

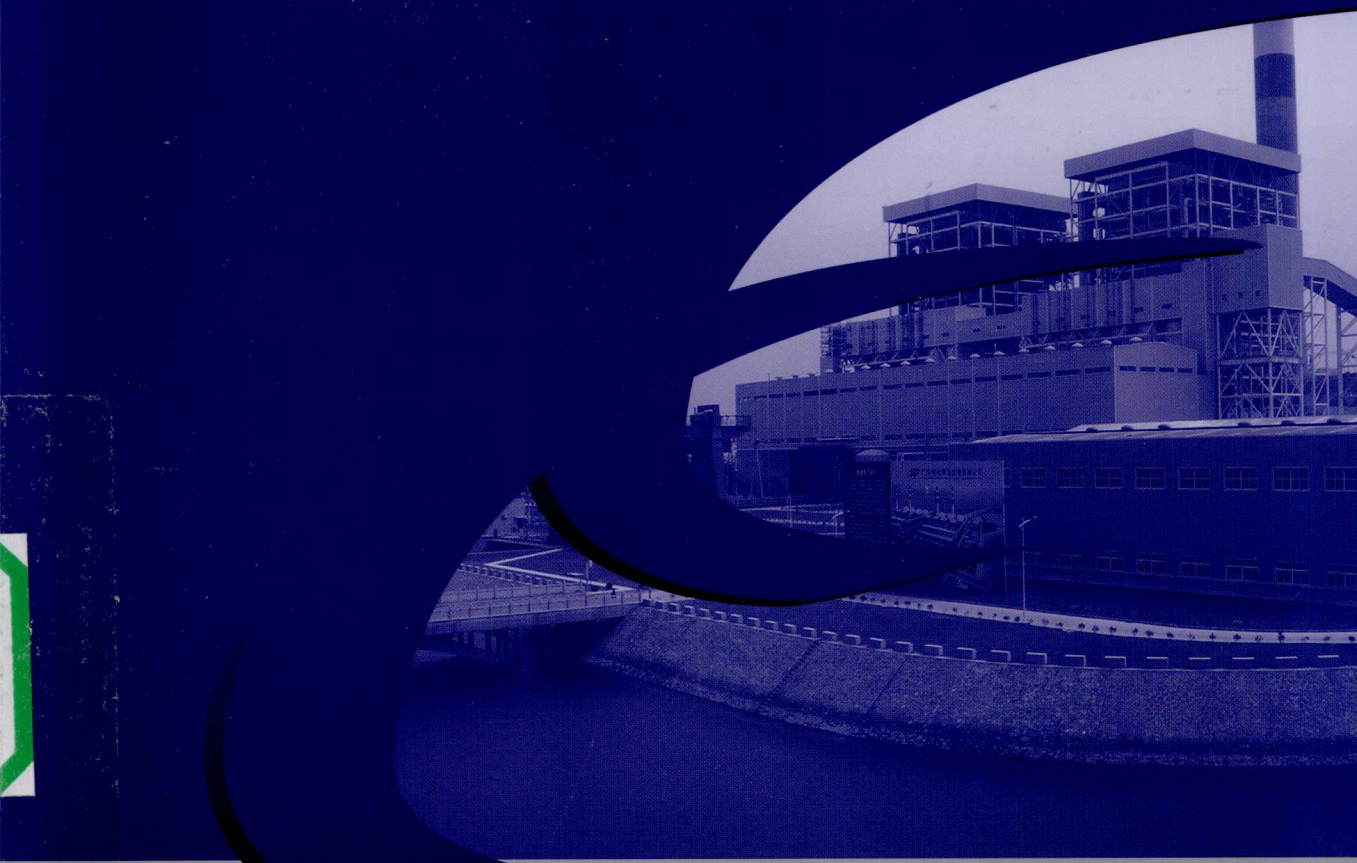


超超临界火力发电机组技术丛书


CHAOCHAO LINJIE HUOLI FADIANJIZU JISHU CONGSU

超超临界机组 电气设备及系统

毛慧和 主编



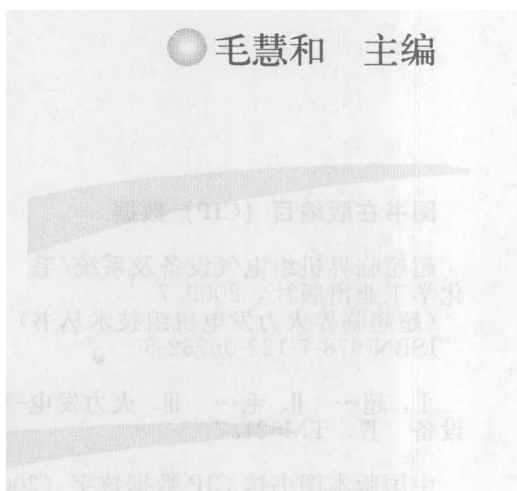
化学工业出版社


 **超超临界火力发电机组技术丛书**

超超临界机组

电气设备及系统

● **毛慧和 主编**



 **化学工业出版社**
· 北京 ·

本书是《超超临界火力发电机组技术丛书》的第三分册。全书详细介绍了我国引进型超超临界火力发电机组中电气设备及系统的基本型式、构造和发展。包括 1000MW 级汽轮发电机的技术要求、结构特点和性能、运行特性以及事故处理；两种典型 1000MW 级发电机励磁系统的原理及结构特点；电力变压器的结构、性能及维护；电气一次系统及设备、直流系统和微机保护系统以及自动装置的原理、结构、操作及维护。

本书适合从事国产超超临界火力发电机组设计、安装、调试、运行、检修及管理工作的有一定专业基础的工程技术人员阅读，或作为电厂生产人员的培训教材，也可供有关专业人员以及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

超超临界机组电气设备及系统/毛慧和主编. —北京: 化学工业出版社, 2009.7
(超超临界火力发电机组技术丛书)
ISBN 978-7-122-05752-5

I. 超… II. 毛… III. 火力发电-发电机-机组-电气设备 IV. TM621.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 086646 号

责任编辑: 郑宇印

文字编辑: 吴开亮

责任校对: 李林

装帧设计: 于兵

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印装: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 16% 字数 424 千字 插页 1 2009 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 49.00 元

版权所有 违者必究

前 言

全世界能源的日益紧张以及对环境保护要求的日益严格，促使火力发电机组采用更高参数、更大容量以获得更佳的效率，这也能更有效地减少对环境的污染。同时，新技术、新材料领域的成果也为高参数机组的制造和应用提供了条件。事实上，自从锅炉、汽轮机成为大规模火力发电的主要动力设备以来，其发电机组一直沿着不断提高蒸汽参数、增大单机功率、改进材料性能和制造工艺、提高自动化水平的方向发展。其经济性、安全性、可靠性、清洁性、灵活性以及自动化程度都在得到不断的改善。

火力发电机组采用超超临界技术是提高汽轮发电机组经济性的有效手段，与同容量亚临界和常规超临界火电机组比较，超超临界机组的效率有明显的提高。我国超临界和超超临界机组已经成为今后一个时期火力发电机组建设的重点，同时正在加快进行超临界和超超临界机组制造、运行中的关键技术研究。2006年11月和12月，华能玉环发电厂和华电国际邹县发电厂的1000MW超超临界发电机组分别建成投产，标志着我国火力发电设备的制造和运行水平都进入了一个新阶段。

为满足广大技术人员和现场生产人员了解引进型超超临界火力发电机组的结构、运行、系统等知识的需要，我们组织编写了这套《超超临界火力发电机组技术丛书》。丛书包括《超超临界机组锅炉设备及系统》、《超超临界机组汽轮机设备及系统》、《超超临界机组电气设备及系统》、《超超临界机组控制设备及系统》、《超超临界机组烟气净化设备及系统》五个分册。

本丛书可供从事超超临界火力发电机组设计、安装、调试、运行、检修的工程技术人员及管理人员阅读，也可作为现场运行、检修人员的培训教材和高等院校相关专业师生的参考书。

《超超临界机组电气设备及系统》是本丛书的第三分册。全书详细介绍了我国引进型超超临界火力发电机组中电气设备及系统的基本型式、构造和发展。包括1000MW级汽轮发电机的技术要求、结构特点和性能、运行特性以及事故处理；两种典型1000MW级发电机励磁系统的原理及结构特点；电力变压器的结构、性能及维护；电气一次系统及设备、直流系统和微机保护系统以及自动装置的原理、结构、操作及维护。

本分册由武汉大学毛慧和主编，参加编写的还有华能海南东方电厂谭龙胜、武汉大学张超、王丙鸿。

本分册在编写过程中，参阅了参考文献中列出的正式出版文献以及相关电厂、制造厂、设计院、安装单位和高等院校的技术资料、说明书、图纸等，得到了众多单位的大力支持，在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平所限和编写时间紧迫，疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者
2009年4月

目 录

第一章 1000MW 级汽轮发电机及其运行	1
第一节 国内外 1000MW 级汽轮发电机概述	1
第二节 1000MW 级汽轮发电机的技术要求	5
第三节 1000MW 级汽轮发电机的结构特点及性能	9
第四节 1000MW 级汽轮发电机的运行	34
第五节 发电机异常及事故处理	40
第二章 同步发电机励磁系统	46
第一节 概述	46
第二节 励磁系统的几种典型结构	47
第三节 1000MW 级汽轮发电机组励磁系统	52
第三章 电力变压器	69
第一节 概述	69
第二节 变压器技术参数	70
第三节 变压器结构	76
第四节 变压器的主要附件	80
第五节 分裂绕组变压器	90
第四章 高压电器设备	93
第一节 高压电器概论	93
第二节 SF ₆ 高压断路器	97
第三节 隔离开关	100
第四节 互感器	102
第五节 高压开关柜	109
第六节 封闭母线	115
第五章 电气主接线和厂用电接线	122
第一节 1000MW 机组电厂主接线的主要形式	122
第二节 1000MW 机组电气主接线实例	127
第三节 电气主接线的运行	130
第四节 厂用电接线	137
第五节 厂用电接线实例	139
第六章 直流及 UPS 系统	145
第一节 直流系统设置	145
第二节 蓄电池	152

第三节	直流系统装置	158
第四节	交流不间断电源系统	174
第七章	发电厂微机保护	186
第一节	1000MW 汽轮发电机微机保护	186
第二节	变压器继电保护	217
第三节	发电机-变压器组微机保护	225
第八章	自动装置	229
第一节	自动准同期装置	229
第二节	厂用电切换装置	247
第三节	故障录波分析装置	254
参考文献	259

第一章 1000MW 级汽轮发电机及其运行

第一节 国内外 1000MW 级汽轮发电机概述

世界经济的迅速发展,促进了电力工业的快速增长。电力工业中,火力发电长期占据重要地位,为了缓解环境压力和节省能源,必须发展高效、清洁的火力发电技术,超超临界火力发电机组就是在这一背景下得到快速发展的。目前超超临界火力发电机组已经是成熟的先进发电技术,在经济发达国家中得到了广泛应用,并展现出显著的节能和减亏效果。超超临界火力发电机组容量也从 20 世纪 50 年代的 125MW 发展到现在的 1000MW 以上,最大单机容量已经达到 1333MW(3000r/min)和 1650MW(1800r/min),正在研制的两极或四极发电机组,其容量则达 2000~2500MV·A。

近年来,我国的超临界、超超临界机组发展很快。从开始引进 600MW 超临界机组发展到目前主要采用 1000MW 容量的超超临界机组只用了短短的几年时间。目前,我国已经建成和正在建设的 1000MW 超超临界火力发电厂达到了十几家,计划要上马的更是有几十家之多。下面是国内外部分公司生产的 1000MW 级汽轮发电机的概况。

一、德国西门子公司 (Siemens)

西门子公司已生产了多台 1000MW 级、2 极、3000r/min 的汽轮发电机。这些发电机分别安装在瑞士、德国、西班牙和中国。发电机功率有 900MW 和 1000MW,定子电压为 27kV,冷却方式为水-氢-氢。

西门子发电机的定子采用分段机座,便于运输。定子铁芯中部风道为 3mm,边端 8mm。采用铝合金支持筋,用穿心螺杆压紧,支持筋处用键在压板外固定。端部采用平板式压板紧固,外有磁屏蔽并有冷却风道,齿压板为反磁性材料。机座采用立式弹簧板隔振,定子铁芯外有夹紧环。通风方式为轴向通风。定子空心线棒采用不锈钢管通水冷却。主绝缘采用环氧粉云母少胶带真空浸渍系统。

定子线圈上下层电接头采用机械连接。线圈槽部固定除用适形材料外,槽楔下有弹性波纹板,侧面用波纹板垫紧,端部用大锥环及压板螺钉紧固,可轴向伸缩,主出线采用瓷套管。

转子线圈槽部采用轴向、径向通风,端部采用两路通风,在汽轮机端装有多级压气型高压风扇,抽风式通风,转子每个极面上有 4 个阻尼槽放置阻尼条。护环采用 18Mn18Cr。

油密封采用单流环式,端盖轴承,励磁方式为无刷励磁系统,励磁机为单轴承双整流盘。

二、日本东芝公司 (Toshiba)

日本东芝公司曾生产过 2 台 1000MW 级、3600r/min、60Hz 的汽轮发电机,实际容量为 1120MV·A,功率因数为 0.9,定子电压为 25kV,采用自并励励磁方式,安装在日本

Hekinan 电厂, 分别于 2001 年和 2002 年投入运行。额定氢压为 0.52MPa, 定子铁芯端部压板采用焊接钢板制成, 为磁性材质, 其他结构件为非磁性材质。自并励磁系统分包给 ABB 或 GE 公司配套。定子机座的强度用有限元计算方法分析而不作水压试验。

三、日本三菱公司 (Mitsubishi)

三菱公司曾生产过 2 台容量为 990MV·A、3000r/min、50Hz 的汽轮发电机, 安装在泰国 Patchaburi 电厂。定子电压为 24kV, 采用自并励磁方式, 分别于 2000 年 6 月和 10 月投入运行。

定子线圈上下层线棒实心导线的尺寸均为 6.10mm×1.70mm。上层线棒实心导线数为 64 根, 空心导线为 32 根, 下层线棒实心导线数为 48 根, 空心导线为 24 根, 即上层线圈截面积比下层线圈截面积大。

为了降低进相运行时定子铁芯端部发热, 装有由扇形硅钢片叠制而成的阶梯形磁屏蔽, 起到端部漏磁通的旁路作用, 防止漏磁轴向深入端部, 减少端部铁损。

转子槽衬为环氧模压制而成, 绝缘为环氧玻璃布板粘在转子线圈上。绝缘垫条和阻尼条装在转子线圈上部。转子槽楔下、垫条下、护环绝缘套内表面和槽衬内壁有滑移层。阻尼结构由转子槽内装设的阻尼条与槽楔、护环构成。

四、日本日立公司

日立公司曾生产过数台 900MW 双轴发电机, 已投入运行, 但没有生产过 900MW 及以上容量的单轴汽轮发电机。日立公司已与我国东方电机股份有限公司合作制造邹县电厂 1000MW 级汽轮发电机, 容量为 1120MV·A, 定子电压为 27kV, 目前邹县电厂已经投产。

五、原英国 GEC 公司

原英国 GEC 公司生产的 1000MW 级、3000r/min、50Hz 发电机, 其定子采用内外机座, 内外机座间采用切向隔振, 定子铁芯硅钢片厚度为 0.35mm。

端部压板为普通钢, 齿压板为反磁球墨铸铁, 端部压板处有 20mm 厚的铜屏蔽。

定子空心线圈采用空心铜线, 线圈主绝缘采用环氧粉云母多胶带模压固化系统。槽部固定除采用适形材料外, 槽楔为斜楔打紧, 侧面用半导体波板固定。定子端部线圈固定用大锥环及压板螺钉紧固, 可轴向伸缩, 端部线圈间用灌树脂橡胶布管垫紧。定子线圈出线采用环氧玻璃布卷包。中线点在出线端上部。

转子线圈槽部冷却采用付槽通风, 均匀各风路长度。槽部两排通风孔, 冷热风对流, 端部为一路半。转子端部采用单极离心式风扇, 槽部采用全长整根铝槽楔兼作阻尼作用, 转子极面上有 5 个阻尼槽, 用分段铝槽楔, 接口处下部用铜排连接, 但端部无阻尼笼。护环采用 18Mn18Cr。

4 个氢冷却器放在机座四个角上。机内采用抽风式通风, 发电机前轴承与汽轮机低压转子后轴承共用一轴承座, 后轴承为端盖轴承, 采用双轴承双整流盘的无刷励磁系统。我国大亚湾核电站就采用了 GEC 的发电机。

六、法国 Alstom (ABB) 公司

Alstom(阿尔斯通) 主要生产超超临界汽轮机配 ABB 和 GEC 公司的发电机。数年前 Alstom 公司兼并了 ABB 发电部分的业务, 因此, Alstom 的汽轮发电机就是原 ABB 或其前身 BBC 所生产的发电机。1973~1999 年曾生产过近 10 套 1000MW 级汽轮发电机组。

Alstom 发电机有的配核电站, 有的配燃煤电站。发电机容量为 1000~1182MV·A,

定子电压为 21~27kV，励磁方式多数为自并励励磁系统。1000MW 级汽轮发电机冷却方式为水-氢-氢冷却，即定子线圈水内冷，转子线圈和定子铁芯为氢气冷却。

定子机座为分段式，卧式隔振结构。定子铁芯采用铝合金支持筋及穿心螺杆压紧，铁芯外在支持筋处用键固定，铁芯端部采用硅钢片黏结成的压板兼有磁屏蔽作用。

定子线圈采用不锈钢矩形空心管与实心铜线组成，主绝缘采用环氧云母少胶真空浸渍并有内防晕，最后模压成型，相间用绝缘填料填紧。定子线圈槽部固定采用斜楔打紧，侧面用半导体垫条垫紧，端部固定有外部大锥环及内箍并采用可重新紧固结构。

转子线圈槽部采用轴向、径向通风，端部采用两路通风，转子单侧有两极离心式风扇。槽部采用全长整根铝合金槽楔兼作阻尼作用，端部有铜阻尼。护环采用 18Mn18Cr。

七、俄罗斯（前苏联）

前苏联在 20 世纪 70~90 年代曾生产过 TBB 型汽轮发电机，其冷却方式为水-氢-氢冷却。容量有 800MW、1000MW、1200MW，其中 1000MW 发电机有 2 个型号：TBB-1000-2 型是 60Hz、3600r/min，TBB-1000-4 型是 50Hz、1500r/min，定子电压均为 24kV。

定子机座采用分段式，定子铁芯端部压板内有铜屏蔽及磁分路。端部外圈压板处还装有磁屏蔽和边段铁芯黏结。端部有外绑环和内箍。定子线圈槽部用成对斜楔固定，侧面垫半导体波纹板。

转子线圈槽部采用气隙取气冷却，端部采用两路通风。两端采用单级离心式风扇，轴承为座式轴承。励磁采用无刷励磁系统。

八、上海汽轮发电机有限公司

上海汽轮发电机有限公司引进西门子技术（中方控股与西门子合资）生产 1000MW 级、3000r/min、50Hz 汽轮发电机，冷却方式为水-氢-氢，额定容量为 1111.11MV·A，额定功率为 1000MW，定子电压为 27kV，采用无刷励磁系统，已安装于华能玉环电厂。

上海汽轮发电机有限公司 1000MW 级发电机的主要特点如下。

① 采用水-氢-氢冷却方式，即定子线圈为水内冷，转子线圈为氢气直接冷却，定子铁芯为氢气冷却，轴向通风，转子线圈槽内和端部为线匝中的轴向通风孔冷却。为了加快气体流速，增大冷却效果，采用 5 级串联风扇，压头为 23.1kPa。

② 定子线圈采用双层 2 支路并联线圈布置，空心导线采用不锈钢管。

③ 大轴采用高质量 NiCrMoV 合金钢锻件。

④ 定子线圈在槽内 54°换位，侧面采用波纹板固定，槽底采用均压片和楔下波纹板固定。线圈端部采用压板和高强度绝缘螺栓夹紧到刚性绝缘大锥环上，大锥环由定子机座支撑并允许在机座内轴向移动。整个端部线圈间垫成整体，使端部线圈形成“刚—柔”结构。另外，在定子端部装有磁屏蔽，在齿压板和压圈处设计有通风道，以提高冷却效果。

⑤ 转子线圈的空心导线为无氧含银铜线，转子槽绝缘内表面、槽楔下、垫条靠铜线侧、护环下绝缘筒内与转子线圈相接触部分贴有滑移层，使在开、停机和负荷变化时线圈能自由伸缩，防止线圈变形和绝缘损伤。转子每个极面上开有 4 个阻尼槽，阻尼条采用耐高温蠕变及高电导率的铜合金。阻尼结构良好，能承受 I_2 为 6%（额定电流）， $(I_2/I_N)^2$ 为 6s 的负序能力。

⑥ 发电机设计效率为 98.95%，短路比（SCR）为 0.48，绝缘等级为 F 级，额定氢压为 0.5MPa。

⑦ 发电机转子临界转速一阶 720r/min，二阶 2100r/min。与额定转速距离较大，产生共振的可能性较小。

- ⑧ 发电机采用端盖轴承，励磁机端为单轴承双整流盘。
- ⑨ 发电机油密封采用单流环密封油系统。

九、哈尔滨电机有限公司

哈尔滨电机有限公司引进东芝技术，合作生产了 2 极、3000r/min、50Hz、1000MW 级汽轮发电机，冷却方式为水-氢-氢，额定容量为 1120MV·A，额定功率为 1000MW，功率因数为 0.9（滞后），定子额定电压为 27kV，采用自并励励磁。

哈尔滨电机有限公司 1000MW 级发电机的主要特点如下。

① 冷却方式为水-氢-氢即定子线圈水内冷，转子线圈采用气隙取气氢冷却，定子铁芯采用氢冷。轴流式风扇沿轴向转子分为 15 个风区，其中 8 个热风区，7 个冷风区，风区长度为 406mm，转子温度不均匀系数为 1.247。冷却器垂直安装在发电机机座四角。

② 大轴采用高强度合金锻件 NiCrMoV。护环采用 18Mn18Cr。

③ 定子线圈为双层 4 排，空心导线为铜管，线圈绝缘为 Tostight-1，此绝缘材料具有良好的热稳定性，能满足 30kV 电压等级的高介电强度，在负荷变化工况下具有高度可靠的耐热-机械能力。定子铁芯采用有方向性硅钢片，烘焙无机清漆。铁芯有弹性支撑（弹簧板隔振），铁芯端部结构有铜屏蔽和磁分路。线圈端部结构为绑环和绑扎结构，端部可以轴向伸缩。

④ 转子表面加工成凹凸形状，凹形部位为取风孔，凸形部位为出风孔。气隙取气结构。转子极面两端开有阻尼槽，埋设阻尼条，两端有梳齿阻尼环的结构，能承受 I_2 为 6%（额定电流）， $(I_2/I_N)^2$ 为 6s 的负序能力。

⑤ 发电机设计效率为 99%，短路比（SCR）为 0.52，额定氢压为 0.52MPa。

⑥ 发电机采用自并励励磁系统。正常停机采用逆变灭磁，事故状态采用断路器配电阻灭磁。

⑦ 发电机的油密封采用单流环式。其油源采用从汽轮机润滑系统直接供油，工作后回到汽轮机润滑油系统，靠汽轮机润滑油装置降温，没有单独的冷油器。

十、东方电机有限公司

东方电机有限公司引进日立技术，合作生产了 2 极、1000MW 级、3000r/min、50Hz 汽轮发电机，冷却方式为水-氢-氢。额定容量为 1120MV·A，额定功率为 1000MW，功率因数为 0.9（滞后），定子额定电压为 27kV，采用自并励励磁方式。已安装于邹县电厂。

东方电机有限公司 1000MW 级电机的主要特点如下。

① 冷却方式为水-氢-氢。轴流风扇安装在转子两端，沿轴向转子本体分 19 个风区，其中 10 个为热风区，9 个为冷风区，风区长度为 355.6mm，转子温度不均匀系数为 1.16~1.20。氢气通过定子铁芯的径向风道进行冷却。

② 发电机大轴（转子）采用高强度合金锻件（NiCrMoV），护环采用 18Mn18Cr。

③ 发电机油密封采用单流环式，油来自汽轮机油冷却器下游管路的轴承润滑油，无单独的冷油器。

④ 定子线圈端部结构，在铁芯端部采用磁屏蔽和铜屏蔽，还有磁分路，且采取了使定子线圈端部轴向伸缩的技术措施。

⑤ 转子的阻尼系统由槽楔两端梳齿阻尼环和护环组成，护环搭接面喷镀银。

⑥ 励磁方式采用自并励励磁方式。正常停机采用逆变灭磁，事故时采用灭磁开关和灭磁电阻来灭磁。

第二节 1000MW 级汽轮发电机的技术要求

一、基本技术要求

目前, 1000MW 级、单轴、3000r/min、50Hz 的汽轮发电机属于国内外的最高功率等级发电机, 额定电压为 24~28kV, 定子电流达 23kA 以上, 励磁电流超过 5000A, 励磁电压超过 550V。由于电流大、电压高, 发电机在运行中所产生的热量很大, 电动力很大, 要求绝缘材料能承受高温、高电压和高机械强度。

1. 发电机组必须安全、可靠, 满足经济性要求

为了保证电力系统的安全运行, 就必须保证发电机组运行的可靠性, 同时需要提高运行水平, 避免错误操作。

由于 1000MW 级发电机容量很大, 造价很高, 应充分提高发电机组的效率和使用寿命, 对于 1000MW 级的发电机, 要求其使用寿命不少于 35 年, 发电机组的可用率不低于 99%, 强迫停用率应小于 0.5%。

2. 发电机的运行性能

发电机应明确在额定电压、额定频率、额定功率因数、额定氢压下, 氢冷却器冷却水的水质(如除盐水、中水等)与水温值, 并要求按水温与容量的关系曲线运行。发电机的输出功率(MW)应与汽轮机的功率相匹配。

汽轮发电机组在电网中带基本负荷运行比较经济安全, 但有时实际情况需要发电机变负荷和调峰运行, 这就要求 1000MW 级发电机具有变负荷和调峰运行的能力。

发电机应具有在以下非正常情况运行的能力。

① 承担负序电流能力。发电机在不对称负荷状态下运行, 外部不对称短路或内部故障时, 定子绕组将流过负序电流, 从而使转子表层产生较高的温度。严重时损坏转子本体和护环。因此, 1000MW 级发电机应能承受一定的稳态负序电流 I_2 (不小于额定电流的 6%) 和暂态负序电流 $(I_2 I_N)^2$ (不小于 6s)。

② 承担短时过负荷能力。发电机应具有承受 1.5 倍额定电流历时 30s 不发生有害变形及接头开焊等故障的能力。

③ 进相运行能力。要求发电机在功率因数为 0.95(超前)情况下, 能带额定有功负荷长期连续运行, 且各部分温度(或温升)不超过规定值。

④ 承受下列工况下所产生的扭应力的能力: 两相短路冲击产生的扭应力、电厂出线三相或两相重合闸不成功产生的应力、发电机误并列产生的应力、甩负荷时由于调速器失灵引起超速而产生的应力、次同步振荡所产生的应力, 以及周期性振荡产生的应力等。

⑤ 失磁异步运行。发电机失磁后, 将由同步运行逐渐转入异步运行。对发电机来说, 发生异步运行将产生滑差 (s), 会在转子表面感应产生较高温度。定子端部漏磁增大, 使端部件产生局部过热。发电机等效电抗降低, 定子电流增大, 定子因之过热。发电机有功功率发生剧烈的周期摆动, 变化的电磁转矩(可能超过额定值)周期性地作用到轴系上, 并通过定子传给机座, 引起剧烈振动, 同时转差也作周期性变化, 使发电机周期性地严重超速。失磁异步运行时发电机要从电网吸收较大无功功率, 从而降低系统和电厂厂用母线电压。

对于运行中的汽轮发电机突然失去励磁后是否可以不切机, 并带一定有功负荷继续运行

一段时间，仍有不同看法或观点。如 Alstom 规定失磁 2s 后停机，日立公司则规定失磁后立即停机。所以，1000MW 级发电机是否允许失磁异步运行应根据各公司的规定，如果允许失磁后减出力运行，则还要满足电网有足够无功功率的条件。

3. 发电机的冷却方式

发电机的额定容量表示发电机输出的限额，这个限额是考虑了发电机的发热情况、效率和机械强度等情况而决定的。而这些因素中最突出的是发热和效率两项，也就是说一台发电机若让它发出超过它的额定容量的功率时，就会温升太高或效率太低。在大型同步发电机中，常常是发热问题起着限制出力的主要作用。所以，如果能改进电机的冷却方式，提高电机的电磁负载，用同样的有效材料，就可以做出更大容量的电机来。汽轮发电机的最大单机容量从 30 年代的 100MW 发展到今天的 1300MW 以上，这个巨大的发展主要是在逐步改进冷却方式中取得的。

汽轮发电机的发展史，某种意义上说也就是冷却技术的发展史。汽轮发电机的冷却技术经历了空气冷却、氢气冷却以及直接冷却技术。直接冷却方式采用了热容量更大，冷却效果更好的水和油，使发电机的单机容量有了大幅度的提高。目前，1000MW 级汽轮发电机均采用水-氢-氢冷却方式。

(1) 定子线圈水内冷 定子线棒由若干空心导体和实心铜线组成。空心导体，有的公司采用不锈钢（只是导热），如阿尔斯通、西门子，其他公司则采用既导电又导热的空心铜线。

(2) 定子铁芯氢气冷却 其冷却方式与转子的冷却方式和定子内部采用气隙隔板的型式有关，铁芯的冷却风道与转子冷却风道相对应。

(3) 转子氢气内冷 大致有以下三种冷却方式。

① 气隙取气冷却：日立、东芝、哈尔滨电机有限公司和东方电机有限公司等公司采用这种冷却方式，将转子分成冷、热各若干风区，相互间隔，对转子冷却效果良好，温度分布均匀。

② 轴向通风冷却：西门子、三菱等公司就采用这种冷却方式。在汽轮机端装有多级高压风扇，风扇将热风从间隙中抽出，然后通过冷却器冷却，冷却后的冷风分成若干路分别进入转子内、定子铁芯通风道和端部。

③ 轴-径向通风冷却：定子铁芯有径向通风道，转子槽底有副槽，转子线圈开有径向通风孔，氢气直接冷却，转子两端有风扇向里压风。英国 GEC 公司就是采用这种冷却方式。

4. 额定电压

发电机单机容量增大以后，要求电机的绝缘水平能承受较高的电压、温度以及机械强度。

发电机的额定电压是一个很重要的参数，提高发电机的单机容量应相应提高定子额定电压，这样可以相对减小定子电流，电压的提高取决于绝缘材料技术的提高。

对于 1000MW 汽轮发电机来说，额定电压增大到 24~27kV，其定子额定电流则增大到 23kA 以上，增大了的电流将会增加发电机的发热，即发电机的温度或温升将升高，温度升高对绝缘不利。

定子额定电流增大则将增大电磁力，定子线棒在槽内和端部正常运行时受电动力的作用，如固定不牢会磨损线棒，当突然短路故障时，在线棒上产生的力相当于 100 倍或更大的稳态电流所产生的力，与瞬态电流的峰值成正比，且与电流的直流分量和漏磁饱和程度有关。各制造公司都采取相应的技术措施，在槽部和端部进行加固。

由于电机绝缘制造技术的提高，当前各制造公司对 1000MW 级发电机定子电压都确定

在 27kV，少数公司为 28kV。

5. 发电机励磁方式

励磁系统是发电机组的主要组成部分，其性能直接影响到发电机组的运行水平。因此，励磁方式对 1000MW 级发电机也是非常重要的。

目前，各电机制造公司采用的励磁方式有以下两种。

(1) 无刷励磁系统 无刷励磁系统的特点是主、副励磁机和整流装置与发电机转子同轴旋转，无滑环和碳刷。主励磁机发出的交流电流经旋转整流器整流后直接供发电机转子线圈励磁，励磁回路中无灭磁装置和开关，靠自然灭磁。因此，灭磁时间比其他励磁方式的灭磁时间长。其最大优点是无刷、无滑环，运行中不会产生火花、碳粉，运行安全，不会冒火，维护工作量小。西门子（包括上海汽轮发电机有限公司）、三菱等公司均采用过这种励磁方式。

(2) 自并励励磁系统 自并励励磁系统由励磁变压器、灭磁回路、可控硅整流器及励磁调节器（AVR）等组成。励磁变压器的一次侧接到发电机机端，二次侧接到整流装置，经可控硅整流器整流后供发电机转子线圈励磁。这种励磁系统的特点是无旋转的主、副励磁机，但需要滑环、碳刷和灭磁开关。需特别注意的是励磁变压器因谐波而增加的损耗导致其“热容量”与常规“电容量”不同。

上述两种励磁方式都有应用，但要注意其容量要与发电机容量包括强励所需相匹配。

二、主要部件的技术要求

1. 主要部件的材质要求

目前各公司采用的发电机转轴（大轴）有两种材料，即 NiCrMoV 和 26NiCrMoV145，但关于材料脆性转变温度 FATT、转轴 ASTM 屈服极限 $\sigma_{0.2}$ 与 $\sigma_{0.02}$ 和转轴的安全系数 X 各不相同，要求制造部门提供相关数据。

发电机转子护环采用 18Mn18Cr，要求 $\sigma_{0.2} > 1200\text{N/mm}^2$ ， $X > 1.8$ 。

发电机定子线圈绝缘、槽绝缘、转子线圈绝缘、硅钢片绝缘要求采用 F 级，能承受高温，作为 B 级绝缘使用。目前国内外各公司都标明采用的是 F 级绝缘，但型号各不相同，各公司都有自己的绝缘体系，因此，对绝缘要做耐电压试验。

发电机出厂试验时，定子线圈先进行 $3.5U_N/\text{min}$ 直流耐压试验，通过后再进行 $2U_N + 1000\text{V}$ 交流工频耐电压试验，历时 1min，不发生异常情况或击穿。对励磁线圈，当励磁电压为 500V 以下，则做 10 倍额定励磁电压值的交流工频耐压试验，如励磁电压超过 500V，则做 2 倍励磁电压加 4000V 的交流工频耐压试验。

定子硅钢片有方向性，厚度可采用 0.35mm 或 0.5mm，定子铜线采用无氧铜，空心导线必须经过 100% 探伤，转子铜线采用含银铜。

2. 主要部件的结构要求

① 定子线圈槽内固定。由于发电机容量大，相应的定子电流较大，在定子线圈槽内会产生较大的电动力，如固定不牢会使线棒绝缘摩擦损坏。因此需要采用特殊的固定措施，如用斜楔打紧，侧面用波纹板固定等固定措施。

② 定子线圈端部固定。定子线圈端部固定一般有两种结构：一种是端部有大锥环加内箍和压板，如西门子、阿尔斯通；另一种是绑线式，端部有多道绑环。两种结构都采取措施使端部线圈能轴向自由伸缩，以适应调峰和变负荷运行。

③ 转子阻尼系统。为预防或减轻负序电流对转子和护环的破坏作用，在转子和护环上

采用阻尼系统，大容量发电机基本上都有阻尼系统。但各公司的结构稍有不同，例如转子槽楔采用高电导率、高强度的铜（铝合金材料）制作，全长两端伸入护环下，两极面上开4~5个阻尼槽，放入阻尼条。有的是转子槽楔下放全长阻尼条，两端护环下有梳齿阻尼环。

④ 适应调峰运行的技术措施。调峰运行的发电机启停频繁，负荷变化较大，因而导体发热有高有低，金属导体热胀冷缩，转子线圈在槽部和端部会轴向伸缩，护环在转子本体端头也会伸缩，会造成线圈绝缘磨损，护环与转子本体搭接面相互啃环。为防止上述故障，各公司都采取了一些技术措施，在转子槽楔下、垫条下、槽衬内壁、护环绝缘套内表面放置滑移层，使线圈轴向自由伸缩，护环也能伸缩。定子线圈端部也采取了轴向伸缩的技术措施。

三、辅助系统的技术要求

辅助系统包括氢、油、水及监控系统，辅助系统设备质量优劣也关系到发电机组的安全经济运行。

1. 氢气系统

氢气系统包括制氢站、控制系统。传统的制氢站的设备多数为低氢压系统，从电解槽中产生的氢气增压后送入储氢罐，其间未装氢气干燥设备，通过管道直接送入发电机，氢气湿度较高。另一种方式是将电解槽产生的氢气增压到14.7~17.6MPa，将水分脱掉后装入瓶内，然后减压灌入发电机内，可大大降低发电机内氢气湿度。

氢气控制系统包括充、排氢的置换设备，氢气纯度分析仪，压力、密度、湿度、温度指示器，氢压调节器，平衡阀、压差阀，漏氢报警装置，补氢装置，氢气干燥器，工况监视仪等。

运行中机内氢气纯度一般要求保持96%~98%。关于氢气湿度，国际上未有统一标准，国产发电机一般采用DL/T 651—1998《氢冷发电机氢气湿度的技术要求》。对进口的发电机如有规定值，则采用制造公司（厂）的规定。如无规定值，则可参考DL/T 651—1998的标准。

2. 密封油系统

大容量汽轮发电机密封瓦的形式有两种，即单流环式和双流环式，但ABB（原BBC）采用三流环式。

（1）双流环式 氢侧油系统与空侧油系统各自独立，空、氢两侧油压相等，油流向分开，油量无交换，发电机在运行中密封油高于氢压1个恒定压差，这个差值由压力调节阀来实现。空侧与氢侧油压由压力平衡阀来调节平衡。双流环式无真空净油装置，要求平衡阀和压差阀来保证两侧油压平衡，维持油和氢之间的压差恒定。

（2）单流环式 供油系统只有1套，不分氢侧和空侧，密封油经真空油箱脱水后，经2只100%密封油泵，再经冷却器和串接压力调节阀，然后通过过滤器分别进入汽机侧和励磁机侧的密封瓦。密封瓦回油，氢侧的油回到氢侧回油箱，对油、氢分离，氢气进入机内，含氢的油进入液、气分离器后流入回油母管。空侧回油与轴承润滑油混合后分别流入润滑油回油母管和密封油回油母管。密封油回油母管进入真空净油箱喷雾脱气。

密封油系统应保证发电机在正常运行、启停机、盘车、充氢或气体置换等工况下均能密封住机内气体不向外泄漏，压差稳定，密封油不应漏入机内。密封油应清洁无杂质，主要是颗粒度各厂商都应有其标准规定。油中不含游离水。密封瓦的油压一般高于氢压0.05~0.06MPa。

3. 水系统

水-氢-氢冷却的发电机有两个水系统：一是冷却氢气的水冷系统，水源可根据工程水工的设计确定；二是指用水冷却定子线圈的供水系统，它是一个独立的冷却系统，其冷却水应采用除盐水或凝结水。

① 内冷水水质要求：水质应符合表 1-1 的规定。为保持水质纯洁和低导电率，在循环系统中安装离子交换器，将 5%~10% 的水量循环处理。用不锈钢管导热时一般不需要。

表 1-1 内冷水水质要求

pH 值(25℃)	电导率(25℃) / $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	硬度 / $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	含铜量 / $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	溶氧量 / $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	全密闭式冷却水 系统溶氧量/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
7.0~9.0	≤ 2.0	< 2.0	≤ 40	< 300	≤ 30

② 水系统结构：水系统要求组装式，即把所有零部件组装成一个整体，便于运输、安装、调试和运行操作；在水系统中装有离子水处理装置、防止冷却水汽化装置、断水保护、漏水报警、冷却水压力和水温控制装置、加热装置。

③ 定子线圈冷却水的入口温度为 40~50℃，水温波动范围不大于 $\pm 2^\circ\text{C}$ ，出水温度不高于 80℃。

4. 基本的监测仪表及装置

为提高发电机的运行可靠性，除在发电机定子线圈、铁芯外壳、轴承、进出水管道等处理设适当的检温计外，还应装设一些基本的自动监测、报警、自动记录等装置，氢气露点监测仪，发电机各类参数监测、巡检、自动记录、自动打印、遥测显示、瞬时跳闸、事故追忆等装置。

第三节 1000MW 级汽轮发电机的结构特点及性能

一、发电机的技术参数

目前，我国三大电机厂 1000MW 级发电机组均属引进技术，合作生产。上海汽轮发电机有限公司引进西门子技术，哈尔滨电机有限公司引进东芝技术，东方电机有限公司引进日立技术。生产的 1000MW 级汽轮发电机都是 3000r/min、50Hz，冷却方式为水-氢-氢，额定功率为 1000MW，定子电压为 27kV。上海汽轮发电机有限公司的励磁方式采用无刷励磁系统（也可以采用自并励励磁系统），哈尔滨电机有限公司和东方电机有限公司的励磁方式均采用自并励励磁系统。

我国三大电机厂生产的 1000MW 级汽轮发电机的主要技术参数参考值如表 1-2 所示（具体到不同电厂有所不同）。

二、发电机本体

三大电机厂生产的 1000MW 级汽轮发电机，在结构上大致相同，下面以上海汽轮发电机有限公司的 THDF 125/67 型汽轮发电机为例进行介绍。

发电机本体主要由一个不动的定子（包括机座和端盖、定子铁芯和定子绕组、定子出线和出线盒、定子水路、氢冷却器、隔振装置和端部结构等）和一个可以转动的转子（包括转子铁芯和绕组、绕组电气连接件、转轴、风扇、阻尼系统等）构成。THDF 125/67 型汽轮发电机本体外形示意图如图 1-1 所示。发电机整体外形图如图 1-2 所示。

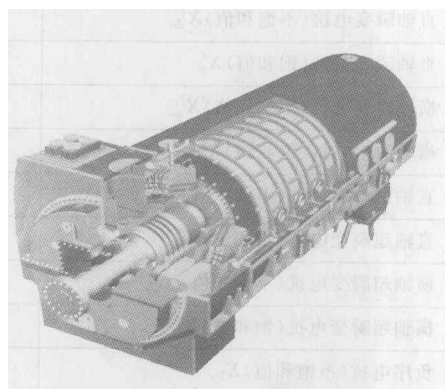


图 1-1 THDF 125/67 型汽轮发电机本体外形示意图

表 1-2 1000MW 级汽轮发电机的主要技术参数参考值

名 称	单 位	技术参数参考值		
		东方电机	哈尔滨电机	上海电机
发电机型号		日立 TFLQQ-KD 东方电机 QFSN-1000-2-27	东芝 LCH-1100-27 哈尔滨电机 QFSN-1000-2-27	西门子 THDF 125/67 上海电机 THDF 125/67
额定容量 S_N	MV · A	1120		1056
额定功率 P_N	MW	1000		950
最大连续输出功率 P_{max}	MW	1100		1000
最大连续视在功率 S_{max}	MV · A	1230	1222.2	1110
额定功率因数 $\cos\phi_N$		0.9	0.9	0.9
定子额定电压 U_N	kV	27	27	27
定子额定电流 I_N	A	23949	23950	22571
额定频率 f_N	Hz	50	50	50
额定转速 n_N	r/min	3000	3000	3000
额定励磁电压 U_{fN}	V	445(75℃)	563	418
额定励磁电流 I_{fN}	A	5173	5360	5653
定子线圈接线方式		YY	YY	YY
冷却方式		水-氢-氢	水-氢-氢	水-氢-氢
励磁方式		静止自并励	静止自并励	无刷励磁
定子每相直流电阻(75℃)	Ω	0.0012	0.00129	0.001078
转子线圈直流电阻(75℃)	Ω	0.085	0.0958	0.0614
定子每相对地电容	μF	0.194	0.31	0.284
转子线圈自感 L	H	0.8	0.72	0.65
直轴同步电抗 X_d	%	188	218	248
横轴同步电抗 X_q	%	188	214	235.5
直轴瞬变电抗(不饱和值) X'_d	%	26	30.2	28.5
直轴瞬变电抗(饱和值) X''_d	%	22	26.9	23.2
横轴瞬变电抗(不饱和值) X'_{qu}	%	42	48.0	69
横轴瞬变电抗(饱和值) X''_q	%	35	42.8	62.1
直轴超瞬变电抗(不饱和值) X''_{du}	%	21	24.0	21.3
直轴超瞬变电抗(饱和值) X'''_d	%	18	21.4	16.8
横轴超瞬变电抗(不饱和值) X''_{qu}	%	21	24.0	23.6
横轴超瞬变电抗(饱和值) X'''_q	%	18	21.4	16.9
负序电抗(不饱和值) X_{2o}	%	24	24.0	22.5
负序电抗(饱和值) X_2	%	20	21.4	16.4
零序电抗(不饱和值) X_{0o}	%	11	12.4	11.2

续表

名 称	单位	技术参数参考值			
		东方电机	哈尔滨电机	上海电机	
零序电抗(饱和值) X_0	%	11	11.8	11.2	
直轴开路瞬变时间常数 T'_{do}	s	9.7	9.4	8.73	
横轴开路瞬变时间常数 T'_{qo}	s	1.0	2.0	2.50	
直轴短路瞬变时间常数 T'_d	s	1.1	1.3	0.829	
横轴短路瞬变时间常数 T'_q	s	0.23	1.45	0.574	
直轴开路超瞬变时间常数 T''_{do}	s	0.07	0.025	0.036	
横轴开路超瞬变时间常数 T''_{qo}	s	0.13	0.04	0.200	
直轴短路超瞬变时间常数 T''_d	s	0.05	0.02	0.03	
横轴短路超瞬变时间常数 T''_q	s	0.05	0.02	0.081	
灭磁时间常数 T_{dm}	s	1.9	7.5	8.73(无刷)	
转动惯量 GD^2	t·m ²	77.4	65.7	64	
短路比 SCR		0.53	0.52	0.5	
稳态负序电流 I_2	%	6	6	6	
暂态负序电流能力 $(I_2/I_N)^2 t$	s	6	6	6	
允许频率偏差	%	±2	±5	-3~+2	
允许定子电压偏差	%	±5	-3~+2	±5	
强迫停机率	%	<0.5	—	≤0.5	
失磁异步允许能力	MW min	20%额定负荷 15min	3s后切机	40%额定负荷 15min	
调峰能力	次	10000	10000	10000	
进相运行能力	MW	功率因数超前 0.95,带额定负荷长 期连续运行	功率因数超前 0.95,带额定负荷长 期连续运行	功率因数超前 0.95,带额定负荷 长期连续运行	
电话谐波因数 THF	%	≤1	≤0.5	≤1	
电压波形正弦畸变率 K_u	%	≤3	≤1	≤3	
三相短路稳态电流	%	154	149	140	
暂态短路电流有效值 (交流分量)	相-中性点	%	589	494	635
	相-相	%	432	359	464
	三相	%	455	372	483
次暂态短路电流有效值 (交流分量)	相-中性点	%	639	543	100
	相-相	%	480	405	100
	三相	%	555	467	201
三相短路最大电流值(直流分量峰值)	%	1110	809	1772	
相-相短路最大电磁转矩	MN·m	29.95	21.7	24.70	
汇水管绝缘电阻	kΩ	0(接地)	—	≥35	