

数字电网的理念、架构与关键技术

李鹏¹, 习伟^{1*}, 蔡田田¹, 于浩², 李鹏², 王成山²

(1. 南方电网数字电网研究院有限公司, 广东省 广州市 510663;

2. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 南开区 300072)

Concept, Architecture and Key Technologies of Digital Power Grids

LI Peng¹, XI Wei^{1*}, CAI Tiantian¹, YU Hao², LI Peng², WANG Chengshan²

(1. Digital Grid Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, Guangdong Province, China;

2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Nankai District, Tianjin 300072, China)

ABSTRACT: With the development and evolution of the fourth industrial revolution represented by digital technologies, building digital power grids based on the in-depth integration of advanced digital technologies is an important path to promote the digitalized transformation of power grid. Focusing on the basic concepts and ideas, this paper introduced the thinking and new features of digital power grid, and presented the technology architecture, including sensor measurement, edge computation, information communication, digital platform, cross-domain intelligence, and system security. Moreover, the challenges and key technical issues of the construction of digital power grid were discussed, and the value system of digital power grid was also prospected. This paper could provide some ideas and references for the development of digital power grid.

KEY WORDS: digital power grid; technical architecture; edge computation; data driven; artificial intelligence

摘要: 随着以数字技术为代表的第四次工业革命的发展与演进, 将先进数字技术与电力系统深度融合, 建设数字电网是推动实现电网数字化转型的重要路径。围绕数字电网的基本理念, 该文详细阐述了数字电网的技术内涵与技术特征, 构建了包含传感量测、边缘计算、信息连接、数字平台、跨域智能和系统安全的数字电网技术架构。在此基础上, 对数字电网建设所面临的挑战及关键技术进行探讨, 并对数字电网的价值体系进行展望, 以期对数字电网的发展提供一些思考和借鉴。

关键词: 数字电网; 技术架构; 边缘计算; 数据驱动; 人工智能

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB0906000, 2020YFB0906002)。

National Key R&D Program of China (2020YFB0906000, 2020YFB0906002)。

0 引言

改革开放以来, 我国社会经济高速发展, 取得了举世瞩目的成就。与此同时, 我国也成为世界第一大能源消费国与碳排放国^[1], 人民日益增长的美好生活需求与经济、环境、生态间不平衡发展的矛盾日益凸显。优化能源结构、提升能源利用效能成为当前我国能源技术与产业发展的重要任务, 也是支撑“碳达峰”、“碳中和”重大战略目标实现的关键所在^[2]。电网既是新能源开发利用的核心载体, 也是推动能源消费模式变革的重要途径^[3], 其位置关键、责任重大。

大数据、物联网、区块链、人工智能等先进数字技术的突飞猛进为电网提供了新的发展契机。然而, 如何将这些前沿科技与电网发展需求完美结合, 仍是亟待探索的课题。国内外针对数字技术在电网中的应用已开展了一些研究: 如在电网传感量测领域, 开展了基于 PMU 的广域高精度数字化同步量测^[4]、基于 AMI 技术的海量终端信息采集^[5]等; 在电网数据发掘利用领域, 通过将多维度、多领域数据融合, 实现了设备级健康状况感知预警^[6]、系统级高精度动态安全评估^[7]等; 在电网信息通信领域, 利用电力无线通信专网^[8]、互联网与移动终端融合应用^[9]等, 为高品质电网运行控制和用户灵活服务提供了支撑; 在电网运行控制领域, 人工智能技术已成为设备级^[10]、区域级^[11]和系统级^[12]运行控制水平提升的重要手段; 在电力市场领域, 将区块链技术与电网应用相结合, 实现了多方能源交易与分布式能源 P2P 交易等^[13]; 这些研究实践大都依托于经典的电气理论和电网技术, 为电网的数字化发

展做出了有益尝试。

与此同时，现代电力系统的庞大规模、多元构成要素和复杂技术集成等特征为电网数字化转型带来了长期挑战^[14]。特别是在以新能源为主体的新型电力系统建设背景下^[1]，系统的波动性将急剧增大，惯量明显降低；分布式特征更加明显，设备数量剧增；多元化主体需求差异增大，电网利益格局更加复杂^[15-17]。应对这些问题需求与技术瓶颈需要更有效地借助数字技术，其关键在于厘清电网数字化转型中的核心任务和关键路径，建立兼具科学性、前瞻性、系统性和可行性的电网数字化发展新视角和新思路。

2020 年，南方电网公司提出“数字电网”发展理念，将数字电网定义为“以新一代数字技术为核心驱动力，以数据为关键生产要素，以现代电力能源网络与新一代信息网络为基础，通过数字技术与能源企业业务、管理深度融合，不断提高数字化、网络化、智能化水平，而形成的新型能源生态系统”^[18]。在形态层面，数字电网将充分利用海量小微传感器、智能设备、电力物联网等手段实现物理电网的数字化升级，进而依托数字孪生的精准镜像、全景可观、动态演化及虚-实交互功能实现数字平台构建，从而通过大数据和先进计算技术，透过海量数据关系发现电网运行规律，推动实现电网的智能运行^[19]。在生态层面，将传统的电力能源交互界面拓展为能源、信息与数据的全方位交互界面，利用电网在算力、算法和数据资源上的优势，引导能量、数据、服务有序流动，推动重塑能源产业格局和构筑现代能源生态体系，支撑能源可持续发展^[20]。

目前，围绕未来电力能源系统的研究大量开展，并形成了智能电网、泛在电力物联网、能源互联网等诸多发展理念。如，智能电网侧重以电力与信息的双向流动为手段，建立高度自动化和广泛分布的电能量交换网络^[21]；泛在电力物联网侧重构建基于先进数字技术的信息网络，以实现电力运营各业务的万物互联和人机交互^[22]；能源互联网不再局限于电力网络，而是在兼容传统电网的前提下，构建考虑多类型能源系统的开放互联体系，表现为智能电网与泛在电力物联网的深度融合^[23]；智能全景电网则强调建立全息状态感知、全态量化评估和全域智能交互的电力系统^[24]。而数字电网旨在将电网长期以来的数字化、信息化发展成果进行系统化融合，在数字空间中重塑物理电网整体形态与特征，

以电网技术体系的全面数字化变革取代面向特定业务的技术发展模式，使数字技术的价值在电网中得以全面落地和充分释放，并赋予电网与前沿数字科技协同发展的能力。相应地，数字电网自身也将形成海量主体、信息能流耦合、多时空尺度、超大规模的复杂巨系统问题^[25]，给传统电力系统的理论体系、技术架构和研究方法带来基础性、颠覆性的挑战。

本文从“数字电网”的理念出发，面向新形势下电力能源系统的现实发展需求，分析了数字电网的技术内涵、特征与架构，梳理了数字电网构建的技术途径和发展路线，探讨了数字电网的关键技术及研究应用方向，并对其未来应用场景与技术价值进行了展望，希望能够为数字电网基础理论和技术方法的创新发展提供一定借鉴。

1 数字电网的新内涵与新特征

1.1 数字电网的技术内涵

数字电网建设涵盖了物理空间中电网的数字化、数字空间中电网的智慧化两方面内涵，是一项高度复杂的系统性工程。其中，物理电网的数字化是数字电网建设的必要基础，而数字孪生与数字平台则是构建数字空间中电网智慧的重要途径。

物理电网的数字化意味着一次、二次系统的共同变革，重点体现在 3 个方面：其一是电网状态的数字化，特别是在大量新能源发电、电力电子装置、新型电力装备等应用后，电网状态将以电气为主，光学、热力、流体、气体、机械等多物理过程并存，需要以高频、多模态的数据采集实现电网状态、设备状态、交易状态、管理状态全维度的状态感知，全面提升电网的可观性；其二是电网能流的数字化，即通过柔性可控装备的广泛部署，使物理电网的能量流动和控制响应特性能够由数字空间灵活定义，提高数字电网的可控性水平，这将给传统电网的运行模式带来颠覆性变化；其三是电力网络的数字化，即构建与复杂物理电网相对应的信息网络，形成电网海量构成要素间的广泛信息连接，增强电网发现、预警风险及主动保护的能力，提高电力系统的可靠性与弹性水平。

数字孪生旨在构建复杂物理实体从现实空间到虚拟数字空间的全息映射，在数字空间中刻画和模拟出物理电网实时状态和动态特征，从而可在虚拟环境中完成真实世界难以开展的各种分析研究，

并支撑各种业务应用^[26]。其主要特征包括^[27]：1) 精准镜像，即对物理电网实时状态进行数字化呈现；2) 全景可观，提供全周期、深层次系统状态观测；3) 动态演化，通过运行信息的反馈，在数字空间展现系统特性演化的动态过程；4) 虚-实交互，依托双向信息通信网络实现数据汇聚和决策指令的下发。

数字孪生是物理电网数字化后的整体呈现形态，也是形成和发挥数字电网价值的关键，可在数字空间中实现数据的汇聚、融合、呈现与交互，进而支撑以数据为基础提炼电网的机理、规则与知识，以数据为驱动构建电网智能，以数据为核心完成电网整体的系统组织与功能运作。其中，数据的核心作用源于两个方面：一是由于新形态下电网的时间常数小、频域分布广、动态过程混杂、准确模型难以获取，要求相关技术和研究方法从“模型等效”发展为更多地基于“数据驱动”；二是由于新形态下电网的波动性显著增加，源-网-荷-储角色融合变换，能量和信息交织互动，在解决不同时空尺度、不同运动过程中多个复杂对象的巨系统问题时，更需要依赖全局数据作为研究基础和纽带。

1.2 数字电网的技术特征

海量数据与广泛连接是数字电网物理层面的最基本特征，这构成了数字电网在数字空间中“知识发现”与“知识迁移”能力的基础，使数字电网能够完成从物理过程到“信号”、“数据”、“信息”，并进一步提炼为业务“知识”与“智能”，最终形成数字电网的“智慧”这一完整过程，如图1所示。数字电网的特征可概括为以下5个方面：

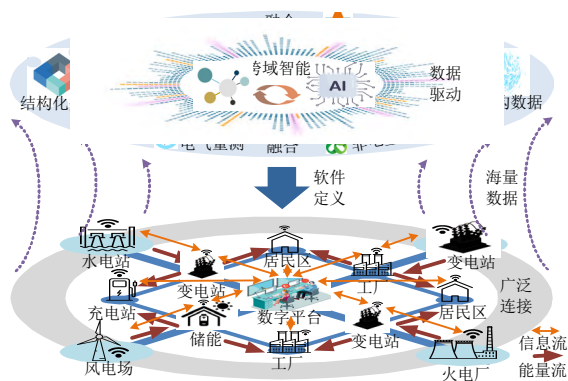


图1 数字电网的技术特征

Fig. 1 Characteristics of digital power grid

1) 海量数据。数字电网不以单一服务传统电网的特定“业务域”为目标，而是以公共的信息来源、数据资源和数据处理能力协调不同业务域的需

求。这首先要求数字电网在物理世界能够获取尽可能丰富、全面、关联、系统的信息量测，而不仅限于传统的少量量测节点和单独的电气量测。由此将使数字电网的数据量在空间广度、量测频度和数据类型等多个维度上爆炸式增长^[28]。

2) 广泛连接。传统电网的一次设备和网架实现了源、荷之间的电气连接；而数字电网将在此基础上，进一步依托先进的信息通信技术，构建与物理电网相对应的信息网络，形成横向广泛覆盖、纵向全面贯通的双向信息连接^[22]，使电网中的物理要素不仅在电气上相互影响，在信息层面也能互联互通、相互协同。广泛连接赋予了数字电网大规模信息-物理系统的本质特征^[29]，使其具备了从系统层面统一感知和控制的可能。

3) 软件定义。数字电网的信息-物理耦合特征增强了二次系统对一次系统的影响作用，同时各种先进电力电子装置和可控装备使数字电网具备了复杂运行控制策略的实现基础。这使数字电网能够在信息环节以通用计算能力满足多类型业务需求，通过软件定义实现面向不同场景的策略灵活配置和快速部署。此外，软件定义还赋予电网在数字空间中灵活定义物理系统运行状态的能力，实现数字感知物理、数字定义物理的闭环^[30]。

4) 数据驱动。海量数据和广泛连接使数字电网获取的数据资源大幅提升，使其能够从数据层面打破传统电网业务域的界限，在数字空间实现多源数据的融合与提炼，从而更加准确完善地刻画电网的运行状态和行为规律^[31]。在此基础上，以公共的数据资源与强大的算力服务于数字电网的业务需求，实现“数据驱动”的电网运行与控制，最大化利用“数据”价值，驱动数字电网形成高水平的业务“智能”。

5) 跨域智能。传统电网的信息化和数字化发展以业务为主线，服务特定业务需求，形成了面向不同业务域的信息自动化系统。而数字电网除了构建特定的业务级智能以外，更重要的是完成对跨业务数据的融合挖掘、知识发现和知识图谱的构建，实现不同业务与领域之间“知识”与“智能”的跨域迁移^[32]。这使数字电网在满足业务智能化的同时，还兼具了在系统层面对不同业务的主动协调能力，使电网知识能够在不同业务领域得以迁移和复用，从而大幅提升电网整体的“智慧化”水平。

可见，数字孪生是支撑数字电网构建和业务功

能实现的重要环节，二者在技术上互为支撑。例如，数字孪生的构建依赖于数字电网的海量数据和广泛连接，同时也为数字电网提供了精准镜像和全景可观的数字化分析手段；基于数字孪生的推演模拟可有效支撑电网运行态势分析，指导制定系统运行方案，并借助数字孪生的虚-实交互能力实现策略快速准确部署，实现数字电网的软件定义；借助不断更新的运行数据实现数字孪生与电网同步实时演化，为数字电网业务智能提供融合的数字平台支撑。

2 数字电网的技术架构

面向物理电网数字化和电网数字孪生构建两方面需求，数字电网技术架构在整体上可划分为传感量测、边缘计算、信息连接、数字平台、跨域智能、以及贯穿全局的系统安全 6 个层次，如图 2 所示。

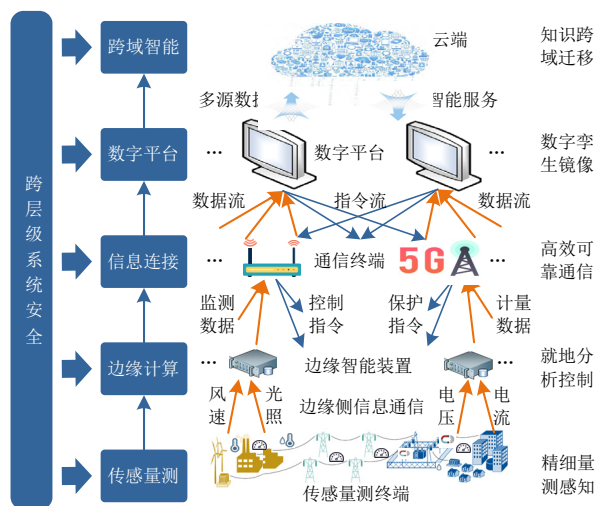


图 2 数字电网的技术架构

Fig. 2 Technical architecture of digital power grid

1) 传感量测层。

作为物理电网数字化的基础环节，传感量测层由面向电气及各种非电气环节的海量传感量测装置组成，是将物理过程转化为数字信号的电网“神经末梢”。其主要任务包括两方面：一是依托多物理量传感装置获取更完备的基础环节信息，通过建立数据的完备性解决模型和参数的准确性问题，刻画系统的复杂物理状态和动态过程，为电网精准状态感知提供基础^[33]，同时满足新能源发电实时状态检测、精准功率预测等需求；二是借助更加低成本、微型化的传感量测手段，满足电网多应用场景、复杂外部环境下的灵活部署应用，支撑大规模、网络化传感量测体系的构建^[34]，实现电网对新能源的全面测量感知。

2) 边缘计算层。

边缘计算为物理电网数字化后的海量数据获取及利用提供了针对性的解决方案，构成了数字电网的“低位神经中枢”。数字电网的边缘侧既是海量数据的来源侧，也是贴近大量感知和控制目标的对象侧。各种传感量测终端采集得到的运行数据通过局域通信网络汇集至边缘计算装置，就地完成快速分析计算与业务服务；由边缘计算得到的重要信息可进一步上传至云端，完成更加复杂的分析决策。依托边缘计算技术，将形成云-边协同的电网运行架构，可解决海量数据传输与集中利用带来的庞大资源需求，赋予数字电网在边缘侧对新能源等更加完备的就地感知、控制和业务协同优化能力，支撑新能源的安全高效消纳，同时为大规模电力系统提供更加快速灵活的运行基础^[35]。

3) 信息连接层。

信息连接是支撑电网数据和信息在边缘计算装置与云端数字平台之间双向流动的必要保障，构成了数字电网的“神经通路”。信息连接层既要支撑数字电网的大量边缘计算装置接入、多元要素连接、灵活组网等多样化需求，实现结构化和非结构化等多类型数据的高效传输；同时还要满足数字电网控制、保护等核心业务对通信实时性、可靠性和传输速率、时延抖动等指标的严苛要求，需要通过多种通信技术手段的协同利用来实现^[36]。

4) 数字平台层。

数字平台是具备云资源存储、大数据处理、数据驱动分析等能力的强大软硬件平台，是数字电网核心功能与智能的实现基础。在硬件方面，数字平台将依赖各种高性能计算和数据存储交换装备等组成先进架构下的计算资源集群，并实现对硬件资源的优化配置和协调调度；在软件方面，将利用大数据融合与挖掘分析手段，基于海量数据完成对物理电网的感知、认知及综合呈现，建立电网运行状态和核心特征的数字孪生镜像^[37]。在此基础上，由数字平台将数据驱动得到的电网知识与物理电网的原生机理融合，为电网提供具有前瞻性的态势判断和运行决策，保障高比例新能源接入后的系统安全运行。

5) 跨域智能层。

跨域智能的构建是数字电网的高级发展目标，构成了数字电网的“高位神经中枢”。数字电网在边缘侧发现局部系统的运行规律和发展态势，在云端由数字平台完成系统层面的全局知识发现。以此

为基础,跨域智能层将首先面向不同的应用需求,通过对特定数据的学习形成业务智能;进而借助数据网络将不同业务域的知识相互关联,形成电网的知识网络和知识图谱;最终实现知识在领域间的迁移,掌握电网各类业务应用间的相互影响和协同作用,实现跨业务域的智能协同^[38]。

6) 系统安全层。

系统安全是贯穿数字电网建设、运行、维护全过程的核心问题。对系统安全层的构建,既要注重各层次安全问题解决方案的有效性,也要兼顾数字电网整体安全技术体系的完整性。其重点在于两个方面:一是需要解决数字电网转型中的基础安全性问题,为海量终端接入、边缘侧业务应用、无线信息通信、数据安全保护、智能运行决策等环节提供基础安全保障^[39];二是利用数字新技术的应用提升电网安全性,如利用设备状态的全景深度感知提高运维精准度、利用边缘计算和图像识别实时发现电网故障风险等^[40]。

3 数字电网的关键技术与挑战

从技术架构出发,数字电网每个层级的构建均面临着传统技术数字化转型和前沿数字技术全面应用等多重挑战,需要运用多方技术手段的有效协同来共同应对。本节将围绕这一内容,针对传感量测、边缘计算、信息连接、数字平台、跨域智能、系统安全6个层级展开分析。

3.1 数字电网透明感知技术

电力系统运行状态的全面、准确数字化表征是构建数字电网的基础。然而在数字电网中,来自电网及上下游的感知与控制需求将出现爆发式的增长,这需要先进的传感量测技术实现多类型数据的数字化信息采集。为此,构建以智能传感器为数据来源、以多源数据融合为技术手段、以智能量测体系为实现方案的电网透明感知整体架构,是打造全测全控、全景感知的数字电网的首要关键^[41]。数字电网的透明感知技术如图3所示,具体包括以下内容:

1) 电网多物理量的宽量程高精度传感量测技术。电网当前的数据量测手段仅可获取局部片段的串行数据,只支持电网稳态运行的“慢过程”。这种有限范围、慢节奏、低精度的传感量测技术难以满足多样化的电力需求^[42]。为此,需要研究传感器多数据融合技术与多物理量集成技术,加强电气量

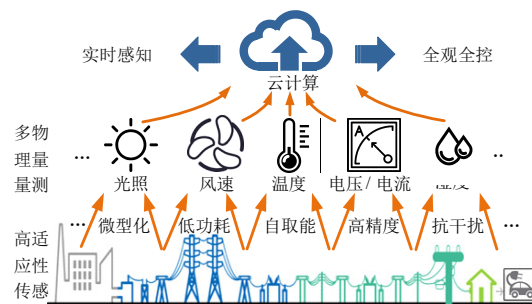


图3 数字电网的透明感知

Fig. 3 Transparent sensing of digital power grid

和非电气量传感技术理论研究和装置研发。在此基础上,通过广泛部署智能传感器,建设“传感网+电网”紧密联系的统一物理网络,实现电网对新能源的全面测量感知,满足新能源发电实时状态监测、精准功率预测等需求。

2) 面向复杂部署环境的高适应性传感量测技术。目前,电网的传感量测手段仍以“互感器+低压回路测控终端”为主,其复杂的安装流程与可靠供能要求限制了其自身的环境适应能力^[43]。为此,需要加强微型传感技术与微型能量收集技术等相关方面的理论研究,在结构方面提高传感器的小型化、集成化和微功耗水平;同时,将前沿智能技术与传感量测装置相结合,提升传感器的自主性、可靠性和抗干扰能力,实现覆盖数字电网全域的高渗透率智能测量感知。

3) 数字电网智能量测技术体系构建。电网运行状态的监控不完善和数字电网的全观全测要求,已成为电网发展的主要矛盾之一^[44]。这需要构建融合多类型量测手段的网络化传感量测体系,利用智能电表、SCADA、PMU等传感量测数据,以及电网历史运行、资产运维等多源数据,结合非侵入式负荷识别、智能状态诊断与监测等先进技术手段,形成“云-边-端”一体化的新一代智能量测技术体系,实现对数字电网全域数据资源的高效采集、存储、计算和应用^[45]。

综上所述,当前对电网传感量测技术的研究多集中于不同应用场景下的电场传感元件,而对磁场等非电量的微型化高精度传感技术仍有待突破;同时,目前传感量测装置普遍不具备能量自收集与自主能力,未来应加大前沿智能技术、微型能量收集技术与传感量测装置的技术融合;此外,智能电表、SCADA、PMU等传感量测系统相互独立,难以实现数字电网全域数据资源的高效利用,研究一体化的智能量测技术体系则是未来亟待研究的重点。

3.2 边缘智能分析与协调控制技术

多源海量数据为电网处理和利用数据的能力提出了巨大挑战。对数字电网来说,利用云-边协同的运行架构,将部分业务应用向边缘侧转移,在边缘侧完成基础的数据分析处理与快速服务响应,是应对海量数据通信压力的有效解决方案^[46]。实现数字电网边缘智能分析与协调控制,关键在于边缘计算装置的专用性能、就地数据融合挖掘与利用方法、以及电网差异化业务应用在边缘侧的有效协同,如图 4 所示。

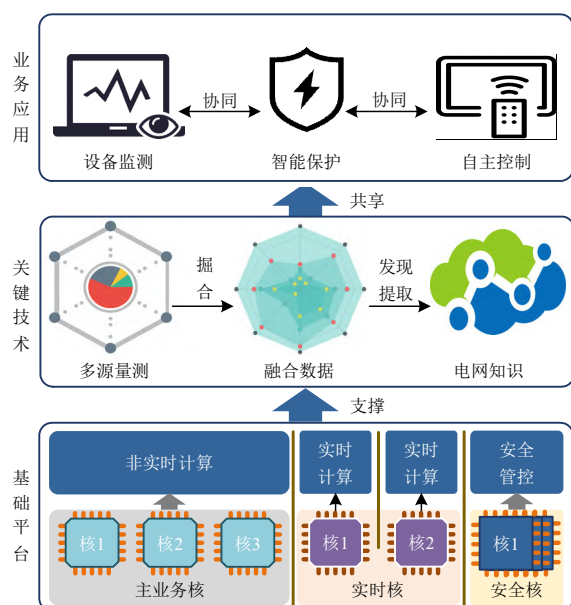


图 4 边缘智能分析与协调控制

Fig. 4 Edge intelligent analysis and coordinated control

1) 满足数字电网多元业务需求的边缘计算技术。电网边缘侧复杂的业务构成,不仅要求边缘计算装置能够协调有限资源满足实时/非实时、多时间尺度及不同数值精度的复杂计算需求^[47],还要求可靠的虚拟隔离环境以满足业务应用的安全管控。为此,在计算性能方面,需要基于芯片架构和指令集的专用化设计,赋予边缘计算硬件多核并发处理和多元异构计算能力;在边缘业务方面,需要通过不同应用在边缘环境下的嵌入式适配、以及在分布式架构下的有效协调与高可用服务,实现边缘侧的准确就地分析与控制^[35]。

2) 电网边缘侧状态感知与知识发现。在数字电网的云-边协同架构下,边缘侧要在电网状态有效感知的基础上,对数字电网运行规律进行认知总结,使数据被进一步融合提升为特征知识,以满足上层应用对电网特征的利用需求。由于数据获取和信息通信环节制约,边缘侧亟待研究更有效的知识

发现与提取方法,基于有限的历史数据发掘价值信息,进而为就地业务服务奠定基础;同时,由于边缘侧存储和运算资源受限,如何在这一条件下完成多模态数据的高效融合挖掘也是不可忽视的关键问题。

3) 电网边缘侧多类型业务协同应用。受限于边缘计算资源,各项边缘业务必须采用合理的协同配合机制,以实现有限资源约束下的高效可靠运行^[48]。对此,首先分析不同业务的功能特征及其内在关联,设计适当的数据资源共享机制与业务协同运行机制,满足不同业务对数据资源的需求;与此同时,针对电网边缘侧多主体、多要素运行特征,发展云边、边边协同架构下的边缘智能推理与分布式运行控制方法^[49],支撑电网形成对新能源更加完备的就地智能控制能力,保证新能源的“友好接入”,推动能源结构低碳化。

综上所述,在边缘计算装置方面,随着近年来核心元器件国产化进程的推进,各关键元器件已逐渐形成国产化替代方案,但多数解决方案仍处于起步阶段,还有待不断验证及研发迭代;在边缘计算技术方面,受限于边缘侧的存储运算资源,如何对有限的电网数据进行高效挖掘并支撑电网边缘侧的分布式就地控制,是未来研究的关键。

3.3 电力物联与信息通信技术

针对数字电网全域物联与高效数据传输等关键问题,需要构建强壮的跨域融合组网架构,同时探索基于新一代通信技术的全域物联高效接入、支撑多源数据传输的无线通信、基于 5G 的电力通信等新技术,为数字电网多业务混合承载提供安全可信接入与可靠保障。数字电网的电力物联与信息通信架构如图 5 所示,具体包括以下方面:

1) 面向数字电网的全域物联网网络技术。数字电网传感量测终端和边缘智能装置的广泛应用,对通信网络支撑大量终端高效接入的能力提出了要求。然而,传统电力物联网技术的发展重点面向特定业务需求,使得同一物理网络下的资源管理和网络运维复杂度过高;同时,传统电力物联网基于云平台的集中式资源调度方式,导致业务响应时延较大^[22]。为应对上述挑战,亟需建立无缝覆盖、支持海量终端低功耗接入的天地一体新型智能电力物联网。在此基础上,研究面向差异化服务的统一资源管理机制,实现通信资源的高效分配,满足未来电力场景下业务随遇接入与按需承载的需求。

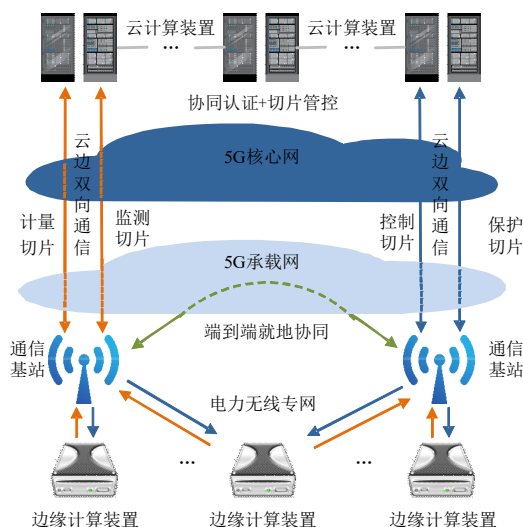


图5 数字电网的信息通信架构

Fig. 5 Information communication architecture of digital power grid

2) 支撑多源数据传输的电网无线通信技术。

随着电力无线专网通信量的激增,通过增设基站提升网络容量的方法面临着巨大的建设成本压力^[50]。为此,需要研究动态资源管理算法和网络容量仿真方法以解决电力无线专网覆盖和容量升级等网络优化问题。其次,研究电力无线专网无线信号传播模型和链路预算计算方法,设计不同场景下电力无线专网深度覆盖解决方案,缓解电力通信可靠性和成功率下降问题。最后,针对基站和终端的规范化运维难题,研究基于机器学习等先进算法的电力无线专网规划方法,为电力无线专网的规划建设与安全运行提供技术支撑。

3) 基于 5G 的电网高可靠双向通信技术。5G 技术为电网业务的信息承载提供了有力手段,但 5G 专网建设成本巨大且受频率监管的制约,亟需研究融合 5G 的数字电网高安全可靠通信技术^[51]。然而,专网与 5G 公网融合组网存在业务跨域可信认证、数据横向可靠摆渡等难题。因此,需要研究 5G 电力切片增强安全加密等技术,提升信息网络的跨域可信认证能力。面向电网需求,需要研制融合 5G 的安全可信接入通信仓,开发去中心化业务安全可信认证系统、5G 电力业务流量摆渡系统和 5G 切片安全管控系统,为通信网络切片式承载电网业务提供安全可信接入与可靠运行技术支撑^[52]。

综上所述,面对广泛接入的边缘终端装置和数字电网激增的通信量,已有电力通信技术的性能和成本问题不断突出,亟待建立资源高效分配的新型智能电力物联网和支撑多源数据传输的电力通信

网，突破融合 5G 技术的高安全可靠通信技术，以满足数字电网在未来不同场景下的通信需求。

3.4 数字平台构建与数据利用技术

电网数据的海量、异构、多源特征要求数字平台具备高效数据处理与融合能力,以实现电网运行状态与核心特征在数字空间的孪生镜像^[53]。但由于电网构成的复杂性,电网数字孪生既要体现个体要素的状态与行为,又要刻画系统层面的全局特征,兼具反映电网空间结构和地理布局等客观属性,在数据融合与建模方面均存在极大的困难^[54]。对此,需要研究数字电网从设备级到系统级的全要素、高保真孪生体构建技术,支撑数字电网的跨域业务应用服务。电网数字孪生与数据利用技术如图6所示,具体包括以下方面:

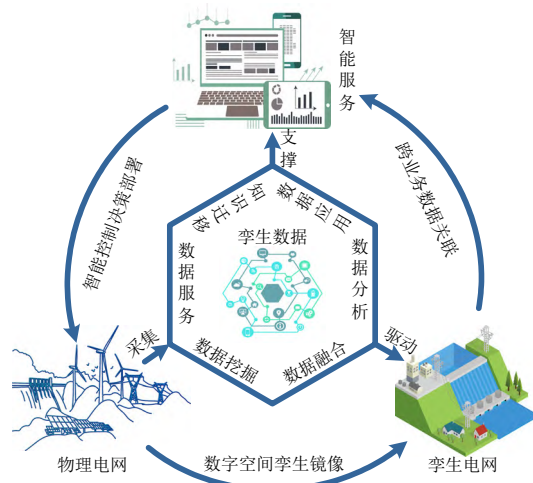


图 6 电网数字孪生与数据服务

Fig. 6 Digital twins and data services for power grids

1) 电网数字平台的基础软硬件支撑技术。电网海量数据的融合挖掘与分析应用依赖于高性能硬件平台和先进软件算法。在硬件方面, 数字平台需要充分运用高性能并行计算硬件, 通过对硬件平台资源进行协调配置和优化, 有效支撑海量数据的分析计算和存储调用^[55]。在软件方面, 需要发展面向电网复杂特征的大数据融合挖掘方法, 以及面向电网多颗粒度和多尺度过程的仿真计算、推演模拟方法等, 支撑整体电网数字孪生的构建^[56]。此时, 由于数字电网构成和动态特征的复杂性, 众多机理和参数尚不明确的环节给传统的“模型等效”方法提出了挑战, “数据驱动”将在其中发挥更大的作用。

2) 多源数据融合驱动的数字孪生构建与呈现技术。数字电网的多元构成要素和复杂业务需求不仅使电网数据涵盖从信息管理到生产调度的全流程,还使其具备了实时/非实时等数据特征。为实现

基于多源异构数据的数字孪生构建与呈现,在模型方面,需要突破传统的电网数据模型和标准,实现数据的统一建模;在数据网络方面,需要实时拟合电网运行的状态、关系和行为,通过实时数据交互支撑基于数字孪生体的精准分析与闭环控制;此外,通过设备统一信息平台管理和系统全面实时监测,赋予数字孪生体大数据可视化能力。在此基础上,还可为电网提供具有前瞻性的态势判断和运行决策,保障高比例新能源接入后的系统安全运行,促进电网绿色低碳化发展。

3) 基于数字平台的电网统一数据服务技术。基于数字孪生体提供关联数据服务,使数据价值在不同业务中得以释放,是数字平台的重要目标之一^[57]。为此,需要以物理电网为核心,在电网物理约束下实现海量多源数据的筛选甄别与融合应用,在系统层面建立跨业务应用的数据关联网络;此外,以数字孪生为基础,需要进一步针对不同电网业务需求,衍生为不同场景下的差异化数据服务形态,并形成数据与模型的管理、适配与平台化统一服务机制,实现在不同业务中的多颗粒度灵活运用。

数据库是电网数字平台的基础支撑,现阶段采用的集中式数据库系统已难以应对日益复杂的数据环境,需加紧探索适用于海量数据环境的分布式关系型数据库等技术。在数字孪生构建方面,目前电力行业在数字孪生领域建设尚处于初级阶段,只能提供对物理世界部分二维及三维信息的简单映射。因此,应结合数字电网孪生呈现的需求,从具象到抽象对电网数字孪生技术进行深入研究,提供满足数字世界中实时准确孪生所需的创新数据表达模式,并融合智能算法技术对电网的外观形态、关联关系、运行特性进行动态实时互动呈现。

3.5 跨域智能构建与业务服务技术

数字电网集成了分布式电源等灵活性资源,具有高时变性和高复杂性的特点,需要快速灵活的运行决策技术来保证其安全经济运行^[58]。然而,电网输-变-配各业务环节对模型高度依赖,数字电网的高复杂性和时变性使得有限的建模能力更加恶化。针对上述问题,其关键在于将数据与知识融合,利用知识图谱辅助深度学习,并基于深度学习结果拓展和更新知识图谱,进而挖掘数据间潜在联系并提高模型迁移性,以解决数字电网各环节时变性、复杂性与建模能力间的矛盾^[59]。数字电网的跨域智能构建与业务服务如图 7 所示,具体包括以下方面:

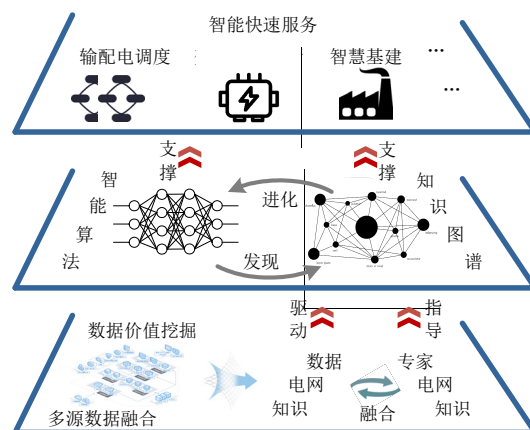


图 7 数字电网跨域智能与业务服务

Fig. 7 Cross-domain intelligence and services of digital power grids

1) 基于多源数据的价值信息挖掘与提取技术。电网数字化带来的海量多源数据和电网边缘侧沉淀形成的行为机理及运行规律,是数字电网与人工智能融合的主要驱动力^[60]。为实现上述目标,数字电网需要具备数据价值提取能力,从电网内部和外部数据中抽象出能够反映电网特征的关键信息。然而,由于电网数据放置管理分散且结构复杂,同时数据间相互关联、相互影响,如何结合电网业务需求和数据特征实现多种数据的有效融合和发掘利用,是数字电网发展中迫切需要解决的重要问题。

2) 数据驱动的电网知识发现与业务智能。从电网数据中提炼运行机理并提升为电网知识,以满足不同业务应用的需求,是提升电网智慧化水平的重要途径。然而,传统的电网知识发现局限于对电网数据库的挖掘,忽略了知识的关联融合和再创新,导致数据价值利用不充分、电网特征认识不全面^[61]。针对上述问题,需要构建电网数据-知识协同发现模型,通过专家的电网知识和数据驱动的电网知识的融合,以及对电网知识的全面评价和动态更新,使数字电网的知识库成为一个不断进化的动态系统,从而显著增强数字电网的自我发现和自我学习能力^[62]。

3) 数字电网跨域知识迁移与智慧业务协同。以电网数字平台提供的融合数据服务为基础获取知识,并构建数字电网的知识图谱,实现多领域知识模型和智能方法的跨域迁移,进而具备电网不同业务的统筹协调和协同优化能力^[63]。为实现上述目标,需要建立知识-数据融合的数字电网智能快速服务技术框架,通过知识和数据的联合驱动,为数字电网多业务场景提供安全准确、可解释的智能决

策快速服务。同时,电网不断产生的各类业务新数据将通过数字平台融合并提供服务,可采用数据驱动的方法驱动电网跨域智慧的自我完善,从而实现人工智能与电网全过程业务应用的深度融合^[64]。

综上所述,针对跨域智能与业务服务技术,已有的电网知识发现主要聚焦于对大数据的挖掘,同时主要限于对特定业务的知识获取,未充分发挥电网数据的价值。对此,应探索构建电网数据-知识协同发现模型,实现对数据挖掘知识的动态更新;在此基础上,通过构建知识图谱,实现数字电网知识的跨域迁移与全过程业务的快速服务。

3.6 数字电网系统安全防护技术

数字电网的安全问题贯穿始终,涵盖了电网构建至运行的全过程,既涉及信息层面的边缘装置接入、信息通信等环节,也涉及业务层面的生产运营、能源服务等环节,是数字电网中不可忽视的重要问题。数字电网的跨层级安全防护体系如图8所示,具体包括如下几个方面:

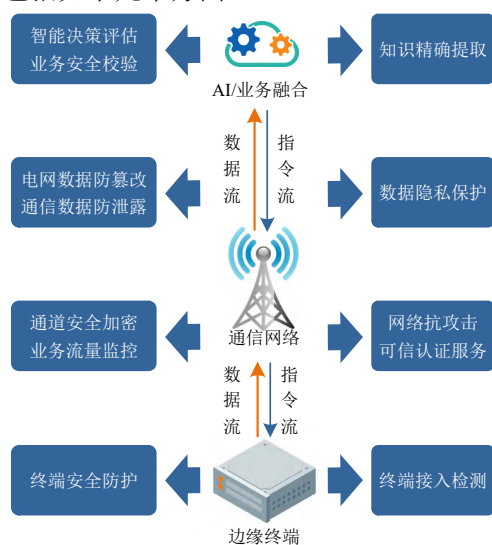


图8 数字电网的信息安全体系

Fig. 8 Information security of digital power grids

1) 数字电网的终端安全接入技术。边缘侧装置的接入安全是保证电网完成有效感知与可靠控制的前提。边缘侧的安全性首先体现在对终端的接入检测方面,非法终端的接入可能导致量测失效或虚假数据注入,导致电网感知失效甚至控制决策错误^[65]。此外,边缘侧的安全性还体现在终端自身的安全防护方面,即能够在恶劣环境下保持运作、在外部攻击造成单一节点失效时具备冗余和自愈能力,从而确保复杂运行条件下的有效感知与控制^[66]。

2) 数字电网的信息物理安全防护技术。数字电网在本质上是一个超大规模的复杂信息物理系

统,电力流和信息流多重交互,系统面临的安全风险显著增加^[67]。从信息安全角度,这要求数字电网能够保证信息通信网络不受外部干扰与攻击,同时对电网业务通道采用流量安全监控等技术,通过接入认证、通道加密等环节的有效协同,实现信息通信网络对电网业务的可信服务与可靠保障。从物理安全角度,强调构建全域纵深的网络安全防御体系,保证物理系统在信息通信环节异常乃至缺失情况下的安全稳定运行,避免各类攻击行为带来的全系统运行风险。

3) 数字电网的数据安全与保护技术。电网数据安全的首要内涵是数据的不可篡改性,这依赖于数据服务过程中有效的权限控制与服务机制设计;此外,电网数据还需保证不可泄漏,避免电网关键信息被外部获知,增加系统运行特征暴露和遭受攻击的风险;最后,电网数据安全还在于有效的隐私保护^[40],特别是对用户数据而言,随着社会对个人隐私的愈重视,电网作为企业在提供数据服务的过程中,必须保证各利益主体的数据隐私得到保护。

4) 人工智能与电网业务的安全融合技术。人工智能技术与电网的融合促进了设备状态检测、环境风险辨识等业务应用的智能化,为电网安全性的提升提供了有效手段^[68];但与此同时也带来了融合过程中的衍生安全性问题。为了避免人工智能与电网业务融合带来的风险,首先需要提高人工智能算法的可解释性,提升对人工智能决策水平的评估能力;此外,需要在知识发现过程中融入电网的专家经验和知识,避免对电网特征和知识的过度拟合,确保知识获取中的准确性;最后,在人工智能实际业务应用中,需建立合理的校验机制,通过多种手段的协调验证保证人工智能在电网业务应用中的安全性^[64]。

综上所述,当前业界研究的系统安全管理监测技术,主要围绕传统IT基础设施和TCP/IP通信协议进行系统的资产管理、安全运维管理以及安全流程管理,且聚焦于传统互联网系统的网络安全管理,难以充分满足数字电网大量终端接入与全方位、全天候的网络安全防护的需求。因此,亟需加强分布式网络安全数据采集技术、风险感知与威胁自动识别技术等技术的研究。

4 数字电网的价值体系构建

以数字电网为基础,充分发挥运行知识与人工

智能的双向互补作用，通过数字化输电、数字化变电和数字化配用电全方位支撑复杂电网的高效可靠运营。同时，以数字化电网运营为原点向外延伸，

引领和带动工业互联网及城市建设等多领域的数字化升级，从而进一步释放数字电网的潜在经济价值与社会价值。数字电网的整体价值体系如图 9 所

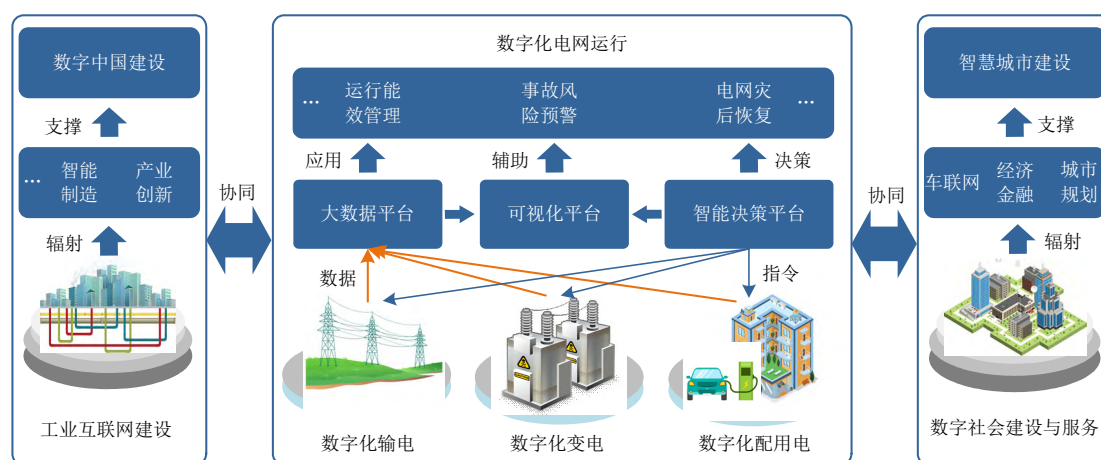


图 9 数字电网的价值体系

Fig. 9 Value of digital power grids

示，具体包括以下方面：

4.1 数字化电网运行

1) 数字化输电。数字电网万物互联与全面感知的技术优势为数字化输电提供了得天独厚的条件。数字化输电通过运用平台汇聚的电网历史与实时量测数据，灵活提取运行安全边际，可以为电网调度运行业务提供智能辅助决策，有效提升输电网运行的安全性与经济性。此外，数字化输电还可通过采用“在线监测+无人机”等智能巡检策略，实现对输电线路及设备本体的全方位自主精细化监控，进而基于融合深度学习的大数据分析技术，及时预警电网风险并做出决策响应。

2) 数字化变电。基于传感通信与数字孪生技术，数字化变电可构建全景感知、风险可视、操作可达的孪生变电站，打造新一代智能变电运行控制系统，提高数字变电运营的经济效益与安全水平^[69]。同时，通过开发标准化的嵌入式设备状态传感器，数字化变电还可建立变电设备智能化管控平台，利用边缘智能装置与设备状态监测主站获取在线监测数据以及存量历史数据，完成数据-知识联合驱动的局放故障智能分析与诊断，实现变电设备的全面健康管理。

3) 数字化配用电。数字化配电以设备数字化为基础，综合运用传感、通信与可视化技术，将物理电网的结构特性和运行信息进行数字化综合与呈现，构建电网一张图，实现配电网运行状态的透明感知。同时，数字化配电还可支撑配电侧弱模型

依赖的智能优化运行，通过部署离线训练和在线控制双边功能，能够对配电网的综合健康水平进行智能诊断，并实现部分可控灵活性资源的闭环控制。

4.2 支撑工业互联网建设

数字电网是工业互联网建设的重要环节。工业互联网旨在通过先进的传感网络、大数据分析、软件来建立具备自我改善功能的智能工业网络。电力系统作为当前社会最为庞大复杂的工业系统之一，数字电网建设将带动先进信息化、数字化技术与传统工业体系的深度融合，同时为相关行业的数字化转型提供宝贵经验和模式借鉴。同时，以工业互联网为桥梁，通过数据交换与服务共享，可将数字电网的边界扩展至上游设备制造、下游工业生产与用户灵活服务等领域，充分释放电力数据在智能制造与产业运营创新等方面的价值，实现以能源技术为突破点对整体的引领带动，有力支撑数字中国建设。

4.3 支撑数字社会建设与服务

数字电网将构建起更加灵活和柔性的用户能源配给平台，促进用户侧清洁能源替代与电网新型负荷服务能力提升，推动分布式电源等新型能源服务与低碳能源生态的发展。数字电网通过与车联网紧密衔接，可使城市交通系统基于车辆行驶轨迹与电动汽车充电数据形成自身优化运行策略，并利用实时调度控制实现城市交通有序运营。此外，通过将数字电网蕴含的海量电力数据与政务、经济和商业等数据相结合，能够充分发挥数据在繁荣数字经济和数字生态等方面的作用；通过数字电网与智慧

金融等进行对接,有助于形成电力金融服务发展新模式,并发挥电力数据在信用等级、金融风险评估等方面的重要作用;通过数字电网汇聚的电力能源消费大数据,并与城市人口、气象等信息相结合,可用于研判城市经济发展态势,为城市规划建设提供更丰富的决策依据。

5 结论

数字电网是承载新型电力系统建设的重要手段,也是落实党中央对建设网络强国、数字中国和智慧社会战略部署的重要举措。通过数字电网的研究与建设,将有力推动数字技术领域前沿科技成果与电网发展的深度融合,提高电网的综合运行与服务水平,建立前沿科技与电网相互促进、融合发展的新机制,在数字能源乃至数字工业体系的建构中具有重要支撑意义。

由于海量要素接入、信息-物理耦合、源-网-荷角色灵活变换等复杂特征,数字电网的建设运行成为高度复杂的系统性工程,并呈现出多学科交叉、多领域融合的新形态和新模式,其关键问题的解决依赖于理论基础和技术方法的全面突破。其中,亟待突破具备能量收集功能的微型智能传感量测技术与装置、边缘侧智能感知分析与协同控制方法、智能全域物联和先进通信基础理论与方法、多模态数据融合挖掘与数字孪生体构建技术、数据驱动的电网知识发现与跨域迁移基础理论与方法、数字电网信息物理安全分析与防御理论、先进人工智能技术与电网的深度融合应用等关键瓶颈问题。未来新型电力生态下多方主体的数字化协同是提升数字电网增量价值的重要手段,而建立标准化的统一数据接口体系是其中关键一步。因此,未来应重点关注该领域的研究工作,以实现多方数据的充分共享,有效打破主体间的业务壁垒,促进新型电力生态的横向贯通。此外,量化相关技术发展水平是推动数字电网建设的重要动力,下一步应基于我国电网发展实际,厘清数字电网技术发展与应用脉络,形成相关技术水平的量化分析评价方案,以为我国数字电力能源体系的构建提供帮助和借鉴。

本文旨在剖析数字电网的核心目标和发展理念,构建适合数字电网发展规律的技术架构和关键技术体系,设计适合我国国情的数字电网发展建设道路,从而为推动数字电网的研究实践提供一些思路和借鉴。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 新时代的中国能源发展白皮书[R]. 2020.
The State Council Information Office of the People's Republic of China. White paper on Chinese energy development in the new era[R]. 2020(in Chinese).
- [2] 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[EB/OL]. (2021-04-27)[2020-09-22]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546169.htm.
Speech by Xi Jinping at the General Debate of the 75th UN General Assembly[EB/OL]. (2021-04-27)[2020-09-22]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-09/22/content_5546169.htm(in Chinese).
- [3] 李立涅, 张勇军, 陈泽兴, 等. 智能电网与能源网融合的模式及其发展前景[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 1-9.
LI Licheng, ZHANG Yongjun, CHEN Zexing, et al. Merger between smart grid and energy-net: mode and development prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 1-9(in Chinese).
- [4] ABDOLAH I A, TAGHIZADEGAN N, BANAEI M R, et al. A reliability-based optimal μ -PMU placement scheme for efficient observability enhancement of smart distribution grids under various contingencies[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2021, 15(8): 663-680.
- [5] ALSHARIF A, NABIL M, MAHMOUD M M E A, et al. EPDA: efficient and privacy-preserving data collection and access control scheme for multi-recipient AMI networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 27829-27845.
- [6] QI Bo, ZHANG Peng, RONG Zhihai, et al. Differentiated warning rule of power transformer health status based on big data mining[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 121: 106150.
- [7] ZHU Lipeng, LU Chao, LUO Yonghong. Time series data-driven batch assessment of power system short-term voltage security[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(12): 7306-7317.
- [8] ABDALAAL R M, HO C N M. Analysis and validations of modularized distributed TL-UPQC systems with supervisory remote management system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3): 2638-2651.
- [9] CECATI C, CITRO C, SIANO P. Combined operations of renewable energy systems and responsive demand in a smart grid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(4): 468-476.
- [10] PENG Xiaosheng, YANG Fan, WANG Ganjun, et al. A convolutional neural network-based deep learning methodology for recognition of partial discharge patterns from high-voltage cables[J]. IEEE Transactions on Power

- Delivery, 2019, 34(4): 1460-1469.
- [11] AKPOLAT A N, HABIBI M R, DURSUN E, et al. Sensorless control of DC microgrid based on artificial intelligence[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 2319-2329.
- [12] DUAN Jiajun, SHI Di, DIAO Ruisheng, et al. Deep-reinforcement-learning-based autonomous voltage control for power grid operations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 814-817.
- [13] CUI Shichang, WANG Yanwu, LI Chaojie, et al. Prosumer community: a risk aversion energy sharing model[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(2): 828-838.
- [14] 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.
- ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904(in Chinese).
- [15] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2-11.
- KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11(in Chinese).
- [16] 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.
- 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(in Chinese).
- [17] 王成山, 王瑞, 于浩, 等. 配电网形态演变下的协调规划问题与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2385-2395.
- WANG Chengshan, WANG Rui, YU Hao, et al. Challenges on coordinated planning of smart distribution networks driven by source-network-load evolution[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2385-2395(in Chinese).
- [18] 中国南方电网有限责任公司. 数字电网白皮书[R]. 2020.
- China Southern Power Grid Co., Ltd.. Digital power grid white paper[R]. 2020.
- [19] 南方电网公司. 数字化转型和数字南网建设行动方案[R]. 2019.
- China Southern Power Grid. Action plan for digital transformation and digital southern network construction [R]. 2019.
- [20] 中国南方电网有限责任公司. 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[R]. 2021.
- China Southern Power Grid Co., Ltd.. The white paper on digital power grids promoting the construction of new power systems with new energy as the main body [R]. 2021(in Chinese).
- [21] YU Yixin, LIU Yanli, QIN Chao. Basic ideas of the smart grid[J]. Engineering, 2015, 1(4): 405-408.
- [22] 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(in Chinese).
- [23] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 1-8.
- SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang. Energy internet: concept, architecture and frontier outlook[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8(in Chinese).
- [24] 张晓华, 刘道伟, 李柏青, 等. 智能全景系统概念及其在现代电网中的应用体系[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10): 2885-2894.
- ZHANG Xiaohua, LIU Daowei, LI Baiqing, et al. The concept of intelligent panoramic system and its application system in modern power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10): 2885-2894(in Chinese).
- [25] 白浩, 周长城, 袁智勇, 等. 基于数字孪生的数字电网展望和思考[J]. 南方电网技术, 2020, 14(8): 18-24, 40.
- BAI Hao, ZHOU Changcheng, YUAN Zhiyong, et al. Prospect and thinking of digital power grid based on digital twin[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(8): 18-24, 40(in Chinese).
- [26] BOSCHERT S, ROSEN R. Digital twin - the simulation aspect[M]//HEHENBERGER P, BRADLEY D. Mechatronic Futures. Cham: Springer, 2016: 59-74.
- [27] 王成山, 董博, 于浩, 等. 智慧城市综合能源系统数字孪生技术及应用[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1597-1607.
- WANG Chengshan, DONG Bo, YU Hao, et al. Digital twin technology and its application in the integrated energy system of smart city[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1597-1607(in Chinese).
- [28] 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.

- PENG Xiaosheng, DENG Diyu, 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(in Chinese).
- [29] 刘东, 盛万兴, 王云, 等. 电网信息物理系统的关键技术及其进展[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3522-3531.
- LIU Dong, SHENG Wanxing, WANG Yun, et al. Key technologies and trends of cyber physical system for power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3522-3531(in Chinese).
- [30] 荀挺, 张珂珩, 薛浩然, 等. 电网调控数据综合智能分析决策架构设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 121-127.
- XUN Ting, ZHANG Keheng, XUE Haoran, et al. Framework design of the analysis decision system about the power grid data[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 121-127(in Chinese).
- [31] 刘吉臻, 王庆华, 房方, 等. 数据驱动下的智能发电系统应用架构及关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3578-3586.
- LIU Jizhen, WANG Qinghua, FANG Fang, et al. Data-driven-based application architecture and technologies of smart power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3578-3586(in Chinese).
- [32] 余建明, 王小海, 张越, 等. 面向智能调控领域的知识图谱构建与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 29-35.
- YU Jianming, WANG Xiaohai, ZHANG Yue, et al. Construction and application of knowledge graph for intelligent dispatching and control[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 29-35(in Chinese).
- [33] 张宁, 马国明, 关永刚, 等. 全景信息感知及智慧电网[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1274-1283.
- ZHANG Ning, MA Guoming, GUAN Yonggang, et al. Panoramic information perception and intelligent grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1274-1283(in Chinese).
- [34] 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.
- CHEN Weigen, ZHANG Zhixian, LI Jian, et al. Intelligent sensing technology for power equipment state parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 323-342(in Chinese).
- [35] 李彬, 贾滨诚, 曹望璋, 等. 边缘计算在电力需求响应业务中的应用展望[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 79-87.
- LI Bin, JIA Bincheng, CAO Wangzhang, et al. Application prospect of edge computing in power demand response business[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 79-87(in Chinese).
- [36] 郑琨琪, 何光宇. 智能用电网络数据采集与通信机制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1544-1551.
- JIA Kunqi, HE Guangyu. Research of smart electric appliance network data collection and communication mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1544-1551(in Chinese).
- [37] 周二专, 冯东豪, 严剑峰, 等. 秒级响应电网在线分析软件平台[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3474-3480.
- ZHOU Erzhu, FENG Donghao, YAN Jianfeng, et al. A software platform for second-order responsiveness power grid online analysis[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3474-3480(in Chinese).
- [38] 和敬涵, 罗国敏, 程梦晓, 等. 新一代人工智能在电力系统故障分析及定位中的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5506-5515.
- HE Jinghan, LUO Guomin, CHENG Mengxiao, et al. A research review on application of artificial intelligence in power system fault analysis and location[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5506-5515(in Chinese).
- [39] 王博, 游大海, 尹项根, 等. 基于多因素分析的复杂电力系统安全风险评估体系[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 40-45.
- WANG Bo, YOU Dahai, YIN Xianggen, et al. A security risk assessment system of complicated power grid based on multiple factor analysis[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 40-45(in Chinese).
- [40] 陈武晖, 陈文淦, 薛安成. 面向协同信息攻击的物理电力系统安全风险评估与防御资源分配[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2353-2360.
- CHEN Wuhui, CHEN Wengan, XUE Ancheng. Security risk assessment and defense resource allocation of power system under synergetic cyber attacks[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2353-2360(in Chinese).
- [41] 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(in Chinese).
- [42] 何金良, 稽士杰, 刘俊, 等. 基于巨磁电阻效应的电流传感器技术及在智能电网中的应用前景[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 8-14.
- HE Jinliang, JI Shijie, LIU Jun, et al. Review of current sensor technology based on giant magneto resistive effect and possible applications for smart grids[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 8-14(in Chinese).
- [43] 杨庆, 孙尚鹏, 司马文霞, 等. 面向智能电网的先进电压电流传感方法研究进展[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 349-367.

- YANG Qing, SUN Shangpeng, SIMA Wenxia, et al. Progress of advanced voltage/current sensing techniques for smart grid[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 349-367(in Chinese).
- [44] 刘灏, 毕天姝, 徐全, 等. 配电网高精度同步相量测量技术方案与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 23-29.
- LIU Hao, BI Tianshu, XU Quan, et al. Scheme and prospect of high-precision synchrophasor measurement technology for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 23-29(in Chinese).
- [45] 丁杰, 奚后玮, 韩海韵, 等. 面向智能电网的数据密集型云存储策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(12): 66-70, 100.
- DING Jie, XI Houwei, HAN Haiyun, et al. A smart grid-oriented data placement strategy for data-intensive cloud environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(12): 66-70, 100(in Chinese).
- [46] 司羽飞, 谭阳红, 汪泓, 等. 面向电力物联网的云边协同结构模型[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 7973-7979.
- SI Yufei, TAN Yanghong, WANG Feng, et al. Cloud-edge collaborative structure model for power internet of things[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 7973-7979(in Chinese).
- [47] 岑伯维, 蔡泽祥, 胡凯强, 等. 电力物联网边缘计算终端业务时序逻辑与计算负荷建模方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 107-114.
- CEN Bowei, CAI Zexiang, HU Kaiqiang, et al. Modeling method for bussiness sequential logic and workload of edge computing terminal in electric internet of things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 107-114(in Chinese).
- [48] 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(in Chinese).
- [49] 马良, 许刚, 谈元鹏. 考虑扰动影响的微电网分布式自适应控制策略[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 146-156.
- MA Liang, XU Gang, TAN Yuanpeng. Distributed adaptive control strategy for microgrids considering disturbance effects[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 146-156(in Chinese).
- [50] 曹津平, 刘建明, 李祥珍. 面向智能配用电网络的电力无线专网技术方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 76-80, 133.
- CAO Jinping, LIU Jianming, LI Xiangzhen. A power wireless broadband technology scheme for smart power distribution and utilization networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 76-80, 133(in Chinese).
- [51] 陈皓勇, 李志豪, 陈永波, 等. 基于 5G 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 1-8.
- CHEN Haoyong, LI Zhihao, CHEN Yongbo, et al. Ubiquitous power internet of things based on 5G[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 1-8(in Chinese).
- [52] 高维良, 高厚磊, 徐彬, 等. 5G 用作配电网差动保护通道的可行性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 1-7.
- GAO Weiliang, GAO Houlei, XU Bin, et al. Feasibility analysis of adopting 5G in differential protection of distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 1-7(in Chinese).
- [53] 蒲天娇, 陈盛, 赵琦, 等. 能源互联网数字孪生系统框架设计及应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2012-2028.
- PU Tianjiao, CHEN Sheng, ZHAO Qi, et al. Framework design and application prospect for digital twins system of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2012-2028(in Chinese).
- [54] 贺兴, 艾芊, 朱天怡, 等. 数字孪生在电力系统应用中的机遇和挑战[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2009-2019.
- HE Xing, AI Qian, ZHU Tianyi, et al. Opportunities and challenges of the digital twin in power system applications [J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2009-2019(in Chinese).
- [55] 李鹏, 王智颖, 王成山, 等. 基于多 FPGA 的有源配电网实时仿真器并行架构设计[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 174-182.
- LI Peng, WANG Zhiying, WANG Chengshan, et al. Design of parallel architecture for multi-fpga based real-time simulator of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 174-182(in Chinese).
- [56] 施博辰, 赵争鸣, 朱义诚, 等. 电力电子混杂系统多时间尺度离散状态事件驱动仿真方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 2980-2989.
- SHI Bochen, ZHAO Zhengming, ZHU Yicheng, et al. Discrete-state event-driven simulation approach for multi-time-scale power electronic hybrid system [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 2980-2989(in Chinese).
- [57] 高扬, 贺兴, 艾芊. 基于数字孪生驱动的智慧微电网多智能体协调优化控制策略[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2483-2491.

- GAO Yang, HE Xing, AI Qian. Multi agent coordinated optimal control strategy for smart microgrid based on digital twin drive[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2483-2491(in Chinese).
- [58] LI Peng, JI Jie, JI Haoran, et al. MPC-based local voltage control strategy of DGs in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2911-2921.
- [59] 周念成, 廖建权, 王强钢, 等. 深度学习在智能电网中的应用现状分析与展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 180-191.
- ZHOU Niancheng, LIAO Jianquan, WANG Qianggang, et al. Analysis and prospect of deep learning application in smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 180-191(in Chinese).
- [60] 程乐峰, 余涛, 张孝顺, 等. 机器学习在能源与电力系统领域的应用和展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 15-31.
- CHENG Lefeng, YU Tao, ZHANG Xiaoshun, et al. Machine learning for energy and electric power systems: state of the art and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 15-31(in Chinese).
- [61] 郑琨琪, 王治华, 范帅, 等. 电网信息物理系统的数据驱动架构设计及应用[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3116-3127.
- JIA Kunqi, WANG Zhihua, FAN Shuai, et al. Data-driven architecture design and application of power grid cyber physical system[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3116-3127(in Chinese).
- [62] 王琦, 李峰, 汤奕, 等. 基于物理-数据融合模型的电网暂态频率特征在线预测方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 1-9.
- WANG Qi, LI Feng, TANG Yi, et al. On-line prediction method of transient frequency characteristics for power grid based on physical-statistical model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 1-9(in Chinese).
- [63] 范士雄, 李立新, 王松岩, 等. 人工智能技术在电网调控中的应用研究[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 401-411.
- FAN Shixiong, LI Lixin, WANG Songyan, et al. Application analysis and exploration of artificial intelligence technology in power grid dispatch and control [J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 401-411(in Chinese).
- [64] 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.
- 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(in Chinese).
- [65] 梅文明, 李美成, 孙炜, 等. 一种面向分布式新能源网络的终端安全接入技术[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 953-961.
- MEI Wenming, LI Meicheng, SUN Wei, et al. Terminal security access technology for distributed new energy networks[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 953-961(in Chinese).
- [66] 张涛, 赵东艳, 薛峰, 等. 电力系统智能终端信息安全防护技术研究框架[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 1-8, 67.
- ZHANG Tao, ZHAO Dongyan, XUE Feng, et al. Research framework of cyber-security protection technologies for smart terminals in power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 1-8, 67(in Chinese).
- [67] 汤奕, 陈倩, 李梦雅, 等. 电力信息物理融合系统环境中的网络攻击研究综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 59-69.
- TANG Yi, CHEN Qian, LI Mengya, et al. Overview on cyber-attacks against cyber physical power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 59-69(in Chinese).
- [68] 李明节, 陶洪铸, 许洪强, 等. 电网调控领域人工智能技术框架与应用展望[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 393-400.
- LI Mingjie, TAO Hongzhu, XU Hongqiang, et al. The technical framework and application prospect of artificial intelligence application in the field of power grid dispatching and control[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 393-400(in Chinese).
- [69] 谢善益. 基于 UCIM 的数字化变电站及控制中心模型协同设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(15): 64-67.
- XIE Shanyi. Model coordination design between digital substations and control center based on UCIM [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15): 64-67(in Chinese).



李鹏

在线出版日期: 2021-12-31。

收稿日期: 2021-08-30。

作者简介:

李鹏(1973), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电网数字化、智能化, lipeng@csg.cn;

*通信作者: 习伟(1980), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为电网数字化及芯片化, xiwei@csg.cn;

蔡田田(1982), 女, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为数字电网、电力专用芯片技术及应用, caitt@csg.cn。

(责任编辑 乔宝榆)

Concept, Architecture and Key Technologies of Digital Power Grids

LI Peng¹, XI Wei^{1*}, CAI Tiantian¹, YU Hao², LI Peng², WANG Chengshan²

(1. Digital Grid Research Institute of China Southern Power Grid;

2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University))

KEY WORDS: digital power grid; technical architecture; edge computation; data driven; artificial intelligence

Advances in digital technology provide new opportunities for the development of power grids. However, the characteristics of modern power system, such as large scale and high penetration of renewable energy and power electronics, make it difficult for the digital transformation of power grids. Building a digital power grid that integrates digital technology and power system is an important way to promote the digital transformation.

The digital power grid is a new energy ecosystem based on the modern power and energy networks and new-generation information technologies. It takes data as the critical production elements, and is driven by cloud computing, big data, artificial intelligence, and other advanced digital technologies. The technology architecture of digital power grids can be divided into six layers, including sensor & measurement, edge computation, information communication, digital platform, cross-domain intelligence and system security, as is shown in Fig. 1.

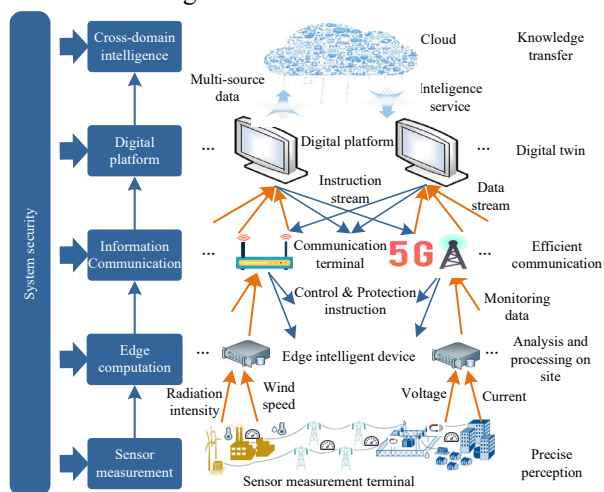


Fig. 1 Technical architecture of digital power grid

1) Sensor and measurement. Relying on various intelligent sensors to obtain electric and non-electric quantities such as wind speed and solar irradiance, it can accurately describe the operation state and complex dynamics of the power grid. On this basis, it can help build a networked sensing measurement system integrating multiple types of measurement means such

as smart meters, SCADA and PMU.

2) Edge computation. Through the basic analysis and processing of multi-source measurement data, it can provide fast protection, control and other services on the edge side. Meanwhile, the power flow features of the local network, as well as the variation trends of power supply and load, can be discovered and uploaded to the cloud to support more complex analysis and decision-making.

3) Information communication. The information communication layer mainly supports the massive access of edge terminals and the efficient transmission of multiple types of data such as image and voice. It is also responsible for providing diversified communication services that meet different requirements including real-time and reliability.

4) Digital platform. Digital platform is a powerful hardware and software platform with cloud resource storage, big data processing, data-driven analysis and other capabilities. The collected operating data can be aggregated on the digital platform to form a big data network, thereby further building a digital twin mirror of the operation states and features of the power grid.

5) Cross-domain intelligence. Intelligence for different applications, such as production and dispatching, can be first formed by learning from their data. The knowledge of these applications is further correlated to form the power grid knowledge graph. With the knowledge graph, the knowledge migration across application domains can be realized, enhancing the intelligent collaboration of different applications.

6) System security. This layer provides security guarantees for the whole process from construction to operation of power grids. It involves anti-attack and vulnerability monitoring at the information level, as well as privacy protection and data encryption in production, operation and energy services.

This paper emphasizes the concept and technical architecture of digital power grids. Some instructive perspectives of main challenges, key technologies, application scenarios, and value finding are discussed for future studies.