

电力行业管理与执法实务全书

电力工程建设 (十二)

卢炳瑞 主编

中国言实出版社

图书在版编目(CIP)数据

电力行业管理与执法实务全书/卢炳瑞主编.

—北京:中国言实出版社,2004.9

ISBN 7-80128-321-6

I. 电…

II. 卢…

III. 电力工业—法规—中国—汇编

IV. F407.616

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 103281 号

中国言实出版社出版发行

(北京市西城区府右街 2 号 邮政编码 100017)

中铁十六局印刷厂

787×1092 32 499.125 印张

2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月第 1 次印刷

印数:1~1 000 册

定价:2560.00 元(本卷 16.00 元)

目 录

◎关于燃料电池发电技术调研报告	1
◎我国燃料电池技术进展	51
◎探讨在我国电力系统发展燃料电池发电的技术 路线	58
◎燃料电池及其发展前景 FUEL CELLSAND THEIR PROSPECTS	79
◎西部大开发电力要先行热电联产应做出更大贡献	87
◎电气化——可持续发展能源系统——谈谈我国 电气化标准问题	101
◎生物质气化发电技术简介	114
◎提高大城市电力使用效率的政策分析：日本的 实践经验	116
◎新能源与电子电力	131
◎中国风电场建设分析及发展预测	134
◎内蒙古某高新技术工业园焦化厂煤气资源回收 利用工程项目发电方式解决方案	144
◎关于进一步开展资源综合利用的意见	150
◎澳大利亚煤层气发电项目	157
◎盘江矿区煤层气资源及开发前景	170
◎电效经济：提升能效电效是一种最现实的选择	178

◎展望新世纪的中国能源之路	179
◎电效经济：发展中国家新一波的经济浪潮	187
◎国家政策导向——提高电能效率	188
◎北京排水集团高碑店污水处理厂沼气热电联 供情况介绍	195
◎增压流化床联合循环电站的发展动态	204

◎关于燃料电池发电技术调研报告

1. 引言

能源是经济发展的基础，没有能源工业的发展就没有现代文明。人类为了更有效地利用能源一直在进行着不懈的努力。历史上利用能源的方式有过多次数革命性的变革，从原始的蒸汽机到汽轮机、高压汽轮机、内燃机、燃气轮机，每一次能源利用方式的变革都极大地推进了现代文明的发展。

随着现代文明的发展，人们逐渐认识到传统的能源利用方式有两大弊病。一是储存于燃料中的化学能必需首先转变成热能后才能被转变成机械能或电能，受卡诺循环及现代材料的限制，在机端所获得的效率只有 33~35%，一半以上的能量白白地损失掉了；二是传统的能源利用方式给今天人类的生活环境造成了巨量的废水、废气、废渣、废热和噪声的污染。对于发电行业来说，虽然采用的技术在不断地升级，如开发出了超高压、超临界、超超临界机组，开发出了流化床燃烧和整体气化联合循环发电技术，但这种努力的结果是：机组规模巨大、超高压远距离输电、投资上升，到用户的综合能源效率仍然只有 35%左右，大规模的污染仍然没有得到根本解决。多年来人们一直在努力寻找既有较高的能源利用效率又不污染环

境的能源利用方式。这就是燃料电池发电技术。

1839年英国的 Grove 发明了燃料电池，并用这种以铂黑为电极催化剂的简单的氢氧燃料电池点亮了伦敦讲演厅的照明灯。1889年 Mood 和 Langer 首先采用了燃料电池这一名称，并获得 $200\text{mA}/\text{m}^2$ 电流密度。由于发电机和电极过程动力学的研究未能跟上，燃料电池的研究直到 20 世纪 50 年代才有了实质性的进展，英国剑桥大学的 Bacon 用高压氢氧制成了具有实用功率水平的燃料电池。60 年代，这种电池成功地应用于阿波罗 (Appollo) 登月飞船。从 60 年代开始，氢氧燃料电池广泛应用于宇航领域，同时，兆瓦级的磷酸燃料电池也研制成功。从 80 年代开始，各种小功率电池在宇航、军事、交通等各个领域中得到应用。

燃料电池是一种将储存在燃料和氧化剂中的化学能，直接转化为电能的装置。当源源不断地从外部向燃料电池供给燃料和氧化剂时，它可以连续发电。依据电解质的不同，燃料电池分为碱性燃料电池 (AFC)、磷酸型燃料电池 (PAFC)、熔融碳酸盐燃料电池 (MCFC)、固体氧化物燃料电池 (SOFC) 及质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 等。燃料电池不受卡诺循环限制，能量转换效率高，洁净、无污染、噪声低，模块结构、积木性强、比功率高，既可以集中供电，

也适合分散供电。

大型电站，火力发电由于机组的规模足够大才能获得令人满意的效率，但装有巨型机组的发电厂又受各种条件的限制不能贴进用户，因此只好集中发电由电网输送给用户。但是机组大了其发电的灵活性又不能适应用户的需要，电网随用户的用电负荷变化有时呈现为高峰，有时则呈现为低谷。为了适应用电负荷的变化只好备用一部分机组或修建抽水蓄能电站来应急，这在总体上都是以牺牲电网的效益为代价的。传统的火力发电站的燃烧能量大约有近 70%要消耗在锅炉和汽轮发电机这些庞大的设备上，燃烧时还会排放大量的有害物质。而使用燃料电池发电，是将燃料的化学能直接转换为电能，不需要进行燃烧，没有转动部件，理论上能量转换率为 100%，装置无论大小实际发电效率可达 40%~60%，可以实现直接进入企业、饭店、宾馆、家庭实现热电联产联用，没有输电输热损失，综合能源效率可达 80%，装置为集木式结构，容量可小到只为手机供电、大到和目前的火力发电厂相比，非常灵活。

燃料电池被称为是继水力、火力、核能之后第四代发电装置和替代内燃机的动力装置。国际能源界预测，燃料电池是 21 世纪最有吸引力的发电方法之一。

我国人均能源资源贫乏，在目前电网由主要缺少电量转变为主要缺少系统备用容量、调峰能力、电网建设滞后和传统的发电方式污染严重的情况下，研究和开发微型化燃料电池发电具有重要意义，这种发电方式与传统的大型机组、大电网相结合将给我国带来巨大的经济效益。

2. 燃料电池的特点与原理

由于燃料电池能将燃料的化学能直接转化为电能，因此，它没有像通常的火力发电机那样通过锅炉、汽轮机、发电机的能量形态变化，可以避免中间的转换的损失，达到很高的发电效率。同时还有以下一些特点：

1 不管是满负荷还是部分负荷均能保持高发电效率；

不管装置规模大小均能保持高发电效率；

具有很强的过负载能力；

通过与燃料供给装置组合的可以适用的燃料广泛；

发电出力由电池堆的出力和组数决定，机组的容量的自由度大；

电池本体的负荷响应性好，用于电网调峰优于其他发电方式；

用天然气和煤气等为燃料时，NO_x 及 SO_x 等排出量少，环境相容性优。

如此由燃料电池构成的发电系统对电力工业具有极大的吸引力。

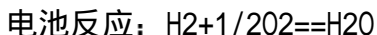
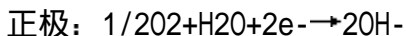
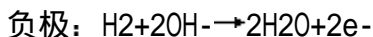
燃料电池按其工作温度是不同，把碱性燃料电池（AFC，工作温度为 100℃）、固体高分子型质子膜燃料电池（PEMFC，也称为质子膜燃料电池，工作温度为 100℃以内）和磷酸型燃料电池（PAFC，工作温度为 200℃）称为低温燃料电池；把熔融碳酸盐型燃料电池（MCFC，工作温度为 650℃）和固体氧化型燃料电池（SOFC，工作温度为 1000℃）称为高温燃料电池，并且高温燃料电池又被称为面向高质量排气而进行联合开发的燃料电池。另一种分类是按其开发早晚顺序进行的，把 PAFC 称为第一代燃料电池，把 MCFC 称为第二代燃料电池，把 SOFC 称为第三代燃料电池。这些电池均需用可燃气体作为其发电用的燃料。

燃料电池其原理是一种电化学装置，其组成与一般电池相同。其单体电池是由正负两个电极（负极即燃料电极和正极即氧化剂电极）以及电解质组成。不同的是一般电池的活性物质贮存在电池内部，因此，限制了电池容量。而燃料电池的正、负极本身不包含活性物质，只是个催化转换元件。因此燃料电池是名

符其实的把化学能转化为电能的能量转换机器。电池工作时，燃料和氧化剂由外部供给，进行反应。原则上只要反应物不断输入，反应产物不断排除，燃料电池就能连续地发电。这里以氢-氧燃料电池为例来说明燃料电池的基本工作原理。

氢-氧燃料电池反应原理

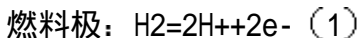
这个反映是电解水的逆过程。电极应为：



另外，只有燃料电池本体还不能工作，必须有一套相应的辅助系统，包括反应剂供给系统、排热系统、排水系统、电性能控制系统及安全装置等。

燃料电池通常由形成离子导电体的电解质板和其两侧配置的燃料极（阳极）和空气极（阴极）、及两侧气体流路构成，气体流路的作用是使燃料气体和空气（氧化剂气体）能在流路中通过。

在实用的燃料电池中因工作的电解质不同，经过电解质与反应相关的离子种类也不同。PAFC 和 PEMFC 反应中与氢离子（H⁺）相关，发生的反应为：



全体： $H_2 + 1/2O_2 = H_2O$ (3)

氢氧燃料电池组成和反应循环图

在燃料极中，供给的燃料气体中的 H_2 分解成 H^+ 和 e^- ， H^+ 移动到电解质中与空气极侧供给的 O_2 发生反应。 e^- 经由外部的负荷回路，再反回到空气极侧，参与空气极侧的反应。一系列的反应促成了 e^- 不间断地经由外部回路，因而就构成了发电。并且从上式中的反应式 (3) 可以看出，由 H_2 和 O_2 生成的 H_2O ，除此以外没有其他的反应， H_2 所具有的化学能转变成了电能。但实际上，伴随着电极的反应存在一定的电阻，会引起了部分热能产生，由此减少了转换成电能的比例。

引起这些反应的一组电池称为组件，产生的电压通常低于一伏。因此，为了获得大的出力需采用组件多层迭加的办法获得高电压堆。组件间的电气连接以及燃料气体和空气之间的分离，采用了称之为隔板的、上下两面中备有气体流路的部件，PAFC 和 PEMFC 的隔板均由碳材料组成。堆的出力由总的电压和电流的乘积决定，电流与电池中的反应面积成比。

PAFC 的电解质为浓磷酸水溶液，而 PEMFC 电解质为质子导电性聚合物系的膜。电极均采用碳的多孔体，为了促进反应，以 Pt 作为触媒，燃料气体中的

CO 将造成中毒,降低电极性能。为此,在 PAFC 和 PEMFC 应用中必须限制燃料气体中含有的 CO 量,特别是对于低温工作的 PEMFC 更应严格地加以限制。

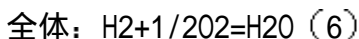
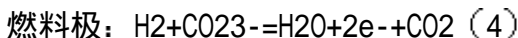
磷酸型燃料电池基本组成和反应原理

磷酸燃料电池的基本组成和反应原理是:燃料气体或城市煤气添加水蒸气后送到改质器,把燃料转化成 H₂、CO 和水蒸气的混合物,CO 和水进一步在移位反应器中经触媒剂转化成 H₂ 和 CO₂。经过如此处理后的燃料气体进入燃料堆的负极(燃料极),同时将氧输送到燃料堆的正极(空气极)进行化学反应,借助触媒剂的作用迅速产生电能和热能。

相对 PAFC 和 PEMFC,高温型燃料电池 MCFC 和 SOFC 则不要触媒,以 CO 为主要成份的煤气化气体可以直接作为燃料应用,而且还具有易于利用其高质量排气构成联合循环发电等特点。

MCFC 主构成部件。含有电极反应相关的电解质(通常是为 Li 与 K 混合的碳酸盐)和上下与其相接的 2 块电极板(燃料极与空气极),以及两电极各自外侧流通燃料气体和氧化剂气体的气室、电极夹等,电解质在 MCFC 约 600~700℃的工作温度下呈现熔融状态的液体,形成了离子导体。电极为镍系的多孔质体,气室的形成采用抗蚀金属。

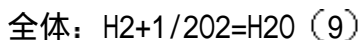
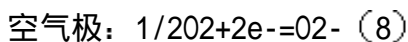
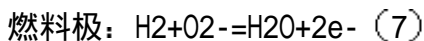
MCFC 工作原理。空气极的 O_2 (空气) 和 CO_2 与电相结合, 生成 CO_3^{2-} (碳酸离子), 电解质将 CO_3^{2-} 移到燃料极侧, 与作为燃料供给的 H^+ 相结合, 放出 e^- , 同时生成 H_2O 和 CO_2 。化学反应式如下:



在这一反应中, e^- 同在 PAFC 中的情况一样, 它从燃料极被放出, 通过外部的回路反回到空气极, 由 e^- 在外部回路中不间断的流动实现了燃料电池发电。另外, MCFC 的最大特点是, 必须要有有助于反应的 CO_3^{2-} 离子, 因此, 供给的氧化剂气体中必须含有碳酸气体。并且, 在电池内部充填触媒, 从而将作为天然气主成份的 CH_4 在电池内部改质, 在电池内部直接生成 H_2 的方法也已开发出来了。而在燃料是煤气的情况下, 其主成份 CO 和 H_2O 反应生成 H_2 , 因此, 可以等价地将 CO 作为燃料来利用。为了获得更大的出力, 隔板通常采用 Ni 和不锈钢来制作。

SOFC 是以陶瓷材料为主构成的, 电解质通常采用 ZrO_2 (氧化锆), 它构成了 O^{2-} 的导体 Y_2O_3 (氧化钇) 作为稳定化的 YSZ (稳定化氧化锆) 而采用。电极中燃料极采用 Ni 与 YSZ 复合多孔体构成金属陶瓷, 空

气极采用 LaMnO_3 (氧化镧锰)。隔板采用 LaCrO_3 (氧化镧铬)。为了避免因电池的形状不同, 电解质之间热膨胀差造成裂纹产生等, 开发了在较低温度下工作的 SOFC。电池形状除了有同其他燃料电池一样的平板型外, 还有开发出了为避免应力集中的圆筒型。SOFC 的反应式如下:



燃料极, H_2 经电解质而移动, 与 O^{2-} 反应生成 H_2O 和 e^- 。空气极由 O_2 和 e^- 生成 O^{2-} 。全体同其他燃料电池一样由 H_2 和 O_2 生成 H_2O 。在 SOFC 中, 因其属于高温工作型, 因此, 在无其他触媒作用的情况下即可直接在内部将天然气主成份 CH_4 改质成 H_2 加以利用, 并且煤气的主要成份 CO 可以直接作为燃料利用。

近 20 多年来, 燃料电池经历了碱性、磷酸、熔融碳酸盐和固体氧化物等几种类型的发展阶段, 燃料电池的研究和应用正以极快的速度在发展。AFC 已在宇航领域广泛应用, PEMFC 已广泛作为交通动力和小型电源装置来应用, PAFC 作为中型电源应用进入了商业化阶段, MCFC 也已完成工业试验阶段, 起步较晚的作为发电最有应用前景的 SOFC 已有几十千瓦的装置

完成了数千小时的工作考核，相信随着研究的深入还会有新的燃料电池出现。

美日等国已相继建立了一些磷酸燃料电池电厂、熔融碳酸盐燃料电池电厂、质子交换膜燃料电池电厂作为示范。日本已开发了数种燃料电池发电装置供公共电力部门使用，其中磷酸燃料电池（PAFC）已达到“电站”阶段。已建成兆瓦级燃料电池示范电站进行试验，已就其效率、可运行性和寿命进行了评估，期望应用于城市能源中心或热电联供系统。日本同时建造的小型燃料电池发电装置，已广泛应用于医院、饭店、宾馆等。

3. 燃料电池发电系统

3.1. 利用天然气的发电系统

MCFC 需要供给的燃料气体是 H_2 ，它可由天然气中的 CH_4 改质生成，其反应在改质器中进行。改质器出口的温度为 $600^{\circ}C$ ，符合 MCFC 的工作温度，可以原样直接输送到燃料极侧。

另一方面，空气极侧需要的 O_2 通过空气压缩机供给。另一个反应因素 CO_2 ，空气极侧反应等量地再利用发电时燃料极产生的 CO_2 。除了有 CO_2 外，燃料极排出气体还含有未反应的可燃成份，一起输送到改质器的燃烧器侧，天然气改质所必需的热量就由该燃烧热

供给。这种情况下，排出的燃料气体会含有过多的 H_2O ，将影响发热量，为此通常是先将排出燃料气体冷却，将水份滤去后再输送到改质器的燃烧侧。从改质器燃烧侧出来的气体与来自压缩机的空气相混合后供给空气极侧。

实际的电池因内部存在电阻会发热，故通过在空气极侧中流过的大量氧化气体（阴极气体，即含有 O_2 、 CO_2 的气体）来除去其发生的热。通常是按 $600^\circ C$ 供给的气体在 $700^\circ C$ 下排出，这一指标可通过在空气极侧进行流量调整来控制，为此采用阴极气体的再循环，即，空气极侧供给的气体为以改质器燃烧排气与部分空气极侧排出气体的混合体，为了保持电池入口和出口的温度为最佳温度，可将再循环流量与外部供给的空气流量一起调整。

来自空气极侧的排气为高温，送入最终的膨胀式透平，进行动力回收，作为空气压缩动力而应用。剩余的动力，由发电机发电回收，从而可以提高整套系统的效率。另外，天然气改质所必需的 H_2O （水蒸汽）可从排出的燃料气体中回收的 H_2O 来供给。

这种系统的效率可达 55~60%。在整套出力中 MCFC 发电量份额占 90%。绝大部分的发电量是由 MCFC 生产的。如果考虑到排气形成的动力回收和若干的附

加发电，广义上也可以称为联合发电。

在使用 PAFC 的情况下，若以煤炭为燃料发电时就不容易了，采用天然气时，其构成类似于 MCFC 机组，基本上是由电池本体发电。原因是 PAFC 排出气体温度较低，与其进行附加发电不如作为热电联产电源。

SOFC 能和较高温度的排气体构成附加发电系统，由于 SOFC 不需要 CO_2 的再循环等，结构简单，其发电效率可以达到 50%~60%。

3.2 利用煤炭的发电系统

以 MCFC 为例进行介绍。煤炭需经煤气化装置生成作为 MCFC 可用燃料的 CO 及 H_2 ，并在进入 MCFC 前除去其中含有的杂质（微量的杂质就会构成对 MCFC 的恶劣影响），这种供给 MCFC 精制煤气，其压力通常高于 MCFC 的工作压力，在进入 MCFC 供气前先经膨胀式涡轮机回收其动力。涡轮机出口气体，经与部分来自燃料极（阳极）排出的高温气体（约 700°C ）相混合，调整为对电池的适宜温度（约 600°C ）。该阳极气体的再循环是，将排出的燃料气体中所含的未反应的燃料成分返回入口加以再利用，借以达到提高燃料的利用率。向空气极侧供给 O_2 和 CO_2 是通过空气压缩机输出的空气和排出燃料气体相混合来完成的。但是，