

天然气发电项目分类与审批办法建议

——兼论分布式供能系统与冷热电联供的关系

华 贲

(华南理工大学 天然气利用研究中心 , 广州 510640)

摘 要 : 从世界能源转型的历史进程和视野论述了燃煤热电联产发展为天然气冷热电联供的必然性 , 剖析了能源生产和供应的集中与分散的关系 . 论述了相对于集中的千 MW 级煤、水、核电主力基荷机组 , 百 MW 级天然气发电属于分布式能源 . 中国“ 十二五 ”将建设的一大批支撑地方新区域经济发展的百 MW 级天然气冷热电联供分布式发电项目(DES/ CCHP) , 绝大多数能够以 16 h/d 模式运行 , 肩负起提高能效、保障新区能源、开拓天然气下游市场、提高电力供应可靠性和调峰的四重使命 , 均可按“ 天然气冷热电联供调峰电站 ”审批 , 门槛是能效高于 70% . 10 MW 及以下的小型 DES/ CCHP 按自备电站审批 .

关键词 : 能源生产 / 供应 ; 集中与分散 ; 冷热电联供 ; 分布式供能 ; 天然气发电 ; 项目审批办法

中图分类号 : TK01 ; TE09 ; F206 文献标识码 : A 文章编号 : 1673 - 1603(2011) 04 - 0289 - 05

0 引 言

过去 10 年以 10% 速度增长的中国经济是靠年增 2 ~ 3 亿 t 煤炭支撑的 . 2010 年中国耗煤 32.5 亿 t , 占世界总量的 48.3% , 是碳排放居世界第一位的主要原因 . 为实现 2020 年碳强度降低 40% ~ 45% 的目标 , “ 十二五 ”能源规划中提出 2015 年中国煤耗“ 封顶 ”在 38 亿 t/a 的指标 . 新增的煤炭消耗主要用于新建超超临界坑口电站和纯氧煤气化多联产 . 中、东部新工业园区、新城区占能耗 60% ~ 80% 的燃料都不可能再依靠新增燃煤 , 只能转向天然气 .

发达国家成熟的天然气下游市场与中国目前以及广东省规划的天然气消费市场的比较 , 如表 1 所示 .

表 1 美国和中国天然气消费分布^[1] %

分类	电力	工业	商业	住户	油气生产 + 管输	车辆
美国 2008	29	28	13	21	6 + 2.9	0.1
中国 2009	14.3	36.5	5.3	20.0	13.7	10.2
广东规划 2015	29.17		1.97	68.86		

注 1. 中国数据是根据文献[1]的另一个表的数据整合推测的 ;
2. 广东省 2015 规划中的 68.86% 为“ 城市居民燃气 ” , 1.97% 为“ 分布式能源 ”

广东省目前天然气发电装机容量仅为 3 GW 多 , 按“ 十二五 ”规划 , 将新建 16 个容量共 11.88 GW 的天然气发电项目 . 2015 年天然气发电装机容量将达到 15 GW , 占总发电装机的 14.6% , 消耗天然气 114 亿 m³/a , 占总消耗量的 29% , 远远超过全国的平均值 . 16 个天然气发电规划项目中 , 列为“ 热电联产 ”CHP 的有 6 个、“ 冷热电联供 ”CCHP 的有 2 个、“ 调峰调频 ”电厂的 1 个 ; 其余 7 个中 , 5 个是已有(调峰)电厂的扩建 , 2 个是新建“ 燃气电厂 ”^[2] . 另外 , 广东省还规划了 7.61 亿 m³/a(占 1.97%)的天然气用于“ 分布式能源 ” . 但“ 十二五 ”期间天然气怎样才能支撑快速增长的工业和建筑物燃料需求 , 广东用于“ 城市居民燃气 ”的近 69% 天然气用于何处 , 天然气用于“ 热电联产 ”是否最高效率 , 理顺天然气发电项目审批办法对其下游市场发育、提高能效有什么重要意义 , 针对这些问题 , 在此作些分析和探讨 .

1 历史进程的回顾^[3-5]

人类使用的一次能源从 1850 ~ 1920 年 , 经历了从生物能源转向煤 , 再转向石油、天然气的两次大转型 . 目前正在发生逐步向核能与可再生能源的第三次历史

收稿日期 : 2011 - 10 - 11

作者简介 : 华 贲(1937 -) , 男 , 沈阳人 , 华南理工大学教授 , 博士生导师 , 天然气利用研究中心主任 , 中国能源学会常务理事 , 中国能源研究会热力学与工程应用专委会副主任 , 《Frontiers in Energy》、《天然气工业》等杂志编委 . 中国城市燃气协会分布式能源专委会特别顾问 . 主要从事过程系统能量分析和综合化的理论工程研究 . 著有《天然气冷热电联供能源系统》等论文 400 余篇 . 2010 获“ 中国分布式能源特别贡献人物奖 ” . 完成广州大学城、清远华侨工业园、珠海横琴新区等冷热电联供区域能源规划十余项 .

性大转型. 热电联产 CHP 是在 20 世纪燃煤占一次能源 30% ~ 80% 的历史时期发展起来的 ,其着眼点在一次能源转换环节. 而自 1970 年起 ,天然气逐渐替代煤发电并作为工业和建筑物燃料 ,煤则更多地用于发电基荷以及钢铁、水泥等领域. 天然气价格的提高催生了把天然气发电以及作为工业和建筑物终端供能结合起来的冷热电联供 CCHP 技术. 其着眼点已不仅是“联产” ,而是通过科学用能、梯级利用、系统优化来实现从一次能源到终端利用最高效率的“联供” . 从燃煤 CHP 到天然气 CCHP ,是一个重大的科技进步. 如果从抽象概念出发 ,天然气也可以搞 CHP ,燃煤也能实现 CCHP. 但是 ,最新型燃气轮机联合循环能效已可达 60%、CCHP 总能效 80% 以上 ,但仅靠抽汽供热所能够达到的“热电比”却远不如效率只有 40% 的燃煤 CHP. 所以 ,仅仅套用 CHP 模式利用天然气是不够的. CHP 与 CCHP 系统的比较见表 2.

表 2 燃煤热电联产与天然气冷热电联供的比较

项目	燃煤 CHP	天然气 CCHP
基本模式	锅炉/汽轮机 - 发电 + 抽汽供热	燃气轮机或内燃机联合循环
一次发电最高效率	40%	60%
着眼点和范围	一次能源转换	一次能源到终端利用全过程
理论基础	热力学第一定律	热力学第二定律
关键参数和考虑内容	供热抽汽量和比率	梯级利用、各级传热温差、烟损耗 ; 满足所有终端用能需求的最优方案
评价指标	热电比	能效、经济性、碳减排效果
审批门槛	热电比 > 30%	一次能源利用效率 > 70%

2 能源生产和消费的“集中”与“分散”

现代能源从生产到终端消耗有 3 个层次. ①一次能源 ,即煤油气等化石能源和可再生能源. ②一次能源转换成的二次能源或载能介质 ,主要是电 ,2010 年我国电力能源消费占一次能源消费总量的比率已达 44. 35% ,天然气也是能够通过管网向远程广大地域供应的载能介质 ,未来还有氢气. ③终端用能 ,在占总能耗大部分的工业、建筑物领域 ,主要形式是电、热(蒸汽)和冷 ,也有天然气. 交通终端用能则是多元的.

能源转换和终端供应的“集中”与“分散”是相对 ,而不是绝对的. 就终端用能来说 ,分散的是一家一户、一栋楼宇供冷、暖 ,一个个小锅炉产蒸汽. 集中的是北方城市几平方公里范围、上千万平方米集中供暖(CWS) ,半径 1. 5 km 的区域供冷(DCS) ,半径 8 ~ 10 km 的供工业蒸汽. 显然 ,集中的终端供应比分散更

高效. 这也是全世界的发展趋势.

就一次能源转换成载能介质来说 ,分散和集中的尺度则完全不同. 集中的发电指 1 GW 超超临界燃煤机组、800 MW 水轮机等高效率、低单位投资的大机组 ,构成总装机 2 ~ 6 GW 的核电站、5 ~ 6 GW 的火电站、10 ~ 20 GW 的水电站等骨干、基荷电源 ,能够通过数千 km 长、500 ~ 1 000 kV 低损耗的超高压、特高压电网输电 ,构成可覆盖数十万 km² 的供电主力. 但风电、太阳能热发电一般没有这么大 ,百兆瓦级就是集中的 ,最近刚刚规模化运行的潮汐发电 ,十兆瓦级就得算集中的了. 对生物质燃料/化工装置 ,10 万 t/a 级采用发酵、热解的大型化工厂也是集中的. 分散的发电指屋顶太阳能光伏 ,装机小于 50 MW 的小河水电 ,几十或几百千瓦的边远地区 and 海岛风电等等. 小于 1 MW 的应急柴油发电机当然也是分散发电.

天然气发电多大算集中 ,多大算分散 ,这是与以上情况都不同的. 因为如上所述 ,天然气既是一次能源 ,也是载能介质 ,同时还是终端用能介质. 电是“一身二任” ,天然气则是“一身三任” . 上世纪后 20 年代 ,发达国家建设了一批大型天然气发电厂. GE、西门子、三菱公司的 9F 级天然气发电机组 ,单台联合循环规模已达 400 MW. 我国 2006 年投运的深圳东部、广前、惠州等 5 个配合 LNG 照付不议合同和昼夜调峰的天然气电厂 ,计划都是 2 ~ 6 台 9F ,总装机容量 2 GW 多 ,这些当然是集中的发电. 而配合冷热电联供终端供能的 1 MW 左右的天然气内燃机或微燃机当然是分散的发电. 但两者之间是否有一个鲜明的界限呢 ?

3 “分布式能源”与“分布式供能”系统辨析

上面讨论的“集中”与“分散” ,在发电侧关键是总量规模 ,在终端供应侧关键是用户集约化的规模 ,在英文中是 Centralized 和 Decentralized 两个单词. 2003 年北美东部的大停电事故后 ,纽约市和墨西哥城为保障供电安全分别在境内建设了 5 个和 6 个数十兆瓦的天然气联合循环分散式电源 ,作为大电网的补充和安全保障 ,用的就是 Decentralized 这个词.

而上述基于热力学第二定律 ,把发电同工业和城市建筑物供冷、供热结合起来 ,实现科学用能、梯级利用的冷热电联供(CCHP)系统 ,是着眼于提高能源利用效率而开发的 ,它与不论从终端供能还是能源转换的角度所看的“集中”与“分散”完全不同. 因此 ,最早采用这种技术的美国人把它叫做“ Distributed Energy

System ”,按英文直译就成了“ 分布式能源系统 ”. 究其要义,是藉冷热电联供实现最高能效,因而就必须建设在冷、热、汽负荷中心,就地直供;其规模由冷、热水和蒸汽的经济输送距离所决定,因为从经济上说电当然是可以就地直供的. 所以从本质上来说,应该翻译成“ 分布式供能系统 ”才更确切. 这样来看,它当然可大可小. 着眼于 1 MW 左右的小规模冷热汽终端用户,就开发了微型燃气轮机,或采用小型内燃机. 着眼于大型燃气轮机更高的单循环发电效率,就设法与早已有之的大型过程工业、大城市集中供热(Centralized Warming System),以及区域供冷(District Cold System)结合起来. 按照 10 km 左右的蒸汽和采暖热水经济输送距离,相应的电力装机就可达 100 MW 规模,覆盖范围可达几十 km². 可见,“ 分散 ”与“ 分布 ”一字之差,其概念是不同的.

最早发展 DES/CCHP 的美国,到 1999 年,在已建设的 980 个项目中,覆盖一定区域的、平均装机容量 78 MW 的项目有 27 个,占到了装机容量的 42.8%,加上平均容量 22.4 MW 的 60 个项目,共占总装机容量的 70%,其余的绝大多数不到 1 MW(见表 3). 例如一个麦当劳店的 DES/CCHP 不过 300 kW 左右. 美国 DES/CCHP 的这种格局,是它们的城市早已成型,冷热水管路受限和私有制的自由市场经济体制所决定的.

表 3 美国 1999 年 DES/CCHP 不同系统形式比较^[3]

系统形式	装机容量 (MW)	容量比例 (%)	系统数量 (座)	数量比例 (%)	平均装机容量 (MW)
联合循环	2 110	42.8	27	2.8	78.1
锅炉/蒸汽	1 341	27.2	60	6.1	22.4
燃气轮机	933	18.9	104	10.6	9.0
内燃机	506	10.3	770	78.6	0.7
其他	36	0.7	19	1.9	1.9
总计	4 926	100	980	100	5.0

发达国家发展天然气早于中国 30 多年,目前人均耗气量是中国的 30 倍^[1]. 早期它们也建设了一批集中式的天然气电站,但随着高效的 CCHP 的发展和天然气价格走高,美国早已不再建设纯发电的天然气电站,几乎所有 9F 机组都是瞄准出口市场的. 英国自 2000 年起也已经禁止再建纯发电的天然气电站. 丹麦的集中式电源点(有煤、有天然气),自 1985 年至今保持在 18 个没有增加. 但到 2009 年全国各地新建了数以百计的天然气 DES/CCHP,目前已占能源消耗的 50% 以上,使丹麦的 GDP 成倍增长而总能耗基本没有增加.

4 当前中国国情下应如何发展天然气 DES/CCHP

“ 十二五 ”期间,中国经济发展所需的新增能耗的 80% 还是在工业和建筑物终端用能领域.“ 十二五 ”期间,中国天然气将平均年增加 300 亿 m³,约合 0.4 亿 tce/a. 如果采用传统利用技术,远不能满足年增超过 1 亿 tce 的能源需求,而且用户难以承受高的天然气价格. 而若普遍采用能效高 1 倍的先进的天然气 DES/CCHP 利用技术,300 亿 m³/a 天然气就能够替代相当于 0.8 亿 tce/a 的煤炭,支撑工业化和城镇化的能源需求^[8].

今天中国的国情与美国和丹麦当年发展 DES/CCHP 时的情况有很大的不同. 中国正处在全球化、低碳转型和快速实现工业化、城市化,大批新建数十千米的新工业区和新城区的历史时期,加上城市居住密集,工业、CBD、住宅 3 种功能区集中布局等特定条件,使得中国可以采用各种最新科技成果集成创新,发展一大批冷热电汽负荷集成度很高的、百兆瓦级区域型天然气 DES/CCHP 系统,能效比西方国家的 DES/CCHP 更高. 图 1 是典型的天然气冷热电联供系统流程,表 4 是一个 38 km² 工业园区的能源规划实例,可见供应同样的冷热汽需求,按联供模式耗气 40 × 10⁶ m³,能比传统分供模式耗气 89 × 10⁶ m³ 的效率提高 1 倍^[8]. 如果发电装机容量匹配适当,总能效可达 90% 以上. 由此可见,推广天然气 CCHP 系统是中国近 10 年提高能效最重要的战略举措.

结合“ 十二五 ”新区建设,普遍推广区域型 DES/CCHP 是完全可能的. 以珠三角地区为例,正在规划或建设的珠海横琴新区冷热电联供能源站、深圳光明新区能源站、中山嘉明燃机电厂 2 期、珠海高栏港区域能源站等 2 × 9F 机组,中山南朗深南电厂、民众镇沙仔化工纺织园区电站、东莞东兴冷热电联供电厂、广州科学城北区“ 中新知识城 ”等 2 ~ 3 × 9E 机组,清远华侨工业园、中山嘉明电厂改造等 2 × 6F 机组,以广州大学城 DES 为代表的中型工商住区 2 × FT8 机组等规划实例表明,百兆瓦级的天然气联合循环机组实现 CCHP 是完全可能的.

5 现有工业区、城区天然气 DES/CCHP 的局限和解决办法

现有区域冷热蒸汽管道的路由是限制大型 DES/CCHP 发展的主要因素,但不拘于“ 楼宇型 ”或“ 用户

型”框框的小型 DES 仍有发展的空间. 只要努力满足 ①冷、热、汽负荷多种类、多时段互补 ②减少各级传热温差,安排能量多次梯级利用 ③尽可能选用高效、廉价设备等 3 个条件,就有可能实现小型 DES 能效、经济性和碳减排的目标. 因此,如选择一个冷热电负荷均

较大的用户为投资主体,按照市场机制向邻近用户拓展冷、热水或蒸汽的市场,规模以不向电网售电为度的项目,其管道路由的限制并非完全不可克服. 一个可借鉴的成功案例,美国芝加哥市世界最大的 10 万 RT 的区域供冷项目,就是从 2 万 RT 的基础上逐步扩大的.

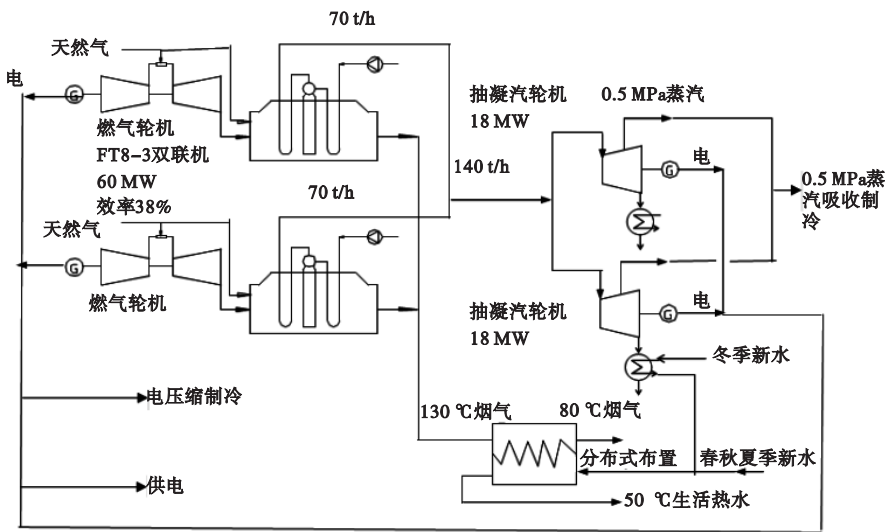


图 1 典型的天然气冷热电联供系统流程图

表 4 某工业园区常规分供系统与 CCHP 系统各项能耗和总能耗的比较^[8]

项目	供应规模	供热量 /MW	常规分供耗气量, MW/10 ⁶ m ³ /a	CCHP 减少发电/耗气量, MW/亿 m ³ /a
发电	264MW		508/2.33	
供蒸汽	150t/h	114	127/58	26.3/23
供热水	471t/h	27.4	30/14	3.6/1.7
区域供冷	281MW		146/17	60.7/15.4
合计			89	40.1

注 1. 发电、供汽、热水按 4 800 h/a, 供冷按满负荷 1 200 h/a 计; 2. 第 3、4 列因次, 斜杠前为 MW, 斜杠后是折算为 106 m³/a

6 天然气 CCHP 电站与调峰电站相互兼容的创新^[7]

按照电力发展规划, 2015 年我国核电和风电装机的占比将增大到 8%, 昼夜调峰和长距离西电东送挑战日益增强. 而规划到 2015 年最适宜调峰的天然气发电只占 4.5%, 抽水蓄能电站调峰不仅耗费成千亿元的投资, 而且还会损失 25% 的电量. 研究表明, 在智能电网即将普遍推广、昼夜分时电价自动切换的条件下, 上述区域型 DES/CCHP 大部分都可以按照 16 h/d 的模式运行. 夜间停机时制冷改用电网的低价谷电; 16 h/d 生产的生活热水储存在负荷中心够 1 天用量的储罐中; 蒸汽供 16 h/d 运行的离散制造业用户基本同

步. 只有 24 h/d 连续生产的过程工业企业用蒸汽, 需要专设机组供应. 因此, 只要能够理顺生产关系的架构, 天然气冷热电联供电站按 16 h/d 运行兼做调峰电站, 在技术上和工程上是完全可行的, 这也是基于当代中国特定国情的集成创新.

“十二五”期间, 天然气消费即使达到 2 600 亿 m³/a, 也不过占一次能源的 8%, 远低于世界平均水平的 24%. 中国要想以 8% 的天然气同时实现提高能效、替代工业和建筑物燃煤、支撑“十二五”中国经济发展、保障供电可靠性和调峰等多项任务, 就必须实行跨越式发展, 在新开发区域普遍推广 DES/CCHP 模式, 并与调峰相结合. 如果把 2015 年比 2010 年新增 1 600 亿 m³/a 天然气中的, 原来分别用于发电、工业燃料、建筑物燃料的 1 200 亿 m³/a 天然气集成优化用于新老区域的冷热电联供能源系统, 到 2015 年, 中国天然气发电量就能够从 2 700 亿 kWh/a 增加到 4 500 亿 kWh/a, 占比从 4.5% 提高到 8.4%. 这样不仅大大增加了调峰能力, 而且也增强了负荷中心的供电可靠性.

7 现阶段天然气发电项目审批办法建议

促进上述集成创新的关键, 就是改革天然气发电项目审批办法. 建议:

1) 把百兆瓦级的区域型 DES/CCHP 均定位为冷

热电联供+调峰电站,除了大型炼油、化工、造纸、食品等24 h连续生产的过程工业CCHP系统之外,所有工业园区和新城区的天然气DES/CCHP都适用。百兆瓦级建在负荷中心、冷热电汽都能就地直供、主要提供腰荷和峰荷电力、仅占电网总量10%左右的系统,叫做“分布式供能系统”是符合实际的。

2) 由电监会和物价局联手确定峰/平段分时上网电价,这是实现该机制的关键。目前燃煤发电尚有亏损,在与煤的等热值比价大于2的天然气国内消费价格下,天然气发电很难赢利。而天然气DES/CCHP调峰,正是打开这个“死结”的钥匙。作为调峰机组,给予峰段/平段的电价是合理的。建议按照占总电量75%的大工业用电价格制定全省统一的百兆瓦级天然气DES上网电价;若大工业峰段和平段的用电电价分别为 p_p 和 p_e ,则天然气DES峰段和平段的上网电价定为 $\beta \cdot p_p$ 和 $\beta \cdot p_e$ ($\beta < 1$),或者 $p_p - \alpha$ 和 $p_e - \alpha$ ($\alpha < 0.1$)。 β 或 α 是协调电网与发电企业利益的关键参数,应由电监局和物价局测算定出,并根据经济条件变化而调整。

3) 替代大部分抽水蓄能设施配合调峰的宏观效果^[6]。“十二五”末,广东天然气总耗量将达400亿 m^3/a ,如果安排其中的一半,即200亿 m^3/a ,结合“十二五”新规划的工业园区、新城区的开发,建设一批规模化的DES/CCHP,加上原有机组逐步改造为CCHP,总装机容量可达20 GW,发电量可达1 000亿 kWh/a ,就能够发挥核电和风电所要求的昼夜调峰的作用。按照这种模式,广东2015年电力构成如表5所示。

表5 广东省电力“十二五”规划方案中的对比

	品种	煤	油气	核	水	风	抽水蓄能	小计
原有规划	装机	60.97	13.32	13.79	8.09	2.50	7.28	106.0
	%	57.5	12.57	13.01	7.63	2.36	6.87	100
新模式	装机	57.5	20	14	8	2.50	4	106.0
	%	54.2	18.9	13.2	7.5	2.4	3.8	100

比较可见,由于天然气CCHP发电增加,煤电增加量就会减少,也不需再新建抽水蓄能。“十二五”打下按照新模式发展的基础之后,“十三五”就能够继续深入,配合发展到24 GW的核电调峰,扩大DES/CCHP的规模,进一步减少煤电的比率。这是广东省除“退二进三”继续优化产业结构之外,深入提高能效,减排二氧化碳,完成国家下达的能源强度 ε 、碳强度 κ 指标的最根本、最关键的举措。

4) 替代纯尖峰负荷的调峰机组。因为南方夏季城

市建筑物空调有时可占电网峰荷的50%,所以南方电网计划在广东建设几个大规模的尖峰负荷纯调峰电站,年运行小时数为1 500~2 000 h。因开工率太低,为维持项目的经济性需要给予高达2元/ kWh 的上网电价。如果采用上述规划,绝大部分新区白天空调冷负荷由DES/CCHP直供,夜间利用低谷电,将有巨大的削峰填谷的作用。再加上平/峰时段可令DES机组满负荷运行,发电量倍增,就可不必再建纯尖峰负荷调峰电站,不仅避免了大量投资的积压浪费,而且可节省南方电网上百亿元/年的调峰费用。

5) 现有城区和工业区小型DES/CCHP定位为自备电站。现有城区和工业区小型DES/CCHP因为受到冷热汽管道路由的限制,规模难以很大(暂定为1~10 MW级),发电时间、质量都有随机性和不确定性,因此不宜向网上售电,可视作企业法人下属的自备电站。这样的DES即使在广东建100个总量也不到1 GW,不到广东电力的1%,无足轻重。对它们的管理办法建议如下:① 依托某一终端能源需求(首先是电)大户,避免另组能源服务公司。② 按照自备电站模式管理,并网,但不上网售电,电力在内部消化。③ 规模在10 MW左右或更小,不要求调峰,避免干扰电网运行。④ 多余电力可以制冷、热,向邻近用户销售。⑤ CCHP总能效 $>70\%$ 的,按大工业或区域型DES/CCHP的天然气价格定价,否则就按照较高的商用天然气价格定价(上海已实施此办法)。

有了这样的管理机制,现有城区的较小型DES/CCHP将会较快发展。同时水管路由的障碍在市场激励下,有可能通过各种办法被克服。

参考文献

[1] 陈俊武. 中国中长期碳减排战略目标初探[J]. 中外能源, 2011, 16(8): 1-10.
[2] 广东省能源发展“十二五”规划(修订稿). 2011. 8.
[3] 华 贲. 区域型分布式冷热电联供能源系统的规划设计[J]. 中外能源, 2011, 16(3): 13-20.
[4] 华 贲. 低碳能源时代中国热电联产的发展趋势[J]. 沈阳工程学院学报, 2011, 6(2): 97-101.
[5] 华 贲. 热电联产VS冷热电联供[J]. 中外能源, 2011, 16(11)(待发表).
[6] 华 贲. 分布式能源与电网优化配置和供电可靠性[J]. 中国发电, 2011(11): 24-26.
[7] 华 贲. 区域分布式能源与智能电网安保调峰的战略协同[J]. 中国电机技术版, 2011(3): 1-6.
[8] 华 贲. 天然气在向低碳能源转型中的关键作用[J]. 天然气工业, 2011, 31(11)(待发表)

(下转第297页)