	54	36	54	60	54	48	72	60
每相匝数		10	9	9	9	12	9	10	9	8	8	10
并联支路		2	2	2	2	1	2	2	2	2	3	2
转子槽数/槽分度 Z_2/Z_2'		32/48	30/48	32/48	32/48	28/42	32/48	28/44	28	28/50	28/39	32
转子每极匝数		80	90	80	80	84	96	92	87	63		
线负荷 A_1 (A/cm)		1095	1290	1290	1290	1237	1545	1189	1550	1641	1420	1292
气隙磁通密度 B_δ (10^{-4} T)		8220	8120	7980		8280	8250	9140		9700		7150
短路比 k_c		0.614	0.563	0.549	0.534	0.565	0.47	0.674	0.585	0.52	0.57	0.49
效率 η (%)		98.71	98.32	98.61	98.63	98.35	98.61	98.43	98.81	98.48	98.36	98.79

续表

名 称	厂名或进 口国 型 号	哈尔滨电机厂			东 方 电机厂	上海电机厂		北京重型 电 机 厂	意大利	法国	日本	苏联
		TQN -100-2	QFSS -200-2	QFQS -200-2	QFQS -200-2	QFS -125-2	QFS -300-2	SQF -100-2				
满载励磁电压 U_{fe} (V)		271	384	445	453	265	483	245	379	304	440	420
满载励磁电流 I_{fe} (A)		1614	1605	1763	1749	1635	1844	1393	3005	3790	2420	1930
同步电抗 x_d (%)		181	190	190	198.08	187	226	163	190	182	174	184
瞬变电抗 x'_d (%)		28.6	22.2	24.5	24.28	25.7	26.9	22.8	24	27	25	29.5
超瞬变电抗 x''_d (%)		18.3	14.23	14.13	14.44	18.03	16.7	15.77	14.5	20	17.5	19
励磁方式		同轴 交流	同轴交流	同轴交流	同轴交流	同轴直流	同轴 交流	同轴交流	励 磁 变压器	同轴 交流	同轴 交流	电动发 电机组
主 励 磁 机	容量(kVA)	590	870	870	1140	交1175 kW 直550 kW	1360 kW	500kW	3000	1600	1400	990 kW
	电压(V)	242	346	346	410	380 330	485	230	6000/ 650	280	370	470
	电流(A)	1400	1450	1450	1600	2000 1832	1800	1365		3300	2185	2100
	功率因数	0.92	0.92	0.92	0.92	0.89	0.9	0.92		0.96	0.85	
	频率(Hz)	100	100	100	100	100	100	100	50	150	100	
副 励 磁 机	容量(kVA)	18	23.8	23.8	31.5	50	50	7kW		永60 /35	35	
	电压(V)	90	110	110	76	120	120	60		380	160	
	电流(A)	115	125	125	240	284	284	80			126	
	功率因数	0.87	0.8	0.8	0.87			0.85			0.8	
	频 率(Hz)	500	500	500	400	400	500	100		150	400	
氢压(10^{-1} MPa)		2			3				3	3	2~3	
水压(10^{-1} MPa)					2	2	2	1.5	1.3			

也便于配套, 电厂建设速度快, 可获得较显著的经济效果。

汽轮发电机的额定电压通常是随着电机容量的增大而提高, 而额定电压的选择与定子绝缘材料、母线和开关设备工作条件有关, 和发电厂及发电机的设计关系很大。各国大容量汽轮发电机的额定电压也不一致, 一般容量为30万kW的机组, 额定电压多在20kV以上。目前汽轮发电机的定子电压最高为27kV。二极汽轮发电机的最优额定电压和容量之间的关系见图1-1-1。

第二节 单机容量的提高和冷却技术

定子铁芯内径 D (cm)和长度 L (cm)是决定电机重量、价格、工作特性的主要尺寸, 并和发电机容量 S (kVA)、转速 n (r/min)以及电磁负荷(气隙磁密 B_g 和线负载

A_1 之积)有关, 其关系式为:

$$S = CD^2Ln \quad (1-2-1)$$

式中 D^2L ——定子铁芯内圆圆柱体体积, 相应地也表示发电机体积;

C ——电机出力系数或材料利用系数, 表示单位转速、单位体积的视在功率, 其

$$\text{值 } C = \frac{S}{D^2Ln}, \quad C \text{ 和电磁负荷 } B_s A_1 \text{ 成正比。}$$

一、提高单机容量

由 1-2-1 式可以看出, 增加电机的尺寸可以提高发电机的容量。但是由于二极汽轮发电机转速很高, 转子上受到很大离心力, 尤其轴中心孔受的应力最大, 其力的大小与转子直径的三次方成正比。因此加大直径要受到转子材料的机械强度限制。目前转子本体最大直径为 1.25m, 其轴中心孔的应力已接近现今转子材料的机械强度的极限。增加转子的长度也有一定限度, 转子的长度和直径的比例不能太大, 否则刚度不够, 挠度太大, 将使气隙不均匀, 产生不平衡的磁拉力, 也会使转子的临界转速下降, 影响运行稳定性。目前大容量汽轮发电机转子的长度与直径的比值为 3~6.5, 转子本体最大长度为 8m, 全长最大为 13.5m, 重量达 75~80t。

提高单机容量的另一途径是选择比较高的电磁负荷 A_1 和 B_s , 也就是提高材料利用系数 C 。但提高气隙磁通密度 B_s , 将使铁损和转子绕组铜损增大, 温升升高, 效率降低。而且目前硅钢片受磁饱和的限制, 最大磁通密度为 2T, 气隙磁通密度 B_s 不超过 1T。而提高线负荷 A_1 , 不仅必然使定子绕组的铜损及漏磁电抗和附加铜损相应增大, 温升增高, 而且将引起发电机的短路比下降、电压变化率加大和运行稳定性下降。

提高电磁负荷 $A_1 B_s$ 值后, 绝缘材料的许可温升又成了限制提高单机容量的一个因素, 为此, 必须发展冷却技术来解决电机温升问题。同时要采用快速反应的交流励磁和自动调节励磁装置来提高发电机的运行稳定性。

近年来由于采用了冷却性能好的冷却介质, 并发展了对定子和转子绕组进行直接冷却的技术, 线负荷 A_1 已提高到 1000~2000A/cm, 最大为 2200A/cm, 从而造出了百万 kW 级的巨型汽轮发电机。

二、冷却介质

应用最广的冷却介质有气体、液体两种, 常用的有空气、氢气、水、油。冷却方法有表冷(间接冷却)和内冷(直接冷却)。空气和氢气多应用于表冷; 氢气、水和油多应用于内冷。现代大、中型和巨型汽轮发电机定子绕组和转子绕组以内冷式为主, 铁芯以表冷为主。表 1-2-1 示出四种冷却介质的物理性能。

从表中可知氢气重量最轻, 约为空气重的 1/15, 空冷电机内风损约为总损耗 5%, 改用氢冷后, 风损可降到空冷时的 1/10, 发电机效率约可提高 0.2%~0.8%。如 SQF-100-2 型空冷汽轮发电机(转子本体直径为 910mm, 长度为 3000mm)和 TQN-100-2 型氢冷汽轮发电机(转子本体直径为 1000mm, 长度为 3250mm)相比较, 由于后者的风损减小, 其机械损耗比前者减少 30%, 效率提高 0.27%。氢气传热能力和散热系数比空气大, 例如, 2 个表压、0℃、含氢 96% 的气体导热系数为 1 个表压、0℃空气的 6.7 倍。因此, 氢冷比空冷可使被冷却部件温升降低 15~20℃, 发电机容量可提高 20%~25%。为了减

表 1-2-1

四种冷却介质物理性能（相对值）

性 能 \ 相 对 值 \ 介 质	空 气	氢气(2个表压)	油	水
密 度	1	0.2134	848	1000
体积热容量	1	3.0	1400	3500
导热系数	1	7.1	5.3	23
消耗量(相对流量)	1	1.0	0.012	0.012
传热能力	1	3.0	21	51

少气体流动粘度和提高表面散热能力，氢压一般可提高到2~3个表压。当氢气压力从0.35个表压提高到2个表压时，相对比热可由5.25增至14.35，相对散热能力由0.75增至3.0，可明显地提高冷却效果。太原、吉林、南定、焦作等发电厂空冷发电机改为氢冷后，温升试验结果表明：氢压为0.03~0.05表压时，约提高出力20%；氢压为0.5表压时，可提高出力30%左右；氢压为1表压时，可提高出力达40%以上。此外，氢气尚有不助燃，发生电弧时，不会引起电机着火；电晕放电时，不产生臭氧以及有利于防止电腐蚀和延长绝缘寿命等优点。但是氢气内混进空气后，可能形成易爆炸的混合气体。如果氢气内混进空气使氢气的纯度下降到5~75%时，碰到电火花或高温时就会引起爆炸，并产生0.5~0.6 MPa的爆炸力。（因两个体积氢和一个体积氧的混合物爆炸时产生的压力最大，温度最高，而空气中约含氧20%）。因此，氢冷发电机的机座和端盖要求能承受0.7 MPa的水压试验而不出现形变。机座和端盖接触面以及轴伸端，都需采取可靠的密封措施以保持机内氢气纯度不低于97%。

在氢内冷电机中，氢气直接与导体接触，实际上是扩大了导体散热面，若再合理地提高氢压，并在气隙内加装隔板，使进、出风区增多和风路长度缩短，则冷却效果将大为加强，尤其对温升较高的转子，冷却效果更为显著。

用水作为冷却介质对发电机绕组进行直接冷却，是目前国内外已采用的一种冷却方式。水的热容量比空气大4倍多，比重较空气大800倍，散热能力比空气大50倍，故水是一种最好的冷却介质，冷却效果比氢气好很多倍。发电机采用水冷的最大优点是可以提高电磁负荷和电流密度，缩小电机尺寸或提高发电机容量，节约原材料。此外，水还有良好的绝缘性能，常用的化学除盐凝结水的电阻率为 $10\sim 20\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ ，其值随温度升高而降低，呈负电阻温度系数。为防止空心导线堵塞，水内不可含有机杂质，更不得含有可溶杂质。水与空气接触后，水中便含有氧和游离的二氧化碳，它的电阻率就会降低十分之九。发电机在运行中，尽管定期更换和平时补充凝结水，但因水箱内水与空气接触，水中总会含有 $7.5\sim 8.2\text{mg/L}$ 氧和 $0.6\sim 2\text{mg/L}$ 二氧化碳。这种水与铜导线相接触，导线受到电化腐蚀，水中就会出现铜离子。水中含氧量愈多，腐蚀性越大，铜离子越多，水的电阻率就下降越多。如果凝结水的电阻率由 20×10^4 降到 $10\times 10^4\Omega\cdot\text{cm}$ ，水中铜的溶解度可增大到10倍。为了保持凝结水的良好性能，在冷却水系统内装有离子交换器，以清除水中的

铜离子和游离的二氧化碳。此外，水系统内尚需装磁性过滤器，以清除水中的铁磁微粒。按照苏联的规定：发电机运行时，定子绕组内冷却凝结水的额定电阻率应为 $200 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 。当降低到 $75 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 时，报警装置应发出信号。若更换部分新水而不能恢复凝结水的电阻率，在电阻率降到 $50 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 时，发电机应与电网解列。

在双水内冷电机中，冷却水在转子绕组内的流速比在定子绕组内高，这样就增大了给铜表面的供氧量，使腐蚀加快和水中含铜离子量增多，因此，对独立的转子冷却水系统，加装离子交换器是绝对必要的，并规定凝结水的电阻率不应低于 $50 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 。

总之冷却水的水质应达到下列要求：（1）透明、纯净、不含固体杂质；（2）硬度小于 $10 \mu\text{mol/kg}$ ；（3）电阻率大于 $200 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ ；（4）pH值应大于 7.5，约在 9 ~ 10 之间，即偏碱性；（5）含氨（ NH_3 ）微量，无氨更佳，因氨对铜有腐蚀作用；（6）水压在 0.05 ~ 0.6 MPa，进水温度不超过 40°C ，出水温度一般为 80°C ，最高不得超过 85°C 。

三、冷却方式

现代大功率汽轮发电机的冷却介质和冷却方法多为组合式，其中主要有以下五种：

- （1）定子绕组氢外冷，转子绕组氢内冷，铁芯氢冷；
- （2）定子绕组氢内冷，转子绕组氢内冷，铁芯氢冷；
- （3）定子绕组水内冷，转子绕组氢内冷，铁芯氢冷；
- （4）定子绕组水内冷，转子绕组水内冷，铁芯氢冷；
- （5）定子绕组水内冷，转子绕组水内冷，铁芯空冷。

第（1）种组合冷却方式，由于受表冷限制，通常适用于 25 万 kW 以下机组。

第（5）种组合冷却方式，虽可缩小电机体积，也无需防爆和严密的密封措施，但铁芯空冷风损大，效率低，有电腐蚀现象。尤其是空冷不易解决定子端部铁芯、压圈及附件的发热问题。除在定子端部加电屏蔽和磁屏蔽外，有时还需要在压圈上加装冷却水管，以解决散热问题。因此，这种组合冷却方式的适用范围就受到一定的限制。瑞士曾制造出一台充氮的全水冷汽轮发电机，容量为 30 万 kW。国产 30 万 kW 机组也采用这种组合冷却方式。

第（4）种组合冷却方式，已应用到 50 万 kW 汽轮发电机，今后将应用于 100 万 kW 以上机组上。但由于水冷转子工艺比较复杂，因此，对中等容量的发电机转子是否经济，目前国内、国外都还存在不同的看法。

第（2）种组合冷却方式，适用于 100 万 kW 以下机组，原因是定子绕组带高压，为了防止爬电和绝缘击穿，槽内线棒不宜开设排气孔，而是在线棒实心导线排间夹放单排或双排非磁性和高电阻的薄壁钢管，作为通风管道。由于钢管本身涡流损耗小和股线间的绝缘层薄、温差小，故这种冷却方式可视为一种近似的直接冷却方式。为了便于气体进入管道和防止通风管端与同电位线棒间发生闪络放电，管端需套硅有机绝缘套管，管口呈喇叭形。而且因管道长，风阻大，氢气压力高，故此种冷却方式存在风损大、定子线棒全长的温升分布不均匀及需要严密密封等缺点，不过它只有一种冷却介质和冷却系统，故运行比较可靠。

第(3)种冷却方式应用最多, 广泛应用在20~100万kW左右的机组上。因转子是汽轮发电机温度较高的一个部件, 但转子上电压低, 电流密度高。可在槽内导线上开设进出风孔, 通过气隙取气, 就可自动地进风和排风。如再增多进出风区, 又可缩短风道, 减小风阻。因此, 降低进风压力, 就可使转子温度降低, 导线沿轴向长度温升分布比较均匀。定子水冷所需动力小, 水温容易调节, 控制简便。此种冷却方式, 虽然结构和工艺复杂一些, 需要两种介质和两套冷却系统, 不锈钢管用的也多, 但冷却效果好, 运行可靠, 电机直径小, 瞬变电抗可以小, 有利于提高系统稳定度, 是一种比较标准的冷却方式。

第三节 短路比和功率因数对发电机的性能和体积的影响

短路比是对汽轮发电机运行性能和体积、造价有直接影响的参数。所谓短路比 k_c , 就是空载产生额定电压($E_0=U_e$)时的励磁电流 I_{10} 和短路产生额定电流($I_{d1}=I_e$)时的励磁电流 I_{1d1} 之比。本书第八章将详细证明, 其关系式为

$$k_c = \frac{I_{10}}{I_{1d1}} = \frac{1}{x_d^*} \quad (1-3-1)$$

由式可知, 短路比大的发电机, 同步电抗 x_d^* 小, 短路电流大, 电压变动小, 过载能力高, 并联运行稳定性好, 但气隙大, 转子所需励磁磁势大, 则转子直径大、电机体积大、造价高。反之, 短路比小的发电机, 同步电抗大, 短路电流小, 电压变动大, 过载能力低, 并联运行稳定性差, 但气隙小, 转子所需励磁磁势小, 则转子直径小、电机体积小、造价低, 材料利用率高。这就表明短路比的大小对发电机运行性能的影响和对体积、造价的影响是相互矛盾的, 因而在设计选择短路比时应统筹考虑这些因素。

现在大功率汽轮发电机都采用冷却效果好的冷却技术, 大大提高了线负荷和导线电流密度, 从而节省了原材料, 缩小了电机尺寸。短路比已降低在0.4到0.7之间, 但短路比小于0.6时, 电机效率稍有降低。国际电工委员会对20万kW以上汽轮发电机的短路比推荐为0.42到0.58。

为了进一步了解短路比对电机的影响, 如图1-3-1所示, 设空载产生额定电压的励磁磁势 F'_0 和满载转子平衡定子电枢反应磁势所增加的励磁磁势 F'_a 之比为短路比。减小气隙可使空载励磁磁势由 F'_0 减小为 F''_0 , 转子平衡电枢反应磁势所增加的磁势由 F'_a 增大为 F''_a , 则转子上的总励磁磁势显然由 F' 减小为 F'' , 则转子直径可以减小。故降低短路比可使发电机的体积缩小。

现在大功率汽轮发电机的功率因数 $\cos\varphi$ 已由0.8提高到0.85和0.9。因为发电机的额定容量为

$$P_e = mU_e I_e \cos\varphi_e \quad (1-3-2)$$

若保持有功分量 $I_e \cos\varphi_e$ 不变, 提高功率因数可使定子电流减小。如图1-3-2, 设发电机空载产生额定电压的磁势为 F_0 , 当定子电流为 I_e 和功率因数为 $\cos\varphi_e$ 时, 转子平衡电枢反应的励磁磁势分量为 F_a , 近似地取 F_a 与 I_e 同相, 则转子上总励磁磁势为 F 。若使 φ_e 减小为 φ'_e , 保持有功分量 $I_e \cos\varphi_e = I'_e \cos\varphi'_e$ 不变, 则 I_e 减小为 I'_e , 转子平衡电枢反应的励磁磁势分量

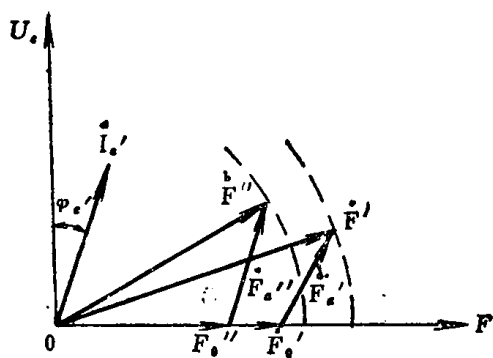


图 1-3-1 减小气隙（降低短路比）对励磁磁势的影响

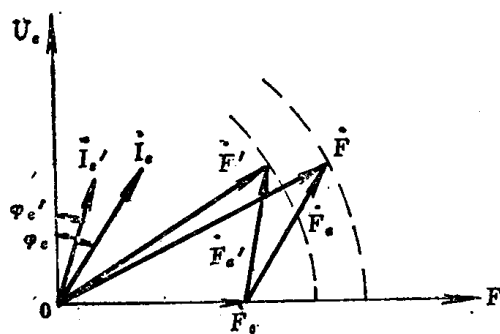


图 1-3-2 提高功率因数对励磁磁势的影响

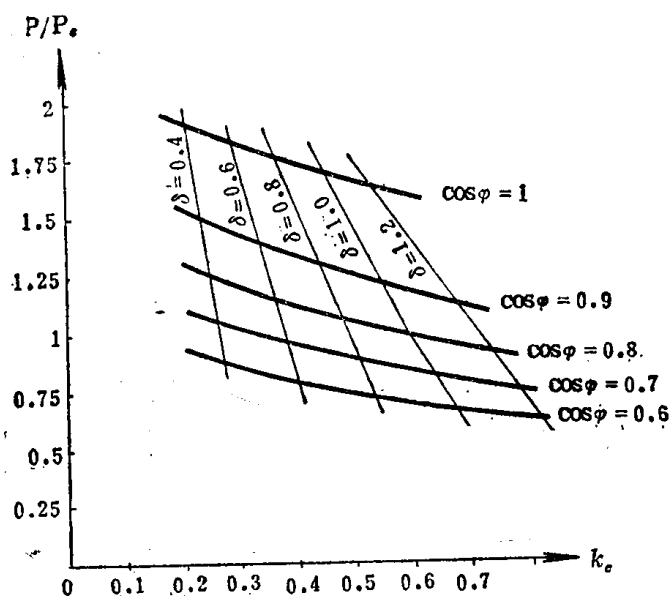


图 1-3-3 短路比、功率因数对容量的影响
 k_s —短路比； P/P_s —有效功率和额定功率（40万kW）之比

表 1-3-1 不同功率因数和纵轴同步电抗对电机重量和造价的影响

额定功率因数	1	0.95	0.9	0.85	0.8	0.75	0.7
重 量	0.84	0.9	0.94	1	1.06	1.13	1.18
造 价	0.86	0.91	0.95	1	1.05	1.11	1.15
纵轴同步电抗	1.5	1.75	2.1	2.5	3		
重 量	1.18	1.13	1	0.97	0.94		
造 价	1.15	1.11	1	0.98	0.95		

由 F_a 减小为 F'_a , F'_a 与 I'_a 同相, 显然转子上总励磁磁势由 F 减为 F' , 则转子直径可以减小。故提高功率因数可减小电机体积, 或者说, 若保持电机尺寸不变, 提高功率因数就可提高电机容量。

例如图1-3-3表示一台额定容量为40万kW、短路比为0.6的发电机, 当 $\cos\varphi$ 由0.8提高到0.925, 容量由40万kW可提高到50万kW, 容量提高了25%, 稳定性只降低7%。如 $\cos\varphi$ 保持0.85不变, 短路比由0.6降低为0.4, 发电机容量也提高到50万kW; 若将短路比由0.6降到0.3, $\cos\varphi$ 由0.8提高到0.9, 发电机容量就可提高到64万kW, 仍能保持应有的稳定性能。

据有关资料介绍: 一台30万kW汽轮发电机, 短路比由0.8降为0.4, 定子重量可减少26%。一台27.5万kW、机重230t的水冷汽轮发电机和一台15万kW、机重200t的氢外冷汽轮发电机, 提高功率因数和降低短路比(即同步电抗相应增大)后, 都可使电机重量和造价下降, 具体数字见表1-3-1。表中造价 P 和重量 G 间关系为: $P \propto G^{0.85}$ 。

第二章 静 止 部 分

大功率汽轮发电机的结构见图2-0-1和图2-0-2。它分为静止和旋转两大部分。静止部分即定子, 主要由机座、定子铁芯、定子绕组、端盖等部件组成。

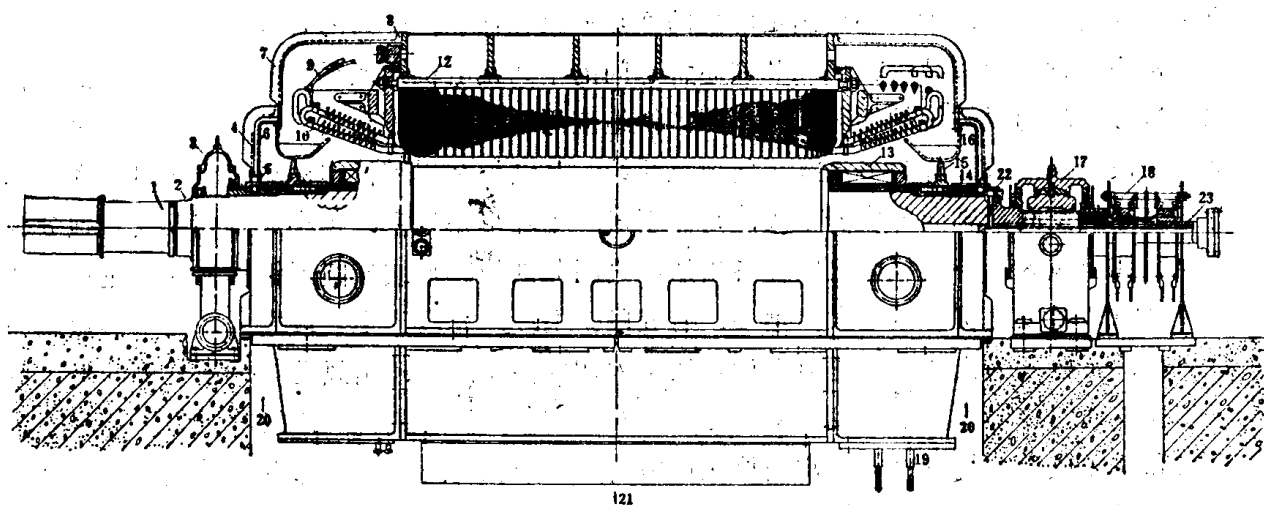


图 2-0-1 SQF-100-2型双水内冷汽轮发电机外形图

- 1—转轴, 2—接地电刷, 3—出水盒, 4—端盖, 5—端盖轴封圈, 6—轴封风道, 7—大端盖, 8—垫圈螺栓, 9—进出水引水管, 10—定子端部绕组, 12—定位筋, 13—大护环, 14—小护环, 15—风扇, 16—风扇罩, 17—座式轴承, 18—电刷架, 19—定子绕组引出线, 20—进风, 21—出风, 22—水室, 23—不锈钢进水管

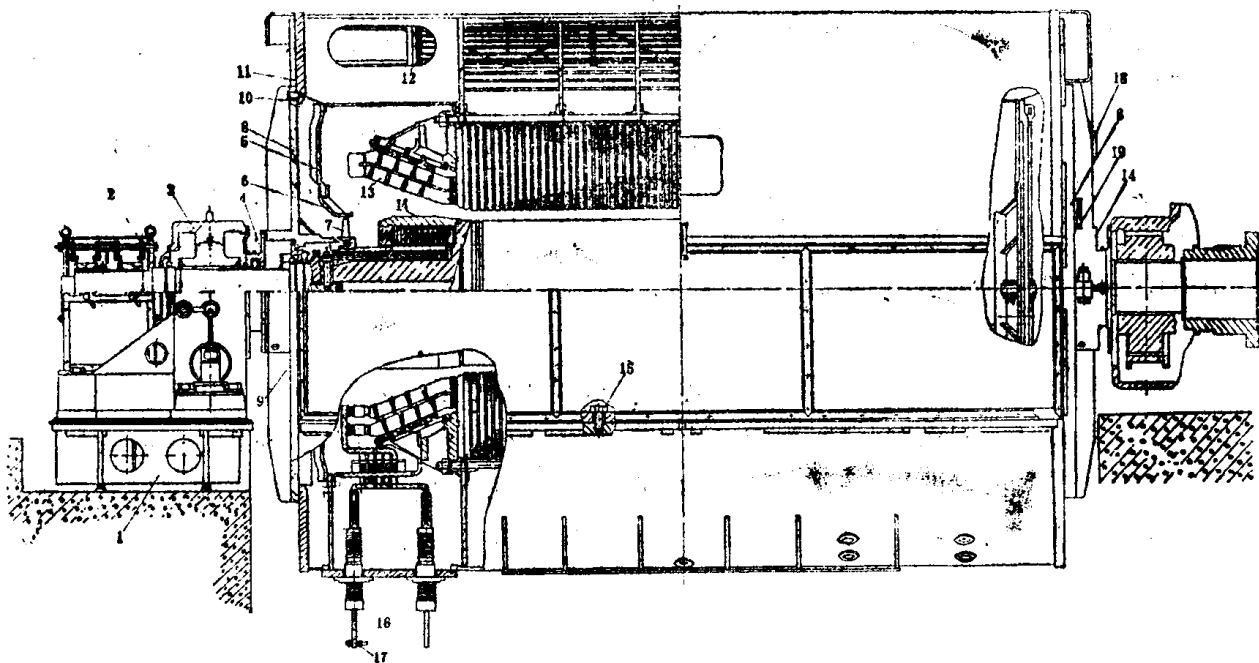


图 2-0-2 TQN-100-2型氢冷汽轮发电机外形图

1—底盘；2—刷架；3—座式轴承；4—油密封装置；5—内端盖；6—风扇罩；7—风扇；8—端盖；9—端盖加强筋；10—密封圈；11—机座；12—冷却器；13—定子绕组；14—护环；15—螺钉；16—出线套管；17—螺杆；18—温度计；19—机座外表

第一节 机 座

机座的作用主要是支撑和固定定子铁芯、定子绕组。如用端盖轴承，它还要承受转子重量。同时，它在结构上还要满足电机的散热通风和保护、密封的要求。

机座为钢板焊接结构。机壳和铁芯背部间的空间是电机通风系统的一部分，它的结构和气流方向随通风系统的不同而异。国产机组应用较多的是压入式径向通风系统，因它是轴向分段通风，故又称为多流式压气通风系统。其结构是用钢板作横隔板，将机壳和铁芯背部之间的空间沿轴向分成若干段，每段形成一个环形小风室，各小风室相互交替地分为进风区和出风区，各进风区之间和各出风区之间分别用圆形或椭圆形钢管连通。进风区和出风区总数随发电机容量增大而增多，有五段、七段、九段、十一段之分，其中偶数段为进风区，奇数段为出风区。进风孔设在风扇内侧的高压风区，出风孔与风扇外侧的低压风区相连并通向冷却器。空冷发电机的冷却器布置在机座的下部。氢冷发电机为了减小通风阻力和缩短风道，气体冷却器常安放在机座内的矩形孔内，有水平布置（卧式）和垂直布置（立式）两种，应用较多的是垂直布置。冷却器的布置见图2-1-1，图2-1-2和图2-1-3。

水平布置的优点是可将四组或六组体积较长的冷却器，分散安放在机座内圆和铁芯背部之间的圆周内，使机座保持为简单的圆柱体结构。缺点是安装拆卸困难。垂直布置则相反，冷却器立放在机座两端或机座中部的两侧位置，机座的结构形状虽较复杂，但拆卸安装却较方便，可以用吊车将整个冷却器吊出或吊入机座。国产及进口机组冷却器数量和安放位置见表2-1-1。