

国外磁流体发电

上海科学技术情报研究所



国外磁流体发电

上海科学技术情报研究所出版

新华书店上海发行所发行

南通市东方红印刷厂印刷

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张: 6.75 字数: 170,000

1975年11月第1版 1975年11月第1次印刷

印数: 1—4,100

代号: 151634·259 定价: 0.85元

(只限国内发行)

编 者 说 明

磁流体发电是将热能直接转换成电能的一种新型发电方式, 具有效率高、污染小、起动快、造价低、发电费用小等优点, 为大幅度提高大型工业电厂的效率、节省能源消耗提供了一条现实可行的途径, 因而世界各国都很注意磁流体发电技术的发展。为此, 我们遵照毛主席“洋为中用”的教导, 将国外最近几年磁流体发电的发展情况汇编成册, 以供参考。在资料的汇编过程中, 中国科学院北京电工研究所、上海硅酸盐研究所、南京工学院等单位提供了大量资料, 在此表示谢意。由于我们水平有限, 文中的错漏之处, 请读者批评指正。

上海电机厂特种电机研究室

上海科技情报研究所

1975年3月

目 录

前言.....	1
一、磁流体发电的基本原理.....	3
二、国外开环磁流体发电的发展概况.....	9
三、美国二万瓩霍耳型磁流体发电机.....	27
四、苏联 Y-25 磁流体发电装置的初步研究结果.....	35
五、日本电子技术综合研究所的 5 号和 6 号磁流体发电机.....	48
六、美国阿夫科公司的五万瓩磁流体发电试验机组的设计方案.....	58
七、国外磁流体发电通道高温材料的研究概况.....	67
八、日本磁流体发电用的蓄热式高温热交换器.....	81

前言

近二十多年来,世界电力生产差不多每十年增长一倍。然而,现在大部分的电力是由烧煤、石油、天然气等矿物燃料的火力发电站生产的,仅一小部分由水电站和原子能电站供应。今后原子能发电,在电力生产中的比重将会逐渐增加,但在今后三、四十年内,烧矿物燃料的火力发电仍将占主要地位。但目前火力发电的效率极低,一般在 $30\sim 40\%$ 之间,因而,不但浪费了大量的燃料,而且给环境带来严重污染,例如,大量的“废热”排到空中和水中,造成所谓的“热污染”;大量的有害气体(如硫化物、氮化物)和灰尘排到空中,造成所谓的“大气污染”。为了解决这些问题,要求对现有的火力发电方式进行改造。如为了提高热效率,除采用大机组、高参数等一些措施外,还从改变能量的转换过程上进行了各种努力。经过对各过程的分析表明,采用磁流体动力转换的方法,即磁流体发电,为大幅度提高大型工业电站的效率提供了一条切实可行的途径。

磁流体发电(Magneto hydro dynamic power generation, 简称 MHD power generation)是将热能直接转换成电能的一种新型发电方式,它是利用高温导电流体高速通过磁场,在电磁感应的作用下将热能转换成电能,其工作原理与涡轮发电机一样(图1),所不同的是,涡轮发电机中的金属导体在磁流体发电机中是导电流体。导电流体可以是导电的气体,也可以是液态金属。导电流体的高温,可从矿物燃料燃烧时的化学能转换成热能获得,也可由核燃料在核反应中核能转换成热能获得。

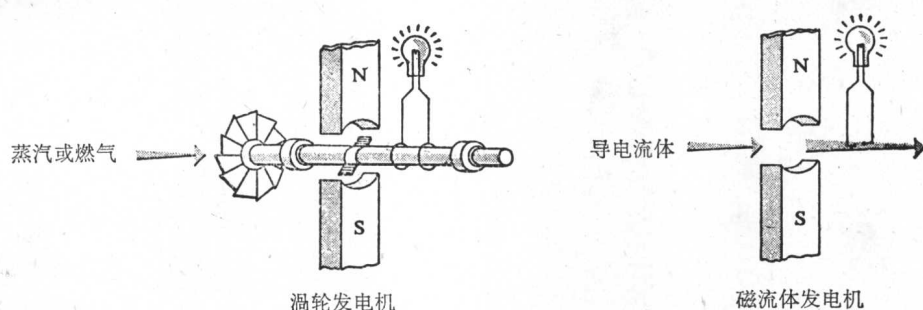


图1 涡轮发电机与磁流体发电机的原理示意图

磁流体发电与传统的火力发电比较,具有以下优点:

1. **效率高** 目前火力发电的热效率为 $30\sim 40\%$,原子能发电为 $25\sim 32\%$ 。如果将磁流体发电机与蒸汽涡轮发电机组合成磁流体-蒸汽动力联合循环发电,则火力发电的热效率可大幅度提高到 $50\sim 60\%$;如果将磁流体发电机和原子核反应堆组合,则可提高原子能发电的效率。从而可节约大量的矿物燃料和核燃料。例如,一吨煤,磁流体-蒸汽动力联合循环发电机可发电4500千瓦时,而蒸汽发电机只可发电3000千瓦时。据美国资料分析,如采用烧煤的磁流体-蒸汽动力联合循环发电机,将可使美国要求的采煤量减少 30% 。

2. **污染小** 由于磁流体-蒸汽动力联合循环发电效率高,故排到空中和水里的“废热”显著减少(效率为 60% 时的热污染是效率为 40% 的二分之一);当磁流体发电机与燃气涡轮发

电机或空气涡轮发电机联合循环发电时,水的热污染可消除。由于在磁流体发电的过程中,加入了易于电离的钾、铯等碱金属化合物,它们极易和燃烧气体中的硫化氢生成容易回收的硫化物。同时,适当控制磁流体发电机燃烧室和通道中发生的过程,还可使排气中一氧化氮含量的浓度降到1~1.5%。这样将使一氧化氮和二氧化硫一起提取出来制取硝酸和硫酸,从而大大减少火力发电对环境所造成的污染。

3. 起动快 磁流体发电机能在几秒钟内达到额定负荷,因而磁流体发电机可作为特殊试验电源和尖峰负荷电源,是一般发电装置无法比拟的。

4. 造价低,发电费用小

由于具有以上的优点,特别是资源的消耗少和减少环境污染这两方面,所以磁流体发电得到了各国的重视,取得了一定发展。但它的发展历史还很短,比起蒸汽涡轮发电来说还很年轻,几乎是在蒸汽涡轮发电几百年以后才发展起来的,因而,还有许多技术问题要解决。但磁流体发电将会得到广泛的应用。

一、磁流体发电的基本原理

(一) 磁流体发电机的结构与工作过程

最简单的磁流体发电机的结构如图 1 所示, 由燃烧室、发电通道和磁体三个基本部分组成。

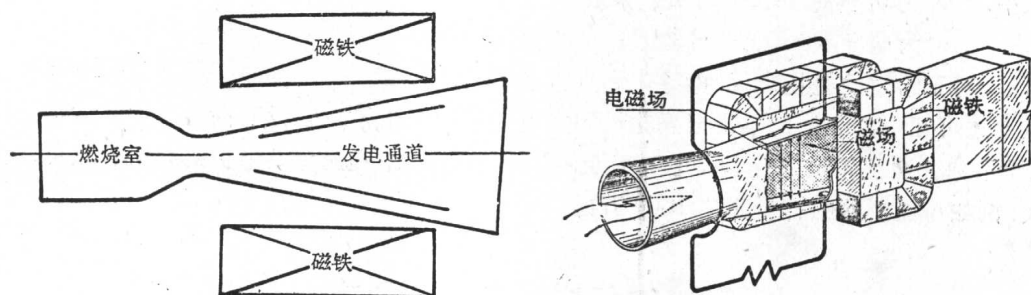


图 1 磁流体发电机的基本结构

燃烧室 燃料在燃烧室燃烧, 燃料的化学能转变成热能, 产生大约 3000°K 的高温导电气体, 导电气体通过喷管, 被加速到 $800\sim 2000$ 米/秒以上。这种高温导电气体, 与一般气体不同, 含有一定数目的自由电子和数目相等的正离子, 是一种等离子体。一般情况下, 要得到这种等离子体, 温度必须在一万度以上。这样高的温度, 不仅采用一般燃烧方法难于得到, 而且目前的材料也难于承受这样的高温。为了在较低的温度下得到具有足够电导率的导电气体, 在燃料中加入少量的低电离电位的物质, 例如碱金属钾或铯的化合物, 使气体在 2500°C 左右即获得适当的电导率。这种低电离电位的物质, 通常称之为添加剂或种子。

发电通道 发电通道由绝缘壁和电极壁组成。电极与普通电机的电刷作用一样, 用来引出电流。

磁体 磁体用以产生磁感应强度在 2 万高斯以上的强磁场, 它由铁芯电磁铁、或空心线圈、或超导线圈作成。

这样, 燃烧室中产生的高温导电气体, 高速进入发电通道, 并与磁场发生相互作用, 产生感应电动势。如果通过电极和外负载组成回路, 即有电流通过, 其电流的方向, 根据右手定则确定, 如图 2 所示。

由此, 高温导电气体的动能在通道中转换为电能。磁流体发电机的开路电压 V 与气流速度 u 、磁感应强度 B 、电极间的距离 d 成正比, 它们之间的关系可由下式表达:

$$V = uBd$$

在回路中接有负载时, 单位体积通道对外负载输出的功率与电导率、气流速度、磁感应强度的关系如下:

$$P = K(1 - K)\sigma u^2 B^2$$

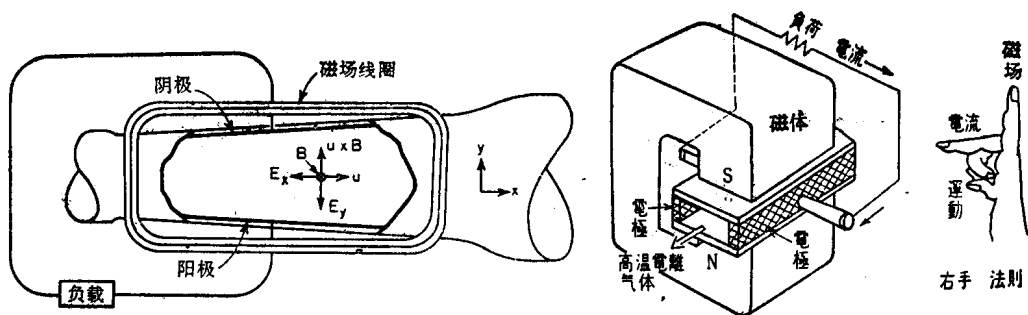


图2 磁流体发电的电流方向

式中, P 为功率密度; K 为负载系数;

σ 为电导率; u 为气流速度; B 为磁感应强度

所以, 对于给定的磁场来说, 电导率和气流速度愈高愈好。

从上述可知, 磁流体发电机把涡轮机和发电机结合起来了, 它没有高热应力的运动结构件, 因而不象普通涡轮机那样, 单机容量受到限制。理论上, 磁流体发电机的单机容量可以作得很大, 例如可能制造的容量高达 1000 万千瓦。

(二) 磁流体发电机的型式

磁流体发电机按照通道的几何形状分为直线式、涡流式和径流式, 如图 3 所示。

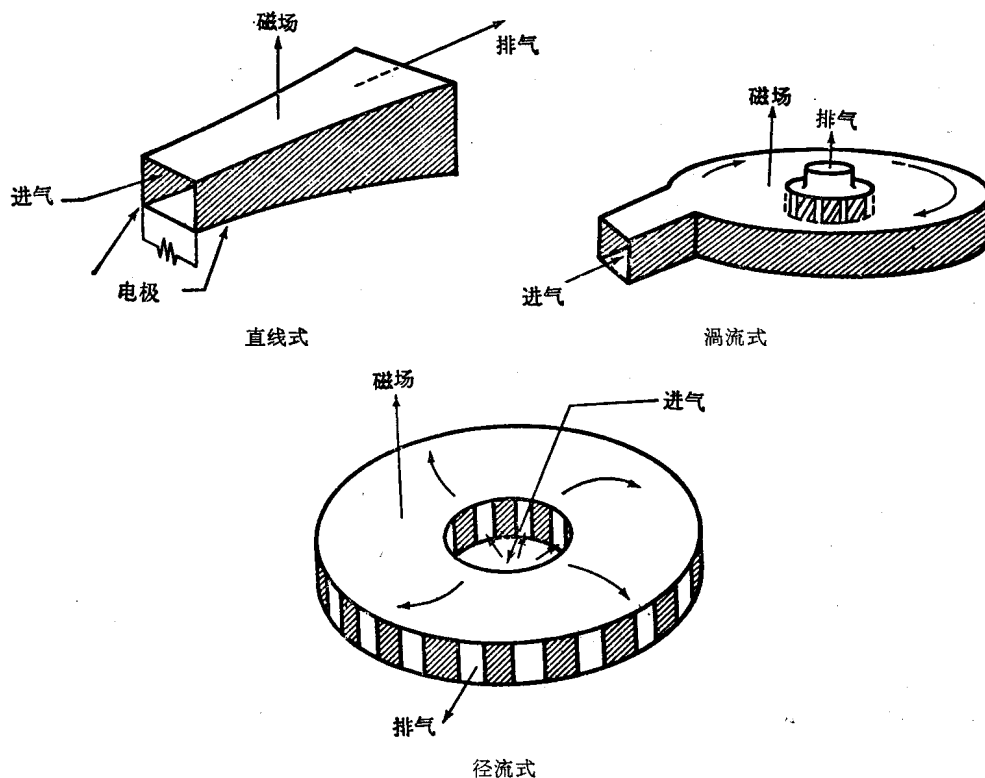


图3 磁流体发电机的几何型式

直线式按照电极的联结方式又分法拉第型、霍耳型、和斜联结型。法拉第型又分为整体电极和分段电极两种型式,如图4所示。

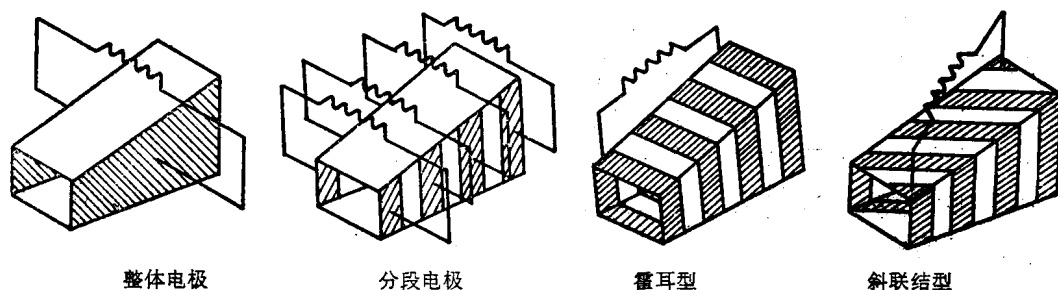


图4 磁流体发电机的电极联结型式

各种型式的磁流体发电通道,具有不同的功率特性、电流-电压特性和结构上的特点。

法拉第型整体电极磁流体发电机,电路中只有一个负载,结构简单,但由于在气流方向出现霍耳电场,使输出功率下降。为了减小霍耳电场的影响,采用分段电极联结方式,可使磁流体发电机的输出功率提高很多。但由于电极的分段,对相邻电极之间的绝缘性能要求高,同时电路是多负载,因而电路和结构较复杂。

如果将法拉第型分段电极发电机的电极分别短路,而用气流方向的霍耳电流作为工作电流,把首末两对电极联结起来形成一个单负载的回路,这就是霍耳型磁流体发电机,它可以产生1万伏以上的高电压。这种型式的磁流体发电机,在霍耳系数较小时,效率较低,而霍耳系数很大时,可以达到较高的效率。

将电位相同的平面,亦即将等电位的电极短路,然后由首末两对电极与负载联结成一个回路,即成为斜联结型的磁流体发电机。这种型式具有霍耳型发电机的优点,但它的特性与霍耳系数无关。同时,这种型式的发电机只有在负载不变的情况下运行较好,如果负载发生变化,发电机的特性就要变坏。

(三) 磁流体发电机通道的流体动力学分析

磁流体发电通道的设计,是以磁流体动力学的基本方程为基础的。对于法拉第型发电机,通常采用简单的一元、稳定、可压缩流体的磁流体动力学方程。并假定可以不考虑摩擦损失和热损失,由于电离度一般很低,还假定理想气体定律是适用的。基本方程如下:

质量方程

$$\rho u A = \text{常数}$$

动量方程

$$\rho u \frac{du}{dx} + \frac{dp}{dx} = -jB$$

能量方程

$$\rho u \frac{d}{dx} \left(C_p T + \frac{u^2}{2} \right) = jE$$

状态方程

$$p = \rho RT$$

电流方程

$$j = \sigma(uB - E)$$

式中: p 为气流的压力; ρ 为气流的密度; T 为气流的温度; u 为气流的速度; C_p 为等压比热; σ 为电导率; B 为磁感应强度; R 为气体常数; A 为通道截面积; E 为横向电场; j 为

横向电流密度; a 为轴向距离。

磁感应强度 B , 通常假定是不变的常数, 上述五个方程有七个未知数, 还需要两个附加条件才能求解。

发电机的负载系数 $K = \frac{E}{uB}$ 是固定的, 由于这个比值就是等熵效率, 通常发电机的等熵效率希望设计接近常数。如果假定一个流动参数, 例如 u 、 M 、 P 、 T 、 ρ 或 A 为常数, 方程就可求解了。

如果按照假定某个流动参数为常数来划分, 那末发电机又可分为等速度、等马赫数 (M)、等压、等温、等密度和等截面发电机。

(四) 磁流体发电的循环系统

磁流体发电一般有三种工作循环系统: 开式循环系统、闭式循环系统和液态金属循环系统。

1. 开式循环系统

开式循环系统的工作流体是燃料、纯氧、添加了钾盐的燃烧气体。燃气通过磁流体发电通道输出电能后, 排气的余热不再利用, 添加剂也不再回收, 这是最简单的循环系统, 它的优点是结构和系统简单、启动快、投资小, 但是效率低、运行费用高, 适用于作为短时间运行的特殊电源和尖峰负荷供电。

上述的简单循环, 由于要用价格很贵的纯氧, 同时排气的余热没有利用, 添加剂也未回收, 这对于大功率大规模发电来说是不经济的。从经济观点出发, 用空气作为氧化剂最便宜。然而由于热电离需要很高的燃烧温度, 而矿物燃料和空气燃烧不可能达到这样的高温。为此, 空气必需预热到 1500°C 以上。

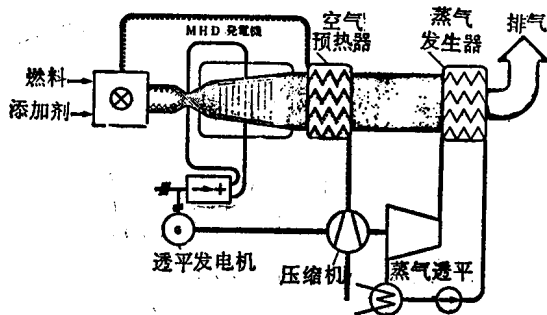


图5 开式循环系统

为使磁流体发电可以作为承担基本负荷的中心电站, 一般考虑采用磁流体——蒸汽动力联合循环系统, 如图5所示。在这种系统中磁流体发电的排气余热除部分用来预热空气以外, 其余被用来产生蒸汽动力发电所需要的蒸汽。这种联合循环, 除了磁流体发电和蒸汽动力发电两个主要系统外, 还包括有高温空气预热系统、添加剂回收系统、直流-交流的逆变换系统和超导磁体系统。

由此可见, 作为基本负荷的开式循环系统相当复杂。但是这种系统可将目前电站的效率从 $30\sim 40\%$ 提高到 $50\sim 60\%$, 并且投资费用和普通电站差不多, 同时这种系统还可以显著改善环境的污染。因而对这种系统的研究和发展具有重要的意义。

2. 闭式循环系统

上述开式循环是利用高温燃烧气体的热平衡电离来得到适当的电导率的。所谓热平衡电离, 就是混合气体中电子的温度和混合气体的温度相等。这时, 燃烧气体的温度必须在 3000°K 左右才能达到所需要的电导率, 但是, 制造能够长时间承受这样高温度的电极和绝缘耐火材料

目前还是很困难的。因此,就提出了能够在较低的温度下得到适当的电导率的方案。目前正在探索的非平衡电离方法就是其中之一。所谓非平衡电离,就是使混合气体中电子的温度高于混合气体的温度。因为气体的电导率主要取决于电子的温度。目前提出的可能产生非平衡电离的方法有:

- ① 电磁辐射:光电离、X 射线、 γ 射线、激光束。
- ② 带电质点:电子和离子束、裂变碎片。
- ③ 不带电质点:中子轰击、悬浮粉末质点的热离子放射。
- ④ 电场:直流电场、或微波频率的交流电场、自感应电场。
- ⑤ 磁场:因为在高强磁场下电离电位稍许减小。

如果这些方法能够产生非平衡电离,那末气体大约在 2000°K 左右就可以达到温度为 3000°K 时的燃烧气体的电导率,对于高温耐火材料的要求可大大降低。

闭式循环就是利用这种非平衡电离的原理工作的,它的工作流体是稀有气体(例如氦气)并以碱金属铯作为添加剂的混合气体。工作流体通过核反应堆或高温热交换器加热,经过磁流体发电通道输出电能,然后,工作流体不排入大气,它的部分热量用以推动蒸汽透平产生附加电能,并再通过冷却、压缩,重新回到核反应堆或高温热交换器加热,如此重复循环如图 6 所示。

闭式循环和开式循环比较有很多优点,由于它的循环是封闭的,所以它可以采用电离电位很低(而价格很贵)的碱金属铯作为添加剂,同时由于工作流体是惰性气体,所以它的腐蚀性没有燃气那样严重,此外,由于循环是封闭的,因而没有空气的污染问题。

虽然目前非平衡电离的研究和高温反应堆技术的发展还有不少问题,然而随着研究工作的进展和高温核反应堆的发展,磁流体发电与核反应堆结合是有可能的。闭式循环系统的磁流体发电可将目前原子能电站的效率从 25~30% 提高到 50~55%,这对于提高核燃料的利用率和降低原子能发电的成本有很大的经济意义。

3. 液态金属循环系统

液态金属循环系统,实际上也是一种闭式循环,但和稀有气体的闭式循环在原理上是不同的,它用液态金属或者液态金属与气体或蒸汽的混合物作为工作流体,并通过核反应堆或热交换器获得高温。这种循环的优点是在所有温度的情况下,液态金属都有很高的电导率,其数量级约为 10^7 姆欧/米,这是电离气体电导率的 10^6 倍。但是要把热源的热能转换成具有很高蒸汽压力的液态金属的动能是很困难的。典型的液态金属循环如图 7 所示。

这种系统使用两种不同沸点的液态金属。高沸点的液态金属通过核反应堆加热,然后和沸点低的液态金属混合,使低沸点液态金属气化,产生一定的蒸汽压力。这种金属的气液混合物再通过喷管,气相金属进一步膨胀产生更大蒸汽压力,使混合物获得高速。然后再用分离器将气液分离。其中高速的液体金属通过磁流体发电通道输出电能,通过扩压器冷凝后重复循环;高速气体金属则冷凝后重复回用。

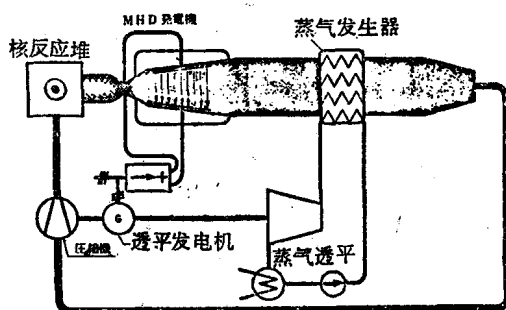


图 6 闭式循环系统

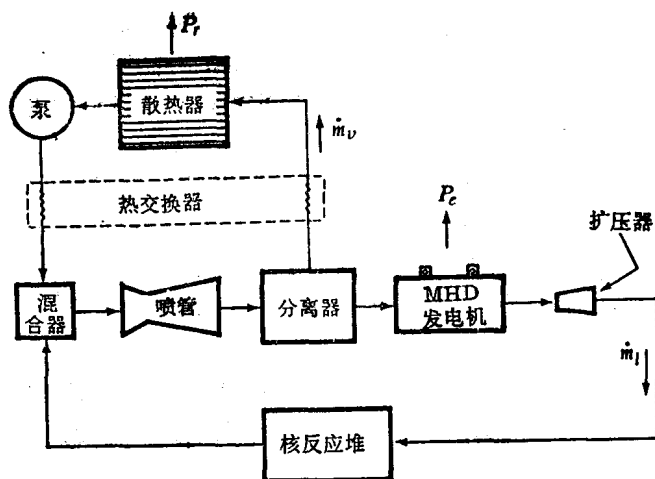


图7 液态金属循环系统

二、国外开环磁流体发电的发展概况

(一) 国外磁流体发电的发展过程与现状

自 1959 年美国阿夫科公司首次用磁流体动力学的方法直接发出 11.4 瓩的电以来, 磁流体发电这一技术已有十多年的历史。在这十多年里, 一些国家和地区, 先后建立了许多不同形式的试验装置, 进行了大量的研究。目前, 开环磁流体发电的基础理论已基本成熟, 研究工作已从实验室的小型装置向工业性的大型实验装置发展。

1967 年以前, 磁流体发电尚处于基础研究阶段, 在美国原理试验成功之后, 苏联、英国、法国、日本等一些国家相继开始研究。在这段时间里, 美国、英国的进展较快。美国基本上完成了短时间大型特殊用途的磁流体发电机的研究工作, 例如, 1963 年建成短时间运行的 1500 瓩的 2 号实验机; 1966 年又建成短时间运行的 3.2 万瓩的 5 号实验机; 1967 年又建造一台 2 万瓩的霍耳型磁流体发电机, 作为高超音速风洞的电源。英国在 1964~1967 年间建造了一台短时间运行的 2.5 万瓩的大型发电装置。

由于各国进行了深入的探索研究, 在不同程度上碰到了一些具体技术困难, 再加上各国情况(如动力政策、研究经费等)不同, 因而在 1967~1970 年期间, 各国的进展有很大差异。1967 年, 英国宣布下马, 停止大规模试验; 美国在这几年里, 也处于停滞状态。因而在一些国家里对磁流体发电的前景发生了争论。但在这段时间里, 苏联认为磁流体发电是大幅度提高能量转换效率最有希望的途径, 因而花了巨额经费, 在小型试验装置的基础上, 建立了万瓩级的工业性试验电厂。1971 年春, 苏联宣布建成世界上第一座 7.5 万瓩的磁流体-蒸汽动力联合循环发电厂, 并投入运行。

近年来, 一些资本主义国家为了摆脱“能源危机”的困境, 纷纷探索新能源的开发和利用, 其中, 对磁流体发电这一新的发电方式, 逐渐引起了重视。磁流体发电在电力工业中的地位, 它作为可使大型工业电厂大幅度提高热效率的一种最现实可行的新的发电方法, 越来越被更多的人所认识。一些国家制订了长远发展计划, 投入了一定的人力和物力, 取得了较快的进展。例如, 美国的一些企业单位在全国科学基金会的支持下, 制订了到 2000 年的长期发展规划, 1974 年的研究经费为 750 万美元; 苏联也制订了分阶段的发展计划, 预计从 1980 年开始建造实用规模的磁流体发电厂; 1973 年春, 美国、苏联签订了研制磁流体发电的合作计划; 日本通产省工业技术院制订了 1966~1975 年的十年发展计划、拨款 64 亿日元; 加拿大和西德等国也都有它们的发展计划。

最近建立的比较典型的磁流体发电装置有: 美国阿夫科公司的 6 号机、7 号机; 美国田纳西大学空间研究所烧煤的 USTI-2 装置; 苏联高温研究所的 Y-25 电厂; 日本电子技术综合研究所的 5 号机、6 号机; 西德尤利赫技术物理研究所的 Vegas-II 装置等。

国外开环磁流体发电的研究主要在两方面进行: 一是用作短时间发电, 作为特殊用途的电源、紧急备用电源、承担电厂尖峰负荷的电源等; 二是用作长时间发电, 作为承担基本负荷的中心电站。

短时间运行的磁流体发电机, 由于系统比较简单, 因而研究得比较充分, 目前已投入实际应用。例如, 美国阿夫科公司制造的 2 万瓩霍耳型磁流体发电机, 供美国空军作为风洞电源之用。国外发展这种短时间运行发电机的目的, 除了作为特殊电源之外, 还为发展长时间运行的磁流体发电机提供技术基础。

虽然短时间运行的磁流体发电技术发展得比较成熟, 但它只能作特殊应用, 因而使用范围狭窄而受到限制, 同时, 由于效率低、经济性差, 因而各国把研究方向转到了效率高、污染小、可长时间运行以承担基本负荷的磁流体-蒸汽动力联合循环发电机的研究上来。

由于磁流体-蒸汽动力联合循环发电的高效率、低污染的优点, 在大功率时, 譬如在 100 万瓩以上, 体现得更加明显, 因而各国目前都把 100 万瓩以上的磁流体-蒸汽动力联合循环发电作为研究方向和主攻目标。例如, 美国、苏联、日本都论证了 100~150 万瓩的磁流体-蒸汽动力联合循环电厂的经济效益。为了实现这样的目标, 各国又把建立万瓩级的磁流体-蒸汽动力联合循环试验电厂作为发展大型实用电厂的重要步骤, 以此提供建立大型实用电厂的技术基础。但由于各国情况的不同, 发展这种万瓩级实验电厂的方法和途径也不尽相同。图 1 为各国研究发展磁流体-蒸汽动力发电技术的大致发展步骤。

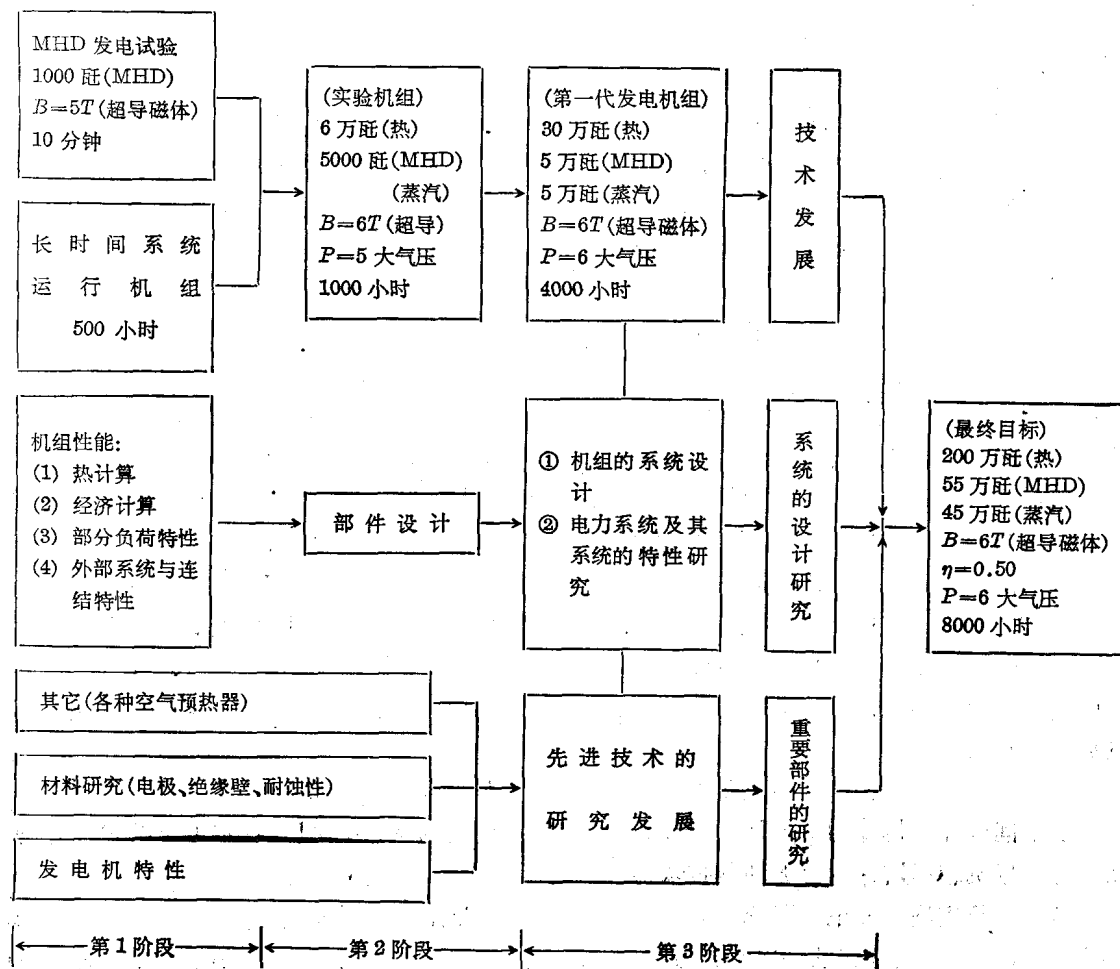


图1 磁流体-蒸汽动力发电的研究发展步骤

各国在发展磁流体发电的时候,亦结合本国资源的实际情况进行综合考虑。例如,苏联储有大量天然气,因而苏联的一些大型磁流体发电装置都采用天然气作燃料。苏联煤的资源也不少,因而也研究燃煤磁流体发电。又如,美国,正在大力研究燃煤的磁流体发电机,因为美国煤的蕴藏量丰富。日本的动力资源主要靠国外进口石油。由于磁流体发电效率高,可减少石油进口,因而日本主要是研究燃油磁流体发电机,而且还大力研究高含硫油的使用及其脱硫的问题。英国以原子能电厂的发电价格最低,燃煤电厂次之,燃油电厂最高,因其所有资源均系进口,从获得大量电能的手段来讲,发展磁流体发电与英国的燃料动力政策并不适合,因而重点放在发展原子能发电上,停止了大规模的磁流体发电的研究工作,转为基础试验研究。

综合世界各国的发展情况,磁流体发电技术的发展过程大致是:从短时间运行到长时间运行(几秒——几分钟——几小时——1千小时以上);从小型试验到大型工业性试验(几十瓩——几百瓩——万瓩——百万瓩);从磁流体发电机的单机运行到磁流体-蒸汽动力联合循环运行。

现在磁流体发电虽有很大的进展,但要建成实用的大型磁流体-蒸汽动力联合循环电厂,并获得长时间的可靠运行,还有许多技术问题尚待解决。一般认为,目前急待解决的问题主要有以下三个方面:

1. 耐高温、耐腐蚀的耐火材料

磁流体发电机通道的运行条件极为苛刻,要求在高温(3000°K 左右)下长期经受高速气流(1000 米/秒以上)的冲刷和添加剂的腐蚀,因而通道电极壁、绝缘壁的材料和结构的研究就成为建造长时间运行的开环磁流体发电机的关键之一。

2. 可靠而经济的附属设备

包括添加剂的喷注与回收装置、高温空气预热器、磁体及逆变换系统等,其中高温空气预热器和磁体最为重要。

由于空气的预热温度的发电机的总热效率有着密切的关系,因而各国对高温空气预热器的发展极为重视。空气预热的方式很多,从当前现实可能和运行可靠的观点出发,下面两种型式的高温空气预热器是较有希望的。一种是具有固定卵石床和气体分配阀系统的蓄热式空气预热器,一种是具有移动卵石床(中间热交换介质)的蓄热式空气预热器。苏联Y-02装置采用的是前者,在流量为 1.2 公斤/秒情况下,空气预热温度达 $1500\sim 1700^{\circ}\text{C}$,并连续运行 7000 小时以上;波兰使用了移动卵石床空气预热器,在流量为 0.5 公斤/秒情况下,空气被预热到 1300°C 。日本曾研究了气液二相流型、溶渣型、颗粒落下型、固定蓄热型、旋转蓄热型和隔壁金属管型等六种热交换器。研究结果表明,在低温范围内使用隔壁金属管型(加热到 1120°K),在中温范围内使用旋转蓄热型(加热到 1370°K),在高温范围内使用固定蓄热型这样的三级热交换器,可获得 1770°K 的高温预热空气。这套加热系统已用在日本电子技术综合研究所的6号机上,进行长时间的磁流体发电全系统试验。

磁体亦是磁流体发电机的重要部件之一。从目前国外的研究情况来看,原理上并不复杂,但从工程的角度来看,问题还不少,共同的问题是励磁功率消耗大,需要的铁和铜(或铝)材料多,并且磁通密度不能达到很高的数值。例如苏联的Y-25装置,光磁体就需要 2000 吨铁和 280 吨铜,这对发电 2.5 万瓩来说,是一个非常大的数字。如要获得较高的磁通密度,带有铁芯的线圈由于铁磁饱和而受到限制,空心线圈虽然没有饱和的问题,但需要非常大的励磁功率,从而又出现一系列问题,如机械力、发热等。为了进一步提高磁通密度,采用超导线圈,这

是磁流体-蒸汽联合电厂获得高效率的必要条件。目前超导磁体在一些小型装置上虽然进行了成功的试验(例如,日本的1000瓩长时间发电5号机上使用的超导磁体,据称是世界上目前最大的磁流体发电用超导磁体,但对实用的大型联合电厂来说,由于磁系统的体积相应增大,且要消耗大量的液氮,因而磁系统的有效冷却和稳定运行都需要进一步研究。

3. 氧化氮的控制

在磁流体发电过程中,热污染和硫污染虽可得到解决,但由于磁流体发电的燃烧温度和压力比普通火力发电厂高得多,生成的氧化氮比普通电厂烟气中的含量高,因而氧化氮的控制对磁流体发电就显得更加突出。一般认为,目前有两种不同的办法可用来控制磁流体发电中氧化氮的散发量。一种是尽量减少烟气中所含的氧化氮,使之达到排放标准。另一种是尽量提高烟气中氧化氮的浓度,使固定氮的回收具有很大经济价值。对此,各国都正在积极开展氧化氮污染控制技术的研究。

(二) 几个国家开环磁流体发电的发展概况

1. 美国磁流体发电的发展概况

美国磁流体发电研究得最早,1941~1944年间,美国西屋电气公司就曾建立过磁流体发电试验装置,由于当时对电离气体的性质没有足够的了解,试验没有成功。1959年,阿夫科-埃

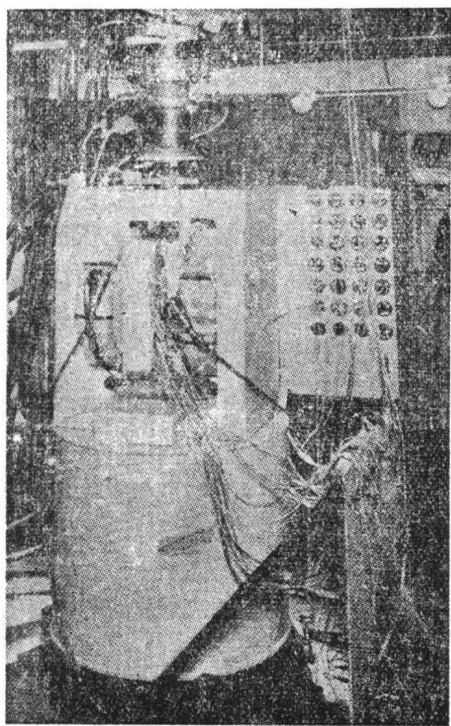


图2 阿夫科1号机

菲尔特研究试验室(AVCO-AERL)采用磁流体发电技术点亮了228盏50瓦的电灯泡(11.4瓩,运行时间为10秒,图2),从而在实验室证实了磁流体发电的实用可能性。这个实验一般认为是磁流体发电研究的开端。在这之后,该试验室建成Mark 1~Mark 7(2号机~7号机)等试验装置。其中,2号机(图3)于1963年建成,出力达1500瓩,热输入2万瓩,运行时间为10秒。在该机上进行了磁流体动力特性、法拉第通道、霍耳通道和圆形截面通道的研究。4号机于1966年建成,发电2瓩,运行2000小时。5号机(图4)于1965年建成,并进行自激发电运行,总电功率输出为3.2万瓩,净功率达2.3万瓩,有8400瓩供给励磁,运行时间为3分钟。5号机是阿夫科公司为军事目的而制造的,被用于特殊武器的研究,例如激光武器。在该机组上同时还进行了分段电极和整体电极的比较试验。试验时采用水冷金属绝缘壁,分段电极采用水冷镶嵌氧化锆电极。结果表明,整体电极的净输出比分段电极小。

在2号机和5号机的基础上,阿夫科公司在1966~1967年期间为美国空军阿诺尔德工程发展中心(AEDC)研制了一台输出功率为2万瓩(实际输出为1.8万瓩)的霍耳型磁流体发电机(每次运行1分钟,每日大约运行3分钟),作为设在田纳西州阿诺尔德基地的高超音速风洞

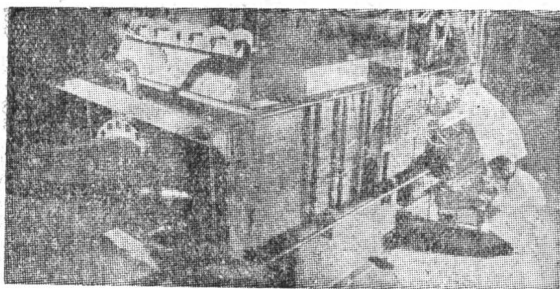


图3 阿夫科2号机

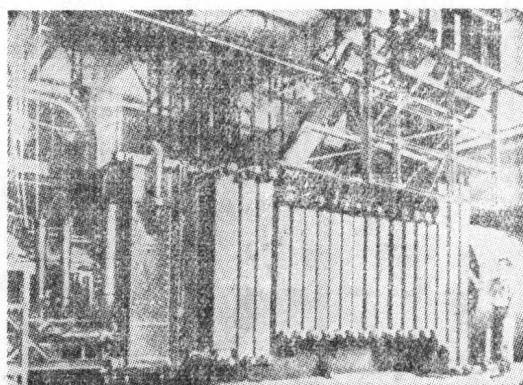


图4 阿夫科5号机

(用来模拟洲际导弹和宇宙飞船返回大气层的再入条件)试验电源。这是第一台实际应用于工程实验的短时间磁流体发电装置。目前,阿夫科公司正在对该机组进行改造,使之可长时间运行,并转向民用。

阿夫科公司在1972~1973年期间,又建造了6号机和7号机。6号机是为了模拟实用规模长时间运行的发电机组将可能遇到的各种情况而建造的。在该机组上,着重进行了发电机

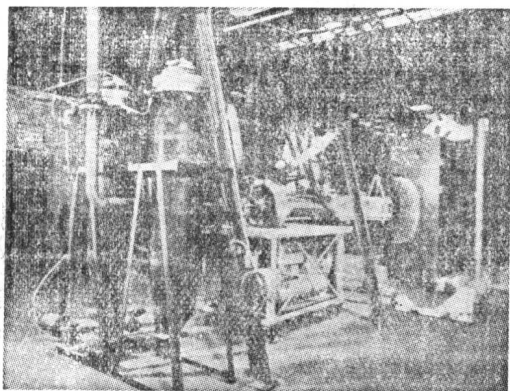


图5 氧化锆和灰分贮存器、燃烧室、通道和磁体

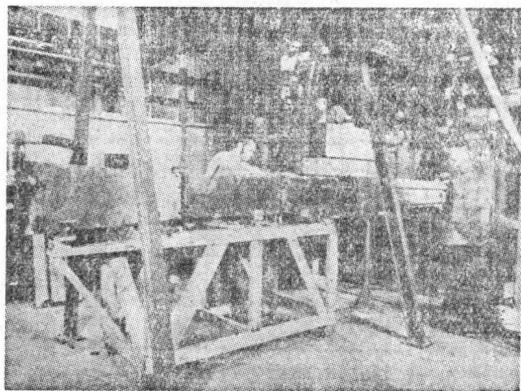


图6 通道和扩散器

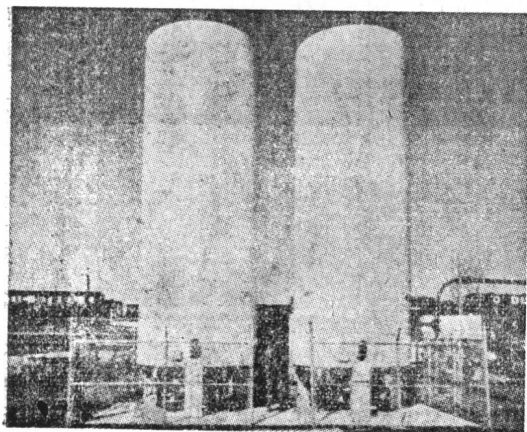


图7 液氮和液氧贮罐

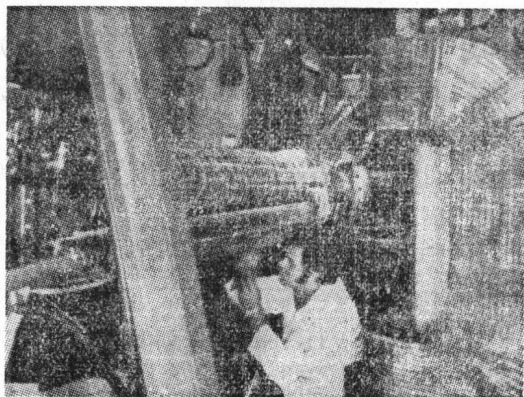


图8 通道和磁铁