

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.01.001

# 面向低碳经济运行的新型电力系统态势感知技术综述

Review on situational awareness technology in a low-carbon oriented new power system

葛磊蛟<sup>1</sup>, 崔庆雪<sup>1</sup>, 李明玮<sup>2</sup>, 刘自发<sup>3</sup>, 夏明超<sup>4</sup>

GE Leijiao<sup>1</sup>, CUI Qingxue<sup>1</sup>, LI Mingwei<sup>2</sup>, LIU Zifa<sup>3</sup>, XIA Mingchao<sup>4</sup>

(1.天津大学 电气自动化与信息工程学院,天津 300072;2.河北工业大学 电气工程学院,天津 300130;3.华北电力大学 电气工程学院,北京 102206;4.北京交通大学 电气工程学院,北京 100044)

(1.School of Electrical Automation and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2.School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 3.School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 4.School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**摘要:**构建以新能源为主体的新型电力系统,既是我国电力系统转型升级的重要方向,也是实现碳达峰、碳中和目标的关键途径。如何充分应用态势感知技术适应多样化、差异化的不同场景,成为保障新型电力系统可靠、安全、优质、低碳和经济运行的关键突破点。立足于新型电力系统的典型特征,首先,从电源侧、电网侧、负荷侧、储能侧4个方面对新型电力系统的关键特征和主要问题进行了分析;然后,从低碳经济运行的视角,深入浅出阐述了新型电力系统态势感知技术在态势觉察、态势理解和态势预测3个阶段中各自主要的关键技术;最后,从低碳经济运行的特点出发,阐述了面向新型电力系统的态势感知关键技术和未来发展趋势,以期为后续新型电力系统的建设、运行等提供一定的借鉴。

**关键词:**新型电力系统;态势感知;低碳经济;碳达峰;碳中和;源-网-荷-储

**中图分类号:**TK 01 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-0706(2023)01-0001-13

**Abstract:** Constructing a new energy oriented power system is not only an important direction for the power system transformation and upgrading in China, but also a key means to achieve the goals of carbon peaking and carbon neutrality. The way of adapting situational awareness technology to diverse and differentiated scenarios has become the breakthrough point of the reliable, safe, high-quality, low-carbon and economic operation of the new power system. Typical features and main problems of the new power system are analysis from four aspects, source, network, load and energy storage. Then, to achieve the low-carbon and economic operation of the new power grid, key points in three application phases of situational awareness technology in the power grid which are situational perception, situational understanding and situational forecast are expounded. In the end, application and prospects of the situational awareness technology in the low-carbon oriented new power system are elaborated by taking the characteristics of low-carbon and economic operation of the new power system into consideration, which provides reference for the construction and operation of subsequent new power systems.

**Keywords:** new power system; situation awareness; low-carbon economy; carbon peaking; carbon neutrality; source-grid-load-storage

## 0 引言

为应对不断加剧的化石能源消耗带来的温室效应、环境污染等一系列问题,世界各国正经历着关键的能源转型变革<sup>[1]</sup>。2021年3月15日,中央财

经委员会第九次会议中指出要构建以新能源为主体的新型电力系统。这一决策为我国能源电力发展和转型指明了行动纲领和方法路径。同年3月,国家电网有限公司发布了“双碳”目标行动方案,提出加快构建智能电网,着力打造清洁能源优化配置平台。在应对全球气候变化挑战的背景下,以低能耗、低污染、低排放为基础的“低碳经济”已成为国际热点,势必为能源电力行业的发展带来全新挑

**基金项目:**国家电网公司科技项目(5400-202128572A-0-5-SF) Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5400-202128572A-0-5-SF)

战:能源供应、能源消纳、能源信息化、能源结构调整、新兴能源技术应用等都需要紧扣低碳经济运行的主题做出新的调整和部署<sup>[2]</sup>。

新型电力系统的实质是基于现有电力系统全面转型升级。具体而言,在电力低碳经济转型发展路径下,以风光为代表的新能源将成为电力供应主体<sup>[3]</sup>。与此同时,新型电力系统规划、建设和运行等都需要基于对多态运行数据、运行环境、设备状态等电量或非电量信息的精准感知,才能实现全面统筹考虑。例如近期受煤电供应紧张、煤炭价格涨幅明显等因素的影响,多地出现了限产限电现象<sup>[4]</sup>,给居民生活、工业生产等都带来了困扰。因此,对系统全面、及时、精准的感知是保障系统安全的前提条件,是系统向低碳经济转型的技术基础,也是目前发展新型电力系统的技术瓶颈。在此背景下,新型电力系统出现灵活性建设不足、精准感知深度不足、海量接入管理无法处理、缺乏实时调度辅助决策等问题,态势感知被认为是解决上述问题的关键技术之一<sup>[5-6]</sup>,力图实现对新型电力系统源-网-荷-储各环节运行态势全景感知。

态势感知技术是在大规模系统环境中,对能够引起系统态势变化的要素进行获取、理解、显示并预测未来发展趋势等活动的一种技术<sup>[7]</sup>。近年来,云计算、大数据、物联网、区块链等数字化技术发展迅速,为电力系统运维智能化转型提供新方向和新方向。态势感知正是基于相关数字化技术,以数字化技术为传统电网赋能,提升电网的感知能力和运行质量<sup>[8]</sup>,成为支撑新型电力系统各应用场景的关键技术。

为实现“双碳”目标下新型电力系统的低碳经济转型,从源-网-荷-储各个方面对新型电力系统的关键问题进行分类,梳理国内外关于新型电力系统态势感知技术的研究,并应用态势感知技术适应新型电力系统多样化、差异化的不同场景:首先,从源-网-荷-储4个方面梳理新型电力系统的特征变化以及出现的新问题;然后,阐述态势感知技术的内涵,并展示新型电力系统态势感知技术应用的最新进展;最后,从低碳经济运行角度,分析以新能源为主体的新型电力系统面临的挑战,并提炼支撑其发展的态势感知关键技术。本文囊括态势感知适应新型电力系统发展的关键技术以及发展瓶颈,能为当下围绕低碳经济运行的新型电力系统的技术研究和发展提供一定参考。

## 1 新型电力系统的特征及主要问题

在碳达峰、碳中和目标下,以高渗透率的可再

生能源、高比例的电力电子设备、高速增长直流负荷“三高”为主要特征的新型电力系统正在逐步形成,由此导致的不确定性和复杂性直接或间接地影响着电力系统的规划、调控、运行和分析。下面,从源-网-荷-储4个方面深入分析新型电力系统的特征变化和当前的主要问题。

### 1.1 电源侧

新型电力系统以新能源为主体,汇集了石油、天然气等常规电源以及高比例风/光等可再生能源。根据《中国可再生能源展望》<sup>[9]</sup>,2050年,发电量占比39%的光伏以及占比33%的风能将在新能源中占据主导地位,非化石能源将占终端电能消费比例的70%,预计2050年各类发电形式的占比如图1所示。

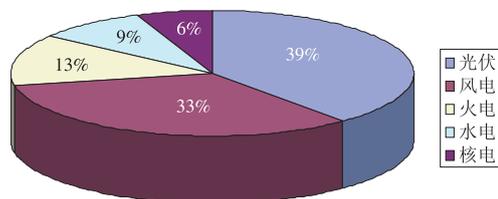


图1 预计2050年各类发电形式的占比情况

Fig. 1 Predicted energy mix in 2050

传统电力系统电源侧燃煤机组出力精准可控,负荷侧用电量基本能够预测,采用“源随荷动”的调控方式实现供需平衡;而新能源大规模并网、煤电逐步关停后,电源侧发电量将无法控制<sup>[10]</sup>,导致电网对新能源管控能力不足,新型电力系统电力电量平衡运行的方法发生显著变化。

目前,电源侧主要存在以下问题。

(1)煤电退出路径简单。基于满足电量需求、电力需求和满足灵活性的要求,火力发电机必须处于待机状态,以便在高峰期和天气恶劣时提供电力、平衡需求<sup>[11]</sup>。因此,从能源结构上看,石油、煤炭等化石能源仍占据并将在短期内持续占据我国能源供给侧的主导地位<sup>[12]</sup>,电力的发展也会受其二氧化碳排放的制约,2010—2020年我国年平均煤电利用小时数如图2所示。

“双碳”目标下,煤电定位逐步由主体电源向承担快速爬坡、调频及应急备用的辅助电源转变。在煤电机组退出路径设计中,不能简单削减煤电的占比,要在清洁高效开发利用的基础上,逐步降低煤电机组设备数量<sup>[13]</sup>。同时,虽然传统火电逐步向调峰电源发展,但由于煤电灵活性不足,无法实现瞬时出力,不能保证发电侧的稳定输出,因此火电与可再生能源发电的协调技术也是亟须解决的难题之一。

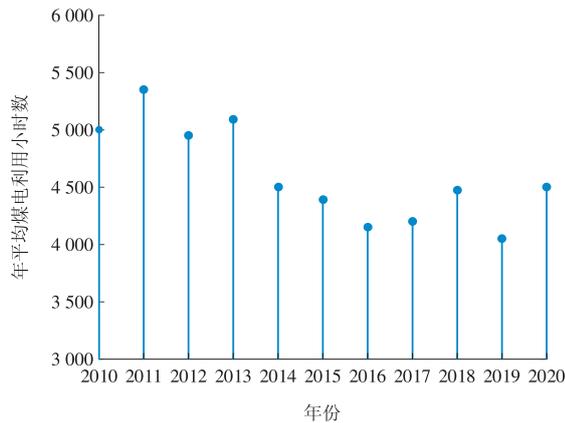


图 2 2010—2020 年平均煤电利用小时数

Fig. 2 Average coal power utilization hours from 2010—2020

(2) 新能源并网的成本与安全问题。成本问题: 新能源功率预测准确度与系统备用容量及成本呈负相关, 因此为提升新能源预测能力, 其并网成本(包括输配电成本、容量成本与平衡成本)有待降低。初步估算我国风电和光伏发电量占比上升到 20% 时, 发电成本约增加 0.03 元/(kW·h); 占比上升到 30% 时, 成本约增加 0.06 元/(kW·h)<sup>[14]</sup>。随着可再生能源发电并网比例的提高, 灵活性电源改造、系统调节运行、电网建设等方面系统性成本的增加不可忽略。

安全问题包括: 1) 缺乏新能源机组的并网标准。由于各机组电压穿越能力、故障支撑能力参差不齐, 易引发大规模脱网事故<sup>[15]</sup>。2) 风险预警技术不完善。新能源故障类型多、特性差异大, 目前缺少识别提炼故障特征的信息技术。

随着可再生能源的大量接入、化石能源的比例逐渐降低, 新型电力系统的动态响应越来越难以预见, 电源侧面临着能源类型多样、特性差异大的难题, 需要利用量测优化配置技术、能源接纳能力影响因素分析技术、分布式能源优化规划技术等态势

感知技术解决传统能源与新能源的协同运行问题。

## 1.2 电网侧

在新型电力系统中, 油气管网/供热网/冷热电联供等多种资源网络, 5G/4G 等无线专网、光纤专网等新型物联网技术, 形成了能量流和信息流等多种网络彼此交叉融合态势<sup>[16]</sup>。系统拥有强大的感知能力和快速应变能力, 支持高比例新能源和电力电子设备参与电力调控全过程<sup>[17]</sup>。因此, 新型电力系统中的电网具有其他能源输配网络无法比拟的优势: 互联互通范围更广、资源配置能力更强、管理效率更高、用户互动潜力更大。

目前, 电网侧主要存在以下问题。

(1) 电气设备传感技术有待提升。可靠的监测数据是运维管控系统处理信息交互结果的基础。电气设备失效是危及电网运行安全的重要原因, 感知状态参量可获得电气设备运行状态信息, 有助于制定合理的运检策略<sup>[18]</sup>。目前常规传感技术存在以下问题: 1) 无法针对传感设备自身老化或使用环境的变化进行自我调整, 不具备更新性; 2) 不具备信息处理与智能控制能力, 不利于信息交互。

(2) 电网市场机制滞后。鼓励可再生能源并网交易不仅需要国家补贴政策的支持, 还需要成熟的预测技术、完善的市场交易机制等条件<sup>[19]</sup>。可再生能源的不确定性与波动性导致其不具备常规可控能源参与市场的竞争力, 需要建立相适应的交易机制。

同时, 电力辅助服务市场建设滞后, 仍保持“计划+市场”的传统, 未能建立与电力市场相融合的长效机制, 导致参与电力系统调峰服务无法得到合理补偿。现有研究仍是沿用国外现有的市场框架, 缺乏对各市场主体行为的分析, 导致可再生能源消纳困难, 浪费严重。当前可再生能源发展的市场交易价格机制对比见表 1。

表 1 可再生能源价格机制对比

Table 1 Comparison of renewable energy price mechanisms

分类	价格机制	优点	缺点	代表国家
基于电量的激励政策	配额制	营造公平竞争的市场环境	市场竞争风险大、电价变动难以预测	美国
	固定电价制	保证可再生能源发电公司的收益	电价水平上升	德国
基于价格机制的激励政策	溢价电价制	发电结构更加合理	管理成本升高	西班牙
	差价合约	规避价格风险	市场主体风险较大	加拿大
招标	招标制	收益客观、有效降低可再生能源发电价格	前提投入大、评审流程时间较长	英国

(3) 主配网耦合增强。新能源高比例接入电网, 导致电网架构日益复杂且主配网呈现一定的不协调, 破坏电网整体的稳定运行以及电网内部电源的运行, 甚至会导致局部区域的瘫痪。在设备停电

检修计划、实时运行风险评估、故障处置等方面, 均需要综合输电网和配电网的信息, 以避免主配变化不匹配。考虑到目前输电网和配电网自动化系统一般采用各自独立建设的模式<sup>[20]</sup>, 目前亟须建立主

配网统一模型,打破主配网信息交互的壁垒。

由于新型电力系统场景多样、数据量大、运行态势复杂,随着同步相量测量单元(Phasor Measurement Unit, PMU)、智能电表等电气设备的快速部署,采集的电力数据缺乏反映系统故障或不良运行状态的信息,对电力市场交易信息、机制运行效果理解不到位,需要结合 PMU 优化配置技术、高级量测体系构建技术、数据缺失条件下的电网分析技术、用户参与系统调度技术等态势感知技术获取可靠的系统管理运行数据和用户用电数据以及完善用户参与电网调度的交易机制。

### 1.3 负荷侧

由于分布式发电、可调节负荷、电动汽车<sup>[21]</sup>等负荷侧灵活性调节资源的快速增长,电力市场主体将从单一化向多元化转变,新型电力系统实现从“源随荷动”到“源荷互动”的转变<sup>[22]</sup>。

负荷侧主要呈现 2 个特点:(1)多样性。包括分布式电源的广泛接入和用户侧负荷设备的多元化发展<sup>[23]</sup>。(2)聚合性。通过智能的优化方法将资源聚合成为电网运行需求的虚拟主体。

目前,负荷侧主要存在以下问题。

(1)负荷预测困难。一方面,在碳达峰之前,电动汽车、温控负荷、工业负荷等柔性负荷的接入使新型电力系统具备了自主调节能力,传统电力系统“源随荷动”的平衡模式开始向“源荷互动”的双向模式转变,导致负荷的不确定性问题更加突出<sup>[24]</sup>。另一方面,“双碳”目标下的能源消费“双控”政策,也将给高载能行业的用电及其增长带来较高的不确定性,给整个系统的电力电量平衡带来较大困难。因此,新型电力系统下的负荷预测呈现非线性和时序性,预测精度难以满足要求<sup>[25]</sup>。

(2)负荷调度困难。一方面,在交通运输领域,电动汽车飞速发展,既给配电系统带来庞大的增量负荷,也造成新型电力系统负荷具有明显的时空分布特性。另一方面,电能替代导致空调、取暖器、热水器等负荷增加,不同设备间的时域互补特征增加了新型电力系统负荷的灵活性。在新特征下,负荷的多重随机性使现代新型电力系统运行优化的目标与约束日益复杂,优化调度难度显著增大<sup>[26]</sup>。

新型电力系统数据类型复杂、数据规模大、不确定性因素多,导致系统用户特点显著、差异巨大,考虑到负荷侧多样性和聚合性的特点,需要利用反映负荷波动特性的不确定性建模技术、负荷分层分级预测技术、电动汽车和负荷接纳能力评估技术、自适应智能控制技术 etc 态势感知技术,促进高精度、高可靠性的态势感知技术在新型电力系统负荷

侧的应用和发展。

### 1.4 储能侧

新型电力系统中的储能技术具有双向功率特性和灵活调整能力,支撑能源和信息实时交互,实现能量平衡、削峰填谷、动态稳定、快速控制的目标<sup>[27]</sup>。储能设备作为电网重要的灵活性调节资源,满足电网需求响应,提升电网各环节的协同互动水平,解决弃风弃光问题<sup>[28]</sup>。当前,中国储能产业正处于政策驱动向市场驱动的过渡阶段,储能必须围绕电网的高弹性、服务的普惠性、技术的创新性、资源的共享性,加速技术和商业模式创新<sup>[29]</sup>。国内储能电站建设处于起步阶段,其运行控制、状态评价等都缺乏经验。

目前,储能侧主要存在以下问题。

(1)储能技术有待突破。目前,广泛应用的大规模储能技术是物理储能、电磁场储能和电化学储能,常用的储能技术如电池、压缩空气储能等,因成本较高而无法在电力系统中大规模应用和推广。未来中国储能技术将呈现更加多元化的趋势并形成多种技术并行的局面。不同储能技术路线发展比较如图 3 所示。

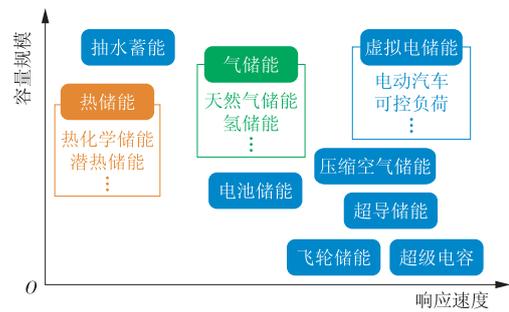


图 3 不同储能技术路线发展比较

Fig. 3 Comparison of the development routes of different energy storage technologies

(2)储能电站监测技术不再适用。储能电站的健康状态、老化特性和运行工况直接影响储能电站的性能<sup>[15]</sup>。目前,在复杂工况下,储能电站受材料、生产工艺、运行环境、管理方式等不确定因素的影响,储能电池内部呈非线性动态变化特性,加之电池状态评估算法尚不成熟,传统的静态数值建模分析和模拟仿真手段不再适用。储能监控系统(Energy Storage Monitoring System, ESMS)是联结储能调度和储能系统的桥梁,构建规模化、规范化的储能电站监控系统是当务之急。

(3)大规模电动汽车储能潜力挖掘困难。电动汽车同时具备储能和负荷的双重性质,大规模电动汽车通过聚集行为形成潜力巨大的储能资源参与电网调度控制,可以实现调压调频的功能。

然而,目前尚缺乏电动汽车全数据链动态行驶以及随机充放电行为分析与多时间尺度下计及用户行为特征的电动汽车虚拟储能调控方法。因此,亟须开展基于储能云的电动汽车集群优化与虚拟储能关键技术研究。

常规电源调节难以应对新能源日内功率波动,新能源消纳存在明显缺陷,高渗透率电动汽车的并网提升了电力系统灵活性,但也增加了系统运行的

不确定性,为全面系统地掌控评估新型电力系统储能侧运行效果,需要结合新型电力系统大数据与云平台技术、电动汽车接纳能力评估技术、储能价值分析技术、源-网-荷-储协同优化规划技术等态势感知技术实现新型电力系统电能调度的全局感知。

综上分析,电力系统将向强不确定性系统演变,向电力电子设备主导演变,向全局智能化、数据化演变,整体框架如图4所示。

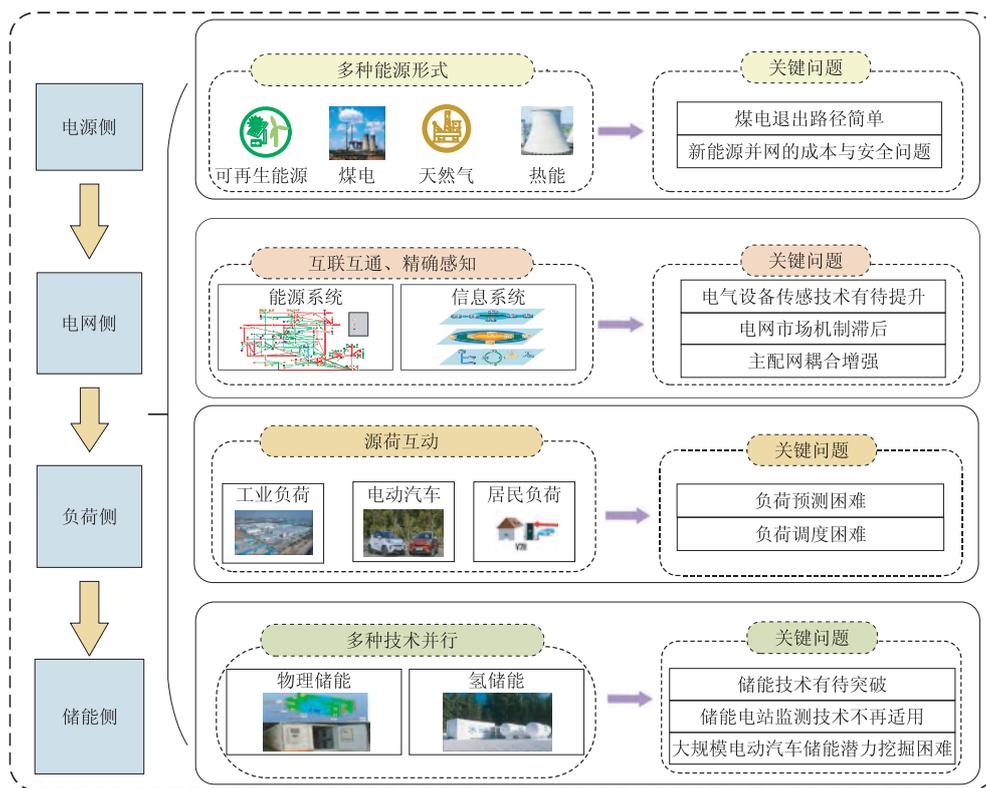


图4 新型电力系统的主要特征和关键难题

Fig. 4 Main features and key challenges of the new power system

新型电力系统的关键特征主要包括:1)清洁替代,电能替代;2)源-网-荷-储协调控制更加灵活;3)发输变配用电过程特性复杂,电力平衡愈加困难;4)持续可靠供电,安全稳定运行出现新挑战。

关键问题概括为以下4个方面。

1)无法处理海量接入管理。目前海量电力系统终端和数据难以实现高效接入和管理,同时所采集的数据也未得到充分的处理和应用。

2)精准感知深度不足。随着高比例新能源大规模并网、电动汽车快速增加以及新型电力设备大量接入,电网不确定性日益突出,电网感知深度和广度不足。

3)缺乏实时调度辅助决策。电网状态评价困难,导致传统的能源电力安全稳定运行理论与运行优化技术无法满足新型电力系统调度控制需求。

4)电力系统灵活性建设不足。既包括技术层

面上对灵活性资源运行特性、电力系统灵活运行方式的建模及优化,也包括经济层面上灵活性资源的价值评估和激励机制的设计。

## 2 面向新型电力系统的态势感知技术内涵

随着信息通信技术和电力能源深度融合,新型电力系统将呈现信息与物理系统深度融合,系统中源-网-荷-储各环节每时每刻都会产生海量信息数据,如何对其进行即时有效的感知,是未来新型电力系统需要解决的“痛点”问题。

新型电力系统强调以新能源为主体,其背后蕴藏了源-网-荷-储一体化运行调控共同参与的实际需求。源-网-荷-储海量数据状态感知问题未得到良好解决,导致新型电力系统中的多类型电力用户特性认知不足,低碳经济的运行目标难以达到要求。

态势感知技术是指在一定的时空条件下,对周围环境中各元素的觉察、理解以及对未来态势的预测,并分为态势觉察、态势理解和态势预测 3 个阶段。态势感知技术有助于实现对电力系统运行态势的全面准确把握,并为复杂的调度控制提供有力支撑。态势感知 3 个阶段的关键技术涵盖了新型电力系统 4 个关键问题的解决方法,新型电力系统态势感知模型如图 5 所示,图中 SCADA 为传统数据采集监控系统。

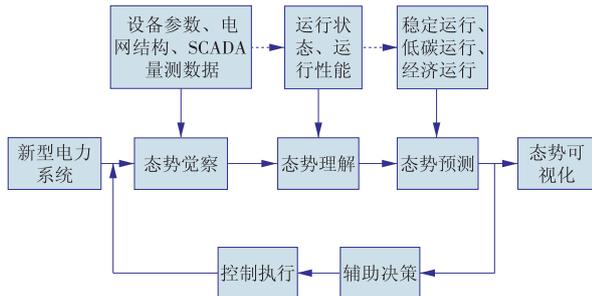


图 5 新型电力系统态势感知模型

Fig. 5 Situational awareness model for the new power system

### 2.1 态势觉察

态势觉察是觉察检测和获取环境中的重要信息或元素,获取信息的主要渠道是根据不同的控制需求和电力系统的实际运行情况进行合理配置量测。态势觉察阶段主要是对电网运行中的一些有效信息进行捕获,是态势感知中首要的一步。态势觉察关键技术包括:大数据采集技术、通信技术、高级量测体系、虚拟采集技术等,如图 6 所示。图中 FTU 为馈线终端单元;DTU 为配电监控终端;TTU 为配电变压器监测终端;PMU 为同步相量量测单元。



图 6 态势觉察架构

Fig. 6 Situational perception framework

大数据采集技术包括信息采集技术、数据采样技术、数据传输技术、数据存储技术等,同时结合人工智能技术,为态势感知的实现提供数据基础。通信技术主要包括移动通信技术、光纤通信技术、通用无线技术,提高电网数据的可靠性、安全性和实

时性。当前先进的 5G 通信技术凭借其高数据传输率和低传输延时的优势<sup>[30]</sup>,开始投入到坚强智能电网与电力物联网建设中来,并逐步应用于智能仪表和状态监测系统。高级量测体系包括网络通信技术、智能表计技术和互动机制,为数据的汇总、整理、挖掘分析以及大数据融合提供技术支持。虚拟采集技术通过对无法实时采集或采集难度较大的数据进行预测,挖掘实时采集数据的内在映射关系,提升运维数据采集的全面性和准确性。

顺应新型电力系统数据海量、多源异构的特点,文献[31]提出了改进的数据存储管理框架。为优化光伏智能边缘终端配置,文献[32]提出一种改进的自适应遗传算法和灰狼优化算法进行模型求解。为解决运维数据的浪费问题,文献[33]提出一种基于相似日、蝙蝠算法与小波神经网络相结合的分布式光伏数据虚拟采集方法。文献[34]提出一种基于改进自动编码器(AE)的变压器故障数据增强方法,解决数据不足问题。而随着大规模分布式电源与电力交通负荷接入,新型电力系统态势觉察元素显著增加,除传统电气量和设备状态量以外,还包括复杂环境量、用户行为量、电力交通量等新型态势觉察元素。

### 2.2 态势理解

态势理解是在态势觉察的基础上,对得到的信息进行处理、分析,提取关键信息。对电力系统的安全运行、脆弱性、无功优化、灵活性、经济性等能力进行评估分析具有重要作用。态势理解的关键技术包括:多元数据融合技术、电网稳定性评估技术、电力市场技术等。

海量多元异构数据的高效融合技术:基于多元数据融合的新型电力系统运行分析,研究动态、多模、多源、高维系统运行数据的分析技术,可以支撑电力大数据分析和预测关键设备健康状态。该技术结合智能响应和趋势智能分析 2 种模式,能够根据实际情况建立数据库和信息化共享平台,能够对不同类型的数据进行分析。在离线数据方面,该技术能够实现分布式离线分析;在实施数据分析方面,可以实时计算调度。

信息驱动的大电网稳定态势评估技术:该技术能够有效评估电网运行的稳定性,在对当前情况进行分析和评估的基础上,对电网未来发展做出预测并制定策略,不仅可以建立静态稳定域,还可以随着电网的不断发展,建立在线动态稳定域,通过静态和动态 2 种方式的结合,为电网正常运行提供必要保障<sup>[35]</sup>。

电力市场技术:围绕电力市场的发展规律,运

用博弈理论建立基于电能生产者和用户的双向良性竞争的电力市场;通过边缘计算技术实现各智能终端间的灵活协同,有效提升电力系统态势感知的计算效率和响应速度<sup>[36]</sup>。

为满足电力行业低碳经济发展要求,文献[37]提出一种基于图论的进化优化方法,促进分布式电源的灵活、高效应用。考虑电力系统运行数据质量现状与主客观评估的模糊性,文献[38]提出一种态势感知实施效果综合评估方法。基于负载需求和风力发电的不确定性,文献[39]结合粒子群优化提出一种改进的最优储能系统容量分配方案。但是,现阶段新型电力系统态势感知的综合评价指标体系尚不健全,受制于地域间经济水平和规划的差异,兼容性较差,实施效果有待提升。

### 2.3 态势预测

态势预测是依据态势觉察和态势理解的结论,预测电网分布式电源、负荷和电动汽车等因素的变化,并进行安全态势评估和风险预警,以预测电力系统潜在和未知的安全风险。态势理解关键技术包括能源预测、节点电压预测等。

能源预测包括电力需求、价格、负荷和发电量预测等方面。主要分为:(1)基于人工智能<sup>[40]</sup>和机器学习的预测技术,如深度学习<sup>[41]</sup>、强化学习<sup>[42]</sup>和迁移学习<sup>[43]</sup>等算法;(2)组合预测,通过组合其预测算法,显著提高预测结果质量<sup>[44]</sup>;(3)分层预测,适用于由于时间或空间分散而具有聚合约束的序列;(4)概率预测<sup>[45]</sup>,与电力系统的随机性和不确定性相适应,通过参数化、半参数化或非参数化的方法表示其概率分布。

节点电压预测包括直接预测和间接预测。直接预测是通过对电压时间序列本身进行建模,其电压幅值数据需要以毫秒级进行测量,更适合瞬态分析。间接预测是通过预测功率注入(例如负荷和可再生能源),然后计算功率流来实现<sup>[46]</sup>。考虑到新型电力系统低碳经济运行的要求,文献[47]提出了一种结合最大信息系数、因子分析、灰狼优化和广义回归神经网络的区域配电网短期负荷预测模型。考虑商业和居民混合的负荷预测影响因素多样和随机性强的特点,文献[48]提出了一种基于灰狼郊狼混合优化算法和长短时记忆网络相结合的短期电力负荷预测方法。然而,目前态势预测计算时间还不能满足实时预测的要求,同时源-网-荷-储模型还有待完善,所以最终对电力系统发展趋势的预测还较为粗糙。

在SCADA难以满足要求的背景下,态势感知技术能够更好地适应经济发展和技术变革下新型电

力系统的复杂变化。态势觉察是根据电力系统分析和控制的需求合理配置量测,以获取所需要的数据。态势理解是对电力系统的稳态运行、经济性、灵活性、生存能力、供电能力、负荷接入能力、分布式电源接纳能力等进行评估分析,获取采集数据中所蕴含的知识。态势预测是对电力系统中的各种变化因素进行预测,掌握电力系统运行态势,及时发现异常供电和潜在故障。这3个阶段正是解决新型电力系统数据挖掘困难、预测精度不高、状态感知不准确等问题的关键技术,助力新型电力系统快速觉察、精准理解、准确研判。

## 3 低碳经济运行的新型电力系统态势感知关键技术

促进新型电力系统的低碳运行,重点在于顺应数字化转型以及解决灵活性问题。本文基于态势感知技术,从推动全域互联、深度感知、灵活运行以及可靠供电等角度,梳理了当前保证系统低碳性和经济性2个层面的发展方向。

从低碳电力角度看,电力行业碳减排的重点应该包括:可再生能源的消纳、节能减排以及提高能源利用效率,关键技术包括能源互联技术、电力物联网技术、新型电力系统优化调度技术等。

从经济运行角度看,电力行业的工作重点应该包括:促进电力市场和碳权市场的交易融合、电力市场机制设计。其中包括制定节能减排的经济政策、完善电力行业的市场机制<sup>[49]</sup>、推进全国碳排放权交易市场建设<sup>[50]</sup>等。

### 3.1 能源互联网技术

推动构建新型电力系统的过程,就是推动电网向能源互联网升级的过程,两者是一个问题、两个视角<sup>[51]</sup>。能源互联网主要包括2层含义:“能源的互联网化”,即电、热、油、气、氢、交通等多种能源网络的互联互通;“互联网+”,即信息技术在能源网中的应用。能源互联网具有深度精准感知、海量接入管理、智能辅助决策等能力,能够实现电力系统各环节网架、设备、人员的互联互通,促进电网精确感知、信息融合<sup>[52]</sup>。

区别于传统电网自上而下分为应用层-网络层-终端层3层,源-网-荷-储分层架构在感知层面实现全面精准感知,加快系统研判、响应速度。但目前仍然存在源-网-荷-储要素多样、源荷双侧不确定性突出而导致新能源消纳能力不足的技术瓶颈,能源互联网技术架构如图7所示。

关键技术包括:(1)为源-网-荷-储提供信息数字化感知和数据计算技术,提供数字传输通道;

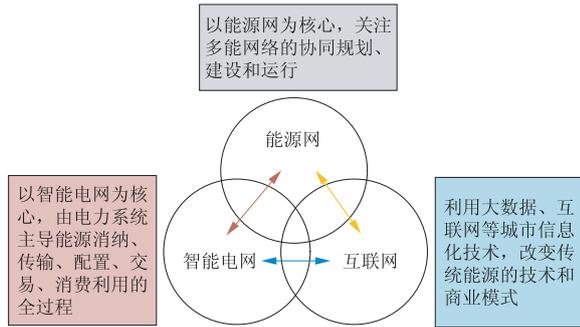


图7 智慧能源系统的互联网架构

Fig. 7 Internet architecture of smart energy system

(2)为海量数据提供云端存储、共享平台,对系统各个环节实时监测提供数据支撑,并促进能量流与信息流的深度融合,满足系统感知海量数据获取需求,实现数据高效可靠传输,推动电网向能源互联网升级。

### 3.2 电力物联网技术

在以电网为核心的区域能源互联网中,其信息网络就是电力物联网。电力物联网通过感知层、网络层、平台层以及应用层建设,对各能源节点数据进行全采集、状态全感知<sup>[53]</sup>,实现能源的设备广泛连接、数据开放共享、服务互动创新,推动能源流、业务流、数据流的“三流合一”,支撑区域能源互联网的智能运行和服务,电力物联网中的数据传输网络如图8所示。

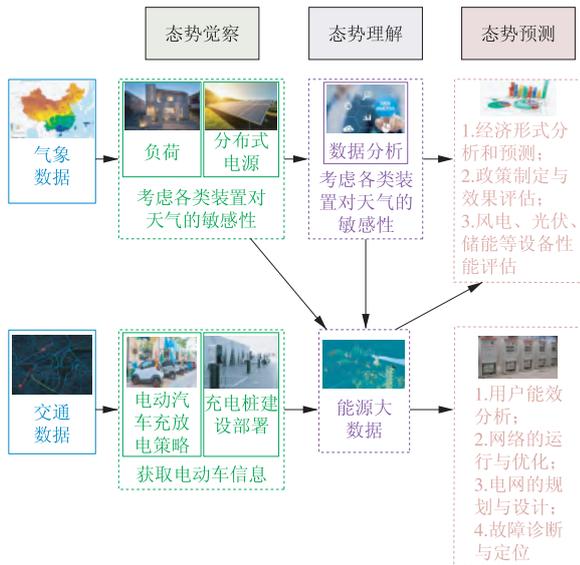


图8 电力物联网中的数据传输网络

Fig. 8 Data transmission network of power IoT

电力物联网将发展成为一个数据流与能量流紧密结合的系统。其中,数据流的形成依托先进的数据感知、数据传输、数据分析以及数据共享技术,能量流是依托于对接入的电力网、热能能源网、太阳能能源网等其他能源系统分享的数据进行交互

分析。

物联网中有线传输方案主要包括光纤、电力线载波、以太网等技术<sup>[54]</sup>。早期主要依靠总线或以太网技术满足来自采集或控制的数据传输需求。无线传输方案主要有 230 MHz 无线电力专网、卫星通信技术、WiFi、Zig Bee、Bluetooth、低功耗广域网 (Low Power Wide-Area Network, LPWAN) 技术等多种方案<sup>[55]</sup>。

### 3.3 新型电力系统优化调度技术

低碳经济政策实施前,我国电力调度主要以经济性原则为主,即在电力调度过程中注重对运行成本的控制。随着低碳经济理念与政策的普及,传统电网调度模式已经无法满足电力企业节能减排需求,需要依据对低碳电力目标的分析,进行电网调度模式的优化<sup>[56]</sup>。新能源不确定性预测成为电力系统调度运行不可或缺的关键环节,亟须研究适用于新型电力系统的调度策略以实现电源侧资源的合理调配。源-网-荷-储各环节协调优化的综合能源系统已成为能源电力发展的迫切需求。

从技术升级角度而言,实现电源侧综合效能提升的关键在于突破电源灵活性瓶颈,火电的灵活性改造可以很大程度缓解,但电源侧本质上的格局改变需要其他的灵活性手段提升,如天然气、调节性水电、抽水蓄能等灵活性更高的机组建设以及高效储能的配套建设应用等。

以及构建极端供能事件的应急机制,在准确研判不同预想极端天气可能造成的不利影响的基础上,需要充分发挥我国机制的天然优势,整合各类可用资源,统一调度、统一管理,有针对地建立应急预案,构建常态化市场运营、极端情况下计划兜底的电力和天然气系统运营模式<sup>[57-59]</sup>。例如通过建立计及储热装置、热电联产电厂、碳捕集装置以及蓄热锅炉组成的电力系统鲁棒经济调度模型<sup>[60]</sup>,并对系统经济性和低碳性的多目标进行求解,最终得到基于风电消纳评估的电力系统经济调度方案。

### 3.4 电力市场顶层设计

电力市场交易机制是决定市场运行效率和交易规模的关键因素。高效的交易机制可以促进新能源积极参与市场,实现资源优化配置。目前,我国对新能源发展的电价支持机制主要分为固定上网电价机制<sup>[61-62]</sup>、溢价补贴机制<sup>[63]</sup>、可再生能源配额制<sup>[64]</sup>和绿证机制。一方面要充分考虑新能源发电的不确定性、波动性,另一方面要调动灵活调节性资源(如新型储能)投资积极性,设计适应新能源参与的多时间尺度电力市场;同时充分利用态势感知对海量数据的挖掘和理解,调动新兴市场主体的灵

活调节能力,优化调峰、调频等辅助服务。关键内容包括建立有效容量交易市场、辅助服务交易市场、电量交易市场、绿证交易市场有机统一的中国特色新型电力市场体系。总的来说,提升电力系统灵活性的关键一方面是激发各环节的灵活性潜力,增强系统整体的灵活性供给能力;另一方面在于提供有效的交易机制,以合理有效的价格信号引导市场行为,提高灵活性资源的跨时空配置效率。

低碳经济运行的新型电力系统态势感知框架如图9所示,构建了一种多维度的新型电力系统态势感知框架,集成了大数据采集技术、通信技术、高

级量测体系、虚拟采集技术、多元数据融合技术、电网稳定性评估技术、电力市场技术、能源预测技术、节点电压预测技术以适应新型电力系统的低碳经济运行,结合了态势觉察、态势理解和态势预测等3个阶段以深入剖析新型电力系统态势感知的结构框架及其关键技术,包括能源互联网技术、电力物联网技术、新型电力系统优化调度技术和电力市场顶层设计,以解决源侧出力预测难、网侧故障研判精度低、荷侧特性分析难、储侧调度控制难的问题,并推动电力系统朝着信息化、数字化、智能化方向加速演进,实现新能源的可观、可测、可控。

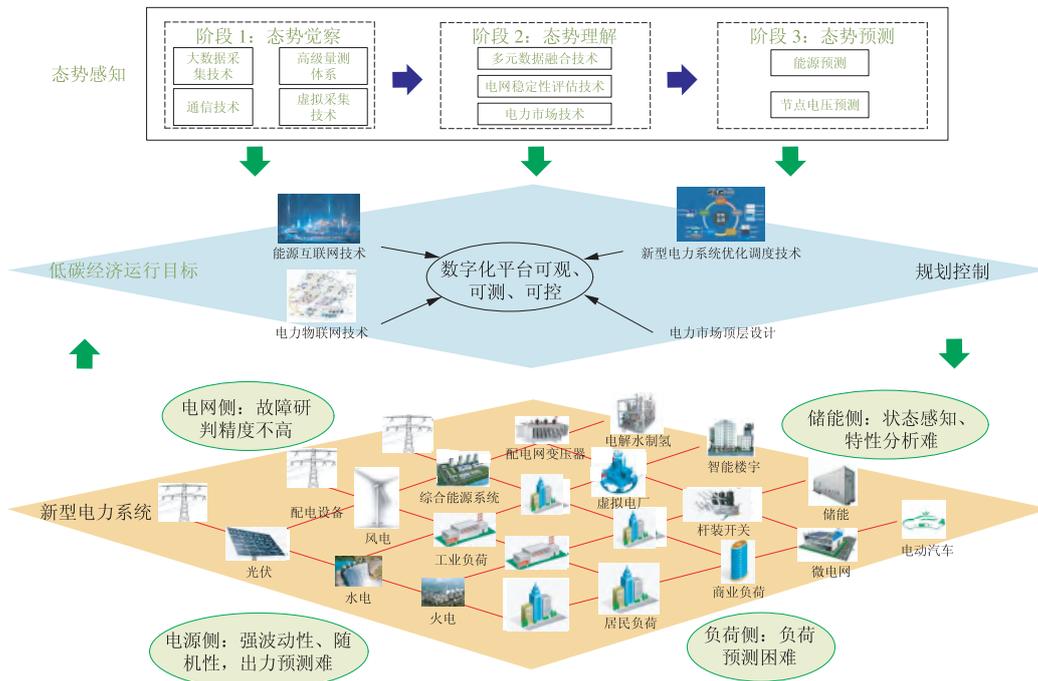


图9 低碳经济运行的新型电力系统态势感知框架

Fig. 9 Situational awareness framework for the new power system in low-carbon economic operation

## 4 结束语

构建以高比例可再生能源为核心的新型电力系统是实现“双碳”目标的关键,而态势感知技术对保障新型电力系统中低碳电力容量和灵活资源的充裕度起到了支撑作用。态势感知技术覆盖电价形成机制和能源数字化的方方面面。未来态势感知技术将有效推动新型电力系统可观、可测、可控能力,加快电网信息采集、感知、处理、应用等全过程智能化能力,成为连接全社会用户、各环节电力设备的平台,推进电网向能源互联网升级并提供关键技术支撑,助力构建低碳经济运行的新型电力系统。基于态势感知技术的新型电力系统,未来的发展方向如下。

(1) 加快推进风光水火储一体化及源-网-荷-储一体化,积极探索可再生能源制氢消纳新模式,

推动电力与其他能源互联互通,实现多能源系统间协同消纳。推进电力系统与互联网、人工智能、大数据等新兴技术的深度融合,创新能源服务新格局。

(2) 解决复杂变化下系统状态实时感知、精准评估和故障隐患及时预警问题,明确极端天气下系统失稳机理以及长效运维的策略,实现系统的精益化管理和高效维护,保障新型电力系统复杂环境下长期运行的安全性和可靠性。

(3) 解决高比例新能源和高比例电气化接入电力系统而产生的随机性、波动性、间歇性问题,实现全面可观、精确可测、高度可控。

(4) 考虑到国内新型电力系统态势感知技术仍停留在理论分析阶段,当前应当利用新一代数字技术对传统电网进行数字化改造,以数据流引领和优化能量流、业务流,搭建风光水火储联合优化调度

的可观、可测、可控的数字化平台。

构建新型电力系统是基于“双碳”目标的一场广泛而深刻的经济社会系统性变革。要实现我国社会的可持续发展,低碳经济是必由之路。构建低碳经济运行的新型电力系统,需要充分利用态势感知技术、发挥信息技术的优势,以达到全面提升发电、供电、输电、配电以及用电环节节能降耗的目标,为我国电力行业的可持续化、低碳经济发展打下良好基础。

#### 参考文献:

- [1] LI Z, DING Y, HAN D. Energy consumption transformation, cleaner production, and regional carbon productivity in China: Evidence based on a panel threshold model [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 16254–16265.
- [2] 赵国涛, 钱国明, 王盛. “双碳”目标下绿色电力低碳发展的路径分析 [J]. *华电技术*, 2021, 43(6): 11–20.  
ZHAO Guotao, QIAN Guoming, WANG Sheng. Analysis on green and low-carbon development path for power industry to realize carbon peak and carbon neutrality [J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(6): 11–20.
- [3] 王彩霞, 时智勇, 梁志峰, 等. 新能源为主体电力系统的需求侧资源利用关键技术及展望 [J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(16): 37–48.  
WANG Caixia, SHI Zhiyong, LIANG Zhifeng, et al. Key technologies and prospects of demand-side resource utilization for power system dominated by renewable energy [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(16): 37–48.
- [4] 李富兵, 樊大磊, 王宗礼, 等. “双碳”目标下“拉闸限电”引发的中国能源供给的思考 [J]. *中国矿业*, 2021, 30(10): 1–6.  
LI Fubing, FAN Dalei, WANG Zongli, et al. Thoughts on China's energy supply caused by "power rationing" under the goal of "carbon peak and neutrality" [J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(10): 1–6.
- [5] 刘晟源, 林振智, 李金城, 等. 电力系统态势感知技术研究综述与展望 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(3): 229–239.  
LIU Shengyuan, LIN Zhenzhi, LI Jincheng, et al. Review and prospect of situation awareness technologies of power system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(3): 229–239.
- [6] GE L J, LI Y L, LI S X, et al. The evaluation on the situation awareness effects for smart distribution networks under the novel design of indicator framework and hybrid weighting method [J]. *Frontiers in Energy*, 2021, 15(1): 143–158.
- [7] GE L, LI Y, LI Y, et al. Smart distribution network situation awareness for high-quality operation and maintenance: A brief review [J]. *Energies*, 2022, 15(3): 828.
- [8] 吕顺利, 丁杰, 张海滨, 等. 新型电力系统智慧物联感知技术标准体系研究及思考 [J]. *电力信息与通信技术*, 2021, 19(8): 39–46.  
LV Shuili, DING Jie, ZHANG Haibin, et al. Research and thinking on the standard system of new power system smart IoT perception technology [J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2021, 19(8): 39–46.
- [9] 马双忱, 杨鹏威, 王放放, 等. “双碳”目标下传统火电面临的挑战与对策 [J]. *华电技术*, 2021, 43(12): 36–45.  
MA Shuangchen, YANG Pengwei, WANG Fangfang, et al. Challenges and countermeasures of traditional thermal power under the goals of carbon neutrality and carbon peaking [J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(12): 36–45.
- [10] WANG S Y, GENG G C, MA J C, et al. Operational bottleneck identification based energy storage investment requirement analysis for renewable energy integration [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(1): 92–102.
- [11] SMITH R K. Analysis of hourly generation patterns at large coal-fired units and implications of transitioning from baseload to load-following electricity supplier [J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2019, 7(3): 468–474.
- [12] SHEN W, QIU J, MENG K, et al. Low-carbon electricity network transition considering retirement of aging coal generators [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(6): 4193–4205.
- [13] 袁家海, 张凯. “碳中和”目标下, 新型电力系统中常规煤电退出路径研究 [J]. *中国能源*, 2021, 43(6): 19–26, 66.  
YUAN Jiahai, ZHANG Kai. Coal power phase-out pathway in the new power system under carbon neutral target [J]. *Energy of China*, 2021, 43(6): 19–26, 66.
- [14] 夏丽娟, 苏艳萍, 王垂涨. 碳达峰碳中和背景下新能源发电环境保护问题探析 [J]. *低碳世界*, 2021, 11(6): 125–126.
- [15] LIU Y, ZHANG J. Research on the effects of wind power grid to the distribution network of Henan province [C]//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2018, 1955(1): 030005.
- [16] 王晓辉, 季知祥, 周扬, 等. 城市能源互联网综合服务平台架构及关键技术 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(7): 2310–2321.  
WANG Xiaohui, JI Zhixiang, ZHOU Yang, et al. Comprehensive service platform architecture and key technology of urban energy Internet [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(7): 2310–2321.
- [17] 王孝琳, 郝超超, 李晓明, 等. 含分布式电源的配电网脆弱性分析 [J]. *电测与仪表*, 2019, 56(6): 38–43.  
WANG Xiaolin, HAO Chaochao, LI Xiaoming, et al. The

- vulnerability analysis of distribution network with distributed generation [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(6):38-43.
- [18] 陈伟根, 张知先, 李剑, 等. 电气设备状态参量智能传感技术[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(S1):323-342.  
CHAN Weigen, ZHANG Zhixian, LI Jian, et al. Intelligent sensing technology for power equipment state parameters [J]. *Proceedings of the CESS*, 2020, 40(S1):323-342.
- [19] 康重庆, 杜尔顺, 张宁, 等. 可再生能源参与电力市场: 综述与展望[J]. *南方电网技术*, 2016, 10(3):16-23, 32.  
KANG Chongqing, DU Ershun, ZHANG Ning, et al. Renewable energy trading in electricity market: Review and prospect[J]. *Southern Power System Technology*, 2016, 10(3):16-23, 32.
- [20] 郑宗强, 韩冰, 闪鑫, 等. 输配电网高级应用协同运行关键技术分析[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(6):122-128.  
ZHENG Zongqiang, HAN Bing, SHAN Xin, et al. Analysis on key technologies for coordinated operation of advanced application software in transmission and distribution network [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(6):122-128.
- [21] LIU D, WANG L, LIU M, et al. Optimal energy storage allocation strategy by coordinating electric vehicles participating in auxiliary service market [J]. *IEEE Access*, 2021, 9:95597-95607.
- [22] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(7):1893-1904, 2205.  
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. *Proceedings of the CESS*, 2018, 38(7):1893-1904, 2205.
- [23] 孙毅, 李泽坤, 许鹏, 等. 异构柔性负荷建模调控关键技术及发展方向研究[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(24):7146-7158, 7488.  
SUN Yi, LI Zekun, XU Peng, et al. Research on key technologies and development direction of heterogeneous flexible load modeling and regulation [J]. *Proceedings of the CESS*, 2019, 39(24):7146-7158, 7488.
- [24] AZEEM A, ISMAIL I, JAMEEL S M, et al. Electrical load forecasting models for different generation modalities: A review [J]. *IEEE Access*, 2021, 9:142239-142263.
- [25] 李长城, 和敬涵, 王颖, 等. 考虑分布式电源支撑作用的输配电系统协同恢复方法[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(2):112-119.  
LI Changcheng, HE Jinghan, WANG Ying, et al. Coordinated restoration of transmission and distribution systems considering DG support [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(2):112-119.
- [26] 陶顺, 陈鹏伟, 肖湘宁, 等. 智能配电网不确定性建模与供电特征优化技术综述[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(10):77-91.  
TAO Shun, CHEN Pengwei, XIAO Xiangning, et al. Review on uncertainty modeling and power supply characteristics optimization technology in smart distribution network [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(10):77-91.
- [27] 李建林, 马会萌, 惠东. 储能技术融合分布式可再生能源的现状与发展趋势[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(14):1-10, 20.  
LI Jianlin, MA Huiyin, HUI Dong. Present development condition and trends of energy storage technology in the integration of distributed renewable energy [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(14):1-10, 20.
- [28] SUN Y S, ZHAO Z X, YANG M, et al. Overview of energy storage in renewable energy power fluctuation mitigation [J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2020, 6(1):160-173.
- [29] 吴智泉, 贾纯超, 陈磊, 等. 新型电力系统中储能创新方向研究[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(10):444-451.  
WU Zhiquan, JIA Chunchao, CHEN Lei, et al. Research on innovative direction of energy storage in new power system construction [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(10):444-451.
- [30] 张宁, 杨经纬, 王毅, 等. 面向泛在电力物联网的 5G 通信: 技术原理与典型应用[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(14):4015-4025.  
ZHANG Ning, YANG Jingwei, WANG Yi, et al. 5G communication for the ubiquitous internet of things in electricity: Technical principles and typical applications [J]. *Proceedings of the CESS*, 2019, 39(14):4015-4025.
- [31] 葛磊蛟, 王守相, 王尧, 等. 多源异构的智能配用电数据存储处理技术[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(S2):159-168.  
GE Leijiao, WANG Shouxiang, WANG Yao, et al. Storage and processing technology of the multi-source isomerized data for smart power distribution and utilization [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(S2):159-168.
- [32] GE Leijiao, LIU Jiaheng, WANG Bo, et al. Improved adaptive gray wolf genetic algorithm for low-cost and high reliability of photovoltaic intelligent edge terminal optimal configuration [J]. *Computer and Electrical Engineering*, 2021, 95:107394.
- [33] 葛磊蛟, 秦羽飞, 刘嘉恒, 等. 基于相似日与 BA-WNN 相结合的分分布式光伏数据虚拟采集方法[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(6):8-14.  
GE Leijiao, QIN Yufei, LIU Jiaheng, et al. Virtual acquisition method of distributed photovoltaic data based on similarity day and BA-WNN [J]. *Electric Power*

- Automation Equipment, 2021, 41(6):8-14.
- [34]葛磊蛟, 廖文龙, 王煜森, 等. 数据不足条件下基于改进自动编码器的变压器故障数据增强方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S1):84-94.  
GE Leijiao, LIAO Wenlong, WANG Yusen, et al. Data augmentation method for transformer fault based on improved auto-encoder under the condition of insufficient data [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S1):84-94.
- [35]刘俊红, 张旗, 韦文峰, 等. 人工智能在电力企业网络安全态势感知中的应用[J]. 网络安全和信息化, 2021(12):126-130.
- [36]杨挺, 翟峰, 赵英杰, 等. 泛在电力物联网释义与研究展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(13):9-20, 53.  
YANG Ting, ZHAI Feng, ZHAO Yingjie, et al. Explanation and prospect of ubiquitous electric power Internet of things [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13):9-20, 53.
- [37]GE Leijiao, SONG Zhaoshan, XU Xiandong, et al. Dynamic networking of islanded regional multi-microgrid networks based on graph theory and multi-objective evolutionary optimization [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2021, 31(1): e12687.
- [38]葛磊蛟, 李元良, 汪宇倩. 智能配电网态势感知实现效果综合评估模型[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, 53(11):1101-1111.  
GE Leijiao, LI Yuanliang, WANG Yuqian. Comprehensive evaluation model for situational awareness effects of a smart distribution network [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2020, 53(11):1101-1111.
- [39]GE L J, ZHANG S, BAI X Z, et al. Optimal capacity allocation of energy storage system considering uncertainty of load and wind generation [J/OL]. Mathematical Problems in Engineering, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/2609674>.
- [40]WERON R. Electricity price forecasting: A review of the state-of-the-art with a look into the future [J]. International Journal of Forecasting, 2014, 30(4):1030-1081.
- [41]SHI H, XU M, LI R. Deep learning for household load forecasting—A novel pooling deep RNN [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5):5271-5280.
- [42]FENG C, SUN M, ZHANG J. Reinforced deterministic and probabilistic load forecasting via  $Q$ -learning dynamic model selection [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2):1377-1386.
- [43]CAI L, GU J, JIN Z. Two-layer transfer-learning-based architecture for short-term load forecasting [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(3):1722-1732.
- [44]HUBICKA K, MARCJASZ G, WERON R. A note on averaging day-ahead electricity price forecasts across calibration windows [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(1):321-323.
- [45]GNETING T, KATZFUSS M. Probabilistic forecasting [J]. Annual Review of Statistics and Its Application, 2014, 1:125-151.
- [46]WANG Y, VON KRANNICHFELDT L, ZUFFEREY T, et al. Short-term nodal voltage forecasting for power distribution grids: An ensemble learning approach [J]. Applied Energy, 2021, 304:117880.
- [47]GE L J, XIAN Y M, YAN J, et al. A hybrid method for short-term PV output forecast based on GWO-GRNN [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(6):1268-1275.
- [48]葛磊蛟, 刘航旭, 赵康, 等. 面向商业和居民混合的配电网短期负荷预测 HGWOACO-LSTM 方法 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(12):1269-1279.  
GE Leijiao, LIU Hangxu, ZHAO Kang. An HGWOACO-LSTM method for short-term load forecasting of distribution network for commercial and residential users [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2021, 54(12):1269-1279.
- [49]余良城. 低碳经济背景下电力行业节能减排路径研究 [J]. 工程技术研究, 2021, 6(22):285-286.
- [50]孔嘉璇, 赵婕廷, 嵇伟. 低碳经济下电力行业的发展与转型 [J]. 中国集体经济, 2021(21):67-68.
- [51]陈国平, 董昱, 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):5493-5506.  
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 CESS, 2020, 40(17):5493-5506.
- [52]MIGLANI A, KUMAR N, CHAMOLA V, et al. Blockchain for Internet of Energy management: Review, solutions, and challenges [J]. Computer Communications, 2020, 151:395-418.
- [53]BEDI G, VENAYAGAMOORTHY G K, SINGH R, et al. Review of Internet of Things (IoT) in electric power and energy systems [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(2):847-870.
- [54]江秀臣, 刘亚东, 傅晓飞, 等. 输配电设备泛在电力物联网建设思路与发展趋势 [J]. 高电压技术, 2019, 45(5):1345-1351.  
JIANG Xiuchen, LIU Yadong, FU Xiaofei, et al. Construction ideas and development trends of transmission and distribution equipment of the ubiquitous power Internet of Things [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5):1345-1351.
- [55]肖勇, 钱斌, 蔡梓文, 等. 电力物联网终端非法无线通信

- 链路检测方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(11): 2319-2327.
- XIAO Yong, QIAN Bin, CAI Ziwen, et al. Malicious wireless communication link detection of power internet of thing devices [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(11): 2319-2327.
- [56] 马玉锴, 田亮. 基于证据理论与云模型的火电机组节能减排绩效综合评价[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2022, 49(3): 96-103, 126.
- MA Yukai, TIAN Liang. Energy saving and emission reduction evaluation of thermal power units based on evidence theory and cloud model [J]. Journal of North China Electric Power University, 2022, 49 (3) : 96-103, 126.
- [57] 侯验秋, 丁一, 包铭磊, 等. 电-气耦合视角下德州大停电事故分析及对我国新型电力系统发展启示[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-14. (2022-01-17) [2022-05-25]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.212202>.
- HOU Yanqiu, DING Yi, BAO Minglei, et al. Analysis of Texas blackout from the perspective of electricity-gas coupling and its enlightenment to the development of China's new power system [J/OL]. Proceedings of the CESS: 1-14. (2022-01-17) [2022-05-25]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.212202>.
- [58] 张金平, 周强, 王定美, 等. “双碳”目标下新型电力系统发展路径研究[J]. 华电技术, 2021, 43(12): 46-51.
- ZHANG Jinping, ZHOU Qiang, WANG Dingmei, et al. Research on the development path of new power system to achieve carbon peaking and carbon neutrality [J]. Huadian Technology, 2021, 43(12): 46-51.
- [59] 王盛, 谈健, 史文博, 等. 英国新型电力系统建设经验以及对我国省级电网发展启示[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(7): 19-32.
- WANG Sheng, TAN Jian, SHI Wenbo, et al. Practices of the new power system in the UK and inspiration for the development of provincial power systems in China [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(7): 19-32.
- [60] 崔明勇, 靳贺, 何良策, 等. 基于风电消纳评估的电力系统鲁棒低碳经济调度[J]. 太阳能学报, 2020, 41(8): 270-280.
- CUI Mingyong, JIN He, HE Liangce, et al. Robust low-carbon economic dispatch of power system based on wind power accommodation evaluation [J]. Acta Energetica Sinica, 2020, 41(8): 270-280.
- [61] 管馨, 陈涛, 高赐威. 适应风电参与电力市场的需求侧储能负荷运行优化研究[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(2): 35-41.
- GUAN Xin, CHEN Tao, GAO Ciwei. Study on optimal operation of the demand-side energy storage system for wind power participating in electricity market [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(2): 35-41.
- [62] HAYAT M A, SHAHNIA F, SHAFIULLAH G. Replacing flat rate feed-in tariffs for rooftop photovoltaic systems with a dynamic one to consider technical, environmental, social, and geographical factors [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(7): 3831-3844.
- [63] ANATOLITIS V, KLOBASA M. Impact of a yearly reference period on the sliding feed-in premium for onshore wind in Germany [C]//2019 16th International Conference on the European Energy Market (EEM). IEEE, 2019: 1-7.
- [64] JIANG K, WANG P, WANG J, et al. Reserve cost allocation mechanism in renewable portfolio standard - constrained spot market [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(1): 56-66.

(本文责编:张帆)

收稿日期: 2022-03-10; 修回日期: 2022-08-30  
上网日期: 2023-01-25; 附录网址: [www.iienergy.cn](http://www.iienergy.cn)

#### 作者简介:

葛磊蛟(1984), 男, 副教授, 博士, 从事智能配电网态势感知、云计算和大数据方面的研究, [legendlj@tju.edu.cn](mailto:legendlj@tju.edu.cn);

崔庆雪(1999), 女, 在读硕士研究生, 从事配电网时滞不确定性方面的研究, [a1023480040@163.com](mailto:a1023480040@163.com);

李明玮(2000), 男, 在读硕士研究生, 从事风光氢混合能源系统稳定控制方面的研究, [962219093@qq.com](mailto:962219093@qq.com);

刘自发(1973), 男, 教授, 博士, 从事电力系统规划和运行、直流配电网以及分布式电源接入电网分析等方面的研究, [tjubluesky@163.com](mailto:tjubluesky@163.com);

夏明超(1976), 男, 教授, 博士, 从事能源互联网、配电网分析与优化、需求响应及柔性负荷调度等方面的研究, [mchxia@bjtu.edu.cn](mailto:mchxia@bjtu.edu.cn)。