

西安电力高等专科学校 编  
大唐韩城第二发电有限责任公司



# 600MW火电机组培训教材

## 电气分册



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# 600MW 火电机组培训教材

## 电气分册

---

---

西安电力高等专科学校 编  
大唐韩城第二发电有限责任公司



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内容提要

本套《600MW 火电机组培训教材》是由西安电力高等专科学校和大唐韩城第二发电有限责任公司联合组织编写的。本分册是《电气分册》，全书分为 20 章，分别为：600MW 汽轮发电机结构和冷却系统，汽轮发电机的正常运行，汽轮发电机的非正常运行，电力变压器，电气主接线，厂用电系统，发电厂开关设备，配电装置及运行，发电厂的防雷及过电压，发电机保护，变压器保护，厂用电系统保护，线路及母线保护，励磁系统，发电机的同期系统，厂用电源的快速切换装置，其他安全自动装置，断路器及隔离开关的控制，发电厂的控制，发电厂运动及调度自动化系统。

本套教材以大唐韩城第二发电有限责任公司 600MW 机组的设备和控制系统为主，结合国内 600MW 机组的情况，以实用为出发点，突出 600MW 机组的设备、系统特点，注重基本理论与实践的结合，注重知识的深度与广度的结合，注重专业知识与操作技能的结合，可以作为 600MW 机组运行、检修人员、技术和管理人员的培训教材，还可以作为相关专业大、中专院校的教材和教学参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

600MW 火电机组培训教材. 电气分册/西安电力高等专科学校, 大唐韩城第二发电有限责任公司编. —北京: 中国电力出版社, 2006

ISBN 7-5083-4137-6

I. 6... II. ①西... ②大... III. ①火力发电—发电机—机组—技术培训—教材②火电厂—电气设备—技术培训—教材 IV. TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 012836 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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2006 年 5 月第一版 2006 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22.75 印张 554 千字

印数 0001—3500 册 定价 42.00 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)

# 《600MW 火电机组培训教材》

## 编委会

主任：张明 王元春

副主任：李新民 解建宝 张宝瑞 蔺昌宇 齐强

委员：孙文杰 冯宏涛 孙朝阳 何方 宁海琪

杨升军 刘佩芬 张建丁 赵丽 付妍玉

赵胜林 贾品丽 党争奎 穆顺勇 梁振武

杨曙光 田风 王军峰 王崇军

丛书主编：解建宝 蔺昌宇

丛书主审：李新民 齐强 宁海琪

### 《电气分册》

主 编：刘佩芬

主 审：董柏林 浦文宗

参 编：徐益敏 张蕊 朱雅清 崔君立

董榕 林创利 朱芸 王艳

陈延枫 王丽

# 前 言

随着我国经济的快速发展，高参数、大容量、低能耗、小污染、高自动化程度的600MW机组将逐渐成为主力机组，近几年来，有一大批600MW机组相继投产，通过培训提高生产人员和技术人员的技术水平是确保机组安全、经济、可靠运行的基础。本套培训教材由西安电力高等专科学校和大唐韩城第二发电有限责任公司联合组织编写。本套教材共分为《锅炉分册》、《汽轮机分册》、《电气分册》、《仪控分册》、《集控分册》、《辅助系统分册》六个分册。

本套教材在西安电力高等专科学校张明教授和大唐韩城第二发电有限责任公司王元春高级工程师为主任的编委会的精心组织下，用两年多的时间，由具有丰富的大机组培训教学经验的教师和具有丰富生产实际经验的工程技术人员共同完成。内容以大唐韩城第二发电有限责任公司600MW机组的设备和控制系统为主，并结合国内600MW机组的情况，以实用为出发点，突出600MW机组的设备、系统特点，注重基本理论与实践的结合、注重知识的深度与广度的结合、注重专业知识与操作技能的结合，可以作为600MW机组运行、检修人员、技术和管理人员的培训教材，还可以作为相关专业大、中专院校的教材和教学参考书。

《电气分册》为本套教材的一个分册。本分册分为四篇，主要讲述大型汽轮发电机的结构、原理与运行，大型变压器主要结构部件的性能与运行，发电厂电气一次系统的构成和运行原理，高压开关电器的原理和性能，配电装置的组成，发电厂的防雷与过电压保护，发电厂电气设备的继电保护，600MW汽轮发电机的励磁控制系统，大型发电机的同期系统，厂用电系统及其快速切换、直流系统、不停电电源以及开关电器的自动控制，电厂的安全自动装置、发电厂远动及调度自动化等内容，选材力求突出600MW机组及相关电气系统和电气设备的特点，注重新设备、新技术的应用，如微机继电保护装置、微机同期装置、微机快切装置、微机故障录波、发电厂网络控制系统NCS及电气纳入DCS控制等内容。

本分册由西安电力高等专科学校刘佩芬担任主编，参加本册编写的人员有：徐益敏（第一、二、三章），张蕊（第四章），朱雅清（第四章），崔君立（第五章），董榕（第六章），林创利（第七、八章），朱芸（第九章），王艳（第十三章），陈延枫（第十、十一、十二章），王丽（第十四、十七章），刘佩芬（第十五、十六、十八、十九、二十章）。

本分册由西北电力设计院董柏林教授级高工、浦文宗教授级高工负责主审，西安电力高等专科学校解建宝副教授、齐强高级工程师参与审稿，韩城第二发电厂张建丁高级工程师、赵丽工程师参与会审，由编审委员会集体定稿。

本分册部分插图及部分图文校对工作由李宏、董榕完成。韩城第二发电厂延晓霞、许建常、王永文等同志提出了修改意见，并提供资料和支持帮助，在此一并致谢。

由于水平和条件所限，书中疏漏在所难免，敬请读者指正。

编 者

2005年12月于西安

# 目 录

## 前 言

## 第一篇 发电机和变压器

### 第一章 600MW 汽轮发电机结构及冷却系统 ..... 1

- 第一节 600MW 汽轮发电机组简况及性能概述 ..... 1
- 第二节 600MW 汽轮发电机的基本结构 ..... 6
- 第三节 发电机的冷却方式及冷却系统 ..... 15
- 第四节 发电机的密封油系统 ..... 18
- 第五节 发电机的中性点接地方式 ..... 20

### 第二章 汽轮发电机的正常运行 ..... 22

- 第一节 发电机并联投入 ..... 22
- 第二节 发电机的稳态功率角特性与稳定概念 ..... 24
- 第三节 发电机并联后负荷的调节 ..... 27
- 第四节 600MW 汽轮发电机安全运行极限和  $P-Q$  曲线 ..... 29
- 第五节 600MW 发电机在额定工况下的运行与允许温度 ..... 30
- 第六节 运行参数不同于额定参数时发电机的运行 ..... 32

### 第三章 汽轮发电机的非正常运行 ..... 35

- 第一节 汽轮发电机进相运行 ..... 35
- 第二节 汽轮发电机的不对称运行 ..... 36
- 第三节 汽轮发电机的失磁运行 ..... 37
- 第四节 发电机短时过负荷运行 ..... 41

### 第四章 电力变压器 ..... 42

- 第一节 变压器的主要结构部件 ..... 42
- 第二节 变压器的技术数据 ..... 48
- 第三节 变压器的冷却系统 ..... 53
- 第四节 分裂绕组变压器 ..... 57
- 第五节 变压器的分接调压开关 ..... 59
- 第六节 变压器的允许运行方式 ..... 63

## 第二篇 电气设备

<b>第五章 电气主接线</b> .....	67
第一节 大电流封闭母线 .....	67
第二节 大型电厂的电气一次接线 .....	69
<b>第六章 厂用电系统</b> .....	76
第一节 厂用电接线 .....	76
第二节 厂用电系统的中性点接地方式 .....	86
第三节 直流系统 .....	91
第四节 厂用事故保安电源和不停电交流电源 .....	98
<b>第七章 发电厂开关设备</b> .....	104
第一节 高压断路器基本知识.....	104
第二节 SF <sub>6</sub> 断路器 .....	106
第三节 真空断路器.....	113
第四节 隔离开关.....	115
第五节 互感器.....	118
第六节 并联电抗器.....	127
第七节 电力电缆.....	130
第八节 低压开关.....	133
<b>第八章 配电装置及运行</b> .....	136
第一节 概述.....	136
第二节 屋内配电装置.....	138
第三节 屋外配电装置.....	139
第四节 成套配电装置.....	143
<b>第九章 发电厂的防雷及过电压</b> .....	154
第一节 发电厂及变电所的防雷.....	154
第二节 电力系统过电压.....	161
第三节 电力系统操作过电压.....	162
第四节 电力系统谐振过电压.....	166

## 第三篇 继电保护

<b>第十章 发电机保护</b> .....	169
第一节 概述 .....	169
第二节 发电机的纵差动保护 .....	171
第三节 发电机定子绕组单相接地保护 .....	173
第四节 低励失磁保护 .....	175
第五节 励磁回路接地保护 .....	177
第六节 反时限负序电流保护及相间后备保护 .....	178
第七节 发电机其他保护 .....	179
<b>第十一章 变压器保护</b> .....	187
第一节 概述 .....	187
第二节 变压器差动保护 .....	188
第三节 变压器非电量保护 .....	193
第四节 变压器零序保护 .....	194
第五节 变压器其他保护 .....	196
第六节 并联电抗器保护 .....	196
第七节 高压厂用变压器的保护 .....	201
第八节 600MW 发电机变压器组继电保护配置举例 .....	202
<b>第十二章 厂用电系统保护</b> .....	206
第一节 低压厂用变压器的保护 .....	206
第二节 高压启动/备用变压器保护 .....	207
第三节 高压电动机保护 .....	208
第四节 柴油发电机保护 .....	209
<b>第十三章 线路及母线保护</b> .....	210
第一节 330~500kV 电力网线路保护配置原则 .....	210
第二节 输电线路保护的工作原理 .....	211
第三节 反应故障分量的线路保护 .....	220
第四节 输电线路的自动重合闸 .....	226
第五节 成套线路保护装置 .....	228
第六节 母线保护和断路器失灵保护 .....	231



## 第四篇 电气自动控制及装置

<b>第十四章 励磁系统</b> .....	239
第一节 概述 .....	239
第二节 励磁系统的励磁方式 .....	244
第三节 硅整流装置 .....	245
第四节 励磁系统的灭磁方式 .....	249
第五节 自动励磁调节器 .....	251
第六节 典型微机型励磁控制系统 .....	256
<b>第十五章 发电机的同期系统</b> .....	265
第一节 同期系统综述 .....	265
第二节 准同期条件及分类 .....	265
第三节 同期点的选择及同期电压的引入方式 .....	266
第四节 微机型自动准同期装置 .....	275
<b>第十六章 厂用电源的快速切换装置</b> .....	285
第一节 概述 .....	285
第二节 厂用电源切换原理分析 .....	286
第三节 厂用电快速切换装置基本功能 .....	291
第四节 快速切换装置举例 .....	292
<b>第十七章 其他安全自动装置</b> .....	298
第一节 电力系统稳定控制装置 .....	298
第二节 频率电压紧急控制装置 .....	300
第三节 故障录波装置 .....	302
<b>第十八章 断路器及隔离开关的控制</b> .....	306
第一节 断路器的控制 .....	306
第二节 隔离开关的控制和安全操作闭锁 .....	321
<b>第十九章 发电厂的控制</b> .....	327
第一节 发电厂的控制方式 .....	327
第二节 发电厂的分散控制系统 .....	329
第三节 发电厂的网络微机监控系统 .....	335

<b>第二十章 发电厂远动及调度自动化系统</b> .....	338
<b>第一节 发电厂运行与电网调度中心的关系</b> .....	338
<b>第二节 电网的分层调度和管理</b> .....	339
<b>第三节 电网调度自动化系统功能简介</b> .....	340
<b>第四节 远程终端单元 (RTU)</b> .....	341
<b>第五节 电力系统自动化的发展及展望</b> .....	345
<b>附录 VD4 真空断路器手车接线图</b> .....	351
<b>参考文献</b> .....	352

# 第一篇 发电机和变压器

## 第一章 600MW 汽轮发电机结构及冷却系统

### 第一节

#### 600MW 汽轮发电机组简况及性能概述

随着经济建设的持续增长,我国的电力工业也有了长足发展。1985年12月30日内蒙古元宝山电厂600MW机组的投入运行,标志着我国已跨入了发展600MW级汽轮发电机组的新时期。

600MW级汽轮发电机组属大容量、高参数、高效率、低污染的机组。大多数工业发达国家将该机组作为火力发电主力机组。我国在发展大容量机组方面,走的是引进国外先进技术并消化吸收以形成自己的优化型机组的道路。经过近20年的发展,我国电网中已投入运行、在建和规划建设的600MW汽轮发电机组已为数不少。600MW汽轮发电机组正在成为我国电网的主力机组。

现列举部分600MW汽轮发电机技术数据于表1-1-1,并分别介绍它们的主要性能及结构特点。

表 1-1-1 部分 600MW 汽轮发电机的主要技术数据

项 目	元宝山电厂 2号机组	平圩电厂 1、2号机组	石洞口二厂 1、2号机组	哈尔滨三厂 3、4号机组	邹县电厂 5、6号机组	韩城第二发电厂 1、2号机组
生产厂家	阿尔斯通	哈电(考核)	ABB、上电	哈电(优化)	日立、东电	日本东芝
额定容量 (MW/ MVA)	600/667	600/666.67	600/667	600/666.67	655.2/728	668.52/742.8
额定电压 (kV)	20	20	24	20	22	20
额定电流 (A)	19245	19245	16038	19245	19105	21443
额定频率 (Hz)	50	50	50	50	50	50
额定转速 (r/min)	3000	3000	3000	3000	3000	3000
额定功率因数	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
相数	3	3	3	3	3	3
定子绕组接线	YY	YY	YY	YY	YY	YY
定子绕组冷却方式	水内冷	水内冷	水内冷	水内冷	水内冷	水内冷
转子绕组冷却方式	氢内冷	氢内冷	氢内冷	氢内冷	氢内冷	氢内冷
定子铁芯冷却方式	氢冷	氢冷	氢冷	氢冷	氢冷	氢冷
氢气压力 (MPa)	0.39	0.517	0.46	0.4	0.414	0.412
同步电抗 $X_d$ (%)	209.8	208.58	203.0	215.56	188.7	186.1
瞬变电抗 $X'_d$ (%)	32.1	25.90	29.0	26.5	22.10	30.4

续表

项 目	元宝山电厂 2号机组	平圩电厂 1、2号机组	石洞口二厂 1、2号机组	哈尔滨三厂 3、4号机组	邹县电厂 5、6号机组	韩城第二发电厂 1、2号机组
超瞬变电抗 $X_d''$ (%)	22.3	23.67	19.0	20.5	20.06	24.0
稳态 $I^2$ (%)	10	8	8	8	8	8
暂态 $I_2^2 t$ (s)	10	10	10	8	10 ( $t \leq 120s$ )	10
定子中性点接地方式	经配电变压器 高电阻接地	经 400/100V 变 压器高电阻接地	经配电变压器 高电阻接地			经 11.55/0.22kV 变压器接地
效率 (%)	98.94	98.67	98.91	98.94	98.8	98.88
短路比	0.5139	0.602	0.5	0.542	$\geq 0.5$	0.537
静过载能力		1.64		1.71	1.622	
定子绕组绝缘等级	F 级	B 级	F 级	B 级	F 级	F 级
转子绕组绝缘等级	F 级	B 级	F 级	B 级	B 级	F 级
铁芯冲片绝缘等级		B 级		B 级	F 级	
定子绕组温升 (°C)	<65	27	60	27	$\leq 85$	54
定子铁芯温升 (°C)	<65	32	60	27.8	$\leq 120$	
转子绕组温升 (最 高/平均) (°C)	<75/ /	71/ /	$\leq 60$	53.8/40.4	115	64
励磁损耗 (kW)		2948		2040	1860.3	1281
机械损耗 (kW)		1961		1298	117.2	1018
总损耗 (kW)		8053		6421	7272.2	5330
励磁方式		无刷	自并励	无刷	静止可控硅	全静态自并励
额定励磁电压 (V)	592	477.5	490	429	367	520
额定励磁电流 (A)	2963	5898	5100	4202	4393	5240
空载励磁电压 (V)		133.7		144.2	148	142
空载励磁电流 (A)		2147	1786	1480	1748	1717
顶值电压倍数	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
强励时间 (s)		<10		<10	10	$\leq 10$
通风形式	—	轴向通风	轴向通风	气隙取气	气隙取气	气隙取气
风扇形式/数量		5级轴流高压		单级轴流/2	轴流/2	单级轴流/2
定子机座特点		整体机座		整体机座	内外机座	内外机座
冷却布置方式		立式(在汽端)		背包式	立式	
隔振方式		切向弹性板		切向弹性板	切向弹性板	
定子槽数		42		42	42	42
转子槽数		32		32	32	32
油密封形式		双流环式		双流环式	单流环式	单流环式

### 一、元宝山电厂 2 号机组

内蒙古元宝山电厂 2 号 600MW 发电机组于 1985 年 11 月首次并网发电，是在我国运行的第一台 600MW 汽轮发电机组。

元宝山电厂 2 号机为法国阿尔斯通公司的产品, 该机采用水氢氢冷却方式, 即定子绕组水冷、转子绕组氢内冷、定子铁芯氢冷。

定子铁芯采用高导磁低损耗的硅钢片叠装制成。定子铁芯硅钢片外沿开有燕尾槽, 通过定位筋叠装固定在定子机座内。定子铁芯使用无磁性整体压圈, 铁芯端部装有电屏蔽和磁屏蔽结构, 以防止轴向磁通导致端部过热。

定子绕组主绝缘为多胶型, 绝缘等级为 F 级。定子槽楔下使用弹性绝缘波纹板进行径向固定, 以防止槽楔松动。定子线棒侧面与槽壁之间, 配垫半导体垫条, 以降低槽壁与线棒之间的电位差。定子绕组端部固定结构比较简单, 制造时施工容易, 运行中通风效果也较好。

转子绕组绝缘等级为 F 级, 采用径向交叉冷却方式, 在转子两端各装一只轴流式风扇。转子采用较完善的阻尼结构, 发电机具有承受一定负序电流的能力。

发电机采用同轴交流励磁机静止半导体整流的自并励系统。

## 二、平圩电厂 1、2 号机组

平圩电厂 1、2 号机分别于 1989 年和 1992 年投入运营。1、2 号 600MW 汽轮发电机是哈尔滨电机有限责任公司引进美国西屋公司技术制造的考核型汽轮发电机。1 号机的定子铁芯冲片、定子绕组、转子绕组等大部分零部件从西屋公司购进; 2 号机仅部分原材料和零部件从西屋公司采购, 从而将国产化率提高到 73%。

1、2 号发电机采用水氢氢冷却方式。定子机座采用整体结构, 氢气冷却器安装在定子机座汽轮机端的两侧。

定子铁芯冲片上冲有通风孔, 叠装后构成定子铁芯轴向氢气冷却通风道。铁芯冲片涂刷耐高温的磷酸铝无机绝缘漆 (耐热温度 700℃)。铁芯两端使用无磁性铸钢齿连接片。齿压板外侧装有用硅钢冲片叠装制成的磁屏蔽。磁屏蔽内圆侧为阶梯状多齿表面, 能有效地分导定子端部轴向漏磁通, 避免铁芯过热。磁屏蔽外侧使用无磁性分块小连接片。分块小连接片沿径向也分为两块, 外径侧用黄铜制成, 内侧用紫铜制成。分块小连接片构成电屏蔽, 同时也起阻止漏磁通的作用。定子铁芯用分块小连接片和无磁性穿心绝缘螺栓压紧。

定子铁芯与机座之间采用立式弹簧板隔振结构, 可以使定子铁芯的倍频振动传给机座和基础的份量降到很小。

定子绕组导线由空心铜线和实心股线组成, 一根空心铜线搭配两根实心股线, 分成 4 排, 槽部进行 540°换位。上层绕组导线的高度尺寸比下层大, 这样可以有效地减少附加损耗。定子绕组槽部固定使用高强度 F 级玻璃布卷制模压成型槽楔, 楔下垫弹性绝缘波纹板, 上下层线棒之间及槽底垫热固性适形材料, 线棒侧面与槽壁之间配垫半导体垫条。定子绕组端部采用刚性固定结构, 径向和切向的刚性好, 轴向可自由伸缩, 能有效地减少定子绕组端部绝缘应力。

转子采用梯形半开口槽。靠近大齿的两槽不等距分布, 以减少损耗和改善磁场波形。大齿上加工有若干等节距的横向圆弧槽, 以平衡转轴刚度。转子本体两端大齿上还有供转子绕组端部出风的轴向通风槽。

转子绕组导线由两根凹形铜线对合构成, 各匝导线的几何尺寸不相同, 但截面积却相等。导线槽内中部冲有通风孔, 导线端部有进出风孔。

转子槽楔用铍青铜 (端部槽楔) 与冷拉无磁不锈钢 (中部槽楔) 制成。槽楔下的导电铜

排与端部铍青铜槽楔构成阻尼绕组，以提高发电机承受不对称负荷的能力。

发电机采用逆流式轴向通风系统，端盖式轴承，双流环式油密封，且使用旋转半导体无刷励磁系统，提高了机组运行的稳定性。

该厂 1、2 号考核型 600MW 汽轮发电机总体上技术领先，但由于它们是从原设计频率 60Hz（转速 3600r/min）的发电机转化过来的，故对我国频率 50Hz（转速 3000r/min）系统来说，虽然机械可靠性裕量更高（提高 1.44 倍），但也存在一些不利影响，如转子绕组最高温度已达到设计值，出力没有裕度且效率偏低（98.67%）。

### 三、石洞口二厂 1、2 号机组

石洞口第二发电厂是我国第一座安装超临界汽轮发电机组的电厂。1、2 号机组分别于 1992 年 6 月和 1992 年 12 月投入运行。

石洞口二厂是我国超临界汽轮发电机组示范电厂。一期工程安装的 2 台 600MW 超临界机组的发电机由瑞士 BBC 公司提供，其中 2 号机组的定子部分由上海电机厂制造。

发电机采用水氢氢冷却方式。且采用顺流式轴向通风方式，装有高压风扇，风摩损耗较大。发电机使用较完善的阻尼结构，具有承受一定负序电流的能力。定子机座与定子铁芯之间采用组合式弹性定位筋隔振结构。

定子铁芯采用高导磁低损耗的硅钢片叠装制成，铁芯端部装有电磁屏蔽结构，铁芯用无磁性分块小连接片和无磁性绝缘螺栓压紧。

定子绕组采用少胶粉云母绝缘。定子线棒槽楔下用弹性绝缘波纹板进行径向固定，线棒侧面与槽壁之间填满半导体垫条。定子绕组端部固定结构简单合理。

发电机励磁系统采用自并励静止励磁方式。励磁电流由接在发电机端的  $3 \times 2400\text{kVA}$  励磁变压器和晶闸管功率柜提供，励磁电压为 490V，励磁电流为 5100A，强励顶值倍数为 2 倍。

发电机装有两台数字式自动电压调节器，一台工作，另一台自动跟踪备用，可以实现自动切换。该调节器具有励磁变差动保护、滑环短路保护和转子过电压等保护功能，还可实现自动无功调节和功率因数调节。

### 四、哈尔滨三厂 3、4 号机组

哈尔滨第三发电厂二期工程安装的 3、4 号机组，是哈尔滨电机有限责任公司在引进美国西屋公司技术，进行优化设计后制成的优化型 600MW 汽轮发电机。其中 3 号机组是国内首台优化型 600MW 汽轮发电机，于 1996 年投入运行。

两台发电机均采用水氢氢冷却方式。氢气冷却器设置在定子机座两端顶部，即采用背包式结构。定子机座内的辐向隔板、轴向筋板和轴向通风钢管构成的骨架，使定子机座具有足够的刚度和强度。定子铁芯本体段的辐向隔板和轴向通风钢管分别构成若干个风区。冷却氢气通过轴向通风钢管被直接从端部送到各冷风区，以确保各风区的风量相等。

定子铁芯用 0.5mm 厚的高导磁率、低损耗的扇形硅钢片叠装制成。定子铁芯采用径向多路通风冷却结构，分为若干个风区，设置多个间隙为 6mm 的径向通风道。定子铁芯采用以定位螺杆、穿心绝缘螺杆和分块压板轴向压紧的紧固结构。定子铁芯与定子机座之间，采用铁芯夹紧环和立式弹簧板隔振结构。

定子绕组导线由外包聚脂玻璃丝绝缘的空心铜线和实心股线按 1:2 的组合比制成，分成 4 排，直线部位进行  $540^\circ$  罗贝尔换位，既能抵消相间循环电流引起的附加损耗，还能减少端部横向磁场差异引起的附加损耗。

定子绕组端部采用美国西屋公司技术成熟的刚柔性绑扎固定结构, 径向和切向刚性好, 轴向可以自由伸缩, 运行温度发生变化时, 还能有效地减少绕组中产生的机械应力。定子绕组端部的紧固零部件均用高强度绝缘材料制成, 可以有效地防止绕组端部发生放电现象。

转轴使用高强度合金钢整体锻件加工制成。转子采用开口槽。为了削弱磁极中心部位的磁通, 增加了大齿两边两小齿的宽度, 并减少了 1 号槽的深度。此外, 大齿上还开有若干个横向槽, 以均衡转子 X 轴向和 Y 轴向的刚度。

转子绕组用冷拉含银铜线制成, 铜线上铣有通风孔, 每匝导线由两根铜线组成。转子绕组采用径向多路气隙取气斜流通风方式(此种方式我国已有丰富设计制造经验)。

### 五、邹县电厂 5、6 号机组

山东省邹县电厂 5、6 号机组两台 600MW 汽轮发电机是东方电机股份有限公司与日本日立公司合作设计、合作制造的产品。5 号机组以日立公司为主制造, 1996 年 12 月投入运行; 6 号机组以东方电机股份有限公司为主制造, 国产化率达 95%, 1997 年 11 月投入运行。

5、6 号发电机均采用水氢氢冷却方式, 转子采用气隙取气冷却结构。

定子机座采用内外机座结构, 便于运输。外机座为一防爆压力容器, 用优质锅炉钢板焊接而成。内机座为笼形框架结构, 由轴向环板和周向定位筋组成, 圆周方向分为 4 瓣, 铁芯装压后把紧, 以提高内定子的刚度。定子机座为立式切向弹簧板隔振结构, 即内机座用具有良好隔振性能的立式切向弹簧板支撑在外机座内, 以有效地减少定子铁芯倍频振动对外机座和发电机基础的影响。

定子铁芯用冷轧无方向性硅钢冲片叠装而成, 冲片两面刷有 F 级二氧化硅无机填料热固性绝缘漆。铁芯沿轴向设有许多径向通风道, 以保证铁芯具有良好的通风冷却效果。

定子绕组采用水内冷结构, 股线分成 4 排。5 号机组上下层线棒截面不同, 上层线棒由空心线和实心线按 1:1 的比例搭配组成, 下层线棒全为空心线, 且上下层线棒空心线规格不同; 6 号机组定子绕组总截面与 5 号机组基本相同, 但上下层截面一样, 且均由空心线和实心线按 1:1 的比例组成, 减少了空心线品种, 方便了生产, 且下层线棒中加入了实心线, 使线棒杂散损耗比 5 号机组小。为了减少附加损耗, 5 号机组槽部股线进行 45°换位, 6 号机组槽部股线进行 54°换位。

定子绕组端部固定采用轴向可伸缩的支撑结构。整个端部径向和周向为刚性固定, 而轴向则通过绝缘支架上的滑销自由伸缩, 从而可以提高发电机承受热变形和负荷变化的能力。

转轴用整体合金钢锻件制成, 转子联轴器、汽端风扇座环、汽端中心环均在转轴锻件上车出。转轴本体上有放置转子绕组的半梯形槽。大齿上开有横向月牙槽, 使转轴大齿、小齿两个方向的刚度基本相等, 从而可以减少倍频振动。

转子绕组使用高强度含银铜线, 具有良好的抗蠕变性能。

发电机采用静止晶闸管自并激励磁系统, 励磁电流来自机端励磁变压器, 经并列运行的晶闸管整流器整流。

### 六、韩城第二发电厂 1、2 号机组

韩城第二发电厂 2×600MW 汽轮发电机是由日本东芝公司设计制造的高效、全封闭、轴卧式、具有阻尼绕组且转子为隐极式的三相两极交流同步发电机。两台发电机的型号为 TAKS (三相、同步电机、具有阻尼绕组、静态励磁), 型式为 LCH (定子绕组水冷却、与

原动机直接耦合、隐极式转子)。

发电机采用水氢氢冷却方式,即定子绕组水内冷,转子绕组氢内冷,定子铁芯及其他结构件为氢气表面冷却。氢气冷却器置于发电机定子机座四个角,氢气利用装在转子两端护环外侧的单级轴流式风扇进行强制循环,转子采用“气隙取气、一斗两路、径向斜流”冷却方式,定子铁芯、转子绕组采用径向“六进七出”的多路通风结构,定、转子沿轴向共有十三个风区,通过两组(4台)氢冷器进行冷却。

发电机机座是圆筒型的、不漏气的焊接结构。机座两端的端盖也是不漏气的焊接结构并支持着发电机轴承和轴密封。轴密封用来防止氢气泄漏。

定子铁芯由冲压成扇形绝缘晶粒的硅钢片叠成。定子铁芯由定子机座里的弹性板支持以隔离铁芯振动。

定子绕组由安装在定子槽中的线棒连接组成。

转子由一个单独的合金钢锻件加工而成,转子风扇为轴流式风扇,安装在转子两端。

发电机采用静态晶闸管整流励磁系统,励磁电源取自机端励磁变压器,起励电源取自 DC 110V。励磁变压器提供的交流电流经整流后,通过滑环和电刷引入到转子上并通过导电杆直接提供给转子绕组。导电杆装于转轴中心孔中。

该发电机为连续运行工作方式,并具有承受负荷突变和三相短路的能力。发电机安装有自动补氢装置、带流量指示(当流量累积指示补氢量超限时报警)、氢气露点监测器(HDM)、温度检测及频率监视器(RFM)等多种监控仪器,以保证发电机运行在理想状态。

从汽轮发电机的结构特点及电磁特性来看,600MW 级汽轮发电机在技术上是一个分水岭。掌握 600MW 汽轮发电机技术结构特点,有助于提高 600MW 级汽轮发电机组的运行水平。

## 第二节

### 600MW 汽轮发电机的基本结构

韩城第二发电厂 1、2 号 600MW 汽轮发电机为三相交流隐极式同步发电机。发电机主要由定子、转子、油密封装置、冷却器及内部监测系统等部分组成。发电机是全密封结构,运行中使用氢气作为冷却介质。包括风扇和气体冷却器在内的通风装置系统是自带的和完全密封的,以防止脏物和潮气进入。

现将各主要结构部件分别介绍如下。

#### 一、定子部分

定子主要由机座、定子铁芯、定子绕组、端盖等部分组成。

##### (一) 机座与端盖

机座的作用主要是支撑和固定定子铁芯、定子绕组,同时也提供了冷却氢气通过发电机的多条循环路径。并且机座还承受电磁力矩和倍频的交变电磁力的作用,且采用端盖轴承,它还承受转子重量。因此,对机座强度和刚度有较高的要求。除此之外,600MW 水氢氢发电机,机壳内的额定氢压为 0.4~0.5MPa,机座还要求可靠的防爆能力和严密的密封,以防止漏氢和抵抗氢气的爆炸。韩城第二发电厂 1、2 号机组发电机的定子机座和轴承座为防爆型的。

韩城第二发电厂氢冷汽轮发电机的外机座是用高强度优质钢板滚弯而成的,机壳是圆筒



型不漏气的焊接结构。机壳内断面板给铁芯提供刚性的支持，以避免谐振。同时内部断面板在铁芯和封盖板之间提供了一系列的环形的空间，通过在断面板之间合理的设计孔和管，就可以得到这些区域要求的气体流量。机壳和定子铁芯背部之间的空间是电机通风（氢气）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。

端盖是电机密封的一个组成部分，为了安装、检修、拆装方便，端盖由水平分开的上下两半构成。大容量的发电机常采用端盖轴承，轴承装在高强度的端盖上。

端盖分为外端盖、内端盖和导风环（挡风圈）。内端盖和导风环与外端盖间构成风扇前、后的风路。

(二) 机座隔振（定子弹性支撑）

1. 铁芯的倍频振动

对大容量汽轮发电机来说，定子铁芯的振动会对机座和基础产生不良影响。发电机带负荷运行时，转子磁通经定子铁芯形成回路，对定子铁芯会产生径向磁拉力和切向磁拉力。任一点的磁拉力与所在点的磁通密度  $B$  平方成正比。两磁极中心线上磁拉力最大，极间磁拉力最小，定子铁芯会产生椭圆形形变。如图 1-1-1 为定子铁芯倍频振动时的椭圆形形变图。

定子铁芯振动可能有几方面原因：①气隙内各点磁通密度随转子旋转而改变，转子每旋转一周，铁芯的形变要交变两次，使得定子铁芯产生两倍于工频即 100Hz 的振动；②定子线棒因电流间的相互作用而产生振动，也会引起定子铁芯倍频振动；③三相突然短路时，定子铁芯还会出现扭转振动；④定子端部漏磁的轴向分量，也会引起铁芯产生轴向倍频振动；⑤由于定子铁芯各齿内磁导的不均匀，定子铁芯还会产生频率高于倍频的振动。

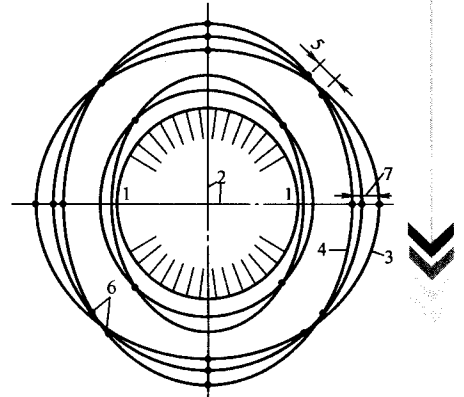


图 1-1-1 定子铁芯倍频振动时的椭圆形形变

- 1—转子磁极；2—磁极中心线；
- 3—极中心线在垂直位置时的形变；
- 4—极中心线在水平位置时的形变；
- 5—切向振动的倍频振幅；6—节点；
- 7—径向振动的倍频振幅

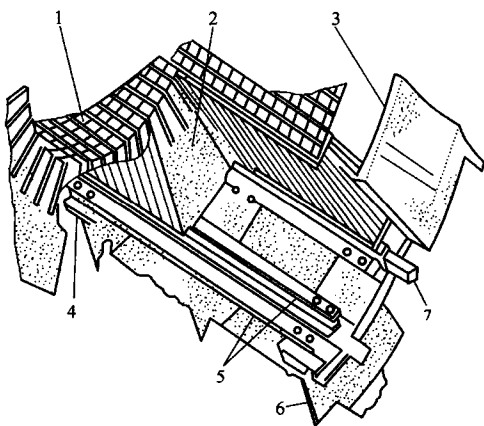


图 1-1-2 定子在弹性板上的装配  
1—径向通风槽；2—铁芯叠片；3—定子铁芯法兰；4—定位环；5—弹簧板；6—分段板；7—主棒（拉紧螺杆）

2. 弹性支撑

为了防止因定子铁芯振动而损害机座焊缝，以及因该振动传到机座引起厂房基础及其他设施发生共振的危险，定子铁芯和机座之间采用弹性连接的隔振结构，使定子铁芯与机座由轴向弹簧板连接，组成一个弹性系统，从而有效的隔离来自径向和切向的定子铁芯磁振动，使其不会影响到机座与基础上。

韩城第二发电厂汽轮发电机中所采用的弹性装配如图 1-1-2 所示。主要由纵向弹性板组成。电枢叠片安装在主棒（拉紧螺杆）上，并依次附加在弹性板上。弹性板用螺栓固定在机壳上并支持着铁芯沿其整个长度及周围安装。弹性板的弹性在建造时被限制在安全装配范围内，可以有效的隔离来自定子机壳铁芯的振动。