

国外提升电力系统灵活性措施及对我国的经验启示

孙彦章, 郭贺宏, 侯哲晖, 邓学飞, 孙 健

国网山西省电力公司, 山西 太原

收稿日期: 2021年12月15日; 录用日期: 2022年1月7日; 发布日期: 2022年1月14日

摘 要

为推动能源结构低碳转型, 早日实现双碳目标重要承诺, 中国近年来大力推动新能源发展, 构建以新能源为主体的新型电力系统。可再生能源渗透率的提高给电力系统稳定运行带来了波动性和不确定性, 我国亟需提高电力系统灵活性以支撑大规模新能源接入, 促进新能源消纳。本文通过总结梳理国际可再生能源占比较高、电力系统灵活性发展经验较为丰富的国家相关经验, 总结其为我国电力系统灵活性带来的经验与启示, 以期为我国提升电力系统灵活性提供借鉴与支撑。

关键词

可再生能源, 新型电力系统, 电力系统灵活性, 经验启示

Foreign Measures to Enhance the Flexibility of Power System and Its Enlightenment to China's Experience

Yanzhang Sun, Hehong Guo, Zhehui Hou, Xuefei Deng, Jian Sun

State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan Shanxi

Received: Dec. 15th, 2021; accepted: Jan. 7th, 2022; published: Jan. 14th, 2022

Abstract

In order to promote the low-carbon transformation of energy structure and realize the important commitment of dual carbon goal at an early date, China has made great efforts in recent years to promote the development of new energy and build a new power system with new energy as the

main body. The increase of renewable energy penetration brings volatility and uncertainty to the stable operation of the power system. China urgently needs to improve the flexibility of the power system to support large-scale new energy access and promote the consumption of new energy. This paper summarizes the relevant experience of countries with a high proportion of renewable energy in the world and rich experience in the development of power system flexibility, and summarizes the experience and inspiration it brings to the flexibility of China's power system, in order to provide reference and support for China to improve the flexibility of power system.

Keywords

Renewable Energy Sources, New Power System, Power System Flexibility, Experience and Inspiration

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景

2020年9月,习近平总书记在联合国大会上提出了中国的碳达峰目标和碳中和愿景,做出了中国力争于2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和的重要承诺[1] [2] [3]。双碳目标的提出对我国电力系统有了更高的要求,构建清洁低碳安全高效的能源体系、实施可再生能源替代行动、深化电力体制改革、构建以新能源为主体的新型电力系统迫在眉睫[4]。近年来我国新能源实现了快速发展,风电、光伏装机容量均居世界首位,形成了可再生能源全面发展的能源供给体系[5]。风、光等可再生能源渗透率的提高为电力系统安全稳定运行带来了较大挑战,电力系统灵活调节能力对支撑高比例可再生能源并网、保障大电网运行安全可靠至关重要,直接关系着电力系统平衡安全全局、决定新能源消纳利用水平[6]。

1.2. 文献综述

国际能源署(International Energy Agency, IEA)指出,电力系统灵活性是指在电力系统的边界约束之下,系统对各类突发事件和各种变化快速反应,根据负荷需求灵活调整电力供应的能力[7]。鲁宗相认为,电力系统灵活性指在一定的时间和成本内,通过优化调度电力系统内的各种资源,以适应电源、电网及负荷不确定性的能力[8]。面对新能源持续高比例接入电网的发展趋势,为进一步促进新能源消纳,许多专家学者就提升电力系统灵活性展开了研究。文献[9]提出应将灵活调节服务(Flexible Ramping Product, FRP)引入电力市场,并通过调研梳理美国、英国和德国FRP的应用情况,提出了我国应完善包含FRP在内的电力市场规则和机制来提升电力系统灵活性的路径建议。文献[8]从电源、输电网和配电网三个角度出发,提出了含高比例可再生能源的电力系统提升灵活性的规划建议。文献[10]提出了我国提升电力系统灵活性的四点建议,分别是降低火电机组最小出力、提升电网互济能力、实施电力需求响应和部署大规模储能设施,并以典型地区为例,构建评价模型对上述四种措施在提升电力系统灵活性和促进新能源消纳两个方面的作用进行定性定量分析。文献[11]从灵活性电源、灵活性电网、灵活性负荷和数字电网平台四个角度出发,分别研究相关技术的应用现状和未来发展趋势,提出我国应开展技术优化与创新以提升新能源电力系统灵活性的路径建议。文献[12]提出了一种以市场电价为驱动力的独立运营商移动储能车调

度方案,旨在提升电网运行调度灵活性,进一步促进新能源消纳。文献[13]设计了包含灵活性资源价值量化方法、平衡市场结算机制、容量补偿机制和收益分配机制等在内的适应高比例可再生能源电力系统的市场机制理论框架,从市场机制设计的角度为我国提升电力系统灵活性提出建议。

上述文献从不同角度提出了关于提升我国电力系统灵活性的建议,目前国外许多典型地区拥有发展电力系统灵活性资源的丰富经验,然而,通过分析国外相关先进经验并结合我国实际情况,为我国提升电力系统灵活性提供借鉴启示的文献研究较少。因此,面对我国火电机组灵活性改造滞后、电力市场发展不健全、相关政策机制不完善等挑战[14],本文在梳理总结国外典型地区电力系统灵活性资源应用实践经验启示的基础之上,结合我国实际情况,为我国提升电力系统灵活性提供借鉴与参考[15][16]。

2. 电力系统灵活性发展驱动因素分析

电力行业作为碳密集度最高的行业,是中国所有工业部门中最大的二氧化碳排放来源,电力部门亟需采取一系列措施降低碳排放量,以支撑我国二氧化碳减排目标实现[17]。为了有效减少电力行业二氧化碳排放量,各地方正逐步推进新能源发展,持续增加新能源装机容量[18]。由于新能源具有调节能力不足、出力不确定等特性,大规模风、光等可再生能源发电和分布式电源的持续发展,在有效降低二氧化碳排放量的同时,使得系统峰谷差不断扩大,净负荷波动率持续提升,大幅增加了电力系统运行控制的难度[19][20]。本文将高比例可再生能源持续接入并且系统电气化程度不断提高的场景定义为新场景,将过去以火电机组为主、新能源装机占比较少少的场景定义为旧场景。与旧场景相比,新场景具有新能源种类丰富、可再生能源接入占比较高和系统不确定性较大等典型特征,电力系统在新旧场景下的灵活性变化趋势如下图1所示。其中,旧场景下的原始负荷曲线较为平稳,其灵活性调节能力可以完全支撑电力系统的灵活性需求,而在新场景下,电力系统主要发生了以下四点变化:1)与原始负荷曲线相比,新场景下净负荷曲线的峰谷差和波动性都大幅提升;2)随着可再生能源接入比例的提升,电力系统的灵活性需求大幅度增加;3)可再生能源替代了传统电源,常规灵活性资源的容量因此而大幅度降低;4)传统的电力供需平衡方式不再能实现对净负荷的全时段包络,部分时段电力系统开始出现灵活性资源供不应求的现象。

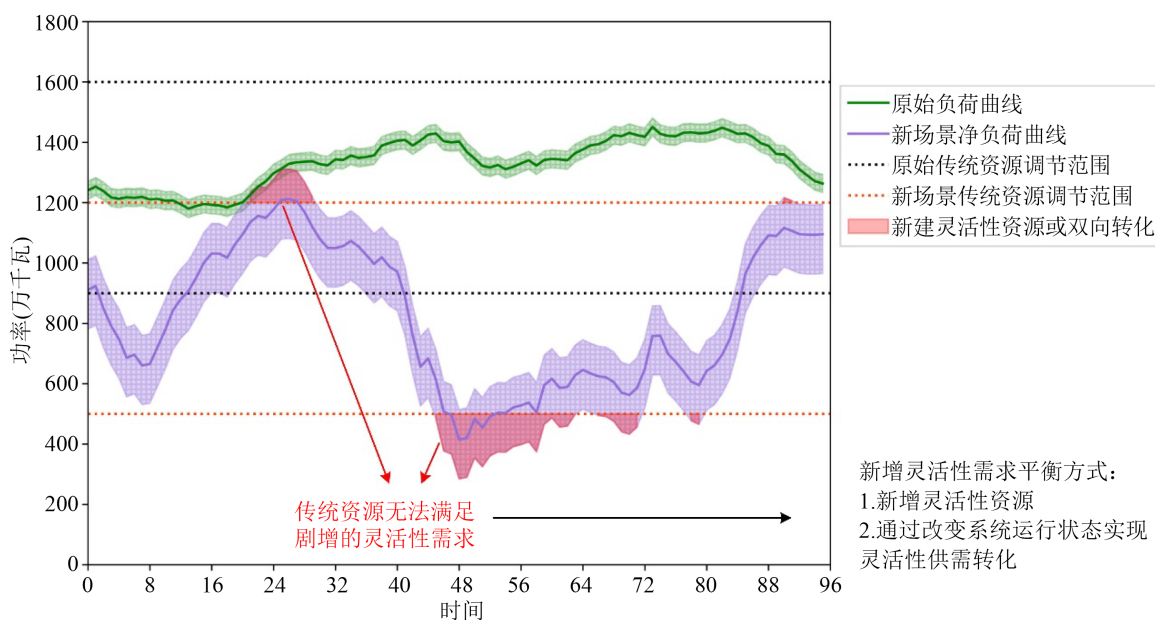


Figure 1. Schematic diagram of net load curve of power system under old and new scenarios

图 1. 新旧场景下电力系统净负荷曲线示意图

在可再生能源高比例接入的新场景下，我国亟需提升电力系统灵活性来促进新能源消纳。与可再生能源占比高、电力系统灵活性发展经验丰富的国家相比，目前我国存在电源侧灵活性资源潜力挖掘不足、电网侧灵活性资源建设进程滞后、需求侧灵活性资源实现方式单一和储能侧灵活性资源成本回收困难等问题。因此，本文通过梳理总结典型国家电力系统灵活性发展相关经验，为我国提升电力系统灵活性提供参考与借鉴。

3. 国际电力系统灵活性发展经验

3.1. 德国

2020年，德国可再生能源发电占全部发电量的比例超过50%，对电力系统灵活性提出了较高要求，主要通过挖掘电源侧灵活性资源潜力、参与跨区域电力输送和完善电力系统需求响应市场来促进电力系统灵活性资源发展。

挖掘电源侧灵活性资源潜力。对火电机组进行技术创新和灵活性升级，例如通过进一步降低最小出力来提升燃气机组灵活性，使其最小稳定出力达到与燃煤机组相同的水平。除此之外，德国还通过涡轮机旁通、生产热能和附加水基蓄热等热电解耦的方式来提升电力系统电源侧灵活性。在电力系统中，热电联产厂可以旁通所有发电涡轮机或者仅旁通高压涡轮机，维持锅炉压力，削减全部或大部分发电量，使蒸汽直接进入热交换器，提供区域供热，从而使涡轮机可以在任何时间重新连接，节省电厂大部分的产能爬坡时间；使用电热锅炉或者热泵生产热能，将电能转化为热能，促使运营商进入平衡市场，在满足供热需求的同时，充分利用增加的低电价时长；用于转变电力生产方式的附加水基蓄热，以一种简单、相对高效且低成本的方式，为电力系统电源侧提供短期灵活性。

参与跨区域电力输送。在区域协调输电规划方面，欧盟建立了欧洲电力输电系统运营商网络ENTSO-E，旨在协调各个管辖区的输电网络规划和运营，包括起草网络规则、协调和监测网络规则实施以及制定长期区域网络计划等。德国作为其成员国，同时属于欧洲输电协调联盟UCTE的五个同步区域之一，与区域内国家主要通过380~400千伏和220千伏的交流输电线路连接，与其他同步电网通过高压直流输电线路连接。除此之外，德国与9个邻国开展实时跨国电力交换，大幅度提升了电力系统灵活性和可再生能源消纳能力。

完善电力系统需求响应市场。德国将其电力需求响应市场分为用户侧、批发市场以及零售市场三部分。电力公司通过市场竞价的方式向输电网运营商提供用户侧的需求响应资源，解决其电力需求并以此获利。电力批发市场上的电力需求响应主要被应用在电力储备市场、可切断负载市场、电力现货市场以及配电网拥塞管理四方面。在电力储备市场上，电力需求响应资源可以以灵活可调负载的形式为输电网运营商提供调频服务，进而平衡因新能源发电带来的预测误差；在可切断负载市场上，企业可以凭借掌握的需求响应资源进行招标竞价，与输电网运营商签订可切断负载合同，当运营商面临系统运行安全问题时，可以激活合同保证其系统的安全稳定；在电力现货市场上，电力需求响应通常被用电大企业用来进行购电优化以及营收创造。在零售市场方面，德国将分布式电源和可控负荷进行整合，利用虚拟电厂保持电网平衡，其价格手段包括实时电价、分时电价以及尖峰电价三种，用户一方面可以通过储热加热器等储能装置和一些分布式电源满足自己的生活需求，另一方面还可以作为“虚拟电厂”参与电力需求响应获利。

3.2. 美国

美国是仅次于中国的世界第二大化石能源消费国，在美国清洁能源转型中，可再生能源超预期的飞速发展正在影响着其电力系统的稳定性和可靠性，同时也为电力系统灵活性带来了复杂的挑战，美国重

点从以下两个方面来提高电力系统灵活性。

对电力系统灵活性进行规划。为了确保电力系统具有足够的灵活性以支撑可再生能源发电的持续增长，美国很早就开始对电力系统进行规划。美国建立中央计划模式，由政府和相关企业共同评估电力系统灵活性的潜在需求，同时考虑短期运营成本和回收成本的长期可行性，避免在缺乏足够规划的情况下，电力系统没有足够的灵活性来保持有效运行。

全面推动需求响应进步。通过持续颁布相关法律法规，美国逐渐形成了一套相对完备的电力需求侧管理法律体系，以便全面推动需求侧响应的进步。美国的需求响应运作模式依据主导方的不同分为三种，分别为：电力公司主导、市场主导以及负荷集成商和电力公司共同主导。其中，在市场主导模式下，市场的买卖双方分别在电力批发零售市场进行需求侧响应的竞价与交易，涉及内容主要包括尖峰电价、高峰时段节电补贴、分时电价、系统峰值响应输电费以及实时电价等，主要通过平衡需求响应的供需状态来提升电力系统灵活性。

3.3. 英国

自 21 世纪初以来，英国的可再生能源发展取得了显著成效，随着风、光等可再生能源渗透率的提高，电力系统的灵活性逐渐成为了新的关注焦点，英国在提高电力系统灵活性上的侧重点主要在以下两个方面。

政府投资公用事业级灵活性资源。英国投资公用事业级的电池储能、先进的天然气发电厂和 V2G 等电力系统灵活性资源，预计到 2030 年，可以增加 7GW 的灵活性能源容量，并可以迅速增加可再生能源发电的份额，同时减少碳排放量并降低成本。除此之外，英国还通过立法积极促进储能行业的快速发展，储能系统和智能电动汽车充电通过将大量可再生能源转移到电力高需求时期或将需求转移到高可再生能源发电期为电力系统提供灵活性。

建立并完善电力市场。英国进一步完善批发能源市场并采用日内市场和快速经济调度来激励电力系统灵活性资源发展，用较短的调度间隔更好地将可变可再生能源发电量的变化与负荷相匹配来提高电力系统灵活性。与此同时，考虑到可再生能源的不确定性可能会增加对辅助服务的需求，英国通过丰富电力辅助服务交易品种等措施进一步完善了电力辅助服务市场。

大力开发应用灵活性提升技术。英国政府投入大量资金对用于风力涡轮机和太阳能光伏最大功率点追踪的有效控件进行开发应用；利用相关技术的进步增加水力发电和抽水蓄能电站的运行灵活性；对中小型火电、供热和制冷、储能等灵活集成系统进行开发测试，有效地提升了电力系统灵活性。

3.4. 丹麦

丹麦电力系统的灵活性不是由单一措施提供的，而是组合了多种技术和制度性工具，涉及对象包括灵活热电厂、联网线路和电力市场等。到目前为止，丹麦已经实现了风能和太阳能占比 50% 的并网整合，其提高电力系统灵活性的路径主要可以总结为以下三点。

多角度开展火电灵活性改造。21 世纪初，丹麦将小型热电联产厂纳入自由电力市场，使其从被动的电力和热力生产商转变成为市场参与者，由此开始了对热电联产厂的灵活性改造。目前，丹麦主要通过改进过载能力、提高爬坡速率和降低最小稳定出力等措施来提升热电联产厂的灵活性。除此之外，丹麦还要求电厂在正常满负荷运行状态之上，额外提供 5%~15% 电力输出的能力，并允许电厂运营商在有利可图时进一步提高发电产量；通过提高翻修电厂所需的投资成本，采用高质量的组件对工艺流程进行控制，实现维持组件高温以缩短发电厂与电网连接时间的目的；通过降低最小稳定出力使电厂保持在线而不是被关停的状态，使其启动成本和时间大幅下降。

积极发展跨区域联网线路。1915年,丹麦和拥有大量价格低廉且可调度水电的瑞典实现了电网互联,并且将之后新建的多个联网线路拓展到挪威和德国。在此基础之上,丹麦向市场提供联网线路的全部容量以确保联网线路的最优应用,使联网线路可以基于价格信号而非合同行事,从而促进电力从低价格向高价格区域流动,并通过不断改善交易机制来发展北欧共同的平衡电力市场,充分利用联网线路作为电力系统的灵活性来源。

开放本区域电力市场。丹麦通过拆分之前垂直整合的能源公用事业来开放电力市场,并进一步要求其电力市场设计能够通过价格信号反映电力系统对灵活性的需求,从而为市场参与者提供采取相应行动的经济激励。因此,其电厂运营商往往会在价格信号的刺激下在电力市场上积极行动,促使日内市场在以具有成本效益的方式解锁灵活性方面发挥着关键作用,在一定程度上提高了电力市场自身运营的灵活性。

4. 国际电力系统灵活性发展经验对中国的启示

国外典型地区在提升电力系统灵活性的过程中,均制定了行之有效的措施,其电力系统灵活性资源发展经验为中国提高电力系统灵活性提供了以下借鉴与启示:

提高火电机组灵活性。从技术角度来看,借鉴德国和丹麦较为成熟的火电灵活性改造技术,如热电解耦、等离子或微油助燃以及机组本体优化调整等技术,促进相关技术标准提升的国际交流与合作,从鼓励技术创新、推进产学研融合、保护技术创新成果、大力推广应用新兴技术等方面提升火电机组灵活性改造相关技术发展水平。从政策角度来看,应快速出台火电灵活性改造相关激励或强制政策,按照“谁调峰、谁受益,谁改造、谁获利”的原则,充分考虑机组类别、技术路线、安全风险、改造投入、运营成本等因素的综合影响,建立健全火电灵活性改造激励机制,强制落后煤电机组退出市场,鼓励有条件的火电厂进行灵活性升级改造,进一步挖掘电源侧灵活性资源潜力。

建设跨省跨区域电网。德国和丹麦等国家积极建设跨国互联电网,通过与电力资源供需关系互补的邻近国家开展跨区电力交易,从而实现电能互济,达到提高电网侧灵活性和扩大新能源消纳比例的目的。我国应结合“十四五”能源发展规划,持续开展科学的电网运行预测分析和电网通道建设规划,通过加快特高压等清洁能源送出通道的电网建设、加强区域协作和输电线路互联以及在重点地区推进智能电网建设等措施不断优化电网结构,提升电力系统电网侧灵活性潜力,形成支撑新能源消纳的强大互联网架构。

实施电力系统需求响应。需求侧响应发展潜力大、响应成本低、调节速度快,是现阶段提升电力系统灵活性的一项关键措施。通过完善电力系统需求响应市场、构建完备的电力需求侧管理法律体系、利用价格信号和响应事件改变需求侧合同协议等措施,德国、美国和法国等国家进一步挖掘了需求侧响应潜力。中国应从建立需求响应市场运营机制、挖掘需求响应资源价值、完善需求响应激励机制、培育需求响应负荷集成商和加强需求响应技术体系架构建立等方面促进电力系统需求响应的发展和应用,有效提高波动性可再生能源等低边际成本资源的利用率,降低用电高峰期运行约束的严格性,充分释放电力系统灵活性资源潜力,进一步提升电力系统需求侧灵活性。

推动储能行业持续发展。大力发展储能资源有助于平衡电力系统净负荷,其中抽水蓄能和电池储能有助于缓解电力系统中波动性可再生能源弃电严重的问题。英国通过对储能行业实施政策补贴和投资来推动本国储能行业的快速发展,日本通过完善抽水蓄能电价机制来促进本国抽水蓄能电站的建设。随着我国清洁能源装机占比的不断提高,应考虑建设一定规模的储能资源,通过加快储能相关市场建设、引导更多的社会资本投向储能产业、对储能行业实施补贴、开展共享储能示范工程建设等措施促进储能行业健康有序长效发展,保证电力系统储能侧灵活调节能力。

加强灵活性资源相关的电力市场建设。国外多个国家和地区都采用了不同的方法和措施加强有关灵活性资源交易的电力市场建设。例如，德国通过调整出清价格调节机制完善电力现货市场；英国利用日内市场和快速经济调度的方式改变电力辅助服务市场的规则；丹麦在开放本区域电力市场的基础之上积极参与跨区域电力市场的灵活性资源交易。我国应协调政府计划与市场竞争的相互关系，进一步促进电力市场交易方式由计划向市场转变；持续提升跨省区电量交易比例，打破省间壁垒，促进省内交易和省间交易融合统一，扩大电力市场范围；不断增加电力系统灵活性资源交易品种，完善中长期与短期相结合的电力市场体系；鼓励发电企业、电网企业、售电企业、交易公司、电力用户、政府相关监管机构和市场管理委员会积极参与市场建设，形成多元化的电力市场主体格局。

5. 总结与展望

在我国大力发展清洁能源，坚持走可持续发展道路，构建清洁主导、电为中心、互联互通的现代能源体系和以新能源为主体的新型电力系统的背景之下，本文总结国外典型地区电力系统灵活性发展领先实践经验，凝练对我国提升电力系统灵活性的借鉴与启示具有必要性和重要性，有利于提高新能源消纳能力，为我国双碳目标的早日实现提供坚强有力支撑。

本文尚有不足之处，未来将围绕以下两点展开深入研究：

1) 从区域战略规划、激励与补贴机制、市场模式与价格机制等方面完善促进电力系统灵活性资源发展的政策建议。

2) 考虑各类电力系统灵活性资源投资与改造潜力、建设容量、调节能力、系统传输能力等约束，建立电力系统灵活性资源开发潜力评估模型，为提升电力系统灵活性制定发展路径与提出政策建议提供科学参考。

参考文献

- [1] 许鸿伟, 汪鹏, 任松彦, 等. 双碳目标下电力系统转型对产业部门影响评估——以粤港澳大湾区为例[J/OL]. 中国环境科学, 2021: 1-13.
https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=ZGHJ20211111007&uniplatform=NZKPT&v=r9213EVI3yfkRb8mUkM1genGf6oha_XzWyFpluc0_8buQ0UDMa9fgkV0H5F_oDY,2021-11-15.
- [2] Tang, B., Li, R., Yu, B., *et al.* (2018) How to Peak Carbon Emissions in China's Power Sector: A Regional Perspective. *Energy Policy*, **120**, 365-381. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.067>
- [3] den Elzen, M., Fekete, H., Höhne, N., *et al.* (2016) Greenhouse Gas Emissions from Current and Enhanced Policies of China until 2030: Can Emissions Peak before 2030. *Energy Policy*, **89**, 224-236.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.11.030>
- [4] 陈胜, 卫志农, 顾伟, 等. 碳中和目标下的能源系统转型与变革: 多能流协同技术[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 3-12.
- [5] 邹才能, 何东博, 贾成业, 等. 世界能源转型内涵、路径及其对碳中和的意义[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 233-247.
- [6] 李静轩. 电力系统运行灵活性分析及优化调度研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [7] IEA (2019) China Power System Transformation: Assessing the Benefit of Optimised Operations and Advanced Flexibility Options. Éditions OCDE, OECD Publishing, Paris.
- [8] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 147-158.
- [9] 王玲玲, 刘恋, 张镭, 等. 电力系统灵活调节服务与市场机制研究综述[J/OL]. 电网技术, 2021: 1-11.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=DWJS20211117006&uniplatform=NZKPT&v=chvihHo5Q36i4gzwMFKefGWF7rvWQSw9TE09GtS3B6Fci2eG-z0XG5L9eiETgcG6,2021-11-20>.
- [10] 郭喆宇. 考虑“源-网-荷-储”不确定性的可再生能源消纳研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2020.

-
- [11] 赵东元, 胡楠, 傅靖, 等. 提升新能源电力系统灵活性的中国实践及发展路径研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 1-8.
- [12] 莫宇鸿, 覃智君, 詹沁. 基于移动储能车的电网运行灵活性提升策略[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2021, 46(3): 651-665.
- [13] 武昭原. 高比例新能源电力系统灵活运行的市场机制设计研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [14] 鲁宗相, 李昊, 乔颖. 从灵活性平衡视角的高比例可再生能源电力系统形态演化分析[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(1): 12-18.
- [15] 李海泉, 曾鸣. 国外低碳电力系统发展现状及经验启示[J]. 华北电力技术, 2010(11): 46-51.
- [16] 闫晶, 张瀚舟. 碳达峰碳中和先行城市的经验、挑战和启示[J]. 上海节能, 2021(8): 778-782.
- [17] Peng, X. (2021) CO₂ Emissions from the Electricity Sector during China's Economic Transition: From the Production to the Consumption Perspective. *Sustainable Production and Consumption*, **27**, 1010-1020. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.024>
- [18] Fan, J.-L., Wang, J.-X., Hu, J.-W., *et al.* (2019) Optimization of China's Provincial Renewable Energy Installation Plan for the 13th Five-Year Plan Based on Renewable Portfolio Standards. *Applied Energy*, **254**, Article ID: 113757. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113757>
- [19] 刘运鑫, 姚良忠, 廖思阳, 等. 光伏渗透率对电力系统静态电压稳定性影响研究[J/OL]. 中国电机工程学报, 2021: 1-13. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20211105.1354.022.html>, 2021-11-05.
- [20] 张文华. 面向系统灵活性的高比例可再生能源电力规划研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2021.