

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240637

## 新型电力系统数智化关键技术应用研究与展望

王朋<sup>1</sup>, 张迪<sup>2</sup>, 张勇军<sup>2</sup>, 甘露<sup>1</sup>, 曾梦妤<sup>1</sup>, 秦绍基<sup>2</sup>, 刘林<sup>1</sup>

(1. 南方电网数字电网研究院有限公司, 广东 广州 510623; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

**摘要:** 数字信息技术与能源电力技术的深度融合推动电网应用场景与业务范畴创新, 数智化技术成为新型电力系统构建与电力行业数智化转型的关键。首先, 探究了新型电力系统数据采集、处理、传输、存储和利用全过程的特性, 概述了各流程典型的数据研究方法。然后, 分别总结分析了新型电力系统“源-网-荷-储”各个环节的典型业务场景, 并对各场景中数智化关键技术应用现状与未来方向进行了论述。最后展望了未来电力数智化转型的创新业务场景, 研判了构建信息安全体系、数据共享区块链平台、全域物联生态和电力行业专用大模型等电力数智化重点发展趋势。该研究为新型电力系统数智化技术迭代及应用提供理论依据与方向引导, 推进电力低碳化、数字化转型。  
**关键词:** 新型电力系统; 数字化; 数字技术; 业务场景; 人工智能

### Research and prospects for key digital-intelligent technology applications in new power systems

WANG Peng<sup>1</sup>, ZHANG Di<sup>2</sup>, ZHANG Yongjun<sup>2</sup>, GAN Lu<sup>1</sup>, ZENG Mengyu<sup>1</sup>, QIN Shaoji<sup>2</sup>, LIU Lin<sup>1</sup>

(1. CSG Digital Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510623, China; 2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** The deep integration of digital information technology and power technology is driving innovation in power system applications and business domains, making digital-intelligence technology a key enabler for the construction of new power systems and the digital-intelligence transformation of the power industry. First, this paper explores the characteristics of the entire process of data acquisition, processing, transmission, storage, and utilization in new power systems, providing an overview of typical data research methods for each stage. Then it summarizes and analyzes typical business scenarios across the “generation-grid-load-storage” segments of new power systems, discussing the current state and future directions of key digital-intelligent technology applications in each scenario. Finally, this paper envisions innovative business scenarios for future power system digital-intelligent transformation, assessing key development trends such as the construction of an information security framework, data-sharing blockchain platforms, comprehensive IoT ecosystems, and industry-specific large AI models. This study provides theoretical foundations and strategic guidance for the iterative development and application of digital-intelligent technology in new power systems, promoting the low-carbon and digital transformation of the power industry.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177085).

**Key words:** new power system; digitalization; digital technology; application scenario; artificial intelligence

## 0 引言

新型电力系统和新型能源体系构建是实现“碳中和、碳达峰”目标的必由之路<sup>[1-3]</sup>。打造数智化坚强电网亟待以科技创新引领发展新质生产力, 加强

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52177085); 南方电网数字电网研究院有限公司创新项目资助(210000KK52220036)

大数据、人工智能(artificial intelligence, AI)、数字孪生、区块链、量子技术等数字技术与氢能、新型储能等绿色技术的创新与协同融合, 有效优化海量分布式发电资源, 提高资产可观性和能源利用率, 赋予新型电力系统满足实时监测、态势感知、智能控制和网络安全等新型业务需求能力, 助推电力产业链、供应链升级与场景智能化应用落地, 推动电网更加安全、可靠、高效、可持续运行。

新型电力系统中存在大规模波动性新能源并

网、集中式与分布式并重<sup>[4]</sup>、多源异质能流系统耦合<sup>[5]</sup>、高比例电力电子化、负荷特性多元化<sup>[6]</sup>、电力市场与碳市场统筹发展<sup>[7]</sup>等典型特性,对源-网-荷-储各环节的优化调控、信息安全、处理效率、响应速度等提出更高要求,推动“云-大-物-移-智-链”等数智化共性关键技术的快速发展与交叉融合,发挥好电网连接能源电力行业上下游的平台与纽带作用<sup>[4,6]</sup>。文献[7]指出区块链技术在多能源主体参与的碳足迹可信追踪、碳配额分配等电碳交易中的应用潜能。文献[8]围绕新型电力系统智能传感技术开展研究,综述了传感器敏感元件、制备技术、测试与校准、通信等相关技术,对传感行业现状和发展趋势进行了研判。文献[9]强调了具备深度场景解析和语言描述能力的多模态大模型技术在电力系统中的应用前景。

业务转型与数字信息技术融合是数字经济时代企业发展的必然选择和长期趋势。新型电力系统数智化将面向特定业务的技术发展模式转变为电网技术体系的全面数智化变革,使数字技术、智能化技术价值在电力应用中得以全面落地和充分释放,并赋能电力系统与数字信息技术协同发展<sup>[10]</sup>。数字技术的自身迭代,以及电力应用场景与业务需求变化,支撑电力设备与产品管理、业务与运营优化、服务与业态模式创新三大业务功能应用,共同驱动数智化技术交叉融合、电力业务创新发展<sup>[11]</sup>。未来,以网络安全技术体系为前提,贯通物联网(internet of things, IoT)平台、AI平台、电网地理信息系统平台等多个平台,锚定业务场景创新发展目标,发挥数智化技术的融合优势,是提升新型电力系统数智化转型可控性与可信度的重点方向<sup>[12-14]</sup>。

另外,随着海量多元设备和智能终端接入,来自不同数据来源、不同类型、不同结构的数据量逐渐倍增,数据生产要素的价值作用渗透到新型电力系统全环节<sup>[9,15]</sup>。新型电力系统数智化的数据包括设备、物理资产、流程的客观数据,是电力行业数字化转型的核心资源。因此,电力数据要素价值的高效释放是赋能新型电力系统数字化的根本途径,数据全流程特性、应用场景识别、技术迭代是数智化关键技术研究的核心。

本文从新型电力系统数智化的数据流转全过程关键技术与数字化转型下新型电力系统典型业务场景分析入手,研究了数智化技术在新型电力系统源-网-荷-储各环节中的应用及未来发展方向,展望了新型电力系统数字化创新业务场景,提出构建信息安全体系、数据共享区块链平台、全域物联生态和电力行业专用大模型等电力数字化重点发展趋势。

## 1 新型电力系统数据流转过程分析

新型电力系统数据流传全过程包括:数据采集、处理、传输、存储与共享、分析与利用等关键环节。电力数据敏感且呈现海量特征,在质量、粒度和准确性方面优势显著,数据全过程流转中的安全性和系统运行高效性是重要前提。

### 1.1 数据采集

新型电力系统中的数据采集分为电能信息和非电能信息采集两类。电能信息采集技术主要面向电流、电压和电能信息处理,尤其适用于高压、高磁场影响等运行环境。海量终端广泛分布,所处物理环境复杂,采集传感装备易受光强度、温度、振动等外部干扰,需要提升装备稳定性、安全性和适用范围,研发微型化、芯片化集成传感装备<sup>[16-17]</sup>。非电能信息采集传感技术主要集中在光学感知和声学感知方面,包括分布式光纤传感、光纤光栅传感和超声波传感等,涉及摄像头、无人机、无人机机巢、杆塔倾斜等在线监测数据和雷电、山火、台风、覆冰、地震、微气象等环境气象数据,应用于新能源出力预测、设备巡检、故障诊断等<sup>[2]</sup>。另外,新型电力系统生产、供电服务、企业经营管理等环节包含的非结构化数据也是重要的非电能数据。

### 1.2 数据处理

数据处理主要包含数据预处理、数据转换、数据整合、数据挖掘以及数据可视化等工作。数据预处理工作需要结合统计学方法、AI等进行数据的缺失值、异常值处理、数据去重等<sup>[18-19]</sup>。缺失值处理手段包括删除、基于统计学和预测模型的填充等。异常值处理则需要识别,识别方法要结合任务的特性进行个性化构建,例如,针对用电量、设备状态异常检测等问题中的小样本异常数据,则不可进行常规的异常值识别与删除替换处理等操作<sup>[18]</sup>。数据转换包括标准化处理、数据编码等,而数据整合处理的是不同来源、格式和结构数据融合的兼容性问题。进一步地,通过数据降维、特征工程、可视化等工作,实现数据挖掘与建模分析。

特别地,新型电力系统数智化转型将包含大量流式数据,难以连续收集和存储,其特性如表1所示,其数据处理结构需采用分布式计算模型,且考虑数据的实时(低时延)处理要求。流数据的分布随时间的推移而演变的现象为概念漂移(concept drift, CD),分为四类:突发式漂移、渐进式漂移、增量式漂移和复发式漂移,给分类和预测等应用场景带来挑战。例如,在新能源出力预测问题中,训练集常为高速、大容量的流数据,当CD发生时,基于

静态输入-输出映射的传统模型的准确性将下降,常用的处理方法包括批量学习和在线学习。批量学习是在 CD 发生后,在新的数据下对模型进行再训练,而在线学习可以实现新数据集下重新调整参数以保持准确性<sup>[20]</sup>。随着电网透明度的提升,海量来源不同、格式不同、采集频率不同、定义不同的结构化数据和非结构化数据等构成多源异构数据,其有效融合成为数据处理关键环节,用于新能源出力预测、输电线路覆冰感知、无人机巡检等电力系统感知、预测与决策分析中<sup>[21]</sup>。

表 1 新型电力系统流式数据特性

Table 1 Characteristics of streaming data in new power system

性质	特征
无限性	作为真实世界中的记录,数据量是连续不断、无限的
实时性	各类数据源产生的数据是实时的,不可预知的
时序性	数据按产生的时间先后顺序按序到达
一次性	数据通常只处理一次,在没有特别保存的情况下,流式数据不能被再次处理
动态性	随时间变化数据分布动态改变,即会出现概念漂移的现象

### 1.3 数据传输

数据传输依赖于通信技术,其传输需求贯穿整个新型电力系统,主要包括以下三个方面:1) 承接经过采集处理环节后的数据接入本地数据中心;2) 完成本地数据中心之间、本地数据中心与数据中台间的信息互通;3) 经过系统处理分析环节后得到的数据,如调控、运维指令等,进一步传输给需要响应指令的电力业务环节执行。含高比例新能源新型电力系统运行呈现高度不确定性,在多时间尺度协调调控、运行状态实时监测与预测、需求侧服务质量与灵活性等方面对数据传输效率提出更高要求<sup>[2,14]</sup>。另外,信息安全与隐私保护是数据传输可靠性和稳定性的关键保障。

### 1.4 数据存储与共享

常规数据存储系统多部署于专用数据中心,但电力系统运行环境复杂,可能处于环境恶劣且偏远的地区,且海量智能终端的接入使得数据采集频度剧增、多源异构特征显著,对新型电力系统存储系统的性能与鲁棒性提出更高要求<sup>[22]</sup>。需要支撑存储资源的横向扩展和动态分配,满足高标准的数据存储与检索要求,辅助实现离线批量计算、实时流式计算、交互式内存计算、多源异构数据计算等目标。通过建立数据仓库和数据湖,结合 AI 的数据管理和优化算法,可实现对数据安全存储系统中节点间的数据共享和数据跨平台跨域安全共享和访问,提高数据检索效率和数据管理智能化水平<sup>[23]</sup>。

### 1.5 数据分析与利用

新型电力系统数字化通过大数据技术与 AI 技术,采用数据驱动、知识-数据混合驱动等分析方法,实现对内优化电力管理、对外推进社会效益。一方面,致力于电网安全稳定分析、新能源消纳、设备状态监测与诊断等业务目标,分析挖掘源-网-荷-储各环节数据,融合调控、经营等业务中的非结构化数据,通过能源电力专业知识专家系统的辅助与校验,揭示电网生产运行全过程、全环节的规律,建立具备电网形态、拓扑结构、运行态势动态呈现的全域数字孪生系统,并根据不同应用需求构建个性化业务平台,提升电力系统规划、调度、运维、供电服务智能化水平<sup>[14,24-25]</sup>。另一方面,面向政府部门、企业和电力客户等各类主体的数据需求,拓展数据产品服务、创新数据运营模式,实现对数据的价值提取和业务关联,以及与政府、企业、能源上下游的数据共享、分析和应用<sup>[5,24]</sup>。

## 2 新型电力系统数智化典型业务场景

源-网-荷-储环节的数智化技术应用是满足新型电力系统调度、控制、运维、规划、营销等方面新业务需求,实现全方位可观、可测、可控的重要抓手<sup>[26]</sup>。能源电力数字化转型是数字技术驱动的业务变革,以数据、算力、算法为核心要素,将数智化技术嵌入到业务过程进行数字化改造,推动产业链上下游数智化转型升级,提升供电服务质量、电力系统安全和电力供应经济性。

在电源侧,高比例新能源接入导致电源数量多、功率波动强、系统惯量低,对出力精准预测、场站全景状态感知及智慧电厂等业务效能提出更高要求。在电网侧,高比例电力电子装置、多能耦合、交直流混联、多微网等多种新型形态出现,云调度、智能聚合辅助服务、输变电智慧运维等业务的支撑作用凸显。在负荷侧,面向新型负荷和产消者等多市场主体利益诉求,发展灵活源荷服务与现代客户服务,推行智慧家庭能源管理、综合能源需求响应机制等势在必行。另外,随着新型储能技术发展,规模化储能、灵活性储能的优化配置及安全管理至关重要。数智化技术在源-网-荷-储环节赋能构建新型电力系统及新业务需求如图 1 所示。

### 2.1 电源侧

#### 2.1.1 智慧电厂

新型电力系统中新能源并网装机容量增长对电力系统灵活运行能力提出更高要求,火电厂装容量大、可控性强,智慧电厂作为工业互联网在发电侧的典型场景,在满足发电企业多类型市场竞争、

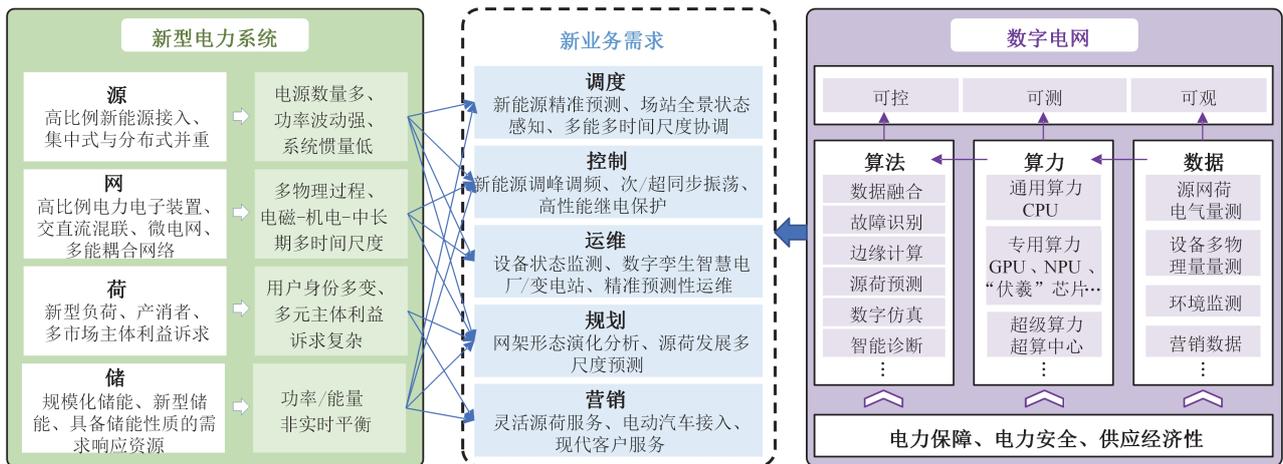


图 1 新型电力系统数智化的新业务需求

Fig. 1 New service requirements of digital-intelligent technology of the new power system

用户个性化需求和低碳减排目标方面较之传统火电厂具有显著优势。电力 IoT 技术、AI、数字孪生等技术，融合新型传感设备、工业机器人等关键部件，在智慧电厂的安全管理、生产管理、经营管理及企业体系架构优化发挥着关键作用，有助于实现全面感知与互联、全生命周期生产管理、实时监控与诊断、运行优化与智能决策等目标<sup>[27-29]</sup>。“智慧汽轮机”作为智慧电厂的关键部分，在设计、制造、控制、运维和检修全生命周期实现智慧化管理，利用制造和运行数据，融合数字技术实现系统状态实时监测与数据挖掘，指导智能运行控制与运维决策<sup>[30]</sup>。

未来，可通过新型智能感知设备与数智化技术，推动智能运维、安全监督、辅助运行操作等落地，实现无人值守的管理模式；构建统一新型电力系统数字化模型，统一数字孪生电厂技术标准，开展发电领域动态数字孪生研究，实现电厂全息仿真。同时，需要关注发电企业在低碳路径优化中的不同影响因素，例如发电企业灵活性资源比例、不同储能配比等，融合数智化技术支撑灵活个性化的企业低碳化、数字化转型模型构建与路径选择<sup>[31]</sup>。

### 2.1.2 分布式能源精准消纳

新型电力系统数字化转型利用智能传感、智能终端、边缘计算等技术与装备，通过对新能源的全景数据采集与状态感知，完成发电量预测和优化调控等目标，助力分布式发电(distributed generation, DG)消纳<sup>[32-34]</sup>。在光伏逆变器侧安装边缘计算设备，能够实现光伏发电的快速无功响应<sup>[32]</sup>。文献[33]中利用电力 IoT 感知信息，从用户侧能量管理、DG 集群控制、配电网多时间尺度优化运行等方面，构建了基于电力 IoT 平台的含可再生能源配电网运行

框架。文献[35]概述了 DG 集群动态划分、集群协调优化、多源数据融合与处理、集群等值建模方法和集群内部自治运行等关键技术。以数据深度利用和单机智能感知为特征的智能调控技术是未来新能源产业的核心领域，用于解决 DG 装机规模爆发、高效调控、源荷时空差异平衡、市场投资等问题，以促进分布式新能源广泛精准消纳<sup>[35]</sup>。

## 2.2 电网侧

### 2.2.1 云化调度

云计算逐步成为新型电力系统调度决策的重要依托手段，公共云服务商已提供面向智能微网、DG 并网管理等电力场景的商业化云计算方案。结合 IoT、云计算技术，以总线技术为基础，对不同调度系统实行功能整合，支持电网实时监控调度，加快数据收集、分析及传输，实时掌握电网运行效率<sup>[15]</sup>。面对海量业务需求，为保障云中心维持高数据吞吐量和存储量，对处理器的电力保障和散热条件提出更高要求，其选址优化问题亟待研究。另外，用户需要将与计算任务相关的数据上传到云端，使得云服务商有可能窥探配电网企业的敏感信息，如发电成本、负荷数据、网架结构等，引发信息泄露风险<sup>[36]</sup>。

海量新能源并网对气象高度敏感，且云化调度面临大量信息攻击风险，电网韧性调度引起广泛关注。电网韧性衡量的是在遭受极端天气和信息攻击时系统可以承受、吸收扰动量，并保持系统稳定的能力<sup>[37]</sup>。韧性调度借助智能传感和云大物移智链技术等，实现物理信息融合下全局全域信息的感知、处理、存储、分析和工程应用。并且，韧性调度融合新型电力系统信息安全防护技术可以有效抵御新型信息攻击、信息物理攻击等复杂安全风险<sup>[38-39]</sup>。未

来,数智化技术将融合气象-电力-地理-社会因素等多源数据,开发 AI+电力智能应急调度技术,支撑系统主动防御、及时响应、快速恢复,助力打造气候弹性强、安全韧性强的数智化坚强电网<sup>[40]</sup>。

### 2.2.2 智能聚合辅助服务

含高比例新能源电网迫切需要深度调峰能力,但分布式新能源体量小,集中参与调峰与辅助服务的难度极大。新型电力系统数智化进程中,先进传感、AI、边缘计算以及海量终端的应用可以有效识别、挖掘灵活性资源特征,使得系统实时信息交互与聚合成为可能。通过引导各环节的大量灵活性资源参与系统调峰、调频、备用辅助服务,制定合理且具有激励性的辅助服务补偿机制,完善市场主体、交易品种、价格传导与跨省跨区市场机制,可促进 DG、储能、可控负荷等资源的有效利用,发挥市场对能源资源的全局优化配置作用<sup>[41-42]</sup>。文献[35]提出基于云管边端架构的 DG 集群并网调控体系,协同常规电源、储能等进行全局调峰辅助服务。微网作为可中断负荷,可以需求响应的方式参与辅助服务,或利用自身储能、电热转换设备,作为独立辅助服务提供商参与调峰<sup>[42]</sup>。另外,变电站、DG 厂站、充换电站、储能站、边缘数据中心站等多站融合化建设和精准化运营,使供电区域内部供需自平衡,对外还可为主网提供调峰备用需求。

### 2.2.3 输变电智慧运维

为实现新型电力系统调控灵活性与电气设备检修的主动性目标,提高系统统筹协调能力,实现输变电设备状态透明化成为关键手段<sup>[3]</sup>。利用智能传感终端、边缘计算装备与无人机、机器人智能巡检等技术,对输变电设备的运行状态参量进行全方位监测和感知,基于历史和在线采集数据构建 AI 与物理知识结合的设备状态高精度预测、故障类型精准识别模型,配合数字孪生、人机交互等技术,进一步实现运维方案高效化与智能化<sup>[43]</sup>。

同时,借助多源异构信息融合技术,实现设备参数、运行数据、地理环境与气象参数等结构化数据以及故障记录、故障声波、局放图谱、红外图像等非结构化数据融合,使设备状态评估、故障诊断与预测更准确<sup>[44]</sup>。国网江苏电力公司融合电力气象、三维模型、AI、统一视频和电力北斗 5 项关键技术,实现数字技术在输电无人机智能巡检全环节应用。未来,需要研究海量异质设备数据融合技术及实现共享交互和信息反馈管控的有效途径。

## 2.3 负荷侧

### 2.3.1 智慧家庭能源管理

用电信息智能高效互动是挖掘用户侧效能、实

现用电信息增值的关键手段,应用于智慧家庭用电管理和用电安全<sup>[45]</sup>。用电管理方面,面向新型电力系统数字化的非侵入式负荷监测,采样用户总进线的电压和电流等电气参数,通过对某一特定区域的数据采集、数据预处理、事件检测、特征提取和负荷分解,可获取该范围内的负荷数量、负荷类别、所处工作状态以及对应的能耗情况等信息,实现用户用电行为辨识<sup>[46-48]</sup>;用电安全方面,通过智能传感终端(现场监控模块、传输模块),将引起电气火灾的主要因素(线缆温度、电流、剩余电流、故障电弧等)进行实时在线监测与统计分析、汇总,并实时传送至云服务平台<sup>[48]</sup>。并且,融合数字信息安全技术对用户能效与发电进行全面监测与分析,便于公共服务平台或家庭服务供应商为用户制定个性化节能增效举措以及设备巡检等服务,促进用户主动参与需求响应,优化用户用电行为<sup>[49]</sup>。

### 2.3.2 综合能源需求响应

新型电力系统数字化为用户参与需求响应提供数据连接<sup>[44]</sup>,可提升响应决策的智能化,充分挖掘用户参与需求响应的主动性。电力能源产消者可通过分布式可再生能源发电,借助电动汽车、新型储能等方式将能源进行转换和存储,借助数字变压器等数字化电力设备实现运行数据监测,利用电源管理系统、楼宇管理系统、电能管理软件等实现主动能耗管理,并以负荷聚合商、用户 to 用户等形式售给电网或其他市场参与者,推动需求侧管理与主动响应、车网互动(vehicle-to-grid, V2G),提升能源利用率<sup>[50]</sup>。例如,借助 AI、大数据等技术学习分析电能/氢能等新能源汽车的行驶习惯、负荷特性,进一步结合电价及主动配电网运行情况,可以对充电桩、加氢站等设施进行科学管理、高效运营<sup>[51]</sup>。

并且,综合能源需求响应是电力需求响应在电、气、冷、热等多种能源网络应用场景中的拓展,利用多能耦合互补特性,深度挖掘用户侧负荷削减、转移潜力,实现多能协同优化和高效利用<sup>[52]</sup>。而消费者往往无法获取完全的信息,会导致有限理性、非理性、主观不确定性等一系列问题,需要提高综合需求响应策略中对消费者行为预测的准确性及主观不确定性的关注,实现消费者与综合需求响应的双赢<sup>[53]</sup>。未来可基于用电大数据和客户画像,建设需求侧综合智慧响应平台,有机结合价格型、激励型需求侧调节手段,鼓励负荷聚合商、虚拟电厂(virtual power plant, VPP)等新型市场主体参与需求侧响应,融合数智化技术辨识各类灵活资源特性,进行用户侧资源动态聚合和响应能力评估,提高响应机制的多样性和高效性,并研究用户侧信息安全与防护技术。

## 2.4 储能

储能是新型电力系统电力供应保障和安全稳定运行的重要支撑,可以显著提高系统供电可靠性,减少弃风弃光,提高系统的综合能效<sup>[35]</sup>。另外,汽车能源网络使得电动汽车作为灵活移动储能资源<sup>[47]</sup>有了网架支撑,但真正让电动汽车群成为电网灵活调节资源的关键在于数智化技术,无论是有序充电还是 V2G 技术的实现都离不开新型电力系统数字化。新型储能对新能源开发消纳和电力系统稳定运行的关键支撑作用逐步凸显,其可以有效提供调峰、调压、调频、备用、黑启动、惯量响应等多种功能。其中,共享储能市场需要考虑储能供应商、共享储能运营商、储能用户等不同的利益相关者之间的博弈<sup>[54]</sup>。

未来应研究智能感知、数字孪生及前沿储能技术支撑下的储能系统/电池运行监控,确保电池免除火灾和燃爆造成的人身和财产安全,逐步构建包含电池、制造、管理等环节的全生命周期溯源追踪体系,实现数智化技术对储能全链条的改造升级和降本增效;应关注集中式、分布式、共享式储能商业运营模式,结合全域数据分析与智能优化决策,实现新能源项目共享储能容量、分摊储能费用,提高储能设施利用率等问题<sup>[55]</sup>。

## 3 数智化技术创新应用挑战

数能融合、数智赋能新型电力系统技术革新与数字化、智能化转型,主要体现在一些新兴重点业务中,包括:碳中和管理、电力市场与碳市场、多能源耦合及能源-交通-信息耦合、现代电力客户服务、产业转型与产业新生态等,本节对相关数智化新技术、新产品的研究现状和应用案例进行了分析,在此基础上对未来的应用挑战进行了研判。

### 3.1 碳中和管理

1) 碳足迹溯源:基于新型电力系统数据采集、监测、储存、分析等全过程技术,对企业和产品从采购、运输、生产、仓储、销售等全流程进行碳足迹溯源,并且记录每个环节数据流转信息,可以有效实现产业链、供应链上下游的碳足迹时空溯源,有助于识别高碳排环节、辅助绿电交易以及产品碳标签管理。进一步结合区块链通过部署智能合约芯片装置,碳排放数据产生时即被加密并写入区块链网络,提升数据实时性、精确度和可信度<sup>[56-57]</sup>。同时,任何企图篡改数据的行为都将被区块链记录留存,碳排放数据造假、作弊门槛被大幅提高,辅助实现碳足迹精准可信溯源。

2) 碳排放计量:碳排放核算需要聚焦电能从

“被生产”到“被消耗”的全生命周期过程,构建电力系统全环节碳核算方法。文献<sup>[57]</sup>基于电力系统碳排放流分析理论,提出一种全环节碳计量方法,实现源、网、荷三侧电碳信息的“分钟级”实时碳计量和“用户级”精细碳计量。另外,考虑到电力行业的数据优势,结合 AI、大数据分析等技术,通过电-碳之间的折算关系也可以有效估算短期碳排放<sup>[58]</sup>。未来可以基于连接发电企业的生产数据、碳排放数据、物料消耗数据和外部数据,新型电力系统数字化可实现对碳排放、碳减排及碳汇数据的实时采集传输,构建实时碳核算体系,改善数据周期长导致无法及时量化碳中和路径、无法实时指导企业交易的问题<sup>[59]</sup>。

3) 碳普惠与碳积分:区块链与数智化技术相配合,智能传感设备采集与碳普惠相关的数据之后,数据自动上链,有效减少了人为干预,保障数据在上链环节的真实准确性<sup>[7,60]</sup>。同时,使用区块链来记录碳普惠生态中绿色减排行为、积分和减排量等流向,并对上下游、不同环节进行相互校验,保证参与减排活动的数据真实性和可追溯性。另外,碳普惠结合区块链、IoT、隐私计算等技术,可以从源头保证参与减排活动的用户个人信息的安全和隐私,进而提升碳普惠参与者的积极性。

### 3.2 电力市场与碳市场

1) 虚拟电厂:虚拟电厂指结合新型电力系统数字化的控制、计算、通信等技术,把分布式电源、储能系统、可控负荷、电动汽车等多元异构分布式能源资源聚合起来,通过软件架构实现灵活调控,促进能源资源合理优化配置及利用。VPP 的概念更多强调的是对外呈现的功能和效果,其基本应用场景是电力市场。文献<sup>[61]</sup>针对多元竞争电力市场中电价电量不确定性对 VPP 投标策略的影响,提出一种 VPP 参与日前电力现货市场投标的主从博弈模型,有效实现 VPP 收益和社会效益最大化。2023 年 7 月,南方电网搭建的全国首个区域级 VPP 投运,在广东、广西省同步实现了调频、直控等快速响应。

2) 电力-碳市场协同:围绕源-网-荷-储、市场交易与监管等各环节,基于数智化技术,结合自愿减排量、绿色证书、绿电消纳凭证等,实现电力-碳市场的信息共享、协调联动。文献<sup>[62]</sup>基于碳排放流模型核算电能交易碳足迹,提出一种结合纳什议价模型的产消者 P2P 电-碳交易模型。另外,借助用户侧采集数据进行用户画像,发挥用户用电数据的社会经济价值,进一步支撑电碳耦合、电力-碳市场协同。2024 年,我国碳市场步入第三个履约期,全国温室气体自愿减排交易市场重启,国务院公布《碳

排放权交易管理暂行条例》,将进一步加强绿证市场与节能降碳政策、碳核算和碳市场的衔接。国家电网区块链公司技术成果可以提供智能合约、数据溯源、身份认证等 10 余类区块链共性服务,应用于绿电绿证交易、绿电溯源、电碳协同等 100 余项场景,服务上下游企业超 1000 家、用户 50 000 余家。

### 3.3 多能源耦合及能源-交通-信息耦合

1) 多种能源耦合协同运行:多能流耦合具有显著非线性与多时间尺度特征,要求新型电力系统具备精准感知与高效通信技术、高并发接入与海量数据管理技术及融合建模、趋优进化技术,进一步增强数字电网末端对分布式源、荷、储资源的实施感知与精准调控<sup>[63]</sup>。文献[64]提出基于 IoT 的智慧能源管理系统框架和两阶段优化调度模型,用于智能冷却、加热和电力组合商业建筑系统的能源管理。云-边-端协同技术利用云层的强大算力、边层的部署灵活性、端层的全面感知与及时响应,可实现云中心、边缘侧与端侧的数据协同和业务协同推动多能源协调运行。如图 2 所示,“云-雾-边-端”协同架构下,处理过程更好地在边缘层完成,减轻云端负荷与网络延时,实现数字电网与电力 IoT 系统海量数据的全面感知、采集、处理和业务应用<sup>[65]</sup>。

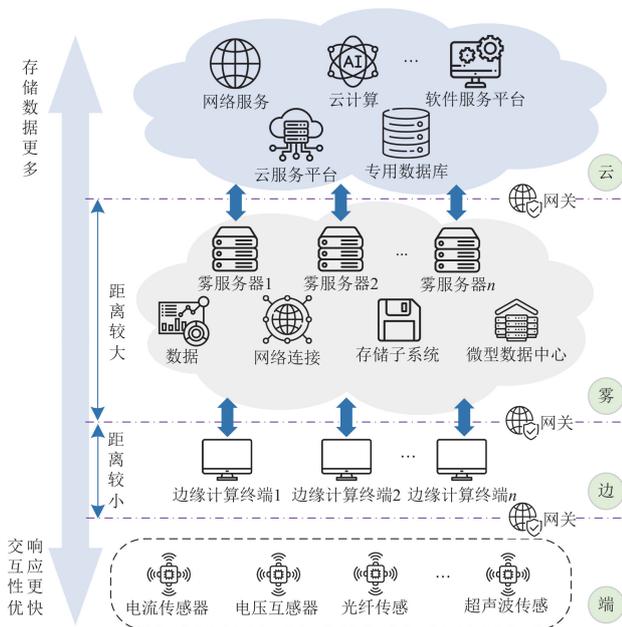


图 2 电力 IoT 云-雾-边-端协同架构示意图

Fig. 2 Cloud-fog-edge-end collaboration architecture of power internet of things

2) 能源-交通-信息耦合:能源-交通-信息三网融合,是能源低碳化、数字化转型和交通强国建设的必然选择。结合多种能源的业务应用场景,其关

键技术主要包括:复杂网络建模及扰动传播分析,多源海量异构数据价值挖掘,交通-能源网多时间尺度交互机理研究,三网多重不确定耦合作用,三网融合下的多元社会化行为分析<sup>[66]</sup>。文献[67]以氢燃料电池电动汽车为研究对象,提出一种同时考虑电网、加氢站、制氢站的协调规划策略,对电网、气网和交通网的协同作用和耦合关系进行了建模。并且,基于商业模式和市场驱动,融合数智化技术开发“能源-交通”能效数据模型,可以开展 VPP、分布式充储站点电网响应服务、充电导航、交通碳交易服务等,指导能源-交通-信息基础设施规划建设<sup>[68]</sup>。

### 3.4 现代电力客户服务

海量高不确定性、气象敏感性新能源高渗透接入中低压配电网,广泛低压用户与电网交互显著增强,客服人员迫切需要即时掌握用户所在配电网的拓扑信息和运行状况,低压侧透明化成为迫切需求<sup>[1,3]</sup>,只有借助 IoT、AI 和大数据等技术,才能有效打破线上各渠道服务及信息交互的专业壁垒,促进各渠道数据贯通,推动客户服务数据共享与信息增值,引导和激励用户选择需求响应、节能减碳等行为,辅助碳普惠、碳积分等政策的推行。并且,数智化技术对来自语音客服(语音)、网络媒体(文本)、运行数据等不同渠道的多模态数据进行挖掘分析,可以更好地支持用户停电信息管理,辅助极端天气场景下的停电舆情风险评估,提升现代电力客户服务的主动服务能力及智能化服务效能<sup>[69-70]</sup>。

### 3.5 产业转型与产业新生态

市场需求驱动、技术研发与升级、经济效益转化形成良性循环,是新型电力系统数字化发展的动力源泉。首先,探索和衍生数字化产品生态与商业模式,推动跨域融合与多元合作。例如,智能传感、安防、智慧城市等代表性领域,需考虑用户个性化消费需求,提供多样化、定制化综合服务。其次,在电力数字化装备产业链等领域,加大对 IoT、AI、云计算、芯片等技术的科研投入,研发微型智能传感、电力专用芯片等数字产品,突破“卡脖子”技术,以场景创新和应用示范牵引国产替代<sup>[8]</sup>。南方电网数字集团研发电力智能微型传感器,开发了“数研极目”传感器自主品牌,涵盖电气量、非电气量等多个产品系列,已推广应用数十万套。

同时,应关注电力系统数字化转型中专用软件架构复杂性指数上升的操作系统研发,逐步完善数据体系及通用语义解析模型,实现跨业务、跨应用的全域数据互联。最后,需要发挥新型电力系统在产业数字化转型中的龙头作用,吸引产业链上下游资源向数字化电网产业集聚、协同发展,推动数字

产业集群与上下游数字生态发展。

### 4 数智化技术应用的重点发展趋势

数智化技术在新型电力系统中的应用和发展过程是行业发展范式的根本改变,将给行业安全架构、组织模式、技术体系、数字化生态等带来全面变革,本节总结展望了新型电力系统信息安全防护体系、跨业务共享区块链平台、电力行业专用大模型和全域物联生态营造等数智化重点发展方向,为新型电力系统数字化、智能化转型的整体布局提供支撑。

#### 4.1 构筑新型电力系统信息安全防护体系

由于新型电力系统数字化架构的开放性、多源异构性,以及终端设备和应用场景的多样性、运行环境复杂性,数据流转全环节面临严峻的安全和隐私问题<sup>[14,38]</sup>。新型电力系统中海量分布式电源、充电桩等用户侧设备接入电网,电网与用户、用户之间的灵活互联互通与安全高效协同难题亟待研究。相关数字化安全防护技术包括密码技术、身份认证与访问控制技术、网络安全接入技术、硬件保护服务等,隐私计算技术包括同态加密、差分隐私、联邦学习、多方安全计算技术等<sup>[71]</sup>。未来可以结合 AI、区块链、量子通信等技术,提升安全防护的主动性,开展入侵检测、漏洞检测、智能攻防等研究。

#### 4.2 构建跨业务数据共享区块链平台

电网业务部门管理层级众多、业务系统相对独立,信息共享和业务协作效率差强人意,亟需建立具有电力特色的跨部门协作规范。借助数据交换平台、多级数据中台等手段,可实现数据资源的可视化,并通过接口调用、数据核验、联合建模等方式,规范数据安全授权机制,打通不同业务系统信息共享通道,提升资源利用率与业务部门协同效率。例如,区块链的去中心化特征提升数据安全性,通过智能合约约定合约主体、成立条件及内容,有助于打破电网中的数据壁垒,促进信息的横向流动。如图 3 所示,构建基于区块链的数据全流程可信追踪机制,可以有效提升多方协同合作的能力<sup>[56,60]</sup>。

#### 4.3 开发海量数据-知识驱动电力行业大模型

一致性和连续性是评估 AI 模型对物理世界认知能力的重要指标,阐明模型的运行机制对实际应用中的安全性、性能局限性和可信度至关重要。自然语言处理技术融合新型电力系统智能采集、监测、感知、分析、应用等技术,尤其是大模型技术将激发对电力行业大样本量、大数据量、大知识量的价值利用,为通用电力 AI 及认知智能带来巨大发展契机<sup>[72]</sup>。AI 作为发展新质生产力的重要引擎,未来需要推动电力 AI 应用从全域感知智能趋向认知智

能,基于海量电力专业历史数据和相关领域知识,发展电力时空数据预测、设备运维、资产管理、能源管理与优化、市场交易等电力领域通用 AI 大模型,提升 AI 大模型的可信度与可解释性,实现电力行业数智化发展目标。2023 年 12 月,南方电网发布首个自主可控电力大模型“大瓦特”,其已在智能客服、电力调度和安全监管等垂直领域得到应用<sup>[73]</sup>。

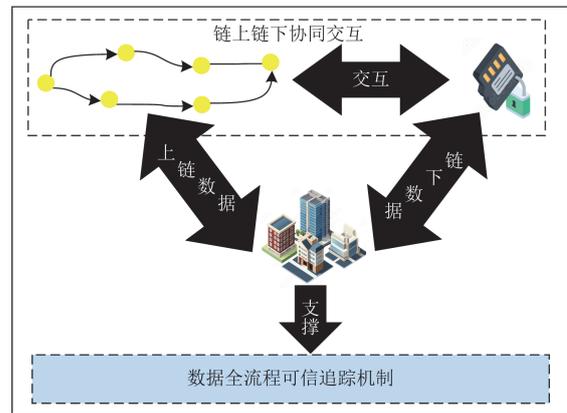


图 3 基于区块链的数据可信追踪机制

Fig. 3 Trusted tracking mechanism for data based on blockchain

#### 4.4 营造新型电力系统数字化全域物联生态

1) 共享数据资产管理与利用:利用电力大数据准确性高、实时性强且能充分反映区域经济和企业经营状况等优势,推动新型电力系统数据管理、集成与共享,以及数据服务等数据资产业务的定制开发和应用推广,构建跨域数据交换安全协议,加强数据共享过程的监督,逐步实现数据资产治理和市场优化配置。例如,绿色金融领域中电力-金融数据共享,结合 AI、大数据等技术,辅助构建用户征信画像与银行风控,为企业提供绿色信贷、债券、保险及碳金融等多元产品和服务,推动金融资源的合理配置,同时约束用户用电行为合法合规;电力-政务数据共享,充分挖掘“电-碳”相关性,建立全国范围、地区级、行业级、企业级的碳排放监测、核算和预测模型,辅助电能替代市场分析与低碳化转型<sup>[62,74]</sup>。南方电网碳资产管理有限公司结合数字化建设,着力构建绿色投融资评估体系,实现投融资活动全生命周期全环节的可视化追踪管理,支持能源产业链绿色转型与实体企业绿色创新发展。

2) 共建技术支撑与标准体系:加大前沿技术突破创新和数字化电网应用中创新链、产业链和资金链支持,加速科技成果向经济效益、资源高效配置的转化,实现数智化技术支持体系的建设与升级。随着新型电力系统数字化内涵动态演进和技术突破创新,其标准化工作具有长期性和渐近性特征,需

要通过政府引导、专家协同优化共建相关技术标准、应用标准和行业标准,形成专业技术标准与行业应用标准紧密结合的产业标准体系。

3) 共创公共服务平台:坚持以能源资源可持续、服务社会民生为引领,加快新型电力系统数字化产业公共服务平台建设,提升公共服务质量感知、控制、评价与决策的科学性和精准性,提升公共服务管理系统的整体运行效能;加快汇集技术、资金、人才、信息等公共服务资源,形成一个覆盖全国与地方各级且具有高度产业适应性和地区适应性的新型电力系统数字化产业公共服务平台;围绕数智化技术应用的具體服务需求,为各类技术使用厂商和企业提供异质化、高效率 and 高质量现代公共服务。

## 5 结语

本文围绕新型电力系统构建下的技术需求与业务特点,全面研究了新型电力系统中的数据过程、关键技术以及应用场景。首先,结合电网中的数智化技术应用概述了数据采集、处理、传输、存储与共享、分析与利用等数据流转全过程特性。然后,在此基础上全面综述了数智化技术在新型电力系统源-网-荷-储各环节中的应用情况。最后,总结展望了新型电力系统五大数字化业务领域创新场景,并从系统安全、业务架构优化、电力行业专用大模型和全域物联生态营造视角出发,提出了未来电力行业数字化转型的建设性方向。

未来仍需探究新型电力系统数字化转型中破除现有网络安全体系存在的业务壁垒方法,以及在实际应用中智能传感面向广泛低压用户灵活调控技术,以数智化技术创新与应用助推新质生产力发展,发挥电力产业链在数字经济时代的引领作用,推动能源低碳化与数字化高效转型。

## 参考文献

- [1] 任大伟, 侯金鸣, 肖晋宇, 等. 支撑双碳目标的新型储能发展潜力及路径研究[J]. 中国电力, 2023, 56(8): 17-25.  
REN Dawei, HOU Jinming, XIAO Jinyu, et al. Research on development potential and path of new energy storage supporting carbon peak and carbon neutrality[J]. Electric Power, 2023, 56(8): 17-25.
- [2] 印欣, 张锋, 阿地利·巴拉提, 等. 新型电力系统背景下电热负荷参与实时调度研究[J]. 发电技术, 2023, 44(1): 115-124.  
YIN Xin, ZHANG Feng, ADILI Balati, et al. Study on participation of electricity-driven thermal load in real-time scheduling of new power system[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(1): 115-124.
- [3] 朱瑞, 娄奇鹤, 靳晓凌, 等. 适应新型电力系统的电网基建功能化投资结构演化研究[J]. 中国电力, 2024, 57(9): 194-204.  
ZHU Rui, LOU Qihe, JIN Xiaoling, et al. Evolution of functional investment structure of power grid infrastructure suitable for new power system[J]. Electric Power, 2024, 57(9): 194-204.
- [4] MISHRA R, RAO N B K, D RAUT R, et al. Internet of things (IoT) adoption challenges in renewable energy: a case study from a developing economy[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 371.
- [5] 戴璟, 王剑晓, 张兆华, 等. 新型电力系统形态特征与关键技术[J]. 新型电力系统, 2023, 1(2): 161-183.  
DAI Jing, WANG Jianxiao, ZHANG Zhaohua, et al. Morphological characteristics and key technologies of new power system[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(2): 161-183.
- [6] 王相宇, 任洪波, 吴琼, 等. 面向碳中和的多源异质全可再生能源系统优化规划方法研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(7): 136-145.  
WANG Xiangyu, REN Hongbo, WU Qiong, et al. Research on optimal planning method of multi-source heterogeneous all-renewable energy system facing carbon neutrality[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(7): 136-145.
- [7] 董昱, 孙大雁, 许丹, 等. 新型电力系统电力电量平衡的挑战、应对与展望[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-18 [2024-09-09].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240826.1656.007.html>.  
DONG Yu, SUN Dayan, XU Dan, et al. Challenges, response and prospects for power balance in new power systems[J]. Proceedings of the CSEE: 1-18[2024-09-09].  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240826.1656.007.html>.
- [8] 朱继忠, 周迦琳, 张迪. 清洁能源和电力系统碳足迹全生命周期核算综述[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-21 [2024-09-09].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240621.1615.005.html>.  
ZHU Jizhong, ZHOU Jialin, ZHANG Di. Review of full life-cycle carbon footprints accounting of clean energy and power systems[J]. Proceedings of the CSEE: 1-21 [2024-09-09].  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240621.1615.005.html>.
- [9] 江俊杰, 胡军, 马国明, 等. 数字化电力装备专用传感应用需求与发展趋势[J]. 高电压技术, 2024, 50(8): 3271-3307.  
JIANG Junjie, HU Jun, MA Guoming, et al. Application

- requirements and development trend of special sensors in digital electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3271-3307.
- [10] 李鹏, 习伟, 蔡田田, 等. 数字电网的理念、架构与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5002-5017.  
LI Peng, XI Wei, CAI Tiantian, et al. Concept, architecture and key technologies of digital power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5002-5017.
- [11] 曾梦好, 甘露, 张迪, 等. 以数字电网促进新型电力系统 IT 与 OT 融合的思考[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(9): 179-188.  
ZENG Mengyu, GAN Lu, ZHANG Di, et al. Thinking of promoting integration of IT and OT in new power system with digital grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(9): 179-188.
- [12] FANG C, ZHANG Y, HE Y, et al. Architecture and key technologies of geographic information system highly integrated with power grid dispatching and control system[C] // 2023 IEEE 6th International Conference on Information Systems and Computer Aided Education (ICISCAE), September 23-25, 2023, Dalian, China: 139-145.
- [13] LIU Y, ŠTEFANOV A, SEMERTZIS I, et al. Graph CCI: critical components identification for enhancing security of cyber-physical power systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Cyber-Physical Systems, 2024, 2: 340-349.
- [14] 陈振宇, 刘东, 高兴宇, 等. 一种面向电力调控云的高效运维方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 175-181.  
CHEN Zhenyu, LIU Dong, GAO Xingyu, et al. An efficient operation and maintenance method for power dispatching and control cloud[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 175-181.
- [15] 李钦豪, 张勇军, 陈佳琦, 等. 泛在电力物联网发展形态与挑战[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 13-22.  
LI Qin hao, ZHANG Yongjun, CHEN Jiaqi, et al. Development patterns and challenges of ubiquitous power internet of things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 13-22.
- [16] 李鹏, 毕建刚, 于浩, 等. 变电设备智能传感与状态感知技术及应用[J]. 高电压技术, 2020, 46(9): 3097-3113.  
LI Peng, BI Jiangang, YU Hao, et al. Technology and application of intelligent sensing and state sensing for transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3097-3113.
- [17] ZHANG J, WANG Y, YANG Y, et al. Fault diagnosis and intelligent maintenance of industry 4.0 power system based on internet of things technology and thermal energy optimization[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024, 55.
- [18] YANG J, ZHANG W, GUO F. Distributed Kalman-like filtering and bad data detection in the large-scale power system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(8): 5096-5104.
- [19] 许青, 张龄之, 梁琛, 等. 基于联合时序场景和改进 TCN 的高比例新能源电网负荷预测[J]. 广东电力, 2024, 37(1): 1-7.  
XU Qing, ZHANG Lingzhi, LIANG Chen, et al. Short-term load forecasting for power system with high proportion new energy based on joint sequential scenario and improved TCN[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(1): 1-7.
- [20] ZHANG L, ZHU J, ZHANG D, et al. An incremental photovoltaic power prediction method considering concept drift and privacy protection[J]. Applied Energy, 2023, 351.
- [21] 王红霞, 王波, 董旭柱, 等. 面向多源电力感知终端的异构多参量特征级融合: 融合模式、融合框架与场景验证[J]. 电工技术学报, 2021, 36(7): 1314-1323.  
WANG Hongxia, WANG Bo, DONG Xuzhu, et al. Heterogeneous multi-parameter feature-level fusion for multi-source power sensing terminals: fusion mode, fusion framework and application scenarios[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(7): 1314-1323.
- [22] KARTHIKA S, RATHIKA P. An adaptive data compression technique based on optimal thresholding using multi-objective PSO algorithm for power system data image[J]. Applied Soft Computing, 2024, 150.
- [23] 曾飞, 杨雄, 苏伟, 等. 基于区块链与数据湖的电力数据存储与共享方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 48-54.  
ZENG Fei, YANG Xiong, SU Wei, et al. Power data storage and sharing method based on blockchain and data lake[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 48-54.
- [24] 刘思放, 王晓东, 盛肖宁. 面向电力系统业务的边云协同应用分析[J]. 内蒙古电力技术, 2022, 40(6): 51-56.  
LIU Sifang, WANG Xiaodong, SHENG Xiaoning. Analysis of edge-cloud collaboration application oriented to power system services[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2022, 40(6): 51-56.
- [25] 叶青. 人工智能数据分析平台 快速高效巡检抽水蓄能电站[N]. 科技日报, 2023-05-19(008).  
YE Qing. Artificial intelligence data analysis platform for fast and efficient inspection of pumped storage power stations[N]. Science and Technology Daily, 2023-05-19(008).

- [26] 郝伟韬, 蔡国田, 卢俊瞳, 等. 源网荷储互动减碳研究综述[J]. 广东电力, 2023, 36(11): 64-74.  
HAO Weitao, CAI Guotian, LU Juntong, et al. Review of source-grid-load-storage interactive carbon reduction research[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(11): 64-74.
- [27] 华志刚, 范佳卿, 郭荣, 等. 人工智能技术在火电行业的应用探讨[J]. 中国电力, 2021, 54(7): 198-207.  
HUA Zhigang, FAN Jiaqing, GUO Rong, et al. Discussion on application of artificial intelligence technology in thermal power industry[J]. Electric Power, 2021, 54(7): 198-207.
- [28] XIN X, CHEN P, LIU H, et al. Research on load prediction of low-calorific fuel fired gas turbine based on data and knowledge hybrid model[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 253.
- [29] 肖祥武, 王丰, 王晓辉, 等. 面向工业互联网的智慧电厂仿生体系架构及信息物理系统[J]. 电工技术学报, 2020, 35(23): 4898-4911.  
XIAO Xiangwu, WANG Feng, WANG Xiaohui, et al. Bionic structure and cyber-physical system for intelligent power plant oriented to the industrial internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(23): 4898-4911.
- [30] LIU Z, HOU M, SA G, et al. Gas turbine multi-working conditions identification and performance prediction based on deep learning and knowledge[J]. Energy, 2024, 308.
- [31] WANG R, SUN W, WANG J, et al. Low-carbon transition model for power generation companies in China: a case study[J]. Energy Reports, 2023, 9(7): 874-883.
- [32] 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.
- [33] SIOSHANSI R, DENHOLM P, ARTEAGA J, et al. Energy-storage modeling: state-of-the-art and future research directions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(2): 860-875.
- [34] XIE L, WU J, LI Y, et al. Automatic generation control strategy for integrated energy system based on ubiquitous power internet of things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(9): 7645-7654.
- [35] 梁志峰, 叶畅, 刘子文, 等. 分布式电源集群并网调控: 体系架构与关键技术[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3791-3802.  
LIANG Zhifeng, YE Chang, LIU Ziwen, et al. Grid-connected scheduling and control of distributed generations clusters: architecture and key technologies[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3791-3802.
- [36] 张子仪, 蔡泽祥, 郭采珊, 等. 面向泛在电力物联网的分布式云数据中心优化选址[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 36-42.  
ZHANG Ziyi, CAI Zexiang, GUO Caishan, et al. Optimization of distributed cloud computing data center layout for ubiquitous power internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 36-42.
- [37] AL-RUBAYE S, KADHUM E, NI Q, et al. Industrial internet of things driven by SDN platform for smart grid resiliency[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(1): 267-277.
- [38] WANG Y, CHEN C, ZHANG S, et al. A tri-level programming-based frequency regulation market equilibrium under cyber attacks[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(4): 1-10.
- [39] TARIQ M, ALI M, NAEEM F, et al. Vulnerability assessment of 6G-enabled smart grid cyber-physical systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(7): 5468-5475.
- [40] 刘舒巍, 杨和辰, 余夏, 等. AI 技术在电力系统发展中的应用与前景[J]. 南方能源建设, 2024, 11(5): 149-158.  
LIU Shuwei, YANG Hechen, YU Xia, et al. Application and prospect of AI technology in power system development[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(5): 149-158.
- [41] 李东东, 仇文杰, 周波, 等. 考虑源荷相关性及条件风险价值的综合能源系统参与电能-备用市场优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(18): 24-34.  
LI Dongdong, QIU Wenjie, ZHOU Bo, et al. Optimization of an integrated energy system participating in energy and spinning reserve markets considering source-load correlation and conditional value of risk[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 24-34.
- [42] 王雄飞, 鲁恒聪, 李根柱, 等. 泛在电力物联网背景下微网参与调峰辅助服务研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(9): 1-9.  
WANG Xiongfei, LU Hengcong, LI Genzhu, et al. Microgrid participation in peaking-shaving assistant services under the background of ubiquitous power internet of things[J]. Smart Power, 2019, 47(9): 1-9.
- [43] KONG X, XU Y, JIAO Z, et al. Fault location technology for power system based on information about the power internet of things[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(10): 6682-6692.

- [44] WU B, HU Y. Analysis of substation joint safety control system and model based on multi-source heterogeneous data fusion[J]. IEEE Access, 2023, 11: 35281-35297.
- [45] ROBERTO J Y N, ALVARO O V A, GUSTAVO L P N D, et al. Real-time energy and economic performance of the multi-zone photovoltaic-drive air conditioning system for an office building in a tropical climate[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 297.
- [46] WU X, GUO Y, YAN M, et al. Non-intrusive load monitoring using identity library based on structured feature graph and group decision classifier[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(3): 1958-1973.
- [47] FU T, WANG C, CHENG N. Deep-learning-based joint optimization of renewable energy storage and routing in vehicular energy network[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(7): 6229-6241.
- [48] ANISHA N, VIJAYAKUMAR K, MUNESH S. Occupancy detection and localization strategies for demand modulated appliance control in internet of things enabled home energy management system[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 167.
- [49] HUANG Z, WANG F, LU Y, et al. Optimization model for home energy management system of rural dwellings[J]. Energy, 2023, 283.
- [50] MA Y, LU Y, YIN Y, et al. Pricing strategy of V2G demand response for industrial and commercial enterprises based on cooperative game[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 160.
- [51] SUN Y, CAI Z, GUO C, et al. Collaborative dynamic task allocation with demand response in cloud-assisted multiedge system for smart grids[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(4): 3112-3124.
- [52] AMIRI M M, AMELI M T, AGHAMOHAMMADI M R, et al. Day-ahead coordination for flexibility enhancement in hydrogen-based energy hubs in presence of EVs, storage, and integrated demand response[J]. IEEE Access, 2024, 12: 58395-58405.
- [53] ZHENG S, QI Q, SUN Y, et al. A risk diversification strategy for integrated demand response under imperfect rationality[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(4): 3624-3638.
- [54] WANG C, XU H, GUO C, et al. Multi-stakeholder behavior analysis of shared energy storage market based on evolutionary game[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2024: 1-12.
- [55] 朱志芳, 董红, 陈丽萍, 等. 以电网公司为投资主体的电网侧储能效益分析[J]. 广东电力, 2022, 35(6): 1-9.  
ZHU Zhifang, DONG Hong, CHEN Liping, et al. Benefit analysis of grid-side energy storage with grid company as the main investor[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(6): 1-9.
- [56] CUI S, XU S, HU F, et al. A consortium blockchain-enabled double auction mechanism for peer-to-peer energy trading among prosumers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(3): 82-97.
- [57] 张宁, 李姚旺, 黄俊辉, 等. 电力系统全环节碳计量方法与碳表系统[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 2-12.  
ZHANG Ning, LI Yaowang, HUANG Junhui, et al. Carbon measurement method and carbon meter system for whole chain of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 2-12.
- [58] 曾金灿, 何耿生, 李姚旺, 等. 基于卷积神经网络与轻量级梯度提升树组合模型的电力行业短期以电折碳方法[J/OL]. 上海交通大学学报: 1-23[2024-05-07]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.382>.  
ZENG Jincan, HE Gengsheng, LI Yaowang, et al. A short-term carbon emission accounting method using electricity data based on convolutional neural networks and light gradient boosting machine combined model in power industry[J/OL]. Journal of Shanghai Jiao Tong University: 1-23[2024-05-07]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.382>.
- [59] 王仲, 马思明, 王婷婷, 等. 工业园区碳排放核算与“双碳”转型路径研究[J]. 南方能源建设, 2024, 11(5): 191-199.  
WANG Zhong, MA Siming, WANG Tingting, et al. Research on carbon emission accounting and the “dual carbon” transformation path of industrial parks[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(5): 191-199.
- [60] 高培道, 朱朝勇, 张扬, 等. 基于区块链技术的碳普惠平台研究[J]. 中国能源, 2022, 44(9): 43-50.  
GAO Peidao, ZHU Zhaoyong, ZHANG Yang, et al. Research on carbon inclusiveness platform based on blockchain technology[J]. Energy of China, 2022, 44(9): 43-50.
- [61] 彭超逸, 徐苏越, 顾慧杰, 等. 基于主从博弈的虚拟电厂参与多元竞争市场投标策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(7): 125-137.  
PENG Chaoyi, XU Suyue, GU Huijie, et al. Bidding strategy for a virtual power plant participating in a multiple competitive market based on the Stackelberg game[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 125-137.
- [62] 詹博淳, 冯昌森, 王晓晖, 等. 基于碳排放流模型的分布式产消者 P2P 电-碳交易机制[J/OL]. 上海交通大学学报: 1-21[2024-05-07]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki>.

- jsjtu.2023.139.  
ZHAN Bochun, FENG Changsen, WANG Xiaohui, et al. A P2P electricity-carbon trading mechanism for distributed prosumers based on carbon emission flow model[J/OL]. Journal of Shanghai Jiao Tong University: 1-21[2024-05-07]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.139>.
- [63] WANG J, CUI Y, LIU Z, et al. Multi-energy complementary integrated energy system optimization with electric vehicle participation considering uncertainties[J]. Energy, 2024, 309.
- [64] LIU C, WANG D, YIN Y. Two-stage optimal economic scheduling for commercial building multi-energy system through internet of things[J]. IEEE Access, 2019, 7: 174562-174572.
- [65] WANG P, ZHANG D, GAN L, et al. Key technologies and applications of collaboration between digital power grid and internet of things[J]. Digital Twins and Applications, 2024, 1(1): 26-37.
- [66] LI Z, WU Q, LI H, et al. Distributed low-carbon economic dispatch of integrated power and transportation system[J]. Applied Energy, 2024, 353.
- [67] TAO Y, QIU J, LAI S, et al. Coordinated planning of electricity and hydrogen networks with hydrogen supply chain for fuel cell electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(2): 1010-1023.
- [68] GHAZANFARI A, PERREAULT C. The path to a vehicle-to-grid future: powering electric mobility forward[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2022, 16(3): 4-13.
- [69] FATIMA K, SHAREEF H, COSTA F B, et al. Machine learning for power outage prediction during hurricanes: an extensive review[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 133.
- [70] 范敏, 杨青, 郭祥富, 等. 面向不平衡数据的配电网故障停电预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 96-106.  
FAN Min, YANG Qing, GUO Xiangfu, et al. Prediction method of power outage in a distribution network for unbalanced data[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 96-106.
- [71] CHEN S, CHENG H, ZHANG H, et al. Privacy-preserving coordination of power and transportation networks using spatiotemporal GAT for predicting EV charging demands[J]. Applied Energy, 2025, 377.
- [72] 佟佳弘, 武志刚, 管霖, 等. 电力调度文本的自然语言理解与解析技术及应用[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4148-4156.  
TONG Jiahong, WU Zhigang, GUAN Lin, et al. Power dispatching text analysis and application based on natural language understanding[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4148-4156.
- [73] 李天研. 南方电网发布首个电力“大模型”, 智能客服比例将达 75%[J]. 农村电工, 2024, 32(1): 3.  
LI Tianyan. China Southern Power Grid released the first power “large model”, the proportion of intelligent customer service will reach 75%[J]. Rural Electrician, 2024, 32(1): 3.
- [74] QIN M, YANG Y, ZHAO X, et al. Low-carbon economic multi-objective dispatch of integrated energy system considering the price fluctuation of natural gas and carbon emission accounting[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(4): 1-17.

收稿日期: 2024-05-24; 修回日期: 2024-10-25

作者简介:

王 朋(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为数字电网技术; E-mail: peng826@163.com

张 迪(1992—), 女, 通信作者, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为能源电力人工智能技术、电力系统优化调度运行; E-mail: dizhang@scut.edu.cn

张勇军(1973—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能电网与能源互联网的规划、运行与控制等。E-mail: zhangjun@scut.edu.cn

(编辑 张 颖)