

磁 流 体 发 电 問 題

楊 昌 琪 刘 鑑 民

(中国科学院电工研究所)

磁流体发电就是利用部分游离的高温气体，以一定速度通过与其垂直的磁場，由于有相对运动，便切割磁力綫而感应电动势，从而产生电功率的一种把热能直接轉变为电能的新型发电方式。本文介紹有关磁流体发电本身的一些問題。

远在十九世紀卅年代，法拉第即提出，当一个导体在磁場中运动而切割磁力綫时，在导体內即会产生感应电动势，但他并没有把导体局限于金属导体。其后，有許多学者曾利用海水、水銀等导电流体进行过这种发电方式的研究，但都未得到实际应用。直至近几年来，由于飞行器速度的提高，对于高温气体的特性进行了較深的研究，逐步掌握了高温气体的游离与电导特性，这样利用高温气体通过磁場而发电，就引起人們較多的注意。因此近年来，这方面的研究工作得到了較大的发展。

目前，通常是經过鍋炉、汽輪机、发电机而进行发电的，虽然不断提高电厂的运行参数而使其效率有所上升，但至今电厂的最佳效率只有 40% 左右，除了采用特种循环外，虽仍有提高效率的可能，但却有限。磁流体发电由于其本身工质的要求，必須要在較高的温度下运行(如 $2,500-3,000^{\circ}\text{K}$)，如

果能选择合适的热循环，例如高温气体經磁流体发电机后，先經預热器加热气体，然后到普通鍋炉加热蒸汽以推动蒸汽透平再发电，則整个循环就可能有較高的效率，如 60%。此外由于取消了高温、高压及高速的旋轉机械，設備就可以簡單一点。这些就决定了磁流体发电可能是一个有前途的发电方式。当然由于应用了高温与新的发电原理，必然提出了很多新問題，需要逐步解决，才有可能得到实际应用。

在磁流体发电机中，作为工质使用的气体是部分游离的，其中有分别带正負电的离子与电子。当高温游离气体以一定的速度通过垂直磁場或彼此間有相互运动时，这些运动着的带电粒子就受到磁場的作用而发生偏轉。如果在偏轉方向上設置正負二电极，且与外电路相联接，即有电流流通。与此同时，这些带电粒子的偏轉，又与磁場作用而受到一劳伦斯力，其方向与气流运动方向相反。一般的說，电子由于質量小，偏轉速度較大，因此受力大，正負离子受力小，而中性分子并不受力。但由于气体中粒子的相互碰撞以及带电粒子間的相互作用的結果，从宏观上来看，可以近似地把此力看作加于气体上。气体在流动中克服此力而做的功，一部分即

变成电功率，另一部分即电流在气体中流过时所形成的焦耳热。所以电功率终究是由减少气体的总焓而来，而焦耳热却在气体内消散。

对于直流的磁流体发电机，由相似的电路角度来考虑，如果忽略沿气流方向的电流，则近似地可把磁流体发电机中每一小单元当作一个小电源，其中有电动势及内阻，首先它们在垂直于电极的方向上串联，然后再在电极上并联，形成一个发电机整体。此发电机具有等值的电动势与内阻，即使在磁场不变的条件下，由于流速的改变，沿电极方向的电流密度亦是不同的。所以发电机等值电势及内阻不是常数，而是气源参数、发电机结构以及负载特性等所决定的一个复杂的函数。

如与普通直流发电机相比较，则在发电原理、能量关系、作用力等方面基本相似，但亦有区别。普通直流机中，运动方向不变，磁场却变化，因此导体内感应交流电，须整流后才成直流电；而在直流磁流体发电机中，由于运动方向与磁场方向皆不变，因此直接发出直流电。引出电流的机构，在普通电机中借助于金属的相互接触，而磁流体发电机中是依靠气体与固体电极间的导电过程。普通电机中由原动机所输入的能量，除机械及其它电磁损耗外，传给电机的同样分二部分，一部分即电功率，另一部分是电阻中的损耗，后者变成热能，不但无用，相反却主要由它限制了电机的容量。与此不同的是磁流体发电机中气体电导率只有铜导体的 10^{-6} ，因此内耗较大，不过它仍消散于自身气体中。此外是磁流体发电机中霍耳效应比较大。

这样，为了使磁流体发电机能发电，又有较佳的运行参数，必须要求高温气体具有

一定的速度、一定的电导、一定的磁场强度，而电导又是一个中心要求。

初步估算，电导至少要几十莫/米甚至更高才有实际价值，虽它只有铜的 10^{-6} ，但对于气体来说，仍是一个艰巨的任务。例如空气在一大气压下，需要六七千度温度才能达到上述电导值。目前常采用“播种”，即在气体中加入少量的低游离电位的元素，如钾、铯等，以便在较低的温度下即能达到一定的电导数值，从而降低对温度的要求。即使如此，要求的气体温度仍在 $2,500-3,000^{\circ}\text{K}$ 之间。关于电导的计算，目前往往由沙哈公式计算游离度，然后根据碰撞截面来进行计算，对于复合气体粗略地可用等值游离电位来考虑。最近，某些研究表明，沙哈公式在计算时尙待修正，而碰撞截面大致平均为 10^{-15} 平方厘米附近。

由于磁流体发电至少要求二三千度的高温，因此就要求有能产生这样温度的热源与能承受这种温度的材料。目前油氧燃烧可以初步满足此要求，其它热源尙待研究。至于高温材料，更是一个困难的问题，亦是磁流体发电能否真正实现的一个关键问题。发电机本身需要有用作电极及导管的二大类高温材料，它们除能长期耐高温外，还要化学稳定，尤其要不与加入的碱金属发生作用，此外各自又要求在高温下具有良好的电气与绝缘性能。目前初步认为石墨、钨、钨钼合金等可做电极，而某些陶瓷可以考虑做导管。但一般说，它们离真正实用还有很大距离。

磁流体发电机中还需要较强的磁场，一般至少要一万多高斯，甚至更高。而发电机导管又有一定宽度，所以磁场设备较大，消耗一定功率。

以工作循环来分，磁流体发电分开式、

閉式二种。开式循环中，热源所产生的高温气体直接經发电机，最后排出。其气体工质由热源决定，附加金属大都采用比較便宜的鉀盐。閉式循环中，气体由热源加热，經发电机后不断循环使用，所以可用惰性气体作工质。气体中除附加鉀外，可以考虑附加游离电位更低但比較昂貴的銨。銨易于游离，而且在惰性气体中不易形成負离子，这样气体的电导就可以高一些，或者可以降低一些运行温度。但是閉式中高温气体的加热过程，却是一个复杂的問題。

在发电机中除主要的焦耳損耗外，霍耳效应，气流进出发电机时的涡流損耗，流体的粘性等，都会在气体中引起能的消散，增加熵值，降低透平效率；而电极压降，会降低相应的电气效率。此外还有气流經发电机壁的热損失。如果以发出的电功率与气体进入时的总焓之比作为发电机本体的总效率，則它归結为由磁場强度、工质性质、发电机及气源参数等所决定。一般在磁場較大，电导率亦大的情况下，总效率較高。

气源的入口速度，大致可分亚音速及超音速二类。其运行特性有些不同，对等截面的发电导管，分析表明，在亚音速时，气体在导管內是不断加速的，同时其温度、靜焓、压力却不断下降。这里气体动能占总焓的比例不大，但經发电机后却是增加的，所以发出的电功率是通过降低气体靜焓而得到的。超音速則不同，速度在导管內不断降低，而温度、压力却不断上升，动能所占比例較大，电功率是由降低气体动能而得到的。虽然在相同的效率下，有时超音速所要求的电导率或磁場略小，但是伴随着超音速入口气流而来的靜温的降低，引起其电导率的下降，所以目前一般偏重于亚音速的入口气流。

磁流体发电机的电气外特性，与普通电机相仿，通常具有下降特性。因此运行中，如果外界負載有变动，則必須及时地調整磁場或其它参数，否則电压会有波动，或者引起气流的堵塞。沿发电导管的电流密度，一般亦不是常数，对于等截面的发电导管，亚音速时，电流以及相应的电功率，主要由导管的后半部电磁效应所产生；超音速时，相反主要由前半部产生。

总之，磁流体发电机实际上把透平机与发电机的作用合而为一，其中不但有流体問題，亦有电磁过程。因此其运行特性比普通发电机要复杂得多。

至此主要叙述了利用带电粒子在运动时受磁場作用以致偏轉而发电的所謂传导型发电原理。但是当磁場强度与气体压力的比值較大，亦就是电子的迴旋频率与其平均自由碰撞时间的乘积比較大时，霍耳效应就不可忽視，其結果会引起沿气流方向的电流。若从主要由何种电流发出电功率的角度来考虑，发电原理可分传导型及霍耳效应型二种。发电机結構除了因发电原理不同而有区别外，具体結構的型式亦有不同，除上面討論得比較詳細的直綫型传导式发电机外，还有盘式、同軸型等多种。在直綫传导型发电机中，霍耳效应降低了电导的有效值，使发电机的能量密度有所減少，因此有人建議采用分裂电极以減少霍耳效应的影响。在霍耳效应比較強的条件下，仍可采用直綫型結構，直接利用霍耳电流发电，不过需放置許多分裂的短接电极。在盘式結構中，电极分別放置于軸心及外圓上，它利用传导电流发电，但是霍耳电流可以在气体中环流，这同样地降低了电导的有效值。同軸型发电机則利用霍耳效应发电，由于传导电流可以在气体中

环流，所以这里无需直线霍耳型中的许多短接电极。目前直线传导型的磁流体发电机，一則研究得比較早，二則原理比較基本，所以對於它的研究分析較多，相对地亦成熟些。

以上只討論了目前研究得比較多的直流磁流体发电机。由于近代電能的輸送、分配以及使用大部分都采用交流電，因此直流磁流体发电机所发出的直流電必須經反流裝置轉換成交流。这些轉換裝置目前技術上是可以解决的，不过因此却引入了附加裝置，增加投資，运行中又有電能損耗，可能还要附加供应无功功率，使运行指标下降。現在已提出了一些建議，如采用交变磁場、脉动气源等以得到交流電，最近又有建議采用旋轉磁場，即利用异步发电机的原理，在气流速度与磁場有滑差时发出交流電。总的看来，直接产生交流電还是一个比較新而复杂的問題，基本上还处于开始研究阶段。

現在世界上磁流体发电已引起許多国家的注意。苏联学者認為應該很好地研究这种新型的能量轉換方式，进行了某些分析工作，并且建立了一些实验裝置。几年前美国十家电力公司与阿富柯合作，利用电弧加热器作为热源，发了10瓩的直流電力，但由于材料限制只运行了几秒鐘。其后西屋电气公司利用油氧燃燒，亦发出了10瓩左右的直流電。最近阿富柯建立了一个油氧燃燒作热源的中型模型，据报导已发出了200瓩，以后还打算提高。在其他国家亦有有关研究工作的报导。除試驗与理論分析外，还作了一些大功率的假想性設計。

这样看来，磁流体发电在大功率方面可能有較大的前途，它可以燒油，亦有可能利用其它相宜的燃料。如果原子反应堆能在較高温度下运行，且能解决一系列的有關問題，

那么閉式循环估計会有利。如果研究有結果，亦可能作为星际航行中的发电裝置。此外亦可应用在一些特殊場合中，例如有可能利用噴气发动机噴出的高温气体作为輔助电源。更远一点，如果将来受控热核反应研究成功，且能轉化成高温、高速的等离子流，那么与磁流体发电結合起来，就有可能把热核能直接变成電能。

总之，磁流体发电不但在理論上，并且在实验中証明其原理是可行的，其参数估計是先进的。但是尚存在不少根本的關鍵的問題需要研究与解决。首先是有关发电机理的問題，即发电原理及相应的結構，例如气体及电磁的作用过程，能量传递过程，气体及电磁参数的选择，运行特性等問題。此外，直接发交流電的問題亦是一个重要的研究課題。其次是获得較高的电导率的問題，需要研究热源，播种物质，游离度与电导率及其受电磁場的影响等問題。总之，希望能得到温度不高，但电导率較高的气体。第三要解决高温的导电与絕緣材料。还有許多其他的問題，如整个工作循环的分析及其部件的研究，技术經濟比較等都需要进行探討。我們希望，經過各方面的努力，不但逐步解决各个問題，并使它具有較好的技术經濟指标，那么这种新的发电方式就会取得真正的实际应用。

- [1] L. Steg, G. W. Sutton: Prospects of MHD Power Generation, *Astronautics*, Aug., 1960.
- [2] S. Way, S. M. Dersorso, R. L. Hundstad, G. A. Kemeny, W. Stewart, W. E. Young: Experiments with MHD Power Generation, *ASME, Series A*, vol. 23, No. 4, Oct., 1961.
- [3] J. L. Neuringer: Optimum Power Generation Using a Plasma as the Working Fluid, *Dynamics of Conducting Gases*, 1960.
- [4] 楊昌琪: 等截面发电导管的磁流体发电的一般特性, 中国科学院电工研究所研究报告, 1962年7月。