

第三分册

汽轮发电机及电气设备

华中理工大学 涂光瑜 主编

中国电力出版社

内 容 简 介

本书是300MW火力发电机组丛书的第三分册。书中系统地介绍了300MW汽轮发电机及电气设备的结构、原理、特性及运行、调试、维护。本书共分四篇。第一篇300MW汽轮发电机；第二篇励磁系统；第三篇电气一次系统及设备；第四篇继电保护配置及设备。

本书内容丰富，论述精炼，反映了我国300MW汽轮发电机的设备水平，适合从事300MW燃煤电站电气设计、安装、调试、运行及管理工作的工程技术人员阅读，也可供其他高参数、大容量机组的有关人员，以及高等院校电力工程类专业和热能动力类专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

汽轮发电机及电气设备/涂光瑜主编. -北京: 中国电力出版社, 1998

(300MW火力发电机组丛书; 第3分册)

ISBN 7-80125-622-0

I. 汽… II. 涂… III. ①汽轮发电机②火电厂-电气设备 N. TM311

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第01248号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京鑫正大印刷厂印刷

各地新华书店经营

*

1998年10月第一版 1998年10月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 33.75印张 827千字

印数0001—3400册 定价41.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

《300MW 火力发电机组丛书》

编 委 会

主 编 吴季兰

副 主 编 容奎恩 涂光瑜 高 伟

编 委 (按姓氏笔划排序)

丁学俊 尹项根 叶 涛 刘 沛 许继刚

冯慧文 李树人 吴季兰 吴胜春 陆继明

张永立 张国强 张晓梅 张家琛 涂光瑜

胡能正 高 伟 栾庆富 容奎恩 熊信银

黄树红



为促进社会主义经济建设的发展,我国正大力发展电力工业,新建及在建不少高参数、大容量的火力发电机组,尤以 300MW 机组居多。300MW 机组已成为我国各大电网的主力机组,因此有关工程技术人员、现场生产人员急需了解和掌握这些高参数、大容量机组的结构、系统和运行知识。为此,我们组织编写了这一套《300MW 火力发电机组丛书》。

丛书包括《燃煤锅炉机组》、《汽轮机设备及系统》、《汽轮发电机及电气设备》、《计算机控制系统》四个分册。全套丛书由华中理工大学吴季兰担任总主编。

本丛书可供从事 300MW 火力发电机组设计、安装、调试、运行、检修及管理工作的工程技术人员阅读,或作为培训教材使用,也可供其他高参数、大容量火电机组的有关人员以及高等院校热能动力类和电力工程专业师生参考。

《汽轮发电机及电气设备》是本丛书的第三分册。这一分册共分十章,主要讲述 300MW 汽轮发电机及电气设备的结构、原理、特性以及运行、调试、维护。内容包括:300MW 汽轮发电机(第一篇)、励磁系统(第二篇)、电气一次系统及设备(第三篇)和继电保护配置及设备(第四篇)。本分册力图既系统、又有重点地反映我国 300MW 机组电气设备的制造水平和技术特点,以及这些设备所采用的新原理、新技术、新材料和新工艺。

本分册由华中理工大学涂光瑜主编,参加编写的有张永立(第一篇),涂光瑜(第二篇),熊信银(第三篇第一、二、五章)、胡能正(第三篇第三、四章),尹项根(第四篇第一、二、三、四章)、刘沛(第四篇第五、六、七、八、九、十章)。另外,陆继明和张国强分别参加了本分册第二篇和第三篇第一章初稿的编写。本书审稿为山东电力局高级工程师徐福田(第一篇、第三篇),华北电力大学教授李先彬(第二篇),山东工业大学教授王广延(第四篇)。本分册在收集资料和编写过程中,参阅了书中“参考文献”所列的正式出版文献,以及国内有关制造厂家、安装单位、设计院、研究所和高等院校编印的说明书、讲义和图纸等技术资料,在此一并表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促,又受搜资条件所限,错漏之处在所难免,恳请读者指正。

编 者

1997 年 12 月

目 录

前 言

第一篇 300MW 汽轮发电机

第一章 300MW 汽轮发电机的结构和冷却系统	1
第一节 同步发电机的发展概况	1
第二节 我国 300MW 汽轮发电机发展概况	3
第三节 300MW 汽轮发电机组的主要部件及参数	5
第四节 机座及附属部件	7
第五节 定子铁心	10
第六节 定子绕组	12
第七节 氢内冷式转子	25
第八节 水氢氢汽轮发电机的氢气系统	31
第九节 汽轮发电机的测温	33
第十节 供气系统	34
第十一节 定子外部供水系统	35
第十二节 油密封及外部供油系统	36
第十三节 水内冷式转子	38
第二章 汽轮发电机的启、停和维护	43
第一节 水氢氢汽轮发电机的启动和并列	43
第二节 水氢氢汽轮发电机的解列与停机	46
第三节 汽轮发电机运行中的检查和维护	46
第三章 汽轮发电机的正常运行方式	48
第一节 汽轮发电机的稳态运行特性	48
第二节 发电机与无限大系统并联的运行特性	53
第三节 汽轮发电机的安全运行极限	57
第四节 调节励磁时发电机的工作状态	60
第五节 调节有功功率时发电机的工作状态	63
第四章 汽轮发电机的进相运行方式	65
第一节 进相运行的基本概念	65
第二节 系统稳定性的降低	66
第三节 发电机端部漏磁引起的定子发热	67
第五章 汽轮发电机的不对称运行方式	70
第一节 概述	70
第二节 不对称运行的计算示例	70
第三节 负序电流对同步发电机的危害	76

第四节	对负序电流的限制	77
第六章	汽轮发电机的主要故障及其处理	79
第一节	汽轮发电机组振动的增大	79
第二节	发电机事故过负荷	80
第三节	定子绕组故障	81
第四节	转子绕组故障	82
第五节	失去励磁	83
第七章	汽轮发电机的试验	88
第一节	试验的种类	88
第二节	300MW 汽轮发电机的型式试验	88
第三节	交接和预防性试验	90

第二篇 300MW 汽轮发电机的励磁系统

第一章	概述	100
第一节	励磁控制系统	100
第二节	交流励磁机静止硅整流器励磁系统	102
第三节	交流励磁机旋转硅整流器励磁系统	104
第四节	自并励励磁系统	105
第二章	交流励磁机组	107
第一节	主励磁机	107
第二节	副励磁机	110
第三节	备用励磁装置	111
第三章	硅整流装置	114
第一节	三相桥式不可控整流电路	114
第二节	三相桥式全控整流电路	115
第三节	硅整流元件的保护	120
第四节	可控整流柜	124
第四章	灭磁及转子过电压保护装置	126
第一节	同步发电机灭磁原理	126
第二节	转子过电压保护原理	128
第三节	灭磁及转子过电压保护装置	132
第五章	自动励磁调节器	135
第一节	概述	135
第二节	测量比较及调差单元	137
第三节	综合放大单元	141
第四节	移相触发单元	145
第五节	励磁限制及保护单元	151
第六节	DC 调节器与自动跟踪及自动切换	160
第七节	励磁系统稳定器和电力系统稳定器	165
第八节	励磁控制系统的监视信号单元	167
第六章	励磁系统的调整试验	171

第一节	励磁功率单元调试	171
第二节	励磁调节器开环调试	172
第三节	励磁控制系统闭环调试	175

第三篇 电气一次系统及设备

第一章	电力变压器	179
第一节	变压器的基本原理	179
第二节	变压器型号及其技术数据	180
第三节	变压器的结构	184
第四节	分裂绕组变压器	189
第五节	变压器的主要附件	190
第六节	变压器的检查、试验及运行维护	194
第二章	高压电器	201
第一节	高压断路器的灭弧原理	201
第二节	高压断路器概论	214
第三节	SF ₆ 断路器	221
第四节	油断路器	231
第五节	真空断路器	240
第六节	高压断路器的操动机构	245
第七节	封闭母线	253
第三章	电气主接线和厂用电接线	262
第一节	300MW 机组电厂电气主接线	262
第二节	电气主接线的运行方式	268
第三节	厂用电接线	270
第四节	厂用电系统运行	288
第四章	二次回路	290
第一节	阅读二次回路图的基本知识	290
第二节	厂用变压器的控制信号回路	294
第三节	发电机变压器组出口断路器控制信号回路	300
第四节	厂用电动机控制信号回路基本接线	302
第五节	厂用电机的联锁回路	307
第五章	直流系统	329
第一节	概述	329
第二节	蓄电池的基础知识	329
第三节	充电设备	333
第四节	蓄电池和充电设备的运行	335
第五节	直流系统的异常运行及事故处理	338

第四篇 继电保护配置及设备

第一章	集成电路继电保护的基本电路	345
------------	----------------------------	-----

第一节	运算放大器基础	345
第二节	移相电路	348
第三节	整流电路	349
第四节	有源滤波电路	351
第五节	滤波电路	353
第六节	时间电路	354
第七节	峰值检波器电路	355
第八节	CMOS 器件及其应用	355
第九节	其它器件与电路	356
第二章	300MW 汽轮发电机继电保护	358
第一节	概述	358
第二节	相间短路纵差保护	359
第三节	定子绕组匝间短路保护	362
第四节	定子绕组单相接地保护	366
第五节	低励失磁保护	372
第六节	励磁回路一点接地保护	387
第七节	励磁回路两点接地保护	390
第八节	转子表层过热（负序电流）保护	391
第九节	逆功率保护	397
第十节	低频异常运行保护	400
第十一节	定子绕组过电压保护	402
第十二节	失步异常运行保护	403
第十三节	定子绕组对称过负荷保护	411
第十四节	励磁回路过负荷保护	415
第三章	变压器继电保护	416
第一节	概述	416
第二节	主变压器内部故障差动保护	416
第三节	主变压器零序保护	422
第四节	主变压器瓦斯保护	424
第五节	主变压器其他保护	424
第六节	高压厂用变压器保护	425
第四章	发电机变压器组公用继电保护	427
第一节	概述	427
第二节	发电机变压器组内部故障纵差保护	427
第三节	反时限过激磁保护	428
第四节	后备阻抗保护	430
第五节	发电机变压器组辅助性保护	433
第五章	线路保护基础	434
第一节	距离保护特性表达式	434
第二节	常用的圆和直线特性继电器	435
第三节	微机型保护中距离特性的算法	440
第四节	故障系统电压相量图分析法	441

第五节	集成电路型保护装置的基本电路	444
第六章	综合比相式距离继电器	452
第一节	综合比相式接地距离继电器的基本原理	452
第二节	综合比相式相间距离继电器的基本原理	456
第三节	振荡闭锁装置原理	461
第四节	综合起动元件和过流继电器	465
第五节	装置整体及接地相间逻辑	467
第六节	选相、出口及方向比较逻辑	470
第七章	工频变化量快速方向保护	475
第一节	工频变化量快速方向保护的基本原理	475
第二节	工频变化量快速方向保护的动作逻辑	478
第八章	光纤纵差保护	482
第一节	差动保护的基本原理	482
第二节	光纤纵差保护装置	486
第三节	信号传输系统	488
第九章	微机型高压线路保护	495
第一节	计算机继电保护装置构成	495
第二节	微机型线路保护装置	501
第十章	母线继电保护	518
第一节	母线故障及其保护	518
第二节	带制动特性的母线差动保护	519
第三节	母线差动保护装置	521
第四节	JMH-1 型母线保护装置的基本工作原理	522
第五节	微机型母线保护	527
参考文献		529

第一篇 300MW 汽轮发电机

第一章 300MW 汽轮发电机的结构 和冷却系统

第一节 同步发电机的发展概况

发电机的功能是将原动机转轴上的动能通过发电机转子与定子间的磁场耦合作用，转换到定子绕组上变成电能。

按照原动机的不同，通常同步发电机分为水轮发电机、汽轮发电机、燃气轮发电机及柴油发电机等。水轮发电机和柴油发电机的转速较低，极数较多，多采用凸极式转子。汽轮发电机和燃气轮发电机的转速很高，则采用隐极式转子。由于水轮发电机组、燃气轮机组启动迅速，宜于承担电力系统的峰荷。而火电机组以及核电机组（均为汽轮发电机），则由于不能快速启动，只宜于承担电力系统的基荷。

按照冷却介质的不同，同步发电机可分为空气冷却、氢气冷却、水冷却等。其中还可分为外冷式（冷却介质不直接与导线接触）和内冷式（冷却介质直接与导线接触）。

近年来，我国电力系统中发电机单机容量不断增长，200MW、300MW 的单机已成为系统中的主力机组，600MW 的单机也逐步进入一些大的电力系统。单机容量增长的原因是：

(1) 可降低发电机的造价和材料消耗量

例如一台 800MW 机组比一台 500MW 机组的单位成本要降低 17%；一台 600MW 机组比一台 100MW 机组，其材料消耗率只有 60%。

(2) 可降低电厂基建安装费

若以 200MW 机组安装费用为 100%，则 500MW 机组，单位安装费用只需 85%。

(3) 可降低运行费用

单机容量大的机组的运行人员数和厂用电均较单机容量小的机组低。

当然，并不是在任何情况下单机容量越大越好，如果电力系统总容量小而单机容量过大，则不仅事故停机影响大，平时安排检修也有困难，所以，系统大机组的单机容量应与系统总容量相匹配，其合理的比例见表 1-1-1。例如，目前华中、华东、东北电力系统容量已超过 20000MW，因而装置 300~600MW 的单机容量是合适的。

表 1-1-1 大机组的单机容量和电力系统容量的合理比例

系统容量 (MW)	小于 1000	1000~10000	大于 10000
大机组经济容量 系统容量 (%)	4~6	6~10	约 ≥10

发电机单机容量的加大并非轻而易举，它受到许多因素的制约，因为发电机的单机功率

表达式为

$$P = K A B_s D_i^2 n v \quad (1-1-1)$$

式中 K ——常数；

A ——定子线负荷，A/mm；

B_s ——气隙磁通密度，T；

D_i ——定子内径，m；

n ——额定转速，r/min；

l ——定子铁心有效长度，m。

要提高发电机的单机容量 P ，必须提高式 (1-1-1) 右侧 6 个因子的数值。

一般说，常数 K 与转速 n 不可能大幅度提高。增大定子内径 D_i 可以提高发电机功率，但 D_i 的增大意味着转子直径的增大，会使转子受到很大的离心力，尤其轴中心孔受到的应力最大，其值与转子直径的 3 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。目前汽轮发电机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极限。

增加转子长度也有一定限度，转子长度和直径的比例不能太大，否则刚度不够，挠度太大，使气隙不均匀，产生不平衡的磁拉力。大型汽轮发电机转子的有效长度 l 与直径 D 的比值一般应满足

$$6.5 \geq \frac{l}{D} \geq 3 \quad (1-1-2)$$

此外，提高气隙磁密 B_s 虽属途径之一，但目前硅钢片最大磁密只能达 2T，气隙磁密 B_s 不能超过 1T，否则会过度饱和。

看来，通过冷却技术的发展来提高线负荷 A 有较大的潜力可挖，几十年来发电机的冷却介质由空气到氢气，又发展为水冷，使得发电机单机容量大幅度上升，这是由于介质的性能所决定的。

表 1-1-2 列出了空气、氢气和水 3 种介质的冷却性能。表中均以空气的各项指标为 1，其它介质所列为相对值。从冷却角度看，水是最好的：水的热容量比空气大 4.16 倍，密度较空气大 1000 倍，散热能力比之大 84 倍。此外水还有良好的绝缘性能，得到电阻系数为 $200 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 的凝结水是没有困难的。

表 1-1-2 常用冷却介质的相对指标

冷却介质	相对比热	相对密度	吸热能力*		散热能力	
			体积流量	相对吸热量	流速 (m/s)	相对散热系数
空气	1	1	1	1	30	1
氢气	14.35	0.21	1	3	40	5
水	4.16	1000	0.05	208	2	84

* 按水的流速为气体流速的 1/20 计算。

大型同步发电机已没有完全的空气冷却了。当定、转子均采用氢表冷时，汽轮发电机单机极限容量只能达 100MW；氢内冷是对氢表冷的重要改进，转子氢内冷、定子氢表冷则可达 250MW；转、定子绕组均采用氢内冷时，约可达 1000MW；而目前较为普遍的是转子绕组采取氢内冷、定子铁心采用氢表冷、定子绕组为水内冷（简称水氢氢冷却）方式，其单机极限

容量可达 1200MW。

同步发电机冷却介质与冷却方式的不断改进, 已使发电机的线负荷 A 由 60A/mm 左右提高到了 200~250A/mm 左右。若要再进一步提高, 在现有的冷却方式下遇到极大的困难。

目前, 科技发达的国家都把目标瞄准了“超导化”, 即定子绕组仍采用常导材料导电, 转子绕组则采用超导材料。因为超导励磁绕组能产生高于常导励磁绕组所能产生的气隙磁密, 而不需定子、转子铁心的存在, 定子电枢绕组就可做成无槽气隙绕组, 去掉了铁齿, 定子的空间利用率及线负荷都大大提高, 将单机极限容量提高 3 倍左右, 即达 3600MW。

1979 年美国西屋公司开始 300MVA 大型超导汽轮发电机的研制, 1983 年制成, 由于各方面的原因尚未正式并网发电。前苏联在研制这种发电机中, 后来居上, 处于世界领先地位。列宁格勒(现圣彼得堡)的“电力”工厂所开发的 300MVA 大型超导汽轮发电机完成了并网发电试验, 下一步计划再研制一台 1200MVA 的超导汽轮发电机。

第二节 我国 300MW 汽轮发电机发展概况

1949 年前我国完全没有大型汽轮发电机制造能力。1952 年开始制造出空冷 3MW 汽轮发电机, 到 1970 年就造出了 200MW 定子水冷、转子氢内冷的机型。表 1-1-3 列出的数据可以看到我国国产汽轮发电机单机容量的增长速度。

表 1-1-3 国产汽轮发电机单机容量增长速度

时间	1952 年	1954 年	1957 年	1958 年	1959 年	1960 年	1969 年	1970 年
型 号	QF-3-2 型	QF-6-2 型	QF-12-2 型	QFS-12-2 型 QF-25-2 型	QFQ-50-2 型	TQN-100-2 型	QFS-125-2 型	QFQS-200-2 型 QFS-200-2 型
单机容量 (MW)	3	6	12	12 25	50	100	125	200
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

表 1-1-3 中的 QFS-12-2 型是上海电机厂于 1958 年率先开发的我国首台双水内冷汽轮发电机, 其容量为 12MW, 这在世界电机制造业上亦可谓开创了先河。时隔 13 年, 该厂于 1971 年试制成功我国首台 300MW 汽轮发电机, 即双水内冷 QFS-300-2 型机, 该机于 1974 年投入运行。

1977 年~1986 年, 上海电机厂在上述基础上对该机进行了完善化工作。其主要内容是修改机座结构, 调整转子本体横向槽尺寸, 提高自振频率, 加强转子绝缘引水管绝缘等。由于提高了产品质量, 改进型 QFS-300-2 型的年运行时间可在 6000h 以上, 其中几台达到 7000~8000h。

从 1986 年开始, 上海电机厂进一步吸收成熟的科研成果并移植引进新技术, 从第 13 台产品开始, 制造出创优型 300MW 汽轮发电机产品, 这是第 3 代产品。主要的改进是提高转子绝缘引水管使用寿命, 由于引进了德国 KWU 技术, 发展了外用钢丝编织、内用聚四氟乙烯

的新型转子绝缘引水管，使其寿命由原来的 3 年提高到 4~5 年。

至 1992 年 3 月，该厂已制造 28 台并有 25 台机投入运行，受到用户好评。

为了适应我国电网迅速发展的要求，近年来从国外进口了一些单机容量为 300MW 左右的汽轮发电机组。它们的运行情况都比较好，其经济技术指标列于表 1-1-4。

表 1-1-4 进口 300MW 汽轮发电机组的技术经济指标

制造国厂家	美国 西屋	美国 通电	前苏联 З·С	意大利 ASGEN	法国 CEW	罗马尼亚
运行厂	石 横	上 安	—	大 港	元宝山	蒲 城
机型		AB-350-2 型	TBB-300-2 型			THA-320-2 型
额定功率(MW)	300	379	300	320	300	330
额定电压(kV)	20	23	18	20	22	24
额定电流(kA)	10.190	11.196	11.320	10.868	9.264	9.340
功率因数	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
转速(r/min)	3000	3000	3000	3000	3000	3000
冷却方式	全氢	水氢氢	水氢氢	水氢氢	水氢氢	水氢氢
额定氢压(MPa)	0.428	0.414	0.3	0.32	0.41	0.35
效率(%)	98.5	98.72	98.8	98.76	98.46	98.87
短路比	0.609	0.50	0.53	0.585	0.495	0.5
$x'_d(\text{电})(\%)$	28.2	21.0	32.0	21.5	27.0	33
$x''_d(\text{电})(\%)$	23.6	16.0	21.0	14.5	—	22
励磁方式	无 刷	机内励	高频整流	可控硅	可控硅	可控硅

改革开放以来，我国开始积极引进国外技术，与美国西屋公司进行了 300MW 机型的联合设计。随后国内各大电机制造厂充分吸收国外先进技术，充分发挥自己原有技术优势，生产出自己的优化产品。

上海电机厂生产的 QFSN-300-2 优化型水氢氢汽轮发电机，先后运行于吴泾、石横、汉川等发电厂。

哈尔滨电机厂的首台 QFSN-300-2 型水氢氢汽轮发电机于 1992 年制成，并先后运行于珠江、阳逻、铁岭等发电厂。

东方电机厂于 1974 年就早已开始研制 300MW 容量等级的机型，该厂以自力更生为主，嫁接国外技术于 1985 年试制成功 QFSN-300-2-18 型 300MW 机（起初称为东方 QFQS-300-2 型），该机单位容量的铜耗、铁耗较美国西屋 300MW 机低 19.6% 和 21%，各项技术经济指标均超过国家标准。首台东方型 300MW 汽轮发电机在山东黄台投运，至 1994 年，已有 19 台汽轮发电机产出。该型发电机于 1991 年 12 月通过了国家级鉴定。现在该厂已将该机型进一步优化，将定子绕组额定电压由 18kV 改为 20kV，定型为 QFSN-300-2-20 型。

我国三大电机厂目前所生产的 300MW 汽轮发电机主要额定参数列于表 1-1-5。该表表明，QFS-300-2 型汽轮发电机在冷却方式上采用的是水水空方式，即转子绕组、定子绕组均为水内冷，定子铁心为空冷。表中有 3 种 QFSN-300-2 型汽轮发电机都是水氢氢，即定子绕组为

水内冷，转子绕组为氢内冷，定子铁心为氢表冷的方式。本篇将对哈尔滨电机厂所产汽轮发电机作较详细的介绍，其它机型将作简要介绍。

表 1-1-5 国产 300MW 汽轮发电机主要参数

型 号	QFSN-300-2-20 型	QFSN-300-2 型	QFSN-300-2 型	QFS-300-2 型	QFN-300-2 型
生产厂	东方电机厂	哈尔滨电机厂	上海电机厂	上海电机厂	上海电机厂
额定功率 (MW)	300	300	300	300	300
额定电压 (kV)	20	20	20	18	20
额定电流 (A)	10190	10190	10190	11320	10190
额定功率因数	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
额定转速 (r/min)	3000	3000	3000	3000	3000
额定氢压 (MPa)	0.3	0.3	0.31	0.2 (水压)	0.41
额定励磁电流/电压 (A/V)	2203/426	2642/365	2510/302	1844/483	2698/403
绝缘等级	F/B	B (F) /B (F)	B	B	B
励磁系统	三机同轴交流， 静止 SCR	三机同轴交流， 静止 SCR	三机同轴交流， 旋转 SCR	三机同轴交流， 静止 SCR	三机同轴交流， 旋转 SCR
效率 (%)	≥98.8	98.82	98.8	98.61	>98.6
短路比	0.556	0.656	>0.5	0.47	>0.5
冷却方式	水氢氢	水氢氢	水氢氢	水水空	氢氢氢

宏观上看，国产 300MW 汽轮发电机组由于引进和嫁接了国外技术，不断地自我优化，目前在质量上已比国产 200MW 汽轮发电机组有大幅度的提高，但由于缺乏经验，仍显得不很过硬，在电网中仍未起到替代小机组，以大量降低煤耗的作用，还需要制造厂、运行厂共同努力加以提高。

第三节 300MW 汽轮发电机组的主要部件及参数

300MW 汽轮发电机组通常采取卧式轴，轴系上带有三台同步发电机。图 1-1-1 展示了 QFSN-300-2 型机组的侧视图，其中 11 为主同步发电机（机壳），其强大的电能由 3 引出；5 为主励磁机，它发出的三相 100Hz 中频交流电流由该机的定子绕组引出，经不控整流柜整流成直流电流，供给主同步发电机的励磁绕组；4 为永磁副励磁机，也是一台小型同步发电机，采取永磁式转子，其定子为三相绕组，发出 400~500Hz 的交流电流经可控整流柜整流后，供主励磁机转子励磁。这就是所谓三机同轴励磁系统。

有些 300MW 汽轮发电机组，例如 QFSN-300-2 型机组（运行于汉川电厂），采用了无刷励磁方式。其主励磁机的三相电枢绕组绕在转子上，三相交流出线直接顺转轴引向轴上的旋转二极管，整流直流后又沿轴送到主发电机转子励磁绕组，在总体上看仍然是三机同轴运行。

就主发电机本体而言，其最基本的组成部件是定子和转子，见图 1-1-2。定子主要由定子

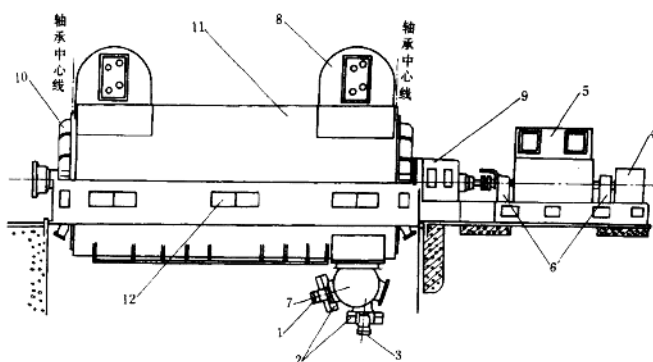


图 1-1-1 QFSN-300-2 型汽轮发电机组侧视图

1—X、Y、Z 引出线；2—电流互感器；3—A、B、C 引出线；4—永磁励磁机；5—主励磁机；6—励磁机轴承；7—出线盒；8—汽体冷却器；9—碳刷架隔音罩；10—端盖；11—机壳；12—测温引线盒

铁心 1 和电枢绕组 2 构成，由于在正常运行状态，尤其是故障短路状态下，定子受有很大的力矩，故必须用机座 3 将其固定。在机座壁与铁心段之间有隔振结构，以减少倍频振动。

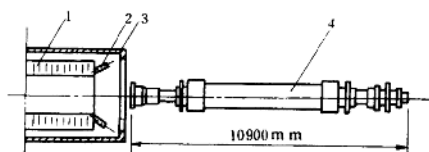


图 1-1-2 QFSN-300-2 型发电机主要部件

1—定子铁心；2—定子绕组端部；3—机座；4—转子

转子 4 正常运行时是插在定子铁心段中的，只有检修时才抽出来，因而在运行现场留有抽转子的空地，其长度大于 10.9m。当转子上的励磁绕组流过励磁电流，且以额定转速旋转时，就会在气隙中产生正弦分布的旋转磁场，作用定子绕组上，使其产生正弦电势。

当定子绕组带上负荷后，负荷电流又会产生一同步旋转的反作用磁场作用于转子，通过这一作用与反作用便将能量从转子传递到定子。

同步发电机运行时，由于效率只有 98.5% 左右，还有在绝对数值上可观的部分能量变成热量损耗在机内，使电机温度升高。要把这部分热量排出去，300MW 汽轮发电机内设有一套水循环系统和一套氢循环系统。

为了轴与轴承的润滑，为了将氢气密封在机内而不外泄，还有一套复杂的油循环系统。

为了监视运转中发电机各重要部分的温度，机内埋设了一套完备的测温系统，图 1-1-1 中的 12 便是测温用的引线盒。

在发电机本体醒目的地方设有铭牌。铭牌上标有发电机的最重要的参数，这些参数是设计和运行中的依据。一般有额定的功率、电压、电流、功率因数、转速、氢压、励磁电压、励磁电流、连接方式、效率等。进口和我国国产 300MW 汽轮发电机主要铭牌参数列于表 1-1-4 和表 1-1-5。其中额定有功功率 P (MW)、额定电压 U (kV)、额定电流 I (kA) 以及额定功

率因数的关系是

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi \quad (1-1-3)$$

额定转速 n (r/min)、电网额定频率 f (Hz) 和同步发电机的磁极对数 P_1 之间的关系是

$$n = \frac{60f}{P_1} \quad (1-1-4)$$

通常汽轮发电机的额定转速 n 为 3000r/min, 因而当 f 为 50Hz 时 P_1 则为 1 对。

式 (1-1-3) 表明, 由于绕组电流受到导线截面和冷却方式的限制, 当额定功率增长时, 额定电压应该随之增长, 两者之间应有最优的关系。我国国家标准和原水利电力部对 300MW 汽轮发电机的额定电压分别规定为 18~20kV 和 20~24kV, 见表 1-1-6。目前三大厂生产的 QFSN-300-2 型汽轮发电机均采用 20kV, 但东方电机厂早期产品 QFSN-300-2-18 型和上海电机厂的 QFS-300-2 型双水内冷汽轮发电机的额定电压只有 18kV, 显然这个电压偏低, 目前这两型产品的额定电压均拟提高为 20kV。

表 1-1-6 国产 300MW 汽轮发电机的额定电压 (kV)

国家标准 GB 7064—86 GB 755—87	原水利电力部的要求 (83) 水电技 字 37 号文	上海、东方、哈尔滨 电机厂产 QFSN-300-2 型	东 方 QFSN-300-2-18 型	上 海 QFS-300-2 型
18 或 20	20~24	20	18	18

第四节 机座及附属部件

一、机座

机座主要用于支撑和固定定子铁心和定子绕组。300MW 汽轮发电机通常采用端盖式轴承, 机座还要承受转子重量。除此之外, 在结构形状上还要满足发电机的散热、通风和密封

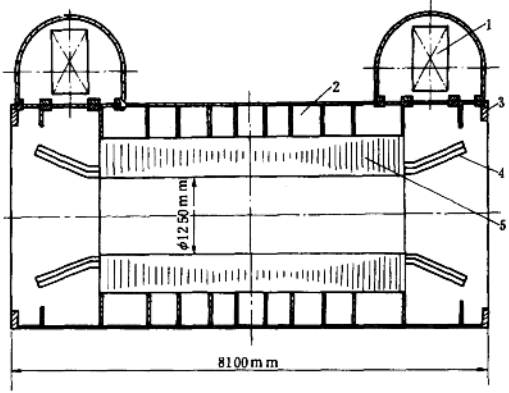


图 1-1-3 机座及氢冷却器安装图

1—氢气冷却器; 2—风室; 3—机座; 4—定子绕组; 5—定子铁心

要求。

上海电机厂和哈尔滨电机厂的 300MW 汽轮发电机机座均采用不可拆卸的整体结构,用优质碳素结构钢板按需要形状滚弯并焊接而成。除外壳和两端端板外,其内部共有 12 道环板将定子内空隔成许多风室,所有焊缝均为气密焊缝。图 1-1-3 表示出机座 3、定子铁心 5 与氢气冷却器 1 的安装情况,机座连同铁心(不包括氢气冷却器)总重约 197t,外径 3.8m,运输长度 8.1m,它是汽轮发电机部件中最重、最大的。其尺寸和重量主要受火车运输条件的限制。

机壳和铁心外圆背部之间的空间属发电机通风系统的部分,为轴向分段式通风。在结构上用横隔板将机壳和铁心背部之间的空间沿轴向分成九段,形成了 9 个环形小风室,各风室相互交替地分为进风区和出风区,各进风区之间和出风区之间分别用椭圆形钢管连通,其中偶数段为进风区,奇数段为出风区,即形成所谓“四进五出”的通风系统。

机座下面的底座上装有氢气和中介介质二氧化碳气体的进出管道。底座励磁机端(以下简称励端)装有出线盒,它是用反磁钢板焊接而成的。

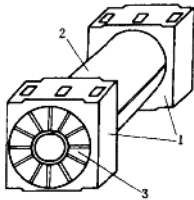


图 1-1-4 QFSN-300-2
型汽轮发电机三段式机座
1—端罩; 2—机座; 3—端盖

为了保证机座连同端盖、出线盒、出线套管、氢气冷却器等的气密性,出厂前在不插入转子状态下,要进行额定氢压下的气密试验,以保证所有接合面的良好气密性。

为了减轻定子机座的质量和尺寸,东方电机厂生产的 QFSN-300-2 型机采用了三段式机座。即沿轴向将机座分为三段,中间段为机座主体,呈圆筒形,用以支承铁心;两端部分称为端罩,呈方盒形,用以设置氢气冷却器并支承端盖轴承,如图 1-1-4 所示。三段机座在制造厂制造完之后,分段运输至运行电厂再组装成一体,其间再采用机械联接并设置橡皮圈密封及适当的焊缝密封,以保证机座的气密性。

表 1-1-7 列出了两种国产 300MW 汽轮发电机定子尺寸及质量,由表可见双水内冷机组由于冷却介质的改善,其尺寸与质量均较小。

表 1-1-7 两种国产 300MW 汽轮发电机定子数据

机 型	机座外径 (mm)	机座长 (mm)	定子外径 (mm)	定子内径 (mm)	定子铁心长 (mm)	定子质量 (t)
QFS-300-2 型	3300	5470	2400	1260	5420	157
QFSN-300-2 型	3800	8100	2540	1250	5200	197

二、氢气冷却器

冷却氢气用的氢气冷却器的示意图如图 1-1-5 所示。它是四组中的一组,由许多铜管组成,铜管的两头穿在管板的孔内,用胀管器胀接在管板上,管板与外面的盖子形成水室,铜管内通冷却水。为了防止水中污泥淤积而阻塞铜管,进水口处装有滤网。氢气在铜管外面通过,把热量传给铜管,再传给冷却水。为了增加冷却表面面积,用薄铜片做成翅片焊在铜管的外表面。管内工作水压为 0.25MPa,冷却水进水温度不超过 33℃,冷却后氢气温度不超过 40℃。

至于氢气冷却器在机座上的布置不同产品不同,QFSN-300-2 型汽轮发电机采用机座背包装。这一布置方式可减小机座的运输质量和尺寸,到发电厂现场才组装在机座上。两组冷却器分别安装在发电机的汽、励端机座之顶部(参见图 1-1-3),每一组又分成两个单元,沿