

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.10.002

“双碳”目标下火电企业绿色低碳转型的 对策分析

Analysis on solution for green and low-carbon transformation of thermal power enterprises
to achieve carbon peak and carbon neutrality

赵国涛, 钱国明, 王盛, 丁泉, 朱海东

ZHAO Guotao, QIAN Guoming, WANG Sheng, DING Quan, ZHU Haidong

(国电南京自动化股份有限公司, 南京 210032)

(Guodian Nanjing Automation Company Limited, Nanjing 210032, China)

摘要:“双碳”目标的提出为能源电力行业发展带来了深刻的变革,尤其是促进发电侧企业的绿色低碳转型方面。在对“双碳”目标进行充分解读的基础上,从能源结构调整、能源供给、能源消纳、能源信息化、新兴能源技术等视角,分析该目标为能源行业所带来的影响。根据目前火电企业在生产经营中的痛点问题,从企业定位、可再生能源消纳、节能、成本管控、企业数字化转型等方面,提出应对绿色转型的策略与方法,为未来火电企业实现转型发展提供借鉴和思路。

关键词:碳达峰;碳中和;绿色低碳;碳减排;火电企业;储能;制氢;可再生能源消纳;数字化转型

中图分类号:TK 01*8 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2021)10-0011-11

Abstract: The proposal of carbon peaking and carbon neutrality brings profound changes to the development of energy and power industry, especially on promoting the green and low-carbon transformation of power generation enterprises. Based on the full interpretation of the goals, their impacts on energy industry are analyzed from the perspectives of energy structure adjustment, energy supply, energy consumption, energy informatization and emerging energy technologies. Then, according to the problems existing in the production and operation of thermal power enterprises, the strategies and methods to deal with green and low-carbon transformation are put forward, which include enterprise positioning, renewable energy consumption, energy saving, cost control and enterprise digital transformation, so as to provide reference and ideas for the transformation and development of thermal power enterprises in the future.

Keywords: carbon peaking; carbon neutrality; green and low-carbon; carbon emission reduction; thermal power enterprise; energy storage; hydrogen production; renewable energy consumption; digital transformation

0 引言

2020年9月,我国政府向世界承诺,力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和,即“双碳”目标。“双碳”目标的提出彰显了中国积极应对气候变化、走绿色低碳发展道路的坚定决心,对未来我国社会经济运行方式、生态环境质量、产业结构布局和生活消费方式等方面都将产生深刻的影响^[1]。尤其在能源电力领域,该目标的提出将会多个维度带来系统性的变革。

2021年2月,国务院印发《关于加快建立健全绿

色低碳循环发展经济体系的指导意见》。该指导意见指出,“双碳”目标必须依靠科技创新和政策创新,通过构建清洁低碳、安全高效的能源体系和绿色经济体系来实现,这为能源电力行业的绿色低碳发展指明了方向。

近年来,国内诸多能源企业响应国家“双碳”目标的战略部署,采取了各种积极的行动,例如2021年3月,国家电网发布碳达峰、碳中和行动方案,全力推进能源供给清洁化、终端能源消费电气化、清洁能源利用高效化。这些行动反映出各企业在新时代背景下,为实现绿色低碳发展、促进转型升级所做的初步思考与探索。

现有关于电力企业应对低碳转型问题的报道大致可分为以下几个角度。(1)转型管理研究。能

源管理是目前低碳转型方向的研究热点^[2],主要是考虑如何将低碳转型理念嵌入到环境管理的新思路中^[3]。(2)转型技术研究。目前的研究大多集中于策略设计方面,如采用政策手段与决策模型讨论减排率与成本之间的关系等^[4]。(3)转型驱动力分析。主要是讨论驱动力产生的来源和机制,在经济效益与社会责任之间进行比较和权衡^[5]。(4)转型路径探讨。一般而言,能源电力的绿色低碳转型路径主要集中在能源结构调整和经济性评价2个方向^[6-7],尤其是转型的成本^[8]及约束性问题^[9]。总体来看,这些报道在研究主题与研究策略上与“双碳”目标的要求基本符合,但是对于不同行业的细分性研究,尤其是针对火电企业在新形势下面临的困难和对策分析方面的文献尚不多见。

本文通过对“双碳”目标概念的解读,讨论该目标提出给我国能源电力行业带来的深刻影响,分析

火电企业在生产经营领域存在的主要痛点问题,提出与绿色低碳转型发展相关的应对策略与思路,为企业未来的快速发展梳理思路 and 提出建议。

1 “双碳”目标的解读

对于“双碳”目标,截至目前国内外都没有一个严格、准确的定义^[10]。一般认为:某个区域或组织的年度二氧化碳排放统计量若在某段时间达到峰值后,维持一定范围内的波动,进而进入平稳下降阶段的演变过程,即可被称作碳达峰;若该统计量因采用去除技术而达到碳排放和碳汇增减平衡,此平衡状态可称为碳中和。

从减排角度看,碳中和的实现难度要远超碳达峰。碳中和概念可被视为深层次的低碳目标驱动,主要包括碳减排和负碳技术2个层面的内容,其内涵解读如图1所示。

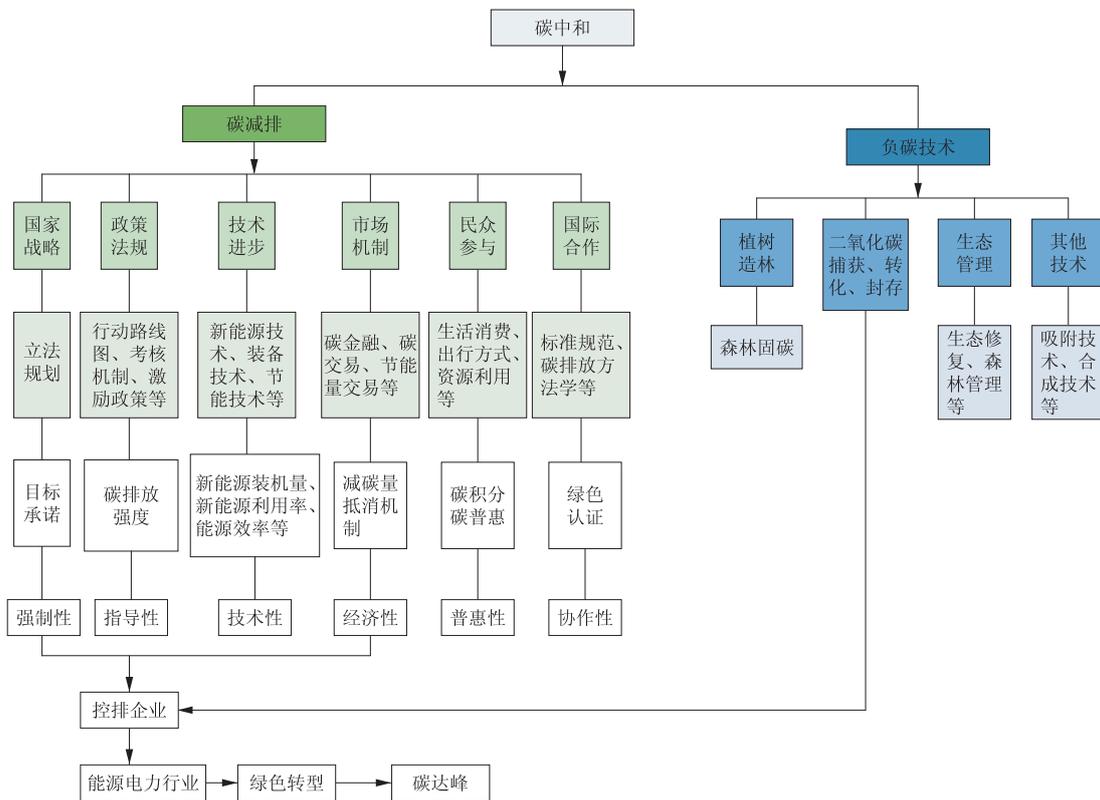


图1 碳中和概念的解读

Fig. 1 Interpretation of the concept of carbon neutrality

1.1 碳减排

对于碳减排工作的内涵,可以从国家战略、政策法规、技术进步、市场机制、民众参与和国际合作等6个角度进行解读。

(1)从角色定位看,碳中和作为国家级发展战略,是涉及能源安全和能源革命的重要主题。碳排放的管控过程必然涉及企业、政府、公众及市场主体等多方的责任与利益,而要化解各种矛盾都离不开

健全的法律体系和社会监督。因此,有效解决有关碳排放管控的顶层设计问题,彰显此项工作的权威性与强制性,是现阶段亟待落实的举措。

(2)碳排放管控工作还需要解决规范性问题。面对国家“双碳”战略目标,各行业都在采取行动积极应对,但尚缺乏统一的指导性法规和文件。地方性法规、指导性文件、激励性政策、相关技术标准与规范等都尚待完善和细分。只有将各种指导性规

定纳入到统一的系统性管理框架中,才能有效降低全社会的碳排放强度。

(3)碳排放的源头管控工作,离不开科技水平的不断进步。从生产的工艺优化到技术管理,从节能技术和装备的应用到能效管理,从碳足迹的追踪到重点排放源的治理,从新能源技术的发展到信息技术的融合等,都需要科技进步提供支撑。

(4)从市场建设视角看,全面推进碳排放的源头管控工作,必须要依靠以价格机制为导向的市场手段,从根本上激发资本市场对该项工作的参与热情,并由此带动相关技术研发和科技进步。目前,相关的市场机制主要包括:碳交易、节能量交易、绿证交易、绿电交易、用能权交易、排污权交易等。

(5)从民众参与视角看,碳减排工作主要涉及碳配额的分配与管理、减碳量的市场开发和碳普惠的需求激发等3个方面^[11]。其中,与生活消费、出行方式、资源利用等密切相关的碳普惠机制最能体现民众参与的普惠性,也是民众自发参与碳减排活动的一种形式。

(6)从《京都议定书》到《巴黎协定》,碳减排工作始终离不开包括标准修订、技术交流、市场准入、资金支持、运行机制等方面的国际交流与合作。

1.2 负碳技术

负碳技术是采用物理、化学方法或管理手段,减少经由人类活动所产生二氧化碳的过程。负碳技术一般包括:二氧化碳捕获、封存和转化^[12],森林固碳和生态管理等。随着各国碳中和目标时间表的陆续确定,有关负碳技术的研究也渐成热点,但目前多种负碳技术在应用层面多受限于高能耗、高成本问题,成熟经济的工艺尚不多见。

对碳中和概念的多角度、概括性解读,也是对未来此项工作开展的一种系统性思考。对于电力行业的二氧化碳控排而言,只有强化源头控制与末端治理环节、遵循绿色发展的理念、不断改进过程管理,才能真正实现“双碳”目标的要求。

2 “双碳”目标对于能源行业的影响

“双碳”战略目标的提出将深刻影响我国社会的各个层面,尤其是高碳、高耗能产业。“双碳”目标对于能源行业的影响,可从能源结构调整、能源供给、能源消纳、能源信息化、新兴能源技术等5个视角进行分析,如图2所示。

2.1 能源结构调整

近年来,世界能源消费结构正在发生深刻变化。根据英国石油公司(BP)发布的《世界能源统计年鉴2020》:2019年全球一次能源的占比下降到

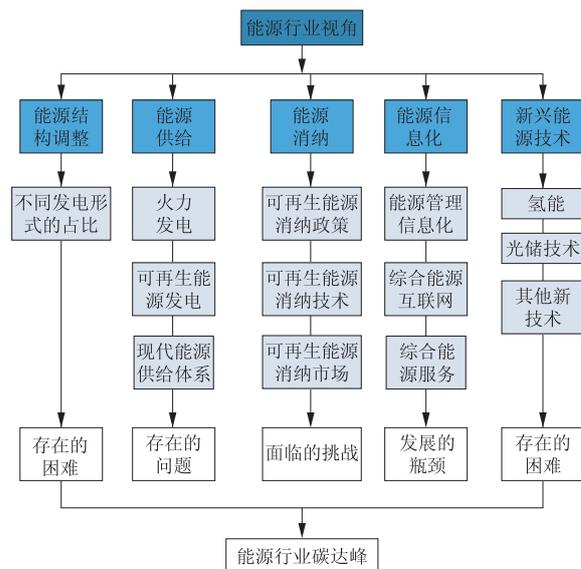


图2 “双碳”目标对于能源行业的影响

Fig. 2 Impact of carbon peaking and carbon neutrality on energy industry

2003年以来的最低水平(27%),可再生能源和天然气推动了能源消费的增长,其中前者出现了年鉴统计史上最大年度增量(3.2 EJ)。同年,据国家统计局核算,我国煤炭消费占比约为57.7%。火力发电仍是我国碳排放的主要来源,未来能源结构的重塑已经势在必行。

2.2 能源供给

根据国家统计局发布的2019年年度数据,全国火力发电量为5220.1 TW·h,占总发电量的69.57%,这样的能源供给比例显然不能满足“双碳”目标的要求。随着新型电力系统的构建与发展,可再生能源将迎来倍速发展。大规模新能源的并网发电问题变得日益突出,以煤电为主的电力系统面临着不断增大的灵活性改造压力,这将为能源供给比例的调整带来更大的挑战。

2.3 能源消纳

有效促进新能源的消纳,是“双碳”目标背景下构建现代能源体系的重要步骤,也是新型电力系统建设的核心环节。

从消纳政策看,以2019年《关于建立健全可再生能源电力消纳保障机制的通知》为标志,通过设定可再生能源电力消纳责任权重来规范和约束各市场关联主体的落实、组织和消纳的责任。

从消纳技术看,通过发展特高压技术应用,满足可再生能源的跨区外送需求,解决用电负荷和能源资源分布不均的问题;通过提高电网的智能化水平,解决电力电子化给电力系统运行带来的宽频振荡、电能质量和电力系统安全运行问题等;通过火电的灵活性改造、光伏储能电站建设、抽水蓄能电

站建设等手段,解决高比例新能源接入电网导致的电力系统峰谷差增大、电网调峰能力不足等问题;基于虚拟电厂(VPP)技术,采用源-网-荷-储一体化模式,实现分布式可再生能源的就地平衡与消纳。

从消纳市场看,核心任务是解决可再生能源供需关系不平衡的问题^[13],可选择的手段包括:发电企业对市场价格信号波动的主动预测、对可再生能源发电质量的主动监控、对分布式可再生能源发电量的集成式管理、对区域能源系统内外多交易市场联动机制的构建^[14]、对可再生能源发电“就近消纳”市场机制^[15]以及商业模式的探索等。

2.4 能源信息化

能源行业“双碳”目标的实现离不开工业化与信息化的融合,离不开能源企业的数字化转型。能源信息化的内容体现在发电侧的信息安全防护、能效管理、碳足迹评价等;网侧的系统安全控制、智能微电网及储能设施配置、分布式能源接入、多能互补方案等;用户侧的智能电表应用、负荷侧信息采集、网-荷信息互动、网侧快速响应与应急管理以及通信服务等。能源信息化的实质就是对能源的发、输、配、送、用等环节的数字化技术赋能过程。数字化技术赋能应着力于促进可再生能源电力在能源终端消费中比重的提高。

2.5 新兴能源技术

“双碳”目标确立后,发展环境效益良好、具备可持续性的新型发电技术成为了一项紧迫的任务。目前较受关注的技术包括:海洋能发电、生物质能、太阳能光热技术、地热能、天然气水合物发电等。氢能作为一种灵活的二次能源,可促使能源供应端融合、提升能源使用效率。通过绿电参与电解水制氢的过程有望成为促进可再生能源消纳的重要技术手段。另外,新能源与储能技术的融合应用成为目前研究的热点。电化学储能是当前应用范围最广的电力储能技术^[16],锂离子电池技术、钠离子电池技术的研发与示范项目不断更新。而一些处于世界科技前沿的新兴技术,如区块链^[17]、虚拟现实^[18]、边缘计算^[19]、物联网^[20]等技术都有望在能源领域得到广泛应用。

“双碳”目标的确定为能源行业的发展带来了深层次影响,这也是未来火电企业进行绿色低碳转型的行业背景与推进基础。

3 火电企业的绿色低碳转型

“双碳”目标的确定,迫使火电企业加快走上绿色低碳转型之路,相关的对策分析如图3所示。

3.1 火电企业面临的痛点问题

目前火电企业在生产经营中面临的难点主要包括企业定位、可再生能源消纳、节能、成本管控、企业数字化转型等5个方面,这些问题都与“双碳”目标的实现密切相关。

3.1.1 火电企业的定位

“双碳”目标的确定必将促进风光发电的快速发展,受成本和技术限制,现阶段高比例风光发电接入问题的主要解决途径还是依靠大电网消纳。由于电能出力的波动性和间歇性,高比例风光发电的引入必然会给大电网的稳定运行带来冲击^[21]。在此场景下,影响大电网稳定的因素主要来自系统转动惯量和系统备用。这些问题的解决都离不开火电机组的调度、调控和管理手段,这就引申出关于火电企业在“双碳”目标背景下如何定位发展的问题。

3.1.2 可再生能源的消纳

“双碳”目标背景下,火电企业集团参与投资的可再生能源发电装机量将会大幅度增长。但由于各地资源禀赋和经济发展水平存在差异,可再生能源的消纳问题将会变得十分复杂。集中式和分布式风光发电在消纳的方式和思路上是存在差异的:前者更多的是依靠大电网消纳和长距离传输;后者现阶段以直接就地消纳为主,未来将有赖于构建消纳的市场机制与商业模式。因此,针对不同的风光发电模式,参与投资建设的火电企业须采取不同的应对策略。

3.1.3 节能

理论上讲,所有关于能耗的核算最终都能被计算或折算为减碳量。因此,企业的节能降耗不仅与能源成本控制相关,而且间接影响“双碳”目标的实现。火电企业的节能控制点包括:汽轮机系统的运行方式、机组配置与设备结构、锅炉系统设备燃烧率和防漏风技术、环保系统的脱硫脱硝与除尘工段的节能技术、变频改造技术和工质管理技术以及废热利用技术等。在各种发电形式涌现与新兴技术应用的背景下,火电企业对节能降耗问题进行科学规划与集控管理就变得十分重要。

3.1.4 成本管控

面对各类新能源快速发展的预期,火电企业的经营压力将进一步增加,如何加强经营成本的管控成为迫切和重要的课题。一般而言,常规的经营成本主要包括燃料成本、生产费用、财务费用、折旧费用、检修费用和其他费用等^[22]。随着高比例可再生能源接入电网,参与调频和备用辅助服务的燃煤/燃气机组所产生的备用机组的固定成本、调频机组启

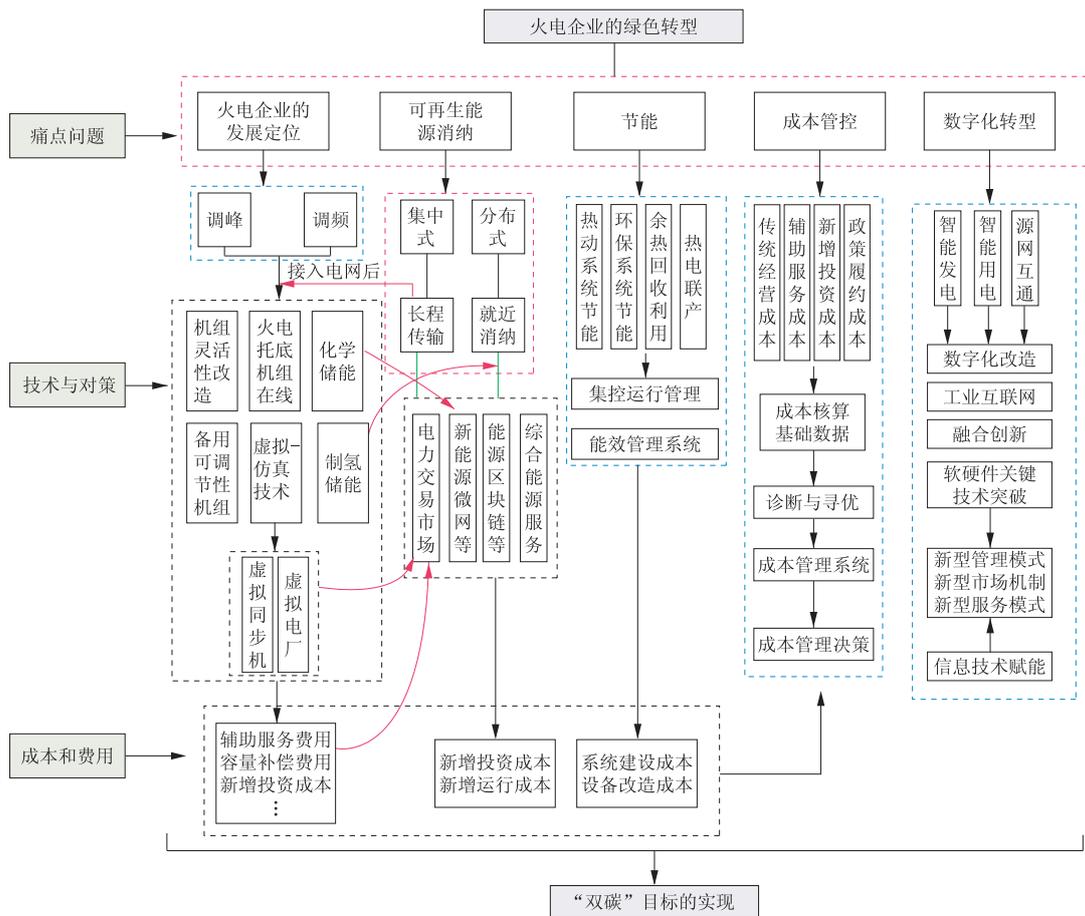


图 3 火电企业绿色低碳转型思路

Fig. 3 Concept of green and low-carbon transformation for thermal power enterprises

停费用、企业搁浅成本等都会发生相应变化；随着“双碳”目标的逐步推进，火电控排企业在碳配额履约、节能服务、储能及新能源投资、信息技术投入等方面也会产生新增成本，这都是火电企业需要尽早思考的问题。

3.1.5 数字化转型

“双碳”目标背景下，分布式发电技术、储能技术、智能控制与自动化技术、通信技术等都将在源-网-荷侧得到深入的应用与发展。火电企业将面临从单纯电力供给方转变为能源产销服务商的转型，这意味着火电企业需要通过数字孪生等技术对电力装备的设计、制造、运维过程进行优化^[23]，通过智能管理技术等对客户服务的产品类型、服务模式等进行管理，最终实现企业的数字化转型。

以上火电企业所面临的痛点问题间也存在着相互关联，并归结于企业绿色低碳转型的目标之下。

3.2 火电企业绿色转型的对策

3.2.1 明确火电企业的发展定位

(1)确定火电机组在线的最优比例。高比例可再生电力接入，会直接造成系统转动惯量下

降，严重威胁系统的运行稳定。考虑到经济调度和系统安全，在满足电力供应的前提下，需要保证一定比例的火电机组在线托底。必须建立较为合理的识别方法来判断担当调频任务的(在线)机组究竟维持何种配置比例才能同时满足电网的经济性和可靠性。该方法的建立可能涉及燃气机组配置、风光出力预测、电力设备利用效率等诸多因素，因此托底火电机组的最优比例需要根据实际情况进行具体分析。

(2)确定备用火电机组的最优比例。高比例可再生电力接入会造成系统内总的发电能力不可控，甚至会因风光发电出力的大幅波动而产生脱网现象。因此，需结合风光发电出力特性和最大负荷情况，合理设置系统的备用容量，保证电网的安全稳定运行。系统预留备用的最优比例也是需要结合经济性、安全性而进行科学的预判。

(3)继续深入推进火电机组的灵活性改造。目前，电网灵活性提升主要来自于单循环调峰气电、抽水蓄能电站、热电联产机组和常规煤电灵活性改造。高比例可再生电力接入，要求电力系统须具备能提供实时响应的技术和资源，火电

(尤其是煤电)机组进行灵活性改造需要满足电力系统灵活性的基本要求,改造可能涉及机组设备本体、辅助设备和各类子系统,且一套机组可提供多套改造方案,每套方案之间的改造重点与投资成本也会存在差异。对于多数火电企业而言,进行机组灵活性改造的关键点在于相应投资成本及费用的分摊,这会对其参与此项工作的积极性。

应出台更多有利于调峰补偿的政策,完善电力辅助服务补偿制度,构建以电力用户侧为主体的辅助服务市场;并在技术层面加强对电源灵活性改造的细节性研究,为进一步促进规模化可再生能源消纳采取行动。

(4)加强虚拟-仿真技术在调峰/调频方向的应用研究。目前用于电网调峰/调频方向的虚拟技术,主要有虚拟同步机(VSG)和VPP。

VSG通过在风光发电并网逆变器内的控制器中加入一种模拟同步发电机的运行机制和外特性的控制算法,以自控方式调节风光出力,以替代真实火电机组参与调频,可增加系统的平衡能力和频率稳定能力^[21]。目前,有关VSG技术的研究主要集中在自适应控制策略^[24]、并网稳定性^[25]和微电网中的应用^[26]等3个方面,VSG与储能的关联研究也逐渐成热点。VSG技术可借助储能模块对机组输出功率进行动态补偿,并能模拟同步发电机的惯性参与电网的一次调频控制,快速平滑功率,消除可再生能源的间歇性与负荷的随机性,提高系统稳定性。因此,未来有必要加强对微电网、VSG和储能的协同技术研究,以拓展微电网的应用空间,为促进可再生能源在大电网的消纳提供技术性支撑。

VPP通过分布式电力管理系统将电网中分散安装的清洁能源、可控负荷和储能系统进行聚合、优化控制和管理,为电网提供调频、调峰等辅助服务,是实现智能电网的重要技术之一。目前,有关VPP参与电网调峰方面的研究大多来自于电力交易市场和电力辅助服务市场,关注点一般在运营模式^[27]、交易出清模型^[28]、调峰策略^[29]等方面。这些研究对交易过程的出力预测与模型优化较为关注,但较少从电网层面针对VPP参与调峰过程所引起的电压、频率、潮流变化等方面进行讨论。另外,有关VPP技术在协调控制技术、智能计量技术和信息技术等方面的研究也尚待加强。

(5)加强储能-火电联合调频/调峰的应用研究。目前,我国的调频电源主要为火电机组,其对自动发电控制(AGC)指令响应滞后,不能满足电网调度的要求,而通过储能与火电机组联合调频就能在一定程度上解决这个问题。目前,此方向的研究多集

中在调频性能^[30]、调频效益^[31]、调频系统设计^[32]等方面,对于储能单元接入后对于电厂自身用电波动性的影响则关注较少。高比例可再生能源并网时,电化学储能可降低可再生能源机组的波动性、提高入网电能质量、增强电网系统调节能力和运行的稳定性^[33]。而且作为快速响应的电源,储能设备还可以参与到电力辅助市场中提供系统备用容量。从严格意义上讲,储能-火电联合调频/调峰也是火电灵活性改造的一种手段。另外,独立储能电站参与辅助服务市场,提供调峰、调频服务,也是促进可再生能源消纳的一种积极方式。

总之,在“双碳”目标背景下,未来的火电企业应该将促进高比例可再生能源的并网作为重点应用场景,以辅助电网的调峰/调频为主要角色定位。在此前提下,保留一定比例的托底机组,以应对各种突发事件引起的电网运行极端情况的出现。

3.2.2 可再生能源的消纳

可再生能源的消纳受政策层面影响较大,但从技术上而言(以风光发电为例),存在2种不同的应对思路。

(1)集中式风光发电。受资源禀赋、负荷特性等因素的制约,国内集中式风光发电的消纳尚存在消纳结构不平衡、源-网发展不协调的情况,这就需要借助特高压电网为骨干网架,通过长程传送来提升能源的配置能力。实现风光发电长程外送的关键在于区域内电网互联、互通能力的大小,即负荷曲线和常规机组最小出力曲线之间的差值^[34]。除增加外送负荷之外,火电企业应提高灵活性电源的比例,提升机组调峰/调频性能,做好日前/日内精准发电预测及负荷预测,通过电力交易市场促进集中式风光发电的消纳。另外,新能源大规模接入挤占了常规机组开机空间,可能会导致系统运转调频能力下降、无功支撑不足、电压稳定问题突出、越限风险增加等情况的出现,须借助数字技术和信息化技术,提高电力系统灵活性、加速构建能够适应高比例可再生能源的智能电力系统。

(2)分布式风光发电。分布式风光发电的消纳思路是以“就近消纳”为主,目前较受关注的技术和手段有:直接就近消纳、储能+微电网、风光发电+绿氢、能源区块链、综合能源服务等。

其中,储能+微电网的消纳模式兼顾了分布式电源的灵活性调控和储能容量的充裕度,有助于实现对微电网的有效控制和能量管理^[35]。但这种组合应用的覆盖面尚有待扩展;同时,该技术组合还可参与辅助市场服务,有利于推动可再生能源并网和保证电网的安全稳定运行。现阶段,国内风光储

模式发展的瓶颈主要来自成本和安全问题。未来需要在锂电池梯次利用、储能辅助服务市场和收益/容量失配等方向加强技术研究。

氢能是绿色、高效的二次能源,其技术应用与产业布局近年来备受关注。通过可再生能源电解水制氢(绿氢)的路线,可有效解决弃风弃光的问题,同时可降低制氢成本,是未来实现“双碳”目标的重要技术方向。在此路线中,制氢容量配置对技术经济性的影响较大^[36];但由于风电氢能系统可以自适应风电出力的随机性与间歇性,负荷波动情况对制氢系统稳定性的影响较小^[37]。从产业发展角度看,当前影响氢能规模化应用的瓶颈主要集中于燃料电池技术研发、储氢与运氢过程的成本控制方面。未来在此方向的研究应聚焦氢能技术的经济性和安全性,深入挖掘氢能技术的市场潜力,以低成本产业发展推动可再生能源的消纳进程。

区块链技术可以提供公开、可靠的信任体系,实现对能源的精准数字化管理。因其去中心化的特点与分布式能源的禀赋相契合,因此能源区块链技术开始受到较多的关注。基于区块链技术,各发电企业可以通过智能合约参与市场交易,大幅度降低了分布式风光电力的交易成本,提升了交易效率;基于区块链技术,以能源碳通证为减碳量核算载体,可为参与可再生能源消纳的各市场主体提供激励^[38-39]。火电企业应积极跟进并提早布局能源区块链技术方向的研究。

综合能源业务以用户为中心、以在用户侧实现信息化为最主要的落地方式,能够降低企业的终端用电成本、提高能源利用效率^[40]。综合能源系统集成成了各种不同特性的电源,在促进分布式风光发电消纳方面所起的作用与风光储系统类似,有关此服务规模化、落地技术的研究还须加强。

3.2.3 节能

节能降耗工作直接影响火电企业的利润,也是实现“双碳”目标的重要环节。该项工作的改进,可从以下几个方面进行考虑。

(1)热动系统。考虑对该系统的运行方式进行优化,提高能量转化率,重视热能品位和燃料化学能品位的关系,促使能量得到充分利用。根据生产实际,考虑对热动机组进行优化配置和节能改造,必要时可对设备进行节流调节。要重视针对电机、水泵、锅炉等设备的新兴节能技术研发和应用,如工业通用燃烧优化控制技术(BCS)等。

(2)环保系统。火电企业环保系统的节能,主要涉及与脱硝、煤粉清洁、水煤浆洁净等环节相关的燃烧技术。这些燃烧技术一般都重视设备的结

构设计,且兼顾强化燃烧与污染控制双重功效,未来针对此方向的技术研发应该得到重视。

(3)热电联产与余热回收。对于热电联产机组,关键是实现统一集中供热和提高余热回收率,可采取的措施包括:着力推广蓄热与保温新型材料的应用,加强对现有设施的节能改造、充分利用低品质热源以提升机组运行效率;重视对节能热力学研究,深入剖析热能损失与工艺过程的关联,提高大型火电机组的综合能量利用效率;协调短期供热运行和长期热负荷水平之间的关系,充分考虑机组进行灵活性改造前后成本及收益的变化,提高供热企业的积极性;提高信息化技术对机组集控运行的管控水平,推动能效管理制度建设等。目前,烟气、锅炉排污水、蒸汽凝结水中的热量回收技术尚未成熟,导致余热回收效率不够理想。

3.2.4 成本管控

(1)成本分析。火电企业的成本问题主要来自4个方面(如图3所示):常规经营成本、参与辅助市场产生的成本、新的投资成本和政策性履约成本。

常规经营成本与电力生产的各环节相关,其中较大比例来自燃料成本。影响燃料成本主要因素包括燃料价格的波动、入厂燃料的质量和储运过程的损耗。解决燃料成本问题的对策是实施煤电一体化的发展,实现产业链上下游整合,形成管理功能良性互补和综合效益最大化。另外,要发挥市场机制作用,形成合理的煤炭产权流转制度,并借助信息化手段建立成本预算精细化管理机制,从根本上实现对常规经营成本的管控。

参与辅助市场产生的成本主要包括调峰和备用成本^[41]。调峰成本与火电机组的煤耗成本、油耗成本、损耗成本、环境成本等都有关联。在涉及深度调峰时,为平衡系统负荷波动而实时改变出力所付出的能量损耗及其他费用会直接影响火电机组参与调峰的积极性。为削弱可再生能源接入电网产生的系统波动,火电机组预留有旋转备用容量,这也会产生辅助服务成本。

“双碳”目标背景下,火电企业需要提高可再生能源发电的装机比例,需要在负碳技术、储能、氢能等方面加大研发投入力度,而这些新能源和新技术的投资也存在一定风险性,且短时期未必能取得直接效益。因此,此类中长期投资所产生的成本,对于火电企业也是需要进行评估和权衡的。

随着“双碳”目标的逐步推进和实施,相关的法律法规也会陆续出台,作为高能耗控排对象的火电企业面临的“碳约束”压力会进一步加大,由此产生的政策性履约成本也会增加。如果再叠加既有的

环境约束、安全生产约束、社会责任约束成本,火电企业面临的成本管控问题将进一步复杂化。

(2)成本管理决策。针对成本构成的复杂性,可考虑采用智能优化算法,对火电企业运行的经济性进行综合评价寻优,进而为企业成本管理决策提供依据和支撑。首先,对上述4类成本分别进行再细化分析,根据生产实际或经验数据,对细分后的各种成本进行占比赋值,得到成本核算所需的基础数据及组成;其次,分析、核算与各类基础数据相关的生产、经营环节,并将对核算结果产生较大影响的成本作为决策变量。以全局智能优化算法为基础,以满足“低碳”和“环保”要求为约束条件,以火电企业全生命周期成本最低为准则(目标变量),建立成本优化模型,采用多种优化算法(遗传、粒子群、退火算法等)进行目标寻优;最后,结合智能寻优分析结果与火电企业运行管控流程构建成本管理系统,对与成本管控相关的生产经营过程进行动态化、系统化管理。以此为基础,创新管理模式,提高管理效率,实现对企业成本管理决策水平的改进与提高。

3.2.5 数字化转型

为顺应新一轮科技革命和产业变革的客观需要、加快实体经济新旧动能的接续转换,火电企业应积极融入到工业数字化转型的浪潮之中,相关的工作开展可从以下4个方面入手。

(1)推进发电侧工业互联网的应用。要加快构筑网络化的电力生产体系,将数字化、自动化、信息化、标准化融合到智能发电的全过程,以实现安全、高效、清洁、低碳、灵活的生产目标,例如,发电信息的监测与反馈、发电侧智能巡检、优化运行方案的模拟与仿真、发电侧成本管理决策、节能管控一体化等,都可经由工业互联网技术实现;另外,要借助工业互联网技术推动现代电力服务模式和电力安全保障模式的构建,打造双向迭代、互促共进、开放共享、安全可靠的供电平台生态体系。

(2)推进发电侧的数字化改造。要加快构筑全生命周期的发电企业数据链接,推动相关设备及生产线的自动化、数字化改造,使发电厂的设计、过程控制、运维保障、经营决策、经营管理等过程实现数字信息化交换。在此基础上,推动有关应用基础信息、新技术仿真模拟、政策解读、电网侧信息收集与分析等数字化系统平台的建设。

(3)拓展融合发电侧的创新应用。要加快培育火电企业数字化的新业态、新模式,尤其是在智能发电的基础上,建立用户侧的网络化协同、个性化定制、服务化延伸等新模式,提高能源和资源的利

用率,建立现代能源电力系统,实现安全、高效、绿色、低碳发电。

(4)实现软硬件技术突破。火电企业的数字化转型,离不开核心工业软件的开发。要大力发展“软件定义”平台,培育软件定义生态,尤其是要加强核心软件的自主化开发力度。要积极研发适应数字电厂、智慧电厂建设的工业硬件设备,特别是与可再生能源利用、氢能开发及储能技术应用相关的工业装备。

总之,推进火电企业数字化转型工作是实体经济与数字经济融合发展的客观要求,也是信息技术赋能工作在发电侧的具体体现。

4 结束语

“双碳”战略目标的提出为能源电力行业带来深层次的影响,这种影响触及火电企业生产经营的痛点问题:企业定位、可再生能源消纳、节能、成本管控、企业数字化转型等。为加快绿色低碳转型的进程,通过对痛点问题深入剖析,提出对策与思考,为未来火电企业实现转型发展提供借鉴和思路。

参考文献:

- [1]胡鞍钢.中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J].北京工业大学学报(社会科学版),2021,21(3):1-15.
HU Angang. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches[J]. Journal of Beijing University of Technology(Social Sciences Edition), 2021, 21(3): 1-15.
- [2]李政,陈思源,董文娟,等.碳约束条件下电力行业低碳转型路径研究[J/OL].中国电机工程学报,2021.(2021-05-11)[2021-08-12].<https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.210671>.
LI Zheng, CHEN Siyuan, DONG Wenjuan, et al. Low carbon transition pathway of power sector under carbon emission constraints [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2021. (2021-05-11) [2021-08-12]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.210671>.
- [3]蒋长流,江成涛.基于低碳转型的环境管理职能变革研究[J].环境与可持续发展,2019(5):109-113.
JIANG Changliu, JIANG Chengtao. Study on change of environmental management function based on low carbon transition [J]. Environment and Sustainable Development, 2019(5):109-113.
- [4]刁心薇,曾珍香,孙丞.混合碳政策下制造商低碳转型的技术选择策略研究[J].控制与决策,2021,36(7):1763-1770.
DIAO Xinwei, ZENG Zhenxiang, SUN Cheng. Research on technology selection in low carbon transition of the

- manufacturer under mixed carbon policy [J]. Control and Decision, 2021, 36(7): 1763-1770.
- [5] 杨双萍. 中国高碳产业低碳转型动力研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [6] 张小丽, 刘俊伶, 王克, 等. 中国电力部门中长期低碳发展路径研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(4): 68-77.
ZHANG Xiaoli, LIU Junling, WANG Ke. et al. Study on medium and long-term low-carbon development pathway of China's power sector[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(4): 68-77.
- [7] 张运洲, 张宁, 代红才, 等. 中国电力系统低碳发展分析模型构建与转型路径比较[J]. 中国电力, 2021, 54(3): 1-11.
ZHANG Yunzhou, ZHANG Ning, DAI Hongcai, et al. Model construction and pathways of low-carbon transition of China's power system [J]. Electric Power, 2021, 54(3): 1-11.
- [8] 李政, 陈思源, 董文娟, 等. 现实可行且成本可负担的中国电力低碳转型路径[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(2): 1-7.
LI Zheng, CHEN Siyuan, DONG Wenjuan, et al. Feasible and affordable decarbonization pathways of China's power sector[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(2): 1-7.
- [9] 张文华, 闫庆友, 何钢, 等. 气候变化约束下中国电力系统低碳转型路径及策略 [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 18-26.
ZHANG Wen Hua, YAN Qing You, HE Gang, et al. The pathway and strategy of China's power system low-carbon transition under the constraints of climate change [J]. Climate Change Research, 2021, 17(1): 18-26.
- [10] 邓旭, 谢俊, 滕飞. 何谓“碳中和”? [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 107-113.
DENG Xu, XIE Jun, TENG Fei. What is carbon neutrality? [J]. Climate Change Research, 2021, 17(1): 107-113.
- [11] 清华大学中国碳市场研究中心, 北京中创碳投科技有限公司. 地方政府参与全国碳市场工作手册[R]. 2019.
- [12] 张九天, 张璐. 面向碳中和目标的碳捕集、利用与封存发展初步探讨[J]. 热力发电, 2021, 50(1): 1-6.
ZHANG Jiutian, ZHANG Lu. Preliminary discussion on development of carbon capture, utilization and storage for carbon neutralization [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(1): 1-6.
- [13] 肖云鹏, 王锡凡, 王秀丽, 等. 面向高比例可再生能源的电力市场研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 663-674.
XIAO Yunpeng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Review on electricity market towards high proportion of renewable energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 663-674.
- [14] 赵国涛, 丁泉, 付军华, 等. 基于多市场联动的区域能源系统低碳路径研究[J]. 电力建设, 2021, 42(3): 19-26.
ZHAO Guotao, DING Quan, FU Junhua, et al. Research on the low-carbon implementation path of regional energy system relying on the linkage mechanism of multi-markets [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(3): 19-26.
- [15] 王宣元, 马莉, 曲昊源. 美国得克萨斯州风电消纳的市场运行机制及启示[J]. 中国电力, 2017, 50(7): 10-27.
WANG Xuanyuan, MA Li, QU Haoyuan. Market mechanisms for wind generation in ERCOT market and the inspiration for China [J]. Electric Power, 2017, 50(7): 10-27.
- [16] 刘志清, 王春义, 王飞, 等. 储能 in 电力系统源网荷三侧应用及相关政策综述[J]. 山东电力技术, 2020, 47(7): 1-21.
LIU Zhiqing, WANG Chunyi, WANG Fei, et al. Source-grid-load application of energy storage in electric power system and related policy overview [J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(7): 1-21.
- [17] 杨晟, 孙跃, 龚钢军, 等. 基于能源区块链的综合能源服务研究[J]. 华电技术, 2020, 42(8): 11-16.
YANG Sheng, SUN Yue, GONG Gangjun, et al. Research on integrated energy services based on energy blockchain [J]. Huadian Technology, 2020, 42(8): 11-16.
- [18] 马宝忠, 杨蓬, 孙聪, 等. 基于虚拟现实技术的变电站交流电源仿真设计[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(2): 591-596.
MA Baozhong, YANG Peng, SUN Cong, et al. Simulation design of AC and DC power supply in substation based on virtual reality technology [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(2): 591-596.
- [19] 孙文文, 何国庆, 刘纯, 等. 物联网背景下应用于光伏发电的边缘计算设备关键技术研究及应用[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(7): 38-43.
SUN Wenwen, HE Guoqing, LIU Chun, et al. Research and application of key technologies for edge computing equipment used in photovoltaic power generation under background of IoT [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(7): 38-43.
- [20] 董世丹傑, 杨超, 姜燕, 等. 基于物联网的光伏并网配电网自愈控制方法研究[J]. 电气自动化, 2021, 43(1): 48-50.
DONG Shidanjie, YANG Chao, JIANG Yan, et al. Research on self-healing control method for photovoltaic grid-connected distribution networks based on the Internet of Thing [J]. Electrical Automation, 2021, 43(1): 48-50.
- [21] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-190.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key

- technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-190.
- [22] 苗彤宇. 电、煤矛盾对 B 电厂生产成本的影响及对策研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [23] 刘亚东, 陈思, 丛子涵, 等. 电力装备行业数字孪生关键技术与应用展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1539-1554.
- LIU Yadong, CHEN Si, CONG Zihan, et al. Key technology and application prospect of digital twin in power equipment industry [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1539-1554.
- [24] 龚仁喜, 顾佳宇. 负荷虚拟同步机惯性与阻尼自适应控制策略[J/OL]. 电测与仪表: 1-7(2021-01-21)[2021-08-08]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210120.1910.014.html>.
- GONG Renxi, GU Jiayu. Adaptive control strategy of inertia and damping for load virtual synchronous machine [J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-7(2021-01-21)[2021-08-08]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210120.1910.014.html>.
- [25] 武倩羽, 周莹坤, 李晨阳, 等. 新能源同步机并网系统惯性特性的理论和实验研究[J]. 大电机技术, 2019(6): 41-46.
- WU Qianyu, ZHOU Yingkun, LI Chenyang, et al. Theoretical and experimental study of inertial characteristics for the synchronous motor-generator pair [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2019(6): 41-46.
- [26] 于洋. 基于虚拟同步发电机的微电网控制策略研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [27] 李嘉媚, 艾芊. 考虑调峰辅助服务的虚拟电厂运营模式[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 1-13.
- LI Jiamei, AI Qian. Operation mode of virtual power plant considering peak regulation auxiliary service [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 1-13.
- [28] 赵晋泉, 杨余华, 孙中昊, 等. 考虑虚拟电厂参与的深度调峰市场机制与出清模型[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(5): 469-475.
- ZHAO Jinquan, YANG Yuhua, SUN Zhonghao, et al. Deep peak regulation market mechanism and clearing model considering participation of virtual power plants [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(5): 469-475.
- [29] 李旭东. 含高比例非常规机组的多元电源联合调峰策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [30] 肖春梅. 电储能提升火电机组调频性能研究[J]. 热力发电, 2021, 50(6): 98-105.
- XIAO Chunmei. Research on using electric energy storage to improve frequency regulation performance of thermal power units [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(6): 98-105.
- [31] 谢惠藩, 王超, 刘湃泓, 等. 南方电网储能联合火电调频技术应用[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 172-179.
- XIE Huifan, WANG Chao, LIU Paihong, et al. Application of joint frequency regulation technology of energy storage and thermal power in China southern power grid [J]. Automation of Electric Power System, 2021, 45(4): 172-179.
- [32] 王兴兴, 孙建桥, 陈明. 储能火电联合调频系统设计与研究[J]. 华电技术, 2020, 42(4): 72-76.
- WANG Xingxing, SUN Jianqiao, CHEN Ming. Design and research on energy storage and thermal power combined frequency modulation systems [J]. Huadian Technology, 2020, 42(4): 72-76.
- [33] 王金星, 张少强, 张瀚文, 等. 燃煤电厂调峰调频储能技术的研究进展[J]. 华电技术, 2020, 42(4): 64-71.
- WANG Jinxing, ZHANG Shaoqiang, ZHANG Hanwen, et al. Progress on the peak load regulation, frequency regulation and energy storage technologies for coal-fired power plants [J]. Huadian Technology, 2020, 42(4): 64-71.
- [34] 罗定. 高比例可再生能源与储能协调运行背景下的随机生产模拟[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [35] 贾伟青, 陈俊清, 赵耀, 等. 储能电池实现风光储微电网灵活安全运行的仿真研究[J]. 太阳能, 2020(12): 33-38.
- JIA Weiqing, CHEN Junqing, ZHAO Yao, et al. Simulation of using storage energy to realize flexible and safe operation of wind-PV-storage energy microgrid [J]. Solar Energy, 2020(12): 33-38.
- [36] 黄大为, 齐德卿, 于娜, 等. 利用制氢系统消纳风电弃风的制氢容量配置方法[J]. 太阳能学报, 2017, 38(6): 1517-1525.
- HUANG Dawei, QI Deqing, YU Na, et al. Capacity allocation method of hydrogen production system consuming abandoned wind power [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(6): 1517-1525.
- [37] 易伟, 徐建源, 吴冠男, 等. 利用风电制氢储能系统提高东北某区域电网弃风消纳能力[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(4): 190-197.
- YI Wei, XU Jianyuan, WU Guannan, et al. Improvement of wind abandoned consumption capacity in a region of northeast region China by wind power hydrogen storage energy system [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(4): 190-197.
- [38] 赵国涛, 钱国明, 丁泉, 等. 基于区块链的可再生能源消纳激励机制研究[J]. 华电技术, 2021, 43(4): 71-77.
- ZHAO Guotao, QIAN Guoming, DING Quan, et al. Study on incentive mechanism of renewable energy consumption

based on blockchain [J]. Huadian Technology, 2021, 43 (4):71-77.

[39]喻小宝,郑丹丹.区块链技术在能源电力领域的应用及展望[J].华电技术,2020,42(8):17-23.

YU Xiaobao, ZHENG Dandan. Application and exploration of blockchain technology in energy and electricity [J]. Huadian Technology, 2020, 42(8):17-23.

[40]王剑晓,夏清,李庚银,等.基于多市场均衡的综合能源市场机制设计[J].中国电机工程学报,2021,41(17):5789-5803.

WANG Jianxiao, XIA Qing, LI Gengyin, et al. Mechanism design for integrated energy markets based on multi-market equilibrium[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 5789-5803.

[41]周椿奇,向月,张新,等.V2G辅助服务调节潜力与经济 性分析:以上海地区为例[J].电力自动化设备,2021,41 (8):135-141.

ZHOU Chunqi, XIANG Yue, ZHANG Xin, et al. Potential regulation ability and economy analysis of auxiliary service

by V2G: Taking Shanghai area for an example [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41 (8) : 135-141.

(本文责编:陆华)

作者简介:

赵国涛(1972—),男,山东青州人,高级工程师,工 学博士,从事分布式能源及微电网产品与技术的研发 工作(E-mail: lenlen22@163.com)。

钱国明(1973—),男,江苏南通人,正高级工程师, 工学硕士,从事电力系统自动化相关技术的研发与管 理工作(E-mail: guoming-qian@sac-china.com)。

王盛(1982—),男,江苏盐城人,工程师,从事电力 系统自动化相关技术的研发与管理工作(E-mail: sheng- wang@sac-china.com)。

丁泉(1979—),男,江苏南京人,高级工程师,工学 硕士,从事电力系统自动化相关技术的研发与管理工作 (E-mail: ding_q@139.com)。

朱海东(1974—),男,安徽阜阳人,高级工程师,工 程硕士,从事综合能源及电力市场等相关的信息化开 发与管理工作(E-mail: haidong-zhu@sac-china.com)。

广 告 索 引

环保公益广告 (后插1)

郑州科润机电工程有限公司 (后插2)

华电水务科技股份有限公司(跨版) (后插3,4)

华电环保系统工程有限公司(跨版) (后插5,6)

中国华电科工集团有限公司新能源 技术开发公司 (后插7)

国家能源生物燃气高效制备及综合利用技术 研发(实验)中心 (后插8)

华电综合智慧能源科技有限公司 (后插9)

华电通用轻型燃机设备有限公司 (后插10)

郑州华电能源科技 有限公司(跨版) (后插11,12)

华电重工股份有限公司(跨版) (后插13,14)

中国华电科工集团有限公司总承包 分公司(跨版) (后插15,16)

华电技术 (后插17)

山东华电节能技术有限公司 (后插18)

华电科工安全环境质量科学研究所 (后插19)

华电郑州机械设计研究院有限公司 (封三)

中国华电科工集团有限公司 (封底)