

数字化主动配电系统初探

尚宇炜¹, 周莉梅¹, 马钊^{2*}, 王运虎³

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192; 2. 山东大学, 山东省 济南市 250061;
3. 国家新能源工程技术研究中心, 北京市 朝阳区 110105)

Preliminary Study of Digitalized Active Distribution Systems

SHANG Yuwei¹, ZHOU Limei¹, MA Zhao^{2*}, WANG Yunhu³

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China; 2. Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China; 3. National Renewable Energy Engineering Research Center, Chaoyang District, Beijing 110105, China)

ABSTRACT: Based on the demands of distribution systems and the development trends of digital technology, the digitalized active distribution system (D-ADS) was analyzed. The development status of digitalized distribution system was briefly summarized. On this basis, the definition and main characteristics of the D-ADS were refined preliminarily, and the conceptual model of the D-ADS was formalized by applying the model based system engineering. Then, technical applications of the D-ADS were explored by taking two examples from two perspectives including digitalized distribution equipment and digitalized distribution system. Besides, technical challenges and relevant development suggestions of the D-ADS were put forward. The characteristics of the D-ADS were concluded.

KEY WORDS: digitalization; internet of things; distribution system; cyber-physical system; digital twin; energy internet

摘要: 基于配电系统需求和数字技术发展趋势,对数字化主动配电系统(digitalized active distribution system, D-ADS)进行了分析和展望。简要梳理配电数字化发展现状,在此基础上初步提炼 D-ADS 的定义和主要特征,借鉴基于模型的系统工程方法建立 D-ADS 的形式化模型。其次,分别以设备数字化和系统数字化 2 个维度为例,探索 D-ADS 的潜在技术应用,梳理 D-ADS 的技术挑战并提出有关建议。对 D-ADS 的特点进行小结。

关键词: 数字化; 物联网; 配电网; 信息物理系统; 数字孪生; 能源互联网

0 引言

随着大数据、云计算、人工智能等数字技术的

蓬勃发展,数字化已成为推动经济社会发展的重要因素,国家“十四五”规划明确提出打造具有国际竞争力的数字产业集群^[1]。在此背景下,能源电力行业将数字化转型提升为战略性举措,旨在通过数字技术协调各类要素、调动海量资源、创新业态模式、创造效益价值,实现设备状态全面掌握、系统运行全面管控、服务质效全面提升的能源互联网发展新格局^[2-5]。据测算,2025 年全球能源数字化市场规模将增至 640 亿美元。

在能源互联网体系中,配电网是直接连接终端用户并支持各类分布式资源(distributed energy resources, DERs)和柔性负荷灵活互动的关键环节^[6]。由于分布式电源(distributed generation, DG)、电气化交通等的快速发展,传统功率单向传输的配网运行模式和以计划为导向的配网运营模式难以满足分布式资源大规模接入以及灵活柔性交/直流负荷等带来的综合挑战^[7]。为此,2008 年国际大电网委员会(international council on large electric systems, CIGRE)C6.11 工作组提出“主动配电网”,后于 2012 年由 CIGRE C6.19 工作组扩展为“主动配电系统(active distribution system, ADS)”^[8],旨在通过网络化灵活运行和 DERs 优化管控等技术,实现分布式与集中式相结合的电力网络主动运行和以市场客户为导向的电力企业主动运营。

然而,有关实践表明,构建主动配电系统是一项具有内在复杂性的系统工程。从结构上看,ADS 属于一类典型的信息物理社会系统,具有多参与主体关联、多业务环节耦合、多类型要素资源协同、多目标/约束制约等特点,单纯依靠传统技术手段难

基金项目: 国家电网公司科技项目:“基于多源数据的配电线路智能运维决策关键技术研究”(5400-202111148A-0-0-00)。

State Grid Corporation Science and Technology Project: Key Technologies of Intelligent Operation and Maintenance Decision of Distribution Line based on Multi-source Data (5400-202111148A-0-0-00).

以应对这些问题。数字技术被寄予厚望。国家电网发布“数字新基建(2020年)”十大任务,提出打造能源互联网数字化创新服务支撑体系^[2];南方电网发布《数字化转型和数字南网建设行动方案(2019年)》^[9],将数字化转型作为数字南网建设的必由之路。河北雄安新区提出建设数字化主动配电网,以期显著提升电网资源配置能力、安全保障能力和智能互动能力^[10]。ABB、施耐德等先后发布了面向配电系统的数字支撑平台和装备^[11-12]。中国电科院、南网科研院等科研单位分别围绕 D-ADS 开展了专题学术研讨^[13-14]。

当前,数字化主动配电系统(digitalized ADS, D-ADS)已成为学界和工业界关注的热点问题。实际上,数字技术并非配电领域的全新命题,而是随着配电技术形态的演进而不断发展的综合性交叉性技术领域,其内涵和外延在不断扩大,并在当前构建新能源为主体的新型电力系统形势下具有新的特点和需求^[15-19]。由于 D-ADS 涵盖配电运行运营的多个环节,不同研究领域的专家存在不同的认识,针对 D-ADS 的系统性研究尚处于初步阶段。数字化与信息化、智能化如何关联,大数据、数字孪生等与 D-ADS 的关系, D-ADS 的特征和形式化模型的描述, D-ADS 的运行运营模式与传统模式存在的差异,这些问题是开展 D-ADS 研究的关键性问题,亟待解决。

基于以上思考,本文着重对 D-ADS 进行分析和展望。首先,结合配电系统需求,简要梳理配电数字化的发展现状,提炼 D-ADS 的定义和主要特征,并借鉴基于模型的系统工程方法建立 D-ADS 的形式化模型;然后,分别以设备数字化和系统数字化2个维度为例,探索 D-ADS 的潜在技术应用,梳理 D-ADS 的技术挑战并提出相关建议;最后,对 D-ADS 的特点进行小结。鉴于 D-ADS 的涉及面较广,本文在论述时不追求面面俱到,而是有所侧重,以期促进 D-ADS 不同研究领域的交流。

1 ADS 的特点、需求及数字化现状

1.1 ADS 的特点和需求

为推动能源生产消费变革,构建安全、可靠、经济、绿色、智慧的新型电力系统,传统配电网正在向 ADS 演进,演进过程如图1所示。其在设备、系统和业务3个层面具有以下突出特点和需求:

1) 设备层面。配电设备规模大、分布广,质量

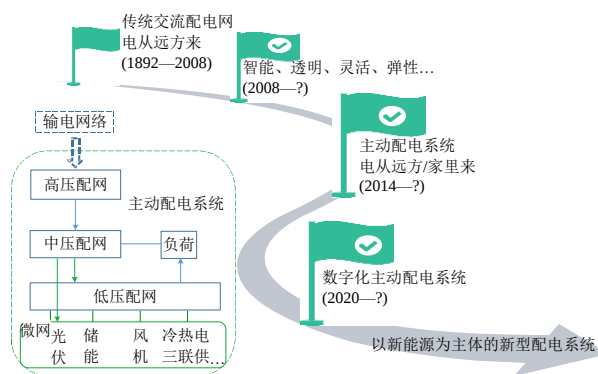


图1 配电系统技术演进示意

Fig. 1 Sketch of technology evolution of distribution systems

良莠不齐、故障停运多发,配网运维人员老龄化和结构性缺员问题日趋严重,配电设备资产密集性与运维资源匮乏性之间的矛盾更加突出。例如,我国仅在运的配电变压器超过1000万台;据统计,85%的用户停电是由于配网设备故障或检修引起的,对社会生产生活用电造成潜在巨大风险^[20]。ADS迫切需要提高设备状态监测能力和健康管理水平

2) 系统层面。分布式可再生能源规模快速增长,终端用户负荷多元化、直流化、柔性化趋势明显,源荷侧“即插即用”移动式需求与日俱增。据测算,2030年我国DG装机达5亿kW,占全国同期总装机容量的17.3%^[21];电动汽车保有量达1亿辆,功率总和超10亿kW^[22]。产能用能方式的转变,使得配网能量流动的复杂性和运行不确定性显著提升,ADS迫切需要提升源-网-荷-储-柔性资源的优化配置能力和灵活管控水平。

3) 业务层面。配网监管政策和降电价、优化营商环境等要求更加严苛,增量配网和售电侧改革不断深化,综合能源服务新模式不断发展壮大,配电企业的市场竞争压力和优质服务要求进一步增加。ADS迫切需要提升配网规划-运维-营销服务全业务的协同创新水平和价值创造能力。

1.2 配电数字化发展现状

配电数字化发展的一个主要目的是在设备层面、系统层面和业务层面满足配电系统运行和运营需求。从国内外发展过程来看,配电数字化发展主要经历信息化、网络化和智能化等3个阶段^[23]。信息化阶段是配电数字化发展的早期阶段,主要为配网建立实用高效的信息管理系统,将重复性基础性的业务流程固化,提高配网运行运营的效率效益。例如,该阶段实现了配电网规划运行、设备管理、

营销服务等业务从线下到线上的转型。此后,智能电网的发展推动配电数字化步入网络化阶段,配电监测和管控从高压配网向中低压配网延伸,配电物联网、工业互联网等技术助力实现各类设备在线感知、远程操作,从而推动配网安全、可靠、经济、绿色运行和产业链网络化协同发展。智能化阶段是配电数字化的高级阶段,主要由能源互联网、电力物联网等发展推动,这一阶段的配电网将具有自主学习、主动管控、智慧运营等能力,通过对海量数据信息的广泛汇集和高效利用,从而构造一个高保真的孪生电网并实现线上-线下融通的闭环运行与运营。

当前,我国配电数字化发展正处于由信息化向网络化、智能化转变的过程^[16]。图 2 以某电力企业为例,给出当前的一类配电数字化体系架构,主要包括终端感知层、网络平台层和业务应用层等层次^[24-27]。

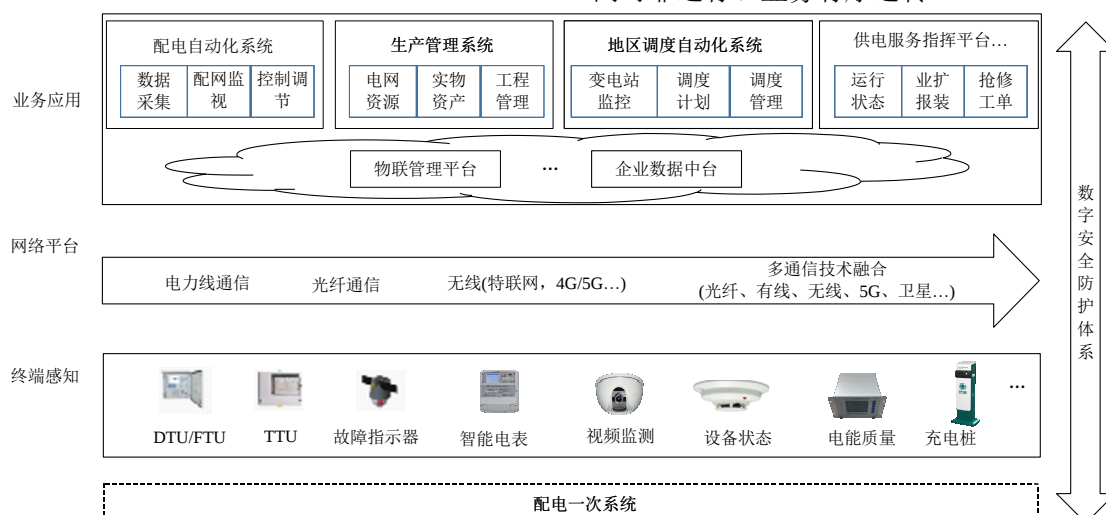


图 2 配电数字系统现状示意

Fig. 2 Sketch of digital systems in distribution network

在配电数字化体系中,信息安全防护是保障配电信息安全的环节。电力公司一般通过软件安全认证、硬件安全芯片、数据安全传输、边界安全隔离等多重组合措施,构建涵盖电网运行调度和企业运营管理的纵深防御体系^[24]。例如,DAS 采用安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证的防护策略,从而阻断可能发生的信息安全隐患。

2 D-ADS 的概念、特点及形式化建模

2.1 D-ADS 的概念及特点

鉴于 D-ADS 的重要性,学界和工业界纷纷开展有益的研究和实践。学术研究方面,文献[28-35]分别研究了配网运行调度、故障处理、数据模型、

终端感知层包括继电保护装置、传感监测装备、终端接入网络和嵌入式计算模块等,这些二次设备与一次系统紧密融合,可实现多物理域数据的在线采集,支撑配网运行监控和关键量测信息高效处理。网络平台层则采用了多种通信技术,包括光纤、电力线载波、无线通信等,可依据不同工程需求实现高可靠、强抗扰、低功耗的通信效果,有利于对大量配电终端进行网络化管理,为各类专业系统的数据汇集和分析应用奠定基础。业务应用层主要包括生产管理系统(production management system, PMS)系统、供电服务指挥平台、调度自动化系统(energy management system, EMS)、配电自动化系统(distribution automation system, DAS)和其他综合性/个性化系统(如气象信息系统、电动汽车充换电网络管理系统等),这些系统可将终端感知层的数据进行融合应用,从而实现设备在线管控、配网可靠运行、业务有序运转。

故障诊断数字平台等方面的数字技术。在各类数字技术中,数字孪生、CPS(Cyber-Physical Systems)等技术与 D-ADS 的相关度较高^[36-39]。数字孪生由美国密歇根大学 Grieves 教授于 2003 年首次提出^[39]。随后,航天、电力等资产密集且对可靠性要求严苛的工程领域对数字孪生技术开展了大量有益探索。一种观点认为,数字孪生是物理实体在虚拟数字空间的等价物,主要包括 3 部分:1) 实体空间的物理系统;2) 虚拟空间中的虚拟系统;3) 用以连接实体系统与虚拟系统的数据与信息的关系^[36],旨在实现实际配网与数字配网的全息复制、孪生交互和虚实迭代^[40]。CPS 是实现物理系统与信息系统深度融合的技术体系,通过构建配电物理-

信息空间中人、机、物、环境等要素相互映射、适时交互、高效协同的架构体系^[36], 并采用自主认知与学习、分析与决策工具技术, 可实现配网可靠经济运行以及各类电气物理计算的快速动态响应。

产业实践方面, 数字技术多用于资源连接和要素协同, 以引导运行运营模式的转变。这一点与数字经济的本质特点是一致的, 即, 通过思维、技术和应用的数字化, 改变原有生产方式和商业运行模式, 依靠数字化连接更广泛的市场和客户, 并尽可能让数字生产力和传统生产关系和谐共存, 进而整体提升生产活动的综合价值, 实现边际效益递增。这一特点与配电系统中资源要素分布广、体量大的特点十分吻合, 通过广泛联通和优化协同将带来潜在的巨大效益。国家电网将构建企业中台作为数字化转型的一项重要任务, 通过能力跨业务复用、数据全局共享, 支撑各项业务快速发展、敏捷迭代、按需调整。南方电网重点建设云平台、数字电网和物联网, 以期提升电网运行管控和运营管理质效^[8]。ABB通过构建企业级数字平台, 利用物联网协议、基于数字孪生的设备全生命周期管理、大数据存储与机器学习技术, 实现设备远程运维和服务远程协同^[10]。施耐德重点研发数字化中低压智能软硬件, 为配电资产管理提供解决方案^[12]。

综合有关研究和产业动向可看出, D-ADS旨在融合传感量测、信息通信、数理建模仿真等先进技术, 促进传统数据分析技术创新变革, 驱动电网规划、资产利用、设备运维、系统调度和用户侧管理等各环节各业务实现信息化、网络化、智能化和灵活广泛的互联互通, 推动配电技术和商业模式变革^[30]。据此, 初步将D-ADS定义为:

遵循电力信息安全标准和统一数据模型, 建立与配电物理系统相匹配的虚拟孪生系统, 基于“知识(经验)+数据+模型+算法+算力+软件定义+空地地通信”构造先进的数字技术体系, 统筹源-网-荷-储-柔多元灵活性资源, 协同感知、分析、决策等运行运营环节, 形成分层、分级、分区管控的配电数字系统架构和分析决策体系, 实现配电设备数字化、系统数字化和全业务流数字化。

上述定义中, 设备数字化包括设备多物理域状态特征、运行参量和结构性能参数的数字化; 系统数字化是在设备数字化的基础上, 通过建模工具实现配网乃至整个电力系统的数字化, 包括电网运行态势的透明化, 以及电网仿真调控自动化等; 全业

务流数字化表示一类广义的业务体系, 涉及能量流、资金流、物流、业务流、人才流的统筹量化和协同优化。因此, 相较于传统的配网信息化, D-ADS具有以下主要特征:

1) D-ADS的数字内涵更加丰富。随着配电物联网的发展, 配电大数据将日趋丰富并成为数字化转型的关键要素^[41]。例如, 设备数字化将推动大量配电设备在线监测防控, 系统数字化将实现大规模分布式资源的灵活规划和运行, 全业务流数字化将实现电力-市场-用户的广泛协同互动, 推动配电系统共享共建共赢。值得一提的是, 数字化不仅适用于大数据场景, 在小数据甚至零样本场景中同样适用。例如, 数据驱动的设备状态评估技术依赖大量设备缺陷和故障样本以提高其评估精度, 而实际获取的样本大多是设备正常运行过程下的样本。为弥补故障类样本的不足, 可将领域知识经验、规则等进行符号化表示, 而后与常规数据结合, 实现数据-知识融合驱动的设备状态评估。事实上, D-ADS的数字化泛指数据、语音、文本、图像等任何可表示可应用的信息, 需要通过统一电网数据模型, 形成完整的数字电网技术体系。

2) D-ADS的数字技术更加依赖数学思维和数理模型。建模和算法是体现数据价值的工具和利器, 传统粗放式或经验驱动的管控方式难以适应主动配电系统的技术需求。为实现设备数字化和状态精准感知, 可通过状态评估模型对多物理域数据加以利用; 为实现系统数字化和运行优化提升, 可运用随机优化模型、电力电子控制模型等, 将电网静态动态数据相结合; 为实现全业务流数字化, 宜开发端到端的全业务流程管控模型。由于不同数据间相互关联耦合, 唯有将问题结构、业务交互、约束目标等通过模型固化、算法量化, 而非采用自然语言等模糊表示方式和简单定性的分析方式, 才能真正实现ADS效率效益的提升。因此, 为刻画集成多物理量、多尺度、多概念、多技术的复杂系统, 模型和工具、算法加算力的广泛融合是D-ADS的核心, 可为数字平台提供数据样本和数据分析能力。

3) D-ADS的数字业务更加灵活开放。传统的数据驱动是辅助决策的过程。D-ADS中的数据将不仅仅用于辅助决策, 而是在数字、模型的推动下直接驱动决策。例如, 在系统规划方面, 由于需要考虑复杂的约束和目标, 传统量化计算主要用于电网可靠性、损耗等基础性电气计算分析, 规划方案则

多依据人工经验制定和优选。D-ADS 则构建了一个高保真的配电孪生仿真系统,通过在仿真系统中对决策空间进行充分探索并不断试错,从而获得满足实际约束的最优规划方案。在业务支撑服务方面,通过对配网潮流、电价、用电行为等多源数据进行关联分析,可制定差异化的电价服务套餐,精准服务用户并引导电动汽车、储能、虚拟电厂等柔性负荷资源,构建灵活互动的主动配电体系。因此,D-ADS 更加需要互联网思维,通过广泛连接和互动重塑组织关系和生产方式,实现数字赋能的配电新模式新业务,取代传统业务协同方式,其影响将超出技术范畴,涉及电网数字化、企业数字化、服务数字化、能源生态数字化。

2.2 D-ADS 的形式化建模

为刻画 D-ADS 的多类要素资源、多元目标主体和多种耦合关系,本节借鉴数字孪生技术及基于模型的系统工程方法(model-based systems engineering, mBSE)建立 D-ADS 的形式化模型^[42-43]。MBSE 是一种形式化建模方法,由国际系统工程学会在 2007 年提出^[42]。它以逻辑连贯的多视角模型框架对设备、系统及各个层级的对象进行表示,可支持由设计分析到评估验证的全生命周期过程,并被美国航空航天局、波音等广泛应用。在 D-ADS 中,MBSE 可视为连接实际/虚拟设备、系统和各类业务模型的“集线器”。图 3 初步给出 D-ADS 的形式化模型示意,而随着研究的深入,可对 D-ADS 的模型进行优化改进。

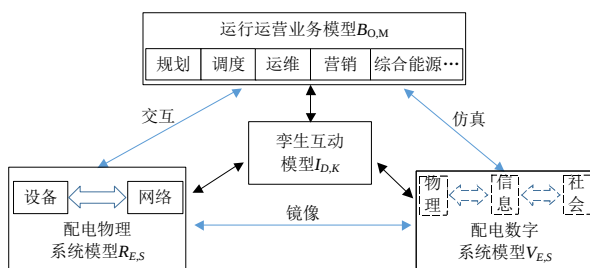


图 3 数字化主动配电系统建模示意

Fig. 3 Sketch of D-ADS modelling

令 $\mathcal{M}_{D-ADS}$ 表示 D-ADS 的模型,它是实际配网、虚拟配网、孪生互动系统和各类配电业务的函数:

$$\mathcal{M}_{D-ADS} = f^{\mathcal{M}}(R_{E,S}, V_{E,S}, B_{O,M}, I_{D,K}) \quad (1)$$

式中: $R_{E,S}$ 、 $V_{E,S}$ 分别为实际系统和虚拟系统模型,角标 E, S 分别表示配电设备和网络,设备主要包括开关、变压器、线路等一次和二次设备; $B_{O,M}$ 为规划、调度、运维、营销服务等各类业务服务模型,

角标 O, M 分别表示运行类和运营类业务; $I_{D,K}$ 为孪生互动模型,角标 D, K 分别表示可形式化表征的数据和知识经验。

与传统仿真模型不同,虚拟系统 $V_{E,S}$ 是实际系统的高保真映射,需要综合考虑配电系统的物理-信息-社会因素。除物理模型外,系统运行时涉及各类内外部因素, $V_{E,S}$ 的一种建模方式为:

$$V_{E,S} = f^R(R_{E,S}, I_p, O_p) \quad (2)$$

式中: I_p 为配电系统的内部损耗; O_p 为配电系统的外部激励/干扰。

孪生互动模型 $I_{D,K}$ 用于实现实际系统、虚拟系统和各类业务模型的关联互动:

$$I_{D,K} = f^I(R_{E,S}, V_{E,S}, B_{O,M}, I_D, I_K) \quad (3)$$

式中: I_D 为 $R_{E,S}$ 、 $V_{E,S}$ 、 $B_{O,M}$ 产生的数据集; I_K 为领域知识经验和其他信息。

业务服务模型 $B_{O,M}$ 是 D-ADS 的主要功能模型,通过实际系统 $R_{E,S}$ 、虚拟系统 $V_{E,S}$ 及有关参量集 I 的关联映射,可计算得到所需的分析/决策结果:

$$B_{O,M} = f^B(R_{E,S}, V_{E,S}, B'_{O,M}, I) \quad (4)$$

由式(1)–(4)可看出,首先, $\mathcal{M}_{D-ADS}$ 模型包含多个子模型,各个子模型间存在较为复杂的嵌套和较强的耦合关联关系。针对不同的问题结构,可为 $\mathcal{M}_{D-ADS}$ 及其子模型设计不同的建模颗粒度。其次, $\mathcal{M}_{D-ADS}$ 涉及多种物理机理和过程模型,这些子模型的实现机制不同,表现形式各异。为简化实现过程,可采用模型封装技术,通过标准化的数据交互格式和规约,实现各类模型数字的高度抽象和高效对接,例如,仿真模拟高比例、多类型的分布式可再生能源和电力电子设备在配电系统的运行特性,包括诸如碳化硅、氮化镓等第三代电力电子半导体器件的建模仿真;模拟电网-用户互动,调动用户侧资源、储能资源、电动汽车等海量资源;通过数字互联实现微网、虚拟电厂、负荷的柔性化处理和需求侧响应的智能互动。针对跨行业的业务流具有差异性的问题,可采用机器人流程自动化技术(robotic process automation, RPA)^[40,44-45]等予以解决, RPA 旨在通过自主捕获数据、触发响应并与其他系统交互协同,在数字系统中模拟和集成复杂的行为或跨业务流程。此外,数字技术将推动人-机合作由传统的数据交互向知识交互转变,促使生产运行模式由“劳动为主、创造为辅”向“劳动为辅、创造为主”转变^[46-47]。

3 D-ADS 应用及建议

3.1 D-ADS 的应用初探

D-ADS 的应用前景十分广阔。本节从设备数字化和系统数字化维度，结合 2 个实际案例探索 D-ADS 的应用。

1) 案例 1，设备状态数字化监测与运维。

配电设备体量大、分布广、质量良莠不齐，传统设备状态感知多依赖人工巡检和定性评价，设备状态难以全面科学掌握，配网“以抢代维、不坏不修”等被动运维方式较为普遍。设备状态数字化监测与运维旨在融合设备状态诊断和运行检修所需的多元数据，采用统计模型和学习方法实现设备健康状态精准计算和基于设备状态的主动运维，如

图 4 所示。首先，通过在线式传感监测、离线式试验检测、机器人自主巡检等技术方式，采集设备运行的电气量、理化量、机械量等各类状态数据，通过数据清洗、格式对齐、时空同步、特征构造等技术手段实现数据预处理并上传至统一数据库。此后，基于数字化服务体系对数据样本进行抽取和挖掘分析，开展基于学习的配电设备缺陷识别和基于多源数据融合分析的设备健康诊断，通过多维度关联、横纵向对比与风险预测分析，驱动配网巡视检修与运维工单，实现运维策略的仿真优化与运维服务的互动调整，从而提高配网运维效率效益^[48-49]。

图 5 给出考虑内外部多因素的配电设备运行状态数字化示意，在健康状态影响因素分析过程中提

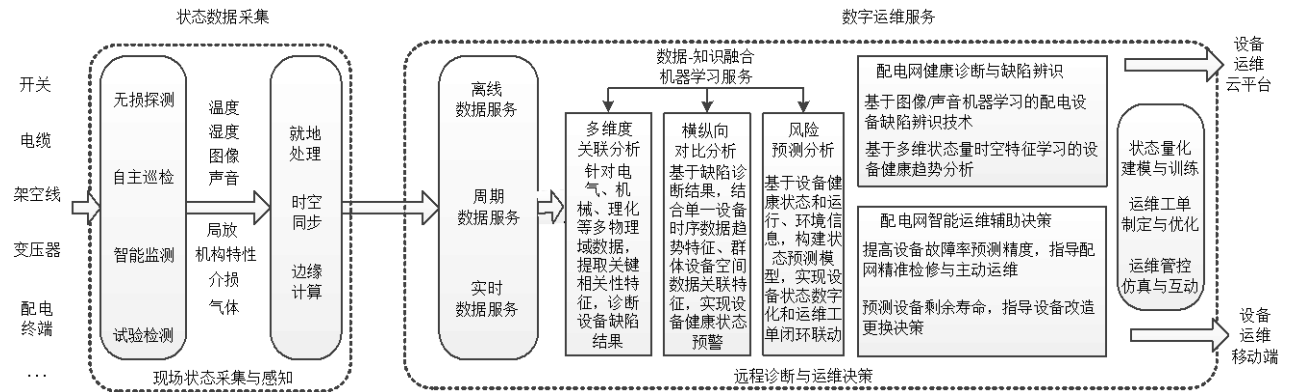


图 4 配电设备状态监测与运维架构示意

Fig. 4 Architecture of distribution equipment condition diagnosis and maintenance

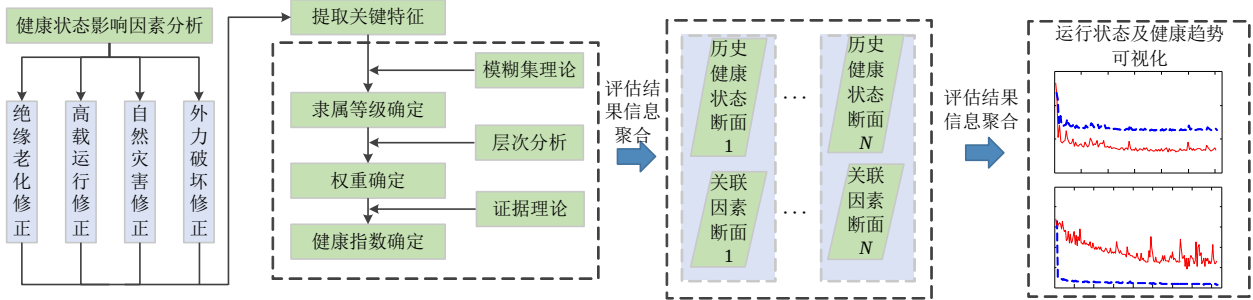


图 5 考虑内外部多因素的配电设备健康状态趋势分析

Fig. 5 Trend analysis of distribution equipment condition considering multiple internal and external factors

取关键特征，在健康评估时依托领域知识经验构建配电设备知识图谱，综合运用多源信息融合、模糊数学与证据理论等方法，建立基于多特征多维判据的配电设备健康状态评估模型^[49]：

$$HI = \max\{MAE(m_{H_i}), H_i \in \mathcal{O}\} \quad (5)$$

式中：HI 表示设备健康指数，角标 i 表示所考虑因素(证据)的序号。MAE()表示修正的平均证据：

$$MAE(m) = \sum_{i=1}^n (w_i m_i) \quad (6)$$

$$w_i = [(w_{ei} w_{fi})^{0.5}] / [\sum_{i=1}^n (w_{ei} w_{fi})^{0.5}], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中： w_i 为第 i 项因素(证据)的改进权重； w_{ei} 为因素 i 的初始权重； w_{fi} 为因素 i 的相对权重。

通过考虑设备服役年限、负载水平、通道环境、故障情况、运维检修记录以及配电自动化、在线监测、带电检测等多维度信息(证据)对设备状态的动态关联影响，可计算描述配电设备真实状态的最优模型参数和权重，并建立适用于不同区域和环境工

况的配电设备状态评价模型数据库。考虑到设备健康状态具有发展性且同时受到内外部因素的耦合影响,可结合具体场景中的数据对既有模型进行参数修正、聚类拟合和学习优化,从而精准刻画设备状态及其发展趋势^[50]。

2) 案例2, 配电系统数字化分析与规划。

配电网规划是一个离散、非线性、多阶段、多目标的组合优化问题。传统配网规划由于基础数据不尽充分全面,往往采用经验知识对规划模型进行简化,导致计算结果难以充分满足实际电网要求。系统数字化诊断与规划旨在融合电网规划态与运行态所需的关键模式和数据,对配电设备和网络现状进行量化诊断,对源/荷发展需求进行精准估计,同

时计及各类可调资源或手段(如 DG、需求侧响应、储能、网络重构等),开展 DER 的精细化建模以及配电系统的协同仿真分析,综合考虑分布式资源不确定性、需求侧响应模式、低压系统特性和配网灵活性等因素,采用适当的概率模型和学习算法进行规划计算和方案评估,如图6所示^[51-54]。首先,确定规划目标并对配网现状和用户信息进行诊断建模,根据实际问题需要确定输入数据和模型颗粒度,实现设备资产和网络运行的现状能力诊断以及未来源网荷发展预测;然后,综合利用规划态、运行态和其他数据,建立配电网规划概率模型,确定规划目标和约束风险;最后,采用学习算法制定规划方案,基于规划-运行仿真分析对方案综合效益进行评估

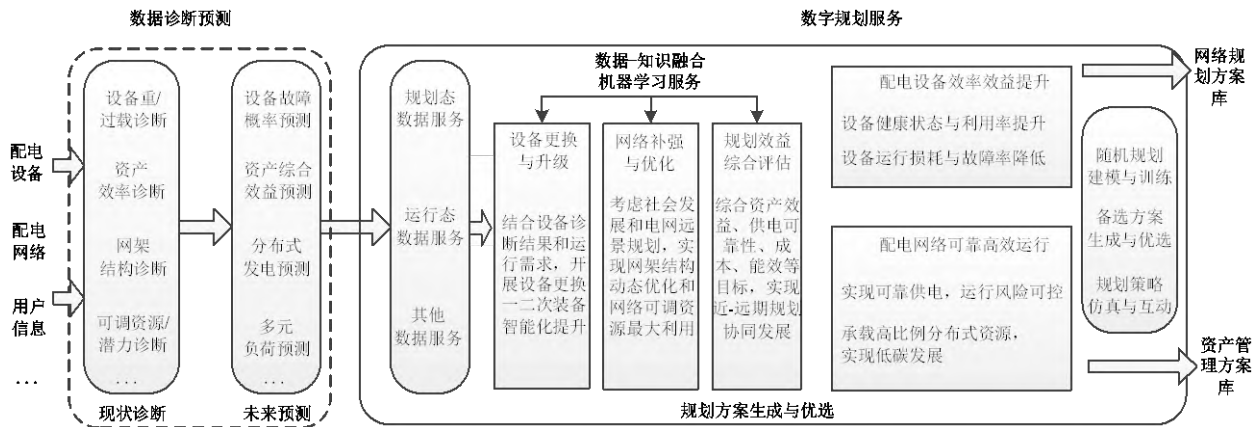


图6 配电系统诊断分析与规划架构示意

Fig. 6 Architecture of distribution system diagnosis and planning

估,通过互动迭代计算以确定最优规划方案。

相较于传统规划模型,D-ADS可为各类随机性因素的精准刻画和规划策略仿真分析提供数字化能力支撑,从而支持概率模型、多场景模型、不确定性集/区间模型等随机模型的按需灵活应用^[55]。同时,不同于传统配网规划中未考虑或简化考虑设备健康状态等因素,D-ADS将此类因素纳入规划模型中,形成更加精准系统的规划方案,从而实现配电资产与网络规划的统筹兼顾。一种规划建模方式示意如下^[56]:

$$\min R = R_e + R_r + R_g = (C_i + C_r + C_o + C_m) + d_s \cdot P_{EENS} + (C_{DSR} + C_{DG,P} + C_{DG,Q}) \quad (8)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} = P_i, i=1,2,\dots,N \\ Q_{Gi} - Q_{Li} = Q_i, i=1,2,\dots,N \end{cases} \quad (9)$$

$$P_i \leq P_{i\max}, \quad i=1,2,\dots,N_L \quad (10)$$

$$U_{j\min} \leq U_j \leq U_{j\max}, \quad j=1,2,\dots,N_S \quad (11)$$

$$U_{i\min} \leq \Delta U_i \leq U_{i\max}, \quad i=1,2,\dots,N_L \quad (12)$$

$$P_{DG,i}^{\min} \leq P_{DG,i} \leq P_{DG,i}^{\max}, \quad i=1,2,\dots,N_{DG} \quad (13)$$

$$Q_{DG,i}^{\min} \leq Q_{DG,i} \leq Q_{DG,i}^{\max}, \quad i=1,2,\dots,N_{DG} \quad (14)$$

$$0 \leq P_{DSR,i} \leq P_{DSR,i}^{\max} \quad (15)$$

$$RS \geq RS_0 \quad (16)$$

式(8)中: R_e 为经济风险,为配电网新建、改造投资费用以及运行维护等费用之和; R_r 为可靠性风险,指由于电力供应不完全可靠或预期不完全可靠时供电企业承担的缺供电量成本; R_g 为环保风险,是指通过运用DG和储能等手段进行削峰填谷,以达到减少或延缓配电网建设投资费用(新建或改造)的目的。式(9)~(16)为各约束项。 C_r 计及了设备全寿命周期的健康状态和改造投资费用因素:

$$C_r = \sum_{k \in r(I)} I_{R,k} C_{R,k} Y_k \quad (17)$$

式中: $r(I)$ 为可更换的设备集,包括在规划水平年所有设备健康指数处于危急缺陷的设备; $I_{R,k}$ 为第 k 类设备的规模; $C_{R,k}$ 为第 k 类设备的单位综合造价;

y_k 为 0-1 变量, 更换设备 k 时 y_k 取 1, 否则取 0。

从以上设备运维和网络规划的案例可看出, 数字化方法体系与传统方法的主要区别在于数据的客观性(如尽量避免传统模型中的经验判断, 包括设备状态评价模型中的特征量权重制定、配网规划模型中的同时率的确定)、模型的全面性(如对配电设备和网络进行精准诊断和协同仿真)以及计算的服务性(如通过人-机互动服务方式动态响应外部需求的变化)等。

3.2 D-ADS 面临的挑战及建议

在能源互联网的发展推动下, 配电数字化将在实际中逐步发挥重要作用。然而, 现有技术体系面临感知深度广度和资源共享不足、数据实时性和融通支撑不足、数字标准化不足等问题^[24], 难以全面助推 ADS 向数字化方向发展:

1) 在电网感知深度广度方面, 目前的数字技术仅实现了部分一次设备与二次终端的成套组装, 二者缺乏深层次实质性的融合, 一次设备电气参量、理化参量、环境参量等状态量的综合采集程度低, 中压配网的拓扑模型动态更新不足、低压配网的观测能力有限, 因而难以实现设备和网络状态的全面精准感知^[24,57]。

2) 数据模型融通共享方面, 低压配网的传感量测技术尚处起步阶段, 高、中、低压配网间缺乏统一协调的数字化支撑平台, 而不同业务场景采用不同的通信方式和规约机制, 调度、配电和营销等专业之间缺乏综合集成的数字化集成模型, 建模工作多采用“烟囱式”信息传递模式, 造成了“模型孤岛”和孤立系统。

3) 在标准化方面, 针对配电设备的状态监测评价技术缺少统一标准, 针对配网运行和运营的智能分析决策技术缺乏基础数据字典和共性算法工具, 尚未形成机器学习等智能技术的实用场景。

4) 在安全防护方面, D-ADS 将具有更加开放互动的互联网属性, 例如, 配电终端、电动汽车充电桩、智能用电设备等可通过无线方式进行通信, 电力机器人可与各类终端及主站进行远程通信, 配电信息边界已延伸至移动互联网边界, D-ADS 信息安全边界逐步走向模糊化, 传统基于网络边界的安全机制难以为继, 如何构建能够抵御不同运行风险和黑客攻击的数字安防体系, 特别是未来海量分散配电终端的安全防护技术, 面临挑战。

5) 在能源政策方面, 新能源体系和数字化不

能简单通过对现有化石能源体系的替代和外延扩张而形成。此外, ADS 将涌现出不同形式的能源组合, 电能消费者和生产者身份将频繁转换。系统灵活性是未来能源电力体系的稀缺资源, 而我国当前能源体系灵活性和效率提升面临技术和市场改革等多重障碍。

为应对以上挑战, 迫切需要对 D-ADS 开展全面系统的研究。为此, 建议首先从思想思维方式上理解数字化转型的意义和价值, 从单纯的市场理念向技术-市场相结合的理念转变, 从传统的物理思维向生物生态思维方向转变, 赋予配电系统容错机制和智能进化优化能力, 追求适应、联系、共生、共赢, 把技术视野下的“硬件组合”和经济社会市场人文的“软件组合”相结合, 从而更好地解决复杂的、跨界的、系统性的问题。以用户为中心、以数据为资产、以模型为工具、以人才为依托, 畅通数字化转型渠道, 拥抱创新数字化新模式新业态, 构建满足客户需求并支持业务创新的数字平台体系, 确保数据管理责任明确、获取源头唯一、使用规则清晰、传输管道通畅、应用质量保证。同时, 为最大化数字化成本与效益, 应建立健全数据资产的全生命周期精益管理体系, 科学高效地采集、处理、应用和报废有关数据资产。

其次, 以问题为驱动, 通过对比配电运行运营实际需求与数字技术的技术特点, 全面梳理问题的瓶颈, 根据实际情况确定数字化转型的范围和方向, 将自上而下和由下至上相结合, 建立标准规范体系, 实现数字转型规范化、全联接, 确保数据有价值、可获取、可信赖、可共享、可应用。在政策方面, 需加强当前能源体制改革与能源转型政策协调, 在改革中融入能源数字化转型的要求, 降低能源转型成本, 带动配电系统由高速度发展向高质量发展转变。

再次, 在方法层面, 建议在物理层面开展 D-ADS 的系统构架研究, 深化 D-ADS 的基础数学建模, 精准映射设备模型和系统模型, 量化描述实际运行工况、设备状态和发展趋势, 图形化友好展现配电系统静态拓扑结构、动态运行状态和二次系统配置等; 在技术层面研发统一协同、扁平应用的数字支撑平台、数据通讯平台和数据共享平台, 在统一平台架构上而非多个平台上实现云-边-端侧数据资源的安全透明交互, 支撑应用模式按需灵活构建和多维数据灵活组合, 助推全业务全流程数字

转型。在安全防护方面,以设备、系统和全业务流数字化需求为导向,突破网络-终端的安全信任机制和技术问题,实现物理系统安全、信息应用安全、边界接口安全、身份信任安全、数据共享安全,从而形成贯穿各环节各场景的无缝化网络安防体系。

4 结论

D-ADS 是实现配电系统效率提升和绿色可持续发展的关键。信息系统对于智能电网的支撑作用,正逐步由以 IT 技术为核心,转变为以数字化为核心。相应的,未来的供电信息服务模式将由软件应用建设模式向数据分析服务模式转变,数据将成为电力企业的要素资源和配置企业资源的关键要素。以此为基础,D-ADS 将连接更加广泛的绿色能源市场和客户,实现边际能源效益递增,助推产业升级改造和体系架构变革,驱动能源电力技术创新并催生新的产业商业机遇。为此,迫切需要将数学理念、模型工具和算法算力进行广泛融合与应用,特别是当前新能源大发展形势下配电设备、系统和业务的数学建模任务艰巨。建议在数字化实践过程中开展跨行业思维融合和跨领域技术创新,积极探索不同的数字技术,科学求证有效的数据管理应用模式,助推数字化新思想、新理念、新技术的发展成熟。

参考文献

- [1] 人民日报. 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议[EB/OL]. (2020-11-04). <http://cpc.people.com.cn/n1/2020/1104/c64094-31917780.html>.
The People's Daily. Suggestions of the central committee of the communist party of china on formulating the 14th five year plan for national economic and social development and the long-term objectives for the year 2035[EB/OL]. (2020-11-04). <http://cpc.people.com.cn/n1/2020/1104/c64094-31917780.html>(in Chinese).
- [2] 申洪, 周勤勇, 刘耀, 等. 碳中和背景下全球能源互联网构建的关键技术及展望[J]. 发电技术, 2021, 42(1): 8-19.
SHEN Hong, ZHOU Qinyong, LIU Yao, et al. Key technologies and prospects for the construction of global energy internet under the background of carbon neutral [J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1): 8-19(in Chinese).
- [3] 赵鹏, 蒲天骄, 王新迎, 等. 面向能源互联网数字孪生的电力物联网关键技术及展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 447-457.
ZHAO Peng, PU Tianjiao, WANG Xinying, et al. Key technologies and perspectives of power internet of things facing with digital twins of the energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 447-457(in Chinese).
- [4] 慈松, 刘前卫, 康重庆, 等. 从“信息-能量”基本关系看信息能源深度融合[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2289-2296.
CI Song, LIU Qianwei, KANG Chongqing, et al. Fundamental exploration into ICT-energy fusion[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2289-2296(in Chinese).
- [5] 张亚健, 杨挺, 孟广雨. 泛在电力物联网在智能配电系统应用综述及展望[J]. 电力建设, 2019, 40(6): 1-12.
ZHANG Yajian, YANG Ting, MENG Guangyu. Review and prospect of ubiquitous power internet of things in smart distribution system[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(6): 1-12(in Chinese).
- [6] 马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 能源互联网概念、关键技术及发展模式探索[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3014-3022.
MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Exploring the concept, key technologies and development model of energy internet[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3014-3022(in Chinese).
- [7] 马钊, 刘颖异, 尚宇炜, 等. CIGRE 2016 未来电力系统及主动配电系统技术新动向[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 27-35.
MA Zhao, LIU Yingyi, SHANG Yuwei, et al. CIGRE 2016 development trends of future power system and active distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 27-35(in Chinese).
- [8] PILO F, BAKARI K E, TAYLOR J, et al. Planning and optimisation of active distribution systems — an overview of CIGRE working group C6. 19 activities[C]//CIRED 2012 Workshop: Integration of Renewables into the Distribution Grid. Lisbon: IET, 2012.
- [9] 萧展辉. 南方电网数字化转型实践[J]. 软件和集成电路, 2021(8): 90-91.
XIAO Zhanhui. Practice of digital transformation of China southern power grid[J]. Software and Integrated Circuit, 2021(8): 90-91(in Chinese).
- [10] 国网河北省电力公司. 雄安新区数字化主动配电网建设方案[EB/OL]. (2020-10-12). http://www.xinhuanet.com/power/2020-10/12/c_1210837105.htm.

- State Grid Hebei Electric Power Company. Construction scheme of digital active distribution network in Xiong'an new area[EB/OL]. (2020-10-12). http://www.xinhuanet.com/power/2020-10/12/c_1210837105.htm(in Chinese).
- [11] ABB. ABB Ability 赋能工业互联, 加速数字化转型[EB/OL]. 2020(2020-09-22). <https://new.abb.com/news/zh-CHS/detail/67973/abb-ability-speeds-up-digital-transformation>.
- ABB. ABB ability enables industrial interconnection and accelerates digital transformation[EB/OL]. 2020(2020-09-22). <https://new.abb.com/news/zh-CHS/detail/67973/abb-ability-speeds-up-digital-transformation>(in Chinese).
- [12] 施想学堂. 释放数字化电网无限潜能[EB/OL]. (2020-11-12). https://go.schneider-electric.com/China_MVC_CN_201911_Campaign-Utility-Academy-Whitepaper_MF-LP.html.
- Shi Xiang School. Unleash the unlimited potential of digital power grid[EB/OL]. (2020-11-12). https://go.schneider-electric.com/China_MVC_CN_201911_Campaign-Utility-Academy-Whitepaper_MF-LP.html(in Chinese).
- [13] 中国电力科学研究院有限公司, 中国电力企业联合会科技开发服务中心. 第4届配电技术高峰论坛[EB/OL]. (2020-11-12). <https://www.eptc.org.cn/TC05/activity/8aae205b744312ed01752b8957d005f6>.
- China Electric Power Research Institute Co., Ltd, China Electricity Council. The 4th power distribution technology summit forum[EB/OL]. (2020-11-12). <https://www.eptc.org.cn/TC05/activity/8aae205b744312ed01752b8957d005f6>(in Chinese).
- [14] 中国电力报. 2020 年配电网数字化智能化提升专题交流会在深圳召开[EB/OL]. 0(2020-10-21). <https://cloud.tencent.com/developer/news/711160>.
- China Electric Power News. The symposium on digital and intelligent improvement of distribution network was held in Shenzhen in 2020[EB/OL]. (2020-10-21). <https://cloud.tencent.com/developer/news/711160>(in Chinese).
- [15] 沈沉, 曹仟妮, 贾孟硕, 等. 电力系统数字孪生的概念、特点及应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 487-498.
- SHEN Chen, CAO Qianni, JIA Mengshuo, et al. Concepts, characteristics and prospects of application of digital twin in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 487-498(in Chinese).
- [16] 蒲天骄, 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).
- [17] 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).
- [18] 刘喆林, 王成山, 李鹏, 等. 多源量测数据融合的配电网状态估计及应用[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2605-2615.
- LIU Zhelin, WANG Chengshan, LI Peng, et al. State estimation of distribution networks based on multi-source measurement data and its applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2605-2615(in Chinese).
- [19] 王珺, 田恩东, 马建, 等. 基于数据驱动的非全实时观测配电网无功优化方法[J]. 电力建设, 2021, 42(2): 68-76.
- WANG Jun, TIAN Endong, MA Jian1, et al. Reactive power optimization of partial real-time visible distribution network based on data driven[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(2): 68-76(in Chinese).
- [20] 刘健, 张小庆, 张志华. 继电保护配合提高配电自动化故障处理性能[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 10-16.
- LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, ZHANG Zhihua. Improving the performance of fault location and restoration based on relay protection for distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 10-16(in Chinese).
- [21] 中电新闻网. 分布式电源发展需规划、政策、技术协调统一[EB/OL]. (2015-08-31)[2019-05-06]. http://www.cpnw.com.cn/zdyw/201508/t20150831_824616.html.
- China Power News Network. The development of distributed generation needs the coordination and unification of planning, policy and technology[EB/OL]. (2015-08-31)[2019-05-06]. http://www.cpnw.com.cn/zdyw/201508/t20150831_824616.html(in Chinese).
- [22] 央广网. 2030 年中国电动汽车保有量或超 1 亿辆[EB/OL]. (2019-01-14). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1622612998275335571&wfr=spider&for=pc>.
- China Broadcasting Network. The number of electric vehicles in china may exceed 100 millions in 2030[EB/OL]. (2019-01-14). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1622612998275335571&wfr=spider&for=pc>(in Chinese).

- [23] 魏晓菁. 加快数字化转型 支撑能源互联网建设[EB/OL]. 2020(2020-08-14). <http://www.chinapower.org.cn/detail/240180.html>.
WEI Xiaoqing. Accelerate the digital transformation and support the construction of energy internet[EB/OL]. 2020(2020-08-14). <http://www.chinapower.org.cn/detail/240180.html>(in Chinese).
- [24] 国家电网有限公司. 面向能源互联网的配电网二次系统研究框架, 2020.
State Grid Corporation of China. Research Framework of Distribution Network Secondary System for Energy Internet, 2020(in Chinese).
- [25] 陈晓杰, 徐丙垠, 陈羽, 等. 配电网分布式控制实时数据快速传输技术[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 151-158.
CHEN Xiaojie, XU Bingyin, CHEN Yu, et al. Real-time data fast transmission technology for distributed control of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 151-158(in Chinese).
- [26] 唐爱红, 程时杰. 配电网自动化通信系统的分析与研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(5): 73-75, 86.
TANG Aihong, CHENG Shijie. Analysis and study of the communication system in distribution automation system[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(5): 73-75, 86(in Chinese).
- [27] 韩岩. 某区域配电自动化系统应用和管理研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
HAN Yan. Research on application and management of distribution automation system in a certain area[D]. Jinan: Shandong University, 2020(in Chinese).
- [28] 吕天光, 艾芊, 孙树敏, 等. 含多微网的主动配电系统综合优化运行行为分析与建模[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 122-132.
LÜ Tianguang, AI Qian, SUN Shumin, et al. Behavioural analysis and optimal operation of active distribution system with multi-microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 122-132(in Chinese).
- [29] 宋杰, 谢海宁, 杨增辉, 等. 基于多源异构数据挖掘的配电网故障信息统计分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 141-147.
SONG Jie, XIE Haining, YANG Zenghui, et al. Statistical analysis of the distribution fault based on multiple source and isomerism data mining technology[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 141-147(in Chinese).
- [30] 周杨珺, 梁朔, 俞小勇, 等. 基于多源异构数据的配电网运行分析平台: 系统架构与技术实现[J]. 南方电网技术, 2018, 12(8): 59-64.
ZHOU Yangjun, LIANG Shuo, YU Xiaoyong, et al. Research and implementation of distribution network operating analysis platform based on multi-source heterogeneous data[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(8): 59-64(in Chinese).
- [31] 尚宇炜, 郭剑波, 吴文传, 等. 数据-知识融合的机器学习(1): 模型分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(15): 4406-4415.
SHANG Yuwei, GUO Jianbo, WU Wenchuan, et al. Machine learning methods embedded with domain knowledge(part I): model analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4406-4415(in Chinese).
- [32] 蔡佳铭, 谢宁, 王承民, 等. 配电网规划的数字化技术和建模方法—第24届国际供电会议研究成果综述[J]. 电网技术, 2019, 43(6): 2171-2178.
CAI Jiaming, XIE Ning, WANG Chengmin, et al. Digitalized techniques and modeling methodologies for distribution network planning-review of CIRED 2017 on power distribution system planning[J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2171-2178(in Chinese).
- [33] HUANG Peng, LIU Rui, MO Juan, et al. Design of digital information share system in power distribution network[C]//2016 3rd International Conference on Information Science and Control Engineering(ICISCE). Beijing, China: IEEE, 2016.
- [34] HU Lijuan, LIU Keyan, LIN Zhi, et al. An abnormal state detection method for power distribution network based on big data technology[C]//2018 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery(CyberC). Zhengzhou, China: IEEE, 2018: 169-1694.
- [35] MUKA R, HAUGLI F B, VEFSNMO H, et al. Information inconsistencies in smart distribution grids under different failure causes modelled by stochastic activity networks[C]//2019 AEIT International Annual Conference(AEIT). Florence, Italy: IEEE, 2019: 1-6.
- [36] GRIEVES M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication[R]. Melbourne, Florida, USA: Florida Institute of Technology, 2015.
- [37] 唐文虎, 陈星宇, 钱瞳, 等. 面向智慧能源系统的数字孪生技术及其应用[J]. 中国工程科学, 2020, 22(7): 74-85.
TANG Wenhui, CHEN Xingyu, QIAN Tong, et al. Technologies and applications of digital twin for developing smart energy systems[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(4): 74-85(in Chinese).
- [38] 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).
- [39] GRIEVES M W. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises[J]. International Journal of Product Development, 2005, 2(1-2): 71-84.
- [40] ENR ÍQUEZ J G, JIMÉNEZ-RAM ÍREZ A, DOMÍNGUEZ-MAYO F J, et al. Robotic process automation: a scientific and industrial systematic mapping study[J]. IEEE Access, 2020, 8: 39113-39129.
- [41] 马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 未来配电系统形态及发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1289-1298.
- MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Form and development trend of future distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1289-1298(in Chinese).
- [42] 朱静, 杨晖, 高亚辉, 等. 基于模型的系统工程概述[J]. 航空发动机, 2016, 42(4): 12-16.
- ZHU Jing, YANG Hui, GAO Yahui, et al. Summary of model based system engineering[J]. Aeroengine, 2016, 42(4): 12-16(in Chinese).
- [43] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.
- TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 5-22(in Chinese).
- [44] BANAS J. Robotic process automation. Trends, expectations and adaptation opportunities in the organization[C]//Expanding Horizons: Business, Management and Technology for Better Society. International School for Social and Business Studies, 2020: 441.
- [45] MONTERO J C, RAMÍREZ A J, ENR ÍQUEZ J G. Towards a method for automated testing in robotic process automation projects[C]//2019 IEEE/ACM 14th International Workshop on Automation of Software Test(AST). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2019: 42-47.
- [46] 栾恩杰, 陈红涛, 赵滢, 等. 工程系统与系统工程[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2016, 8(5): 480-490.
- LUAN Enjie, CHEN Hongtao, ZHAO Yan, et al. Engineered systems and systems engineering[J]. Journal of Engineering Studies, 2016, 8(5): 480-490(in Chinese).
- [47] 石文超, 吕林, 高红均, 李海波, 文金虎, 王家怡, 刘晋源. 基于信息间隙决策理论的含 DG 和 EV 的主动配电网优化运行[J]. 电力建设, 2019, 40(10): 64-74.
- SHI Wenchao, LÜ Lin, GAO Hongjun, etc. Optimization operation of active distribution Network with DG and EV applying IGDT[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(10): 64-74(in Chinese).
- [48] 尚宇炜, 马钊, 彭晨阳, 等. 内嵌专业知识和经验的机器学习方法探索(一): 引导学习的提出与理论基础[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5560-5571.
- SHANG Yuwei, MA Zhao, PENG Chenyang, et al. Study of a novel machine learning method embedding expertise part I: proposals and fundamentals of guiding learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5560-5571(in Chinese).
- [49] 马钊, 周莉梅, 袁海文, 等. 现代配电网健康指数理论及其应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 130-140.
- MA Zhao, ZHOU Limei, YUAN Haiwen, et al. Health index methodology of modern distribution network and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 130-140(in Chinese).
- [50] 黄蔓云, 卫志农, 孙国强, 等. 数据挖掘在配电网态势感知中的应用: 模型、算法和挑战[J/OL]. 中国电机工程学报, 2021[2021-12-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20211101.1124.003.html>.
- HUANG Manyun, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Review of distribution system situation awareness based on data mining: modeling, algorithms and challenges [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2021[2021-12-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20211101.1124.003.html>(in Chinese).
- [51] PILO F, JUPE S, SILVESTRO F, et al. Planning and optimization methods for active distribution systems[R]. Paris: CIGRE, 2014.
- [52] 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).
- [53] 王梓旭, 林伟, 杨知方, 等. 考虑负荷弹性空间的配电网可靠性扩展规划方法[J/OL]. 中国电机工程学报, 2021, <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.211525>.
- WANG Zixu, LIN Wei, YANG Zhifang, et al. A reliability-constrained distribution network expansion

planning method considering flexibility space of power demand[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2021, <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.211525>(in Chinese).

- [54] 孙雨潇, 朱俊澎, 袁越. 基于动态孤岛混合整数线性规划模型的主动配电网可靠性分析[J]. 电力建设, 2019, 40(5): 90-97.

SUN Yuxiao, ZHU Junpeng, YUAN Yue. Reliability evaluation based on dynamic island milp model of active distribution network[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(5): 90-97(in Chinese).

- [55] KANG C, ZHANG N, SCHAEFER C, et al. Optimal power system planning under growing uncertainty[R]. Paris: CIGRE, 2020.

- [56] ZHOU Limei, SHENG Wanxing, LIU Wei, et al. An optimal expansion planning of electric distribution network incorporating health index and non-network solutions[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(3): 681-692.

- [57] 赵仕策, 赵洪山, 寿佩瑶. 智能电力设备关键技术及运维探讨[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 1-10.

ZHAO Shice, ZHAO Hongshan, SHOU Peiyao. Discussion on key technology and operation & maintenance of intelligent power equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20):

1-10(in Chinese).



在线出版日期: 2021-12-12。

收稿日期: 2021-03-25。

作者简介:

尚宇炜(1991), 博士, 研究方向为主动配电网分析、智能运维、资产管理、机器学习等, 517299206@qq.com;

周莉梅(1979), 女, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为智能配电系统规划、配电网健康诊断与智能运维、分布式能源系统等;

*通信作者: 马钊(1957), 男, 特聘教授, 博士生导师, 研究方向为先进配电和分布式能源系统、智能电气设备设计/开发与技术咨询、中低压直流配电技术、综合能源系统、人工智能在电力能源系统中的应用, ma_zhao@hotmail.co.uk;

王运虎(1978), 男, 博士, 山东省标准化研究院管理与科学博士后, 研究方向为能源管理, 新能源与配电网和储能优化应用等。

(责任编辑 王庆霞)

Preliminary Study of Digitalized Active Distribution Systems

SHANG Yuwei¹, ZHOU Limei¹, MA Zhao^{2*}, WANG Yunhu³

(1. China Electric Power Research Institute; 2. Shandong University; 3. National Renewable Energy Engineering Research Center)

KEY WORDS: digitalization; internet of things; distribution system; cyber-physical system; digital twin; energy internet

With the vigorous development of digital technologies such as big data, cloud computing and artificial intelligence, the power industry has promoted the digital transformation into a strategic measure, aiming at coordinating different power elements, mobilizing massive energy resources, innovating system operation modes and creating benefit values through digital technology, so as to realize a new development pattern of Energy Internet with comprehensive mastery of power equipment condition, intelligent control of system operation and overall improvement of service quality and efficiency. Therefore, digitalized active distribution systems (D-ADSs) have become the focus of research in academic and industrial circles.

In fact, digital technology is not a new proposition in the field of power distribution, but a comprehensive and cross technical field developing with the evolution of power distribution technology. Its connotation and extension are expanding, and has new characteristics and requirements under the current context of building a new-type power system with renewable energies as the main body. Because D-ADSs cover many links of distribution systems operation and service, experts in different research fields inevitably have different understandings, and the systematic research on D-ADSs is still in the preliminary stage. How is digitization related to informatization and intelligence, what is the relationship between big data, digital twins and D-ADSs, how to describe the characteristics and formal model of D-ADSs, and what are the differences between the operation mode of D-ADSs and the traditional distribution systems? These problems are the key to the research of D-ADSs and need to be studied. Following the above considerations, this study focuses on the analysis and prospect of D-ADSs so as to promote exchanges in different research fields.

First, the development status of digitalized distribution systems is briefly summarized, with the sketch of technology evolution of distribution systems given in Fig. 1. The main characteristics of the D-ADS are refined preliminarily as follows, following the power systems' information security standards and unified data models, establishing a virtual twin system matching the

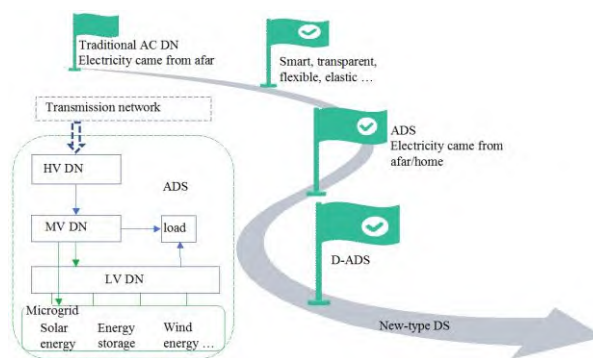


Fig. 1 Sketch of technology evolution of distribution systems

distribution physical system, constructing an advanced digital system based on "knowledge (experience), data, model, algorithm, computing power, software definition and communication infrastructure", connecting the operation links and flexible resources from source-network-load-storage sides, coordinating perception, analysis and decision-making, forming a hierarchical and divisional digital architecture and decision-making system, so as to realize the digitization of power distribution equipment, system and business flow.

The conceptual model of the D-ADSs is formalized by applying the model based system engineering.

Second, technical applications of the D-ADSs are explored by taking two examples from perspectives of digitalized distribution equipment and system, i.e., digitalized distribution equipment condition evaluation and maintenance, as well as digitalized distribution system diagnosis and planning.

Then, some technical challenges and development suggestions of the D-ADSs are put forward. It is suggested to carry out cross-industry methodology integration and cross-field technological innovation in the process of digital practices, actively explore different digital technologies, scientifically verify effective data management modes, and promote the development and maturity of new ideas and technologies. Promisingly, D-ADSs will connect a wider range of green energy markets and customers, achieve incremental marginal energy benefits, boost industrial upgrading and system architecture reform, drive energy and power technology innovation and give birth to new business opportunities.