
Overview on Equipment of Distributed Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Junxiang Zhai*, Guangli He, Congmin Liu, Zhuang Xu, Zhonghui Tian

National Institute of Clean-and-low-carbon Energy, Beijing, China

Email address:

junxiang.zhai.a@chnenergy.com.cn (Zhai Junxiang), guangli.he@chnenergy.com.cn (Guangli He),

congmin.liu@chnenergy.com.cn (Congmin Liu), zhuang.xu.a@chnenergy.com.cn (Zhuang Xu),

zhonghui.tian@chnenergy.com.cn (Zhonghui Tian)

*Corresponding author

To cite this article:

Junxiang Zhai, Guangli He, Congmin Liu, Zhuang Xu, Zhonghui Tian. Overview on Equipment of Distributed Proton Exchange Membrane Fuel Cell. *Science Discovery*. Vol. 9, No. 3, 2021, pp. 101-107. doi: 10.11648/j.sd.20210903.13

Received: March 16, 2021; Accepted: May 17, 2021; Published: May 24, 2021

Abstract: Distributed proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) is one of choices for distributed power equipment, which is efficient, eco-friendly, reliable and responsive. They can be used in different occasions such as house, communication stations and chemical industry. This paper introduces combined heat and power (CHP), backup power and stationary power station, and details their system structure, technical specification and sales distribution. CHP are mainly applied in Japan and Europe, especially in Japan. PEMFC backup power is mainly carried out by large network and communication companies, which are about total 900 units in global, and the actual examples of PEMFC power station are lesser. Through the analysis of representative cases, this paper sums the actual operation and fault cause of distributed PEMFC equipment. Research will be better developed based on this analysis. Meanwhile, this paper sums these distributed power equipment from view of economy. Finally, application of domestic distributed PEMFC is pointed out. Generally speaking, distributed PEMFC receives less attention in our country. However, there are multitudinous chemical industries and so hydrogen in by-product is abundant. As PEMFC technology matures and cost falls, PEMFC power station is a suitable mode for our country based on comprehensive utilization of resources.

Keywords: Proton Exchange Membrane Fuel Cell, Distributed Power Equipment, Combined Heat And Power, Backup Power, Stationary Power Station

质子交换膜燃料电池分布式发电设备应用研究综述

翟俊香*, 何广利, 刘聪敏, 许壮, 田中辉

北京低碳清洁能源研究院, 北京, 中国

邮箱

junxiang.zhai.a@chnenergy.com.cn (翟俊香), guangli.he@chnenergy.com.cn (何广利), congmin.liu@chnenergy.com.cn (刘聪敏), zhuang.xu.a@chnenergy.com.cn (许壮), zhonghui.tian@chnenergy.com.cn (田中辉)

摘要: 质子交换膜燃料电池 (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) 分布式发电技术具有高效、环保、可靠和响应迅速的特性, 是未来分布式发电设备的选择之一, 可以应用到住宅、通讯基站和化工园区等场合。首先, 介绍了质子交换膜燃料电池热电联产、备用电源和大型固定电站3种应用模式, 详述了各个应用模式的结构组成、技术参数以及销量分布。其次, 通过典型案例分析, 总结了燃料电池分布式发电设备实际运行情况、故障原因; 同时, 从经济性角度进行了总结分析。最后, 分析了我国质子交换膜燃料电池分布式发电设备的应用前景, 并总结提出了未来研究的努力方向。分析认为, 随着PEMFC技术的不断成熟和成本的下降, 工业园区内PEMFC固定发电是一个切合国内实际情况的应用模式。

关键词：质子交换膜燃料电池，分布式发电设备，热电联产，备用电源，固定电站

1. 引言

分布式发电设备是位于或邻近电负荷中心，生产的电能不以大规模、远距离输送为目的的独立发电设备，或者建立其基础上的热电联供设备，具有发电效率高、可靠性强、投资小、调峰性能好和能源梯次利用等优点[1]。与传统的“规模化、集约化、配送式”的发电模式相比，这种“分散式”的分布式发电直接对社会资源进行了重构，能够吸引更多的企业及个人参与其中，是未来发电技术的必然趋势。

在众多的分布式发电技术中，质子交换膜燃料电池（Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC）是一种以氢气为燃料，唯一生成物为水的发电技术，具有如下优点[2]：1) 工作温度低，在100℃以下，工作时，红外效应小；2) 能量效率高，发电效率能够达到60%，热电综合利用效率能够达到90%以上；3) 环境友好，设备的唯一外排物是水，对环境不会造成污染；4) 噪音小，安全可靠，该技术发电是利用电化学催化反应，设备核心主体没有机械运转零部件，运行安全，距离发电设备1m处声音分贝低于60dB；5) 结构紧凑、占地面积小，单位功率占地面积小于1m²/kW；6) 启动速度快，启动时间小于30s，负载适应性好，负载变化0~120%。鉴于以上特点，分布式PEMFC发电设备在家庭/建筑、工业园区、孤岛/沙漠、军事和通信等领域均具有良好的应用潜力。

截止到目前，分布式PEMFC发电设备的研究应用多数集中在日本和欧洲的热电联产、工业/建筑的固定式发电、可再生能源储和大型发电站等。本文介绍了质子交换膜燃料电池热电联产、备用电源和大型固定电站3种应用模式；进行了典型案例分析，总结了燃料电池分布式发电设备实际运行情况、故障原因，同时，从经济性角度进行

了总结分析；最后，展望了我国质子交换膜燃料电池分布式发电设备的应用前景，并总结提出了未来研究的努力方向。

2. 热电联产设备

PEMFC热电联产系统是实现能源梯次利用的最好方式，为家庭或公司提供热和电，能源综合利用率高。家用热电联产系统结构示意图如图1所示[2]。热电联产系统包含以下几个部分：1) 气体重整设备：气体重整及分离，生成氢气；2) 燃料电池电堆：产生电力；3) 电能逆变器：电力转换；3) 辅助零部件：热交换器、系统控制器、空气供给系统、气体循环系统、阀门和水泵等；4) 备用燃气炉以及热水储罐；5) 外围部件：热水循环泵、能量管理系统。

从全球研究开发来看，日本和欧洲最为积极推行该类型发电系统，分别通过Ene-Farm热电联产项目和Ene-Field项目进行推广。

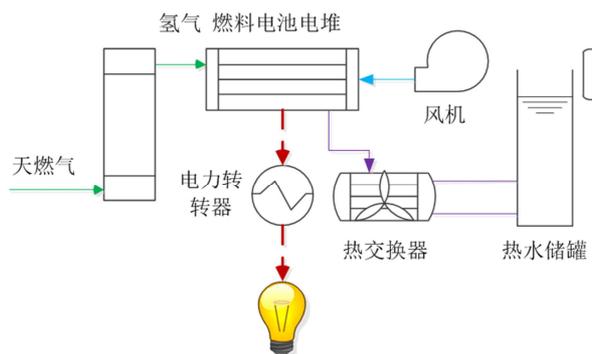


图1 家用热电联产系统示意图。

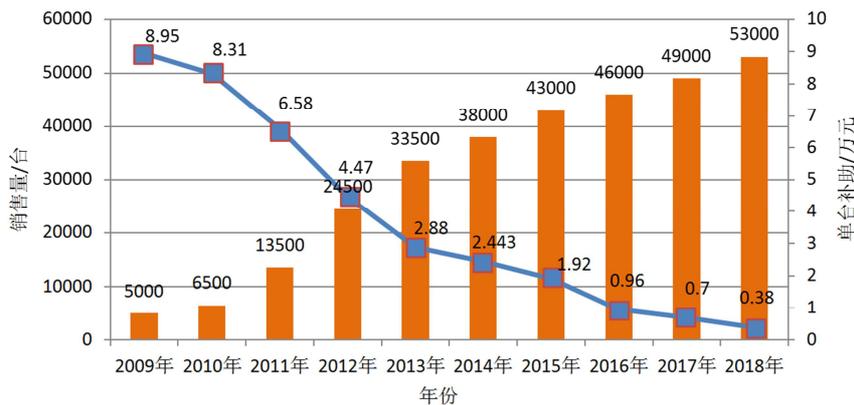


图2 日本Ene-Farm热电联产设备销售量和补贴。

2.1. 日本热电联产

Ene-Farm热电联产项目始于2009年，由日本政府主导，松下、东芝等燃料电池研发厂家以及东京、大阪燃气公司

参与其中。日本Ene-Farm热电联产设备销售量和补贴如图2所示，截止到2018年，日本政府的补贴由开始的8.95万/台降低到2018年的0.38万元/台（2019年取消），而Ene-Farm热电联产设备销售量逐年增加，2018年销售量达到了5.3万台，累积销售量约30万台[3]。

日本家用热电联供设备主要是松下、东芝及新日石3个公司在开展研究，新日石在2016年退出了市场，爱信精机加入进来。松下和东芝主导PEMFC型发电设备，爱信精机研发固体氧化物电池（Solid Oxide Fuel Cell, SOFC）类型，由于PEMFC电池在技术成熟度、价格、性能（输出功率可调、启停方便）占据优势，因此，市场上90%以上的产品都为PEM类型的热电联供系统，热电联产设备类型占比如图3所示[4]。日本给燃料电池热电联供系统市场化应用制定了详细的路线图：2020年，计划安装140万台系统，投资回报周期为7~8年，系统单价控制在80万日元（约4.9万人民币）；2030年，安装530万套，投资回报周期降低到5年，局部地区开展纯氢燃料电池热电联供系统[5]。

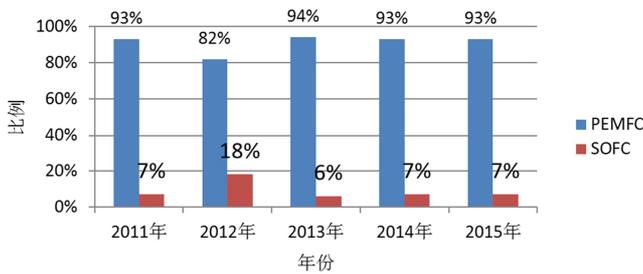


图3 热电联产设备类型。

松下、东芝的热电联产设备技术参数如表1所示[1]。设备发电功率都为700 W，热电综合利用率超过了95%。家用热电联产设备的推广，能够有效降低CO₂排放量（1.3吨/年）。今年5月，松下宣布开启新一代“Ene-Farm”热电联产设备[6]。与前一代相比，发电效率提高到了40%，热电综合利用率提高到了97%，体积略微减小；除此之外，自动化程度更好，更容易维修维护。

表2 欧洲Ene-Field项目的PEMFC热电联供设备技术参数。

Elcore 2400	Dachs InnoGen	Vitovalor	PEMmCHP G5	Inhouse 5000+
300 W	700 W	700 W	2 kW	5 kW
天然气	天然气	天然气	天然气+生物沼气	天然气+生物沼气+纯H ₂
Ecore	Sener Tec	Viessmann	Ballard Power	RBZ
电效率：35% - 38%				
系统综合效率：85% - 90%				

欧洲Ene-Field项目最成功之处在于现场跟踪了热电联供系统运行情况，从产品效率、性能衰减因素、市场化模式等获取了第一手资料，为系统的市场化、普及化奠定了基础。（1）系统效率：对比了实验室测试结果和现场检测结果，为了获取现场实际运行数据，系统上安装了气体计量表、功率计量表、热量计量表及其它传感器。（2）系统故障因素：从产品运行的现场检测来看，系统故障主要源于发电系统的配套设施，只有1%~2%的故障比例来源于燃料电池电堆及其核心零部件，12%的故障比例源于气体重整器及电力逆变器。（3）热电联供系统市场化模式：两条主要路线-“产品和服务”以及“能源服务”。前者是终端用户购买产品和服务，这是目前主要的市场化模式；后者是将系统厂商当做能源服务公司，用户不必购买产品，只需要支付电能和热能费用，此模式在非住宅系统占据主流。欧洲热电联供系统结束Ene-field项目之后，开始了

表1 松下、东芝热电联产设备技术参数。

项目	松下	东芝
类型	质子交换膜	质子交换膜
额定功率/W	700	700
额定发电效率/%	39	39
额定综合效率/%	95	>95
尺寸/(mm×mm×mm)	H1 750×W400×D400	W780×D300×H1 000
储水量/L	140	200
重量/kg	88	86
价格/万日元	160	163
保修期/年	10	10
运转方式	自动学习运转	自动学习运转

2.2. 欧洲热电联产

欧洲热电联供设备的实施推进是为了解决居民供暖，同时避免电网铺设引起的高额投资问题而发起的。热电联供系统项目分为原理样机、规模化验证、市场导入及大规模市场化应用，Ene-Field项目是其中一个重要环节，是热电联供系统市场化导入前的技术实际检验。Ene-Field项目起始于2012年，于2017年结束。与日本Ene-Farm项目相比，该项目规模小了很多，总计支持了1 046套300~5 kW的PEMFC和SOFC热电联供设备，其中包含了443套PEMFC热电联供设备；同时，所使用的燃料种类繁多：天然气、天然气/生物沼气混合气、天然气/生物沼气/纯氢混合气[7]。项目实施中，德国是主要成员国，安装了750套系统。项目包含了10个欧盟成员国，支持的多数是不成熟技术，设备制造商达到了10多个，系统规格类型达到12种。欧洲Ene-Field项目的PEMFC热电联供设备技术参数如表2所示。

PACE项目。该项目周期也为5年，到2021年结束。项目计划在欧洲10个成员国，部署2800套热电联供系统[8]。PACE项目比Ene-field项目更专注，只有4个系统开发商：Solidpower、BDR Thermea Senerotec系统、Viessmann（使用松下PEM技术）及Bosch（使用日本爱信精机技术）。该项目聚焦领域：产品创新及成本降低；供应链开发；政策合作；节能的证实和演示；测试分布式发电的益处等等。

2.3. 经济性分析

朱信等人[3]详细分析了热电联产设备在日本东京和我国上海的经济性。日本东京居民安装热电联产设备的经济性分析如图4所示。图4中的普通居民月合计费用包含了燃气费用和电费，安装Ene-Farm居民的月费用包含了燃气费用和热电联产设备折旧费用。从图4可以看出，家庭用户燃气用量超过77 Nm³时，安装热电联产设备比较经济划

算；燃气用量越高，越具有经济性。这主要是因为燃气度电低于电费，同时安装热电联查设备后燃气价格有优惠。

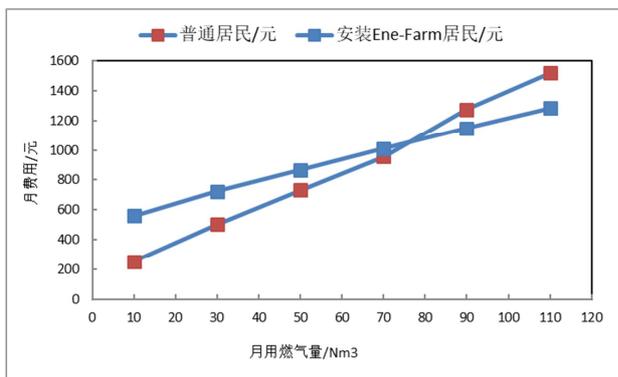


图4 日本东京居民安装热电联产设备的经济性分析。

上海居民的燃气费和电价都是分为几个档次：以燃气为例，燃气量在0~310 Nm³/年，燃气价格为3元/Nm³；310~520Nm³/年，燃气价格为3.3元/Nm³；超过520 Nm³/年，燃气价格为4.2元/Nm³。从计算结果来看，在上海推广热电联产设备时，即使计算热利用价值，度电成本最低为1.15元/kWh，依旧高于电价（第一档：峰值0.617元/kWh）。随后，从热电联产设备的经济敏感性分析结果来看，热电联产设备价格和燃气费用影响较大。如果热电联产设备价格降低60%，那么即使燃气费用价格不变，热电联产设备推广也具有一定竞争力。

3. 备用电源

PEMFC备用电源或者说应急电源是在特殊时刻，当常规电源无法使用时，为了保护人员、仪器和数据而设立的不间断电源，通常用在通信基站、数据中心、消防/应急站点、医院、重要楼宇和公共场合等。

3.1. 通信基站辅助电源

通信基站辅助电源电压一般为48 V或72 V，备用电源能够支撑24~72h。目前，通信基站辅助电源一般采用柴油机或铅酸电池。柴油机主要缺点是噪音和废气污染、难以操作。铅酸电池的主要缺点是在低温下放电特性差、寿命短、易故障，同时存在着铅污染问题。相比较而言，PEMFC燃料电池非常适合用于通信基站辅助电源，其自动化程度高，满足无人值守；电力充足，更换燃料方便；环境适应性强（-40~50℃），满足极低温度的需求。PEMFC、柴油机及铅酸电池分析对比如表3所示[9]。从表3可以看出，对于通信用基站辅助电源来源，PEMFC综合性能优于柴油机和铅酸电池。从图5比较结果来看，与传统备用电源相比，PEMFC初次投资成本较高，但其维护成本低；燃料电池通信基站电源服务期间，每台设备能够产生的经济效益约为2.4万[10]。随着5G发展，微型基站总量将会急剧增长，基站电源需求量也随之增大。新型燃料电池基站电源更加适合。

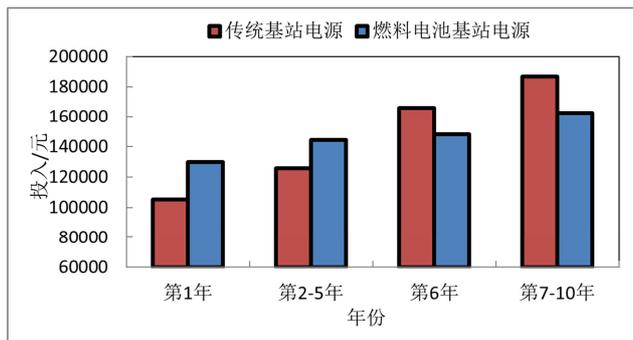


图5 两种基站电源成本对比。

目前，PEMFC通信基站备用电源在全球安装数量大约900套，主要分布在亚太地区，确切的说在印度尼西亚（大约472套），我国国内约有30台在试用[11]。

表3 PEMFC、柴油机及铅酸电池分析对比。

项目	PEMFC	柴油机	铅酸电池
可靠性	+	O	+
投资费用（元/kW）	-	+	++
可扩展运行时长	++	++	--
排放污染	++	-	++
噪音	+	-	++
效率	+	-	++
年维修费用	+	-	++
维护频率	++	-	--
寿命	+	++	--

3.2. 建筑/数据中心备用电源

一些重要建筑（如医院）及数据中心通常是7×24小时、365天的电力供应需求。一旦电力无法供应，不仅会面临巨大的经济损失（例如美国ebay的数据中心因故障，电力断开，带来的是6000 \$/min的直接经济损失），还会危及到人员生命（如医院无法手术）；因此这些场合必须配备备用电源，应对市电断电或自然灾害发生。PEMFC的可靠性及快速响应特性非常适合应用到这些场合；同时，与传统市电相比，PEMFC产生直流电源，省掉了交流/直流变换器。

Zhao等人[12]通过具体实验测试研究了一个10kW 的PEMFC作为数据中心电源系统的负载跟随性，并与传统电力的数据中心电源进行了全生命周期效率对比。结果显示，不论转换为交流还是直流电，PEMFC都响应迅速，重复性良好；PEMFC设备发电效率达到了53 %。与传统电力作为数据中心电源相比，PEMFC电源的全生命周期发电效率提高了12 %。

表4 数据中心PEMFC电源应用实例。

公司	年份	功率/kW
ebay	2013年	6
	2015年	增加3.75
Microsoft	2019年	250
CenturyLink	2014年	500
Apple	2012年	10 000

数据中心PEMFC电源应用实例如表4所示，由表4可知，PEMFC电源的功率等级从几千瓦、几十千瓦到几百

千瓦，Apple公司的达到了MW级别，该公司是联合风/光能及生物沼气。

3.3. 消防/应急站点等独立电源

在一些重要场地如避难所、工业园区及一些公共设施场地如公园，不依赖于市电的独立电源的安装增加了电力抗风险性。这些独立电源基本由风/光能、电解水制氢、燃料电池及蓄电池组成。这套电源设备不仅电力清洁，且实现了电力自足。

一个典型的案例为松下于2015年实施了“H2One”项目，“H2One”项目结构示意图[13]如图6所示。该能源供给系统的燃料来源只有太阳光和水，产物为水、热能、电能，无任何污染物。“H2One”能源供给系统融合了光伏发电装

置、蓄电池、电解水制氢装置、储氢罐、水箱及燃料电池。光伏发电装置产生的电力将被直接用于电解水制氢，所产生的氢气将被存储在氢气罐中，然后被燃料电池利用，而后者将产生我们所需的电力与热量。正常非紧急情况下，H2One的氢能量管理系统被用来电力系统的削峰填谷，东芝目前正在努力提高其储氢能力，以实现本地能源的自给自足。在发生灾害时，H2One存储的氢可以提供大约300名难民一周所需的电力与热水。示范项目主要是为了验证在氢能应急电力和热水供应系统的可行性以及在正常情况下和氢能量管理系统的效率。这将有利于该系统今后整体效率的改进。“H2One”系统安装在川崎市玛利恩广场、东扇岛中公园，这正是川崎市政府指定的紧急疏散区。

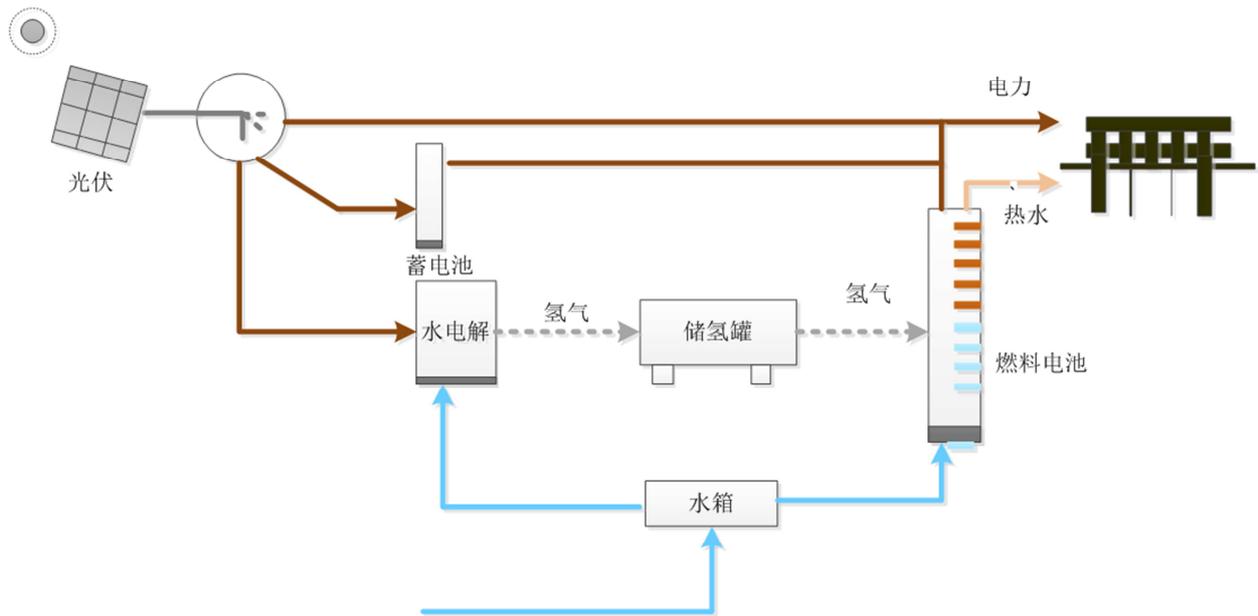


图6 松下H2One项目结构示意图。

4. 固定发电站

与PEMFC热电联产设备相比，全球范围内的PEMFC固定电站数量较少、分布较散。同时，对于大型固定发电站，通常使用熔融碳酸盐燃料电池（MCFC）、固体氧化物燃料电池（SOFC）以及磷酸燃料电池（PAFC），PEMFC固定电站更少。以2019年为例，MCFC、SOFC和PAFC三者出货量之和达到195 MW，基本都是固定式电源；总固定式电源出货量为221.2 MW，因此，固定式PEMFC类型出货量仅仅为26.2 MW，还包括上述的热电联产、应急电源以及固定发电站[14]。

4.1. 1 MW级PEMFC项目

比利时苏威集团在2010年启动了1MW的PEMFC项目，于2011年开始运行[15]。PEMFC设备由荷兰Nedstack提供，PEMFC核心零/部件膜电极来自德国SolviCore。苏威集团负责氢气供给和电力销售。设备主要参数，1MW的PEMFC项目核心部件参数如表5所示。

表5 1MW的PEMFC项目核心部件参数。

	模块	功率
系统	12	
电堆	14/模块	10 kW/电堆
膜电极	75片/电堆	
氢气	750 Nm ³ /h, 0.1-0.2 Bar	
额定输出		1MW@6 kV
峰值功率		1.7 MW

4.2. 世界首套2MW的PEMFC电站

在化工企业，尤其氯碱工厂，电力成本占据企业成本非常大（50%以上）；同时，氯碱企业的副产气含有大量氢气。利用氢气发电，再供给给化工企业使用，不仅利用了副产氢气，也能够解决企业电力成本。

基于上述，2015年1月我国辽宁营创三征(营口)精细化工有限公司和荷兰的三家公司合作建设全球最大的PEMFC固定式发电站[16-17]。2016年10月经过调试，投入运行。整个电站有三部分组成：电池集装箱、工艺集装箱及逆变器集装箱。电池集装箱6个模块组成，每一个模

块含有336单电池；工艺集装箱封装了加湿器、鼓风机、泵、散热器等工艺配套设施。逆变器集装箱封装了逆变器、升压器等电器件。电站使用的燃料来自于营创三征氯碱厂的副产气，副产气体需要经过吸附/脱附装置，除掉氯碱液及其他杂质气体。图7为电站工艺过程图。图7

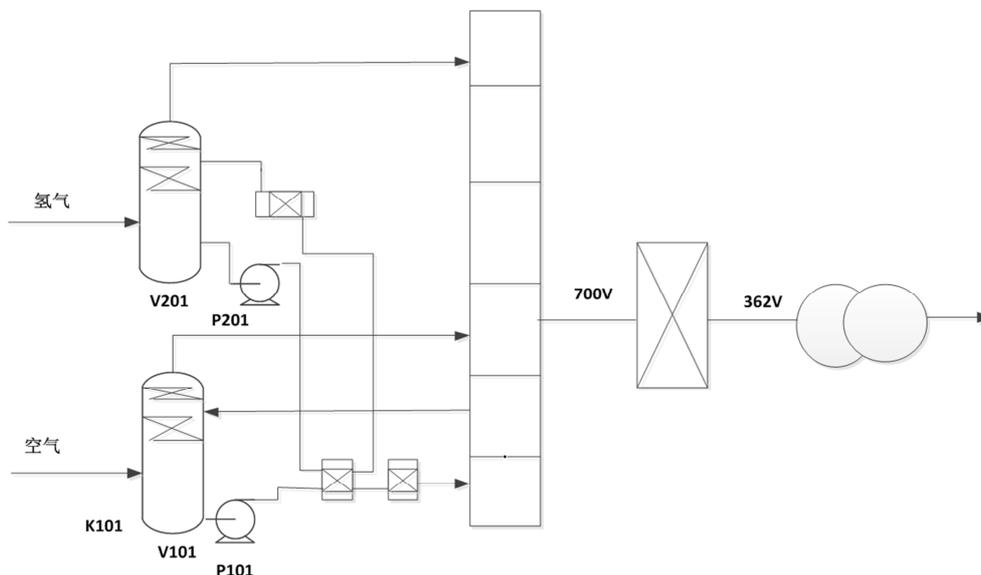


图7 电站工艺过程图。

电站运行7个月后，主要出现了以下问题：1) 电池衰减：氯碱氢气的电导率高导致，因此增加了一台洗涤塔和水雾捕集器，除掉氢气夹带碱雾；2) 天气寒冷导致电池氢气排气管路出现结冰，影响电池发电，后续给管路增加了保温。3) 公司电网电压偶尔波动太低导致逆变器跳闸，重新设定逆变器波动范围。4) 逆变器冷却器在紧急停车的时候一起停掉，造成压力高故障，重整设置控制器程序，系统紧急停车后冷却器继续运行一定时间。

5. 我国质子交换膜燃料电池分布式发电技术应用现状及发展趋势

5.1. 我国质子交换膜燃料电池分布式发电设备应用现状

质子交换膜燃料电池分布式发电设备具有丰富多样的应用场合，可以联合热能应用到家庭，可以作为应急备用电源为数据中心、重要公共场合提供不间断电源，也可以充分利用工业园区的副产氢资源，作为独立发电站使用。

热电联产设备主要在日本和欧洲推广，而我国因民用用电/气比较便宜，远远低于商业所用；因此，燃料电池分布式民用产品如热电联产、备用电源、应急电源替换现有的电/气产品没有价格优势。在我国国内，首个“风电直接制氢及燃料电池发电系统技术与示范”项目由节能环保公司承担，属于国家863项目，于2014年启动，2018年8月完成验收。制氢功率为100kW，燃料电池发电功率为30kW。项目完成了宽功率波动高效电解制氢设备、分布式发电用长寿命高环境适应性燃料电池发电系统和集压缩、储存于一体的紧凑型全自动高密度氢气储供系统的研制，建成基于风电耦合制储氢燃料电池发电的柔性微网系统

中，V101为空气增湿、加压场所；V201为氢气洗涤、增湿场所；P101将纯水输送到热交换器，P201将热水输送到V201增湿V201内的氢气。PEMFC模块产生的直流电，经过逆变器转换为交流电。

一套，系统累计示范运行时间900小时，模块化电解水制氢设备产氢能力为22.9 Nm³/h，电解槽直流能耗为4.34 kWh/Nm³，系统最大储氢容量为404 Nm³，最高储存压力为35.03 MPa。

5.2. 我国质子交换膜燃料电池分布式发电设备发展趋势

随着技术进步、商业化进展，这些民用的燃料电池分布式设备价格会大幅度降低，慢慢具备竞争优势。

近几年，考虑到完全洁净的氢气来源，燃料电池联合风/光制氢、发电成为国内研究领域的一个小焦点，目前，这个应用模式还处于研究前期，距离商业化应用还有一段距离；因此，笔者认为，从实际应用角度来看，我国国内有众多化工园区，其耗电量大，工业商电价格较高，而工业园区通常有大量的副产氢资源，如氨合成尾气、氯碱工业。若将工业园区内的氢气资源用于燃料电池小型电站发电，产生的电力再用于工业园区使用，将会大大提高园区经济性；因此，随着PEMFC技术成熟和成本下降，对于分布式燃料电池发电而言，PEMFC固定发电会率先成为一个切合国内实际情况的应用模式。

6. 结语

本文介绍了质子交换膜燃料电池热电联产、备用电源和大型固定电站3种应用模式，并通过典型案例分析，重点总结了燃料电池分布式发电设备实际运行情况、故障原因以及经济性等。日本和欧洲基本以推广家用型热电联产设备为主，设备功率低于1000 W，质子交换膜热联供类型占据了90%以上；从设备运行情况来看，设备故障主要出

现在辅助部件,故障比例占据67%,外围附件故障比例占据11%,而发电单元-电堆/重整器故障比例只有1%。由此看来,燃料电池分布式发电设备今后的研究重心应放在设备辅助部件和外围部件。从经济性分析来看,日本家用燃气量超过一定数值(大约77Nm³),比较适合安装燃料电池热电联产设备,为家庭提供热能 and 电能;与此不同,我国居民电费低,燃气价格高,燃料电池热电联产设备经济性差,只有当设备成本大幅度下降,才具有一定经济性。另外两种类型-备用电源和固定发站在全球范围内的数量都不多,基本是以示范项目为主。

分析了我国质子交换膜燃料电池分布式发电设备的应用前景。结合我国国情,我国国内有众多化工园区,工业园区内有大量副产氢气。因此,与日本和欧洲大力推行家用燃料电池热电联产设备不同,工业园区内燃料电池固定发电站应是我国分布式燃料电池发电研究发展的方向。研究人员可以从提高热电联用的综合效率方面着手进行研究,充分挖掘电燃料电池固定发电站的价值,提高其经济性,在我国快速推动这种应用模式的商业化。同时,我国有大量的可再生发电资源,尤其在我国偏远地区,风力、阳光充足,而电力铺设又相对比较困难,燃料电池联合风/光制氢、发电也应是重点研究的领域。

基金项目

国家重点研发计划(2019YFB1505000)。

参考文献

- [1] 郭井宽,孙华.分布式能源系统的发展动态[J]. 装备机械, 2016, (1): 70-74.
- [2] 廖文俊,倪蕾蕾,季文娇,等.分布式能源用燃料电池的应用及发展前景[J]. 装备机械, 2017 (3): 58-63.
- [3] 朱信,刘可.日本家用燃料电池热电联供产品经济性的初步分析[J]. 节能工程与经济, 2020 (1): 079-082.
- [4] Aki Maruta. Japan's ENE-Farm programe[R]. 2016.10.10.
- [5] Arias J. Hydrogen and fuel cells in Japan[R]. 2019,10: 1-127.
- [6] <https://fuelcellworks.com/news/panasonic-launches-new-ene-farm-product-a-fuel-cell-for-condominiums/>.
- [7] Nielsen E R, Prag C B. Learning points from demonstration of 1000 fuel cell based micro-CHP units[R]. Technical University of Denmark, 2017,10.
- [8] Summary report on specifications for newest model deployment in PACE (April 2020)[R]. 2020, 08.
- [9] Early Markets: Fuel Cells for Backup Power[R]. FUEL CELL TECHNOLOGIES OFFICE.
- [10] Mark Crouch. Fuel cell systems for base stations: deep dive study[R].
- [11] 莫汝智,洗健,李勇志,等.氢燃料电池在通信基站后备电源领域中的应用[J]. 通信电源技术, 2019,36(S1):44-48.
- [12] Li Zhao, Jacob Brouwer. Fuel cells for data centers: Power generation inches from the server[R]. Micro Research Technical Report, Msr-TR-2014-37.
- [13] Toshiba starts H2One independent energy supply[R]. Fuel cell bulletin, ISSN 1464-2859 April 2015.
- [14] The fuel cell industry review 2019[R], E4tech,2020.
- [15] Ir. Patrick Francoise. Solvy Future Businesses, FCH JU, 3rd stakeholders general assembly brussels, 09-10 Nov.2010.
- [16] 董文虎,张佳兴.2MW氢燃料电池运行情况[J]. 中国氯碱, 2018,2(2):12-14.
- [17] 姜龙,袁媛,刘子程,等.氢燃料电站在氯碱工厂的成功应用[J]. 氯碱工业, 2018,54 (4): 17-19.

作者简介

翟俊香(1982—),女,博士研究生,从事燃料电池及电化学纯化、压缩等方向的研究。也是本文的第一作者及通讯联系人。