

新型电力系统环境下煤电与新能源等 多元资源协调优化运行及其挑战

孙大雁¹, 耿建², 杨胜春², 张粒子³,

杨军峰¹, 乌晓江⁴, 牟树君⁵, 史磊⁶, 夏秋²

(1. 国家电网有限公司国家电力调度控制中心, 北京市 西城区 100031;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 江苏省 南京市 210003;

3. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206;

4. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海市 闵行区 200000;

5. 北京低碳清洁能源研究院, 北京市 昌平区 102211;

6. 国网宁夏电力有限公司, 宁夏回族自治区 银川市 750000)

Challenges of Coordinated and Optimized Operation of Coal Power and New Energy and Other Diversified Resources in New Power System

SUN Dayan¹, GENG Jian², YANG Shengchun², ZHANG Lizi³, YANG Junfeng¹,
WU Xiaojiang⁴, MU Shujun⁵, SHI Lei⁶, XIA Qiu²

(1. National Power Dispatching and Control Center, State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China

2. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, Jiangsu Province, China;

3. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,
Changping District, Beijing 102206, China;

4. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Minhang District, Shanghai 200000, China;

5. National Institute of Clean-and-low-carbon Energy, Changping District, Beijing 102211, China;

6. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750000, Ningxia Hui Autonomous Region, China)

ABSTRACT: As the country with the largest installed capacity of new energy and the most rapid development, China faces the dual challenges of new energy power consumption and security. Enhancing system flexibility, building a new supply and consumption system, and promoting resource optimization and allocation are necessary. Based on the power structure and rapid development trend of new energy in China, five key technologies are proposed and analyzed: improving the flexible operation capability of coal-fired power and new energy, integrating the design and operation control optimization technology of flexible electricity hydrogen chemical system, optimizing the scheduling and operation technology of multi-resource complementarity, market mechanism and clearing technology of capacity and new auxiliary services, and

application technology of comprehensive regulation and optimization operation system of coal-fired power and new energy. These technologies promote the coordinated development of coal-fired power and new energy, promote the construction of a new energy supply and consumption system that adapts to China's national conditions, and promote the transformation and upgrading of the power system.

KEY WORDS: new power system; multi flexible resource; optimization scheduling; regulation ability

摘要: 我国新能源装机规模最大、且持续高速发展, 电网运行面临新能源消纳与电力保障供应的双重挑战, 需多方位提升系统灵活性, 构建新型供给消纳体系, 促进资源优化配置。立足我国电源结构和新能源快速发展态势, 提出和分析了五大关键技术: 煤电与新能源灵活性运行能力提升技术、柔性电-氢-化系统集成设计与运行控制优化技术、多资源互补优化调度运行技术、容量和新型辅助服务市场机制及出清技术、煤电与新能源综合调节和优化运行系统应用技术, 促进煤电与新能源的协调发展, 推动构建适应我国国情的新能源供给消纳体系建设, 推动电力系统的转型升级。

基金项目: 国家重点研发计划项目: “煤电与新能源综合调节及系统优化运行关键技术” (2022YFB2403200)。

Project Supported by National Key Research & Development Program of China: “Key Technologies on Comprehensive Regulation of Coal Power and Renewable Energy and Optimization of System Operation” (2022YFB2403200).

关键词：新型电力系统；多元灵活资源；优化调度；灵活调节能力

DOI： 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0713

0 引言

我国是全球范围内新能源装机规模最大、发展速度最快的国家。截至 2023 年底，全国风电、光伏发电装机容量分别为 4.4 亿和 6.1 亿 kW，约占我国电源总装机容量的 36%，发电量突破 1.4 万亿 kW·h，约占发电总量的 15.5% (见附录图 A1)。新能源发电随机、间歇、波动，电力系统运行需要调用相应的灵活调节容量以保证功率实时平衡。高比例的新能源接入电网后，其大发时消纳难和少发时电力保障供应难的矛盾凸显，亟需发掘源网荷储输等多元灵活资源调节能力，提高系统灵活性^[1]。

从国际来看，德国、澳大利亚等地区新能源占比较高，其灵活性主要来源于燃气机组和水电机组 (见附录表 A1)。考虑到我国“富煤、缺油、少气”的资源禀赋，实现高比例新能源消纳和电网安全运行，亟需提出适应新能源快速、大规模发展的中国解决方案。

预计到 2030 年，我国新能源装机容量将超过 12 亿 kW，占总装机容量的 50%。在新能源快速发展的过程中，煤电装机增长放缓且逐步“减量替代”，新能源发电不确定性与煤电等常规电源调节能力不足的矛盾日益凸显，电力系统运行面临平衡支撑能力不足、调节灵活性欠缺、极端情况下电力供应保障难度大等问题^[2-3]，传统源随荷动电力调度方式难以完全适应新形势新业态，调控技术手段、调度机制等亟待升级^[4-5]。当前迫切需要攻关煤电与新能源等多种资源综合调节及优化运行技术^[6]，从煤电、新能源两大电源和负荷侧新型调节资源入手，多方位提升系统的灵活调节能力，充分利用多元灵活资源，探索适应新型电力系统的多市场协同运营机制，促进煤电与新能源协调发展，支撑系统安全、保供和低碳运行。

围绕新型电力系统环境下煤电与新能源等多元灵活资源协调发展和运行优化问题，从系统平衡、灵活性资源和市场机制 3 个方面开展研究，提出和分析了五大关键技术：煤电与新能源灵活性运行能力提升技术、柔性电-氢-化系统集成设计与运行控制优化技术、多资源互补优化调度运行技术、容量和新型辅助服务市场机制及出清技术、煤电与新能源综合调节和优化运行系统应用技术，促进煤电与新能源的协调发展，推动构建适应我国国情的

新能源供给消纳体系建设，推动电力系统的转型升级。

1 新型系统环境下煤电与新能源协调运行的挑战

1.1 系统平衡问题

电力系统是一个生产和消费实时平衡的系统。传统调度方式是调节发电功率跟踪负荷功率的变化，按秒级进行实时平衡。在“双碳”背景下，以风电和光伏为主的新能源得到迅猛发展，其发电具有强烈的随机、间歇和波动性，需要更多的灵活容量平衡新能源的功率变化。

新能源比例不断提高，给系统的实时平衡带来极大挑战，特别是在风电、光伏集中的地区，消纳问题和保供问题在 1 天内交替出现。如图 1 所示，在凌晨时段，负荷需求低，煤电机组处于最低出力运行，避免停机，而此时段风电大发，难以充分消纳；在中午时段，光伏又到了大发时刻，超出负荷需求，同样难以消纳；在傍晚时刻，负荷需求增长，此时光伏和风电出力大幅降低，需要煤电机组大量发电满足负荷需求，而此时煤电难以启动保证负荷供应，出现供电能力不足的情况，极端情况下只能切除部分负荷来保证功率平衡。

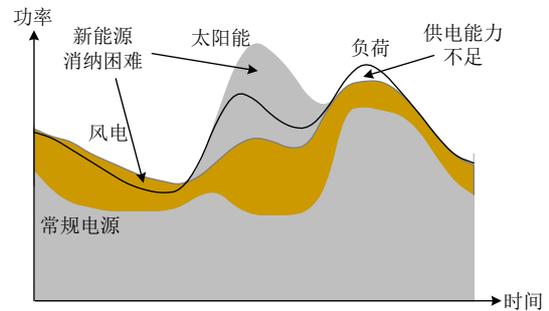


图 1 高比例新能源系统面临的困难

Fig. 1 Difficulties faced by high proportion new energy systems

随着新能源发电占比不断提高，其间歇性和波动性特征更加显著，缺电和弃电在不同时段可能交替出现，保供应和促消纳需求相互交织，加之新能源替代常规电源，系统整体调节能力呈现下降趋势，以往源随荷动模式已难以适应新型电力系统的发展，须挖掘利用源网荷储各环节灵活性资源，促进源网荷储协同互动，支撑清洁能源消纳和电力保供。

1.2 灵活性资源问题

一直以来，受制于“富煤、缺油、少气”的资源禀赋特征，我国电力系统中具备快速响应能力的燃气机组和各类储能系统占比低，灵活性调节资源不足。煤电机组的平均调节范围仅为 30%~100% P_c (P_c 代表额定负荷)，爬坡率为

1.0%~2.0% P_e /min, 而欧洲燃煤灵活调峰机组, 其调节范围可达 17%~100% P_e , 爬坡率可达 3%~5% P_e /min, 我国煤电的调峰能力还存在较大提升空间。

截至 2023 年底, 我国煤电装机容量达 11.7 亿 kW, 占比为 39.9%。根据相关规划, “十四五”期间, 煤电“三改联动”改造规模合计 6 亿 kW 左右, 其中灵活性改造容量为 2 亿 kW(见表 1), 其目的是使煤电机组进一步提升负荷的调节能力, 促进新能源消纳, 并帮助电网安全稳定运行。按照“十四五”时期煤电改造目标测算, 灵活性改造可以提升新能源消纳能力 5000 万 kW 以上。

表 1 “十四五”期间煤电改造项目及效益
Table 1 Coal power transformation projects and benefits during the 14th Five Year Plan period

时间节点及效益	煤电改造项目/亿 kW		
	节能降碳	供热	灵活性改造
“十四五”规划目标	3.5	0.5	2.0
“十四五”前 2 年完成情况	1.52	1.45	1.88
预计效益	节约煤炭消费 5000 万 t 以上; 提升系统调节能力 3000~4000 万 kW; 煤电机组灵活改造 1.5 亿 kW		

注: 数据来源: 国家发展改革委、国家能源局《全国煤电机组改造升级实施方案》。

然而, 随着新能源占比不断提高, 单靠传统发电资源越发难以满足电力供需平衡, 必须挖掘各类可调节负荷(包括工业可调负荷、电动汽车、储能、虚拟电厂等)的调节潜力, 拓展新型负荷侧灵活调节资源。当前我国也在大力开展氢能的建设, 以新能源电解水制氢为例, 利用电、氢转换不仅可发挥氢能功率快速调节优势, 降低高比例可再生能源并网的不稳定性, 还可充分利用弃风弃光, 提高风电、光伏发电制氢的经济性, 对提高新能源消纳具有重要的意义^[7]。此外, 对供电可靠要求较高的传统化工行业也可以通过工艺流程优化与调控手段, 以适应新能源波动, 以期在高比例波动性能源供电下实现“荷随源动”与安全稳定运行, 推动能源转型和绿色低碳发展。

1.3 市场机制问题

传统电力系统中, 以火电、水电和核电为主的发电侧可控性和可调节性较强, 而用电侧波动较小, 系统的调节能力较为充裕, 因而我国在电力市场建设初期主要以电能量市场和有功辅助服务市场为核心。新型电力系统中, 随着集中式风电和光伏装机比例的增大以及分布式电源的迅猛发展, 发电侧的可控性和可调节性降低, 而负荷侧的波动性增加, 使得系统的长期容量充裕性和短期运行灵活

性问题凸显。

煤电机组在支撑可再生能源发展与消纳、电力保供和促进新型电力系统中, 发挥着不可或缺的作用。煤电机组已经由为电力用户提供电能量为主的基荷电源, 转变成为整个电力系统提供调峰、调频、备用和爬坡等功能的灵活性电力资源, 以弥补可再生能源发电出力的随机性、波动性和间歇性缺陷, 保障电网安全稳定运行和可靠供电。煤电资源容量与电能量的双重价值决定了其仍是现阶段电力系统安全、可靠、经济运行的“压舱石”, 应遵照先立后破、近远结合的指导思想, 构建合理市场产品体系, 完善煤电价格结构, 助力新型电力系统建设。

我国当前的市场机制重在体现资源的电量价值, 对资源的可靠容量和灵活调节价值体现不足, 既难以保证煤电机组的合理收益和系统长期容量充裕性, 也无法充分激励新能源改造, 提高系统运行灵活性。国外典型电力市场多采用容量补偿机制、容量市场机制或稀缺电价机制等手段保障容量成本回收, 进而保障系统长期容量充裕性; 通过转动惯量、灵活爬坡等新型辅助服务市场保障调节电源收益、激励新能源改造, 进而保障系统短期运行灵活性。如何面向上述新型电力系统实际问题, 借鉴国外典型市场运营经验, 开展多类型多品种的电力市场协同建设, 是我国当前电力市场建设面临的重要问题之一。

2 关键技术分析

新型电力系统环境下, 高比例新能源的利用和消纳是各国面临的共同挑战, 基于我国的电源结构、灵活性资源和市场发展现状, 应对新能源迅猛发展, 需要从以下 5 个方面开展技术攻关。

2.1 煤电与新能源灵活性运行能力提升技术

煤电与新能源灵活性运行能力提升技术, 主要是从电力系统“电源侧”(煤电、风/光新能源场站)自身灵活运行能力提升角度出发, 重点考虑煤电机组宽负荷深度快速灵活调峰性能、风/光新能源场站调峰/调频/虚拟惯量主动支撑能力等方面, 进一步提升现有发电侧各类电源的灵活调峰性能, 为新型电力系统安全、可靠运行提供调节电源资源。

过去 10 年, 我国煤电、风电、光电得到了快速发展, 但其发展方向还主要集中在提升煤电发电效率、降低风光发电成本、提高单机风/光发电效率等方面^[8], 如: 更高参数的 620℃ 超超临界二次再热发电技术、单机容量为 20MW 的海上风电技术、

单晶硅光伏电池的光电转换效率已经达到了 20% 以上，而多晶硅光伏电池则接近 20%。为提升系统的灵活运行能力，需要进一步挖掘发电侧多种资源的灵活调峰能力。

我国“十三五”期间开展了煤电机组灵活性改造实施，目前关于煤电灵活性改造主要集中在深度调峰，即拓宽煤电机组负荷运行能力的上、下限，由于我国目前对机组快速变负荷响应能力的相关补贴及优惠政策较少，仅少数试点项目对负荷响应速率进行了提升，且提升幅度也较小^[9]。目前，我国煤电机组灵活性技术升级路径主要有 2 种^[10-11]，一种是火电机组+储能系统的技术路线，即在原有热力系统基础上增加储能/储热系统。当电网所需负荷下降时，通过储能系统将多余的能量以热能、电能、机械能等形式存储起来，该路径对原机组热力系统影响较小，同时对电网负荷变化的响应速率较快，但投资成本昂贵，导致纯凝机组很少采用该技术路线，采用该种方式的主要是热电联产机组，以达到热电解耦的目标。另一种路径是针对煤电机组深调范围低、低负荷运行供电煤耗高等问题，综合考虑机组设计性能、能耗水平、热工调节性能、整体安全性和可靠性等方面因素，重点分析影响机组灵活性能力提升的汽轮机、锅炉、辅机、控制等主要系统，开展锅炉低负荷稳燃、宽负荷脱硝、汽轮机通流提效改造、汽轮机末级叶片防水蚀喷涂与材料升级、主要辅机在线安全监测等，综合提升燃煤机组整体宽负荷灵活运行能力，目前燃煤机组灵活性改造后，最低负荷下限可以达到 20% 额定负荷，这些技术对拓宽燃煤机组负荷调峰范围起到了积极作用。

在风、光等新能源发电主动支撑能力提升方面，传统控制方式下的风光新能源无法直接提供惯量和承担调峰、调频任务，随着风光接入容量的不断增大，改造新能源场站使其具备调峰、调频等多维度支撑能力是充分挖掘源侧灵活性资源的有效途径之一^[12]。目前，风光新能源场站调频功能的实现主要有以下几种方式：自动发电控制装置改造；监视系统改造、增加一次调频装置、单机逆变器改造、加装储能。利用风光调节的快速性，与常规电源一次调频在时间尺度、死区、调节范围上相互配合，实现新能源对电力系统运行的主动支撑。

表 2 给出了我国现有发电侧各典型电源灵活调峰性能。目前，我国发电侧多资源灵活运行能力提升还仅局限于基于各自发电资源的特点，开展各自相关灵活运行域提升等方面的研究工作，特别是煤

电机组的运行下限已降低至 20%，拓宽了煤电机组的调峰范围。未来将对发电侧的快速响应能力(快速变负荷速率、启停速率)提出更高要求，也是我国发电侧灵活性运行能力提升的重要发展方向。对于煤电机组，未来将更多地通过在热力系统中增加储能、改善现有汽水热力循环系统运行模式、优化控制响应时间等来进一步提升机组变负荷响应速率；对于新能源场，未来将通过配置一定量的储能与一次调频装置，在风光灵活性调节能力不足时提供一定量的调节能力及系统调频的可靠性与快速性。

表 2 我国现有发电侧各典型电源灵活调峰性能^[13-18]
Table 2 Flexible peak shaving performance of typical power sources on the existing power generation side in China^[13-18]

电源	运行区间		爬坡率/ %	滑坡率/ %	启动 时间
	下限/%	上限/%			
煤电 ^[13-14]	20~30	100	1~1.5	0.8~1	160~870min
风电 ^[15]	切入风速	100	20	15	15s~30min
光电 ^[16]	0	100	100	100	30ms
气电 ^[17]	20~100	100	1.5~3	1.5~3	15~20min
水电 ^[18]	20~50	100	20	20	60~300s
抽蓄 ^[18]	20~50	100	20	20	60~300s

2.2 柔性电-氢-化系统集成设计与运行控制优化技术

新型电力系统环境下，须挖掘各类新型可调节资源，氢能作为一种新型的能源载体，具备清洁、可规模化长时间存储等优点，另一方面，氢能被广泛地应用于交通、供热、化工等领域，尤其是化工领域的用氢需求最大。利用可再生能源发电制氢，并将氢储能技术作为可再生能源发电与下游化工之间的桥梁，实现电-氢-化环节的相互耦合，能够有效地解决新能源消纳问题，减少制氢及化工行业的碳排放。

由于“可再生能源发电-电解水制氢-化工合成”各工段动态过程时间尺度差异大、动态特性及约束复杂，如何保证准确性、实时性，实现电-氢-化耦合柔性调峰系统集成设计是亟待解决的关键技术。在系统集成设计方面，需要结合新能源发电/负荷特性和电网调度需求，关键设备运行指标、安全运行边界，投资和运维成本等参数，研究系统在经济性、柔性、连续性、稳定性等多目标约束下的优化配置方法。同时，设计方法应具备一定的普适性，例如典型的煤化工生产工艺^[19](例如合成氨、合成甲醇等)，在设计过程中还需进一步考虑绿氢产量在煤化工生产流程中的不同占比情况，以及响应调度指令带来的氢气产量大幅度波动对储运氢系统和煤化工生产流程带来的影响和必要的调节手段。

在集群优化控制方面,需要全面考虑电解槽的运行特性、工作约束及传质、传热等多物理过程,并且兼顾宽范围变负载运行方式下的安全性与调节性能^[20]。因此,亟需开展大规模电解系统集群优化控制的关键技术研究。为响应电网调度指令,实现柔性调峰,控制策略的设计需综合考虑各个子系统(包含变流器、电解槽、压缩储运等)的接口特性、运行边界和动态性能,通过控制电解槽模块启停,模块间功率分配,以及单槽功率水平,结合各子系统的效率曲线,优化制氢效率,将温度、压力、气体纯度等关键参数控制在合理安全范围之内,实现系统的大范围快速可调及快速爬坡响应。

在系统安全保护方面,与常规能源相比,氢气更容易泄露,是一种高度易燃易爆的气体^[21]。结合电网的基本网架信息与运行状态信息,对电网状态与电-氢-化耦合系统自身运行状态进行运行边界量化分析,可以得到电-氢-化耦合系统调度模型及其灵活运行范围。在此基础上,通过对电-氢-化耦合系统中的电压、电流、温度、压力、气体纯度等关键运行数据处理与分析,基于机理模型、数据模型并结合工程经验,设计安全风险预警系统,及时排除安全隐患,最大限度地确保系统安全运行。

2.3 多资源互补优化调度运行技术

在调度运行方面,面对高比例新能源电力系统条件下,新能源大发时消纳难和新能源少发时电力保障供应难的突出矛盾,传统的源随荷动发电侧调度模式不再适用。亟需突破源网荷储输协调优化运行技术,解决调节资源多、差异化调节特性耦合、以及运行约束复杂等困难,实现电力供应保障与新能源最大化消纳,具体从以下几方面分析。

从优化对象看,系统调度对象逐步从煤电、新能源、水电等发电侧常规电源等扩展至源网荷储输多类型资源,现阶段主要有以下几种。首先,煤电仍是我国主要电量来源,但调节能力欠缺,当前正推进的煤电机组灵活性改造,使得煤电机组低负荷运行能力、快速爬坡能力、快速启动能力得到提升,对提升系统调峰能力,平衡新能源波动提供了有效手段。其次,储能作为调节性能优越的灵活调节资源也将扮演越来越重要的角色,其快速并行调节能力,对于应对新能源间歇性变化、系统快速爬坡和调频提供了有力支撑。未来,随着能源低碳化发展,氢能应用将显著增加,而利用新能源电力电解水制氢将成为氢能的关键来源,电制氢作为新型负荷侧资源也将纳入电网调节范围。最后,特高压输电通道将电量从能源基地输送至负荷中心,扩大了新能

源的平衡和消纳范围,是我国新能源地区消纳新能源的重要手段,在此基础上,加大直流输电通道的灵活调节能力可以进一步提升新能源的消纳能力,但必须同时考虑影响直流通道运行的短路容量、转动惯量等问题。

从运行约束来看,优化对象的种类和规模增加,其运行特性更加复杂。煤电灵活性改造后的边际成本曲线特性、爬坡滑坡率发生明显变化,需要在现有煤电机组模型的基础上,引入额外变量表征机组运行成本和机组深调状态的运行特性。储能充放电行为存在跨时段耦合、能量状态约束、充放循环和连续性等技术要求。电制氢作为可调节负荷,其运行特性具有快速启动、快速调节的优良特性,并且调节范围大,但必须充分考虑其安全性生产的要求,满足电解槽温度和氢氧含量安全范围。特高压输电能力与配套电源煤电机组开机方式耦合,其灵活调节能力还受直流最小运行功率、调节功率次数、已达成交易电力/电量、受端电网需求等因素的制约。

从优化求解性能来看,电力系统多资源协调优化作为典型的混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)问题,存在 N-Hard 现象。优化对象规模与耦合约束的增加,对优化模型求解算法提出了更高要求,需要从提高 MILP 模型的 2 个关键指标入手:紧凑性和紧密性。提高紧凑性的一个重要方法是去除冗余约束,另一种提高紧密性的方法是减少二进制变量的数量,如采用凸包松弛技术实现模型的连续和凸化,将问题转化为线性规划(linear programming, LP)问题,提高求解速度。

基于某省级电网实例分析,采用“源-网-荷-储-氢”多资源序列组合优化仿真,在现有常规资源基础上,顺序投入储能、煤电深调、特高压直流、电制氢等灵活资源和技术手段,优化新能源大发时期全系统的灵活调节能力,分析结果如图 2 所示,表明多资源协调优化调度可有效提升系统的调节能力和新能源接纳水平。

2.4 容量和新型辅助服务市场机制及出清技术

面对我国新型电力系统与电力市场环境下系统长期容量充裕性与短期运行灵活性问题,亟需构建协同市场产品体系,针对性设计容量市场与新型辅助服务市场运营机制,完善需求预测技术、市场出清技术、仿真推演技术等市场交易技术。

从市场产品体系来看,现有电能量市场与常规辅助服务市场一方面难以充分优化电力资源以应对新型电力系统激增的保供需求与调节需求,另一

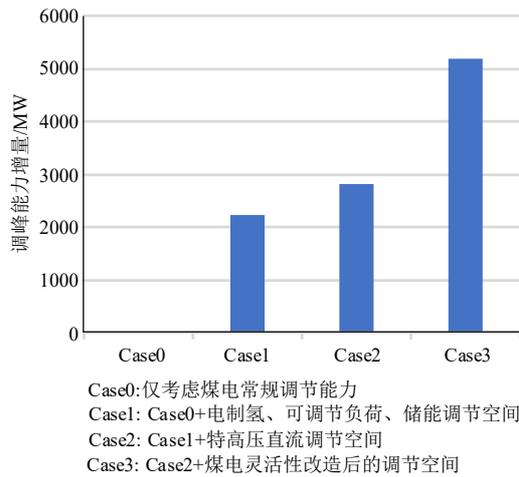


图2 新能源大发时段调峰能力增量

Fig. 2 Peaking capacity increment during high renewable energy generation periods

方面也无法充分体现电力资源的保供价值与调节价值，导致资源相关收益缺失。其根本原因在于现有市场产品类型与新型电力系统涌现的多样需求难以充分匹配，例如现有市场产品体系下容量产品的缺失使得系统长期保供需求没有对应标的加以应对，转动惯量、灵活爬坡等新型辅助服务产品的缺失使得以调频、备用产品为主的辅助服务市场面对系统多样化调节需求时应对乏力。因而明确新型电力系统需求类型，厘清多元主体技术经济特性，完善电力市场产品体系的协同设计，是市场机制与运营技术研究的先决条件。

从市场运营机制设计来看，国际典型电力市场对容量产品机制与新型辅助服务产品机制进行了积极探索。容量产品方面，南美的巴西、智利和秘鲁等国家电力市场中采用容量补偿机制，按月向发电企业支付容量电费^[22]；美国宾夕法尼亚-新泽西-马里兰电力市场和美国中部独立系统运营者及英国电力市场通过容量市场购买未来1~5年的发电容量；美国德州电力市场、澳大利亚电力市场则通过稀缺价格机制，通过高于边际机组边际成本的价格激励反映市场供需，反映可靠容量为系统提供的增量价值^[23]。新型辅助服务市场方面，美国加州、中部、西南等地区的电力市场设立的灵活爬坡产品，英国、欧洲电力市场设立快速备用产品均能有效提高系统爬坡能力，北欧、澳大利亚等地的转动惯量监管或采购机制则能有效保障系统转动惯量充裕性。然而，我国的电力市场建设的条件与建设路径与国际典型电力市场有所差异，国内各地源荷特性也不尽相同。市场机制设计不能照搬国外经验，应结合我国实际情况借鉴和创新设计市场机制，构建形成适合我国中长期市场、现货电能市场、辅助

服务市场，以及容量市场、灵活爬坡市场与转动惯量市场等协同运行和激励相容的电力市场产品结构体系，建立符合“功能互补、时序配合、价本互映、收益互斥”协同机理^[24]的市场交易机制。

从市场交易技术来看，当前技术难点主要包括以下方面。一是高比例集中式风电、光伏接入与海量分布式电源接入带来的系统可靠容量需求与新型辅助服务需求预测困难问题，现有的需求预测方法与调度机构经验难以实现对高比例新能源系统各类需求的精准预测，影响系统运行的安全性与经济性；二是多元主体接入带来的市场出清问题，大量新兴主体接入对市场出清速度、求解能力提出了更高要求；三是复杂博弈环境下的市场仿真推演技术，新型电力系统下多变的市场需求与多元主体的复杂交易策略极大增加了事前市场推演与事后市场反演的技术难度^[25]。需要建立多资源主体的市场行为模型，建立时钟缩放控制技术、大规模高性能出清计算技术、运营大数据评估技术，构建形成成长过程、多市场、多周期模拟推演能力。

综上，新型电力系统环境下应从顶层设计与底层运行两个层面充分考虑，提升了市场优化配置资源能力，保障系统长期容量充裕性与短期运行灵活性。以某省实例电网为例，图3展示了日典型场景下有无爬坡产品时系统爬坡能力供需比的对比情况，可以看出灵活爬坡产品的建设运营能够使系统爬坡能力供需比得到有效提升，进而可以保证系统的短期运行灵活性。

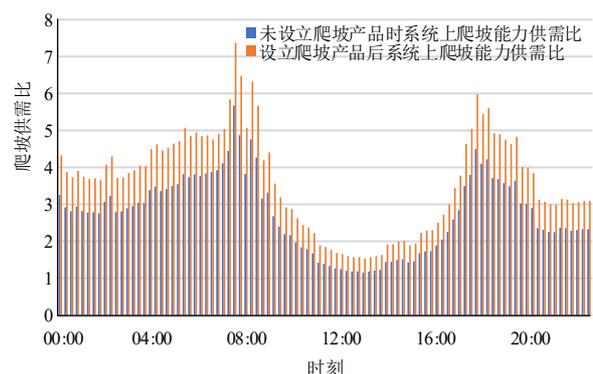


图3 爬坡产品设立前后系统典型日上爬坡能力供需比对比

Fig. 3 Comparison of the supply-demand ratio of the power system with and without the ramping product

2.5 煤电与新能源综合调节和优化运行系统应用技术

近年来国网公司推动建设的新一代调度控制系统基于“物理分布、逻辑统一”架构，提升了对电力系统全局监视、全网防控、集中决策的能力^[26]；微服务架构+自研服务编排技术实现了业务功能模

块高效共享复用集成^[27]；云计算、人工智能、大数据分析等底层通用功能组件极大丰富了电网运行分析决策手段^[28]。为实现煤电与新能源等多元资源的协调优化运行，还需要进一步考虑适应海量异构资源广泛接入及密集交互的需求^[29]、多主体多资源协同优化控制的复杂性、以及多市场协同运营的复杂性^[30]。

首先，在海量异构资源广泛接入及密集交互方面，分析灵活调节煤电、储能、电-氢-化系统、分布式光伏、可调节负荷等源荷侧多资源运行特性，研究各类新型资源参与电网运行控制全过程一体化建模及数据融合技术，支撑海量资源及运行数据的高效接入、监视、预测、调度与市场运行。其次，在多主体多资源协同优化及协调控制方面，充分考虑源荷侧调度控制协同，研究对煤电、新能源、电-氢-化系统、特高压直流等发电与调节资源协同的日前调度和实时控制技术，支撑计及电网复杂约束和调节特性互补的大规模发电与调节资源组合优化与安全控制。最后，在多市场协同运营方面，

既要考虑省间、区域、省级多层次市场的衔接，还要考虑电能量市场与爬坡等新型辅助服务市场、容量市场之间的协同，建立多市场协同运营流程机制，研究容量市场出清、电能量与爬坡等多交易品种联合出清技术，支撑多市场的高效协同和安全运行。

图4给出了煤电与新能源综合调节和优化运行系统调度端整体解决方案，基于调度控制系统基础平台，研发煤电与新能源综合调节和优化运行系统，系统包含平台层、数据支撑层、核心算法层及应用功能层。其中灰底部分为已有功能，蓝底部分为主要新增支撑功能。平台层，充分利用系统强大的基础平台能力，为应用研发提供底座支撑；数据支撑层，聚焦提升灵活煤电、电-氢-化系统等源荷侧多资源模型及数据管理支撑能力；核心算法层，集成发电与调节资源滚动优化和实时控制技术，以及容量市场与新型辅助服务市场出清技术；应用功能层，实现煤电与新能源等多元灵活资源实时监视、分析校核、市场出清到自动控制全过程一体化应用集成，提升源网荷储多资源协同调度控制能



图4 煤电与新能源综合调节和优化运行系统业务功能体系

Fig. 4 Functional system of integrated regulation and optimization operation for coal-fired power and new energy systems

力,保障煤电、新能源等发电和调节资源合理收益,确保大电网安全、经济、优质运行。

3 结论和展望

我国是以煤电为基础能源的国家,随着双碳转型,传统常规电源跟随负荷的电力系统平衡模式和电网调度方式难以适应新能源大规模高速发展。对比分析国外不同国家电源结构和新能源消纳模式,立足我国电源结构,需要提升煤电等多元资源灵活性,建立煤电与新能源等多元灵活资源协调优化调度技术以及相应的市场机制。分析和提出了五大关键技术挑战,包括煤电与新能源灵活性运行能力提升技术、柔性电-氢-化系统集成设计与运行控制优化技术、多资源互补优化调度运行技术、容量和新型辅助服务市场机制及出清技术、煤电与新能源综合调节和优化运行系统应用技术。以期构建适应我国国情的新能源供给消纳体系,推动电力系统的转型升级。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 辛保安, 单葆国, 李琼慧, 等. “双碳”目标下“能源三要素”再思考[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3117-3125.
XIN Bao'an, SHAN Baoguo, LI Qionghui, et al. Rethinking of the "three elements of energy" toward carbon peak and carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3117-3125(in Chinese).
- [2] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2818.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818(in Chinese).
- [3] 陈国平, 董量, 梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5493-5505.
CHEN Guoping, DONG Yu, LIANG Zhifeng. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5505(in Chinese).
- [4] 国家能源局. 新型电力系统发展蓝皮书(征求意见稿)[R]. 北京: 国家能源局, 2023.
- [5] 刘欢, 李翔, 景艳伟. 新能源快速调频技术路线及对比[J]. 电工技术, 2022(5): 1-3.
LIU Huan, LI Xiang, JING Yanwei. New energy rapid frequency regulation technology route and comparison[J]. Electric Engineering, 2022(5): 1-3(in Chinese).
- [6] 王淑超, 孙光辉, 俞诚生, 等. 光伏发电系统级快速功率调控技术及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(21): 6254-6263.
WANG Shuchao, SUN Guanghui, YU Chengsheng, et al. Photovoltaic power generation system level rapid power control technology and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(21): 6254-6263(in Chinese).
- [7] 孙大雁, 史新红, 冯树海, 等. 全国统一电力市场环境下的电力辅助服务市场体系设计[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(4): 13-24.
SUN Dayan, SHI Xinhong, FENG Shuhai, et al. Design of auxiliary service market system under national unified electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(4): 13-24(in Chinese).
- [8] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6258.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6258(in Chinese).
- [9] 王志平. 火电厂灵活性深度调峰改造技术及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2020.
- [10] 欧阳子区, 王宏帅, 吕清刚, 等. 煤粉锅炉发电机组深度调峰技术进展[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8772-8789.
OUYANG Ziqu, WANG Hongshuai, LÜ Qinggang, et al. Research progress on deep peak shaving technology of pulverized coal-fired boiler power unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8772-8789(in Chinese).
- [11] 巩志强, 商攀峰, 徐明新, 等. 煤电机组耦合储热系统的灵活性调峰特性研究及其性能评价[J/OL]. 中国电机工程学报, 2023: 1-13[2024-06-12]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231153>.
GONG Zhiqiang, SHANG Panfeng, XU Mingxin, et al. Research and evaluation on the flexible peaking performance of coal-fired power plants coupled with thermal storage[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2023: 1-13[2024-06-12]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231153>(in Chinese).
- [12] 曾辉, 苏安龙, 葛延峰, 等. 考虑负荷特性的区域电网在线转动惯量快速估计算法[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 423-434.
ZENG Hui, SU Anlong, GE Yanfeng, et al. Fast Estimation algorithm for on-line moment of inertia of regional power grid considering load characteristics[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 423-434(in Chinese).
- [13] 姚力, 崔亚明, 冯云鹏. 某 330MW 循环流化床机组 30%额定负荷深度调峰试验研究[J]. 山西电力, 2023(2): 53-57.
YAO Li, CUI Yaming, FENG Yunpeng. Test study on deep peak regulation at 30% rated load of a 330 MW circulating fluidized bed unit[J]. Shanxi Electric Power, 2023(2): 53-57(in Chinese).
- [14] 齐俊虎. 1000MW 超超临界机组 20%深度调峰控制系统灵活性改造[C]/2023 年电力行业技术监督工作交流会暨专业技术论坛论文集. 南宁: 中国电力技术市场协会, 2023: 11.
- [15] 王秉旭. 风力发电有功功率管理研究[J]. 技术与市场, 2019, 26(12): 97-98.
WANG Bingxu. Study of wind turbines active power management[J]. Technology and Market, 2019, 26(12): 97-98(in Chinese).
- [16] 王诗雯, 刘飞, 刘沁怡, 等. 不对称故障下两级式光伏并网系统低电压穿越控制[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 91-99.
WANG Shiwen, LIU Fei, LIU Qinyi, et al. Low-voltage riding-through control strategy for two-staged grid-connected photovoltaic system under asymmetrical faults[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 91-99(in Chinese).
- [17] 肖新宇, 史毅越, 汤可怡, 等. 安萨尔多 AE94.3A 燃气轮机一次调频分析及优化[J]. 发电设备, 2022, 36(1): 71-74.
XIAO Xinyu, SHI Yiyue, TANG Keyi, et al. Analysis and optimization on primary frequency control of an Ansaldo AE94.3A gas turbine[J]. Power Equipment, 2022, 36(1): 71-74(in Chinese).
- [18] 王婷婷, 赵杰君, 王朝阳. 我国电网对抽水蓄能电站变速机组的需求分析[J]. 水力发电, 2016, 42(12): 107-110, 114.

- WANG Tingting, ZHAO Jiejun, WANG Chaoyang. Demand analysis of variable speed units of pumped-storage power station in power grid of China[J]. *Water Power*, 2016, 42(12): 107-110, 114(in Chinese).
- [19] 邱一苇, 吉旭, 朱文聪, 等. 面向新能源规模化消纳的绿氢化工技术研究现状与关键支撑技术展望[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(18): 6934-6954.
QIU Yiwei, JI Xu, ZHU Wencong, et al. Research status of green hydrogen-based chemical engineering technology and prospect of key supporting technologies for large-scale utilization of new energies[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(18): 6934-6954(in Chinese).
- [20] 沈小军, 聂聪颖, 吕洪. 计及电热特性的离网型风电制氢碱性电解槽阵列优化控制策略[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(3): 463-472.
SHEN Xiaojun, NIE Congying, LV Hong. Coordination control strategy of wind power-hydrogen alkaline electrolyzer Bank considering electrothermal characteristics[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(3): 463-472(in Chinese).
- [21] SINGH S, JAIN S, PS V, et al. Hydrogen: a sustainable fuel for future of the transport sector[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 51: 623-633.
- [22] 刘方, 张粒子, 李秀峰, 等. 巴西电力市场研究: 电力市场化改革历程与市场交易机制[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(8): 2501-2514.
LIU Fang, ZHANG Lizi, LI Xiufeng, et al. Brazil's electricity market research: electricity market reform process and market trading mechanism[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(8): 2501-2514(in Chinese).
- [23] 张粒子. 建立煤电容量电价机制恰适时[J]. *中国电力企业管理*, 2023(31): 47-48.
ZHANG Lizi. Establishing a coal electricity capacity pricing mechanism is timely[J]. *China Power Enterprise Management*, 2023(31): 47-48(in Chinese).
- [24] 王进, 张粒子, 丛野, 等. 应用图论建模输电网的电力现货市场出清模型[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(9): 3429-3439.
WANG Jin, ZHANG Lizi, CONG Ye, et al. A clearing model of electricity spot market based on graph theory to modeling transmission network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(9): 3429-3439(in Chinese).
- [25] 杨争林, 曾丹, 冯树海, 等. 电力市场实验能力建设面临的挑战及关键技术[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(10): 111-120.
YANG Zhenglin, ZENG Dan, FENG Shuhai, et al. Challenges and key technologies of experiment capability construction for electricity market[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(10): 111-120(in Chinese).
- [26] 许洪强, 姚建国, 於益军, 等. 支撑一体化大电网的调度控制系统架构及关键技术[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(6): 1-8.
XU Hongqiang, YAO Jianguo, YU Yijun, et al. Architecture and key technologies of dispatch and control system supporting integrated bulk power grids[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(6): 1-8(in Chinese).
- [27] 许洪强, 姚建国, 南贵林, 等. 未来电网调度控制系统应用功能的新特征[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(1): 1-7.
XU Hongqiang, YAO Jianguo, NAN Guilin, et al. New features of application function for future dispatching and control systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(1): 1-7(in Chinese).
- [28] 舒印彪, 陈国平, 贺静波, 等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. *中国工程科学*, 2021, 23(6): 61-69.
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(6): 61-69(in Chinese).
- [29] 昌力, 曹荣章, 吉斌, 等. 电力现货市场交易运营的未来重大需求与关键技术[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(4): 34-48.
CHANG Li, CAO Rongzhang, JI Bin, et al. Future major demands and key technologies in trading operation of electricity spot market[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(4): 34-48(in Chinese).
- [30] 曾鸣, 杨雍琦, 李源非, 等. 能源互联网背景下新能源电力系统运营模式及关键技术初探[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(3): 681-691.
ZENG Ming, YANG Yongqi, LI Yuanfei, et al. The preliminary research for key operation mode and technologies of electrical power system with renewable energy sources under energy Internet[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(3): 681-691(in Chinese).



孙大雁

在线出版日期: 2024-06-28。

收稿日期: 2024-04-29。

作者简介:

孙大雁(1970), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事电网经济调度、电力市场等方面的研究工作, E-mail: sun-dayan@sgcc.com.cn;

耿建(1971), 男, 通信作者, 博士, 研究员级高级工程师, 主要从事电力市场、电力系统优化调度等方面的研究工作, E-mail: gengjian@sgcc.com.cn。

(责任编辑 马晓华)

附录 A

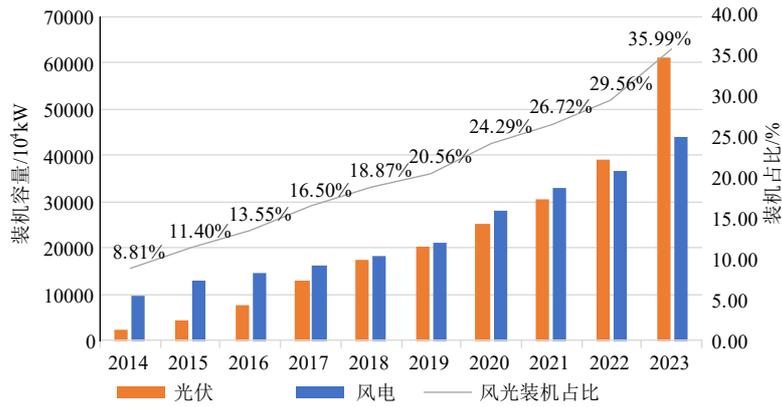


图 A1 我国风电光伏累计装机容量(2014—2023 年)

Fig. A1 Accumulated installed capacity of wind and photovoltaic power in China (2013-2022)

表 A1 德国、澳大利亚等地区新能源占比对比

Table A1 Comparison of the proportion of new energy in regions such as Germany and Australia

调研项目	新能源占比/%	水电占比/%	燃气占比/%	煤电占比/%	煤电调度策略	其他灵活资源
德国	40	3	14.68	28	调节能力强，最小出力 25%~40%，向提供备用转变	少量抽蓄电站及储能参与调节，鼓励虚拟电厂等新商业模式参与
澳大利亚	30	6.7	17.7	50	更多的是提供调频和惯量辅助服务	正大力发展储能参与电网辅助服务
美国 CAISO	27.43	16.59	46.62	0	—	支持储能等市场主体参与电能、辅助服务与容量等不同品种交易

注：数据来源：Hannah Ritchie and Pablo Rosado – “Electricity Mix” Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: <https://ourworldindata.org/electricity-mix>’.