

- 125/135MW 火力发电机组技术丛书

发电机及电气系统

熊信银 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



编 委 会

主任委员：唐必光

副主任委员：潘 笑 熊信银 胡念苏 周柏青 朱全利

委 员：（以姓氏笔画为序）

王建梅 卢理成 叶信芳 刘 勇 刘克兴 朱全利

余艳芝 吴耀武 张世荣 张国忠 李正奉 杨德先

陈志和 周柏青 罗 嘉 苗世洪 胡念苏 唐必光

夏中明 喻红梅 谢建君 谢诞梅 熊立红 熊信银

樊天竞 潘 笑

前 言

我国的火力发电机组正朝高参数、大容量方向发展,但125MW机组由于具有较好的经济性和运行性能,在火力发电厂仍占有一定比例。在发展过程中,通过对汽轮机通流部分的改进,又形成了135MW系列。为满足广大技术人员和现场生产人员对了解125/135MW系列火力发电机组结构、运行、控制知识的需要,我们组织人员编写了这套《125/135MW火力发电机组技术丛书》。本丛书包括《燃煤锅炉机组》《汽轮机设备及其系统》《电厂化学》《热工控制系统》《发电机及电气系统》五个分册。

本书可供从事125/135MW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,亦可供高等院校有关专业师生参考。

《发电机及电气系统》分册系统地介绍了火力发电厂发电机及电气系统方面的有关知识,内容包括汽轮发电机的基本原理、结构、特性、运行维护及主要故障的处理,汽轮发电机的励磁系统,电力变压器、高压断路器、电气主接线、厂用电接线、二次接线及直流系统,发电机、变压器、母线和线路的保护配置及其设备等。

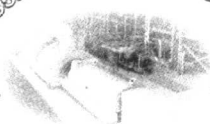
本分册由华中科技大学熊信银主编,参加编写的有吴耀武(第一章),杨德先(第二章)、熊信银(第三章)、苗世洪(第四章)。娄素华、余欣梅也参加了部分编写工作。

本书由湖南省电力公司王家红高级工程师主审,王家红高级工程师对全书进行了认真的审阅,并提出了不少宝贵意见和建议。在本分册编写过程中,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、设计院、发电厂和高等院校编写的说明书、讲义、图纸和运行规程等技术资料。在此,一并谨表诚挚感谢。

由于部分设备所收集厂家资料不全,加之编者水平有限,错漏之处难免,敬请读者批评指正。

编者

2003.9



目 录

前言

第一章 汽轮发电机	1
第一节 概述	1
第二节 双水内冷汽轮发电机的基本构造	4
第三节 汽轮发电机的启停和维护	13
第四节 汽轮发电机的运行方式	20
第五节 汽轮发电机的主要故障及其处理	26
第二章 汽轮发电机的励磁系统	37
第一节 励磁系统概述	37
第二节 交流励磁机系统	43
第三节 硅整流装置	53
第四节 同步发电机灭磁及转子过电压	65
第五节 自动励磁调节器	74
第三章 电气一次系统及设备	94
第一节 电力变压器	94
第二节 高压电器	113
第三节 电气主接线和厂用电接线	156
第四节 二次接线及控制	172
第五节 直流系统	193
第四章 继电保护配置及设备	210
第一节 125MW 汽轮发电机继电保护	211
第二节 电力变压器继电保护	247
第三节 母线继电保护	263
第四节 线路继电保护	271
参考文献	287

汽 轮 发 电 机

汽轮发电机是现代发电厂的主要设备之一，它同锅炉和汽轮机统称为火力发电厂的三大主机。在电力系统中，交流电能几乎都是由同步发电机发出的。1958年上海电机厂自行设计制造出世界上第一台双水内冷的12MW汽轮发电机，1969年制造出第一台双水内冷的125MW汽轮发电机，至1999年，全国累计安装的125MW汽轮发电机有140多台。因此，本章以125/135MW汽轮发电机为主，介绍同步发电机的工作原理、基本构造和运行方式等。

第一节 概 述

在电力系统中，几乎所有的发电机，例如汽轮发电机、水轮发电机、核能发电机、燃气轮发电机及太阳能发电机等都属同步发电机。同步发电机和其他电机一样，工作是可逆的。它既可以作发电机用，又可作电动机用，还可以用作补偿机，但主要是作发电机使用。

一、同步发电机的工作原理

同步发电机是利用电磁感应原理将机械能转换成电能的设备，其工作原理如图1-1所示。由图可见，同步发电机有定子和转子两大部分，定子部分主要由定子铁心和绕组组成，分为A、B、C三相，各相绕组均匀地分布在定子槽中；转子部分由转子铁心和励磁绕组组成，绕组通以直流电，建立发电机的磁场。当转子由原动机（如汽轮机）带动旋转时，产生旋转磁场，定子绕组（导线）切割转子磁场的磁力线，就在定子绕组上感应出电动势，当定子绕组接通用电设备时，定子绕组中即产生三相电流，发出电能。

在定子绕组上感应产生的交流电动势的频率为

$$f = pn_s/60 \quad (1-1)$$

式中： p 为电机的极对数； n_s 为转子每分钟的转数，r/min。

当发电机的极对数、转速为一定时，其产生的交流电动势的频率是一定的。

如果同步发电机作电动机运行，必须在定子绕组加以三相交流电源，电机内部便产生一个旋转磁场。这时转子绕组加直流励磁，则转子将在定子旋转磁场的带动下，沿定子磁场的方向以相同的转速旋转，转子的转速仍由式(1-1)决定，即

$$n = n_s = 60f/p \quad (1-2)$$

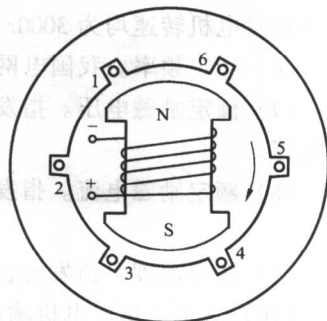


图 1-1 同步发电机的工作原理

1~6—定子绕组；N、S—分别为转子磁极的北极、南极

由上两式可见，同步电机无论是作为发电机使用，还是作为电动机使用，其转速和交流电频率之间都将保持严格不变的关系，也就是说，电枢磁动势为一同步旋转的旋转磁动势，它与转子同速同方向旋转，定子和转子磁动势之间保持相对静止并产生恒定的电磁转矩。同步电机在恒定频率下的转速恒为同步速度，是同步电机和感应电机的基本区别之一。

我国电力系统规定以 50Hz 作为标准频率，如果发电机有 1 对磁极时，其额定转速为 3000r/min；有两对磁极时，其额定转速为 1500r/min；余此类推。习惯上称此转速 n_s 为同步转速。

二、同步发电机的类型

同步发电机因用途不同，结构也相差甚大，一般可按其原动机的类别、本体结构和安装方式等进行分类。

(1) 按原动机的类别，同步发电机可分为汽轮发电机、水轮发电机、燃气轮发电机及柴油发电机等。

(2) 按冷却介质，可分为空气冷却、氢气冷却和水冷却等。

(3) 按主轴安装方式，可分为卧式安装和立式安装等。

(4) 按本体结构，可分为旋转电枢式和旋转磁极式等。

同步发电机的结构，主要是由原动机的特性决定的。如汽轮发电机，由于转速高达 3000r/min，故极对数少，转子采用隐极式，卧式安装；水轮发电机由于转速低（一般在 500r/min 以下）故其极对数多，转子采用凸极式，立式安装。

三、同步发电机的主要技术数据

为使发电机按设计技术条件运行，在发电机出厂时都在其铭牌上标注出额定技术数据。这些额定技术数据主要有：

(1) 额定容量（或额定功率）。额定容量是指发电机在设计技术条件下运行时输出的视在功率，用 $kV \cdot A$ 或 $MV \cdot A$ 表示；额定功率是指发电机输出的有功功率，用 kW 或 MW 表示。

(2) 额定定子电压。指发电机在设计技术条件下运行时，定子绕组出线端的线电压，用 kV 表示。

(3) 额定定子电流。指发电机定子绕组出线的额定线电流，单位为 A 。

(4) 额定功率因数。指发电机在额定功率下运行时，定子电压和定子电流之间允许的相角差的余弦值，即 $\cos\varphi$ 值。

(5) 额定转速。指正常运行时发电机的转速，用 r/min （每分钟转数）表示。我国生产的汽轮发电机转速均为 3000r/min。

(6) 额定频率。我国电网的额定频率为 50Hz（即每秒 50 周）。

(7) 额定励磁电压。指发电机励磁电流达到额定值时，额定出力运行在稳定温度时的励磁电压。

(8) 额定励磁电流。指发电机在额定出力时，转子绕组通过的励磁电流，用 A 或 kA 表示。

(9) 额定温度。指发电机在额定功率运转时的最高允许温度（ $^{\circ}C$ ）。

(10) 效率。指发电机输出与输入能量之比百分值，一般额定效率在 93% ~ 98% 之间。

例如，我国生产的 125MW 汽轮发电机的主要技术数据如下：

型号

QFS-125-2

额定容量/额定功率 (MV·A/MW)	147/125
额定定子电压 (kV)	13.8
额定定子电流 (A)	6150
额定功率因数 ($\cos\varphi$)	0.85
额定转速 (r/min)	3000
磁极	1 对
额定频率 (Hz)	50
额定励磁电压 (V)	265
额定励磁电流 (A)	1650
定子线圈温度 (°C)	90
效率 (%)	98.35
绝缘等级	B
接线方式	Y
励磁方式	他励
冷却方式	双水内冷及空冷
定子线圈冷却水平均温升 (°C)	不大于 40

· 四、汽轮发电机的发展概况

从 1882 年世界上第一个小型发电厂问世, 仅经过了一个世纪的时间, 世界就进入了电气化时代, 从社会生产到人类的生活都已离不开电能。电力工业的发展, 也促进了发电机等电力设备制造技术的迅速发展。1949 年前我国基本没有制造汽轮发电机的能力, 1952 年制造出空冷 3MW 汽轮发电机, 1958 年自行设计制造出世界上第一台双水内冷的 12MW 汽轮发电机, 这在世界电机制造业上亦可谓开创了先河。时隔 11 年, 制造出双水内冷的 125MW 汽轮发电机, 仅隔 3 年, 于 1972 年试制成功我国第一台 300MW 汽轮发电机, 即双水内冷 QFS-300-2 型, 1987 年采用引进技术制造出我国第一台 600MW 汽轮发电机。近 10 多年来, 我国电力系统单机容量不断增大, 至 1999 年全国累计安装 300MW 火力发电机组有 160 多台, 已成为电力系统的主力机组, 600MW 的机组也已进入一些大型电力系统。理论分析和运行实践表明, 大容量机组有如下优越性:

(1) 可降低发电机的造价和材料的消耗量。如一台 600MW 机组的单位材料消耗是一台 100MW 机组的 60% 左右。

(2) 可降低电厂的基建安装费。若以 200MW 机组单位安装费为 100%, 则 500MW 机组的单位安装费只需 85% 左右。

(3) 可降低运行费用。由于大容量机组实行微机监控, 自动控制功能大大提高, 运行人员和装置的减少, 从而降低了运行和维护费用。

发电机单机容量的增大并非轻而易举, 它受到许多因素的制约, 因为发电机的单机功率表达式为

$$P = KABD^2nl \quad (1-3)$$

式中: K 为常数; A 为定子线负荷, A/mm; B 为气隙磁通密度, T; D 为定子内径, m; n 为额定转速, r/min; l 为定子铁心有效长度, m。

由式 (1-3) 可看出, 要提高发电机的单机容量, 必须提高上式右侧 6 个因子的数值。

一般地讲, 常数 K 与转速 n 不可能大幅度提高。

提高发电机的容量主要靠增大 D 和 l 来实现, 目前转子用 Cr-Ni-Mo-V 合金钢, 二极转子外径仅能做到 1300mm 左右。转子长度受刚度限制, l/D 要在 6.5 以下, 否则转子挠度过大, 转子临界转速下降, 不平衡磁拉力增大, 易引起较大的振动。由于转子尺寸受到冶金技术条件限制, 不可能任意加大, 因此必须提高电磁负荷 (气隙磁通密度 B 和定子线负荷 A 的乘积) 才能进一步提高发电机的容量, 这主要依靠: ①采用半导体整流励磁; ②改进绝缘材料的性能和工艺; ③改进冷却技术, 其中通过改进冷却技术提高线负荷有较大的潜力。简单比较如下:

(1) 全氢冷。定子和转子绕组用氢表面冷却或内冷, 定子铁心氢冷。通常 200MW 以上定、转子都采用氢内冷。最大单机容量已达 880MV·A。

(2) 水氢氢。定子绕组水内冷, 转子绕组氢内冷, 定子铁心氢冷, 其单机容量可达 1200MW, 大型发电机广泛采用这种冷却方式。

(3) 水水空。定子和转子绕组水内冷, 定子铁心空气冷却, 又称双水内冷。最大单机容量已达 600MW。

(4) 水水氢。定子和转子绕组水内冷, 定子铁心氢冷。最大单机容量已达 1700MV·A。

(5) 全水冷。定子和转子绕组以及定子铁心均采用水冷, 目前最大单机容量已达 1200MW。

在发电机技术发展的进程中, 产品不断更新、技术日新月异。为了优化发电机性能, 提高发电机的综合经济指标, 增进整个电力系统的可靠性, 便于运行和维护, 新的突破性技术正在世界各大制造公司加紧推进, 其主要研究开发专题有:

(1) 高电压发电机, 直接与 30 ~ 400kV 电网联结。

(2) 全液冷发电机, 定子、转子绕组及铁心全部采用单一液体冷却介质 (水或油) 冷却, 取消氢气系统。全水冷却单机极限容量可提高到 2000 ~ 3000MW, 但结构复杂, 工艺要求高。

(3) 超导发电机, 转子励磁绕组采用以液氦或液氮作冷却介质的超导导线构成, 使励磁绕组产生高的气隙磁密, 而定子电枢则采用无槽铁心, 定子绕组置于气隙中或定子绕组采用水内冷, 可将单机极限容量提高 3 倍, 即达到 3600MW。

第二节 双水内冷汽轮发电机的基本构造

一、双水内冷汽轮发电机

运行中的汽轮发电机, 线圈和铁心等都要发热, 它所产生的热量和发电机的输出功率有密切的关系, 输出功率愈大, 发热量也愈多, 这样会使发电机的绝缘温度过高而超过允许值。因此, 必须加以有效的冷却。发电机冷却效果愈强, 带走的热量愈多, 则发电机输出的功率就愈大。发电机的冷却能力, 在一定程度上反映了其出力大小。我国水内冷技术的应用, 为发电机的发展开辟了一条新的道路。由于水的冷却能力比空气大 50 倍, 因此发电机定子绕组、转子绕组采用了水内冷后, 可以大幅度地提高发电机的出力。

从空气、氢气表面冷却到导体内部用水直接冷却, 每一次冷却技术的突破都是发电机发展史上的一个里程碑。最初的发电机是用空气表面冷却的。1937 年美国通用电气 (General

Electric, GE) 公司首次制造了氢气表面冷却的发电机, 1951 年美国阿里斯·查摩 (Allis Chalmers, AC) 公司制造了第一台 60MW 转子氢内冷的发电机, 1956 年英国茂伟 (Metropolitan Vickers, MV) 公司制造了第一台 30MW 定子线圈用水在内部直接冷却的发电机, 1958 年中国上海电机厂制成了第一台定子和转子绕组都用水在内部直接冷却的 12MW 双水内冷汽轮发电机。此后上海电机厂生产的 50MW、60MW、125MW、135MW、150MW、300MW 汽轮发电机也采用这种冷却方式。1966 年德国开始试制一台 100MV·A 的双水内冷发电机, 其后瑞典、瑞士相继制造大型的双水内冷发电机, 单机容量已达 1300MW (四极半速发电机)。

双水内冷发电机的特点是定、转子绕组都由水直接接触冷却, 铁心部分采用空冷, 水源一般采用凝结水, 通过特定的水回路达到冷却定子绕组和转子绕组的目的, 取得较理想的冷却效果。除了通水回路需要特殊的结构外, 其余部分如铁心等和空冷发电机的对应部分相似。

二、双水内冷汽轮发电机的基本构造

发电机的主要结构是由一个不动的定子和一个可以转动的转子组成的, 为了避免发电机在运行时过热, 还有一套合适的冷却设备。图 1-2 为双水内冷汽轮发电机的整体图。

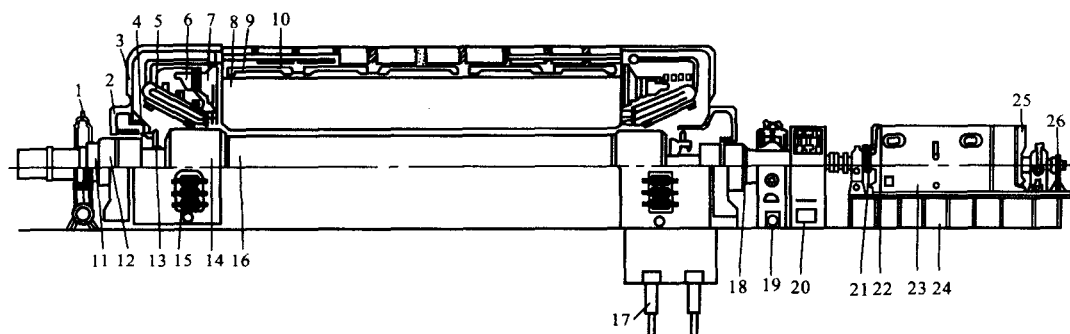


图 1-2 双水内冷汽轮发电机整体图

1—出水支座; 2—外端盖; 3—内端盖; 4—挡风圈; 5—定子线圈; 6—定子线圈支架; 7—定子端部; 8—定子铁心; 9—弹簧支持钢板; 10—风道; 11—出水箱; 12—小护环; 13—风叶; 14—大护环; 15—定子端盖窥视窗; 16—转子本体; 17—定子引出线; 18—进水箱; 19—轴承支座; 20—刷架装配; 21—100Hz 主励磁机滑环; 22—主励磁机小端盖; 23—100Hz 主励磁机; 24—主励磁机支座; 25—主励磁机大盖; 26—转子进水支座

(一) 发电机定子

发电机的定子结构主要包括机座、定子铁心、端盖、定子绕组、进出冷却水的特殊结构及运行监视装置等部分, 现分述如下。

1. 机座

汽轮发电机的机座主要是支撑和固定铁心等部件用的, 整个铁心是通过它安装并固定在基础上, 而且还设置作为有效冷却铁心用的风道和风室。为了减少大机组定子铁心垂直方向自重的振动、双倍频率磁拉力的振动、突然短路时交变力矩扭转振动等的影响, 机组铁心与机座之间不是直接连接, 而是通过隔振弹簧钢板连接在机座上。

对于机座的要求, 除了使安装运输方便以外, 还需要有足够的强度和刚度。所谓强度就是机组要能承受铁心、绕组等重量, 并且在起吊时不致损坏, 运行时能承受可能发生的最大应力; 所谓刚度则是指它受力变形的程度, 要求在发电机运行时不会产生超过容许的变形和

振动。

2. 定子铁心

同步发电机的定子铁心是圆环形，在它的内圆部分，有放置线圈的槽。为了减少同步发电机运行时的损耗和发热，电枢铁心采用高磁率优质冷轧硅钢片，硅钢片厚度为 0.35mm，硅钢片的两面涂以硅有机绝缘漆，这种漆可长期运行在 180℃ 的高温下。

例如，125MW 发电机的定子铁心采用 0.35mm 硅钢片压装组成，有效长度为 3450mm。铁心内圆的径向均匀地分布嵌线槽 42 个，轴向为了满足通风要求分为 50 档，两端用无磁性钢压圈，以螺栓紧固在机座上，端部没有采用磁屏蔽或电屏蔽。为解决端部漏磁引起压圈发热问题，沿压圈宽度圆周的平面及斜面上嵌入 $14\text{mm} \times 14\text{mm} \times \delta 2.5\text{mm}$ 方铜管六排通水冷却。

3. 发电机端盖

发电机端盖分内外两部分，如图 1-2 所示。内端盖起保护线圈作用，外端盖是冷却风进入发电机的通道。为了便于运行人员的巡回监察，内端盖上开有用有机玻璃制成的窥视窗，可以直接看到定子线圈端部有无异常现象发生。内端盖的上部有一个方形的防爆窗，当机组出现异常情况时，内部的压力气体可以冲破防爆窗的牛皮纸外泄。

端盖与机座之间，有定位销并用螺丝紧紧地固定在机座上，使端盖与机座之间有良好的密封。这样可防止灰尘进入机内堵塞风道而影响散热，同时又防止了机座内冷风的泄漏，提高冷却效果。内外端盖上均装有吊攀，便于起吊。端盖上的金属螺栓是采用环氧玻璃丝布绝缘套管和垫片与机座绝缘的，目的是防止金属螺栓在杂散磁场作用下发热。

4. 定子绕组

发电机的定子绕组是由许多个定子线棒（又称为线圈）连接而成的，每个线棒用铜线制造成后包以绝缘。一根线棒分为直线部分和两个端接部分。直线部分放在槽内，它是切割磁力线而感应电动势的有效边。端接部分起连接的作用，有两个出线头，用作把各个线棒按一定规律连接起来，构成发电机的电枢绕组。

发电机的定子铁心上的布线槽为开口槽，线圈均采用半组式篮形线圈。它是将一个线圈分成两半，嵌入槽中后，再把端接部分焊接起来。

采用半组式线圈所构成的绕组，端接部分接成喇叭口形状。这种形状的绕组，优点是端部损耗小，冷却性能较好，在短路时受力情况也较好，且不易变形。

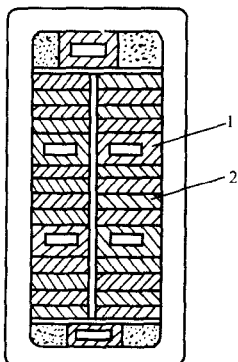


图 1-3 水内冷定子
线棒剖面图

1—空心铜线；2—实心铜线

(1) 定子线棒的结构。水内冷机组线圈的特点是线圈内部直接通水冷却，对于一根线棒来说，既是电的回路，其一部分又是水的通道。线棒的绝缘结构和工艺将对定子线圈的绝缘影响甚大，因此必须同时满足线圈的水冷却和防水的要求。

定子绕组线棒通常以一根空心导线和 2~4 根实心导线为一组，由若干这样的组分两排并列组成，如图 1-3 所示。

如图 1-4 所示，空心铜线的高度一般为 4.5~5.5mm，宽度一般为 7~12mm，内孔高度一般为 2mm，壁厚一般为 1.25~1.5mm。

(2) 定子三相绕组的连接。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。现代大型汽轮发电机的定子绕组并不是集中在一个槽内，而是均匀地分布在整个定子的内表面上，以利于散热和充分

利用空间。

QFS-125-2 型汽轮发电机定子铁心内圆上开有 42 (或 36) 个槽, 每个槽内都嵌有线圈 (又称为线棒)。一根线棒分为直线部分和两个端接部分, 直线部分放在槽内, 它是切割磁力线从而感应电动势的有效边, 端接部分起连接作用, 把各个线棒按一定规律连接起来, 构成发电机的定子绕组。

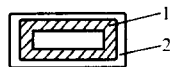


图 1-4 绝缘的空心铜线

1—铜导线; 2—绝缘

该型发电机的定子绕组为三相双层短节距绕组。即每个槽内放有 2 个线棒, 所有绕组的线圈具有同样的尺寸。线圈的一个边放在某槽的上层, 而另一个边则放在另一槽的下层。一个线圈的两个有效边间的齿距称为节距, 用 y 表示; 两个磁极中心线之间的距离称为极距, 用 τ 表示。QFS-125-2 型汽轮发电机有 42 槽, 其中 1 至 21 槽处在 S 极下, 而 22 至 42 槽处在 N 极下, 其极距为 $22 - 1 = 21$ (或 $42 - 21$) 槽, 即 $\tau = 21$ 槽。本机一个线圈的节距为 $y = 19 - 1 = 18$ 槽, $y < \tau$, 短了 3 个槽, 故称为短节距绕组。采用短节距绕组的目的在于节约有色金属和消除发电机电压中的谐波。

已知总槽数 $Z = 42$, 极对数 $p = 1$, 相数 $m = 3$, 则

每极下槽数 $Q = Z / (2p) = 42 / 2 = 21$

每极每相所占槽数 $q = Z / (2pm) = 7$

槽间夹角 $\alpha = p \cdot 360 / Z = 360 / 42 = 8.57^\circ$ (电角度)

相与相间相隔槽数 $n = 120^\circ / 8.57^\circ = 14$

短掉的电角度 $\beta = 3 \times 8.57^\circ = 25.71^\circ$

根据上述参数作出发电机的电动势星形图如图 1-5 所示。

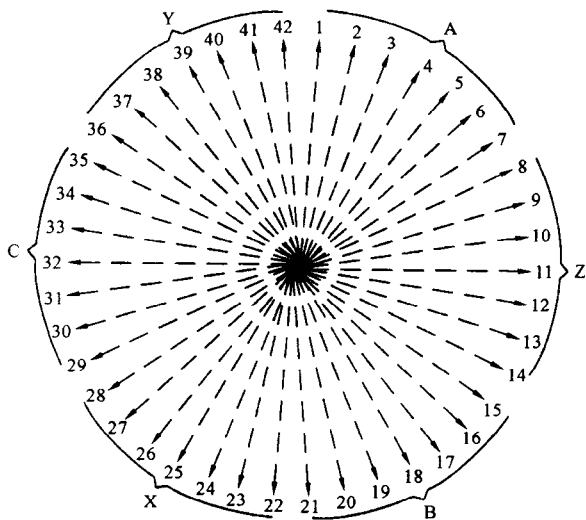


图 1-5 电动势星形图

子线圈由二条支路并联成双 Y 型。

电动势星形图中各相量代表线圈电动势, 亦即由两个线圈边产生的电动势。电动势相量上的数字, 与上层边所占槽号相对应, 同时也代表整个线圈的电动势。放在槽底的下层线圈边, 没有特殊的标号, 因为每一个线圈的节距都是一样的, 当上层边安排正确时, 下层边自然也就正确了。

按照发电机槽的数目, 绕组由 42 个线圈组成, 每相有 14 个线圈, 分成两个组, 每个组有 7 个线圈, 分别处于两个磁极下。从电动势星形图 1-5 中可以清楚地看出, 线圈 1~7 和 22~28 中所感应的电动势, 大小相等, 但符号相反。由于 125MW 发电机容量大, 故定

(3) 定子绕组的冷却水回路。根据散热需要和供水的水压情况, 定子绕组水路系统一般有两种布置方式: 容量较小和铁心较短的发电机, 通常采用一个线圈一条水支路——进、出水在同一端如图 1-6 所示; 容量较大和铁心较长的发电机, 通常采用一个线圈边一条水支路——进、出水各在一端, 如图 1-7 所示。125MW 发电机定子绕组水路系统采用后一种布置方

式。由图可见，总进水管一般从下面进水；总出水管则从上面出水。采用二路进水可使进入线棒各支路的水流流量更为均匀。为了进行耐压试验和测量绝缘电阻，总进、出水管对地应有电气绝缘。采用一个线圈边作为一条水支路时，流速约为 $1 \sim 2\text{m/s}$ ，水压约为 $0.2 \sim 0.3\text{MPa}$ 。

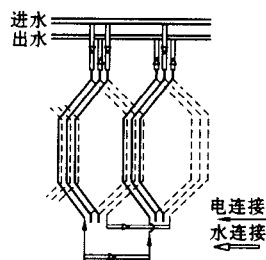


图 1-6 一个线圈一条水支路一进、出水在同一端的定子绕组水电连接示意图

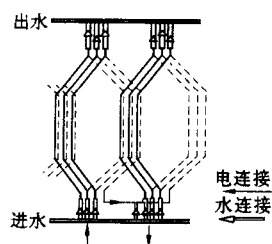


图 1-7 一个线圈边一条水支路一进、出水各在一端的定子绕组水电连接示意图

(4) 定子线圈水接头。定子线圈的水接头有两种结构：一种是将一根线棒的所有空心导线单独抽出，封焊后套上水接头，如图 1-8 所示，其优点是能直接检查空心导线有无堵塞和股线之间的缝隙是否已被焊料填满；另一种是将水接头直接套在线棒头上一次焊接，如图 1-9 所示，在专用设备上施行中频焊接，然后用反光镜对空心导线内孔进行检查，并检查各空心导线之间的流量偏差，以保证无堵塞现象。125MW 定子线圈水接头采用前一种结构，而 600MW 定子线圈水接头采用后一种结构。

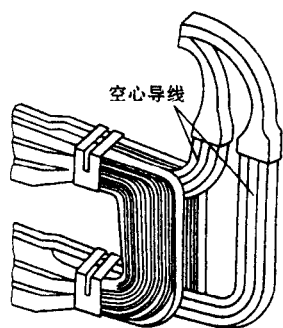


图 1-8 空心导线单独抽出的定子线圈水接头

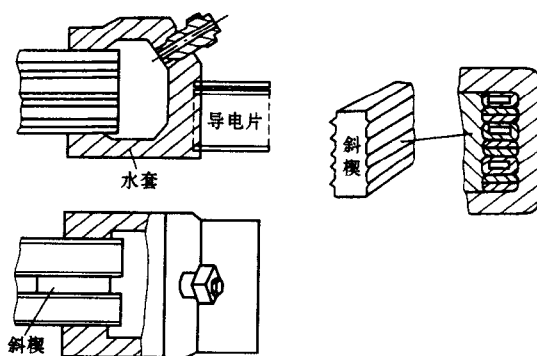


图 1-9 直接套在线棒端头上的定子线圈水接头

(5) 定子线圈绝缘引水管及其接头。定子总进、出水管处于地电位，因此它们与各定子线圈之间须用绝缘引水管连接。目前所用的聚四氟乙烯塑料管，耐击穿电压高，化学性能稳定，耐老化性能优越，但是它的机械性能和耐磨、耐腐蚀性差，因此在结构布置方面，应避免绝缘引水管之间的相互交叉接触，或与金属、胶木等较硬的零部件接触；还应尽量避免过小的引水管弯曲半径，以防止发生管体磨损和凹陷等情况。定子绝缘引水管的长度视发电机的额定电压而异，在 10500V 的电机中，其长度为 300mm 左右，在 13800V 的电机中为 500mm 左右。

定子线圈绝缘引水管与线圈水接头间接头常采用扣压结构和卡套式结构。

5. 其他部件

定子铁心槽底以及每槽线棒之间, 进出风口、轴瓦及进出水等处, 均埋置有测温元件, 以监视发电机的运行情况。

(二) 发电机转子

现代汽轮发电机均为 2 极, 转速为 3000r/min, 因此发电机的转子都采用隐极式。转子的直径由于受到离心力的影响, 有一定的限度, 为了增大容量, 就只能增加转子的长度, 于是转子就形成一个细长的圆柱体。当然转子的长度同样受到转子刚度和振动等影响, 也限制了现代汽轮发电机向大容量发展。

双水内冷发电机的转子线圈直接通水冷却, 因此它除了满足通常转子的电气性能、机械强度方面的要求外, 还必须保证在高速运转下水回路的安全畅通, 因而在制造上对发电机转子的工艺要求更高。

发电机转子是电机的主要部件之一, 它主要由转子铁心、转子励磁绕组、护环以及滑环、风扇等部件组成, 发电机转子本体如图 1-10 所示。

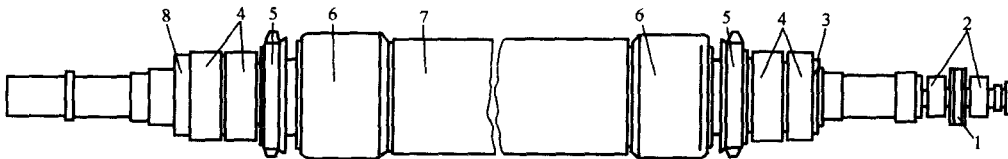


图 1-10 转子本体图

1—风扇; 2—集电环; 3—进水箱; 4—小护环; 5—风扇; 6—大护环; 7—转子; 8—出水箱

1. 转子铁心

汽轮发电机的转子铁心一般是用整个钢锭锻制而成, 它不但要具有良好的导磁性能, 而且还要具有足够的机械强度。发电机转子铁心材料采用优质合金钢, 金加工前需进行周密的材料检查, 不允许有任何结构上的缺陷。转子轴中心沿着轴的方向有一个对穿的中心孔, 这是为了研究中心部分的材料结晶情况及消除中心部分由于锻冶不够而在运转时产生的危险应力。

转子铁心外形如图 1-11 所示, 在铁心上开有两组对称的辐射式槽, 如图 1-12 所示, 转子上对称分布着嵌线槽 32 个。槽与槽之间的部分叫齿。有两个齿特别宽, 称做大齿, 其余的叫小齿。在转子上的槽有两种, 放线圈的叫嵌线槽, 供发电机转子铁心冷却通风用的叫通风槽, 通风槽一般开在大齿的两侧。有些电机为了加强转子的通风, 还在嵌线槽下或小齿上开通风槽。

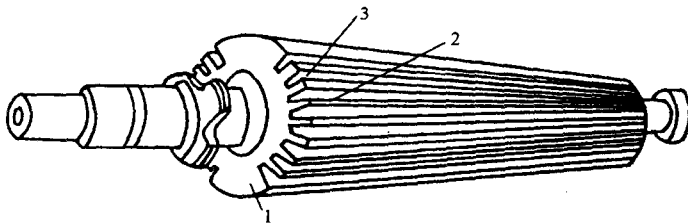


图 1-11 转子铁心外形示意图

1—大齿; 2—小齿; 3—嵌线槽

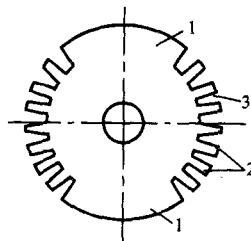


图 1-12 开有辐射式槽的
转子剖面示意图

1—大齿; 2—小齿; 3—嵌线槽

2. 转子励磁绕组

发电机转子磁极有二个，如果每个磁极占有 16 个线槽，安放着 8 个大线圈和 8 个小线圈，整个励磁绕组由 32 个线圈串联组成。这种绕组称为同心式绕组，它是由许多只从小到大的转子线圈组成的，而每一只线圈内又包含有许多匝数。线圈采用内外都为正方形的空心铜线。水内冷转子绕组常采用电路串联、水路并联的方式。

(1) 转子线圈的连接。转子绕组是一个产生磁场的部分。绕组是依次将各槽中的大小线圈的首尾相连而获得整个转子绕组的串联线圈。线圈两端分别通过引线 with 转子同轴的两个滑环相连，距转子绕组远者称为长极滑环，近者称为短极滑环，这样就获得整个转子绕组励磁回路。

(2) 转子水回路。125MW 发电机转子水冷系统是由励磁机端进水、汽轮机端出水循环，将转子导线产生的热量及时带走，使电机绝缘温度控制在允许范围之内，以保证机组的正常运行。线圈与水箱间用绝缘引水管连接，每一线圈为一条水路，共有 28 条水路，为了减少绝缘引水管的数目，便于线圈的电路连接，采用二线圈的水路并联、电路串联的结构。每一线圈的底线或面线，均引至端部的花鼓筒外，与另一线圈焊接在同一水接头上，由此与绝缘引水管相连，冷却水经水接头流至二线圈，而电流则自一个线圈接头流至另一线圈，这样大大减少引水管数目（根据排列，出水引水管为 14 根，进水引水管为 15 根）。

转子绕组水冷系统是由压力为不大于 0.3MPa 水源的冷却水，通过进水支座进入转子中心孔及中心管，在水源压力和转子离心力的作用下，冷却水进入进水箱，如图 1-13 所示。进水箱里面的水在转子离心力作用下，分别流进 15 只进水接头，并经过复合管进入转子线圈的空心铜管内，冷却线棒后又分别进入 14 只出水接头，经复合管和不锈钢接头进入出水箱。出水箱另一侧为对应的 14 个互不相通的出水孔，在转子离心力作用下，出水箱内的水分别从 14 个出水孔中甩出，进入出水支座集水箱，带走了转子热量的冷却水从密封的集水箱流出，从而使转子绕组获得良好的冷却效果。

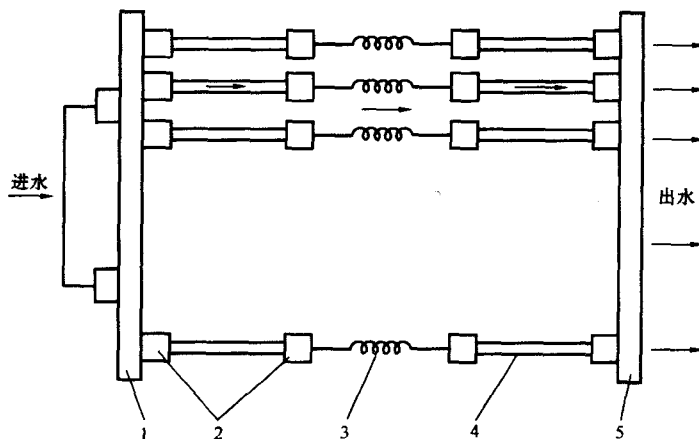


图 1-13 转子线圈水回路示意图

1—进水箱；2—进水接头；3—转子绕组；4—绝缘引水管；5—出水箱

3. 转子护环

发电机在高速旋转时，转子端部线圈受着很大的离心力作用，护环就是用来固定线圈端

部用的，使转子运转时端部线圈不致移动，所以护环应该能承受住很大的离心力即机械应力的作用，同时，还应考虑发电机端部的杂散磁场在护环中引起的发热损耗。转子两端风扇外侧分别有两只小护环，用来固定转子端部水电连接引线。为了避免护环的轴向移动，护环与本体间用突齿搭接。

4. 其他部件

(1) 风扇是供给发电机内部通风冷却用的，一般装在转子的两侧，当转子转动时，风扇使冷却空气吹过线圈和铁心，将热量带走。

(2) 滑环和碳刷是将外部通入的直流电引入转子励磁绕组的装置。滑环（集电环）套在转子轴上，和转子一起转动，它和励磁绕组间有引线连接，而碳刷则是固定的。滑环和碳刷之间为滑动接触，在滑环的表面上开有螺纹，这是为了使碳刷与滑环摩擦而产生的粉末可以沿螺纹方向排出，同时还可以帮助散热。碳刷是发电机中最容易损坏和维护工作量最大的零件。

三、双水内冷系统

发电机在运行过程中，由于产生损耗而发热，使温度升高，直接影响到绝缘材料的使用寿命及电机的安全运行。在大容量发电机中，常常由于发热问题限制了电机出力的增长。所以改进发电机的冷却方式，可以提高电机的电磁负载，使同样的有效材料能做出更大容量的发电机。

一般中、小型同步电机的冷却方式多采用风冷，即用内装风扇或外装风扇方式来冷却。容量略大一些，可以在外面采用通风机来冷却。水轮发电机容量虽很大，但它的直径大、体积大、轴向长度短，其冷却问题相对来说比较容易解决。

大型汽轮发电机的发热问题是比较严重的，尤其是它的转子直径小而轴向长度长，中部的热量不易散出来，所以转子冷却比较困难。

为了提高冷却效率，50MW 以上的汽轮发电机，不用空气冷却，而改用氢气冷却。氢的比热较空气小 14.5 倍，而氢的导热率较空气大 7.4 倍，故氢冷发电机的风阻损耗大为减小，冷却效果比较好，提高了单机容量，但一旦氢气和氧气混合后，具有爆炸的危险性。为了防止爆炸，必须有一套较复杂设备来保证循环的氢流能有一定的纯度，且有一定的压力。

凝结水不但电导率低，化学性能稳定，流动性好，且具有优于气体的良好散热能力，因此是内部冷却电机的较为理想的冷却介质。近十多年来大型同步发电机广泛采用转子氢冷和定子水内冷，以及定、转子都采用水内冷的双水内冷发电机。双水内冷发电机是把导线做成空心的，用凝结水通入导线的内孔来直接冷却导线。水内冷电机结构的特点，除了定、转子绕组与空冷的有些不同外，还多了一套进、出水装置和供水设备。

双水内冷汽轮发电机的冷却水系统如图 1-14 所示。冷却水取自汽轮机的凝汽器，水通入水箱，水箱里的水由水泵打到冷却器里。水从冷却器出来经过滤后分两路，一路通定子，一路通转子。定子绕组的水路是这样的：冷却水通过管道流至机座内固定于端部的进水环，再经绝缘（聚四氟乙烯塑料）引水管流入各空心线圈，带走热量的水从线圈的另一端经绝缘引水管出来，汇集在装于端部的出水环，然后流回水箱，如此反复循环。

为了保证每一线圈有足够的水流量并降低出水温升，总进出水分别装在定子两端，由励磁机端进水，汽轮机端出水。每一水路相当于半个线圈的长度，为保证线圈完全充水，出水管的出口在最高的位置。

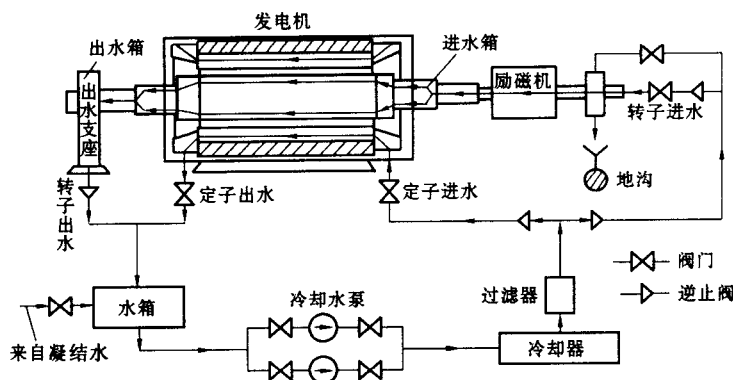


图 1-14 双水内冷发电机的冷却水系统

定子线圈的总进水管用不锈钢管弯制，固定在压圈上，进出水法兰则装在机座外罩板上，并均有与线圈同样的对地绝缘。

上、下层定子线圈的连接，采用水电分开的结构，电路串联，水路并联。每一线圈在罩端之处，将空心铜线全部集中在中间抽出，与特制的连接水管焊接，上、下层线圈的连接水管又合并在一个水管接头上以与绝缘引水管相连，使抽出的空心铜线及连接水管既能通水，又能导电。线圈的实心铜线全部分布在空心铜线的两侧，与另一线圈的实心铜线用气焊逐根对接，作导电用。定子线圈的极间连接引线系采用多根空心铜线组成，所以引线及线圈的连接采用水电合一的方法。

定子线圈的绝缘引水管，采用耐热、耐电、耐腐的聚四氟乙烯塑料管，二端从挤压式的不锈钢接头分别连接在线圈和汇流管的水接头上，并用黄铜螺帽拧紧。因为每一绝缘引水管与上、下层两线圈的水路相连，因此进出水的绝缘引水管仅为水路的一半，每端的绝缘引水管均匀分布在圆周上，每一绝缘引水管的净长为 500mm 以上，以保证有足够的水电阻，减少水的泄漏损耗。

为了及时发现端部的漏水，在定子端部的最下端装有高阻式检漏元件，出现漏水时能发出信号。

转子内部的水路是采用中心孔进水，表面出水，转子所需水压主要依靠转子本身的离心力作用，即冷却水从励磁机端进水支座进入发电机转轴的中心孔内，通过轴上的径向孔道进入装在发电机励磁机端的进水箱。进水箱的侧面，沿圆周均匀地分布着小孔，借助于转子旋转时水本身产生的离心力，顺势流动，经绝缘引水管拐脚，沿轴向进入转子下层线圈，带走热量的水从转子上层线圈出来，经另一端的拐脚和绝缘引水管汇集在出水箱，出水箱另一侧有小孔，借转子旋转产生的离心力，把水甩到出水支座的内壁，然后落下，流回水箱。

为了保证水质，防止水系统腐蚀，除转子内水系统全部采用不锈钢材料外，还加强水系统的密封，以减少水中的含氧量。

转子的绝缘引水管是分配水流、吸收振动和对地绝缘的重要零件，不仅要有良好的耐热性和机械性能要求，而且还要有绝缘和防腐（电腐蚀和化学腐蚀）等性质。本机采用内壁为四氟外层为钢丝编织加强的复合管。绝缘引水管的二端以夹紧式的不锈钢接头分别与水箱和线圈连接。引水管均用胶木等垫块垫紧并用小护环固定。

定子和转子冷却水源利用邻近机组的凝结水，单独设立水箱一座，水冷泵 2 台和立式冷却器 3 台，用江水冷却热水，水冷系统除供定子、转子冷却用外，还供水冷母线用。

第三节 汽轮发电机的启停和维护

125MW 双水内冷汽轮发电机，其转子线圈和定子线圈的空心铜导线通过纯净的除盐水或本机凝结水冷却，定子铁心端部压环通过纯净的除盐水冷却，还有转子风扇并附有密封式强迫空气循环冷却系统。发电机的励磁系统是由 350Hz 永磁机、100Hz 中频励磁机、硅整流柜和微机自动励磁调节装置组成。现将有关 125MW 发电机的启停和维护简述如下。

一、发电机、励磁系统及水冷系统的技术数据

(一) 发电机的铭牌

型号	QFS-125-2 型
额定容量 (MV·A/MW)	147/125
定子电压 (kV)	13.8
定子电流 (A)	6150
转子电流 (A)	1650
功率因数 $\cos\varphi$	0.85 (滞后)
空载转子电压 (V)	91 (15℃)
空载转子电流 (A)	630
转速 (r/min)	3000
接线方式	YY
汽轮机功率 (MW)	125

(二) 发电机的参数

同步电抗	X_d (%)	156
瞬变电抗	X'_d (%)	21.4
超瞬变电抗 (不饱和值)	X''_d (%)	15.4
负序电抗	X_2 (%)	18.8
零序电抗	X_0 (%)	5.76

定子绕组开路时，时间常数 T_{d0} 为 7.16s。

三相突然短路时，电流瞬变分量衰减时间常数 T'_{d3} 为 0.982s。

二相突然短路时，电流瞬变分量衰减时间常数 T'_{d2} 为 1.65s。

单相突然短路时，电流瞬变分量衰减时间常数 T'_{d1} 为 1.842s。

三相 (或二相、单相) 突然短路时，电流超瞬变分量衰减时间常数 T''_d 为 0.035s。

三相突然短路时，定子非周期性电流的衰减时间常数 T_{a3} (不计饱和；二相突然短路时 $T_{a2} = T_{a3}$) 为 0.272s。

三相突然短路时，定子非周期性电流的衰减时间常数 T_{a3H} (计及饱和；二相突然短路时 $T_{a2H} = T_{a3H}$) 为 0.217s。

单相突然短路时，定子非周期性电流的衰减时间常数 T_{a1} (不计饱和) 为 0.192s。

单相突然短路时，定子非周期性电流的衰减时间常数 T_{a1H} (计及饱和) 为 0.154s。