

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.01.010

城市能源互联网视角下的主动配电网规划设计与策略研究

Research on active distribution network planning and design strategy from the perspective of urban energy internet

周炳华¹, 王洋¹, 李峰¹, 崔金栋^{2*}, 冉子晗²

ZHOU Binghua¹, WANG Yang¹, LI Feng¹, CUI Jindong^{2*}, RAN Zihan²

(1. 杭州市电力设计院有限公司余杭分公司, 杭州 310030; 2. 东北电力大学 经济管理学院, 吉林 吉林 132012)

(1. Yuhang Branch of Hangzhou Electric Power Design Institute Company Limited, Hangzhou 310030, China;

2. College of Economics and Management, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

摘要: 城市能源互联使城网规划中各种电力资源信息相通, 改变了电力行业的价值链。为适应这种新形势, 配网规划设计工作的研究成为电力行业亟待解决的问题。通过分析城市能源互联网下配网规划中分布式电源、储能、需求响应、通信等关键技术对主动配电网规划的影响, 从城市能源互联网的视角, 对城市电网规划单位的设计工作提出了加强地方政府沟通、加强企业技术对接、公司自身业务求变和建构整体价值链4项实施策略, 保障了主动配电网规划设计工作的有序进行。

关键词: 城市能源互联网; 主动配电网(ADN); 规划策略; 分布式电源; 储能; 需求响应; 智能电网; 新基建

中图分类号: TM 933; TM 01*8

文献标志码: A

文章编号: 1674-1951(2021)01-0059-07

Abstract: Urban energy internet links the information of power resources in network planning, which changes the value chain of power industry. Under the new situation, the research on distribution network planning and design has become an urgent problem for the power industry. By analyzing the impact of distributed resources access, energy storage, demand response and key communication technologies of distribution network on active distribution network planning under the urban energy internet, four specific implementation strategies for the companies were put forward from the perspective of urban energy interconnection which include strengthen communication with local government, improving technology exchange between enterprises, updating enterprises' business and building an integrated value chain. The strategies ensure the orderly implementation of active distribution network planning and design.

Keywords: urban energy internet; active distribution network (ADN); planning strategy; distributed resources; energy storage; demand response; smart grid; new infrastructure

0 引言

分布式发电(Distributed Generation, DG)与高质量用电需求改变了传统供配电模式。主动配电网(ADN)利用互联网通信、需求侧响应技术, 实现了对规划区域内DG、柔性负荷的双向潮流协调管控, 保障了用户的用电质量和电网企业的盈利。规划主动配电网的过程中, DG的随机性以及需求侧响应机制造成的电网系统供需不平衡, 对电网双向互动智能服务提出了更高的要求。在《能源与电力分析

系列年度报告2019》中, 提出了基于能源互联网大数据平台贯彻“互联网+”智慧能源的指导方针, 推动能源、5G通信网络与数据中心的深度融合。

2019年我国首个城市能源互联网的建成, 实现了以主动配电网为核心的“源-网-荷-储”协调发展。新形势下, 主动配电网关键技术对配电网规划产生了新的影响。本文就能源互联网衍生的主动配电网关键技术对配电网规划的影响进行了深入分析, 并提出建议与对策。

1 国内外研究综述

ADN由国际大电网会议(CIGRE)C6.11项目组最早提出^[1]。ADN利用其主动管控能力解决了传

收稿日期: 2020-09-16; 修回日期: 2021-01-06

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(2020-DY15)

统配电网电能质量恶化、供电可靠性低的问题,电网规划结果也直接影响配电网投资收益以及未来配电网安全经济运行^[2-4]。

目前,国内外学者主要从 DG 规划、线路网络规划等方面入手进行 ADN 规划优化配置。为确保 DG 接入后,电力系统节点电压与电力网络稳定运行,文献[5]综合考虑了风电机组(WT)和光伏发电(PV)的多重配置,提出以确定性方法来规划有源配电网。文献[6-7]将电动汽车与城市电网交通互联,构建起两阶段鲁棒优化模型,合理规划、耦合配电网。文献[8-9]基于多类 DG 和用电负荷时序特性构建负荷预测模型,明晰分布式电源选址。文献[10]提出网络重构、DG 调度、需求侧管理和无功补偿 4 种主动管理模式,确保储能系统(ESS)与 DG 的规模和选址优化。文献[11]基于人工神经网络(ANN)方案,生成适应多种可能的电网网格状态,高精度估计电网中电压幅度和线路负载。

随着城市能源互联网示范项目的推广,多能耦合、互联互通为 ADN 优化配置带来新的技术发展思路。国内外专家主要从分布式电源协同管控技术、储能技术、需求侧响应、通信技术入手,研究城市能源互联网视角下 ADN 关键技术影响。文献[12]考虑可再生 DG 出力不稳定与用户用电分时段特征,提出电力系统规划灵活调度评估方法,满足规划方案更高灵活运行。文献[13]将每个配电系统中的分布式电源视为独立节点,发挥需求侧用电效能最大化,满足需求侧用电需求。针对电力系统源荷双端的不确定性,文献[14]创新性地提出区块链去中心化与城市能源互联网分布式电力系统构建融合,通过点对点(P2P)和智能合约实现供需侧互动。文献[15]提出在智能电网中,电器设备监控系统由 ZigBee 模块组建的无线传感网络、通用无线分组业务技术(GPRS)和互联网技术进行无线通信,保障了 ADN 中大电网与智能风光发电的有效结合。

目前,国内外学者对基于能源互联网的 ADN 规划已有大量研究,但大多停留在前端开发阶段,缺少关键技术对 ADN 设计管理机制的影响分析。因此,本文在城市能源互联网视角下,进行 ADN 关键技术对电网规划的影响分析,并结合电网运行规划经济稳定性对各电力部门具体实施策略提出建议。

2 城市能源互联网与 ADN 规划

城市能源互联网是由分布式能源发电系统、能源传输、能源协调运行系统以及智能电网数据管理、信息采集等多系统构成的能源互联平台。城市能源互联网下可再生分布式电源、电动汽车(EV)及

ESS 等电力负荷剧增,使得城市内部可利用能源多元化,对传统配网规划设计工作带来冲击^[16-17];大量电力资源分散性接入电网使得能源管理模式发生改变,要实现多源电力负荷间的平衡与协调规划,必须提高供能和用能双方的配合度;另外,对多类型能源间的数据进行汇总、分析、挖掘,以实现能源与信息交互、共享,也是配网规划发展关键性研究。

ADN 概念的提出为城市能源互联网下配网规划提供了新的思路。ADN 充分利用可控柔性资源,逐步完成对电源侧的主动规划、管控,改变原来传统配电网被动的运行、管控模式,将被动接受改变成主动运行。ADN 的出现提高了清洁能源的渗透度,实现了多元化能源、能源协同融合以及能源与信息上的互联互通。同时,ADN 下的分布式电源(DR)技术整合了分布式与集中式发电的优点,利用先进的信息技术、“互联网+”和智能管控系统开发各种智能装置,使得城市互联网规划的内部信息交流更加紧密,信息可靠性和安全性水平大幅度提升,技术人员可以及时掌握规划全过程中的动态用电需求的电力电量。城市能源互联网下 ADN 的基本框架如图 1 所示。

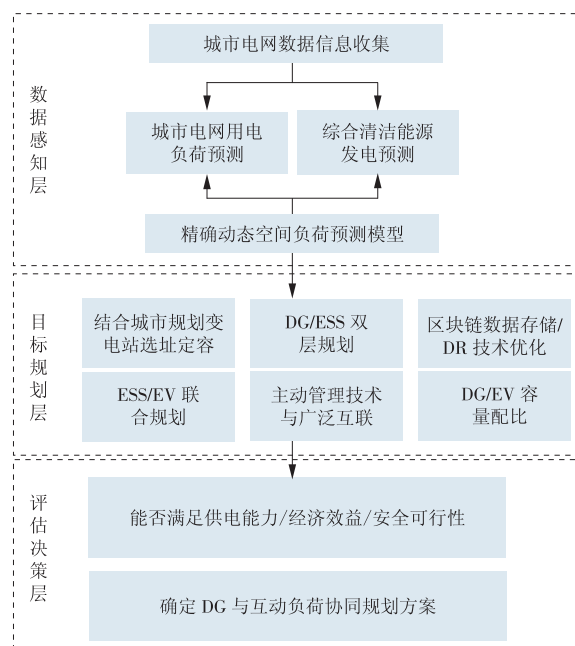


图 1 城市能源网下 ADN 规划的基本框架

Fig. 1 Basic framework of ADN planning under urban energy internet

3 城市能源互联网核心技术对 ADN 规划的影响

现阶段,城市能源互联网下 ADN 规划多数采用综合协调规划技术,除可再生分布式能源布局规划、ESS 以及电网设备选址定容规划,用户侧需求响应作为全新电力资源也归于 ADN 综合协调规划中。

新能源和需求侧响应势必会给配电网添加很多不确定性因素。目前配电网规划主要有 3 种模式,传统柔性配电网(FDN),ADN 和城市能源互联网下 ADN,区别见表 1。

表 1 配电网规划对比分析
Tab. 1 Comparative analysis of distribution network plans

阶段	FDN	AND	城市能源互联网下的 ADN
规划前期	规划前期主要以负荷预测为主	综合考虑负荷预测与发电预测	综合城市整体规划与 DG、EV、ESS 等源性负荷进行负荷预测、发电预测,确定变电站选址定容与电源定点规划
目标规划	主要以 DG 设备选址定容为主	综合考虑 DR、需求侧响应、EV 和 ESS 的联合规划;考虑主动管理技术的应用	综合城市用户需求响应、信息通信、区块链技术进行城市“多源-多网-多荷-多储”一体化建模;不仅实现电源、网架规划,还因地制宜地制定了不同城市多类资源协同规划的方法
评估决策	评价主要以电网安全经济可靠性为目标函数	增加适用 ADN 的评估指标,如电量供储比、DG 接入能力等	城市能源互联网市场开放,规划后评价保证安全可靠运行的同时,必要考虑不同能源主体利益需求,研究适用于不同城市能源互联网下 ADN 可靠性评估体系

3.1 分布式电源的接入

ADN 通过灵活的网络拓扑结构进行潮流约束,结合先进的需求响应技术与用户参与需求调度的自主性对负荷综合治理,使能源形式逐步向耦合和集成方向发展。城市能源互联网视角下 ADN 规划中多类型、不确定的分布式电源的引入给城市电网高品质供/用电与电网运行调度提出挑战,频繁的负荷变化会产生较大的频率偏差甚至频率崩溃。受间歇电源分布随机性和出力不稳定性以及柔性负荷柔性调度和调节能力局限影响,ADN 在潮流管理、电压协调控制、供需平衡方面面临巨大压力,导致的电压及电能质量不稳定,使得负荷预测与发电预测工作量增大,增加电网系统的运行风险。

ADN 电力系统和网络架构的整合较为复杂,实际规划过程中需考虑网损、DG 坐标、电压稳定性等问题。含 DG 的 ADN 规划研究靠电源协同布置、接入 DG 后的供电稳定性、电力系统电能质量实现对城市电网规划模型的多目标经济效益评估。电网公司可借助互联网无线信息网络构建新型 ADN 多源协同优化调度平台,如图 2 所示。

平台基于区块链节点及集中/分布式协同控制原理,收集终端用户信息,分析微网储能、EV 出行对用电能效的影响,依照能源交互、负荷侧响应、电网运行 3 个层次整合优化调度,建立 ADN 多源一体化无功优化模型,借助全球定位系统(GPS)信号将规划区域网格化设定,通过临近节点电源的电力调度运算实现对目标节点信息的感知,从而拟定目标 DG 与移动电力设备的分布选址。

3.2 储能系统

在传统的配电网模式中,电力资源都是即发即用,能源网络系统运行安全性低。储能设备可实时响应电力系统频率、电压调节,提升系统电能质量和安全系数。面向能源联网的 ADN 下,ESS 的应用可分为电源侧、输配侧、需求侧 3 类:以 DR 多能源发

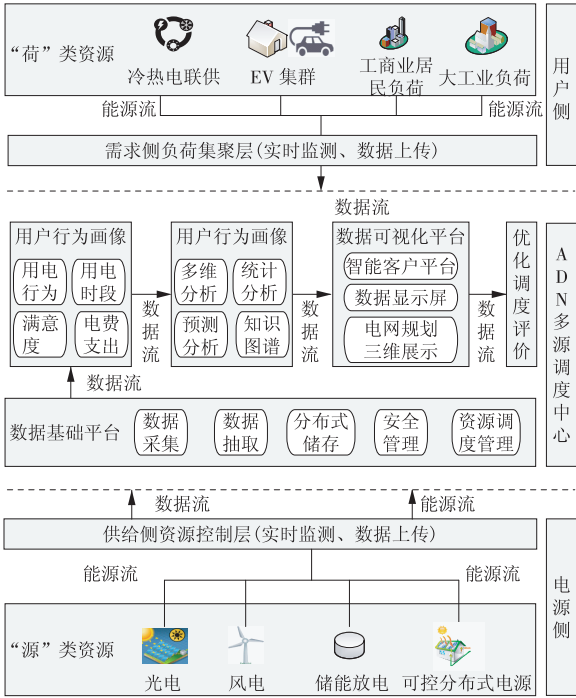


图 2 Multi-source collaborative scheduling platform for ADN

电协同大规模集中式发电的配电网电源侧的 ESS,解决了新能源接入电网间歇性和波动性问题,提高电力系统分析消纳能力;在配电网输配侧,ESS 可以用于不间断电源,达到削峰填谷、降低网络损耗的目的;在需求侧,大规模储能设备的应用有效缓解了分时用电失衡的情况,提高了设备的利用率和系统效率。在实际的 ADN 规划中,需要综合城市整体规划考虑 ESS 的接入位置 and 不同类型 ESS 的最大容量与功率。其中,EV 充电桩作为数字新基建的研究聚点,利用车载储能设备平抑可再生能源接入电网造成的电压波动。车到电网(Vehicle-to-Grid,V2G)技术可根据用户的行为规律与用电习惯,实现 EV 即插即用与智能管控。城市能源互联网中大量充电桩的投入在一定条件下补充了微网原有储能单位的供电不足与供需不平衡,保证整个 ADN 系统的

稳定运行。由于EV充电在时间、空间上的随机性,在配电网规划过程中要精确区域的充电负荷预测,在满足充电需求的基础上,考虑接入位置的经济、可用性,根据场景与时段的不同进行合理选址定容、扩展规划。

3.3 需求侧响应技术

需求侧响应技术(DSR)可实现ADN内部功率的双向流动,通过与终端用户进行双向信息交流和分时电价政策的鼓励,调整电网系统整体运行状态,达到提高再生能源利用率、多源互补、电网供用电平衡、削峰填谷的作用。在系统运行过程中,DSR以信息为导向,实时监控供/用电信息、整合双向信息、提高ADN规划灵活性。在实际城网规划过程中,考虑分布式电源与DSR相融合的电网综合规划,可有效降低电力系统网损。

我国电力市场需求响应资源复杂多样,负荷电压调控难度大。基于能源互联网智能用电理念,创新需求响应技术架构,全面打造电力供应商、电力用户等多方利益共享模式(如图3所示)。实际城市电网规划建设中,政府主管部门在当地需求响应资源基准上,引导、激励电力用户优化用电方式,主动参与实施电力需求响应;电力供应商基于市场供需动态信息与用户反馈构建需求响应资源组合优化分层分布式体系架构,全面分析终端需求响应资源特征,通过大数据技术整合系统运行、市场交易和用户用电数据,实现需求响应资源的智能调控;分析不同用户的用能习惯、用能满意度、电费出资行,通过分时电价与补贴电价机制建立供需双方电量负荷优化调度,以优化用能终端整合利益为目标,构建供需双方双层利益驱动模型。

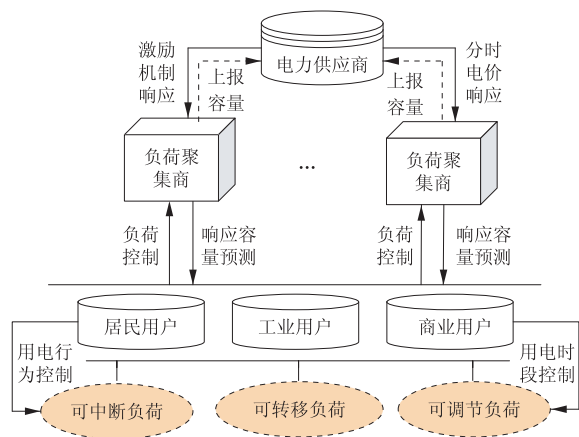


图3 ADN用户需求响应模型

Fig. 3 User demand response model of ADN users

3.4 信息通信技术

城市ADN规划和运营过程中,产生海量的能源信息流与数据流。城市能源互联网下智能配网建

设各配网节点都可视为独立数据源,存在于配网规划、设计和能源生产、转移、消费、存储的全过程,海量数据通过能源互联转变为全新的电网能源资产,而能源的分布模式决定了城市电网规划数据碎片化,这样极易造成数据的丢失与破损。

互联网信息融合技术将“云、大、物、移、智”等先进通信技术与能源技术进行深度融合,实现了能源链与信息链的开放共享。互联网信息融合技术涵盖了分布式电源、数据挖掘、智能数据整合、实时数据分析、设备全方位检测、数据可视化等技术,可精确获取DG发电/运行数据、电力/电子设备规划、电网与用户互动数据,并利用大数据平台进行数据整合处理,有效融合各种交叉、冗余、不一致、频率差异大的数据,减少数据的流失,实现电力数据的无差别共享,考虑数据资产价值建立信息通信技术的ADN协调规划模型与规划方法,可以有效指导电网规划资源配置。

4 城市能源互联网下的ADN规划管理策略

考虑城市能源互联网下的ADN规划的目的是构建以电为核心,城市内部各类分布式能源综合利用、协调优化,打造优质、可靠、满足各方利益的资源配置平台。针对我国城市配电网规划存在较严重问题,需对电力、能源等行业采取有效措施。

4.1 加强地方政府沟通

在城市能源互联网中,DR, EV, ESS与城市交通系统相得益彰,较常规的ADN规划市场更为开放、运营模式更加丰富。无论是城市ADN规划前期负荷预测与发电预测的准确性,还是市场交易、综合能源服务等多方位平台对资源的优化配置,都离不开中央以及各级地方政府的扶持政策。

在新一轮国家电力体制改革中,为满足城市ADN供电负荷需求以及电力市场参与者利益最大化,结合规划区域整体产业链与电力经济市场发展状况,采用“主新建、副改造”的设计思路。各电网建设相关部门应与政府、用户积极沟通,实现城市电网的整体标准化构建,流程如图4所示。在规划过程中,除考虑技术手段的影响外,城市内部变电站场地的合理布局、交通条件以及网架周边的居民设施等都是规划可行性的重要因素。在规划前期,与当地政府规划部门进行有效沟通,了解城市建设与市场环境和当地政府在配电网规划各个阶段的用电政策,制定完善的规划制度,充分利用城市土地资源以保障地方政府政策收入最大化,避免出现变电站选址、电源定容与城市整体规划冲突的情况。同时,还需要保障城市给排水、网络通信、城市

出行等合理规划设计,以及与风光、燃气、通信等多个技术单位进行规划对接,保障城区配电网规划项目有序开展落实。因此,在规划过程中需加强与各个审核部门之间的沟通联络,对城市各地区电力负荷即时收集、准确预测,遇到问题及时沟通,最大限度地加快审核效率,进而缩短工期、降低建设成本,满足当地电力需求。

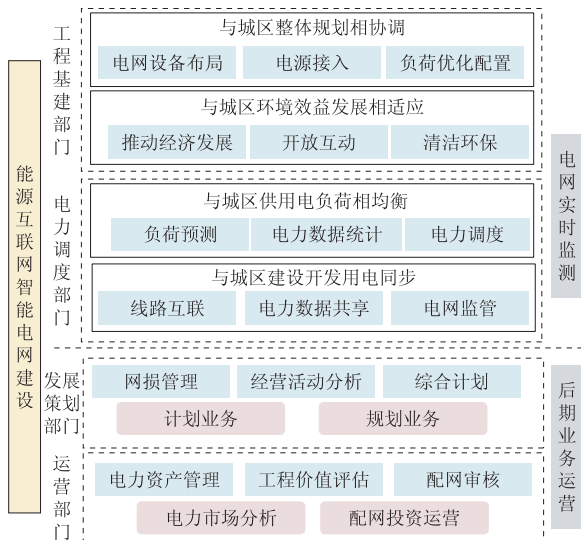


图4 各部门沟通流程

Fig. 4 Communication among different departments

4.2 强化供电企业技术对接

风光与储能等柔性负荷的不确定性,为负荷预测带来巨大的工程量。DR改变了传统配电系统的网架结构,单一电源发电变为多类别能源发电,不合理的分布式电源位置与容量导致节点电压下降。因此,在城市配电网规划中,供电企业应加强与配网公司的沟通和工程技术对接,综合城市电力设备的合理选址,充分考虑DG, ESS, EV等多方利益博弈,在动态非线性特征负荷模型下实现城市电网环境经济效益最大化和造价成本最小化,实现电网负荷精准预测。

同时,在用户阶段加大电力市场调研,提升自身服务能力。以主动增强服务意识为切入点,基于互联网信息化理念,打造创新性客户互动平台,利用5G信息媒介及时了解客户用电需求要点,并及时更新、完善客户的基础用电信息,完善所有用电户主信息的无中心化沟通。树立完善的电力数据资产管理制度,加强信息化管控,强化企业内部各部门技术对接,建立主动对接机制,有利于规划部门提前对城区公用资源进行合理规划使用与专项配网规划项目的落地实施,进而实现工程全寿命周期的积极参与。

4.3 设计公司自身业务求变

电力设计企业可在工程规划与信息融合、人力资源优化配置、业务流程再造等多方面完成企业价值增值,如图5所示。

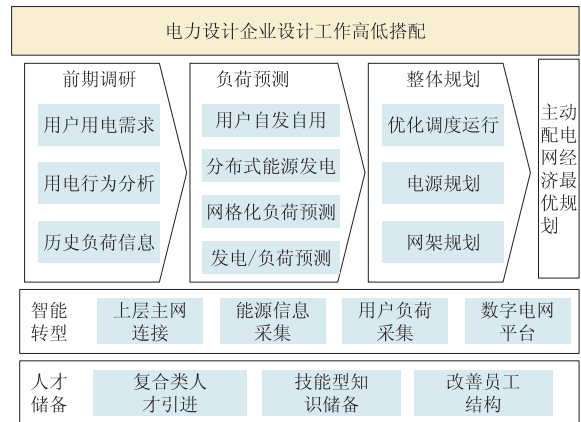


图5 电力设计公司业务流程

Fig. 5 Business process of an electric power design company

新形势下,城市能源互联网下配电网规划要满足科学、合理、稳定的设计理念,电网设计公司就需要在竞争激烈的互联网新时代主动求变。要紧跟时代主流,多渠道开展拓展新能源市场业务升级,保持能源信息融合综合服务前瞻性与一体化对接;紧抓电网设计工作新技术业务研讨与内部员工专业技能提升,通过自身技术提升,形成设计企业专业技术壁垒,增强设计工作价值含量,推动城市智慧电网设计工作的高低搭配。

通过建设集成共享的数字电网平台,提升电网与政府、电网与客户以及电网内部各部门、各专业之间的资源整合和数据共享水平,提升电网规划、建设的精准性和前瞻性,提高新基建电网配套项目的建设质量和速度。同时,在信息化时代,城市ADN终端用户主动参与需求响应,将改变负荷特性,导致负荷预测难度高、城市电网规划前期设计工作专业复合性强。设计人员应加强技能型知识储备,企业应提高技术性人才比例与人员升级,完善企业业务、增强技术优势。

4.4 构建整体利益价值链

基于城市能源互联网下城市内部互联互通、优化共享理念,打造城市电力行业全过程整体利益价值链。在电力数据资产全生命周期成本(LCC)内搭建电力资金流、信息流、业务流、价值流“四流合一”的全行业框架指标。其中,信息流通过能源电力基础设备与先进的信息通信技术、泛在物联技术实现电力供应设备到终端用户的全生态信息交互平台;业务流以企业的业务目标为导向,在电力市场能源交易过程中连接能源生产者与消费者,伴随业务活

动实现电力资产增值;电力行业价值流主要指在中央或地方政府对电力数据资产的统一监管下,能源资产自产生至综合能源服务评价全过程中的能源增值。“四流合一”将城市电网巧妙形成一个闭环,实现了“四流”的无缝对接,达到了城市互联网双向交互、平等共享及服务增值的目标,最终有效提高城市多能耦合利用率,促进新能源最优消纳,达到城市电网规划建设全局最优。

城市互联下电力企业整体利益价值链涵盖了

城市各类能源发、输、变电以及城市用户用电调度基础环节,实现数据与信息在电网规划设计公司、电力设备供应商、发电企业、终端用户与用户间的转换与整合,确保电力能源贯通信息与城市互联网数据系统连接城市智能电网价值链各个行业,如图 6 所示。强大的城市互联系统通过收集、分析计算到最终管控电力信息,协调价值链上的各利益相关方活动,打破了电力企业多方业务壁垒,降低了不同行业间的沟通成本。

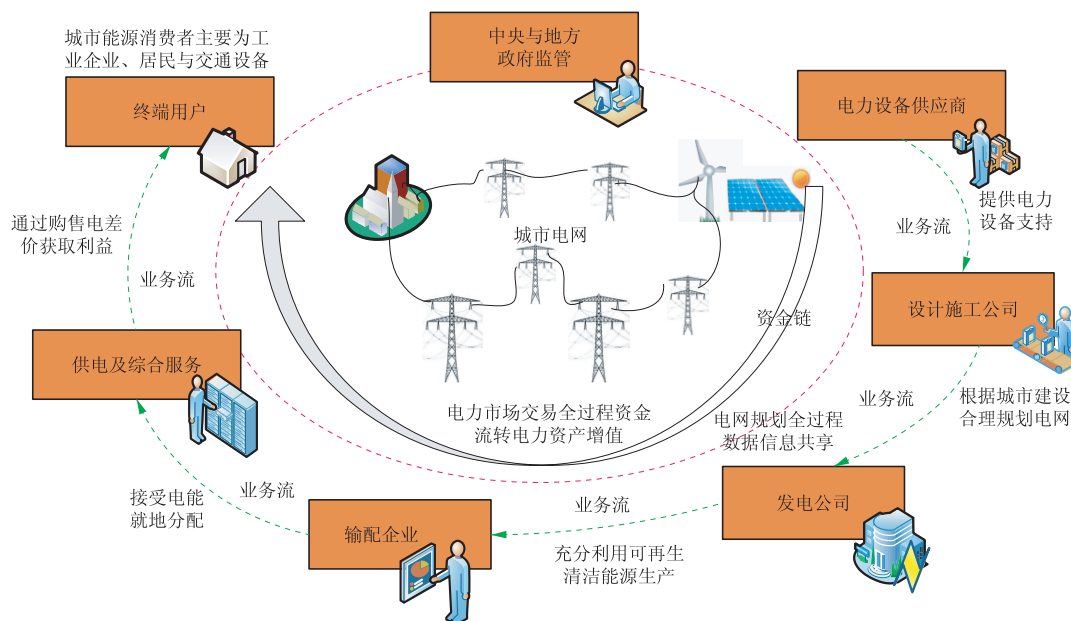


图 6 城市互联下电力行业整体利益价值链

Fig. 6 Value chain of the whole power industry the under urban interactions

5 结束语

ADN 通过需求分析自主管控实现多源协同优化,实现接入 DG 的最大消纳。DG、ESS、EV 等柔性负荷的接入,需要在 ADN 运行中采用更多的先进技术与灵活的输配用电模式,城市能源互联网理念的发展趋势为电网关键技术提供更多联动性。

本文首先研究了 DR 协同互动、ESS、信息通信、DSR 等核心技术对配网规划影响机理,然后从加强地方政府沟通、加强企业技术对接、公司自身业务求变和建构整体价值链 4 个角度出发对城市配电网提出规划建议。

参考文献:

[1] 范明天,张祖平,苏傲雪,等.主动配电系统可行技术的研究[J].中国电机工程学报,2013,33(22):12-18.
FAN Mingtian, ZHANG Zuping, SU Aoxue, et al. Study on feasible technology of active distribution system[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2013, 33 (22): 12-18.

[2] 邢海军,程浩忠,张沈习,等.ADN 规划研究综述[J].电网技术,2015,39(10):2705-2711.
XING Haijun, CHENG Haozhong, ZHANG Shenxi, et al. Overview of active distribution network planning [J]. Power Grid Technology, 2015, 39 (10): 2705-2711.
[3] LI Y, FENG B, LI G, et al. Optimal distributed generation planning in active distribution networks considering integration of energy storage [J]. Applied Energy, 2018, 210:1073-1081.
[4] EHSAN A, YANG Q. State-of-the-art techniques for modelling of uncertainties in active distribution network planning: A review [J]. Applied Energy, 2019, 239: 1509-1523.
[5] MOKRYANI G, HU Y, PANAGIOTIS P, et al. Deterministic approach for active distribution networks planning with high penetration of wind and solar power [J]. Renewable Energy, 2017(113):942-951.
[6] XIE S, HU Z, WANG J, et al. The optimal planning of smart multi-energy systems incorporating transportation, natural gas and active distribution networks [J]. Applied Energy, 2020(261).https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114412.

- [7]XIE S, HU Z, WANG J. Two-stage robust optimization for expansion planning of active distribution systems coupled with urban transportation networks [J]. Applied Energy, 2020, 261: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.117619>.
- [8]芮松华,刘海璇,王洪波,等.基于遗传-蚁群算法的交直流配电网分布式电源优化配置[J].电力建设, 2019, 40(4): 9-17.
- RUI Songhua, LIU Haixuan, WANG Hongbo, et al. Optimal allocation of distributed generation in AC/DC distribution network based on genetic ant colony algorithm [J]. Electric Power Construction, 2019, 40(4): 9-17.
- [9]陈浩,马平.基于改进多目标粒子群算法的DG选址定容优化研究[J].计算机与数字工程, 2020, 48(1): 16-38.
- CHEN Hao, MA Ping. Study on DG location and capacity optimization based on improved multi-objective particle swarm optimization [J]. Computer and Digital Engineering, 2020, 48(1): 16-38.
- [10]EBRAHIMI H, MARJANI S R, TALAVAT V. Optimal planning in active distribution networks considering nonlinear loads using the MOPSO algorithm in the TOPSIS framework [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 30(3): 1-17.
- [11]JAN-HMENKE M, BORNHORST N, BRAUN M. Distribution system monitoring for smart power grids with distributed generation using artificial neural networks [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019(113): 472-480.
- [12]李宜修.中国智能电网技术研究热点和前沿[J].中国科技信息, 2018(5): 98-99.
- LI Yixiu. Research hot spots and frontiers of smart grid technology in China [J]. China Science and Technology Information, 2018(5): 98-99.
- [13]BACKE S, KARA G, TOMASGARD A. Comparing individual and coordinated demand response with dynamic and static power grid tariffs [J]. Energy, 2020, 201: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117619>.
- [14]魏联滨,王伟臣,李慧,等.基于AP聚类和鲁棒优化的电网规划灵活性评估[J].电力系统及其自动化学报, 2020, 32(3): 99-106.
- WEI Lianbin, WANG Weichen, LI Hui, et al. Grid planning flexibility evaluation based on AP clustering and robust optimization [J]. Journal of Power System and Automation, 2020, 32(3): 99-106.
- [15]DILEEP G. A survey on smart grid technologies and applications [J]. Renewable Energy, 2020, 146(2): 2589-2625.
- [16]李云波,张子立,张晋宾,等.基于区块链的分布式微电网交易与能源调度研究[J].华电技术, 2020, 42(8): 24-31.
- LI Yunbo, ZHANG Zili, ZHANG Jinbin, et al. Energy trading and scheduling on micro-grid based on blockchain technology [J]. Huadian Technology, 2020, 42(8): 24-31.
- [17]赵龙,岳义博.大型储能电站智能辅助调试系统的设计及应用[J].华电技术, 2019, 41(11): 53-56.
- ZHAO Long, YUE Yibo. Design and application of intelligent auxiliary debugging system for large-scale energy storage power station [J]. Huadian Technology, 2019, 41(11): 53-56.

(本文责编:陆华)

作者简介:

周炳华(1978—),男,浙江杭州人,高级工程师,从事配电网规划与设计工作(E-mail:342981323@qq.com)。

崔金栋*(1980—),男,山东德州人,教授,博士,从事电力大数据、信息建模方面的研究(E-mail:20100429@neepu.edu.cn)。