

# 第1章

## 绪 论

### 1.1 碳中和背景下的新型电力系统

#### 1.1.1 碳中和背景

近年来,全世界范围内正面临着能源短缺、环境污染、气候变化三大问题。早在 2009 年和 2010 年,联合国分别在丹麦哥本哈根和墨西哥坎昆召开了世界气候大会,这充分体现国际社会对气候变化问题的高度重视。目前,随着世界能源低碳化进程的进一步加快,以及能源危机、环境污染等问题的日益严峻,世界各国正开展一场全新的能源革命,大力推进能源系统的绿色低碳清洁化转型。我国也提出要推进能源生产和消费革命,构建清洁低碳、安全高效的能源体系。2020 年 9 月,习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布,我国力争在 2030 年前实现“碳达峰”,努力争取在 2060 年前实现“碳中和”,并于 2020 年气候雄心峰会上提出要在 2030 年实现国内生产总值二氧化碳排放将比 2005 年下降 65% 以上,非化石能源占一次能源消费比重将达到 25% 左右,风电和光伏总装机容量达到 12 亿 kW 的发展目标<sup>[1]</sup>。此外,美国和欧盟也已提出要在 2050 年前实现碳中和目标。由此可见,降低碳排放、构建清洁低碳可持续的能源系统已成为世界各国的重要战略目标。

据统计,全国化石能源消耗带来的碳排放约占总量的 90%,其中电力带来的碳排放占比超过 40%<sup>[2]</sup>。因此,实现碳达峰、碳中和目标(即“双碳”目标)的关键在于能源,而能源变革的主力军则是电力。按照能源革命的总体导向,电力系统的基本形态和技术特征也将会发生巨大改变。于是,以火电为主的传统电力系统正

转变为一个以新能源为主体的清洁、低碳、互联、智能的新型电力系统,其中,风电、光伏等新能源将成为主力电源,而传统的水电、气电以及储能等灵活性资源将提供辅助服务以应对风电、光伏等新能源发电的间歇性波动性,电力系统将与天然气系统、热力系统紧密耦合,形成以电为中心的综合能源系统,不同能源间的相互转换和互补互济将成为必然趋势和未来发展的常态,新型电力系统的构建是实现 2030 年碳达峰、2060 年碳中和目标的迫切需要,是推动能源清洁低碳转型的基本路径,以保障我国的能源安全和实现能源的可持续发展。

### 1.1.2 发电装机容量的现状及发展趋势

根据国家统计局及中电联发布的相关数据显示,近十年来,我国发电装机总体保持增长趋势,其中传统化石能源发电装机占比持续下降,新能源发电装机占比明显上升。在 2011—2020 年的 10 年间,我国发电装机累计容量从 10.62 亿 kW 增长到 22 亿 kW。截至 2020 年年底,全国火电装机容量 12.5 亿 kW,占总发电装机容量的 56.8%,较 2011 年下降了 15.7%;水电装机容量 3.7 亿 kW,占总发电装机容量的 16.8%;并网风电装机容量 2.8 亿 kW,占总发电装机容量的 12.7%;并网光伏装机容量 2.5 亿 kW,占总发电装机容量的 11.4%;可见,目前的水电、风电、光伏的装机容量比重已达 40.9%,该比重势必会逐年增加,目前新增发电装机以新能源为增量主体,仅 2020 年的并网风电、光伏新增装机已高达 1.2 亿 kW,占全年新增发电装机总容量的 62.8%,已连续四年成为新增发电装机的主力军。

2021 年 3 月,全球能源互联网合作发展组织发布了《中国 2030 年能源电力发展规划研究及 2060 年展望》<sup>[3]</sup>,该报告中指出:2025 年,我国电源总装机容量将达到 29.5 亿 kW,其中清洁能源装机容量为 17 亿 kW,占比为 57.5%,清洁能源发电量为 3.9 万亿 kW·h,占比 41.9%,煤电将达到峰值 11 亿 kW,风电、光伏装机容量将分别达到 5.4 亿 kW 和 5.6 亿 kW。2025—2030 年新增电力需求将全部由清洁能源满足。预计 2030 年,我国电源总装机容量将为 38 亿 kW,其中清洁能源装机容量为 25.7 亿 kW,占比为 67.5%,清洁能源发电量为 5.8 万亿 kW·h,占比 52.5%,风电、光伏装机容量分别达到 8 亿 kW 和 10.25 亿 kW。2025—2060 年我国电源装机容量的规划见表 1-1。从表中可以看出,可再生能源,尤其是以风电、光伏为代表的新能源将从原来能源电力的配角演变为绝对的主角。

表 1-1 2025—2060 年我国电源装机容量的规划

电 源	2025 年		2030 年		2060 年	
	容量/ $10^9$ kW	占比/%	容量/ $10^9$ kW	占比/%	容量/ $10^9$ kW	占比/%
煤电	11	37.3	10.5	27.6	0	0.0
水电	4.6	15.6	5.54	14.6	7.6	9.5
风电	5.36	18.2	8	21	25	31.2

续表

电 源	2025 年		2030 年		2060 年	
	容量/ $10^9$ kW	占比/%	容量/ $10^9$ kW	占比/%	容量/ $10^9$ kW	占比/%
光伏	5.59	19	10.25	27	38	47.4
气电	1.52	5.2	1.85	4.9	3.2	4.0
核电	0.72	2.5	1.08	2.8	2.5	3.1
燃氢机组	0	0.0	0	0.0	2	2.5
生物质及其他	0.65	2.2	0.82	2.2	1.8	2.2
合计(电源总装机容量)	29.5		38		80	
清洁装机占比/%	57.5		67.5		96	

## 1.2 综合能源系统简介

### 1.2.1 综合能源系统的概念及作用

能源系统在朝着清洁低碳可持续化发展的过程中,新能源发电、新型储能、燃气发电、碳捕集、电制氢等技术的利用成为关键,尤其是具有“零碳排放”的新能源(以风电与光伏为主)已成为能源系统转型与变革的主力,然而,由于风电与光伏出力具有间歇性和波动性的特点,风电和光伏的容量系数极低,若要满足大部分的电量供应,其电力装机容量将远超负荷峰值,这意味着在日内运行时,若风电和光伏等间歇性可再生能源出力较大时,系统将出现大量的电力过剩,进而会出现弃风、弃光现象,比如,2019年我国弃风电量为168.6亿kW·h,弃光电量为46亿kW·h,导致资源的大量浪费;若出力较低,系统则会出现大量的电力缺额,这就要求系统有大量的备用容量。与此同时,在此出力波动下,也会增加电网的传输负担。从长期来看,风电、光伏的出力还将出现严重的季节性不平衡问题。在“碳达峰”和“碳中和”的背景下,高比例新能源电力系统中会具有更为明显的间歇性、波动性特征,会给电力系统的安全稳定运行和电力电量的平衡带来极大的挑战,面临着新能源消纳困难和系统灵活性不足的难题。可见,新能源高比例渗透问题是电力系统转型发展中必须要解决的关键核心问题。

针对高比例新能源并网带来的问题,首先要提高电力系统的灵活性,它是保障电力系统安全稳定运行的前提,电力系统灵活性即在一定时间尺度下,通过优化调配各类可用资源,以一定的成本适应发电、电网及负荷随机变化的能力。随着源侧风电、光伏新能源发电装机容量的增长,系统对灵活性资源的需求将持续增长。系统需要综合利用储能、天然气系统、氢能、水能、热电联产等灵活性发电资源作为维持供电稳定的方案。目前,虽然世界上没有一个独立区域电力系统的可再生能源

渗透率超过 50%，但已有大量学者研究未来 100% 可再生能源电网的发展路径与最终形态，多样化电源与多能源协调将是其重要特征，也就是说，含有高比例新能源的多能互补综合能源系统可有效支撑高比例新能源电力系统的安全可靠运行，助力构建清洁低碳电力系统。所谓综合能源系统指的是一种存在多种能源交互的能源综合网络，它通过电、气、冷、热等多能源综合规划、协调控制、智能调度以及能源间的互联互通、互济互动，可以显著提高能源利用率和可再生能源尤其是风电和光伏等新能源的消纳能力<sup>[4]</sup>。

### 1.2.2 综合能源系统的主要构成

综合能源系统是一个多能源耦合并协同互补的复杂系统，涉及火电、水电、风电和光伏等新能源、天然气、储能、热能、氢气、电转气等，它的基本结构如图 1-1 所示。根据《电力行业“十四五”发展规划研究报告》，在“十四五”期间，要清洁高效发展火电、推进水电绿色发展、加快抽水蓄能电站和燃气调峰电站的建设，以集中式和分布式并举大力发展风电、光伏等新能源，开展“风光水火储一体化”建设，可见，综合能源系统的协调优化运行对于电力系统综合调节能力的提高具有重要的理论价值和现实意义。下面针对综合能源系统的主要构成部分进行逐个描述。

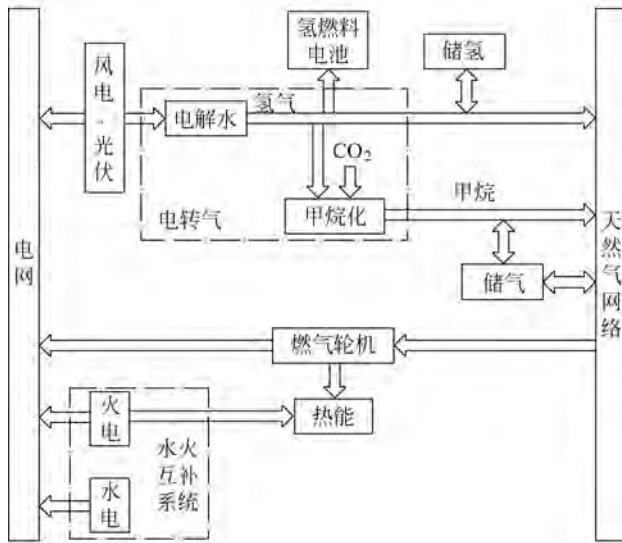


图 1-1 综合能源系统基本结构

#### 1. 水火电互补系统

长期以来，火电一直占据着电力系统的主体地位，截至 2020 年年底，我国火电的装机容量为 12.5 亿 kW，依然占到总发电装机容量的 56.8%，最常见的火电形

式为燃煤发电。众所周知,火力发电厂会排放大量的二氧化碳、硫氧化物以及氮氧化物等有害气体,不仅污染环境,还会导致严重的温室效应。为应对全球气候问题,并进一步加强节能减排工作,早在多年前政府部门便要求火力发电厂在提供安全低廉的电力前提下,还要保证对环境的危害最小。常见的减排措施包括使用低污染排放的燃料、环境经济优化调度(optimal environmental economic dispatching, OED)和安装脱硫装置。最优的环境经济调度不仅考虑系统的经济效益,还考虑系统的环境效益,近年来备受国际社会的关注。此外,燃煤电厂已广泛采用脱硫装置来脱除二氧化硫。这是因为二氧化硫的大量排放带来了一系列严重的环境问题(如酸雨),对我国环境造成了巨大压力,区域环境质量不容乐观。从20世纪80年代末开始,由二氧化硫引起的空气污染和酸雨问题就已经引起了我国政府的高度关注,并逐步出台了一系列控制二氧化硫排放的措施。比如,在2003年,国家计委、财政部、国家环保总局和国家经济贸易委员会根据国务院《排污费征收使用管理条例》(国务院令第369号),特联合制定了《排污收费征收标准管理办法》(四部委令,2003年第31号)。可见,作为二氧化硫排放大户的火电行业消减二氧化硫的任务异常艰巨,是脱硫工作的重点所在。但由于脱硫设备高投资、高运行成本、脱硫技术制约、占地面积大等问题,导致很多燃煤电厂在安装了脱硫装置后,并没有真正去运行脱硫装置,因此,脱硫装置的脱硫环保作用并没有得到充分发挥。研究烟气脱硫装置对发电优化调度及发电企业利润的影响,对于提高燃煤电厂安装并运行脱硫装置的积极性、促进节能减排具有重大的理论研究价值和实际指导意义。

节约能源消耗、降低碳排放以及减少环境污染已经迫在眉睫,且成为我国能源战略的重要组成部分。在2021年刚刚发布的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中明确指出,单位国内生产总值能源消耗和二氧化碳排放要分别降低13.5%和18%,主要污染物排放总量持续减少,要提高电力系统互补互济和智能调节能力。在《电力行业“十四五”发展规划研究报告》中也指出,要协调火电与可再生能源的协调发展,减低电力碳排放强度,助力“碳达峰”目标。那么,作为清洁能源且是可再生能源的水电可与火电形成优势互补。

水火电互补系统是最早、最简单的一种综合能源系统,水电是技术成熟且运行灵活的清洁低碳可再生能源,具有防洪、发电、航运、灌溉等综合利用功能,其经济和环境效益显著。相比于火电,水力发电清洁无污染、启停机及爬坡速度快,非常适合作为系统的调峰资源。根据统计显示,我国水能资源可开发装机容量约为6.6亿kW,年发电量约为3万亿kW·h,按利用100年计算,相当于1000亿吨标煤,在常规能源资源剩余可开采总量中仅次于煤炭,我国的水能资源总量、投产装机容量和年发电量均居世界首位。截至2020年年底,水电的装机容量3.7亿kW,占到总发电装机容量的16.8%,预计2025年水电的装机容量为4.6亿kW,占到总发电装机容量的15.6%。

## 2. 风电、光伏等新能源

风电、光伏都是清洁、绿色、无碳排放、无污染的新能源,全球的风能和太阳能资源十分丰富、开发潜力巨大,全球风能资源的理论蕴含量约为  $2.0 \times 10^{15} \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{年}$ , 太阳年辐射到地球表面的能源约为  $1.16 \times 10^{14} \text{ t}$  标准煤,超过全球化石能源的总储量;我国的风能资源分布广泛,陆上(高度 70m 和 80m)的技术可开发量约  $6.1 \times 10^9 \text{ kW}$ ,主要集中在“三北”地区,海上(水深 5~25m)的技术可开发量约  $2.0 \times 10^8 \text{ kW}$ ;我国可利用的太阳能发电资源约为  $2.7 \times 10^9 \text{ kW}$ ,主要集中在西部省份。在“碳达峰”和“碳中和”背景下,风电、光伏等新能源将逐步替代传统化石能源,也将成为世界能源发展的主要趋势。2021年3月,国家发改委发布的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中提出,要大力提升风电、光伏发电规模,坚持集中式和分布式并举,加快发展东中部分布式能源,有序发展海上风电。风电和光伏将迎来前所未有的高速发展。预计到2025年,风电、光伏装机容量占比将超过37%;到2030年,风电、光伏装机容量占比将达到48%。

风电和光伏的发电出力都具有间歇性、波动性和反调峰特性,弃风、弃光现象明显。大规模风电、光伏等新能源的消纳问题一直是电网面临的重要难题,随着风电、光伏等新能源的装机容量逐步增大,电网将面临更为严峻的高比例新能源入网挑战。具体体现为<sup>[5]</sup>: ①风电、光伏发电量较大的部分地区,如西北、东北地区,其装机容量远超最大用电负荷,影响了新能源消纳。②供热期间的系统调峰能力不足也造成了新能源在本地消纳的困难。比如,北方供暖期与大风期重叠,部分省网冬季低谷期调峰能力严重不足,使得弃风问题突出。③风电、光伏的送出能力不足也是影响其跨区消纳的主要因素。比如,甘肃河西地区风电、光伏装机容量较大,超过了15GW,但由于网架相对薄弱,送出能力不足,直接影响了新能源的消纳。而可以实现能源间互补互济的综合能源系统为新能源的消纳提供了途径,可以借助于水电、火电、电转气和天然气系统极大地提高风电、光伏等新能源的消纳率,具体内容将在后面的章节进行详细描述。

## 3. 电转气及氢气

电转气(power-to-gas, P2G)是将电能转化为氢气或者天然气的一种技术,包含两种:一种是电转氢气(power-to-hydrogen, P2H),就是通过电解水,生成氢气;另一种是电转甲烷(power-to-methane, P2M),就是再将电解水产生的氢气与二氧化碳反应,产生甲烷。随着电转气技术的日趋成熟,电网和天然气网络的耦合关系日益紧密,将无法消纳的风电、光伏等新能源通过电解水生成氢气,或者再与二氧化碳反应生成甲烷,直接注入到天然气系统中,这样便可以实现能量在电网和天然气网络之间的双向流动,互为备用。一方面,增加了风电、光伏等新能源的消纳量,

并将这部分电能储存于天然气网络中(此时的天然气网络相当于一个容量极大的电力储能系统),补充了天然气供应量;另一方面,通过燃气轮机将天然气转换为较低碳和较清洁的电能(或热能),以补充电力供应或做调峰使用。可见,电转气技术为风电、光伏等新能源的消纳提供了新思路和新途径。

氢气是一种零碳、清洁、可与电能双向转化的灵活性资源,能够在电力系统各环节发挥调节作用,在面向“碳中和”的电力系统转型中必不可少。电制氢、氢储能以及氢燃料电池对于提高系统灵活性的潜力非常巨大。据估计,为实现“碳中和”目标,我国用作提供电网灵活性的氢气生产容量将至少要达到100GW。因此,氢气在碳中和目标下的高比例新能源电力系统中扮演着重要的角色。目前,丹麦、美国等国家已经开展绿色氢枢纽项目,丹麦绿色氢枢纽主要目的是确保可再生能源供应,而不受外界天气影响。该项目将季节储氢和日常储氢结合在压缩空气储能中,为用户提供100%绿色电力。美国犹他州可再生能源-氢发电枢纽项目则计划用可再生能源制氢进行发电,以替代燃煤发电厂,该发电厂将在2025年使用30%的绿色氢气,并在2045年之前使用100%的绿色氢气,实现可再生能源电力并网稳定运行。在我国,氢也逐渐被作为一种重要的区域灵活性调节资源,在我国三北地区等新能源富集区域和海上风电资源丰富地区都具有广泛的应用前景。长期看来,在高比例新能源的新型电力系统中,氢将成为实现长周期跨季节储能、双向灵活调节的主要灵活性资源。

### 1.2.3 综合能源系统的优化调度

包含风电、光伏、氢气、水电、火电、燃气轮机等的综合能源系统是实现“碳达峰”和“碳中和”目标下能源间互联互通、互补互济的必然产物,可以有效提高风电、光伏等新能源的消纳率、降低碳排放、节约能源消耗以及减少污染物排放。因此,针对综合能源系统的优化调度便至关重要。

接下来将按照“单个系统-复杂多系统”的思路,主要围绕着短期火电/水火电系统的优化调度问题、考虑烟气脱硫装置的发电优化调度问题、长期水火电系统优化调度问题、含新能源及电转气的短期电-气综合能源系统的优化调度问题,进行深入而系统的描述,主要涉及优化模型和优化算法,尤其是相关约束条件的处理等方面的问题。

## 1.3 短期火电系统优化调度综述

短期火电系统优化调度问题的研究已经相当成熟。一般是以一天为调度周期,以1h为单位,在满足系统各种物理条件和安全运行条件下,确定火电机组各小时的有功出力。主要包含考虑联络线约束的多区域经济优化调度、考虑多种燃料的经济优化调度、考虑环境因素的环境经济优化调度等,是电力系统优化计算中的

重要内容之一。

### 1.3.1 短期火电系统经济优化调度

短期火电系统经济优化调度(short-term optimal economic thermal dispatching, SOETD)问题只涉及系统的经济效益,通常以机组的总燃料费用最小作为目标函数,约束条件包括实时负荷平衡约束、机组出力限制约束、爬坡限制约束、备用约束、传输线最大容量约束等,是一个单目标、高维、非线性的有约束优化问题。传统的求解方法则根据原始的耗量曲线,微分求得微增率曲线,并以此进行经济负荷分配<sup>[6]</sup>。1934年,Steinberg提出以数学极值理论为基础的等微增率原理<sup>[7]</sup>,该方法普遍适用于耗量特性为凸函数的火电机组经济负荷分配问题,并且长期以来,在电力系统优化发电调度中发挥着重要作用,但是值得注意的是只有当微增率上升时,等微增率原则才是最经济的。除此之外,其他用于求解该问题的传统算法还有:线性规划法<sup>[8-11]</sup>、二次规划法<sup>[12-13]</sup>、非线性规划法<sup>[14]</sup>、动态规划法<sup>[15-17]</sup>、拉格朗日松弛法<sup>[18-19]</sup>等,都取得了一定的成果,但同时也存在一些问题。比如,线性规划法简单易用,但准确度较差;动态规划法存在严重的维数灾难问题;拉格朗日松弛法采用分层优化,效果好,但是难以获得可行解。

近年来,众多的智能优化算法如遗传算法(genetic algorithm, GA)<sup>[20-23]</sup>、模拟退火(simulated annealing, SA)算法<sup>[24-25]</sup>、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法<sup>[26-28]</sup>、差分进化(differential evolution, DE)算法<sup>[29-32]</sup>等以及各种混合算法<sup>[33-35]</sup>被广泛运用到火电系统经济优化调度中,并取得了很好的优化调度结果。尤其是粒子群优化算法,由于它具有原理简单、易于编程实现、调整参数少、收敛快、良好的局部搜索和全局搜索能力等优点,因而被运用到电力系统优化计算的各个方面。然而,上述研究成果没有考虑环境因素,没有全面体现电力系统中节能减排的原则。

### 1.3.2 短期火电系统环境经济优化调度

除了短期火电系统经济优化调度问题,还有同时考虑电力系统经济效益和环境效益的短期火电系统环境经济优化调度(short-term optimal environmental economic thermal dispatching, SOEETD)问题,即同时优化火电机组的总燃料费用和总污染气体排放量,是一个复杂的多目标、高维、非线性、有约束优化问题,而通常情况下,求解多目标优化问题比求解单目标优化问题要困难很多。一般而言,SOEETD问题中的燃料费用函数和污染气体排放量函数是相互冲突的(说明:根据燃料费用系数和污染气体排放量系数对函数进行曲线拟合,便可以清楚地看出燃料费用和污染气体排放量随着发电出力的增大而大致呈现出相反的变化趋势,因此说两个函数是相互冲突的),也就是说当仅追求燃料费用最低时,会损害环境利益;而当仅追求污染气体排放量最低时,则损害经济利益。所以研究如何能同时兼顾相互冲突的经济利益与环境利益,寻求两者利益之间的折中点,以使得社会

效益最大的问题具有重要意义,国内外学者对此也进行了大量的研究。

用于解决短期火电系统环境经济优化调度(SOEETD)问题的传统方法主要有权系数和法<sup>[11,36-41]</sup>、费用惩罚系数法<sup>[42-44]</sup>、约束条件法<sup>[45-46]</sup>和上述方法的混合方法。其中,权系数和法是将燃料费用函数和污染气体排放量函数乘以一定的权系数并相加,将多目标优化问题转变成单目标优化问题,需要经过多次运算才能获得帕累托最优前沿(Pareto optimal front, POF),而且难于选择最优的权系数。例如,将燃料费用最低、环境排放物最少、安全指数最高作为优化目标,采用权系数和法是将多目标问题转化成单目标问题,并采用“单纯形法”选取最优的权重,利用“模糊隶属度法”获取满意度最大的函数值,即最优值;费用惩罚系数法则是通过费用惩罚系数将污染气体排放量转化成相应的费用值,并与燃料费用相加构成新的单目标优化函数,但费用惩罚系数只是一种近似估算值<sup>[40]</sup>。有些研究是根据协调方程式得到关于燃料费用系数、污染气体排放量系数和负荷的发电量表表达式,采用直接解析法进行求解<sup>[43]</sup>,但实质上依然是费用惩罚系数法的一种;而约束条件法则把污染气体排放量作为约束条件加入传统的经济调度中,采用单目标优化方法进行求解,该方法只是在原经济优化调度的基础上添加了污染气体排放量约束限制,并不是真正意义上优化污染气体排放量,所以无法得到帕累托最优前沿。

上述方法的主要思路是将多目标优化问题转化为单目标优化问题,使问题得到简化的同时也产生了较大的误差。近几年,启发式优化算法<sup>[11,47-54]</sup>被广泛应用到 SOEETD 问题中,而且将 SOEETD 问题作为多目标优化问题进行优化,即同时优化燃料发电机组中的燃料费用函数与污染气体排放量函数。Basu 采用非占优排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA)进行环境经济优化调度<sup>[47]</sup>,在传统的遗传算法(GA)基础上对粒子的每个个体添加了两种新的属性——非支配的排序(non-dominated rank)和拥挤距离(crowding distance),并以此来判定解的优劣,取得了较好的效果,但是遗传算法计算时间长,收敛速度慢且由于交叉、选择、变异使得算法操作复杂。Abido<sup>[48]</sup>采用改进的多目标进化算法,根据模糊集理论得到折中最优解,并通过多个仿真算例表明了进化算法相比于遗传算法的优越性,即得到更低的燃料费用和更少的污染气体排放量。

此外,多目标粒子群优化(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)算法具有收敛快、易于实现且容易平衡局部搜索与全局搜索的特点,被广泛应用于发电调度的优化计算中。MOPSO 算法对全局最优极值和个体最优极值进行了重新的定义,即全局最优极值和个体最优极值不再是一个确定解,而是一组解集,称为全局最优解集和个体最优解集。同样地,最优解也是一组解集,即帕累托最优前沿(POF),并采用各种方法在 POF 中取选取折中最优解。Abido<sup>[49]</sup>采用帕累托占优条件获得 POF,通过模糊隶属度函数获得折中最优解,相比于线性规划算法<sup>[9]</sup>和进化算法<sup>[50]</sup>,得到了分布均匀且分布范围较广的帕累托最优解集。MOPSO 算法还被成功应用于考虑多区域间备用共享的环境经济优化调度中<sup>[51]</sup>,

同时还计入了区域间电力传输费用。为加快收敛进程和增加解的多样性, Abido 采用局部搜索法和适应值共享法, 得到了分布特性较好的 POF<sup>[52]</sup>, 但是文中没有考虑网损。Singh 等在 MOPSO 算法中引入模糊机制, 随机生成一个以全局最优极值为中心且符合正态分布的区域, 利用锦标赛选择法确定全局最优极值<sup>[53]</sup>, 但是个体最优极值的选取不符合多目标规划原则, 容易使算法陷入局部极值点, 限制了算法的搜索能力。

除了建立上述的确定型模型, 还可以建立短期火电系统环境经济优化调度的随机优化模型<sup>[55]</sup>, 将机组出力、燃料费用系数、污染气体排放量系数均看成期望值, 文中通过算例仿真, 表明了随机模型没有确定模型的优化效果好, 但是随机模型更贴近实际情况中的不精确性和不确定性, 可以使决策者规避在不确定性环境中的风险, 也具有一定的实际意义。

综上所述, 可以看出短期火电系统环境经济优化调度问题的求解方法可以分为两种: 一种是通过权重和法或费用惩罚系数法或约束条件法将多目标优化问题简化为单目标优化问题; 另一种是采用多目标优化算法, 通过帕累托占优条件求得帕累托最优前沿, 进而对多目标优化问题进行求解。显然帕累托占优条件和多目标优化算法对优化结果起着关键性的作用, 因此亟待研究更为合理、更为有效的帕累托占优条件和多目标优化算法。

## 1.4 考虑烟气脱硫装置的发电优化调度综述

为应对全球气候问题, 并进一步加强节能减排工作, 要求火力发电厂降低硫氧化物、氮氧化物以及  $\text{CO}_2$  等污染气体的排放, 其中  $\text{SO}_2$  带来严重的酸雨问题。而电力行业是排放  $\text{SO}_2$  的主要行业, 因此, 脱除  $\text{SO}_2$  成为发电企业一项严峻的任务。目前, 我国已建立了较为完善的国家大气污染防治法规以及控制污染气体排放的标准体系。其中, 控制  $\text{SO}_2$  排放的烟气脱硫装置被广泛采用, 相应的脱硫产业得到较快发展, 因此, 研究烟气脱硫装置在电力系统中的应用及其对发电调度的影响已成为电力系统优化调度的一个重要组成部分。

根据国务院《排污费征收使用管理条例》(国务院令 第 369 号), 2003 年国家计委、财政部、国家环保总局和国家经济贸易委员会, 特联合制定了《排污收费征收标准管理办法》(四部委令, 2003 年第 31 号), 规定  $\text{SO}_2$  的收费标准分两年涨至 0.63 元/kg。可见, 安装烟气脱硫装置已势在必行。截至 2007 年年底, 我国火电厂烟气脱硫装置容量约占火电总装机容量的 50%, 但多数为新建机组, 单靠新建机组是无法达到  $\text{SO}_2$  排放限制标准的, 所以老机组的脱硫改造对  $\text{SO}_2$  的减排有关键性影响<sup>[56]</sup>。但是, 老机组的脱硫改造存在一定的困难, 如资金筹措问题和高运行成本等。

就脱硫运营而言, 邓彦斌<sup>[56]</sup>通过对国家政策和脱硫设施生产运营的分析, 建立了脱硫项目效益综合评价系统, 但是其各评价指标是通过调查问卷以权重的形