

•重点行业碳中和发展路径•

DOI:10.15961/j.jsuese.202100656



# “双碳”目标下新能源为主体的新型电力系统： 贡献、关键技术与挑战

肖先勇<sup>1</sup>, 郑子萱<sup>1\*</sup>

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**构建以新能源为主体的新型电力系统是实现“碳达峰、碳中和”目标的重要手段。在高比例可再生能源和高比例电力电子设备的“双高”趋势下,电力系统将从“源随荷动”的确定性电量平衡向源-网-荷-储多元协同概率性电量平衡过渡,从以机械电磁设备为主的高转动惯量系统向电力电子器件为主的低转动惯量系统演化,势必对电力系统的发电、输电、配电、用电等多环节提出更高的要求。本文结合近年来中国电力低碳转型的成效及国家碳排放现状,阐述了未来新型电力系统对于“双碳”的贡献。在此基础上,从安全运行、可靠供电、经济高效及数智转型4个层面论述了构建新型电力系统的关键技术,并从稳定问题复杂化、防控措施待强化、灵活资源多样化、运行方式灵活化、供电需求品质化、市场机制多元化、能源利用高效化、能源生态数字化、运营管控智能化9个方面梳理总结了建设新型电力系统将要面对的主要挑战。新型电力系统重点将在发电侧利用清洁能源替代化石能源以降低发电碳排放,在用电侧推动电气化转型以减少传统终端用能过程碳排放两个方面助力“双碳”目标实现,迫切需要统筹考虑4个层面的问题:1)安全运行是根本前提,由于新型电力系统动态特性改变及演化机理不明,不仅需要解决各类新型电力系统稳定性问题,也要应对电压、频率的支撑不足,以及应对措施不完善的严峻挑战。2)可靠供电是核心目标,解决新能源发电波动性、间歇性所带来的电力电量平衡问题,需要让更多的灵活性资源参与到电力系统功率平衡调节中,同时,还需要统筹调度系统各环节的灵活性资源,保障电力系统可靠、高品质供电。3)经济高效是必然要求,目前尚缺乏合理的电力市场机制与碳市场机制作为提高系统经济效益的有效手段,中国在源、网、荷、储各方面的能效仍有较大提升空间。4)数智转型是关键支撑,电力业务亟需通过数字技术与智能控制技术改造生产及管理模式,“大云物移智链”等技术在能源电力领域的融合创新和实际应用同样面临诸多挑战。规划、设计、建设、运行以新能源为主体的新型电力系统需要结合新理论、新技术、新市场、新政策,研究系统安全运行中的稳定机理与防控措施,挖掘系统灵活性资源并维持系统可靠供电,设计合理的电力市场与碳市场机制,不断提高能源生产-传输-存储-转换-消费等环节的效率,朝着从高碳电力系统向深度低碳或零碳电力系统转型的目标持续迈进。

**关键词:**碳达峰;碳中和;新能源;电力系统

中图分类号:TM721

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2022)01-0047-13

## New Power Systems Dominated by Renewable Energy Towards the Goal of Emission Peak & Carbon Neutrality: Contribution, Key Techniques, and Challenges

XIAO Xianyong<sup>1</sup>, ZHENG Zixuan<sup>1\*</sup>

(College of Electrical Engineering, Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

**Abstract:** To achieve emission peak and carbon neutrality, it is a crucial mean for the power industry to build a new power system and accelerate

收稿日期:2021-07-07

基金项目:国家自然科学基金项目(U2166209)

作者简介:肖先勇(1968—),男,教授,博士生导师。研究方向:电能质量与优质供电。E-mail: xiaoxianyong@163.com

\*通信作者:郑子萱, E-mail: scuzzx@163.com

网络出版时间:2022-01-17 17:03:47

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20220117.1545.002.html

the energy revolution. “Double-high: High penetration of renewables and inverters” trends are leading to the transition of the power system from deterministic power balance named as source following load to probabilistic power balance named as synergy source–grid–load–storage; from high rotational inertia system dominated by mechanical electromagnetic systems to low inertia system dominated by power electronics. It is inevitable that higher requirements will be placed on multiple aspects of the power system, including generation, transmission, distribution and consumption. This paper expounds the contribution of new power system to emission peak and carbon neutrality in the perspective of the effectiveness of China’s low carbon power transition and the current state of national carbon emissions in recent years. On this basis, the key technologies for constructing new power system are discussed from four dimensions of safe operation, reliable power supply, economic efficiency and digital intellectualization. The main challenges to be faced in building new power system are summarized in nine aspects, such as complication of stability issues, safety precautions to be strengthened, flexible resource diversification, flexible operation mode, high-quality power supply, diversified market mechanism, efficient energy utilization, digitalization of energy ecology, intelligent operation and control. The new power system will focus on replacing fossil energy with renewable energy in power generation, and promoting electrification on the power consumption side to reduce carbon emissions. And there is an urgent need to consider the following four dimensions. 1) Safe operation is fundamental prerequisite. As the dynamic characteristics of the new power system change and the evolution mechanism is unidentified, it is not only necessary to deal with the challenges caused by various new stability problems, but also to deal with the severe challenges of insufficient voltage and frequency support and the imperfect response measures. 2) Reliable power supply is core objective. The problem of power balance caused by the volatility and intermittency of new energy generation requires more flexibility resources to participate in the power balance regulation of the power system, and also requires higher flexibility of the power system to coordinate the flexibility resources of all parts of the system to ensure reliable and high-quality power supply of the power system. 3) Economic efficiency is inevitable requirement. At present, there is still no reasonable electricity market mechanism and carbon market mechanism as an effective means to improve the economic efficiency of power system. There is still much potential to improve the energy efficiency of China in all aspects of source, network, load and storage. 4) Digital transformation is critical Support. The power industry needs to transform the production and management mode through digital technology and intelligent control technology. Besides, the integration innovation and practical application of technologies such as big data, cloud computing, internet of things, Artificial Intelligence, mobile internet, blockchain in the field of energy and power also face many challenges. Planning, designing, constructing and operating the new power system dominated by renewable energy need new theories, new technologies, new markets and new policies to study the stability mechanism and safety precautions in safe operation, excavate the flexible resources and maintain the reliable power supply, design reasonable power market and carbon market mechanism, continuously improving the efficiency of energy production–transmission–storage–conversion–consumption, and finally achieve the goal of transitioning from a high-carbon power system to a deep low-carbon or zero-carbon power system.

**Key words:** emission peak; carbon neutrality; renewable energy; power system

全球经济和工业水平的迅猛发展,促使能源需求急剧增长。传统化石能源在生产、转化过程中会产生大量二氧化碳,其引发的气候问题已日益威胁全球生态安全。截至2021年4月22日,全球已经有120多个国家陆续宣布了碳中和目标。碳中和是指在规定时间内,二氧化碳的人为移除抵消人为排放,达到相对“零排放”。当前,中国已将减碳列入国家重要发展目标,力争于2030年前达到碳排放峰值,2060年前实现碳中和。

目前,中国电力系统碳排放还处于较高水平,占全社会碳排放的40%左右,其中煤电是碳排放的主要来源,故提升电网新能源发电比例是实现减碳目标的重要途径。国家电网公司、南方电网公司已发布助力“碳达峰、碳中和”的有关文件,推动构建以新能源为主体的新型电力系统。在发电侧,采用清洁能源代替化石能源,降低发电碳排放;在输配电侧,提高传输效率,减少损耗;在用电侧,实施用电电气化改造,减少传统终端用能过程中的碳排放。针对传统能源供应体系中电力、热能、天然气各自独立、社会基

础设施资源利用率低下、缺乏统筹规划等问题,有必要构建以电为中心、电网为平台的综合能源系统<sup>[1]</sup>,实现能源广泛互通互济。此外,“数字新基建”对于推动数字技术与传统电网产业深度融合发展具有重要意义,以此加速产业数字化和数字产业化,以电网数字化转型助推新型电力系统建设。

中国风电和光伏发电装机容量自2010年起开始大幅增长,但在电力系统中,风光发电量的占比仍然很低,2019年仅占到2.9%和5.4%。然而,在中国“双碳”目标下,到2060年预测中国风电和光伏发电装机容量占比之和需达到约80%,发电量占比之和达到约70%<sup>[2-4]</sup>。未来高比例新能源并网将给新型电力系统带来诸多挑战,包括安全稳定运行、电力电量平衡、新型市场机制建设,以及数字化与智能化提升等,具体表现如下:1)传统电力系统采用出力可控的火电机组发电,而新型电力系统采用出力具有随机性、波动性和间歇性的新能源机组发电<sup>[5]</sup>。2)传统电力系统采用同步发电机旋转惯量作为电网支撑,其安全稳定控制理论较为完善;而新型电力系统中的大量

新能源发电设备缺乏惯量支撑,且应对电力扰动鲁棒性差<sup>[6]</sup>,其稳定机理与控制方法有待研究<sup>[7]</sup>。3)传统电力系统由确定性一次能源保障供电可靠性与经济性,在规划设计、稳定分析、平衡调控、电力市场等方面均以确定性条件进行技术研究和工程应用;而新型电力系统主要由波动的可再生能源为负荷供电,在规划设计、平衡调控等方面均以不确定性条件进行技术研究和工程应用。4)传统电力系统的发电成本较低,而新型电力系统建设将大幅增加电网发、输、配、用各环节的建造和运行成本。5)传统电力系统数据量较小,对数据传输、处理能力等要求较低;而新型电力系统具有数据量大、多样化、相互关联等特点,对电网信息传输、数据处理等多方面提出了更高的要求。

实现传统电力系统向新型电力系统转变,安全运行是根本前提,可靠供电是核心目标,经济高效是必然要求,数智转型是关键支撑。与此同时,新型电力系统在安全、可靠、经济及数智化进程方面还存在诸多挑战,需要新理论、新技术、新市场、新政策共同支撑。本文首先阐述了新型电力系统对实现“双碳”目标的贡献;然后,从安全运行、可靠供电、经济高效和数智转型4个层面分析了新型电力系统面临的主要挑战,包括稳定问题复杂化、防控措施待强化、灵活资源多样化、运行方式灵活化、供电需求品质化、市场机制多元化、能源利用高效化、能源生态数字化,以及运营管控智能化;最后,从强化基础研究、攻克关键技术、推进工程应用的维度给出应对上述挑战建议采取的主要具体措施,以期吸引更多学者参与对新型电力系统的探讨与研究。

## 1 新型电力系统对“双碳”的贡献

中国电网公司已经在推动能源电力转型中取得了丰富的实践成果。截至2020年底,为建设坚强智能电网,保障新能源及时并网消纳,中国电网公司已投资约2.4万亿元,以加强输电网络及清洁能源电站建设。在电网侧,跨区域输电能力达2.3亿kW,其中输送清洁能源电量占总输电量比例达43%。在能源消费侧,采用加快建设电动汽车充电网络,民航机场、沿海和内陆码头不断推广以电代油,工业领域推广电窑炉、电锅炉等举措,累计实现替代电量8 677亿kW·h,电能消费占终端能源消费比例约27%。此外,为促进能源高效利用,研发并全面掌握特高压核心技术和全套设备制造能力,建成国家风光储输、张北柔直等示范工程;建设“新能源云平台”,在新能源电厂并网与运行控制领域也获得一系列成果。随着发电侧清洁能源替代程度的深化,系统稳定机制复杂、调节资源稀缺等问题愈加凸显。如何最大化消纳新能源,实现更高要求下新型电力系统的安全、可靠、经济运行,仍面临诸多挑战。未来新型电力系统的构建还需继续围绕能源供给清洁化、能源消费电气化不断推进。

当前,中国为减少能源利用中的碳排放,仍在不断推动能源生产与消费结构朝着清洁、高效、低碳的方向良性发展<sup>[8]</sup>,并以电为中心、电网为平台带动能源系统转型。**图1**指出构建新型电力系统对实现2060年净零碳目标的贡献,同时总结了构建新型电力系统的路径及挑战。薛钦源等<sup>[9]</sup>通过计算能源供给多样性的方法说明了中国能源供应的现状并指出了一次能源结构发展和结构优化所面对的问题及对应的建

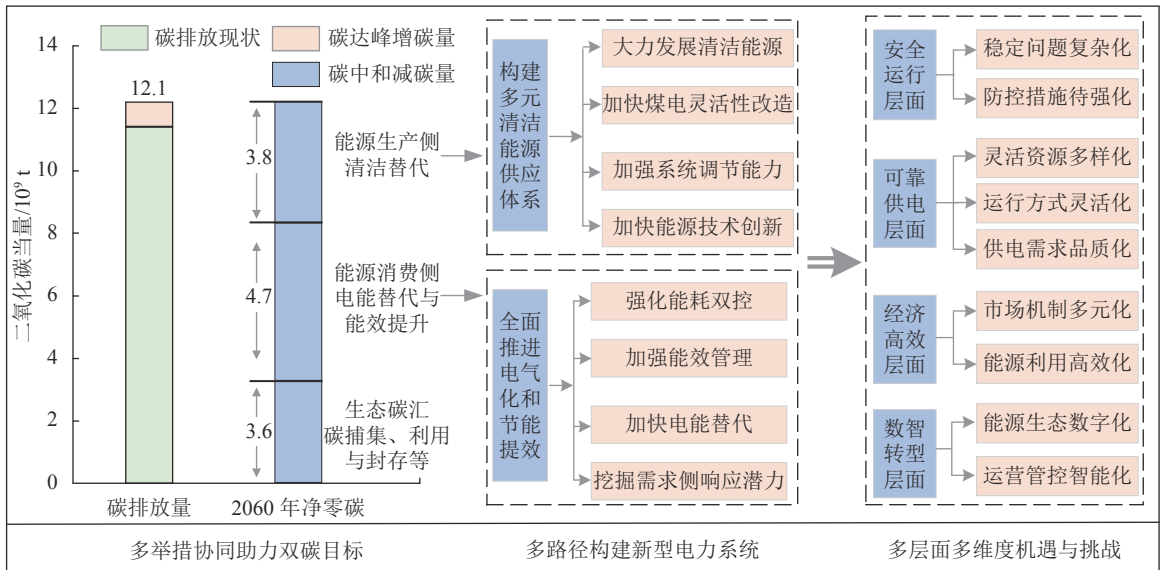


图1 新型电力系统的实现路径及挑战

Fig. 1 Pathways and challenges of new power systems

议。在加快节能减排,防治大气污染的新形势下,中国正不断努力在能源供给侧构建多元清洁能源供应体系。国家光伏装机量占全球的45%左右,并持续为光伏发电成本降低做出贡献,中国风电装机量以20%年均增速提升。在“十三五”期间,为保障新能源及时并网消纳,通过煤电灵活性改造和系统调节能力的提升,促使风电和太阳能发电量达5 872亿kW·h,减少燃煤消耗2.5亿t,减排二氧化碳当量4.5亿t。此外,能源技术创新同样意义重大,当前中国已实现核能、光热等新型发电方式的自主设计、建造和运营,其运行安全性与社会认可度都在不断提升<sup>[10]</sup>。

构建新型电力系统除推进新能源利用,实现电力生产减排外,在能源消费方面,随着转型发展配套政策出台实施、技术进步降本增效、电网改革与能耗双控深入推进、输配电技术不断突破,中国能源消费结构中电能消费的地位愈加突出。为了降低对传统能源的依赖,减少温室气体排放,工业、交通、建筑领域的电气化转型及能效管理也在不断推进。在生产过程中,传统的更换设备、优化燃料等措施已经无法满足工业部门更高的减碳需求。为了从根本上大幅降低工业传统方式下发电、产热时的碳排放,需要大力推动热电联产、碳捕获与储能技术的大规模应用。在交通方面,运载工具的电气化转型是最为有效、贡献最大的减排措施。同理,在建筑领域提升技术水平如热泵的应用等举措,加强了建筑节能改造,对减排同样有重大意义<sup>[10]</sup>。为如期实现碳中和,中国将继续推进新型电力系统的构建,抓住能源发展新形势下的机遇,积极应对各层面下的挑战,通过多种路径加快实现能源供给侧清洁替代、能源消费侧电能替代。

## 2 安全运行层面的挑战

### 2.1 稳定问题复杂化

新型电力系统高比例可再生能源、高比例电力电子设备的“双高”趋势下,电力系统动态特性改变及演化机理不明,稳定问题变得更为复杂。一方面,新能源设备接入电网引发的运行方式改变将从一定程度上影响经典稳定性问题;另一方面,系统动态行为改变将引发新的稳定性问题。电力系统稳定性问题与挑战如图2所示。

#### 2.1.1 对经典稳定性问题的影响

由图2可知,经典电力系统稳定性问题包括了功角稳定、电压稳定与频率稳定。新能源机组的渗透率、机组类型、地理位置、接入电网强度、运行工况、控制策略与控制参数决定了其对经典稳定性问题的影响程度。

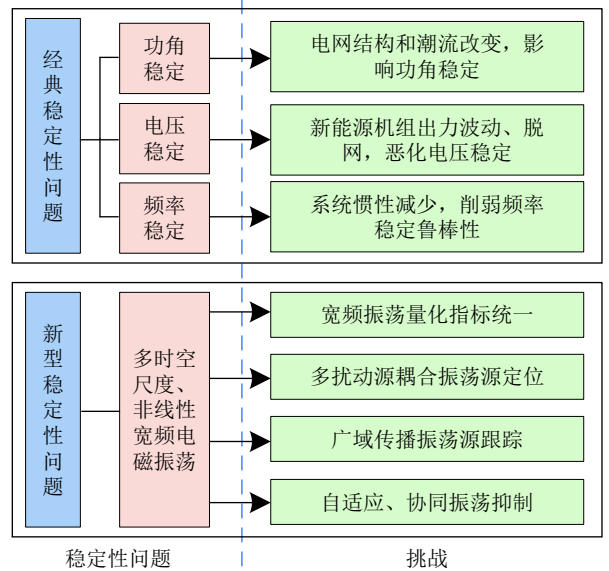


图 2 电力系统稳定性问题与挑战

Fig. 2 Challenges of power system stability

1) 功角稳定方面。在低频振荡中,具有代表性的稳定性问题是由发电机主导的功角稳定性问题,大规模新能源发电机组接入会改变电网结构和潮流分布,可能影响功角的暂态稳定性,引入新的低频振荡现象<sup>[11]</sup>。低频振荡的频率范围一般是0.2~2.0 Hz,在区域联网背景下,传统发电机组发电进行远距离输送依然存在,高比例新能源并网可能加剧功角稳定问题<sup>[12]</sup>,恶化区域电网之间的机电振荡模式,引发联络线低频功率振荡。此外,新能源的接入可能会改变原有的网架结构和动态过程,使得原本稳定运行的电力装备偏离其最优运行点,进而可能引发低频振荡现象。

2) 电压稳定方面。新能源机组的电压-无功响应能力将影响系统电压稳定性。高比例风电、光伏接入强度较弱的电网时电压稳定控制难度增大<sup>[13]</sup>,且容易引发新能源机组脱网,进而影响系统电压稳定性。

3) 频率稳定方面。高比例电力电子化导致的系统惯量下降、新能源出力功率波动都将降低系统频率的鲁棒性<sup>[14]</sup>。

在分析方法上,传统电力系统稳定性问题多单独针对功角稳定、电压稳定与频率稳定开展分析研究<sup>[15-17]</sup>。随着新能源大量接入、系统规模扩大、运行方式增多,多种不同稳定性问题相互耦合,如何进行准确的稳定性模式判别<sup>[18]</sup>,厘清不同稳定性问题相互演化规律也是未来经典稳定性问题研究的挑战之一。Jadidbonab等<sup>[19]</sup>采用随机规划方法处理风力发电与需求的不确定性,作为评估和提高含风力发电与热能需求的电力系统稳定性基础。陈磊等<sup>[20]</sup>通过简化的代数方程和仿真分析得出了随着风电机组替换

常规机组比例增大,系统稳定性具有从功角稳定向电压稳定转化的特性的结论。毛安家等<sup>[7]</sup>则进一步研究高比例新能源电力系统暂态稳定和电压稳定的演化机理,给出了基于常规机组最大替换功率的稳定性演化的量化指标。

### 2.1.2 新型稳定性问题的出现

在新型电力系统中,电力电子变流器将广泛应用于发、输、配、用电各个环节,由此引发的新型电磁振荡现象出现在:电力电子设备与串联补偿装置<sup>[21]</sup>、电力电子设备与交流系统<sup>[22-23]</sup>、电力电子设备与直流系统<sup>[24]</sup>,以及电力电子设备之间<sup>[25]</sup>。同时,电力系统互联为振荡能量在电网中广域传播提供了有利条件,可能加剧电磁振荡的严重程度<sup>[26]</sup>。从振荡频率的角度来讲,新型振荡现象的频带较宽,包括了低频、次同步、超同步及谐波,从Hz至kHz量级的振荡均有可能发生。其中:低频振荡多是由于新能源接入改变了系统的稳态运行点,较少见到有关于其直接引发低频振荡的工程案例;次同步振荡是新能源接入后较为普遍的振荡现象,在国内外均有较多报道,其主要机制是电力电子装置控制环节设定不合理,或难以适应系统环境导致的;谐波振荡则主要是由于电力电子装置的开关动态引发的,这也是电力电子装置接入后对区域电网最直接的影响。

Liu等<sup>[27-29]</sup>分别从负阻尼、等效阻抗、多模式谐振等角度研究振荡的产生机理,伍文华<sup>[30]</sup>、李辉<sup>[31]</sup>等分别采用阻抗模型、模态分析等进行特性分析,余希瑞等<sup>[32]</sup>通过在电源侧改进控制器参数、附加阻尼控制等方法进行振荡抑制。然而,新型电磁振荡问题具有宽频、多模态、扰动耦合、传播广泛、自适应、协同的特征,总体呈现出多时空尺度和非线性两大特性。未来电磁振荡问题研究面临的主要挑战包括:1)如何完善振荡的形成机制,提出统一量化的振荡分析指标体系;2)如何反映强非线性电力系统振荡的动态特性,建立振荡分析方法,实现振荡源定位及传播路径跟踪;3)如何针对新特性提出自适应、广域协同、高鲁棒性的有效振荡抑制方案<sup>[33-34]</sup>。

### 2.2 防控措施待强化

由于新能源发电系统的大规模接入,新型电力系统的电力电子化程度不断加深,系统缺少传统同步发电机组的机械转动惯量,呈现明显的低惯量、弱抗扰特性。一方面,等效惯量的降低恶化了系统抗扰能力<sup>[6]</sup>;另一方面,新能源设备对电压、频率变化敏感,耐受能力不足,容易引发脱网事件,进而导致连锁故障<sup>[35]</sup>;另外,新能源设备的短路电流不确定,可能导致保护的误动与拒动,进一步加剧扰动影响<sup>[36]</sup>。因此,在电力系统稳定机理不明的情况下,系统还面

临着对电压、频率的支撑不足,应对措施不完善的严峻挑战。

目前,提高系统惯量主要包括两方面手段。一方面,外加储能系统,可以为电力系统提供调峰、调频和电压支持等服务<sup>[37]</sup>。然而,高比例可再生能源要求系统保持较高的备用水平,以电池为代表的储能系统主要用于提供辅助备用,在高比例新能源渗透背景下储能利用率、投资回报、收益平衡问题仍面临挑战。

另一方面,在源、网、荷、储各个环节的电力电子变换器中采用虚拟惯性控制也可以提升电网惯量支撑<sup>[38]</sup>。然而,由此引发的系统惯量时空分布特性与多变性在“双高”系统中越发凸显。黄俊凯等<sup>[39]</sup>研究了面向系统小干扰稳定提升的虚拟惯量优化分配模型与方法,考虑到新型电力系统的多种稳定性存在相互耦合现象,未来有必要开展综合协同多目标惯量分配研究。辛焕海等<sup>[40]</sup>针对多样化新能源接入系统开展了基于广义短路比指标的电网强度度量方法研究。随着新型电力系统的发展,如何实现准确、实时惯量评估及惯量的合理分配是未来的挑战之一。

此外,继电保护是限制事故影响范围,保障系统安全稳定运行的重要防线。由于同步电源减少,以电力电子装置为接口的新型电力系统短路电流水平较低,零序、负序故障电势也相应改变。同时,低/高电压穿越控制下的新能源发电系统将在故障过程中向负荷提供一定的有功、无功支撑<sup>[41]</sup>。随机性、间歇性出力的新能源系统同样会影响电力系统的短路电流特性。探索交直流混联、大规模新能源并网情景下的新型继电保护特性及与数字化相融合的保护技术也是未来提高电力系统安全稳定运行的重要手段。

## 3 可靠供电层面的挑战

大规模新能源发电接入背景下,受地理环境和气象条件因素影响,新能源发电出力具有波动性、间歇性、能量密度低等特点<sup>[42]</sup>。同时,中国用电需求呈现冬、夏“双峰”特征,峰谷差不断扩大,北方地区冬季高峰负荷往往接近或超过夏季高峰,保障电力供应的难度逐年加大。从实际运行情况看,依靠常规电源满足电网高峰负荷需求仍然是实现电力电量平衡的主要方式。在极端天气下,很难保证充足的供电裕度支撑电力系统可靠运行。此外,由于传统电力系统灵活性不足,导致中国各地始终存在弃风、弃光问题,不利于“双碳”目标的实现。

### 3.1 灵活资源多样化

提升电力系统灵活性以应对具有波动性、间隙

性的新能源发电,是实现新能源充分消纳的关键<sup>[43]</sup>。提升电力系统灵活调节能力,首要方式是增加系统的可灵活调节的资源,从而解决电力电量平衡问题<sup>[44]</sup>。

现有研究及实际应用中,已有采用储能及负荷需求响应以提升系统灵活性的方法。例如,王洪坤等<sup>[45]</sup>提出可中断负荷和储能对提升配电网运行灵活性的积极作用。储能系统不仅能够平滑新能源功率波动满足负荷平衡,还具有跟踪新能源发电计划出力、辅助“削峰填谷”等用途<sup>[46-47]</sup>,对于提高新型电力系统灵活调节能力具有积极意义。在负荷需求侧响应实践方面,以各综合能源公司为主参与构建的综合能源系统,通过提供综合能源服务的方式,实现了多类型能源互补协同,并产生经济效益。然而,随着未来新能源接入比例不断升高,灵活性调节资源还需解决低成本、大容量、长时间、高可靠的能量储存问题,目前,单纯依靠储能参与系统电力电量平衡调节的经济性较差,难以实现大规模、多类型储能的协调调控。因此,还需要更多地发掘需求侧资源潜力,充分调动电动汽车、热力负荷等灵活性资源参与电力系统功率平衡调节。

### 3.2 运行方式灵活化

高比例新能源接入有利于持续推进绿色低碳转型、区域能源结构调整。同时,也使得电力系统的运行方式不断趋向多样化、分散化,中国电力系统形态也随之发生巨大变化。在电力系统运行调度上,结合中国新能源资源与需求呈现逆向分布的特点,面向系统运行的功率波动问题,中国发布了《关于提升电力系统调节能力的指导意见》<sup>[48]</sup>,指出从电源侧、电网侧、负荷侧多措并举,通过构建区域联网并配合交直流协调,调动各个运行环节的调节能力,在多时空尺度上实现多能互补,解决新能源消纳难题,也对当前的调度计划和运行方式提出了更高的要求。

目前调度计划的制定大多采用确定性模式处理不确定性问题<sup>[49-51]</sup>。因此,为保证电力实时优化调度与合理分配,需要转变传统的基于确定性方法分析决策处理不确定性问题的思路,采用概率性分析方法实现分析决策,如风电出力概率化预测、不确定性理论分析决策等方法。为实现可靠供电,还需要电网通过多样化运行方式应对更多复杂场景,面对愈加多样的运行状况,考虑源、荷、储各环节灵活性资源的统筹调度。在电源侧,可再生能源发电与储能、氢能的打捆并网将是未来降低发电不确定性的重要举措;在负荷侧,电力用户、分布式储能等资源通过电力调度、有序用电以及需求侧响应等策略参与电力电量平衡调控也是实现可靠供电的重要环节。

为应对上述问题,结合大数据技术的开发与应用,新型电力系统中可以基于大数据思维发现运行规律,通过在线双向综合监测技术,分析电力系统多元协同运行状态,深入挖掘灵活性资源,选择不同运行控制方式,实现电网各环节灵活互动响应<sup>[52]</sup>。

### 3.3 供电需求品质化

电力系统高比例可再生能源与高比例电力电子装备的“双高”特征正显著改变电力系统动态行为,也深刻影响着以电能质量为代表的电力扰动特征与水平。与此同时,新型电力系统发展也对用电技术的革新产生重要影响,用电形式与用电产业也在向精密化、柔性化、智能化、集成化等方向发展,基于微处理器的数字型和电力电子型负荷所占比重逐渐增加,对电力扰动事件更加敏感,这都对系统的电能质量水平提出了更高的要求,传统电能质量的监测、分析、评价与控制方法已不能够完全适应新型电力系统的特性与需求,系统地解决电能质量问题已成为电力系统“高质量”发展的重要内容与挑战之一。

值得一提的是,学者和工程技术人员正逐渐认识到电力扰动本身承载着大量涉及系统与设备运行状态的有用信息,值得系统深入地研究如何将电力扰动监测数据应用于新型电力系统各相关领域<sup>[53]</sup>。2021年,南方电网公司在广州发布《数字电网推动构建以新能源为主体的新型电力系统白皮书》,提出将持续依托数字电网建设“数字赋能”新型电力系统,这也为电力扰动问题的解决提供了新工具,拓展了新应用场景。胡文曦等<sup>[54]</sup>基于对电力扰动监测数据的应用,提出了以电力扰动的改善与防御为目标的“感知-预警-诊断-服务”的主动应用框架,并给出了基于电力扰动监测数据分析可能的应用场景。然而,受限于现有感知方法无法准确辨识敏感用户、传统电能质量评估决策方式滞后、监测装置功能的局限性以及优质供电服务机制尚不成熟等现实问题,如何实现新型电力系统电力扰动监测数据的主动应用还需要更深入的研究。

## 4 经济高效层面的挑战

### 4.1 市场机制多元化

建设新型电力系统将大幅增加电网各环节的建造和运行成本,同时,考虑到新能源发电成本较高,且短时间无法通过技术创新大幅降低成本,因此设计合理的电力市场与碳市场机制是当前提高系统经济效益的有效手段<sup>[55]</sup>。根据市场类型和交易机制的差异,本文总结了电能市场、辅助服务市场、碳市场在“双碳”背景下的主要挑战和完善市场机制的主要路径,具体构成如图3所示。

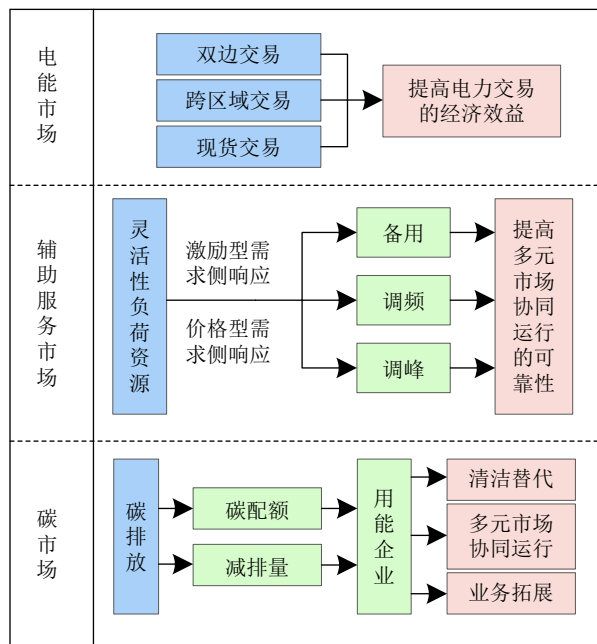


图3 电力系统经济高效的市场化解决方案

Fig. 3 Economic and efficient market solution for power system

#### 4.1.1 电能市场

实现碳中和对中国以新能源为主体的电能市场建设提出了更高的要求，重点在于完善电能市场双边交易规则，设计电能市场跨区域交易规则，构建电能市场现货交易机制3个方面。

当前中国各地双边交易规则处于试行阶段，考虑到高比例新能源并网的新场景，用户与新能源发电企业在充分参与市场竞争的同时应提高市场效率，优化电能市场中的双边交易规则，在双边交易阶段完成新能源初步消纳<sup>[56]</sup>。优化电能市场中的双边交易机制，可以从买卖双方的交易需求、交易意愿、心理感知和效用入手，对新能源发电企业和电力用户进行匹配，明确成交电量和电价。以新能源为主体的电能市场双边交易将不再局限于大用户和发电企业，储能系统、柔性负荷聚合商、综合能源系统等多类型主体将参与到双边交易中，通过匹配机制协调各主体利益分配，实现各类资源优化配置。

单一地区新能源发电的随机性和波动性较大，导致以新能源为主体的电能市场电价剧烈波动。考虑到不同地区的发电类型、用电特征和气候状况具有一定的时空互补性和功能互补性，因此，建立以新能源为主体的电能市场，还需要各地区电能市场协同运行，设计电能市场跨区域交易规则，包括完善的外送电能分配规则、组合规则和定价规则，在满足区域间联络线输电容量的基础上，根据各地区电能供需情况和多能互补原则将富余电能打捆外送，以提

高用电效益<sup>[57]</sup>。

以新能源为主体的电能市场在中长期交易中存在着复杂的不确定性，多需结合现货市场中的短期交易来消纳不平衡电量，提升新能源接入水平<sup>[58]</sup>。构建科学的现货交易机制是实现高比例新能源参与电能市场交易的重要保障，特别是建立日前-日内-实时多时间尺度下的交易类型、准入制度、竞价规则、结算规则，从而为新能源为主体的电能市场建设提供有力支撑。

#### 4.1.2 辅助服务市场

现阶段电力辅助服务大多由发电侧火电机组提供，以新能源为主体的辅助服务市场要求结合辅助服务类型和新能源出力特点，引导热力负荷、储能、电动汽车以及智能楼宇等需求侧灵活性资源参与辅助服务<sup>[59]</sup>，最大限度保证供电可靠和系统安全稳定。

辅助服务市场主要存在以下挑战：考虑到新能源发电的波动性和随机性，新型电力系统削峰填谷对辅助服务市场的备用容量提出了更高的要求。光伏、风电等新能源固有的逆调峰特性，使得在当前储能等基础配套措施发展滞后阶段仍需依靠火电、水电等机组为系统提供调峰容量；由于大规模新能源并网使电网调频能力有所降低，因此辅助服务市场应保障频率响应的基本需求；由于发电侧的灵活性降低，当系统出现极端事件时，可能会导致尖峰电价。

在以新能源为主体的辅助服务市场中，通过需求侧响应机制，调动具有响应潜力的电力用户参与辅助服务市场的积极性，解决新能源发电无法提供辅助服务的问题。一方面，直接用经济奖励和补偿激励电力用户提供各种电网需要的辅助服务；另一方面，在市场规则下适当调整辅助服务价格，让电力用户主动参与到辅助服务市场当中<sup>[60]</sup>。

#### 4.1.3 碳市场

以新能源为主体的碳市场通过对发电企业和电力用户温室气体排放配额和自愿减排量的交易，达到降低温室气体排放量的目的。丰富碳市场交易品种和交易方式（现货、碳期货、碳期权），设计合理的碳市场机制可以激励用能企业节能减排。随着碳价的上涨和可再生能源发电成本的降低，新能源发电的经济效益将会远高于化石能源发电<sup>[61]</sup>。

碳市场的发展对电力市场提出了以下挑战：化石能源发电在市场中逐渐失去竞争力，推动了发电侧的光热、光伏、风电等清洁能源替代；用能企业决策人员根据发电类型、发电成本、市场价格、碳排放量等因素综合分析，制定企业参加电能市场、辅助服务市场和碳市场交易的最终方案；对现有碳交易业

务进行适当调整,进一步拓展碳市场在碳资产管理、碳核查、综合能源服务等方面的新兴业务;电价、辅助服务价格、碳价等交易品种的相互影响<sup>[62]</sup>,建立碳市场、电能市场等多元市场规则协同优化,有助于实现以新能源为主体的新型电力系统。

#### 4.2 能源利用高效化

建设经济高效的新型电力系统对能源利用高效化提出新挑战。中国在源、网、荷、储各方面仍然具备较大的能效提升空间,实现“双碳”目标要求电网各主体通过技术层面、管理层面达到能源利用高效化目标,提升用能经济效益。

##### 4.2.1 技术层面

电能的生产、转换、传输、利用与存储等环节的技术创新是中国实现节能降碳、经济高效和可持续发展的关键,源、网、荷、储各环节仍有节能改造空间,主要表现为新能源发电效率有待提高、输变电损耗有待降低、部分储能技术在能量转化过程中损耗较大、部分用电设备效率较低、产业链相对较长等问题。通过高效设备研发、用能结构调整以及循环经济发展等方式,深度挖掘发电企业和电力用户在发用电过程中的节能潜力,在技术层面实现能源利用高效化。

在发电侧,需通过提高新能源集群预测精度、热电联产等方法提升清洁能源发电效率。在电网侧,采用高压直流输电等技术减少输电损耗。在储能侧,应当考虑储电、储热、储气、储氢等多类型储能设施有效结合、互补应用,以降低储能损耗<sup>[63]</sup>。在用电侧,要求解决大量电动汽车有序充电及充电桩高效利用的问题;同时,研发工业节能装置,推广居民节能电器,通过数智化实现工艺流程节能、低温余热回收等多种举措,以达到提高能效的目的。

##### 4.2.2 管理层面

中国目前对源、网、荷、储各环节管控相对独立,缺少全链路能源管理方案,导致了综合能源管控效率低、电力用户用能成本高等问题。为了助力实现“双碳”目标,在综合能源系统建设过程中,运用现代数字化、智能化管控技术,将新能源发电、输电、配电、用电等各个环节统一管理、协同控制,实现新型电力系统各环节的有效统筹、协调和优化,具体措施如下:1)以能效管理为中心,推动风、光、水、火等横向发电互补<sup>[64]</sup>,实现电、气、水、冷、热多能就近开发消纳、高效利用。2)以工业园区、大型公共建筑等为重点,积极拓展用能监测、用能诊断、能效提升、多能供应等综合能源服务。3)推动综合能源系统建设,挖掘用户侧资源参与需求侧响应的潜力,对高耗能设备进行节能改造,从管理层面实现能源高效化利用<sup>[65]</sup>。

## 5 数智转型层面的挑战

建设以新能源为主体的数字化、智能化电力系统需要在能源互联网的基础上,应用大数据、云计算、物联网、人工智能、移动互联网和区块链等先进数智转型技术<sup>[66]</sup>,优化电网中的能量流和信息流,增强电网经济性、灵活性、可靠性等基本指标。中国电力系统的数智化建设已具有一定的基础,例如,国家电网公司推进的“网上电网”应用,从技术、功能、形态等方面推动了传统电力系统的数智化转型,为加快建设以新能源为主体的新型电力系统提供了重要的技术支撑。本文从能源生态数字化和运营管控智能化两方面入手,介绍电力系统数智转型的主要挑战和基本举措,如图4所示。

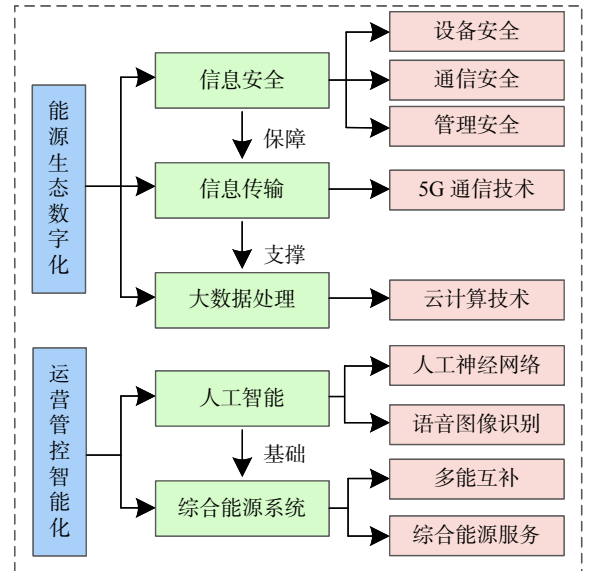


图4 电力数智化关键技术

Fig. 4 Key technologies of electric power digitization

### 5.1 能源生态数字化

能源生态数字化是中国实现碳达峰、碳中和的必然选择。随着云、大、物、移、智、链等技术在电力领域的广泛应用,电网的信息化特征不断凸显。在未来以新能源为主体的数字化电网中,确保各主体间迅速、安全、有效的信息交互至关重要。

#### 5.1.1 信息安全

大量智能仪表、传感器等终端接入电力系统,使得中国发、输、配、用各环节的数据类型复杂化。数字化电网建设过程中存在着诸多不安全因素,其中信息设备安全、信息通信安全和信息管理安全是当前信息安全问题的主要挑战。具体如下:1)电力系统存在信息设备的安全风险。当前中国部分电力设备依靠国外技术和芯片的现象仍然存在,并且部分电力设备信息安全防护措施不完善,通过区块链加密技术、数字签名认证、入侵检测技术等方法可以提升信



息设备安全<sup>[67]</sup>。2)电力系统存在信息通信的安全风险。未采取安全保密措施的信息传输,可能会导致信息泄露、丢失、篡改等现象,因此应以数据的完整性、保密性和可用性为目标保障信息通信安全。③电力系统存在信息管理的安全风险。电网内部人员在管理和运行信息网络时不规范操作使信息存在泄露的安全隐患,网络安全系统应具有检测信息安全违规行为的功能,并及时向违规人员发送警报。

### 5.1.2 信息传输与处理

电力大数据具有数据量大、多样化、相互关联等特点。大数据时代对电网信息传输、数据处理等多方面提出了更高的要求,只有加强电力系统信息化建设,才能更好地适应以新能源为主体的数字化电网需求。

数字化电网对通信及信息数据处理技术提出了更高的要求。电力系统发、输、配、用各环节的电力智能终端迅速增多,终端的数据监测、采集、传输过程逐渐完善,使数字化电网愈发需要一种具有实时、稳定、可靠、高效的信息通信技术,综合能源服务也愈发依赖通信技术。相比4G网络,5G网络具有传输速度更快、传输容量更大、通信时延更低等特点,有助于推动以新能源为主体的数字化电网发展<sup>[68]</sup>。与此同时,新型电力系统的计算规模日趋增大,对计算效率的要求更高,设备独立计算已无法适应数字化电网的运算需求。云计算技术通过聚合大量计算资源和存储资源的方式,可以大幅增强数据处理和信息交互能力,是实现数字电网信息化的重要抓手,为大规模、多维度数据的处理提供了有效的技术手段<sup>[69]</sup>。

### 5.2 运营管控智能化

近年来,中国对电网的运营管控智能化进行了大量探索。在新一代信息技术的基础上,结合先进的监测技术、控制方法和分析决策理论,大幅增强了电网的自愈能力,改善了电网的电能质量,优化了电力调度的运行效率,提高了电力用户的需求侧响应能力,最终形成安全、经济、高效、环保的智能电网。在智能电网的研究基础上,电力运营管控智能化还需要通过深度学习、机器学习等人工智能技术对数字化电网数据信息进行有效的管理和分析,使数字化电网最终向智能调控的智慧化方向快速发展。数字化电网迫切需要在数据挖掘、电力预测等技术领域深入研究,加快推进运营管控智能化,在综合能源管理中实现信息感知与智能控制,促进智能电网全面升级。面对日益多元化、个性化和互动化的电力用户和电网企业需求,也需要以数字化提高定制化服务和智能化服务水平,以提升电网服务能力,提高用户满意度。

人工智能技术在中国电力行业的应用仍有待拓展。中国电力智能化的基础应用较为零散,缺乏统一的智慧平台支撑,距离实现电力全面智能化还存在一定差距。考虑到电力系统中的电网安全与控制、新能源发电预测、电力潮流优化、新能源并网、电力数据分析等多项业务,应用人工神经网络、语音图像识别等关键技术的需求愈发旺盛<sup>[70]</sup>。

建设以新能源为主体的综合能源系统,深化和推进综合能源服务,为中国新型电力系统的数字化转型提供解决方案。实现风、光、水、火、储的资源优化配置是综合能源系统发展方向之一,使各类可再生能源数据可以在平台中实现共享、传输,再辅以数据分析处理技术,从而为多种可再生能源在时间、空间、功能等各维度信息的全面融合与优化互补打下坚实基础。对于传统能源结构下监测、预测、发电、控制、调度等各类型服务需要有针对性地整合、完善,并且有序开展电网各项业务<sup>[71]</sup>。

## 6 结论

构建以新能源为主体的新型电力系统是实现“双碳”目标、遏制气候变暖的必然要求。随着发电侧清洁能源替代程度的深化,新型电力系统将逐渐呈现稳定问题复杂化、防控措施待强化、灵活资源多样化、运行方式灵活化、供电需求品质化、市场机制多元化、能源利用高效化以及能源生态数字化与运营管控智能化等趋势。建设以新能源为主体的新型电力系统,在安全运行、可靠供电、经济高效和数智转型4个方面对电网提出了更高的要求和挑战。为应对上述挑战采取的主要措施包括:1)完善稳定机理分析与应对措施研究;2)挖掘系统灵活性资源,并采用概率性方法分析决策;3)设计合理的电力市场与碳市场机制;4)提高能源利用效率;5)融合信息传输、信息安全、信息处理等新技术的同时,提高电力智能化程度。采用上述措施应对新型电力系统挑战的同时,还需要充分结合新理论、新技术、新市场、新政策。本文综述了“双碳”目标下新型电力系统建设面临的关键技术挑战和可能的解决方案,以为能源电力领域的专家学者进一步研究探讨起到抛砖引玉的作用。

### 参考文献:

- [1] Jia Hongjie, Wang Dan, Xu Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(7): 198–207. [贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(7): 198–207.]
- [2] 全球能源互联网发展合作组织. 中国2060年前碳中和研

- 究报告[R].北京:全球能源互联网发展合作组织,2020.
- [3] 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):6245–6259.[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):6245–6259.]
- [4] Tang Baojun,Li Ru.Impact of reduced renewable energy costs on carbon peak and carbon neutrality of power industry[J].*Enterprise Economy*,2021,40(8):53–63.[唐葆君,李茹.可再生能源成本下降对电力行业碳达峰与碳中和的影响[J].*企业经济*,2021,40(8):53–63.]
- [5] Ding Ming,Lin Yujuan,Pan Hao.Probabilistic production simulation considering time sequence characteristics of load and new energy[J].*Proceedings of the CSEE*,2016,36(23):6305–6314.[丁明,林玉娟,潘浩.考虑负荷与新能源时序特性的随机生产模拟[J].*中国电机工程学报*,2016,36(23):6305–6314.]
- [6] Wang Bo,Yang Deyou,Cai Guowei.Review of research on power system inertia related issues in the context of high penetration of renewable power generation[J].*Power System Technology*,2020,44(8):2998–3007.[王博,杨德友,蔡国伟.高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J].*电网技术*,2020,44(8):2998–3007.]
- [7] Mao Anjia,Ma Jing,Kuai Shengyu,et al.Evolution mechanism of transient and voltage stability for power system with high renewable penetration level[J].*Proceedings of the CSEE*,2020,40(9):2745–2756.[毛安家,马静,蒯圣宇,等.高比例新能源替代常规电源后系统暂态稳定与电压稳定的演化机理[J].*中国电机工程学报*,2020,40(9):2745–2756.]
- [8] 全国煤化工信息总站.2002年—2018年中国能源生产、消费结构[J].*煤化工*,2020,48(3):85.
- [9] Xue Qinyuan,Nie Xinwei,Gong Kai.Primary energy structure evolution,problems and countermeasures in China—from the perspective of supply diversity[J].*Resource Development & Market*,2021,37(5):525–531.[薛钦源,聂新伟,巩凯.中国一次能源结构演变、问题及对策研究——基于供给多样性视角[J].*资源开发与市场*,2021,37(5):525–531.]
- [10] 陈白平,陆怡,刘恭毅,等.中国气候路径报告[R].[2021–07–01].北京:波士顿咨询公司,2020.<https://web-assets.bcg.com/89/47/6543977846e090f161c79d6b2f32/bcg-climate-plan-for-china.pdf>.
- [11] Du Wenjuan,Bi Jingtian,Wang Tong,et al.Impact of grid connection of large-scale wind farms on power system small-signal angular stability[J].*CSEE Journal of Power and Energy Systems*,2015,1(2):83–89.
- [12] Wang Qing,Xue Ancheng,Zheng Yuanjie,et al.Impact of DFIG-based wind power integration on the transient stability of power systems[J].*Power System Technology*,2016,40(3):875–881.[王清,薛安成,郑元杰,等.双馈型风电集中接入对暂态功角稳定的影响分析[J].*电网技术*,2016,40(3):875–881.]
- [13] Xie Xiaorong,He Jingbo,Mao Hangyin,et al.New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J].*Proceedings of the CSEE*,2021,41(2):461–475.[谢小荣,贺静波,毛航银,等.“双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J].*中国电机工程学报*,2021,41(2):461–475.]
- [14] Xin Huanhai,Liu Yun,Wang Zhen,et al.A new frequency regulation strategy for photovoltaic systems without energy storage[J].*IEEE Transactions on Sustainable Energy*,2013,4(4):985–993.
- [15] Li Bin,Liu Tianqi,Li Xingyuan.Impact of distributed generation on power system voltage stability[J].*Power System Technology*,2009,33(3):84–88.[李斌,刘天琪,李兴源.分布式电源接入对系统电压稳定性的影响[J].*电网技术*,2009,33(3):84–88.]
- [16] Xu Xiaoyuan,Yan Zheng,Shahidehpour M,et al.Power system voltage stability evaluation considering renewable energy with correlated variabilities[J].*IEEE Transactions on Power Systems*,2018,33(3):3236–3245.
- [17] Vahid-Pakdel M J,Seyedi H,Mohammadi-Ivatloo B.Enhancement of power system voltage stability in multi-carrier energy systems[J].*International Journal of Electrical Power & Energy Systems*,2018,99:344–354.
- [18] Wu Wei,Tang Yong,Sun Huadong,et al.The recognition of principal mode between rotor angle instability and transient voltage instability[J].*Proceedings of the CSEE*,2014,34(31):5610–5617.[吴为,汤涌,孙华东,等.电力系统暂态功角失稳与暂态电压失稳的主导性识别[J].*中国电机工程学报*,2014,34(31):5610–5617.]
- [19] Jadidbonab M,Vahid-Pakdel M J,Seyedi H,et al.Stochastic assessment and enhancement of voltage stability in multi carrier energy systems considering wind power[J].*International Journal of Electrical Power & Energy Systems*,2019,106:572–584.
- [20] Chen Lei,Liu Yongqi,Dai Yuanhang,et al.Study on the mechanism of transient voltage stability of new energy source with power electronic interface[J].*Power System Protection and Control*,2016,44(9):15–21.[陈磊,刘永奇,戴远航,等.电力电子接口新能源并网的暂态电压稳定机理研究[J].2016,44(9):15–21.]
- [21] Shair J,Xie Xiaorong,Wang Luping,et al.Overview of emerging subsynchronous oscillations in practical wind power systems[J].*Renewable and Sustainable Energy Reviews*,2019,99:159–168.
- [22] Zou Changyue,Rao Hong,Xu Shukai,et al.Analysis of resonance between a VSC–HVDC converter and the AC grid[J].*IEEE Transactions on Power Electronics*,2018,33(12):10157–10168.
- [23] Li Chun.Unstable operation of photovoltaic inverter from field experiences[J].*IEEE Transactions on Power Deli-*

- very,2018,33(2):1013–1015.
- [24] Yin Congqi,Xie Xiaorong,Liu Hui,et al.Analysis and control of the oscillation phenomenon in VSC–HVDC transmission system[J].*Power System Technology*,2018,42(4):1117–1123.[尹聪琦,谢小荣,刘辉,等.柔性直流输电系统振荡现象分析与控制方法综述[J].*电网技术*,2018,42(4):1117–1123.]
- [25] Chen Laijun,Li Lifeng,Zheng Tianwen,et al.Resonance suppression strategy for multi-parallel inverters based on adaptive filtering[J].*Power System Technology*,2020,44(1):200–207.[陈来军,黎立丰,郑天文,等.基于自适应滤波的并联逆变器谐振抑制策略[J].*电网技术*,2020,44(1):200–207.]
- [26] Ma Ningning,Xie Xiaorong,He Jingbo,et al.Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J].*Proceedings of the CSEE*,2020,40(15):4720–4732.[马宁宁,谢小荣,贺静波,等.高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J].*中国电机工程学报*,2020,40(15):4720–4732.]
- [27] Liu Huakun,Xie Xiaorong.Comparative studies on the impedance models of VSC-based renewable generators for SSI stability analysis[J].*IEEE Transactions on Energy Conversion*,2019,34(3):1442–1453.
- [28] Liu Huakun,Xie Xiaorong,Zhang C,et al.Quantitative SSR analysis of series-compensated DFIG-based wind farms using aggregated RLC circuit model[J].*IEEE Transactions on Power Systems*,2017,32(1):474–483.
- [29] Du Wenjuan,Fu Qiang,Wang Haifeng,et al.Concept of modal repulsion for examining the subsynchronous oscillations caused by wind farms in power systems[J].*IEEE Transactions on Power Systems*,2019,34(1):518–526.
- [30] Wu Wenhua.Research on wide-bandwidth oscillation mechanism and suppression methods of renewable energy power generation connected to the weak grid[D].Changsha:Hunan University,2019.[伍文华.新能源发电接入弱电网的宽频带振荡机理及抑制方法研究[D].长沙:湖南大学,2019.]
- [31] Li Hui,Chen Hongwen,Yang Chao,et al.Modal analysis of the low-frequency oscillation of power systems with DFIG-based wind farms[J].*Proceedings of the CSEE*,2013,33(28):17–24.[李辉,陈宏文,杨超,等.含双馈风电场的电力系统低频振荡模态分析[J].*中国电机工程学报*,2013,33(28):17–24.]
- [32] Yu Xirui,Zhou Lin,Guo Ke,et al.A survey on low frequency oscillation damping control in power system integrated with new energy power generation[J].*Proceedings of the CSEE*,2017,37(21):6278–6290.[余希瑞,周林,郭珂,等.含新能源发电接入的电力系统低频振荡阻尼控制研究综述[J].*中国电机工程学报*,2017,37(21):6278–6290.]
- [33] Xiao Xiangning,Luo Chao,Liao Kunyu.Review of the research on subsynchronous oscillation issues in electric power system with renewable energy sources[J].*Transactions of China Electrotechnical Society*,2017,32(6):85–97.[肖湘宁,罗超,廖坤玉.新能源电力系统次同步振荡问题研究综述[J].*电工技术学报*,2017,32(6):85–97.]
- [34] Jiang Qirong,Wang Yuzhi.Overview of the analysis and mitigation methods of electromagnetic oscillations in power systems with high proportion of power electronic equipment[J].*Proceedings of the CSEE*,2020,40(22):7185–7201.[姜齐荣,王玉芝.电力电子设备高占比电力系统电磁振荡分析与抑制综述[J].*中国电机工程学报*,2020,40(22):7185–7201.]
- [35] Bi Pingping,Xu Xiaoyan,Mei Wenming,et al.Study on cascaded tripping-off risk assessment method and delivery capacity of wind power base[J].*Power System Technology*,2019,43(3):903–910.[毕平平,许晓艳,梅文明,等.风电基地连锁脱网风险评估方法及送出能力研究[J].*电网技术*,2019,43(3):903–910.]
- [36] Ding Shaoqian,Lin Tao,Zhai Xue,et al.Research on state vulnerability assessment method of grid with large scale new energysources based on short-circuit capability[J].*Power System Protection and Control*,2016,44(13):40–47.[丁少倩,林涛,翟学,等.基于短路容量的含大规模新能源接入的电网状态脆弱性评估方法研究[J].2016,44(13):40–47.]
- [37] Li Feng,Hao Yuchen,Zhou Chang,et al.Dispatching operation and key technologies analysis of electrochemical energy storage on grid side[J].*Distribution & Utilization*,2020,37(6):82–90.[栗峰,郝雨辰,周昶,等.电网侧电化学储能调度运行及其关键技术[J].*供用电*,2020,37(6):82–90.]
- [38] Lü Zhipeng,Sheng Wanxing,Liu Haitao,et al.Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system[J].*Proceedings of the CSEE*,2017,37(2):349–360.[吕志鹏,盛万兴,刘海涛,等.虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J].*中国电机工程学报*,2017,37(2):349–360.]
- [39] Huang Junkai,Yang Zhifang,Liu Juelin,et al.Optimal allocation of virtual inertia for improving small-signal stability[J].*Proceedings of the CSEE*,2020,40(3):713–723.[黄俊凯,杨知方,刘珏麟,等.面向小干扰稳定提升的虚拟惯量优化分配模型与方法[J].*中国电机工程学报*,2020,40(3):713–723.]
- [40] Xin Huanhai,Gan Deqiang,Ju Ping.Generalized short circuit ratio of power systems with multiple power electronic devices:Analysis for various renewable power generations[J].*Proceedings of the CSEE*,2020,40(17):5516–5527.[辛焕海,甘德强,鞠平.多馈入电力系统广义短路比:多样化新能源场景[J].*中国电机工程学报*,2020,40(17):5516–5527.]
- [41] 国家电网公司.光伏电站接入电网技术规定:Q/GDW 617—2011[S].北京:中国电力出版社,2011.
- [42] 范偲偲.新能源高比例发展对电力系统的影响分析与应

- 对措施[J].*机电信息*,2021(5):61–62.
- [43] Shi Tao,Zhu Lingzhi,Yu Ruoying.Overview on power system flexibility evaluation[J].*Power System Protection and Control*,2016,44(5):146–154[施涛,朱凌志,于若英.电力系统灵活性评价研究综述[J].2016,44(5):146–154.]
- [44] Lu Zongxiang,Li Haibo,Qiao Ying.Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J].*Automation of Electric Power Systems*,2016,40(13):147–158.[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].2016,40(13):147–158.]
- [45] Wang Hongkun,Wang Shouxiang,Pan Zhixin,et al.Optimized dispatching method for flexibility improvement of distribution network with high-penetration distributed generation[J].*Automation of Electric Power Systems*,2018,42(15):86–93.[王洪坤,王守相,潘志新,等.含高渗透分布式电源配电网灵活性提升优化调度方法[J].*电力系统自动化*,2018,42(15):86–93.]
- [46] Li Bei,Guo Jianbo.A control strategy for battery energy storage system to level wind power output[J].*Power System Technology*,2012,36(8):38–43.[李蓓,郭剑波.平抑风电功率的电池储能系统控制策略[J].*电网技术*,2012,36(8):38–43.]
- [47] Ding Ming,Wu Jianfeng,Zhu Chengzhi,et al.A real-time smoothing control strategy with SOC adjustment function of storage systems[J].*Proceedings of the CSEE*,2013,33(1):22–29.[丁明,吴建锋,朱承治,等.具备荷电状态调节功能的储能系统实时平滑控制策略[J].*中国电机工程学报*,2013,33(1):22–29.]
- [48] 国家发展和改革委员会,国家能源局.关于提升电力系统调节能力的指导意见[EB/OL].[2021–07–01].[http://www.nea.gov.cn/2018-03/23/c\\_1370599\\_94.htm](http://www.nea.gov.cn/2018-03/23/c_1370599_94.htm).
- [49] Sun Weiqing,Tian Kunpeng,Tan Yiming,et al.Power grid dispatching plan and evaluation considering spatial and temporal characteristics of flexibility demands[J].*Electric Power Automation Equipment*,2018,38(7):168–174.[孙伟卿,田坤鹏,谈一鸣,等.考虑灵活性需求时空特性的电网调度计划与评价[J].*电力自动化设备*,2018,38(7):168–174.]
- [50] Xu Zhicheng,Zhang Fuqiang,Chen Shizhe,et al.Analysis of multi-region coordinated peak-shaving and peak-valley mutual operation mode under the energy Internet[J].*Electric Power*,2018,51(8):64–69.[徐志成,张富强,陈世喆,等多区域电力系统协调调峰及峰谷互济运行方式分析[J].*中国电力*,2018,51(8):64–69.]
- [51] Huang Xianchao,Feng Yu.Day-ahead and intra-day coordinated optimal scheduling of stand-alone microgrid considering unit flexibility[J].*Electric Power Automation Equipment*,2020,40(4):125–131.[黄弦超,封钰.考虑机组灵活性的独立微网日前日内协调优化调度[J].*电力自动化设备*,2020,40(4):125–131.]
- [52] Wu Xindong,Zhu Xingquan,Wu Gongqing,et al.Data mining with big data[J].*IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*,2014,26(1):97–107.
- [53] Xu W,Yong Jing.Power disturbance data analytics—New application of power quality monitoring data[J].*Proceedings of the CSEE*,2013,33(19):93–101.[徐文远,雍静.电力扰动数据分析学——电能质量监测数据的新应用[J].*中国电机工程学报*,2013,33(19):93–101.]
- [54] Hu Wenxi,Xiao Xianyong,Wang Ying,et al.Analysis and proactive application of power disturbance data in modern power grid[J].*Automation of Electric Power Systems*,2021,45(4):1–11.[胡文曦,肖先勇,汪颖,等.现代电网电力扰动数据分析与主动应用[J].*电力系统自动化*,2021,45(4):1–11.]
- [55] Song Yazhi,Liu Tiansen,Ye Bin,et al.Linking carbon market and electricity market for promoting the grid parity of photovoltaic electricity in China[J].*Energy*,2020,211:118924.
- [56] Xia Tian.Electric power market mechanism and policies optimization model to promote new energy consumption[D].Beijing:North China Electric Power University,2020.[夏天.促进新能源消纳的电力市场机制及政策优化模型研究[D].北京:华北电力大学,2020.]
- [57] Li Guodong,Li Gengyin,Zhou Ming,et al.Analysis on foreign typical market mechanisms for promoting new energy consumptive[J].*Electric Power*,2019,52(2):46–52.[李国栋,李庚银,周明,等.国外促进新能源消纳的典型市场机制分析[J].*中国电力*,2019,52(2):46–52.]
- [58] Chen Yihua,Zhang Wei,Zhang Chenggang,et al.Operational mechanism of inter- and intra-provincial electricity spot markets to promote renewable energy accommodation[J/OL].*Automation of Electric Power Systems*[2021–07–01].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20210528.1019.002.html>. [陈艺华,张炜,张成刚,等.促进新能源消纳的省间、省内两级电力现货市场运行机制[J/OL].*电力系统自动化*[2021–07–01].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20210528.1019.002.html>.]
- [59] Wang Huilong,Wang Shengwei,Tang Rui.Development of grid-responsive buildings:Opportunities,challenges,capabilities and applications of HVAC systems in non-residential buildings in providing ancillary services by fast demand responses to smart grids[J].*Applied Energy*,2019,250:697–712.
- [60] Ding Yi,Hui Hongxun,Lin Zhenzhi,et al.Design of business model and market framework oriented to active demand response of power demand side[J].*Automation of Electric Power Systems*,2017,41(14):2–9.[丁一,惠红勋,林振智,等.面向电力需求侧主动响应的商业模式及市场框架设计[J].*电力系统自动化*,2017,41(14):2–9.]
- [61] Feng Shengbo,Huang Jian,Zhou Fuqiu,et al.The impacts of the carbon market on the industry of renewable energy power generation[J].*Macroeconomic Management*,2019(11):55–62.[冯升波,黄建,周伏秋,等.碳市场对可再生能源

发电行业的影响[J].*宏观经济管理*,2019(11):55-62.]

- [62] Song Haiyun,Zhang Xiaoxuan,Zhang Gao.The development and problems of China's carbon market[J].*IOP Conference Series(Earth and Environmental Science)*,2020,440: 042100.
- [63] Wang Yating,Su Xinyi,Liu Shiyu,et al.Study on application prospect and support policies of energy storage in high-penetration renewable energy system[J].*Electric Power Survey & Design*,2020(1):15-19.[王雅婷,苏辛一,刘世宇,等.储能在高比例可再生能源系统中的应用前景及支持政策分析[J].*电力勘测设计*,2020(1):15-19.]
- [64] Zeng Ming,Yang Yongqi,Liu Dunnan,et al.“generation-grid-load-storage” coordinative optimal operation mode of energy Internet and key technologies[J].*Power System Technology*,2016,40(1):114-124.[曾鸣,杨雍琦,刘敦楠,等.能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J].*电网技术*,2016,40(1):114-124.]
- [65] Lu Jie,Liu Xiangxiang,Zhou Qi,et al.Multi-layer energy comprehensive and coordinated control technology for residential smart energy[J].*Renewable Energy Resources*, 2020,38(11):1534-1540.[卢婕,刘向向,周琪,等.支撑居民智慧能源的多能源协调综合控制技术[J].*可再生能源*,2020,38(11):1534-1540.]
- [66] Tang Yuezhong,Shao Zhiqi,Guo Chuangxin,et al.Conceptual study on digital power grid[J].*Electric Power*,2009,42(4):75-78.[唐跃中,邵志奇,郭创新,等.数字化电网概念研究[J].*中国电力*,2009,42(4):75-78.]
- [67] Cheng Jie,Shang Zhijie,Hu Wei,et al.Security risks and countermeasures of smart grid information system[J].*Electrotechnical Application*,2020,39(4):99-102.[程杰,尚智婕,胡威,等.智能电网信息系统安全隐患及应对策略[J].*电气应用*,2020,39(4):99-102.]
- [68] Liu Wenxia,Hao Yongkang,Zhang Xinyue,et al.Digital technology based key technologies in power grid asset management and its application[J].*Power System Technology*, 2018,42(9):2742-2751.[刘文霞,郝永康,张馨月,等.基于数字化技术的电网资产管理关键技术及应用[J].*电网技术*,2018,42(9):2742-2751.]
- [69] Peng Xiaosheng,Deng Diyuan,Cheng Shijie,et al.Key technologies of electric power big data and its application prospects in smart grid[J].*Proceedings of the CSEE*,2015,35(3):503-511.[彭小圣,邓迪元,程时杰,等.面向智能电网应用的电力大数据关键技术[J].*中国电机工程学报*,2015,

35(3):503-511.]

- [70] Yang Ting,Zhao Liyuan,Wang Chengshan.Review on application of artificial intelligence in power system and integrated energy system[J].*Automation of Electric Power Systems*,2019,43(1):2-14.[杨挺,赵黎媛,王成山.人工智能在电力系统及综合能源系统中的应用综述[J].*电力系统自动化*,2019,43(1):2-14.]
- [71] Chen Yiming,Li Zhi.Analysis on the development trend and features of smart energy sources[J].*Journal of Chinese Society of Power Engineering*,2020,40(10):852-858.[陈以明,李治.智慧能源发展方向及趋势分析[J].*动力工程学报*,2020,40(10):852-858.]



肖先勇,四川宜宾人,1990年、1998年、2010年分别获得四川大学电力系统及其自动化专业学士、硕士、博士学位。现为四川大学电气工程学院教授,博士生导师。任四川大学电气工程学院院长,智能电网四川省重点实验室主任,中国电机工程学会高级会员,中国电力教育协会电气工程与电力经济教学指导委员会常务委员,中国电力行业标准委员会委员,四川省电机工程学会理事、学术工作委员会委员兼秘书长,四川省电工技术学会理事。IEEE Transactions on Power Delivery、《电网技术》《工程科学与技术》《中国测试》等国内外期刊编委。长期从事电能质量与优质电力、智能电网与电网安全、超导电力及其应用等领域的研究和教学,是智能供电系统、优质电力、电力系统不确定理论与测度等的倡导者和响应者,并将不确定性理论、不确定测度论、最大熵和Exergy理论、畸变功率理论引入电能质量、优质供电、电网连锁故障与安全风险评估、智能电网高级计量体系等领域。近年来,承担或参与国家自然科学基金项目4项,省部级科研项目7项,企业委托项目100多项,出版教材或译著4部,在国内外学术期刊发表学术论文200多篇,在CIRED等国际学术会议发表论文40余篇,SCI、EI检索论文130多篇,获得国家发明专利近20项。电压暂降与优质供电等相关科研成果已推广应用到了中国70%以上的省市自治区,获省部级、国家电网、南方电网公司科技进步奖等科技奖励十余项。

(编辑 赵婧)

引用格式:Xiao Xianyong,Zheng Zixuan.New power systems dominated by renewable energy towards the goal of emission peak & carbon neutrality:Contribution,key techniques,and challenges[J].*Advanced Engineering Sciences*,2022,54(1):47-59.  
[肖先勇,郑子萱.“双碳”目标下新能源为主体的新型电力系统:贡献、关键技术与挑战[J].*工程科学与技术*,2022,54(1):47-59.]