

全国碳市场启动后北京热电行业低碳运行管理方式研究

史彩菊^{1*}, 金生祥², 安振源¹, 王六虎¹, 金立¹, 马万军¹, 王清², 张秉权²

(1.北京京桥热电有限责任公司, 北京 100067; 2.北京能源集团有限责任公司, 北京 100022)

【摘要】 随着四大热电中心的建成投产, 北京市完成了由燃气机替代煤机的转变, 实现了更加智能化的清洁能源发电供热。2013年北京市碳市场启动运行, 给刚起步的燃气供热机组运行赋予了更广阔和更深远的意义; 2017年12月19日, 以发电行业为突破口, 全国碳排放交易体系正式启动, 北京市热电行业低碳运行管理意义重大而深远。本文以燃气热电联产机组运行数据为基础, 通过计算分析, 提出燃气热电联产机组清洁、高效、低碳运行方式, 为全国碳市场启动后, 北京乃至全国热电行业低碳运行管理提供经验借鉴。

【关键词】 燃气热电联产机组; 供电碳排放强度; 碳市场; 清洁、高效、低碳运行

【中图分类号】 F206

【文章编号】 1674-6252 (2018) 03-0032-07

【文献标识码】 A

【DOI】 10.16868/j.cnki.1674-6252.2018.03.032

随着环保要求的进一步严格, 清洁能源装机容量不断提高, 燃气机组由于其环保、节能、启停快等优点, 发展速度较快, 截至2017年8月底, 京津唐燃气机组装机容量达到1 117.458万kW, 占全部装机容量的15.07%。特别是在北京地区, 随着四大热电中心^[1]的建成投产, 煤机已全部退出运行, 北京地区燃气装机容量达到819.7万kW, 全部为供热机组。2011年, 国家发展和改革委员会下发了《关于开展碳排放权交易试点工作的通知》, 确定在北京、天津、上海、重庆、广东、湖北、深圳七省市开展碳排放权交易试点; 2014年, 北京市人民政府下发《北京市碳排放权交易管理办法(试行)》, 将对本市行政区域内重点排放单位的二氧化碳排放实行配额管理, 重点排放单位应当在配额许可范围内排放二氧化碳, 如果所拥有的配额无法满足自己的排放需求, 就需要通过交易购买碳排放权指标, 从而增加生产经营成本。随着各地碳市场运行经验的积累, 2017年将启动全国碳市场^[2]。

综上所述, 如何面临即将启动的全国碳市场, 继续保持燃气供热机组节能、环保优势, 保证燃气供热机组的清洁、高效、低碳经济运行, 是新时期、新形势、新要求下的迫切需求。

1 北京地区能源供应现状

1.1 装机规模及分布

随着节能减排和环境保护压力的增大, 北京市

“十二五”规划提出了“1+4+N”的供热体系, 即“建成东南、东北、西南和西北四大天然气热电中心, 形成1+4+N中心供热体系”。

东北天然气热电中心: 位于朝阳区高安屯, 供热能力为2 400万m²;

东南天然气热电中心: 位于朝阳区王四营, 供热能力为3 900万m²;

西南天然气热电中心: 位于丰台区草桥, 供热能力为2 100万m²;

西北天然气热电中心: 位于石景山区高井, 供热能力为3 600万m²。

目前四大热电中心已全部建成投产, 原有的燃煤机逐步退出市场, 北京市的装机类型全部为燃气机清洁供热发电, 并以9F为主流机型, 具体如表1所示。

1.2 燃气机组的主要特性介绍

目前北京市已投产燃气机组, 主要为“二拖一”燃气蒸汽联合循环, 其配置方案为2台燃气轮机、2台余热锅炉、1台蒸汽轮机, 同步建设脱硝装置。整套机组选型先进, 能源利用率高, 污染物排放少, 主要有以下几大特点:

(1) 运行方式多样化

机组采用“二拖一+3S离合器+大旁路”的配置方案, 可实现“两台燃机+两台余热锅炉+蒸汽轮机”的“二拖一”运行和“一台燃机+一台余热锅炉+蒸汽轮机”的“一拖一”运行; 还可以根据供热需求实

* 作者简介: 史彩菊 (1967—), 女, 高级工程师, 从事电厂热能动力工程管理, E-mail: shicaiju@powerbeijing.com。

表1 北京市装机规模及分布表

序号	电厂	归属发电集团	装机容量 / 万 kW	机组配置	备注
1	京丰燃气	京能集团	41	三菱 9F	一拖一
2	北京太阳宫燃气	京能集团	78	GE9F	二拖一
3	草桥燃气	京能集团	83.8	西门子 9F	二拖一
4	京能东北燃气	京能集团	84.5	西门子 9F	二拖一
5	京能西北燃气	京能集团	130.7	西门子 9F	一套二拖一 + 一套一拖一
6	未来城燃气	京能集团	25.5	西门子 9E	一拖一
7	郑常庄燃气	华电集团	50.8	西门子 9E	两台一拖一
8	华能北京热电燃气	华能集团	92.3	日本三菱 9F	二拖一
9	高井燃气电厂	大唐集团	138	GE9F9F	一套二拖一 + 一套一拖一
10	国华北京燃气电厂	国华集团	95.1	日本三菱	二拖一
合计			819.7		

现纯凝、抽凝、背压甚至汽轮机全切工况等多种运行方式。

(2) 供热能力大

抽凝工况的最大供热面积为 1 000 万 m²，背压工况的最大供热面积为 1 200 万 m²，设计有汽机全切工况，汽机全切工况下，供热面积可达 1 400 万 m²，以应对极端天气或市政供热特殊情况的需求，更好地担负起供热企业的社会责任。

(3) 环保水平高

采用降噪消音型设计，在平面布置、设备选型、工艺布置、降噪措施等方面全方位进行降噪优化设计，使厂界噪声控制在 45dB，达到了噪声控制最高等级；同步建设高效脱硝装置，氮氧化物排放低至 7.3mg/Nm³，远低于北京市 30mg/Nm³ 的排放标准；二氧化硫和粉尘接近零排放；二氧化碳年排放约 140 万 t，与全国火电平均水平相比，减排 130 余万 t。

(4) 能源利用率高

机组采用燃气蒸汽联合循环技术，通过“热电联产”的工艺方式，将高品位能源用于发电，低品位能源用于供热；通过锅炉尾部加装烟气换热装置等能源梯级利用技术，实现了清洁优质天然气能源的高效利用，机组供热季发电电气耗可低至 0.136Nm³，供热工况下能源利用率最高可达 89.74%。

(5) 自动化水平高

整套机组实现了“全程智能化控制”，自动控制水平国内领先，真正实现了全过程无断点的一键式启停^[3]，大大提高了系统操作的准确性、规范性，减轻了运行人员的劳动强度，缩短了机组启停时间。

1.3 北京地区燃气机组碳排放量测算

北京市目前已经投运燃气机组 12 台（套），其中“二拖一”机组 8 台（套），“一拖一”机组 4 台（套）^[4]，其二氧化碳排放强度和排放总量，随着机组运行方式的

不同、热电比^[5]的不同而存在较大不同，单套“二拖一”机组排放强度在 320～360kgCO₂/（MW·h），碳排放总量在 140 万～160 万 t；“一拖一”机组排放强度在 350～420kgCO₂/（MW·h），排放总量在 80 万～96 万 t。从最近几年北京市燃气机组参与北京碳市场的履约情况看，部分机组由于运行方式和热电比的不同出现了 5 万～8 万 t 的配额缺口。

《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》^[6]对二氧化碳排放提出了明确要求，即 2020 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40%～45%，2030 年二氧化碳排放达到峰值并争取尽早达峰，单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60%～65%。燃气机组是清洁能源机组，其氮氧化物排放目前已经降到 5mg/Nm³ 以下，二氧化碳排放也已经比同容量的煤机大幅降低，但是为了实现中国应对气候变化国家自主贡献文件的行动目标，北京市燃气机组还需继续节能挖潜，通过经济运行管理和热电比优化，进一步降低二氧化碳排放强度和排放总量。

2 国家及北京碳市场的发展及现状

2.1 国家碳市场的主要进展

20 世纪 80 年代，工业国家在应对环境危机的大讨论中，试图引导生态与经济的关系由“对立”转变为“并立”的“生态现代化”理论，主张以“市场机制”代替“命令控制”机制应对环境问题，成为碳市场形成与发展的重要理论基础^[7]。我国国家碳市场也是在这一理论基础之上形成和发展的。碳排放权交易理论最早是由美国经济学家 Dales^[8] 作为温室气体减排的有效市场工具提出来的，旨在通过市场方式提高环境资源利用效率。碳排放配额交易是世界各国普遍采用的环境经济策略，我国试点城市碳排放权交易均基于以上理论基础，其主要进展如表 2 所示。

表2 我国碳市场进展

年份	内容
2007	国家发改委发布应对气候变化国家方案
2008	《中国应对气候变化的政策与行动》白皮书发布
2009	承诺到2020年单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降40%~45%
2010	“十二五”规划要求建立碳排放权交易体系
2011	国家发改委公布我国碳交易试点地区：北京、上海、天津、重庆、深圳、广东、湖北
2012	各试点发布实施方案，为试点做准备
2013	深圳率先启动了碳交易，拉开了中国碳市场的帷幕
2017	启动全国碳排放交易市场
2020	力争建成制度完善、交易活跃、监管严格、公开透明的全国碳排放权交易市场，实现稳定、健康、持续发展

与其他市场体系相比，碳排放交易体系有点特殊，“碳市场本质上是一个政策性市场”。这一交易体系既有很强的政策性，政府强制性设定碳排放交易体系的覆盖范围、排放总量、各企业的排放限额，同时，这一体系又要坚持市场化导向，纳入交易体系的企业，碳减排成本高低不同，减排成本低的企业超额完成减排任务，可以将剩余的碳排放配额卖给超额排放的企业获取收益，通过这样的市场化方式，激励企业改进生产、转型升级，实现成本最小化的减排。

国家发改委2017年12月19日宣布，以发电行业为突破口，全国碳排放交易体系正式启动。在此次全国性的碳排放交易体系建设之前，我国的碳市场工作早在2011年就已经起步。2011年，我国确定北京、天津、上海、重庆、湖北、广东、深圳等7省市作为试点开展碳交易工作。2013年，深圳率先启动实际交易，拉开了我国碳市场的帷幕，各试点省市随后也逐步启动运行。目前已纳入近3000家重点排放单位，截至2017年11月累计配额成交量达到2亿tCO₂当量，约46亿元人民币。

2.2 北京市碳交易体系运行情况及对燃气电厂的要求

北京作为碳排放试点城市之一，从试点运行至今，已经形成一套完备的碳市场交易体系。根据《北京市碳排放权交易管理办法（试行）》规定，市发展改革委同市统计局定期确定年度重点排放单位名单和报告单位名单，并向社会公布，根据配额^[9]核定方法（历史法及先进值法）及核查报告，核定并发放重点排放单位年度配额，免费发放^[10]，重点排放单位应当在规定的时间内按照要求向市发展改革委提交上年度碳排放报告，并按照规定上缴与其上年度碳排放量等量的配额，履行年度碳排放控制责任，未按规定提交报告或履约的排放单位，北京市发展改革委依据《关于印发规范碳排放权交易行政处罚自由裁量权规定的通知》（京发改规〔2014〕1号），参照《关于北京市严格控制碳排放总量前提下开展碳排放权交易试点工作的决定》规定予以处罚，最高

将按照市场均价的5倍对该单位超出其配额许可范围的碳排放总量（未履约排放量）予以罚款。北京市碳市场启动至今，碳价基本稳定，平均价格在50.43元/t，根据规定，若不能正常履约，将按照252.15元/t进行处罚，一套“二拖一”燃气电厂，年度配额约150万t，若超配额排放5万t，就需要花费250多万元购买配额进行履约，否则将被处罚约1300万元。巨额花费对企业造成了社会效益和经济效益的双重负担和压力，要求企业必须加大节能减排力度，通过科技创新降低排放强度。对于北京市发电企业来说，通过经济运行管理，降低发电气耗，降低厂用电率，实现热电优化分配，是降低碳排放强度和排放总量、实现碳资产^[11]保值增值的重要手段和方式。

3 燃气机组低碳运行管理的研究方法和结论

现有国内文献和研究重点关注了碳排放交易体制的建立对电力行业尤其是发电企业的影响^[12]，分析了电力行业的机遇和挑战^[13]，并研究了适合电力行业的碳排放权交易机制^[14]，而针对发电企业如何适应碳市场发展，通过优化运行方式、节能降耗等从源头来减少碳排放，涉足较少。本文根据近三年北京市碳市场运行情况，结合燃气机组运行特性，从采暖季、非采暖季、年度运行节奏等整机优化运行和循环水冷端优化、辅机优化运行管理等方面，经过试验、数据搜集和分析，以“保政治供电和民生供热，提高经济效益，降低二氧化碳排放”为原则，提出低碳运行管理建议。

考虑燃气机组特殊的成本分布，各种不同工况下的固定成本、财务费用和管理费用的稳定性，为方便分析，暂将收入减去燃料成本之差称为“变动利润”。分析方法如下：分析机组投产以来的运行工况，考虑“四大热电中心”建设初衷，参照电力需求、供热量需求变化，确定要分析和探讨的运行方式；搜集实际运行数据，结合厂家提供的热平衡图，通过热力试验和计算^[15-17]，求得不同工况下的机组经济运行数据；根据经济运行数据和电价、气价、碳价等因素，计算（不含固定成本）的“变动利润”，进而比较确定清洁、高效、低碳经济运行方式。本文以以上原则，选取了采暖期相同供热量不同运行方式、非采暖期纯凝运行、机组年度运行方式安排、循环水冷端优化等四种情况进行低碳经济运行管理探讨。

3.1 采暖期低碳经济运行

北京地区兴建燃气轮机组，其主要目的还是要解决区域内供热需求，以期望降低燃煤采暖，其电力除了必须的区域电源支撑外，可以利用特高压和内蒙古、西北的网电来满足^[18]；北京地区无煤化，大幅降低环保排放；低排放的燃气机组采暖季在保证供热需求的前提下，采取何种运行方式，对于其二氧化碳排放影响较大。因此本文以满足当前热负荷需求为边界条件，通过比较采暖

期机组各种不同运行方式下的碳排放强度, 提出采暖季低碳运行的最佳方式。

机组冬季供热运行设计有抽凝、背压、汽轮机全切三种工况。由于全切工况为事故紧急情况下的特殊、非常规运行工况, 本文不做详述。冬季供热量除了受环境温度变化而变化外, 基本保持稳定, 因此, 本文选择满足不同环境气温变化的供热需求, 以保供热、保民生、降排放、提高外购电比例的能源供给原则, 保持供热量不变, 分析背压和抽凝两种工况运行的经济性。具体数据如表 3 所示。

表 3 中的供热量、发电量是实际运行数据, 并符合

机组热电负荷曲线, 决定了一个运行工况。燃气量是此工况下发电、供热消耗的总的燃气量, 二氧化碳排放量是按照《北京市企业(单位)二氧化碳排放核算和报告指南》的方法计算出来的, 其余各项指标都是在基础数据和工况的基础上计算而得。从以上表格可以看出, 无论在供暖初期、中期还是晚期, 在各种稳定的供热需求下, 背压运行的供电碳排放强度、发电气耗、单位燃气量的盈利能力均优于抽凝供热运行, 因此机组背压运行无论在能源消耗、二氧化碳排放还是单位燃气量盈利能力方面, 均表现出极高的低碳经济运行优势, 因此冬季供热, 机组拟采用背压供热运行。

表 3 相同供热量不同供热工况运行数据

名称	单位	供热量 1 500 GJ/h		供热量 1 600 GJ/h		供热量 1 700 GJ/h	
供热工况	—	抽凝	背压	背压	抽凝	背压	抽凝
发电量	MW	340.40	561.01	390.17	616.26	437.47	671.63
燃气量	Nm ³	84 178.11	123 146.28	93 919.90	133 476.64	103 076.20	144 300.22
变动利润	元	139 029.62	188 911.84	155 870.76	207 832.84	172 485.35	225 734.65
二氧化碳排放量	t	97.25	172.18	111.67	187.73	124.97	204.24
排放强度	kg/(MW·h)	233.40	413.23	251.27	422.40	264.65	432.50
单位燃气量的变动利润	元/Nm ³	1.65	1.53	1.66	1.56	1.67	1.56

名称	单位	供热量 1 800 GJ/h		供热量 1 900 GJ/h		供热量 2 000 GJ/h	
供热工况	—	抽凝	背压	背压	抽凝	背压	抽凝
发电量	MW	482.30	727.12	524.66	782.74	564.56	838.48
燃气量	Nm ³	111 647.00	155 617.00	119 632.31	167 426.99	127 032.12	179 730.20
变动利润	元	188 873.41	242 617.28	205 034.92	258 480.73	220 969.88	273 325.00
二氧化碳排放量	t	137.15	221.69	148.19	240.09	158.11	259.44
排放强度	kg/(MW·h)	274.29	443.38	280.79	454.91	284.61	466.99
单位燃气量的变动利润	元/Nm ³	1.69	1.56	1.71	1.54	1.74	1.52

3.2 非采暖季低碳经济运行

机组年度利用小时设计为 4 500 小时, 近年来, 随着北京绿色发展要求, 利用小时将处于不断压降的趋势, 但非供暖期由于区域负荷支撑的需要, 仍需运行, 特别是在春、秋两季, 机组运行负荷率较低, 经常处于“二拖一”低负荷和“一拖一”负荷重叠区域运行, 电量相同, 但由于运行方式的不同, 其能耗水平和碳排放水平差别较大, 研究这两种方式下的低碳经济运行具有较大的实际意义。

每年 3 月下旬到 5 月、9—11 月上旬, 是年度电力需求低迷阶段。此阶段, 机组经常处于“二拖一”低负荷率(50%~60%)和“一拖一”运行的尴尬选择中。下面通过实际运行数据(见表 4), 从气耗水平、碳排放强度和单位供电量盈利能力等方面综合分析低碳环境下非采暖季机组的经济运行方式。

比较“二拖一”低负荷(50%负荷率——“二拖一”

工况二)和“一拖一”(40%负荷率)运行, “二拖一”低负荷(50%负荷率)碳排放强度高、单位供电量盈利能力低, 因此“二拖一”低负荷运行无论从能耗水平、碳排放强度还是单位供电量盈利能力方面均不及“一拖一”(40%负荷率)运行。

但就利润而言, “二拖一”低负荷(50%负荷率——二拖一工况二)运行, 优于“一拖一”(40%~45%负荷率), 但这种优势随着碳排放成本的增加不断降低, 当碳排放成本升高至 85 元以上时, “二拖一”低负荷(50%负荷率)运行, 产量高带来的利润优势将不复存在。因此在争取机组运行方式时, 尽量“二拖一”较高负荷率(60%负荷率以上)运行, 否则应权衡能耗水平、利润和碳成本各面, 平衡择优。

3.3 机组年度低碳经济运行

燃气机组年度发电利用小时计划是在核定电价时就确认的, 年度利用小时计划确定后, 其发电量的节奏安

表4 不同供热工况运行数据

指标	单位	二拖一		一拖一			一拖一		
		工况一	工况二	工况一	工况二	工况三	工况一	工况二	工况三
负荷率	%	69.41	51.21	40.47	40.22	40.32	43.21	43.51	43.41
发电量	万 kW · h	1396	1030	814	809	811	869	875	873
综合厂用电率		2.28%	2.64%	2.65%	2.65%	2.68%	2.52%	2.5%	2.47%
发电厂用电率		1.94%	2.28%	2.2%	2.2%	2.22%	2.13%	2.11%	2.07%
上网电量	万 kW · h	1 364.17	1 002.81	792.43	787.56	789.27	847.10	853.13	851.44
燃料成本	万元	586.37	450.94	343.18	340.35	341.01	361.34	364.03	363.2
售电收入	万元	846.6	622.34	491.78	488.76	489.82	525.71	529.45	528.4
变动利润	万元	260.23	171.4	148.6	148.41	148.81	164.37	165.42	165.2
二氧化碳直接排放	t	5 123.41	3 966.81	3 022.49	3 008.23	3 022.93	3 213.63	3 243.40	3 247.79
供电碳排放强度	kg/(MW · h)	374.27	394.11	379.67	380.21	381.20	377.86	378.66	379.89

排、热电比的不同都将造成较大的二氧化碳排放强度和排放总量的不同。本文在机组核价利用小时保持不变的状态下，绘制不同热电比下的机组实际运行供电碳排放强度，结合北京市供电碳排放强度先进值^[19]，通过分析，提出年度机组低碳经济运行管理建议。

北京市现行的二氧化碳配额发放原则为：产量乘以碳排放强度先进值，碳排放强度先进值^[9]由国家发改委发布，对于供热机组，其与热电比密切相关，具体如表5所示。

表5 电力行业碳排放强度先进值

子类	先进值单位	先进值
9E级热电比≤0.2	kgCO ₂ /(MW · h)	409.98
9E级热电比>0.2, ≤0.3		368.3
9E级热电比>0.3		341.15
9F级热电比≤0.2		353.1
9F级热电比>0.2, ≤0.3		345.49
9F级热电比>0.3		312.37

根据机组年度运行数据，冬季发电利用小时占全年60%左右，本文拟合出企业年度不同热电比下的碳排放强度曲线，结合北京市发布的碳排放强度先进值，得出图1。

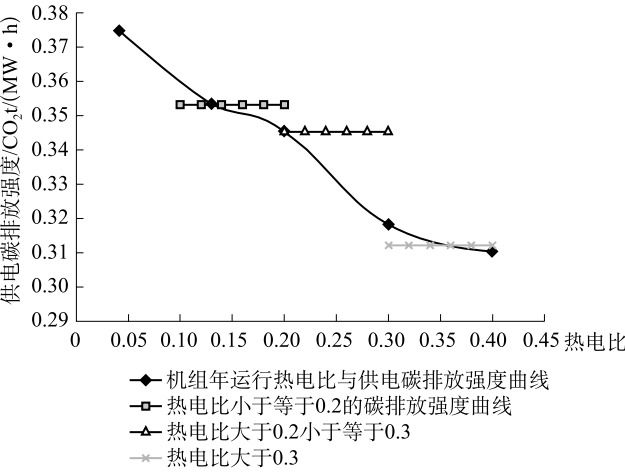


图1 供电碳排放强度与热电比关系

图1中，平行于横轴的直线，为北京市发布的供电碳排放强度先进值，曲线为企业实际运行供电碳排放强度与热电比关系曲线，为了二氧化碳不超标排放，即实际碳排放强度需控制在先进值以下，机组热电比必须控制在一定范围，机组运行存在不连续的安全区域，即热电比为0.126~0.30以及0.37以上。当热电比在0.3~0.37时，或者低于0.126时，机组实际供电碳排放强度曲线处于北京市发布的供电碳排放强度先进值曲线上方，按照产量乘以供电碳排放强度计算出的二氧化碳排放量将超出北京市发放的排放配额，超标排放，因此是不安全运行区域。如果冬季利用小时降低，运行安全区域将向右上方移动；如果夏季负荷率提高，运行安全区域将向左下方移动。

3.4 循环水冷端优化低碳运行管理

循环水冷端包括冷却塔、循环水泵、凝汽器等，其冷却介质——循环水，受环境因素的影响较大，不同季节的水温差异可以超过20℃，而机组的负荷率也会影响循环水泵的电耗。因此，如何在循环水泵的电耗与机组供电电气耗之间找到平衡点，即冷端优化，是火力发电厂低碳、经济运行调整控制的一个重要工作。

冷端优化的一个重要方面是求取凝汽器压力的最佳值，当凝汽器压力降低时，机组功率增加，供电电气耗降低，碳排放强度降低，二氧化碳排放总量降低；凝汽器压力升高时，机组功率下降，供电电气耗升高，碳排放强度升高，二氧化碳排放总量降低。所以，在给定机组参数下，凝汽器压力与汽轮机组发电功率、汽轮机微增功率关系密切，而运行中的机组真空是由诸如冷却水参数（流量和入口温度）和汽轮机负荷所决定的。在给定机组负荷和冷却水入口温度时，真空由循环水量决定，循环水量增大则循环水泵耗功也增大。然而循环水泵是厂用电大户，过分地增加循环水量，可能使得汽轮机真空提高而多发的电无法弥补循环水泵多耗费的电，当汽轮机功率的增量与泵耗功增量差值最大时，对应的凝汽器压力为最佳真空，对应最佳循环水量值。

图2是某“二拖一”燃气机组,其循环水系统配置两台流量分别为21 600m³/h、扬程26m的夏季循环水泵和两台流量分别为4 896m³/h、扬程26m的冬季循环水泵、10台机力冷却风机、冷却面积24 500m²的凝汽器,通过冷端优化,得出在不同环境温度、相对湿度和不同机组负荷下循环水泵运行方式的最优选择曲线。

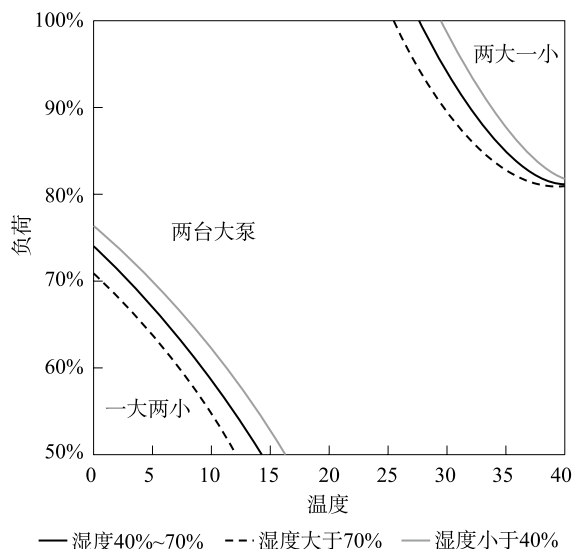


图2 循环水泵最佳运行方式参考曲线

4 结语

如上所述,由于燃气供热机组多种不同的运行方式、供电碳排放强度先进值制定的原则不同、碳配额在市场上价格的不同,燃机机组的低碳运行管理更加多维化。随着2017年12月19日全国碳市场的启动,京内燃气电厂作为参与北京市碳市场多年的发电企业来说,通过近年来的运行实践,在低碳运行方面积累了一定的运行管理经验,为燃气供热机组参与全国碳市场提供了一定的思路:

(1) 机组采暖季运行最好采用背压工况,同样供热量和发电量下,背压运行的二氧化碳排放总量低于抽凝运行75~101t/h,而且随着供热量和发电量的提高,两种运行工况的二氧化碳排放差值增大。

(2) 非采暖季的运行淡季(每年的3月下旬到5月份、9月至11月上旬),机组“二拖一”和“一拖一”运行均能满足电负荷需求时,要尽量采取“一拖一”方式运行,此时的二氧化碳排放强度低于“二拖一”低负荷运行16kgCO₂/(MW·h)。

(3) 考虑北京市燃气蒸汽联合循环热电联产机组配额先进值,热电联产机组运行热电比要尽量高,但全年热电比应尽量避免0.3~0.37区域运行,此区域的二氧化碳排放总量将超配额,此安全区域随着采暖季利用小时和非采暖季负荷率的不同而有所变化,需要根据机组特性和运行方式确定。

(4) 通过对燃气电厂循环水冷端优化研究,确定循环水系统最佳运行方式,提高机组效率,降低供电气耗和碳排放总量。

参考文献

- [1] 北京市规划委员会. 城市性质、发展目标与策略 [EB/OL].// 北京市城市总体规划(2004—2020). 北京:北京市规划委员会. 2002. <https://baike.baidu.com/item/%E5%8C%97%E4%BA%AC%E5%B8%82%E5%9F%8E%E5%B8%82%E6%80%BB%E4%BD%93%E8%A7%84%E5%88%92%282004-2020%29>.
- [2] 国家发展改革委. 全国碳排放权交易市场建设方案(发电行业) [R]. 北京:国家发展改革委, 2017.
- [3] 北京能源投资(集团)有限公司, 西门子电站自动化有限公司, 艾默生工程控制有限责任公司. 燃气—蒸汽联合循环发电机组自启停控制技术的应用 [M]. 北京:中国电力出版社, 2014.
- [4] 靳世慧. 北京碳市场对试点内电力企业影响研究 [D]. 西安:陕西师范大学, 2016.
- [5] 北京市人民政府. 北京市企业(单位)二氧化碳排放核算和报告指南 [M]. 北京:北京市政府, 2013.
- [6] State Forestry Administration. Enhanced Actions on Climate Change: China's Intended Nationally Determined Contributions [R]. Beijing: State Forestry Administration, 2015.
- [7] SPAARGAREN G, MOL A P J. Carbon flows, carbon markets, and low-carbon lifestyles: reflecting on the role of markets in climate governance [J]. Environmental politics, 2013, 22 (1): 174-193.
- [8] DALES J H. Pollution, Property & Pricess: An Essay in Policy-Making and Economics [M]. Toronto: University of Toronto Press, 1968.
- [9] 邹兆仪. 低碳经济背景下中国碳金融发展的路径选择 [J]. 内蒙古财经学院学报, 2010, 8 (5): 46-50.
- [10] 陆敏. 我国碳排放配额交易市场现状及价格问题研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.
- [11] 欧阳邵杰. CDM 机制下电力行业碳交易的可行性探究 [J]. 东方企业文化, 2011 (2): 231-232.
- [12] 江成瑶. 中国碳排放交易体制的建立对电力行业的影响研究 [D]. 合肥:中国科学技术大学, 2014.
- [13] 马莉, 张晓萱, 蔡涛. 碳交易: 电力行业的机遇与挑战 [N]. 中国矿业报, 2013-01-08.
- [14] 骆跃军, 骆志刚, 赵黛青. 电力行业的碳排放权交易机制研究 [J]. 环境科学与技术, 2014, 37 (6N): 329-333, 470-470.
- [15] ASME. ASME-PTC6-2004 汽轮机热力性能考核试验规程 [S]. 华盛顿:美国国家标准学会, 2006. <https://wenku.baidu.com/view/af0281bdfd0a79563c1e72c2.html>.
- [16] ASME. ANSI/ASME PTC22-2005 燃气轮机的性能试验规程 [S]. 华盛顿:美国国家标准学会, 2005. <http://doc.mbalib.com/view/af7fd847d4ece9f286c35d0109c4d413.html>.
- [17] 阎维平, 阚伟民, 冯永新, 等. ASMEPTC4.4-2008 燃气轮机余热锅炉性能试验规程 [M]. 北京:中国电力出版社, 2013. <https://www.5ibc.net/book/577473.html>.
- [18] 张舵, 黄海. 北京“十二五”规划纲要(草案): 五环内告别小煤炉 [EB/OL]. (2011-01-21). http://www.gov.cn/jrzq/2011-01/21/content_1789772.htm.
- [19] 北京市发改委. 京发改[2014] 905号 关于发布行业碳排放强度先进值的通知 [EB/OL]. (2014-04-30). <http://210.73.66.144:4601/law?fn=lar813s772.txt&truetag=1022&titles=&contents=&dbt=lar>.

(下转第88页)

参考文献

- [1] 中共中央. 中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定 [EB/OL]. (2013-11-15). http://www.gov.cn/jrzq/2013-11/15/content_2528179.htm.
- [2] 国务院. 国务院关于推进中央与地方财政事权和支出责任划分改革的指导意见 (国发〔2016〕49号) [EB/OL]. (2016-08-24). http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-08/24/content_5101963.htm.
- [3] 国务院. 国务院关于印发“十三五”生态环境保护规划的通知 (国发〔2016〕65号) [EB/OL]. (2016-12-05). http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-12/05/content_5143290.htm.
- [4] 习近平. 决胜全面建成小康社会 夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利——在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告 [EB/OL]. (2017-10-27). http://www.gov.cn/zhuanti/2017-10/27/content_5234876.htm.
- [5] 开根森. 美国水环境治理法令的建立 [J]. 科学对社会的影响, 2007, (S1): 5-20.
- [6] 美国联邦环保署 2017 年预算 [EB/OL]. <http://www.epa.gov>.
- [7] 美国联邦环保署 2001-2017 年预算 [EB/OL]. <http://www.epa.gov>.
- [8] 逯元堂, 吴舜泽, 陈鹏. 环境保护基金特征及构建思路研究 [J]. 生态经济, 2015, 31 (9): 191-193.
- [9] 财政部, 环境保护部. 关于推进水污染防治领域政府和社会资本合作的实施意见 (财建〔2015〕90号) [EB/OL]. (2015-04-09). http://jjs.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/zhengcefaui/201504/t20150427_1223522.html.
- [10] 国家统计局社会和科技统计司, 环境保护部环境规划院, 中国人民大学国民经济核算研究所 (编译) [R]. 国际环保支出统计文献汇编, 2009.
- [11] 中华人民共和国财政部. 财政数据 [EB/OL]. <http://www.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/caizhengshuju/>.
- [12] 1989 年 12 月 26 日第七届全国人民代表大会常务委员会第十一次会议通过, 2014 年 4 月 24 日第十二届全国人民代表大会常务委员会第八次会议修订. 中华人民共和国环境保护法 [EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2014-04/25/content_2666328.htm.
- [13] 国务院. 国务院关于加强环境保护重点工作的意见 (国发〔2011〕35号) [EB/OL]. (2011-10-17). http://www.gov.cn/zwqk/2011-10/20/content_1974306.htm.
- [14] 国务院. 国务院关于加强重点领域投融资机制鼓励社会投资的指导意见 (国发〔2014〕60号) [EB/OL]. (2014-11-16). http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/26/content_9260.htm.
- [15] 国务院. 国务院关于改革和完善中央对地方转移支付制度的意见 (国发〔2014〕71号) [EB/OL]. (2014-12-27). http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-02/02/content_9445.htm.

Experience of Federal Fiscal Expenditure on Environmental Protection in the United States

CHEN Peng, XU Shunqing*, LU Yuantang, GAO Jun, LIU Shuangliu

(Chinese Academy for Environmental Planning, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China)

Abstract: For the new stage, to deal with the new situation and new task in the current environmental protection work, based on the analysis of characteristics of federal fiscal expenditure in the United States, some experiences to optimize China's central government spending on environmental protection were put forward, from the angle of increasing the investment of special fund for environmental protection, increasing the proportion of environmental protection expenditure for science and technology, strengthening environmental protection expenditure in key areas, and paying attention to the establishment of environmental protection fund.

Keywords: United States; federal finance; environmental protection expenditure; experience reference

(上接第37页)

The Study of Low-Carbon Operational Management Model for Beijing Thermal Power Industry after the Initiation of Carbon Market

SHI Caiju^{1*}, JIN Shengxiang², AN Zhenyuan², WANG Liuhu¹, JIN Li¹, MA Wanjun¹,
WANG Qing², ZHANG Bingquan²

(1. Beijing Jingqiao Thermal Power Co., Ltd., Beijing 100067, China; 2. Beijing Energy Holding Co., Ltd., Beijing 100022, China)

Abstract: With the establishment and operation of the four thermal power centers, Beijing completed the transformation from of the coal machine to gas engine, and realized a more intelligent and cleaner energy generation heating. The initiation of Beijing carbon market injects profound and significance consideration for the operation of gas heating unit. Start from the power generation industry, national carbon emissions trading system was officially launched in December 19, 2017, which enforces the idea of low-carbon operation management in the thermal power industry. Based on the operation data of gas fired cogeneration unit, through calculation and analysis, a clean, efficient and low carbon operation mode for gas cogeneration unit is proposed. It provides experience for low carbon operation management to thermal power in Beijing and even the whole country.

Keywords: combined gas and heat power unit; power supply carbon intensity; carbon market; clean and efficient low-carbon operation