

燃料电池—冷、热、电联产系统的经济性分析

基于冷、热、电联产的燃料电池（Fuel Cell—Based Combined Cooling, Heating, and Power, FC—CCHP）系统可以极大地满足数据中心的降温、供暖需求，同时还能为中心提供部分电力。对一个向数据中心供能的FC—CCHP系统进行经济性分析，建立合理的经济指标模型，并采集国内某大型数据中心的实际运行数据进行仿真研究。结果分析表明，提高能源价格比和延长FC运行寿命都会给CCHP系统带来更好的经济效益。

王伟/国家电网公司 黄莉 徐石明 郑红娟/国电南瑞科技股份有限公司 曹驰 高辉 谢俊/南京邮电大学自动化学院

0 引言

如今，纸质媒介正逐渐被电子媒介所代替，日常生活和工作中要处理更多的数据，大大增加了数据中心的数量与规模，也使得数据中心的能源需求日益增多^[1]。近年来，用于服务器、数据中心以及电子存储的电力占据了全球总增加量的80%；数据设施中使用电力最多的是降温系统，约占25%~50%的电力；英国商业建筑中36.5%的电力用于降温、通风和制冷方面；同时，据统计，温室气体每年排放量的2%来自IT行业及相关技术^[2]。

技术的改进与创新大大提高了原动机低功率运行时的效率，促使集中式发电逐步转向分布式发电。若将分布式发电应用于数据中心，可使其灵活地应对燃料价格，更好地保障系统的安全运行，并大大减少传输、分配过程中的损耗以及电力设施中的滞留能量^[3]。采用发

电系统和能量负载的分布式协同定位技术，还能充分利用原动机产生的余热。这种利用余热的技术被称为联合发电，冷、热、电联产（Combined Cooling, Heating and Power, CCHP）是联合发电的技术推广，其利用余热驱动降温系统，极大地提高了能源利用率，在经济效益、能源效率、环境影响和系统可靠性等方面具有明显优势^[4]。传统技术中，数据设施通过电网驱动计算机并进行电力降温。对于同一数据中心的能量需求，图1对采取CCHP方案和传统方法进行了相关比较，图2提供了两者的能量流动情况^[5-6]。相比于CCHP，传统方法能源利用率低，需要消耗更多的一次能源。而CCHP的加热和降温环节由原动机通过集成系统进行供能，大大提高了能源整体利用率。

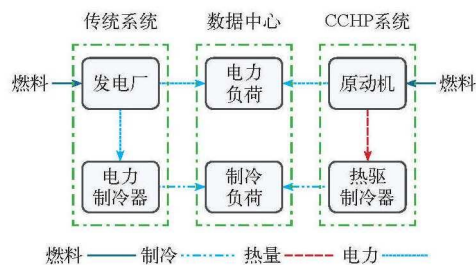


图1 传统系统与CCHP系统的比较

燃料电池（Fuel Cell, FC）是将化学能转化为电能但无燃烧现象的电化学装置，IT领域已逐渐增加对FC的研究与应用，其拥有电气效率高、低噪声和低排放的优势^[7]，是理想的CCHP原动机，被广泛应用于分布式发电领域。此外，由于FC没有移动部件，大大降低了计



王伟/高级工程师

关键词/Keywords

冷、热、电联产·
燃料电池·
数据中心·
经济性·

国家电网公司科技项目：面向能源互联网的多源协调优化运行应用研究（SGTJDK00DWJS1500100）。

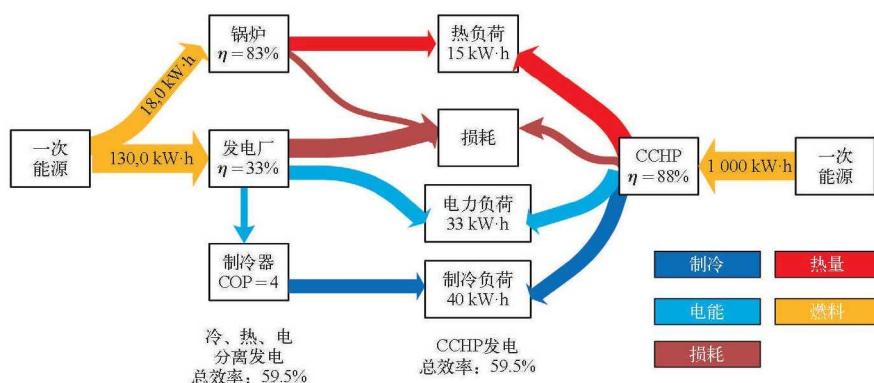


图2 传统系统与CCHP系统的能量流动情况

划中断风险，提高了系统的稳定性，改善了数据中心的安全防范能力。本文使用熔融碳酸盐燃料电池（Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC），其运行在500~700℃范围内，并以 CO_3^{2-} 作为中间产物，能提供高品质的高温余热，图3为MCFC的工作原理^[8]。

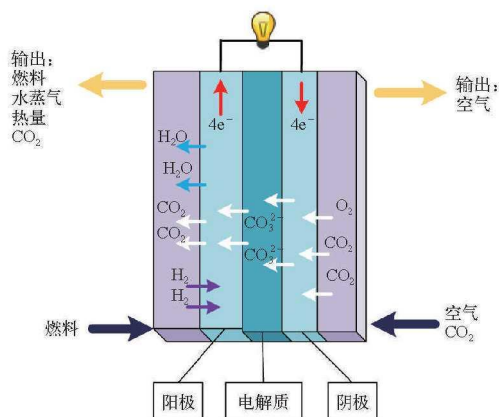


图3 MCFC的工作原理

热驱降温系统基于图4的溴化锂（溶剂）—水（制冷剂）吸收循环^[8]。不同于传统蒸汽压缩循环借助于机械压缩机，该系统利用吸收器和压力泵对制冷剂蒸气进行压缩。该系统的工作原理为：热量蒸发发电机中的制冷剂，之后制冷剂流向冷凝器；制冷剂冷凝后流过膨胀阀进入蒸发器，然后经过冷却水回路加热后再次被蒸发；制冷剂蒸气进入吸收器并被来自发电机吸收的稀释溶液喷洒；然后，高品质的制冷剂溶液被压力泵送回发电机。具有两个冷凝器发电机组（低温和高温）的系统被称为双效吸收降温器，这时系统将需要更高温的热量，选择使用单一还是双效吸收系统

取决于废气温度。

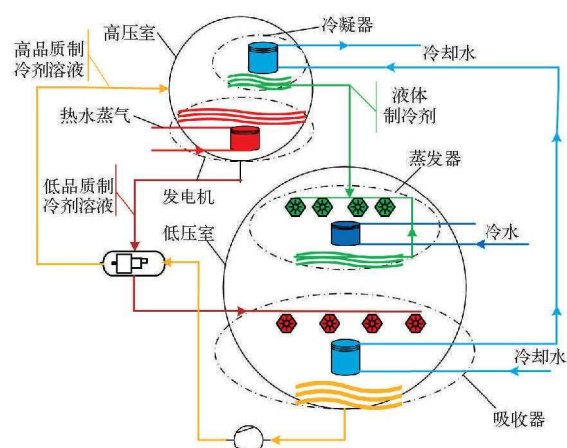


图4 吸收式降温器的工作原理

相关文献研究了采用不同供能系统时数据中心的能源效率。Schmidt等研究者^[9]采用协同发电技术向一座现代化数据中心提供电能和降温服务，并得出结论：该方案投资回收期的长短主要依赖于天然气和电力价格。文献[10]中，仿真测试结果表明，当负荷需求稳定且降温需求比较低时，数据中心可采用CCHP系统，这样会节省高达54%的运营成本；要使CCHP方案更加经济，电价要略高于天然气价格。有关FC作为原动机驱动数据中心也被广泛研究。文献[11]对FC驱动数据中心进行案例仿真，分析认为，这一举措可带来至少20%的节省成本。文献[12]中，研究人员测试了一个10 kW机架式FC系统在不同负荷下的运行情况，结果显示，数据中心采用FC后能够极大简化电网连接和内部配电系统，并达到53%的能源利用率。为深入研究FC—CCHP系统的运行，Guizzi和

Manno^[13]建立了一个系统运行模型,使该系统能够以恒定出力和制冷功率驱动数据中心。仿真结果表明,该系统可以减少数据中心约47%的成本、20%以上的能源以及超过20%的CO₂排放。

本文旨在分析FC-CCHP系统应用于数据中心的经济性,建立了经济指标评价模型,设计了典型的仿真场景,并基于已有文献的研究成果深入研究了影响FC-CCHP经济性的因素,仿真数据源自国内某大型数据中心。

1 问题模型

数据中心拥有七台超级计算机,以及一台云服务器。2014年,该中心平均每月使用936 MW的电力、865 MW·h的降温耗能,其中电力来自当地电网,降温主要采用区域降温。天然气燃料价格的选取参考2014年相关网站所统计的工业客户的天然气消费量、电力和降温价格,由数据中心以单价的形式支付给电网和区域供冷企业。该中心还有一个数据备份系统,一个电力备用系统(两台总额定功率为800 kW的柴油发电机),还有一套降温备用系统(降温功率为500 kW的压缩制冷机组和400 kW的水冷系统)。这些能源备用系统大大增加了投资、运营和维护(Operating and Maintenance, O&M)成本(约203 495元/年的柴油发电机耗费,44 210元/年备用降温耗费)。因此,数据中心采用FC-CCHP作为主要的能源系统后要能够有效地节省投资和O&M成本。

FC-CCHP的运行系统依据DFC3000模型^[14],DFC3000是一个具有2.8 MW功率,以MCFC为基础、天然气为燃料的联合发电系统。FC的运行寿命和O&M成本取决于诸多因素,本研究将使FC运行寿命达到5年,O&M成本控制在220元/MW以内。DFC3000配备一个双效吸收式制冷机,具有1 400 kW的制冷功率,性能系数为1.3,冷水温度为6~7℃,并在吸收循环后排放360 kW、50℃的水蒸气^[14]。来自吸收循环的冷水可冷却最高16℃的空气,然后这些空气被送入封装数据的降温系统以冷却大型计算机。从降温系统排出的空气温度在35~45℃,该温度取决于大型计算机的负荷

量,这些热量还可供其他办公部门使用。当冬季寒冷时,这些回收的热功率可达430 MW,相当于节省220 884元/年的取暖费。

参考有关经济效益分析的研究^[15-17],本文采用等效年现金流(Equivalent Annual Cash Flow, EACF)评价经济性指标,模型如下

$$EACF = \frac{NPV}{A_{t,i}} \quad (1)$$

$$NPV(i, l) = \sum_{t=0}^l \frac{R_t}{(1+i)^t} \quad (2)$$

$$A_{t,i} = \frac{1 - 1/(1+i)^l}{i} \quad (3)$$

式中, NPV为净现值; A为年金因子现值; l为预期寿命; i为利率; t为时期; R_t为给定期间的现金收入流量。

EACF(元/年)是一种经济性衡量方法,它一次性计算年收益或亏损费用,涉及资金状况、投资变化和回报率等,表1为相关计算数据。

表1 仿真输入数据

资金成本/元	70 145 000
运行及维护成本/(元/MW·h)	220
电力负荷/kW	1 185
制冷负荷/kW	1 282
电能价格/(元/MW·h)	580
制冷价格/(元/MW·h)	450
供热价格/(元/MW·h)	710
天然气价格/(元/MW·h)	330
利润率(%)	6

2 结果分析

该FC-CCHP系统可为数据中心节省约6 005 000元/年的运行费电,包括电力、降温、供暖和备用系统维护。但是考虑到资金成本后,该系统将会有约233 700元/年的经济损失。这表明,就目前能源价格和国家对技术的投资力度而言,FC-CCHP方案的经济效益不太理想。

据世界银行大宗商品预测,随着开采、运输技术的发展,未来天然气的价格将会下降。欧盟2030能源趋势报告也指出,工业用电价格预计每年将以平均5%的速率增长。假定天然气价格保持不变,

电力价格上涨3%，降温和供热价格年上涨2%，O&M成本每年也上涨2%，此时FC—CCHP系统会有很好的经济效益，EACF值约为3 152 000元/年。

在提供降温服务时，由于FC具有较高的热功率比，使得数据中心所生产的电力远远超过所需的电力。有两个环节可以产生额外电力。其一，达到CCHP电力制冷最佳配比（约为1:10），此时通过直接并入传统电力降温系统会大大减少冷却负荷耗量。其二，若将该系统应用于大学校园的数据中心，系统可以生产更多电力供数据中心使用，并从区域降温处获取额外的冷却功率，这样会比原始运行场景节省更多电力，此时EACF值约为611 300元/年。但是当系统满足数据中心的电力负荷需求时，其要终止供电，此处可挽回额外损失约3 167 000元/年。下一代FC预计将有7年运行寿命，此时FC企业需提供10年期的产品运行维护与保修。若将这10年保修期考虑在内，将有约692 000元/年的EACF损失。

上述分析结果已总结在表2中，EACF受能源价格变化的影响很大，天然气和电力价格1%的年变化将会分别带来的50%和56%的EACF变化。这意味着在电力价格大幅上涨的情况下，数据中心配备FC—CCHP系统会十分经济。

表2 不同场景下的EACF

场景	EACF
原始场景/(元/年)	-2 335 000
能源价格可预测/(元/年)	+3 152 600
有助于降温的额外电力/(元/年)	-2 946 000
电力负荷模式/(元/年)	-5 488 000
考虑7年运行寿命/(元/年)	-1 371 000
实行FC能源协议/(元/年)	-692 000

3 结束语

当前，由于投资高，O&M成本高，FC运行寿命短，使得FC—CCHP系统的经济可行性较差。但是，随着研究技术的发展，FC的运行寿命将大大延长，将来可被大规模生产应用，从而给该系统带来更可观的经济效益，进而产生更广泛的市场需求和经济规模，这将极大地降低资金成本，并吸引更多的技术人员的参与，最终会大大降低

O&M成本。基于预期的能源价格变化、政府的补贴和税收激励，数据中心采用FC—CCHP系统将会是一项经济客观的投资。

由于FC电气效率高，低噪声，低排放，当电力供应不足时，其可作为多联产系统的理想原动机，提供高品质的供暖或降温服务。采用FC—CCHP系统作为主要的能源系统，并以电网和区域供冷作为备用，这种方案将大大增加系统的电力和降温供应量，开辟了一个新的研究视角。

本文的研究结果表明，未来的研究重点应放在FC的运行寿命上，如果能将下一代MCFC的运行寿命延长两年，系统将额外节省956 000元/年的成本。除经济影响外，改善FC运行寿命还将间接影响市场规模和整个投资领域，从而不断改善FC—CCHP系统的应用前景。

参考文献

- [1] 周伏秋, 谷立静, 孟辉. 数据中心节能和优化布局研究 [J]. 电力需求管理, 2011, 13 (3): 1-3.
- [2] Koomey J G. Worldwide electricity used in data centers [J]. Environmental Research Letters, 2008, 3 (3): 220-236.
- [3] Chicco G, Mancarella P. Distributed multi-generation: a comprehensive view [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13 (3): 535-551.
- [4] 王鲁浩, 李歧强, 王桂荣, 等. 多可再生能源冷热电联供微网系统环境经济优化调度 [J]. 控制与决策, 2016, 31 (5): 913-918.
- [5] 王成山, 洪博文, 郭力, 等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (31): 26-33.
- [6] 周任军, 康信文, 李绍金, 等. 冷热电联供系统能量流函数及运行策略 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34 (1): 1-5.
- [7] 李春华, 朱新坚, 胡万起, 等. 光伏/燃料电池联合发电系统的建模和性能分析 [J]. 电网技术, 2009, 33 (12): 88-93, 111.
- [8] 于泽庭, 韩吉田, 王振. 熔融碳酸盐燃料电池总

- 能系统的热力学分析 [J]. 山东大学学报: 工学版, 2006, 36 (6): 28-31.
- [9] Schmidt R, Iyengar M, Steffes J, et al. Cogeneration: grid independent power and cooling for a data center [C]. Proceedings of the ASME Interpack Conference, 2009: 1063-1075.
- [10] Xu D, Qu M. Energy environmental, and economic evaluation of a CCHP system for a data center based on operational data [J]. Energy and Buildings, 2013, 67 (4): 176-186.
- [11] Riekstin A C, James S, Kansal A, et al. No more electrical infrastructure: towards fuel cell powered data centers [C]. Workshop on Poweraware Computing and Systems, 2013, 48 (1): 39-43.
- [12] Zhao L, Brouwer J, James S, et al. Servers powered by a 10 kW in-rack proton exchange membrane fuel cell system [C]. International Conference on ASME & International Coufereace on Fuel Cell Science, 2014.
- [13] Guizzi G L, Manno M. Fuel cell-based cogeneration system covering data centers energy needs [J]. Energy, 2012, 41 (1): 56-64.
- [14] 顾继先. 燃料电池发电的电站应用 [J]. 电网与清洁能源, 2013, 29 (4): 96-99.
- [15] 路宽, 刘思, 牛新生, 等. 运用成本效益分析的电动汽车充电电价制定 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26 (3): 76-80.
- [16] 董凯, 江辉, 黄泽荣, 等. 运用成本效益分析的风/柴/储能系统规划方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22 (3): 67-72.
- [17] Yan B F, Xue S, Li Y F, et al. Gas-fired combined cooling, heating and power (CCHP) in beijing: a techno-economic analysis [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 63: 118-131.

(收稿日期: 2017-03-24) EA

广告 | AD



Weidmüller 

魏德米勒MultiMark标记系统 —使电气柜内的联接清晰可见

工业4.0使电气柜内的联接布线越来越复杂, 电气元件及其联接的标记能有效降低误操作的风险并帮助现场维护。魏德米勒MultiMark标记系统, 在整个工程阶段的初期, 就提供针对这些需求的专业解决方案, 150种新的标记产品几乎可以涵盖所有的标识需求。MultiMark标记系统包括软件、标记号和打印机, 快速打印, 快速标记, 简便的操作以及清晰的打印内容使整个标记流程得以优化。

扫一扫, 关注魏德米勒官方微信



Let's connect.

魏德米勒电联接(上海)有限公司
电话: 86 21-22195008 网址: www.weidmueller.com.cn