

全能值班员技能提升指导丛书

电气分册

大唐国际发电股份有限公司 编

DATANG POWER

注重理论结合实际

强调实际操作技能提升

培养合格的全能值班员



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

全能值班员技能提升指导丛书

电气分册

大唐国际发电股份有限公司 编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是结合大唐国际发电股份有限公司 200~600MW 发电机组相关设备,为集控值班人员能够尽快掌握电气设备的理论和生产实际所编写的培训教材。

全书共分十二章,全面介绍了发电机结构及冷却系统、发电机的运行、发电机的异常运行及事故处理、发电机励磁系统、厂用电系统、变压器及运行、互感器与开关电器、配电装置、发电机—变压器组保护、高压输电线路保护、发电厂直流系统、发电厂的电气控制系统等内容。除“发电机的异常运行及事故处理”单列一章外,在其他各章的相关内容中,也都重点增编了与值班人员实际工作直接相关的操作调整、注意事项、异常分析、事故处理以及相关的事事故案例。

本书作为大型火力发电厂运行人员的培训教材,适合从事火力发电机组检修、调试及管理工作的工程技术人员阅读,也可供其他相关专业人员以及高等院校电力工程类专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

全能值班员技能提升指导丛书·电气分册/大唐国际发电股份有限公司编. —北京:中国电力出版社,2008
ISBN 978-7-5083-6556-5

I. 全… II. 大… III. ①发电厂-电工-技术培训-教材②发电机-机组-电气设备-技术培训-教材 IV. TM62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 002384 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

*

2008 年 1 月第一版 2008 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.5 印张 351 千字

印数 0001—8000 册 定价 28.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

《全能值班员技能提升指导丛书》

编 委 会

主 任 佟义英

副主任 方占岭

委 员 (按姓氏笔画排列)

王俊清 田小鹏 白 岭 伍小林 李玉昆

张 洁 项建伟 赵世杰 赵振宁 高向阳

《电气分册》编审人员 (按姓氏笔画排列)

王俊清 史 扬 白 岭 吕 明

苏利辉 张 洁 蔡 威

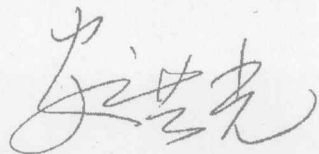
序

伴随着我国国民经济的快速增长,电力工业得到了迅猛发展。为了更好地节约能源,保护生态环境,建设生态文明,电力行业努力降低供电煤耗和减少污染物的排放,不断发展清洁高效发电技术,高参数、高效率、大容量火电机组不断增加。新技术、新设备、新材料大量采用,机组系统大,测点多,自动调节系统多,控制逻辑复杂,保证机组的安全、可靠、经济运行是发电企业面临的重要任务。

单元机组集中控制是当今大型发电机组的主要控制方式,集控全能值班制是各发电企业普遍采用的运行管理体制,这对发电企业运行全能值班员的素质提出了更高的要求。加强集控运行人员的培训工作,尤其是有针对性的现场实际操作技能的培训已成为各发电企业运行管理工作的当务之急。

科学技术是第一生产力,人力资源是第一资源,加强员工的技术培训是实现企业和员工共同愿景的重要途径和方法。作为国有控股大型发电企业,大唐国际发电股份有限公司一直致力于公司的协调发展。在公司业务不断延伸、规模不断扩大的同时,本着提供优质电能、保障电网安全运行的出发点,采取了多种方式狠抓运行管理工作,尤其是运行培训工作,并不断根据实际发展状况,摸索新的更行之有效的培训方法。

本套丛书是大唐国际发电股份有限公司根据集控全能值班制的发展状况,有针对性地组织编写的技能培训丛书,旨在提高全能值班员的理论、实际操作水平,从而提高企业安全经济运行水平。我们希望通过本套丛书的编写、出版,能够与兄弟企业从事发电运行管理工作的人员相互借鉴、交流经验,同时更好地促进行业技术和管理水平的提高。



前言

近几年来,随着电力工业的快速发展,大容量、高参数发电机组迅速增加,600MW超临界机组及300MW循环流化床机组陆续投产。由于新机组投入商业运行的进程不断加快,各发电企业无法抽出专门的时间对运行人员进行有计划、有系统的技术培训,而运行值班人员又需要不断更新、补充上岗,因此对当前集控运行值班人员的在岗培训显得尤为迫切。为适应这一形势,大唐国际发电股份有限公司组织公司的生产技术人员和华北电力科学研究院有限责任公司的有关专家,着手编写了这套《全能值班员技能提升指导丛书》。

本书为丛书的《电气分册》,主要面向发电厂运行值班人员,内容包括300~600MW机组常用电气设备与系统,包括发电机—变压器组、厂用一二次系统及附属设备的结构、设计理念、操作调整注意事项及其出处,有一定的理论深度,而且增加了现场设备实际操作的指导原则、要点、注意事项及相关案例内容。这使得本书对运行值班人员的学习更具有实际意义,这也是本书有别于其他图书的一大特色。本书对即将走上工作岗位的学生,也有很好的参考意义,可以把他们学到的理论知识更快地与工作实践结合起来。应当注意的是,本书只对设备的操作进行通用的描述,所以不能代替运行规程。

本书主要由陡河、乌沙山等发电厂与华北电力科学研究院有限责任公司根据大唐国际发电股份有限公司各发电企业设备具体情况,结合原理、结构、功能及实际操作编写的,具有较强的实用性。全书共分十二章,其中,第一章由华北电力科学研究院有限责任公司吕明和陡河发电厂王俊清编写;第二章由华北电力科学研究院有限责任公司吕明、陡河发电厂王俊清编写;第三章由王俊清编写;第四章由华北电力科学研究院有限责任公司张洁、史扬和陡河发电厂王俊清编写;第五章由乌沙山发电厂苏利辉编写;第六章由华北电力科学研究院有限责任公司刘少宇、乌沙山发电厂苏利辉编写;第七章由华北电力科学研究院有限责任公司徐党国、蔡威和邓春编写;第八章由王俊清编写;第九章由张洁、史扬和陡河发电厂白岭编写;第十章由张洁和史扬编写;第十一章、第十二章由陡河发电厂王俊清、黄俊峰编写,并负责全部内容汇总。全书由陡河发电厂王俊清、白岭,乌沙山发电厂苏利辉进行初审;最后由华北电力科学研究院有限责任公司吕明、张洁及陡河发电厂白岭进行统稿,对全书内容进行了修改、补充和完善。

在本书编写过程中,得到了大唐国际发电股份有限公司、各发电厂和华北电力科学研究院有限责任公司各级领导的大力支持,在此表示感谢。由于编者水平有限,难免存在疏误之处,恳请读者提出宝贵意见,以便今后进一步修订。

本书编委会

2007年10月

目 录

序

前言

第一章 发电机结构及冷却系统	1
第一节 发电机定子结构	1
第二节 发电机的转子结构	8
第三节 发电机定子绕组内冷水系统	11
第四节 发电机的通风冷却系统	11
第五节 发电机氢气及密封油系统	14
第六节 发电机的测温及工况监视设备	16
第七节 冷却条件变化对发电机允许出力的影响	17
第八节 发电机冷却系统异常故障处理	19
第二章 发电机的运行	27
第一节 额定参数下的运行与允许温度	27
第二节 发电机的启动、试验、并列、停机	28
第三节 单元机组机电炉大联锁保护	34
第四节 电压、频率变化的控制和运行	35
第五节 发电机功角特性与稳定概念	36
第六节 发电机的安全运行极限与 $P-Q$ 曲线	38
第七节 发电机工作状态与有功功率调节关系	39
第八节 发电机工作状态与励磁调节关系	40
第九节 发电机的进相运行	42
第三章 发电机的异常运行及事故处理	44
第一节 发电机短时过负荷能力及不对称运行	44
第二节 发电机的失磁与异步运行	46
第三节 发电机的异常运行及事故处理	48
第四章 发电机励磁系统	56
第一节 励磁系统的作用及要求	56
第二节 发电机的调压特性及机组间无功功率分配	57

第三节	自动励磁调节装置原理	59
第四节	励磁系统的运行与异常事故处理	66
第五章	厂用电系统	87
第一节	厂用电及厂用负荷分类	87
第二节	厂用电源的切换	88
第三节	厂用电系统运行检查, 操作	90
第四节	厂用电系统的异常及事故处理	93
第五节	厂用电系统的保护	98
第六节	厂用电监控系统	101
第七节	柴油发电机及保安电源	101
第六章	变压器及运行	105
第一节	变压器的分类与基本概念	105
第二节	变压器的主要结构部件及作用	107
第三节	变压器的冷却系统	114
第四节	变压器的允许温升及过负荷能力	116
第五节	变压器本体的监测和保护装置	120
第六节	变压器的投运和试验	121
第七节	变压器的正常运行监视及分接头调整	123
第八节	变压器的油质监测和色谱分析	126
第九节	变压器的异常运行及事故处理	127
第七章	互感器与开关电器	134
第一节	电压互感器	134
第二节	电流互感器	136
第三节	互感器的使用、维护	138
第四节	开关分类和基本参数	141
第五节	六氟化硫 (SF ₆) 断路器	141
第六节	真空断路器与高压开关柜	147
第七节	断路器操动机构	152
第八节	隔离开关	156
第九节	高压断路器、隔离开关的检查、操作及异常处理	158
第八章	配电装置	161
第一节	屋内、屋外配电装置	161
第二节	成套配电装置	164
第三节	SF ₆ 全封闭组合电器	165

第九章 发电机—变压器组保护	169
第一节 概述	169
第二节 发电机—变压器组保护的基本配置	170
第三节 发电机—变压器组各保护装置的主要功能和技术要求	171
第四节 继电保护及自动装置的运行要求及故障处理	175
第十章 高压输电线路保护	178
第一节 线路纵联保护	178
第二节 线路光纤纵联差动保护	180
第三节 线路的后备保护	182
第四节 线路自动重合闸装置	185
第五节 母差保护及断路器失灵保护	187
第十一章 发电厂直流系统	190
第一节 发电厂直流电源的设置	190
第二节 直流系统的运行与维护	191
第三节 密封铅酸蓄电池	196
第四节 直流系统的异常与事故处理	199
第十二章 发电厂的电气控制系统	206
第一节 发电厂的控制方式	206
第二节 断路器的控制	207
第三节 信号与测量系统	208
第四节 发电机厂同步系统	210
第五节 发电厂微机监控系统概述	212
第六节 网控 NCS 系统	213
第七节 发电厂运行与系统调度中心联系	220
参考文献	222

第一章

发电机结构及冷却系统

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。在发电机本体上设有铭牌。铭牌上标有发电机最重要的参数,这些参数是设计和运行的依据。一般有额定功率、额定电压、额定电流、功率因数、转速、氢压、励磁电压、励磁电流、连接方式、效率等。其中额定有功功率 P (MW)、额定电压 U (kV)、额定电流 I (kA) 以及功率因数 $\cos\varphi$ 的关系是

$$P=\sqrt{3}UI\cos\varphi$$

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

$$n=60f/P_1$$

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

同步发电机都是由定子、转子两个基本部分组成。定子部分是由机座、端盖、定子铁芯、定子绕组等部分组成。转子主要由转子锻件、励磁绕组、护环、中心环和风扇等组成。

发电机的发热部件,主要是定子绕组、定子铁芯(磁滞与涡流损耗)和转子绕组。必须采用高效的冷却措施,使这些部件发出的热量散发出去,保证发电机各部分温度不超过允许值。在汽轮发电机的发展过程中,冷却方式的发展一直占有主导地位,它关系到整个发电机的技术经济指标以及运行的可靠性。按照冷却介质和冷却方式的不同,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)。

汽轮发电机结构与冷却方式密切相关。目前大型汽轮发电机较为普遍的是转子绕组采用氢内冷、定子铁芯采用氢表冷、定子绕组为水内冷,简称“水氢氢冷却”方式。因此下面将主要介绍这种形式的汽轮发电机。

第一节 发电机定子结构

汽轮发电机的定子主要由机座、定子铁芯、定子绕组、端盖等部分组成。

一、机座

机座的作用主要是支撑和固定定子铁芯和定子绕组,同时在结构上还要满足发电机的通风和密封要求,此外还要能防止漏氢和承受住氢气的爆炸力。

机座由高强度优质钢板焊接而成。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。对定子铁芯为轴向通风的系

统,机壳与铁芯背部之间的空间为简单风道。对定子轴向分段、径向通风冷却的系统,常将机壳和铁芯背部之间的空间沿轴向分隔成若干段,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,也有的在每个进风区都设有独自的进风管,以减小各进风区(室)的压力差。进风孔设在风扇送出的高压风区,出风口通向风扇背侧的低压风区并途经冷却器。

为了减少氢冷发电机通风阻力和缩短风道,冷却氢气的冷却器常安放在机座内的矩形框内。冷却器一般为2~4组,其布置位置主要有三种形式,即立放在电机两端的两侧、立放在电机中部的两侧、横放在电机上部两端。

二、端盖及轴承

端盖的作用是用于保护定子端部,对发电机进行密封。由于机座、端盖与轴承要承受高速旋转的转子,它们之间应准确同心,因此安装时应特别精确、保证质量。与机座一样,端盖也应是防爆和密封的。它是由优质钢板焊接,经消除应力后加工而成的。

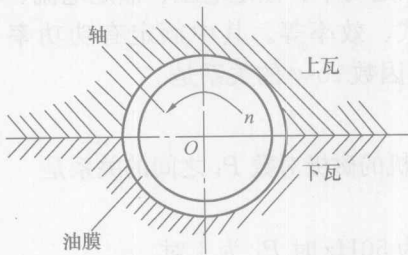


图 1-1 椭圆瓦轴承及油膜

大型汽轮发电机的轴承一般为端盖式,安装于端盖的中心孔处。其轴瓦多为椭圆形结构,见图 1-1。采取双侧进油或单侧进油。当转子以 3000r/min 转速运转时,在轴与轴承间形成厚度约 0.25mm 的油膜,用以防止轴与轴承间的金属摩擦。为监视轴瓦温度,在下半轴瓦最高温度点附近的钨金面下埋设有铜热电阻测温元件。

为了防止氢气从发电机内轴与端盖间的间隙外漏,或空气从外部混入机内,引起爆炸,在端盖与轴交接

处装有油密封设备。

三、定子铁芯

定子铁芯是构成发电机磁路和固定定子绕组的重要部件。要求它导磁性能好、损耗低、刚度好、振动小,在结构设计及通风布置上具有良好的冷却效果。

发电机定子铁芯常采用导磁率高、损耗小、厚度为 0.35~0.5mm 的优质冷轧硅钢片叠装而成。每层硅钢片由数张扇形片组成一个圆形,每张扇形片都涂了耐高温的无机绝缘漆。B 级硅钢绝缘漆能耐温 130℃,一般铁芯许可温度为 105~120℃。F 级绝缘漆,能耐受更高的温度。硅钢片叠装后,用油压机等工具经热压压紧,定位筋与压紧压圈好像一个笼状物,将铁芯固定在其中间。

因为发电机运行时,硅钢片会有磁滞、涡流损耗,定子绕组也会发热,必须将热量散掉。而仅通过定子铁芯的外表面散热是很不够的,改善散热的主要办法就是增大氢气与铁芯的接触面积,即让冷却氢气在硅钢片段之间的通风沟中流通,这样就大大增加了铁芯的散热面积,改善了铁芯的散热条件。

从图 1-2 中可以看到,在第 1 段和第 64 段硅钢片的端部用了压指和压圈,压指呈条形,用于压住铁芯的每一个齿;压圈呈圆环形,用于压紧压指和铁芯的轭部,最后用定位筋两端的螺母压紧。

整个定子铁芯通过外圆侧的许多定位筋及两端的齿压板(又称压指)和压圈或压板固定、压紧,见图 1-3 (a)、(b),再将铁芯和机座连接成一个整体。有的电机为了使铁芯轭

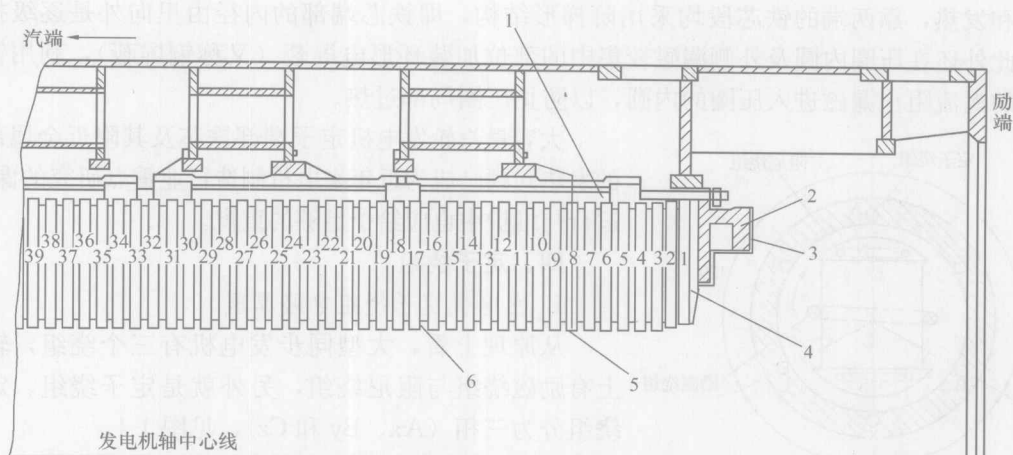


图 1-2 QFSN-300-2 型汽轮发电机定子铁芯装配图

1—定位筋；2—压圈；3—铜屏蔽；4—压指；5—测温元件；6—通风沟

部和齿部受压均匀和减少压板厚度，铁芯除固定在定位筋上外，在铁芯内还穿有轴向拉紧螺杆，再用螺母紧固在压板上。由于穿芯螺杆位于旋转磁场中，各螺杆内会感生电动势，因此必须防止穿芯螺杆间短路形成短路电流，这就要求穿芯螺杆和铁芯相互绝缘，所有穿芯螺杆端头之间也不得有电的联系，结构见图 1-3 (c)。

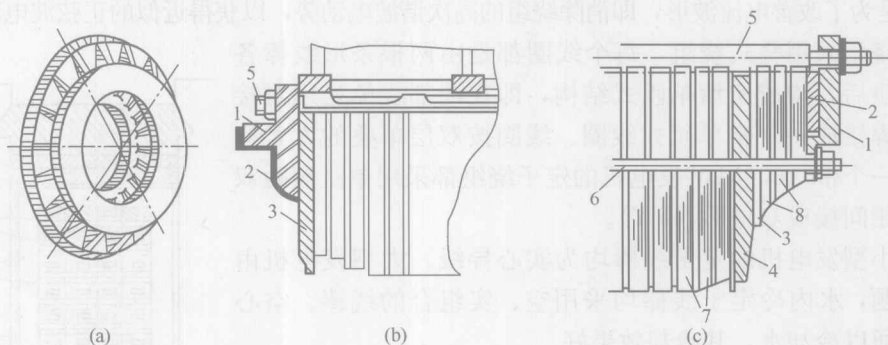


图 1-3 压圈、压指、穿芯螺杆及端部固定

(a) 压圈；(b) 端部铁芯固定；(c) 穿芯螺杆结构

1—压圈；2—电屏蔽；3—压板；4—压指；5—定位筋；6—穿芯螺杆；7—端部铁芯；8—磁屏蔽

汽轮发电机的铁芯端部的发热问题比较突出。汽轮发电机与水轮发电机相比，定子铁芯直径小，极对数少，线圈节距大，导致定子绕组端部长，出口倾角大。同时由于线负荷大、磁密高，故端部漏磁大，且形成一个旋转的漏磁场。转子端部也有一个随转子旋转的漏磁场。两者合起来仍以定子漏磁场占主导地位。

端部漏磁场的分布情况比较复杂。它随电机结构、材料、距离，带负载的情况不同而不同。例如在滞后功率因数运行时，定子和转子的合成磁通相互削弱；而在超前功率因数下运行时，两者合成磁通相互加强，端部漏磁就增多，故发电机在进相运行时端部易于发热。端部漏磁总是企图从磁阻最小的路径通过。因此定、转子漏磁通主要集中在压圈内圆、压指和端部最边缘段铁芯的齿部，导致这些部位附加损耗增大，局部温度升高。为了减少铁芯端部

漏磁和发热,靠两端的铁芯段均采用阶梯形结构,即铁芯端部的内径由里向外是逐级扩大的。此外还在压圈内圆及外侧漏磁较集中的部位加装环形电屏蔽(又称铜屏蔽),利用铜屏蔽内的涡流阻止漏磁进入压圈的内圆,以防止压圈局部过热。

大容量汽轮发电机定子端部铁芯及其附近金属部件的发热问题已成为近年来电机制造行业重点研究的课题,运行与维护中也应给予足够的重视。

四、定子绕组

1. 发电机定子绕组电路原理

从原理上看,大型同步发电机有三个绕组,转子上有励磁绕组与阻尼绕组,另外就是定子绕组。定子绕组分为三相(Ax、By和Cz),见图1-4。

定子三相绕组嵌放在定子槽中,它们在布局上应相差120°电角度,以便在转子旋转时产生互差120°相位差的电动势。实际上,大型汽轮发电机的定子绕组并不是

集中在一个槽内,而是分布在整个定子的内表面上,以利于散热和充分利用空间。因而沿电枢圆周单位长度上的电流值就被定义为定子线负荷,它是设计汽轮发电机的重要参数。

2. 水内冷定子绕组结构

大容量发电机定子绕组和一般交流发电机定子绕组的共同点,都是采用三相双层短距分布绕组,目的是为了改善电流波形,即消除绕组的高次谐波电动势,以获得近似的正弦波电动势。

定子绕组采用叠式绕组,每个线圈都是由两根条形线棒各自做成半匝后,构成所谓单匝式结构,即在端部线鼻处用对接或并头套焊接成一个整单匝式线圈。线圈按双层单叠的方式构成绕组的一个带。600MW发电机的定子绕组都采用单匝短距双层叠绕,相间接成双星形(YY)。

中、小型发电机的定子线棒均为实心导线。大型发电机由于散热问题,水内冷定子线棒均采用空、实组合的线棒。空心导线可以通以冷却水,其冷却效果好。

水内冷定子绕组线棒采用聚脂玻璃丝包绝缘实心扁铜线和空心裸铜线组合而成。一般由一根空心导线和2~4根实心绝缘扁线编为一组,一根线棒由许多组分成2~4排构成。国产600MW发电机定子线棒空心、实心导线的组合比为1:2。图1-5所示为一种典型的水内冷定子线棒在定子槽中的断面。

为了抑制趋表效应,使每根导体内电流均匀,减少直线及端部的横向漏磁通在各股导体内产生环流及附加损耗,线棒各股线(包括空心线)要进行换位。大容量电机定子线棒一般采用540°换位,如国产600MW汽轮发电机的定子线棒就采用直线部分进行540°编织换位。

3. 定子绕组绝缘

绝缘对发电机的造价和寿命有直接的影响,也是关系发电

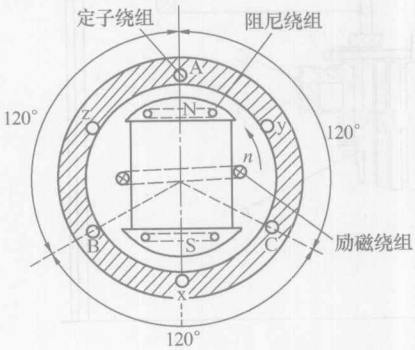


图 1-4 同步发电机电磁原理图

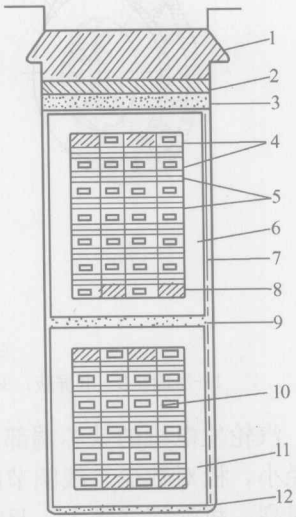


图 1-5 水内冷定子线棒断面
1—槽楔; 2—滑动模块; 3—填充物; 4—空心导线; 5—实心导线; 6—对地绝缘; 7—侧面填充物; 8—互换垫片; 9—填充物(埋电阻温度检测器); 10—排间隔物; 11—对地绝缘; 12—槽底填充物

机能否在额定电压下长期正常运行的一个重要因素，尤其对大容量、高电压、大电流汽轮发电机就更为重要。发电机在运行中，绝缘长期处于高温、高压、强电场、交变的电磁力和复杂的机械力作用下，它是一个较易出问题的薄弱部位。从发电机运行中所发生的各种事故来看，由绝缘损坏引起的事故比例还是不少的。因此，必须合理选择绝缘材料，保证结构设计和制造工艺的质量，在运行中也应切实加强绝缘的监督和维修工作。

对发电机的绝缘材料有多方面的要求，具体如下：

(1) 在电气性能上，应具有高的耐电场强度能力和小的介质损失，不仅如此，另一个重要方面是耐电晕引起的电腐蚀。运行中，为了掌握绝缘性能，及早发现绝缘缺陷，防止事故，必须进行规定的预防性试验、加强定期检查和维修。

(2) 在机械性能上，应具备高的机械强度、弹性和韧性。发电机在运行中，槽部和端部绕组经常受到交变电磁力的作用，当发生突然短路时，所受到的冲击力比正常运行时要大好几十倍，当温度变化时，绝缘还要受到拉伸和压缩的热应力。因此绝缘层应有一定的厚度，线棒应有一定的刚度，线圈在定子槽部和端部都应很好地固定。

(3) 应具有高的耐热性和良好的导热能力。运行中的定子和转子导体都是发热体，引起电机温升，绝缘材料的温度过高会加速其老化。按耐热能力通常将绝缘材料分为七级，即 O、A、E、B、F、H、C 等，它们对应着不同的最高许可温度，见表 1-1。绝缘处于表 1-1 中所列最高温度之内，发电机可以长期运行，超过该温度发电机绝缘寿命将随温度按指数规律缩短，如 A 级绝缘在高于许可温度 8~10℃ 持续运行，就会使其绝缘寿命缩短一半。

(4) 从大气污染和发电机工作环境考虑，绝缘材料应具有耐油、耐潮、耐化学腐蚀的能力。相应地说，应在运行中尽可能降低发电机冷却氢气的粉尘和水分的含量。

表 1-1 各种等级绝缘材料的最高许可温度

绝缘级别	O	A	E	B	F	H	C
最高许可温度 (℃)	90	105	120	130	155	180	180 以上

发电机定子绕组绝缘包括线棒的主绝缘以及股间绝缘、排间绝缘、换位部位的加强绝缘等。

主绝缘是指定子导体和铁芯间的绝缘，亦称对地绝缘或线棒绝缘。主绝缘是线棒各种绝缘中最重要的一种绝缘，它是最易受到磨损、碰伤、老化和电腐蚀及化学腐蚀的部分。根据槽部与端部是否采用同一结构，主绝缘分为连续绝缘和复合绝缘两种。目前世界上大型发电机多数采用环氧粉云母带连续绝缘，表面有防电晕措施，其优点是耐潮性高、老化慢，电气、机械及热性能好，但耐磨和抗电腐蚀能力较差。

五、定子绕组的水路连接与水电接头

1. 定子绕组的水路连接

发电机内设有进水母管和出水母管。按每匝线圈进出水方式及其两半匝线棒的水流方向，定子绕组的水路连接可分两种形式：串联双流水路和并联单流水路。两种水路连接形式如图 1-6 所示。

600MW 汽轮发电机都采用后一种方案。并联单流水路，即一个线圈两条水路。每半匝线棒为一条水路，故又称为半匝水路。由于这种水路的进水和出水母管分别布置在电机内的励磁侧和汽轮机侧，故又称这种水路为双边进出方式。这种方案水路短、水压降小、进水压力低

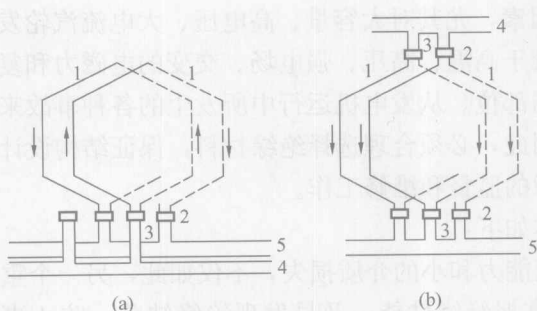


图 1-6 定子绕组内冷水路连接方式

(a) 串联双流水路；(b) 并联单流水路

1—空心导线；2—水电接头；3—绝缘水管；
4—进水管；5—出水管

目前，国内外一些水冷定子绕组的水电接头不尽相同，主要可分为三种类型。

第一种类型如图 1-7 所示。一个绕组的上层、下层线棒端的鼻部，将两线棒的多股实心导线分别弯曲，用银焊焊在一起，构成两线棒实心导线电的通路。鼻端两线棒的空心导线抽出向同一方向弯曲，各自焊在一起后，放入各自的水接头盒内封焊，然后将两个水接头通过一段铜管连至三通接头，构成空心导线电的通路，三通接头再经绝缘引水管接至水母管。这类水电连接的特点是，结构简单可靠、易于装配和检修。我国目前水电接头以及美国西屋公司等均有与此类似结构。

第二种类型如图 1-8 所示。绕组上层、下层线棒鼻端通过导电并头套把两线棒的空心与实心导线一起套住，套内线棒间用导电的斜楔楔紧，保持电的良好通路。每根线棒的端头伸出并头套外，伸进各自的水接头盒（导电并头套）进行封焊。两个线棒的水接头各自经绝缘引水管接至进或出水母管。这种水电连接的待点是：水、电完全分家，水接头完全不导电；接头部位的股线不会发生不填实问题，运行中断股的可能性基本不存在。

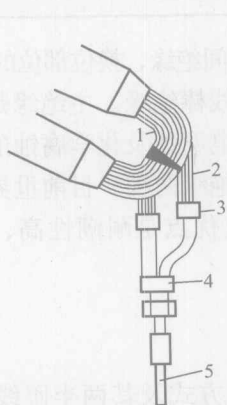


图 1-7 定子绕组水电接头图（一）

1—实心导线；2—空心导线；3—水接头；
4—三通接头；5—绝缘引水管

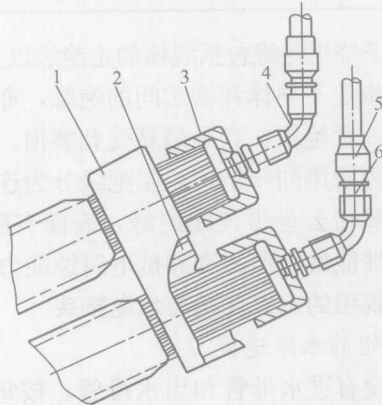


图 1-8 定子绕组水电接头图（二）

1—导电并头套；2—导电楔块；3—水接头盒；
4、5、6—接头零件

第三种类型如图 1-9 所示。水电并头套（水套）上除焊有与引水管连接的接头外，还焊有一组长短依次排列的导电片。每根线棒空心 and 实心导线分成两排，中间填放一块斜楔，并

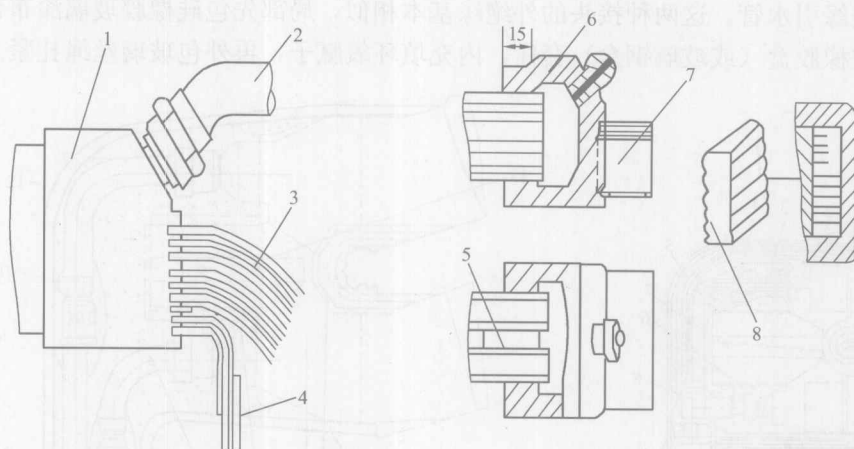


图 1-9 定子绕组水电接头图（三）

1—水电并头套（水套）；2—引水管；3、7—导电片；4—搭接；
5、8—斜楔；6—水套

排放进水电并头套内，楔紧后封焊。焊在水电并头套上的导电片，经弯曲与另一线棒端的并（接）头套上的导电片逐一焊接成电的通路。这种水电接头具有轴向长度短、结构简单、嵌线后装配方便等优点。但水接头焊接工艺要求高，加热后用银或锡焊接，严防内孔堵塞。这种水电接头与前述的水电接头的主要区别是线圈的全部电流都流经水套。国内外许多大容量水冷定子绕组的电机采用这种类型的水电接头。例如日立公司 600MW 水氢氢汽轮发电机定子绕组的水电接头就完全与此类似，如图 1-10 所示。

我国引进考核型和国产优化型 600MW 汽轮发电机定子绕组的水电接头也属此类结构，所不同的是上下线棒两个水电接头套上的导电铜排是相互靠拢后放入铜并头套内，两组铜排间打入双斜楔并用销子销住双斜楔，保持电的良好通路。其结构图分别如图 1-11 和图 1-12 所示。

图 1-11 中水接头连接部件（水接头至三通接头）都是有电流流通的，故称为水电合一水接头。图 1-12 中水接头的连接部件（水接头盒至绝缘引水管）是不流通电流的，故又称其为水电分家水接头。但需

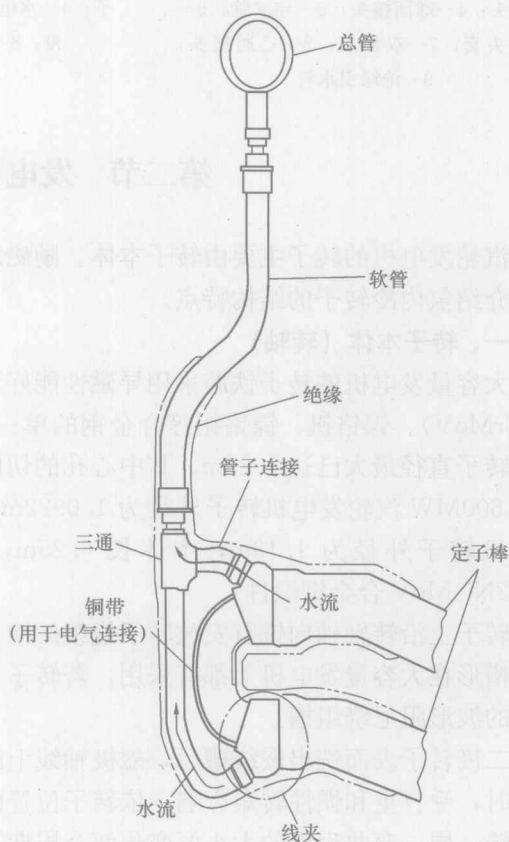


图 1-10 日立公司 600MW 发电机定子绕组水电接头

多用一根绝缘引水管。这两种接头的外绝缘基本相似，局部先包硅橡胶玻璃漆布带，然后采用两半片硅橡胶盒（或玻璃钢盒）套住，内充填环氧腻子，再外包玻璃绳扎紧。

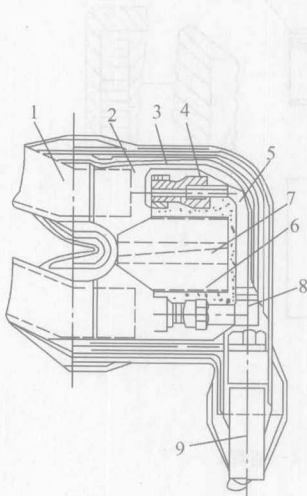


图 1-11 水电合一接头与绝缘

1—空、实心导线；2—水电接头套；3—水接头；4—球面接头；5—导水管；6—铜并头套；7—双斜楔；8—三通接头；9—绝缘引水管

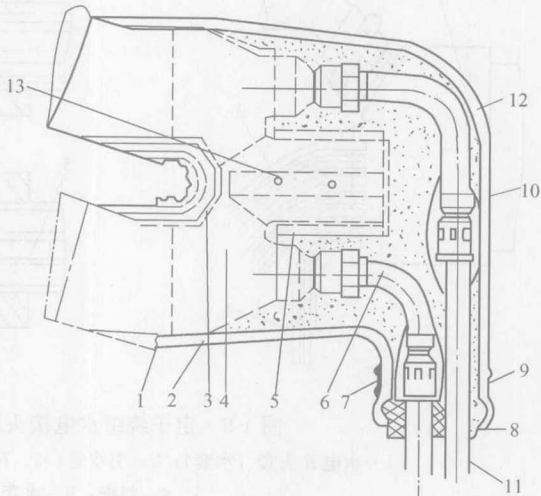


图 1-12 水电分家接头并头绝缘

1、9、10—玻璃绳；2、12—玻璃钢绝缘盒；3—环氧腻子；4—水电接头盒；5—铜并头套；6—不锈钢管；7—绝缘带；8—橡胶密封套；11—绝缘引水管；13—楔销

第二节 发电机的转子结构

汽轮发电机的转子主要由转子本体、励磁绕组、护环、中心环和风扇等组成。本节内容主要介绍氢内冷转子的结构特点。

一、转子本体（转轴）

大容量发电机的转子铁芯采用导磁性能好和机械强度高的优质合金钢锻件，如镍铬钼钒（NiCrMoV）、镍铬钒、镍铬钼等合金钢的单一锻成体，经校验合格后，加工制成。汽轮发电机转子直径最大已达 1.25m，其中心孔的切向应力已接近目前锻件允许应力的极限。我国引进 600MW 汽轮发电机转子外径为 1.0922m，本体长 5.893m。国产优化型 600MW 汽轮发电机转子外径为 1.13m，本体长 6.25m，总长 12.025m，重量为 72t，转轴材料为 26Cr2Ni4MoV 合金钢锻件。

转子上沿转轴轴向铣有安放转子绕组的槽。转子槽形有矩形槽、梯形槽、阶梯形槽，这三种槽形在大容量发电机上都有采用。若转子上装设阻尼绕组，大齿极面上铣有和转子槽距相等的波形阻尼绕组槽。

二极转子表面铣出嵌线槽后，磁极轴线上大齿部分刚度比极间开槽区内的大，当转子旋转时，受自重和惯性转矩影响，依转子位置的不同，转轴弯曲程度（挠度）也不相同。转子每转一周，弯曲程度的大小要变化两个周期，将产生双倍频振动。对大型的细长转子，为此常在大齿表面上沿轴铣出一定数量的圆弧形横向月牙槽，使大齿区域和小齿区域两个方向