

基于分布式发电的虚拟发电厂研究综述

夏榆杭, 刘俊勇

(四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 为了解决大规模分布式电源接入配电网后造成的系统难以调度、终端用户频率/电压大幅波动、能源利用率低等严峻问题,提出了在配电网中构建基于分布式发电的虚拟发电厂。比较了不同文献中对虚拟发电厂的定义,概括出虚拟发电厂的关键特征,介绍了组成虚拟发电厂的各种分布式发电机组,比较了虚拟发电厂与微网之间的差别,分类梳理了现有文献中提出的虚拟发电厂运行时采用的多源协调控制和优化调度方法,以及虚拟发电厂在参与电力市场交易时所采用的交易策略,介绍了现有关于虚拟发电厂的工程项目进展,最后对虚拟发电厂在未来的发展进行了展望。

关键词: 分布式发电; 虚拟发电厂; 协调控制; 优化调度; 电力市场

中图分类号: TM 62

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.04.016

0 引言

随着世界各国实施越来越严格的环境保护法规,以及人们对环境要求的不断提高,人们越来越倾向于选择更为清洁的、环境友好的可再生能源。在可再生能源中又以分布式电源的发展最受关注。分布式电源通常指微型水轮机、小型风机、光伏发电(PV)和小型燃气轮机等分布式发电机组、储能系统,以及需求侧的温控负荷。分布式电源在未来的能源结构中扮演着重要角色,其不仅能提供清洁的能源供应,提高能源的使用效率,而且能降低大量常规化石燃料发电机组造成的温室气体的排放^[1-4]。由于分布式电源一般不直接接入主网,通常安装在配电网的用户侧,使得配电网中的潮流呈现了双向流动的特点。虽然分布式电源的总发电量理论上能够替代传统发电机组,但是受自然条件和使用成本的制约,使得分布式电源在系统出现紧急情况的时候无法为主网提供必要的辅助服务支撑,而且如果缺乏对分布式电源的有效管理,将会导致系统的投资成本和运行成本急剧增长,最终又影响了系统对分布式电源的接纳。

为了实现分布式电源在配电系统中自由、灵活的接入,基于分布式电源的虚拟发电厂 VPP(Virtual Power Plant)应运而生。VPP 通过内部先进的通信和控制架构,将一定区域内包含的所有分布式电源聚集起来,实现对大规模、分散的分布式电源的有效管理^[5],并且可以将大量不同的分布式电源的参数生成对外统一的运行概况,使得分布式电源能够在电力市场中以电能供应者的身份与主网签订电量合同,为系统提供高可靠性、高质量、高度安全和随时可用的电能服务,使得对配电网中大量分布式

电源的管理更加高效,提高了系统运行的稳定性。

1 VPP 的概念

1.1 VPP 的定义

VPP 的定义至今没有统一。在欧洲率先实施的多个关于 VPP 的项目中对于 VPP 的定义也不尽相同:在 FENIX(Flexible Electricity Network to Integrated eXpected energy solution)项目^[6]中定义 VPP 为一个大规模的分布式电源(包括储能设备和需求侧响应资源)接入电网后通过关键传输机制作为配电网和输电网的控制源,能够有效降低分布式电源接入电网后系统的运行和电能输送的费用,为系统提供频率控制、电压控制、潮流控制,提升系统的安全性和可靠性;在 VFCPP(Virtual Fuel Cell Power Plant)项目^[7]中将 VPP 定义为一个互联的分布式住宅型的微型热电联产集合,通过运用燃料电池技术,将热电联产发电机安装在居民住宅、小型企业和公共设施中,提供制热、制冷和发电等需求,该项目的主要目的是通过智能能源管理和先进通信技术进行 VPP 的开发、安装和试验,确保 VPP 能够以个人终端用户和电网侧均受益的方式运行;在基于功率匹配器的 VPP 项目^[8]中定义 VPP 为一个能将电力系统中众多的家居型热电联产机组和其他分布式电源(如风机、热泵和储能设备)集合起来,根据弹性电价为用户提供电能的智能电力系统。此外,文献[9]中定义 VPP 为分散的发电机组、可控负荷和储能设备的集合,通过双向互动机制(既接收各设备的当前状态,又向控制目标发送信号),协调发电机组、可控负荷、储能装置的运行状态,并将这些元素聚集起来作为一个统一的发电厂来运行。文献[10]定义 VPP 为一个含有大量分布式电源的虚拟电网,通过先进的通信技术和能量管理体系将内部分布式电源聚集起来形成具有和传统发电机组类似的参数(如发电调度、发电约束、运行费用等)的发电

厂,并且能对外直接与其他系统运营商进行交易,提供辅助服务和签订相关的电量合约,提高电力系统的可靠性,减少运行费用。

综合看来,基于分布式发电的 VPP 是一个包含有多种分布式电源的柔性聚合发电厂,在一定区域内协调控制内部的不同电源、储能设备和负荷,实现比常规发电机组更优良的调度特性,并可以作为整体参与电力市场交易,VPP 的核心可以概括为“通信”和“控制”。

1.2 VPP 与微网的区别

目前,基于分布式发电的 VPP 和微网是解决大规模小容量分布式电源并网的主要手段,VPP 和微网均能通过与主网并网的方式,将多余的电量出售给主网。根据微网的定义,微网通过主分离装置实现与主网的互联,其内部通过电力电子器件与负荷实现“硬”连接,并基于电力电子技术对微网内部的不同分布式发电机组进行协调控制,以及利用硬件设备对微网内部分布式电源进行继电保护,实现微网运行模式的平滑切换^[11-13]。在农村和边远地区,通过合理设计微网结构,能够显著改善地区用电经济性,说明了微网也适合孤网运行。VPP 则主要是通过其内部的控制中心利用先进的通信技术对分布式电源进行聚集控制^[14],使其运行具有柔性特征,且 VPP 在分布广泛的区域内整合大量的电源出力,并通过不止一个联络点与电网相连。VPP 与电网解列时,一般不能成为封闭系统独立运行,且一直与主网进行能量流、信息流、货币流的交换,表现出开放系统的特征。此外,VPP 通过中低压配电网接入主干网,而且内部也存在配电网,因此配电网在边界节点通过电压、频率、电价、网损等信息影响着 VPP 内部的运行方式。

2 VPP 的研究现状

2.1 基于分布式电源的 VPP 构成

VPP 的结构框架如图 1 所示。一般而言,VPP 内包含有小型风机、光伏发电、小型热电联产机组(μ CHP)等多种分布式发电机组和储能设备。小型风机和光伏发电通过连接向能量供应商输送电量(P_{exp})或购买电能(P_{imp}),以及对局部负荷供电。而 μ CHP 不仅能满足当地用户的电能需求(P_{chp}),还能对用户的储热装置(水箱)提供热能(h_{chp}),文献[15-16]中详细介绍了 μ CHP 的结构框架,如图 2 所示。对于储能装置而言,其将 VPP 内富余的电量储存起来,根据电价水平和负荷需求情况提供给局部负荷或主网。

此外,VPP 中还存在一类具有储热/冷能力的负荷,如电热水器、暖通空调、热泵等。这类负荷在

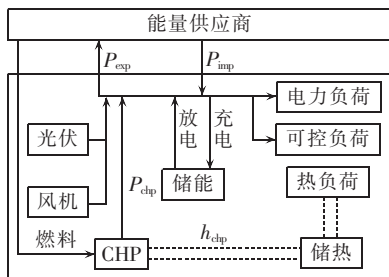


图 1 VPP 系统结构

Fig.1 System architecture of VPP

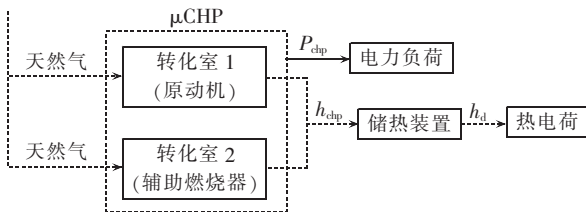


图 2 μ CHP 结构图

Fig.2 Structural chart of μ CHP

制热或制冷到某一温度时,能在一定时间内保持温度恒定,该特性称为热惯性。这类负荷具有根据电价水平来调节负荷状态的能力,还能在系统出现电量不足时提供备用支持,改善系统的频率状况,这类负荷统称为温控负荷 TCL(Thermostatically Controlled Loads)^[17-19]。

2.2 VPP 的运行

由于 VPP 中以风机、光伏为主的大量分布式发电机组的出力具有较强的间歇性、随机性特点,VPP 在运行中需要对区域内多种电源进行协调控制,以平抑 VPP 整体有功功率输出的波动问题,使 VPP 能够优化各分布式电源的发电成本,以经济的方式对外参与系统的各种辅助服务交易和电量交易。

2.2.1 VPP 的多源协调控制

VPP 对多种分布式电源的控制一般分为集中控制、集中-分散控制和完全分散控制 3 类^[20]。集中式控制模式提供了一种自上而下的方式来管理分布式电源。首先,各区域先将负荷情况传递到位于 VPP 中心的控制协调中心 CCC(Control Coordination Centre),然后由 CCC 将计算后的出力、机组启停等信息传递给分布式电源控制器 DGC(Distributed Generation Controller),再由 DGC 控制各分布式电源的运行状态。在该模式下,CCC 对 VPP 内所有单元具有完全控制权。文献[21]分析了典型的分布式电源在实时电力市场中不同政策下的经济性,并对 VPP 中的多种分布式电源进行集中控制,优化了 VPP 内分布式电源的运行,减少了终端用户的电量价格,实现了 VPP 与主网的相互受益。但是,此种结构要求 CCC 具有非常强大的计算能力和通信带宽,因为随着分布式电源数量的不断增大,CCC 需要处理的信息海量增

长,一旦 CCC 故障罢工,则可能瓦解整个 VPP 的运行结构。

在集中-分散控制结构中,VPP 一般将其分为低层控制和高层控制。在低层控制中,分散的分布式发电机组均被当地的控制器 LC(Local Controller)控制,DGC 控制着各分布式电源的出力情况,而 LC 又利用逻辑算法对 DGC 进行控制。各 LC 通过连接成环形网络架构进行信息交换,并将汇集的信息传递到高层控制中心,由高层控制中心对各分布式电源出力进行协调控制。文献[22]提出了一种利用区域温控负荷实现对系统频率控制的方法,该方法首先对家居温控负荷电冰箱的热力学特性建立一阶常系数微分方程模型,然后提出基于变参与度的需求侧分散控制策略,协同储能系统进行区域配电网的频率调节策略,实现频率调节。在这种控制架构中,VPP 将部分控制功能下放到 LC,改善了集中控制中数据传输堵塞和扩展性差的问题,使得 DGC 能够根据负荷需求和外部电力市场对 VPP 进行整体的能量优化。

在完全分散控制中,VPP 被划分为多个自治、智能的子系统,每个子系统间通过通信进行交互协作,以感知其他子系统的运行状态,从而替代 VPP 中原本存在的控制中心,而控制中心则成为了数据交换和处理中心。文献[8]提出了一种基于市场-经济原则的 VPP 电量交易市场的多代理协调控制策略,各分布式电源独立作为代理,进行日前电量交易、实时平衡的联合能量市场投标竞价,再基于功率匹配器优化 VPP 内的发电量和负荷需求量,实现 VPP 内的电量电力平衡,该分散控制策略保证了 VPP 电量交易市场架构的灵活性、可扩展性。针对小容量的分布式电源和家用负荷无法作为真正的电力市场参与者的问题,文献[23]中将小容量电源和负荷构造为一个小型的多代理系统进行控制,并将每个代理与相关的分布式电源和负荷定义为现场层,再根据相关的物理约束组成多代理系统,将每个多代理系统中含有的一个与其他相似的多代理系统进行通信的代理定义为管理层,最后将每个负责参与电力交易的代理分为企业层,认为由于多代理系统具有存储信息量全、减少信号时延、缩短控制时间等优点,分散的多代理系统能更好地控制 VPP 的运行。在完全分散控制结构中,VPP 中的每个单元的发电或用电方案可能需要多次通信迭代才能最终确定。相比较于前 2 种控制结构,完全分散控制架构具有更为优良的扩展性和开放性,但是却要求 VPP 中的各子系统具有一定程度的智能行为,能够具备日常运行管理、故障处理等能力。

通过以上 3 种控制模式的分析,可以发现 VPP 对分布式电源的控制大幅降低了以往分布式电源无

序接入配电网时对配电网造成的冲击,为分布式电源参加电力市场交易提供了可能,降低了大量分布式电源接入所带来的调度困难,实现了配电网的有序管理,提高了整体配电网网络的稳定性。

2.2.2 VPP 的优化调度

VPP 通过通信技术和控制策略协调分布式电源出力,在满足各种网络和物理约束条件时,力图以发电成本最小、机组收益最大、污染物或碳排放最小等为目标满足用户负荷需求,这就要求充分利用 VPP 内清洁的分布式电源,如风电、光伏等,然后再利用 VPP 内运行经济的机组满足负荷需求。如文献[24]中提出了基于动态优先排序方法建立各分布式电源的边际成本集,然后 VPP 按照集合决定每个机组的发电顺序,动态调节其短期竞价策略集合,最后得出 VPP 基于市场中的动态电价行为最优竞价策略,实现了 VPP 的最优调度。由于配电网能够通过 VPP 的边际节点影响 VPP 的运行,文献[25]在配电运营商(DSO)与 VPP 协调运行的基础上提出了一种基于成本的运行优化方法,其中 DSO 根据主网供应电价、配电网损、网络辅助服务等要求进行优化,并将优化后节点有功/无功等经济指标提供给 VPP,VPP 在内部负荷的约束条件下,依据该信息优化各分布式电源的出力。由于 VPP 中还存在相当的常规分布式电源,因此在对 VPP 进行优化调度时,还需要满足 VPP 的整体的碳(污染物)排放限额。文献[26]中利用“以碳定电”的规则制定 VPP 中各分布式机组的运行顺序,要求 VPP 中排放低的机组优先发电,并在满足 VPP 总的调度成本下,实现系统的碳排放最小。文献[27]则认为用户在进行电能消费时就进行了碳排放,并将 VPP 中的温控负荷融入了个人碳排放机制,激发了用户参与 VPP 调度的兴趣,进一步减少了 VPP 整体的发电成本和碳排放。以上文献均从 VPP 对其所聚集的发电单元和用电单元的控制出发,从而实现 VPP 的最优调度,但是 VPP 内各分布式机组作为独立的运行实体,VPP 发电商与各实体的关系主要是能量流的调度、货币流的分配和信息流的共享,如何在各实体间分配 VPP 的整体收益也是影响 VPP 优化调度的一个重要因素,目前关于这方面的研究还比较欠缺。

此外,由于 VPP 的用户也存在一定的热能需求,在对 VPP 进行优化调度时,还需要考虑用户的热能需求对 VPP 内各机组运行的影响。但是由于热电联产机组、储热系统的存在,导致了 VPP 在运行中热能-电能的供应与消费处于耦合状态,且热能和电能的需求曲线并不是时时同步,这就需要首先分别建立热电联产机组(CHP)的电能输出和热能输出模型,再联合热能与电能的最小生产成本函数为目标

函数的基础上建立 VPP 最优调度的模型^[28]。而文献[29]在分析了各分布式电源的特性后,认为在 VPP 中主要为用户提供热能需求的 CHP 并不能在电能负荷高峰时提供足够的电能,而且 CHP 增加了 VPP 结构的复杂性,因此对 VPP 进行经济调度优化的时候,需要先对 CHP 的出力进行优化,并且在文中提出一种基于混合整数线性规划方法对 CHP、储热系统的输出热能进行优化,并分析了终端用户热负荷模型的正确性对优化结果的影响。

由以上可知,VPP 在优化调度时,通过对内部机组的有效组合,消除了可再生分布式电源出力波动性对整个 VPP 运行的影响,实现了分布式电源和负荷的协同管理,优化了 VPP 在电力市场环境下的运行。

2.3 VPP 参与电力市场交易

在未来的电力供应中,VPP 将在促进电力市场自由化、增强电力系统可靠性、提高电力供应的经济效率和保护环境等方面扮演着非常重要的角色。VPP 利用先进的信息通信技术 ICT(Information Communication Technology)及时、快速地响应负荷需求、电价的变化,平抑系统内部的负荷峰谷,并且 VPP 内的富余电量还可积极参与主网的能量市场竞价。针对 VPP 内各分布式电源在电力市场交易中的动态行为,文献[30]提出了基于竞争电力市场的多代理仿真器 MASCEM(Multi-Agent Simulator of Competitive Electricity Markets)架构来研究分布式电源参与电力市场的竞价策略与协商机制,该架构能促进各代理获取对方的信息,改进各代理的策略,然后利用获取的信息建立尽可能多的场景,并利用基于场景决策算法为分布式电源在交易中的决策提供支持。为了解决 VPP 在联合能量和备用市场中的竞价问题,可以先根据 VPP 中的电量供应-需求的平衡约束和网络的安全约束条件,建立一种基于机组组合的不均衡竞价模型,将 VPP 中的多种分布式电源参数生成统一的 VPP 运行水平,再利用相应的启发式算法求解出 VPP 的最优竞价策略^[31-32]。VPP 在电量交易时通常会首先获得其内部各单元的发电/用电信息,然后根据主网所提供的供电关键时段,求出 VPP 的总发电量/用电量的最优方案,并上报到主网。主网在收到 VPP 所提供的信息后,将具体的发/用电功率随时间变化的需求量下发给 VPP,最后再由 VPP 对发电/用电需求进行分配。

由于 VPP 中分布式电源的发电成本各不相同,其边际发电成本依赖于光照、风速、网损、负荷等局部环境,而这些多变的局部环境导致了分布式电源的边际成本不断变化,使得 VPP 在进行电量交易时面临如下不确定性:①VPP 包含的光伏、风机等可再生机组出力的不确定性;②电价、燃料(天然气)价格

的不确定性。针对第一类不确定性问题,如 VPP 在参与日前市场和实时平衡市场中的电量交易时,一般先基于历史数据将不确定性因素构建成有限的场景集,然后将其引入日前市场的 VPP 交易模型中,再利用实时平衡市场修正 VPP 内部机组的发电量。该方法一般会采用随机决策算法计算出 VPP 在风机/光伏的典型出力场景下的最大预期收益^[33]。除此之外,文献[34]在上述基础上提出一种基于市场规则的 VPP 电量交易模型,通过 VPP 交易时所必需的竞价和电价信息,设计出允许分布式电源自由参与电量市场的通用路径,以协调 VPP 内部负荷需求与外部电量交易,从而最大限度地获得收益。在解决第二类不确定性问题时,通用的处理方法是先用蒙特卡洛模拟出大量的价格数据,并运用场景缩减算法提取出能覆盖所有价格数据信息的数据集,然后基于风险理论建立出 VPP 进行电量交易的损失函数模型,再将数据集代入损失函数中,并分析 VPP 在不同风险下的电量交易收益,生成 VPP 的期望收益与风险度的有效前沿曲线,为 VPP 提供电量交易的决策支持^[35-36]。

3 VPP 的工程应用进展

欧洲 FENIX 项目中将 VPP 分为 2 类:技术型 VPP TVPP(Technical VPP)、商业型 VPP CVPP(Commercial VPP)^[37]。TVPP 通过将相同地理区域内的分布式电源聚集成为能够包含所有分布式电源特性的局部能源管理系统;CVPP 则是在含有分布式电源所有费用信息、出力曲线后参与电力市场交易。在 FENIX 的北部方案中,CVPP 通过控制箱收集大量连接在家居侧的分布式发电水平、运行状态、市政负荷需求等信息,经过 DSO 处理计算后,得出当前电力市场中 VPP 内部机组的最佳发电水平。在北部方案中,DSO 还将会积极地参与到 VPP 的市场交易,并且主导控制 CVPP 的整个运行过程。北部方案基于 SCADA 系统和分布式电源的多代理控制,实现了 CVPP 代表其内部的分布式电源对外提供电量竞价曲线,一旦交易实现,CVPP 将计算出的内部分布式电源发电计划表传送给各发电设备,进行相应的电能生成。在 FENIX 的南部方案中,VPP 中含有 12 台单机视在功率为 170 MV·A 的发电机组连接在中压配电网,并将 SCADA 对其的测量数据实时传输到 CVPP 模块和控制箱,再将 VPP 作为由 DSO 操作的并行控制系统,对 DSO 或输电运营商(TSO)提供无功功率以保证电压稳定。南部方案利用智能计量技术实现了 VPP 聚合分布式电源参与日前电力市场、为主网提供一定的紧急备用和维持配电网电压稳定的主要功能。

丹麦东部博恩霍尔姆岛上实施的 EDISON 项

目^[38]主要是利用VPP解决电动汽车接入电力系统中,在满足所有约束的条件下,以最小的费用对电动汽车进行充电。对此,该项目在岛上组建了含有52台分布式机组(其中包括35台风机)、27000名用户、总容量为135 MW、最大负荷为55 MW的VPP网络。该网络中包含了3个主要功能模块:对每个分布式机组的控制模块、数据采集模块以及通信模块。该项目首先研究了如何利用电动汽车的充电来应对风电场出力的波动,仿真模拟了电动汽车的移动轨迹对电网潮流的影响,并且以每15 min为时段计算出VPP的潮流地图,能一目了然地分析出线路和变压器过载的具体地理位置,选择对电动汽车进行充电的最佳位置。该项目研究了电动汽车的聚合充电行为对配电网的影响,通过集中控制和最优分派的模式协调VPP为电动汽车充电,并利用预测的聚合负荷曲线和电动汽车的充电路径清除VPP中可能存在线路阻塞问题,实现了电动汽车和VPP的最优运行。

瓦腾福欧洲公司在德国柏林实施的基于智能热泵的VPP项目主要是为了解决电力市场中的电价波动问题。在该项目中,VPP包含了30台热泵和CHP,通过引入热泵能显著减少由于风机出力波动而引起的电价波动。当电价处于低谷时,用户开启热泵;当电价处于高峰时,通过CHP产生富余的电量来平衡电量缺口。瓦腾福控制中心将采集的负荷、发电信号进行处理后,制定出调度计划,再通过VPP传递到各机组,以此决定各机组的运行状态。该项目试图利用集中性的小容量分布式电源和CHP技术消除高渗透率下可再生分布式电源出力不确定性对整个系统运行稳定性的影响,并通过智能分布式电源和负荷管理,实现VPP内部的电压稳定性。

此外,Konwerl、Virtplant、Unna、ProVipp等项目^[39-41]中均尝试利用热电联产和储能系统减小VPP中风机、光伏等可再生能源机组出力的波动性对VPP参与电力市场的影响。

4 研究展望

分布式电源大量接入配电网后,VPP通过控制中心和通信网络将各种分布式电源聚集成一个大型的虚拟发电实体,以期能更好地利用分布式电源。但是就微观方面而言,由于VPP内部含有大量的风机、光伏、CHP等微型发电机组,储能系统,以及终端用户侧的温控负荷,这些分布式电源的出力紧随着其覆盖区域内的负荷需求变化,使得这些分布式电源呈现出丰富的动态行为,增加了管理VPP内部分布式电源的难度;宏观方面而言,VPP在对外参与电力市场交易、为系统提供辅助服务的过程中,不仅要求信息传输的稳定可靠,还要求能即时地传递控制指令,

使分布式电源能够自由地接入能量和系统管理市场,实现系统整体容量的最优利用和高效运行。对此,需要从以下几个方面对VPP所存在的问题进行深入研究。

(1)当前在对各分布式电源进行协调调度的过程中,由于种类多样的分布式电源在运行过程中的不同出力区间,使得其需频繁地向控制中心提交实时运行状态和边界条件,这导致了控制中心需要依据每个分布式电源的运行状态频繁地修改建立的参数模型,极端情况下甚至使得调度优化算法无法根据边界条件做出对各分布式电源的最优调度计划。此外,由于不同分布式电源的出力受其供电范围内的负荷水平影响,以及相邻分布式电源发电水平的差异可能造成分布式电源运行状态的波动,因此非常有必要依据VPP内负荷与分布式电源间的电气距离、不同负荷之间的电气距离,以及分布式发电机组间的机械距离,从整体上建立出描述VPP出力的虚拟发电机模型VGM(Virtual Generator Model)^[42],通过对各分布式机组的出力范围采用支持向量等方式的聚类算法^[43-44],得到VGM的出力范围,然后再利用多代理^[45]、博弈论^[46]等方法分析VPP内的负荷、主网、VGM这三者间的相互作用机理,以及不同自然条件、网络等约束条件下对VGM运行趋势的影响,实现VPP内的各分布式电源与VPP整体的最优运行。

(2)在VPP参与主网电力市场交易过程中,存在2个不确定性因素:一个是VPP内部的分布式发电机组受到风速、光照、天然气价格、负荷水平等外部因素,以及计划检修、故障停机等内部因素引起的机组意外被动退出电力市场的影响造成的出力波动;另一个是电量交易市场中的电价不确定性因素。在VPP参与电力市场联合能量-备用的投标竞价中,由于机组出力和电价的不确定性,导致了不同时段VPP内不同机组发电成本的不同,因此可以考虑先利用场景生成算法^[47-48]产生出含有这些不确定性因素下的所有竞价策略,然后再利用场景缩减算法^[49-50]提取出典型场景组成竞价策略集,最后分析比较得出最优策略。此外,在分析VPP参与电力交易所获取的收益时,还须考虑分布式发电机组由于内部因素导致的意外退出风险,在不同的条件风险价值CVaR(Conditional Value at Risk)水平约束下计算出分布式电源组合的期望收益。此外,由于VPP内用户的热能-电能负荷需求不一致的时空波动特点,以及由于CHP、储能系统引起的VPP内部的热能-电能滞环非线性特性,如何利用历史数据深度挖掘用户热能-电能需求的相关性,保证热能与电能的交叉套期保值,实现VPP能量交易的最大收益,将是

VPP 未来发展的另外一个方向。

(3) 构建基于功能的通用 VPP GVPP(Generic VPP)。在现有的 VPP 框架中,一个关键的问题就是如何设计出一种具有开放、鲁棒特性的服务架构来满足大规模分布式电源的聚合与控制。而基于功能特性的 GVPP 结构对此提供了一种能接纳所有分布式电源自由参与电力市场交易、提供辅助服务的思路。在 GVPP 的内部,其各功能模块分别指定不同的任务,而且模块间松散的耦合保证了 GVPP 的灵活性,能够根据不同的需求实现 GVPP 的定制。GVPP 架构作为整个 VPP 的控制基础,利用 IEC61850 等标准,提供了配置服务、归档服务、报表服务、消息服务、日志服务、计算服务、数据库服务、报警服务、用户接口服务以及安全服务,并在提供的这些服务下,实现了对分布式电源的市场管理、财务管理、发电管理、组合管理和分析支持五大重要功能。各分布式电源通过集成接口实现了分布式电源的聚集,GVPP 通过市场接口参与电力市场交易,通过主网接口实现了对 TSO 或 DSO 提供辅助服务,如图 3 所示。

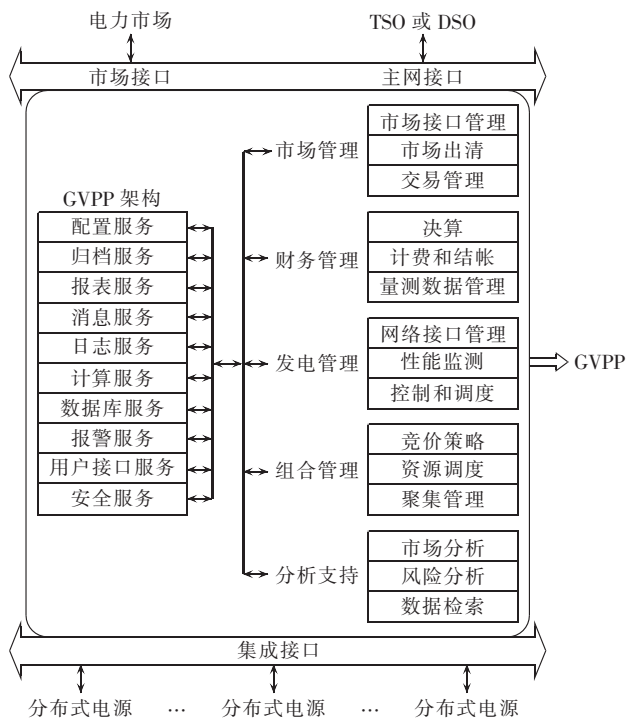


图 3 基于功能的 GVPP
Fig.3 Function-based GVPP

5 结语

基于分布式发电的 VPP 通过先进的通信技术和控制架构解决了配电网中大量不同类型的小容量、功率随气候波动的分布式电源机组管理的问题,并将一定区域内的分布式电源聚集为一个整体来接入电网,由于其松散耦合的控制模式,各分布式电源可以随时并入或退出 VPP,实现了区域内部电量与

负荷平衡,增强了每个分布式电源自由参与电能市场竞争、投标时的可接入性和对系统的可见性,提高了系统的运行效率,实现了大分散的分布式电源在配电网中的消纳。

参考文献:

- [1] ESTEBAN M,ZHANG Q,UTAMA A. Estimation of the energy storage requirement of a future 100% renewable energy system in Japan[J]. Energy Policy,2012,47:22-31.
- [2] KANASE-PATIL A B,SAINI R P,SHARMA M P. Sizing of integrated renewable energy system based on load profiles and reliability index for the state of Uttarakhand in India[J]. Renewable Energy,2011,36(11):2809-2821.
- [3] LIU H Y,WU S D. An assessment on the planning and construction of an island renewable energy system—a case study of Kinmen Island[J]. Renewable Energy,2010,35(12):2723-2731.
- [4] CONNOLLY D,LUND H,MATHIESEN B V,et al. The first step towards a 100% renewable energy-system for Ireland[J]. Applied Energy,2011,88(2):502-507.
- [5] XIA Yuhang,LIU Junyong. Optimal scheduling of virtual power plant with risk management[J]. Journal of Power Technologies,2016,96(1):1-8.
- [6] CORERA J M. Integrated project FENIX—what is it all about? [J]. Contract,2005,30:2009.
- [7] ROOSSEN B,HOMMELBERG M,WARMER C,et al. Virtual power plant field experiment using 10 micro-CHP units at consumer premises [C]//Smart Grids for Distribution. Frankfurt,Germany:CIRED Seminar,2008:86-90.
- [8] KOK J K,WARMER C J,KAMPHUIS I G. PowerMatcher:multi-agent control in the electricity infrastructure[C]//Proceedings of the Fourth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. Utrecht,Netherlands:[s.n.],2005:75-82.
- [9] SABOORI H,MOHAMMADI M,TAGHE R. Virtual Power Plant (VPP),definition,concept,components and types[C]//Power and Energy Engineering Conference (APPEEC),2011 Asia-Pacific. Wuhan,China:IEEE,2011:1-4.
- [10] PUDJANTO D,RAMSAY C,STRBAC G. Virtual power plant and system integration of distributed energy resources[J]. Renewable Power Generation,IET,2007,1(1):10-16.
- [11] LASSETER R H. Microgrids[C]//Power Engineering Society Winter Meeting. New York,USA:IEEE,2002:305-308.
- [12] LASSETER R,AKHIL A,MARNAY C,et al. The CERTS micro-grid concept,white paper on integration of distributed energy resources[R]. Washington DC,USA:California Energy Commission,Office of Power Technologies-US Department of Energy,2002.
- [13] HATZIGARYIOU N. Microgrids—the future of small grids[R]. Amsterdam,Netherlands:Future Power Systems,FPS,2005.
- [14] NIKONOWICZ Ł B,MILEWSKI J. Virtual power plants—general review:structure,application and optimization[J]. Journal of Power Technologies,2012,92(3):135-149.
- [15] HOUWING M,NEGENBORN R R,de SCHUTTER B. Demand response with micro-CHP systems[J]. Proceedings of the IEEE,2011,99(1):200-213.
- [16] HOUWING M,AJAH A N,HEIJNEN P W,et al. Uncertainties in the design and operation of distributed energy resources;the

- case of micro-CHP systems[J]. *Energy*,2008,33(10):1518-1536.
- [17] KATIPAMULA S,LU N. Evaluation of residential HVAC control strategies for demand response programs[J]. *Transactions-American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers*,2006,112(1):535.
 - [18] BACKHAUS S N,SINITSYN N,KUNDU S,et al. Modeling and control of thermostatically controlled loads[C]//17th Power Systems Computation Conference. Stockholm,Sweden;[s.n.],2011:90-97.
 - [19] RUIZ N,COBELO I,OYARZABAL J. A direct load control model for virtual power plant management[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*,2009,24(2):959-966.
 - [20] DONALD J. Marihart;communication technology guidelines for EMC/SCADA system[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*,2002,16(2):181-188.
 - [21] TSIKALAKIS A G,HATZIARGYRIOU N D. Centralized control for optimizing microgrids operation[C]//Power and Energy Society General Meeting,2011. San Diego,CA,USA:IEEE,2011:1-8.
 - [22] JIA H J,QI Y,MU Y F. Frequency response of autonomous microgrid based on family-friendly controllable loads[J]. *Sci China Tech Sci*,2013,56:693-702.
 - [23] DIMEAS A L,HATZIARGYRIOU N D. Agent based control of virtual power plants[C]//International Conference on,Intelligent Systems Applications to Power Systems,2007. ISAP 2007. Toki Messe,Niigata,Japan:IEEE,2007:1-6.
 - [24] KOK K. Short-term economics of virtual power plants[C]//20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Prague,Czech Republic:IET,2009:1-4.
 - [25] CALDON R,PATRIA A R,TURRI R. Optimal control of a distribution system with a virtual power plant[C]//Bulk Power System Dynamics and Control-VI. Cortina d'Ampezzo,Italy:[s.n.],2004:278-284.
 - [26] SKARVELIS-KAZAKOS S,PAPADOPOULOS P,GRAU I,et al. Carbon optimized virtual power plant with electric vehicles [C]//45th International on Universities Power Engineering Conference(UPEC). Cardiff,Wales:IEEE,2010:1-6.
 - [27] CHAPPIN E J L. Carbon dioxide emission trade impact on power generation portfolio[D]. Delft,Netherlands:Delft University of Technology,2006.
 - [28] CALDON R,PATRIA A R,TURRI R. Optimization algorithm for a virtual power plant operation[C]//39th International on Universities Power Engineering Conference. Bristol,UK:IEEE,2004:1058-1062.
 - [29] WILLE-HAUSSMANN B,ERGE T,WITTEWER C. Decentralized optimization of cogeneration in virtual power plants[J]. *Solar Energy*,2010,84(4):604-611.
 - [30] PRAÇA I,MORAIS H,RAMOS C,et al. Multi-agent electricity market simulation with dynamic strategies & virtual power producers[C]//Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh,PA,USA:IEEE,2008:1-8.
 - [31] MASHHOUR E,MOGHADDAS-TAFRESHI S M. Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets-part I:problem formulation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*,2011,26(2):949-956.
 - [32] MASHHOUR E,MOGHADDAS-TAFRESHI S M. Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets-part II:numerical analysis[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*,2011,26(2):957-964.
 - [33] PANDŽIĆ H,MORALES J M,CONEJO A J,et al. Offering model for a virtual power plant based on stochastic programming[J]. *Applied Energy*,2013,105:282-292.
 - [34] YOU S,TRÆHOLT C,POULSEN B. A market-based virtual power plant[C]//2009 International Conference on Clean Electrical Power. Capri,Italy:IEEE,2009:460-465.
 - [35] TAHERI H,RAHIMI-KIAN A,GHASEMI H,et al. Optimal operation of a virtual power plant with risk management[C]//Innovative Smart Grid Technologies (ISGT),2012 IEEE PES. Washington DC,USA:IEEE,2012:1-7.
 - [36] TAHERI H,GHASEMI H,RAHIMI-KIAN A,et al. Modeling and optimized scheduling of virtual power plant[C]//2011 19th Iranian Conference on Electrical Engineering(ICEE). Tehran,Iran:IEEE,2011:1-6.
 - [37] BRAUN M. Virtual power plants in real applications[R]. Voronezh,Russia;Sixth Research Framework Programme of the European Union for the FENIX Project(SES6-518272),2009.
 - [38] ANDERSEN P B,POULSEN B,DECKER M,et al. Evaluation of a generic virtual power plant framework using service oriented architecture[C]//IEEE 2nd International on Power and Energy Conference. Johor Bahru,Malaysia:IEEE,2008:1212-1217.
 - [39] YOU S,TRÆHOLT C,POULSEN B. Developing virtual power plant for optimized distributed energy resources operation and integration[D]. Copenhagen,Denmark:Technical University of Denmark,2010.
 - [40] FENN B,HOPP O,AHNER M,et al. Advanced technologies of demand side integration by VPPs and through smart metering in households-experiences from a lighthouse project[R]. Paris,France:CIGRE,2012.
 - [41] The Solarserver. The combined power plant: the first stage in providing 100% power from renewable energy[EB/OL]. (2008-01-15)[2014-12-25]. http://www.solarserver.com/solarmagazin/anlagejanuar2008_e.html.
 - [42] WANG D,PARKINSON S,MIAO W,et al. Hierarchical market integration of responsive loads as spinning reserve[J]. *Applied Energy*,2013,104:229-238.
 - [43] BREMER J,RAPP B,SONNENSCHN M. Encoding distributed search spaces for virtual power plants[C]//2011 IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications in Smart Grid (CIASG). Paris,France:IEEE,2011:1-8.
 - [44] BREMER J,RAPP B,SONNENSCHN M. Support vector based encoding of distributed energy resources' feasible load spaces [C]//Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe). Gothenburg,Sweden:IEEE,2010:1-8.
 - [45] PINTO T,MORAIS H,OLIVEIRA P,et al. A new approach for multi-agent coalition formation and management in the scope of electricity markets[J]. *Energy*,2011,36(8):5004-5015.
 - [46] GINTIS H. Game theory evolving:a problem-centered introduction to modeling strategic interaction[M]. Princeton,USA: Princeton University Press,2009:101-115.
 - [47] HØYLAND K,WALLACE S W. Generating scenario trees for multistage decision problems[J]. *Management Science*,2001,47(2):295-307.
 - [48] OLSSON M,SODER L. Generation of regulating power price

- [45] 章健,艾芊,王新刚. 多代理系统在微电网中的应用[J]. 电力系统自动化,2008,32(24):80-82.
ZHANG Jian, AI Qian, WANG Xingang. Applcation of multi-agent system in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 80-82.
- [46] ZHENG G, LI N. Multi-agent based control system for multi-microgrids[C]//2010 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering (CISE). Wuhan, China: IEEE, 2010: 1-4.
- [47] ZHAO B, ZHANG X, CHEN J. Integrated microgrid laboratory system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2175-2185.

作者简介:



支 娜

支 娜(1976—),女,陕西西安人,讲师,博士研究生,主要研究方向为微电网控制(**E-mail**:zhina@xaut.edu.cn);

肖 曦(1973—),男,湖南常德人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为微电网及其储能、电机系统及其控制(**E-mail**: Xiao_xi@tsinghua.edu.cn);

田培根(1979—),男,湖南临澧人,讲师,博士研究生,主要研究方向为微电网能量管理、储能系统规划和控制(**E-mail**:Tp10@mails.tsinghua.edu.cn)。

Research and prospect of multi-microgrid control strategies

ZHI Na¹, XIAO Xi², TIAN Peigen^{2,3}, ZHANG Hui¹

(1. Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Institute of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Multi-microgrid system is an interconnected system of microgrids, distributed generations, energy storages and loads, its control is more complicated due to its complex structure, and the reasonable and effective control strategy is the basis of its stable operation. The existing documents of multi-microgrid research on networking modes and coordinative control strategies are overviewed in detail, the networking modes of AC bus structure, AC-DC bus structure and virtual multi-microgrid bus structure are listed, and the strategies of hierarchical control, master-slave control, multi Agent control and peer-to-peer control are compared. Suggestive schemes about the key technologies in the future development and research of multi-microgrid are proposed based on the recent researches.

Key words: multi-microgrid; coordination control; distributed power generation; networking mode; multi Agent systems

(上接第 106 页 continued from page 106)

scenarios[C]//2004 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Ames, IA, USA: IEEE, 2004: 26-31.

- [49] HEITSCH H, RÖMISCH W. Scenario reduction algorithms in stochastic programming[J]. Computational Optimization and Applications, 2003, 24(2-3): 187-206.
- [50] DUPAČOVA J, GRÖWE-KUSKA N, RÖMISCH W. Scenario reduction in stochastic programming[J]. Mathematical programming, 2003, 95(3): 493-511.

作者简介:



夏榆杭

夏榆杭(1986—),男,四川简阳人,博士研究生,研究方向为电力系统调度自动化与电力市场(**E-mail**:406602096@qq.com);

刘俊勇(1963—),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为灵活交流输电与电力市场等。

Review of virtual power plant based on distributed generation

XIA Yuhang, LIU Junyong

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: It is suggested to construct a virtual power plant based on distributed generation for solving the problems brought in by the large-scale integration of distributed energy sources into the distribution network, such as difficult system dispatch, end-user frequency/voltage fluctuation, low energy efficiency, etc. The definition of virtual power plant is compared among different literatures, its key features are summarized, its different distributed generation units are introduced, its multi-source coordination control and optimal dispatch proposed in different literatures, as well as its trading strategy in power market, are sorted, the progress of its current projects is discussed, and its future development is prospected. The difference between virtual power plant and microgrid is introduced.

Key words: distributed power generation; virtual power plant; coordination control; optimal dispatch; power market