

基于“三流分离-汇聚”的虚拟电厂架构设计

陈皓勇¹, 黄宇翔¹, 张扬², 王斐², 周亮², 汤君博², 吴晓彬¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广东省 广州市 510640;

2. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东省 广州市 510600)

Architecture Design of Virtual Power Plant Based on “Three Flow Separation-Convergence”

CHEN Haoyong¹, HUANG Yuxiang¹, ZHANG Yang², WANG Fei², ZHOU Liang², TANG Junbo², WU Xiaobin¹

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China;

2. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, Guangdong Province, China)

摘要: 随着新能源渗透率的提高, 其随机性、间歇性、波动性带来的电力电量平衡与频率稳定问题日益凸显。这些问题仅靠集中式的传统电厂难以应对, 电力系统中灵活性资源也应该承担部分电力与电量平衡的责任。虚拟电厂(virtual power plant, VPP)作为分布式灵活性资源聚合调控的载体, 可以整体参与市场化的电力市场交易和接受电网的调度, 为电力系统实时平衡提供重要支撑。虚拟电厂的发展离不开大量灵活性资源基础、先进通信与调度控制技术、高效盈利模式与完善的市场政策。虚拟电厂的运营可归于能量网络的能量流动、信息网络的信息交互、价值网络的价值传递。为此, 基于“能量-信息-价值”的3层网络体系, 分析不同类别虚拟电厂的运行模式与控制方案, 提出“三流分离-汇聚”的虚拟电厂架构设计思路, 为虚拟电厂的设计、建设和运营提供有益的指导。

关键词: 新能源; 新型电力系统; 虚拟电厂(VPP); 电力市场; 能量流; 信息流; 价值流

ABSTRACT: With the increase of new energy penetration, the power balance and frequency stability problems brought by its randomness, intermittency and volatility has become increasingly serious. It is difficult to cope with these problems only by traditional centralized power plants. Flexible resources in the power systems should also bear a part of the responsibility for the balance of power and energy. Virtual power plant (VPP) can aggregate a large number of distributed flexible resources with different characteristics, participate in the electricity markets as a whole and accept the

dispatch of the grid, and provide important support for the real-time power balance of the power systems. The development of VPPs should be based on a large number of flexible resources, advanced communication and dispatching/control technologies, and efficient business models and good market policies. The operation of VPPs can be attributed to the energy flow of the energy network, the information interaction of the information network and the value transfer of the value network. Therefore, based on the three-layer network architecture of “energy-information-value”, the operation modes and control schemes of different types of VPPs were analyzed, and the idea of “three flow separation-convergence” for VPP architecture design was proposed. The findings provide useful guidance for the design, construction and operation of VPPs.

KEY WORDS: new energy; new power system; virtual power plant (VPP); electricity market; energy flow; information flow; value flow

0 引言

2021年3月15日, 中央财经委员会第九次会议指出, 要构建清洁低碳安全高效的能源体系, 控制化石能源总量, 着力提高利用效能, 实施可再生能源替代行动, 深化电力体制改革, 构建以新能源为主体的新型电力系统^[1]。2021年10月24日, 国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》明确提出, 大力提升电力系统综合调节能力, 加快灵活调节电源建设, 建设坚强智能电网, 提升电网安全保障水平^[2]。随着新能源渗透率的逐步提高, 其随机性、间歇性、波动性带来的电力电

基金项目: 中国南方电网有限责任公司重点科技项目(GDKJXM20220333)。

Project Supported by Key Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (GDKJXM20220333).

量平衡与频率稳定问题^[3-5]日益凸显,仅依靠集中式的传统电厂难以应对。虚拟电厂(virtual power plant, VPP)作为整合并调控灵活性资源、促进可再生能源消纳、实现需求侧响应的载体,是新型电力系统建设中不可或缺的一环^[6]。

虚拟电厂的概念最早由著名经济学家 Shimon Awerbuch 提出^[7]。其在著作《虚拟公共设施:新兴产业的描述、技术及竞争力》中对虚拟电厂提出了明确的定义:虚拟电厂不存在实体,是独立且以市场为驱动的各类市场实体之间的灵活合作方式,通过有效的合作就能够为消费者提供所需要的高效电能服务^[8]。随着世界各国可再生能源比例的逐步增加,虚拟电厂这一概念得到了世界各国的响应,此后虚拟电厂各项技术逐渐发展起来。欧洲的虚拟电厂主要以聚合“源”侧资源、消纳可再生能源为主。德国最大的虚拟电厂运营商 Next-Kraftwerke,通过高效聚合超过4 000个分布式发电与储能装备,以参与能量市场或为电网提供辅助服务,通过虚拟电厂降低新能源波动性带来的影响,同时促进了新能源本地消纳。美国较少在“源”侧采用虚拟电厂的概念,相关工程项目多以需求侧响应为主。进入21世纪以来,美国各公司正在积极引导电力用户成为产销者,Swell Energy公司正在推动电力用户安装太阳能电池板与电池储能单元,减少用户从电网中购买的电力,并依照电网的需求进行充放电,以获取收益。

相比之下,我国在虚拟电厂的研究与工程建设方面起步较晚,但发展势头迅猛。近年来,我国在华东与华北等地积极开展虚拟电厂试点。2018年3月,由国网冀北电力有限公司提交的《虚拟电厂用例》和《虚拟电厂架构与功能要求》2项标准在国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)获批正式立项。2019年12月,国网冀北电力有限公司建设的虚拟电厂示范工程正式投运^[9-10]。广州、深圳等城市的虚拟电厂也相继投入运行。虚拟电厂作为能够整合灵活性资源、促进新能源就地消纳与调动负荷侧积极性的载体,在新型能源体系和新型电力系统的建设中发挥关键作用^[11]。

目前,世界范围内的虚拟电厂仍处于起步与初级阶段,虚拟电厂技术层面的发展与市场层面的创新仍有广阔空间。其关键在于,虚拟电厂的技术研究与运行控制是电力系统自动化、电力电子技术、控制理论、通信技术与电力市场、电力经济学等多学科融合、多难点交叉的复杂工作^[12]。要解决这一问题,需厘清电力系统“能量流动”“信息交互”“价值传递”3个层面的具体问题与耦合关系。因此,本文基于新型电力系统3层网络系统(能量网络、信息网络、价值网络)的基础理论^[13],对虚拟电厂的信息传递、控制方法与市场模式进行分析,提出“三流分离-汇聚”的虚拟电厂架构,为我国虚拟电厂研究及建设提供参考。

1 新型能源体系的3层网络架构

电能作为一种清洁、方便且容易传输、转换和控制的能量形态,在能源转型中处于中心环节,其他能量形式往往需要转换为电能,相互耦合。电力与其他各类型能源的生产、传输与使用需要通过各种类型的网络来实现,如电网、热网、燃气网等。由于本质上这些网络传递的都是能量,只是能量的表现形式不同,所以可以统称为能量网络。能量网络之间存在能量耦合,不同的能量网络之间必然存在通过能量转换设备(燃气轮机、发电机、空调等)进行的不同能量形式的转换,并遵循严格的物理学规律。

除传统的有线、无线通信技术外,近年来,随着5G、Wi-Fi 6、低功耗广域网(low power wide area network, LPWAN)、高速电力线载波(high-speed power line carrier, HPLC)等新型通信技术的普及,在物理层面的能量网络之上,新型电力系统又建立了可实现信息处理、运行优化和实时控制的信息网络^[14]。由于大规模可再生能源接入,电源侧的随机性、间歇性与波动性日益增强,储能和需求侧响应的广泛参与成为新型电力系统运行的必要手段,使得新型能源体系更趋复杂。新型能源体系中种类繁多的分布式资源的协同控制,离不开高可靠性、高效率的信息网络的支持^[15]。

在传统电力系统中,大型集中式发电厂生产

电能并经由多级变压器与输配电线路进行输送。与之相对的是相对简单的电力产业链形态，即传统发电商集合竞价、购电商批发购电(或由电网统购统销)、用户按合同(或相关规定)缴纳电费。然而，随着可再生能源的不断接入、分布式储能的建设与投运，在新型电力系统中，传统的集中化交易市场将逐步转变为多层级耦合、多交易品种协同的复杂开放性市场，且与供热市场、一次能源市场相耦合。新型能源体系的价值传递将从原来的简单流向变得复杂多样。依托能量网络层面的能量传输与转换、信息网络层面的信息传递与控制决策，由价值规律主导的价值网络是新型能源体系得以蓬勃发展的关键因素。

因此，新型能源体系将呈现出“能量-信息-价值”3层网络架构的形态^[13]，如图1所示，作为新型能源体系和新型电力系统的重要组成部分，虚拟电厂也将呈现出这种形态。目前，虚拟电厂的发展仍处于初级阶段，不仅依赖电气设备与电网技术的进一步发展，还涉及通信与控制技术、市场模式与交易机制等。

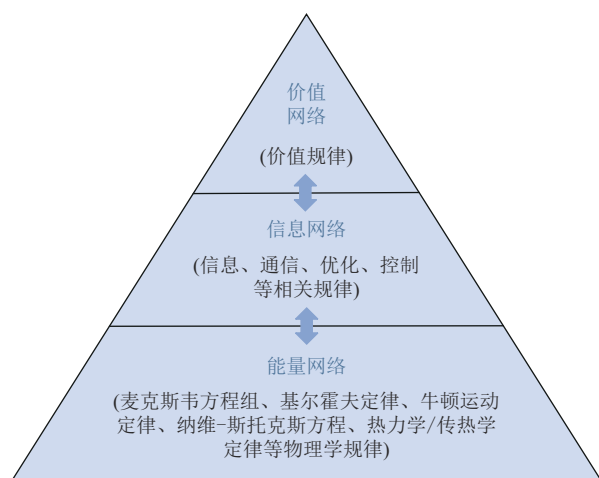


图1 新型能源体系的3层网络结构

Fig. 1 Three-layer network structure of new energy systems

虚拟电厂的本质是聚合大量的灵活性资源，通过信息通信技术感知灵活性资源的运行状态并进行实时控制，使其外特性像稳定可控的传统电厂一样，接受电网调度或参与电力市场交易。从物理机理的角度而言，新能源发电出力的随机性、间歇性与波动性给虚拟电厂响应能力量化及实时

运行控制带来巨大挑战。与此同时，大量电力电子设备的渗透与可调节负荷的增多对虚拟电厂动态聚合提出了更高要求。从信息传递来看，由于虚拟电厂接入的灵活性资源种类繁多、特性各异，所采取的通信方式与接口标准不同，同时考虑到虚拟电厂实时优化所需的低时延特性，现有的成熟通信技术仍需对虚拟电厂进行进一步优化与针对性部署。从价值与市场层面来看，由于我国尚未建成完全成熟的电力市场，虚拟电厂是否能够参与电力市场、以何种方式参与电力市场以及开展何种产品交易等问题仍有待探索和实践，此外，灵活性资源的利益分配也是虚拟电厂建设与运营所急需解决的问题^[14]。以上这些问题是相互关联的，需要在虚拟电厂的研究、投建与运营过程中逐步解决。

2 虚拟电厂的控制架构与运营模式

2.1 虚拟电厂信息感知与融合

与新型能源体系的3层网络结构相对应，虚拟电厂是能量、信息与价值高度融合的产物，虚拟电厂的一切决策与控制都需要基于实时监测与数据处理技术来进行。由于海量异质资源的接入，虚拟电厂需要一个多元化、分散化、高并发的复杂信息系统的支撑，低成本解决“物理-信息-经济-社会”耦合复杂能源系统从“无序”向“有序”转变的问题，实现系统平衡和稳定。

有别于微电网，由于虚拟电厂的分层分区架构呈现多样化与时变性，其资源的电气/地理分布特性与物理网络约束并不固定。为准确获知虚拟电厂的整体运行状态，需要应用分布式信号处理技术，在分布式传感器感知信息的基础上进行融合估计。在分布式信号处理中，一组传感器共同观测环境状态的信息。由于成本、频谱带宽限制和复杂度等因素的影响，传感器将自身的观测数据进行压缩，只将部分信息传输至融合中心，再对环境状态进行融合估计。通过传感器只能感知系统的一部分，如何利用传感器量化压缩后的信号，获得动态系统的整体状态，是分布式信号处理的关键^[15]。

多源信息融合又称为多传感信息融合，这是

20 世纪 70 年代提出来的概念，首先应用于军事领域。多传感信息融合系统充分利用多个传感器资源，通过对各种观测信息的合理支配与使用，在空间-时间上依据某种优化准则将互补与冗余信息结合起来，产生对观测环境的一致性解释或描述，同时产生新的融合结果。运用信息融合技术，将分层分区的虚拟电厂中广泛分布的大量传感器的观测信息整合起来，获得整个虚拟电厂的准确运行状态，是虚拟电厂运行控制的基础。

2.2 虚拟电厂的控制架构

虚拟电厂将大量具有不确定性的分布式资源整合，形成可观可控的整体，实现从“无序”向“有序”转变。这些分布式资源主要包括各种分布式电源、储能系统、可控负荷以及电动汽车等，一般接入配电网，形成虚拟电厂的能量网络。在信息网络层面，虚拟电厂的控制架构主要包括集中式控制、分散式控制、分布式控制 3 类^[16-17]。

2.2.1 集中式控制

虚拟电厂典型集中式控制架构如图 2 所示。虚拟电厂各可控单元的所有信息均传递至控制协调中心(control coordination center, CCC)，虚拟电厂中所有单元的控制权均在控制协调中心，各单元的发电、用电计划及实时的调控信号也由控制中心制定。这种控制架构需要控制协调中心拥有强大计算能力与多单元控制力，通信压力大且计算量繁重，兼容性和扩展性也不理想，并不适合海量灵活性资源的虚拟电厂。

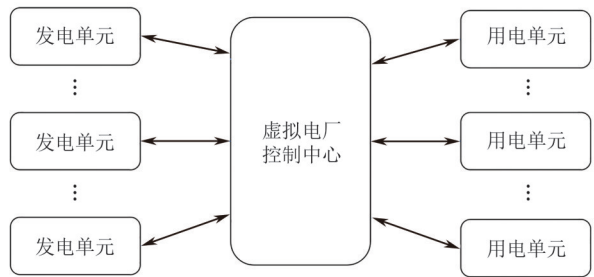


图 2 虚拟电厂集中式控制架构
Fig. 2 Centralized control architecture of VPP

2.2.2 分散式控制

虚拟电厂典型分散式控制架构如图 3 所示。虚拟电厂包括高层与低层 2 个控制层级，在低层控制中，本地控制中心管理本区域内有限个发电、

用电单元，彼此进行信息交换，并将汇集的信息传递到高层控制中心；高层控制中心将任务分解并分配到本地控制中心，本地控制中心负责制定每一个单元的具体控制方案。由于下层控制系统的存在，不需要将每个可控单元的数据都上传到集中式的控制中心中，上下层协同的控制架构具有较好的延展性，能够避免因数据集中传输而带来的数据拥堵与高时延问题。

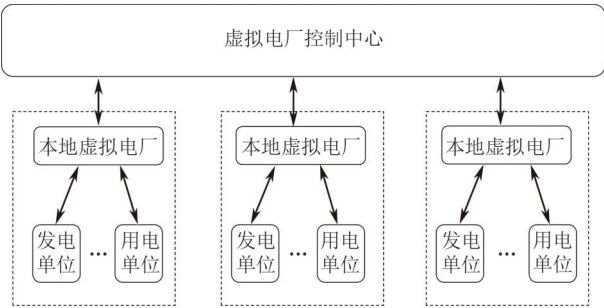


图 3 虚拟电厂分散式控制架构
Fig. 3 Decentralized control architecture of VPP

2.2.3 分布式控制

虚拟电厂典型分布式控制架构如图 4 所示，分布式通信与控制的主要标志就是对控制单元进行子系统的划分。这些子系统通过各自的智能代理彼此通信并相互协作，实现集中式控制架构中控制协调中心的功能，但避免了数据冗余。分布式控制架构的虚拟电厂需要依赖更高效通信网络进行数据交换与处理，同时需要更有效的算法进行高并发的数据协调计算。

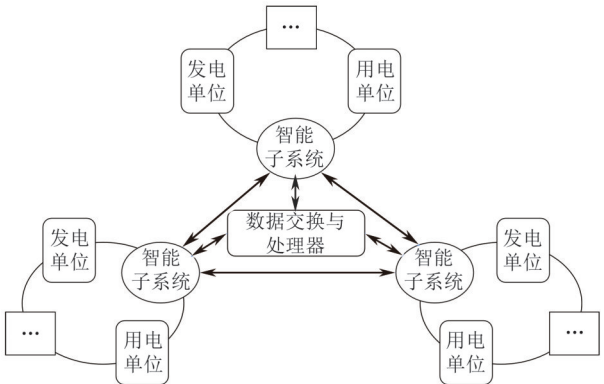


图 4 虚拟电厂分布式控制架构
Fig. 4 Distributed control architecture of VPP

2.3 虚拟电厂的运营模式

与控制架构相对应，虚拟电厂的端对端(peer-

to-peer, P2P)交易市场也分为集中式市场、分散式市场和分布式市场3种类型。在价值网络层面,形成聚合商-聚合商、聚合商-用户、用户-用户的复杂交易模式和复杂端对端交易网络^[18]。

从对外特性而言,虚拟电厂按照所包含主体资源的不同,可分为需求侧资源型、供给侧资源型和混合资源型3种(对外表现为产销者特性)。按虚拟电厂的功能特征或运行方案,又分为商业型虚拟电厂(commercial virtual power plant, CVPP)与技术型虚拟电厂(technology virtual power plant, TVPP)^[19]。CVPP主要目标是通过聚合分散式资源参与市场或接受调度机构的需求响应邀约,实现灵活资源投资成本回收与持续运营发展。TVPP主要目标在于聚合可调的灵活资源并接受电网的调度与控制,为电力系统提供备用容量或者实现电力系统的实时平衡。根据不同场景与不同功能,2种虚拟电厂所聚合的资源与调控的方式也有所不同^[20]。

从市场博弈、风险收益与利益分配而言,从聚合商的角度综合考虑多类型市场主体的收益,是商业型虚拟电厂的主要存在形式,是分布式资源投资组合并参与不同市场的策略呈现。商业型虚拟电厂基于负荷预测、响应能力量化与用户需求上报等形式,与日前形成整体负荷曲线与预期调节量,制定参与电能量与辅助服务市场的最优策略,并由虚拟电厂市场主体进行市场竞标,将竞标结果反馈至调度机构与技术型虚拟电厂。

从电网运行者的角度综合考虑分布式资源运行参数与不确定性对本地电力系统的实时影响,进行调度指令分解与偏差快速响应,是技术型虚拟电厂的主要存在形式。在获得商业性虚拟电厂的出力计划及中标曲线后,技术型虚拟电厂通过对资源的物理机理建模,结合本地拓扑与资源不确定性,对虚拟电厂资源出力进行日前计划分解,在日内实时追踪出力信号并及时修正^[21]。技术型虚拟电厂主要依赖资源运行信息的实时监测、低时延的通信网络与精准的资源闭环控制系统。

除对外特性分类外,虚拟电厂还延伸出了多种商业模式,如分布式交易、多虚拟电厂联合备用等。近年来,端对端能源交易受到越来越多的

关注^[22-23],研究证实,虚拟电厂内的资源可以通过合理端对端交易实现市场均衡并提升社会福利。相较于以自然垄断和规模效应为特点的传统集中式电力市场,端对端能源交易模式是典型的“共享经济”。在虚拟电厂内,用户可以与其他用户(或资源)共享多余的本地发电量,也可以对需求响应、容量备用等其他资源进行交易,实现“卖家多赚钱,用户少花钱”的多方互利共赢。与此同时,新型数字技术(如区块链等)的应用进一步提高了端对端交易的可靠性。为避免端对端交易中高频次所带来的高额交易费用与高并发性所带来的数据传输堵塞问题,采用区块链与智能合约技术可以快速撮合出清并结算资源之间的交易量与交易价格,实现分布式资源高频次交易的可信保障。

3 虚拟电厂的“三流分离-汇聚”架构

如前所述,虚拟电厂具有“能量-信息-价值”3层网络架构。能量网络是虚拟电厂的基础,虚拟电厂存在的本质意义是通过改变灵活性资源的控制方式,达到促进新能源消纳、优化电网运行、消除电网阻塞、延缓发输电投资的目的^[8]。在能量网络层面,通过聚合大量灵活性资源,优化其能量输入、输出,一方面,可以促进新能源发电直接供应本地负荷,使新能源就地消纳;另一方面,也可以控制灵活性资源参与电网的调峰调频、削峰填谷。在能量网络基础上,虚拟电厂又衍生出涵盖状态监测、信息交互、优化调度、互动控制等多方面的信息网络^[15]。虚拟电厂运行的关键在于信息感知与通信,即通过多层级聚合与协同控制技术,使得分散且性质各异的灵活性资源对外展现出整体可观可控的特性,虚拟电厂对外的灵活性、适应性与鲁棒性都需要强大的信息网络层技术支撑。虚拟电厂作为“源、荷、储”聚合并接入“网”的产物,在市场中常常扮演产销者这一角色。虚拟电厂与聚合商的出现丰富了电力市场的交易方式和价值流向。一方面,灵活性资源所有者和聚合商需要通过参与电网互动调节以获取利润;另一方面,聚合商也要为其所聚合的灵活性资源支付费用。价值网络是虚拟电厂价值

实现、灵活性资源调节潜力挖掘的载体。

虚拟电厂是“物理-信息-经济-社会”耦合的复杂能源系统,从“能量-信息-价值”3层网络的视角进行分析将更加清晰。能量网络提供各灵活性资源的基础模型与运行参数,而信息网络通过信息感知、优化调度与实时控制等手段,实现海量灵活性资源的优化运行与实时控制^[24],价

值网络支撑电价、其他价格信号调节供需以及市场主体的价值实现。清晰地分辨虚拟电厂能量流、信息流、价值流,研究其分离和汇聚过程,有助于透彻理解虚拟电厂建设与运营的内在逻辑,从而设计出适合我国国情的解决方案。为此,本文提出“三流分离-汇聚”的虚拟电厂架构设计方案,如图5所示。

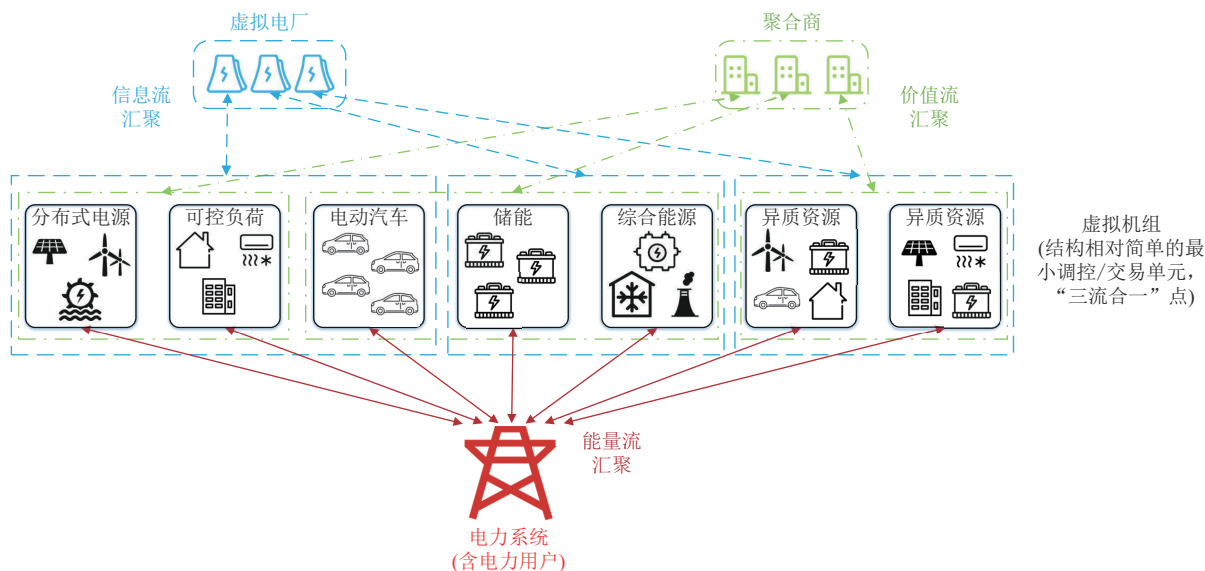


图5 基于“三流分离-汇聚”的虚拟电厂架构

Fig. 5 VVP architecture based on "three flow separation-convergence"

由于虚拟电厂所包含的大量分布式灵活资源(可控单元)仍然要接入电网(主要是配电网),其运行将受到电网的约束并接受电力调度控制中心的调度,同时也为电网运行提供支撑^[18]。因此,在物理层面,分布式资源的能量流汇聚到电网(包括电力用户)。在调度控制层面,虚拟电厂对分布式资源进行多层级聚合,通过信息交互实现对分布式资源的优化调度与实时控制,改变电能或其他形式能量的大小和流向,参与电网调节与运行,在这个过程中,需要考虑分布式资源和所在电网的协调问题^[24]。在信息层面,分布式资源的信息流汇聚到虚拟电厂(应理解为技术型虚拟电厂)的调控管理平台。虚拟电厂所聚合的分布式资源往往由聚合商投资运营,聚合商作为市场主体,通过所拥有的分布式资源参与各级市场来获取利益。在价值层面,分布式资源的价值流汇聚到聚合商(应理解为商业型虚拟电厂)运营管理平台,并进

一步上传到各级电力交易平台。虚拟电厂和聚合商所掌握的信息可能有所不同,比如聚合商可能不掌握电网信息,而虚拟电厂往往掌握“网”“源”的全部信息。在一定的条件下,虚拟电厂和聚合商也可以由同一个主体来承担,即信息流与价值流可能重合。全部分布式资源可按并网点进行分组,本文称之为“虚拟机组”,即结构相对简单的最小调控/交易单元(虚拟机组内所包含的多个分布式资源不再进一步细分,而是始终作为一个整体参与调度和交易)。只有参与调度控制和市场交易的主体一致,才不会导致权利与义务的错配。对于调度,电厂是管理主体,而非调控对象,机组才是物理真实的调控对象。对市场交易而言,机组也是参与交易的报价单元。

虚拟机组划分得过大,将导致电网安全难以保证;而虚拟机组划分得过小,将导致聚合商失去灵活调配资源的空间。虚拟机组应按照电网分

层分区的结果，动态聚合为一个分区内同一聚合商所有用户控制单元的聚合体。虚拟电厂调控系统以户表为单位进行建模和数据采集，每个户表下所有资源的聚合体即为用户控制单元。虚拟机组也是“能量-信息-价值”三流合一的环节，在虚拟机组之外，三流则先分离再经由各自的路径汇聚，如何接收所在电网及其他外部环境的信息(包括运行信息与价值信息等)并进行决策与控制，是虚拟电厂能否长期稳定运行的关键。因此，要建设能够适应市场环境和高效、可靠运行的虚拟电厂，重点在于电网、虚拟电厂、聚合商与分布式资源的有效协同^[24]。本文所提出的基于“三流分离-汇聚”的虚拟电厂架构，分别从能量流动、信息交互与价值传递方面描述了虚拟电厂“源网荷储”互动的运作方式，为解决该多主体协同问题起到参考借鉴作用。

4 结论

基于分层集群的新型电力系统的3层网络架构，针对虚拟电厂的信息感知、控制架构与运营模式进行分析，提出了“三流分离-汇聚”的虚拟电厂设计理念，并对各层网络内涵进行深度分析，得到如下结论：

1) 随着电力电子、信息通信和人工智能等技术的发展，各类终端设备走向智能化和数字化，能够更加主动地参与系统的运行控制及高频次的交易。虚拟电厂作为能够主动聚合灵活性资源、参与电网调节和电力市场交易的载体，是新型电力系统的重要一环。

2) 虚拟电厂是一个广域、分布式、自治的复杂系统，涉及主体类型众多，点多面广，关联复杂，其架构设计较难，而能量流、信息流、价值流的精确分析为之提供了一个逻辑清晰的视角。“三流分离-汇聚”的架构设计思路能为虚拟电厂设计、建设和运营提供有益的指导。

3) 虚拟电厂涉及电力系统、电力电子、优化与控制、信息与通信、经济管理、人工智能等不同学科，是一个典型的多学科交叉问题，需要在基础理论与方法上有所突破，并且紧密结合工程应用开展研究。

参考文献

- [1] 习近平. 中央财经委员会第九次会议[EB/OL]. (2021-03-15)[2023-03-01]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.html.
Xi J P. The ninth meeting of the Central Financial Leading Group[EB/OL]. (2021-03-15)[2023-03-01]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.html.
- [2] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2021(31): 48-58.
The State Council of the People's Republic of China. Circular of the State Council on printing and issuing the action plan for carbon dioxide peaking before 2030[J]. The Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2021(31): 48-58.
- [3] 李东东, 刘强, 徐波, 等. 考虑频率稳定约束的新能源电力系统临界惯量计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 24-33.
LI D D, LIU Q, XU B, et al. New energy power system critical inertia estimation method considering frequency stability constraints[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 24-33.
- [4] 张军六, 李佳朋, 唐震, 等. 基于本地测量的高比例新能源电力系统不平衡功率估算与附加功率控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(3): 50-60.
ZHANG J L, LI J P, TANG Z, et al. Local measurement based unbalanced active power estimation and supplementary power modulation for power systems with high proportions of renewable energy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3): 50-60.
- [5] 杨洪朝, 杨迪, 孟科. 高比例可再生能源渗透下多虚拟电厂多时间尺度协调优化调度[J]. 智慧电力, 2021, 49(2): 60-68.
YANG H Z, YANG D, MENG K. Multi-time scale coordination optimal scheduling of multiple virtual power plants with high-penetration renewable energy integration[J]. Smart Power, 2021, 49(2): 60-68.
- [6] 郑浩伟, 闫庆友, 尹哲, 等. 计及日前-实时交易和共享储能的VPP运行优化及双层效益分配[J]. 电力建设, 2022, 43(9): 34-46.
ZHENG H W, YAN Q Y, YIN Z, et al. VPP operation optimization and bilayer revenue distribution model considering the two-level market and shared energy storage[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(9): 34-46.

- [7] 李凌昊, 邱晓燕, 张浩禹, 等. 电力市场下的虚拟电厂风险厌恶模型与利益分配方法[J]. 电力建设, 2021, 42(1): 67-75.
LI L H, QIU X Y, ZHANG H Y, et al. Risk aversion model and profit distribution method of virtual power plant in power market[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(1): 67-75.
- [8] 卫志农, 余爽, 孙国强, 等. 虚拟电厂的概念与发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 1-9.
WEI Z N, YU S, SUN G Q, et al. Concept and development of virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 1-9.
- [9] 王宣元, 刘敦楠, 刘蓁, 等. 泛在电力物联网下虚拟电厂运营机制及关键技术[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3175-3183.
WANG X Y, LIU D N, LIU Z, et al. Operation mechanism and key technologies of virtual power plant under ubiquitous internet of things[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3175-3183.
- [10] 王宣元, 高洪超, 张浩, 等. 面向新型电力系统的灵活资源聚合技术应用场景分析及建设启示[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(1): 73-80.
WANG X Y, GAO H C, ZHANG H, et al. Analysis and enlightenment of aggregation technology application scenarios of flexible distributed energy resources oriented to new power system[J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(1): 73-80.
- [11] 严欢, 胡俊杰, 黄旦莉, 等. 考虑电动汽车虚拟电厂灵活性和高比例光伏接入的配电网规划[J]. 电力建设, 2022, 43(11): 14-23.
YAN H, HU J J, HUANG D L, et al. Distribution network planning considering the flexibility of EV virtual power plants and high penetration of PV[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 14-23.
- [12] 卫璇, 潘昭光, 王彬, 等. 云管边端架构下虚拟电厂资源集群与协同调控研究综述及展望[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(6): 539-551.
WEI X, PAN Z G, WANG B, et al. Review on virtual power plant resource aggregation and collaborative regulation using cloud-tube-edge-end architecture[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 539-551.
- [13] 陈皓勇, 谭碧飞, 伍亮, 等. 分层集群的新型电力系统运行与控制[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 581-595.
CHEN H Y, TAN B F, WU L, et al. Operation and control of the new power systems based on hierarchical clusters[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 581-595.
- [14] 李嘉媚, 艾芊, 殷爽睿. 虚拟电厂参与调峰调频服务的市场机制与国外经验借鉴[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 37-56.
LI J M, AI Q, YIN S R. Market mechanism and foreign experience of virtual power plant participating in peak-regulation and frequency-regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 37-56.
- [15] CHEN H, WANG X, LI Z, et al. Distributed sensing and cooperative estimation/detection of ubiquitous power internet of things[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 1-8.
- [16] WANG W, CHEN P, ZENG D, et al. Electric vehicle fleet integration in a virtual power plant with large-scale wind power[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5924-5931.
- [17] LI J, PENG D, ZHAO H, et al. A spatial-temporal bi-layer optimal control strategy of large-scale electric vehicles (EVs) in a multi-area virtual power plant (VPP) oriented to dual carbon target[J]. IET Renewable Power Generation, 2022, 16(7): 1445-1461.
- [18] LI X, LI C, LIU X, et al. Two-stage community energy trading under end-edge-cloud orchestration[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(3): 1961-1972.
- [19] 杨秀, 杜楠楠, 孙改平, 等. 考虑需求响应的虚拟电厂双层优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(2): 137-146.
YANG X, DU N N, SUN G P, et al. Bi-level optimization dispatch of virtual power plants considering the demand response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2): 137-146.
- [20] 田立亭, 程林, 郭剑波, 等. 虚拟电厂对分布式能源的管理和互动机制研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2097-2108.
TIAN L T, CHENG L, GUO J B, et al. A review on the study of management and interaction mechanism for distributed energy in virtual power plants[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2097-2108.
- [21] GOUGH M, SANTOS S F, LOTFI M, et al. Operation of a technical virtual power plant considering diverse distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2): 2547-2558.
- [22] 周玮, 高垚, 彭飞翔, 等. 基于模型预测控制的能源产消者端对端交易策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 1-10.
ZHOU W, GAO Y, PENG F X, et al. Peer-to-peer

energy trading strategy for prosumers based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 1-10.

- [23] 刘杨, 刘天羽. 基于区块链和动态定价模型的微电网P2P能源交易[J]. 智慧电力, 2022, 50(3): 30-36.

LIU Y, LIU T Y. P2P energy trading in microgrid based on blockchain and dynamic pricing model[J]. Smart Power, 2022, 50(3): 30-36.

- [24] 李可舒, 王冬容. 欧洲虚拟电厂发展对我国的启示[J]. 中国电力企业管理, 2020(25): 93-95.

LI K S, WANG D R. Enlightenment of the development of virtual power plants in Europe to China [J]. China Power Enterprise Management, 2020(25):

93-95.

收稿日期: 2023-05-21。

作者简介:



陈皓勇

陈皓勇(1975), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力经济与电力市场、新能源发电与智能电网技术、虚拟电厂、综合能源系统与能源物联网等, eehychen@scut.edu.cn。

(责任编辑 尚彩娟)