

DOI: 10.7500/AEPS201210156

虚拟电厂的概念与发展

卫志农¹, 余爽¹, 孙国强¹, 孙永辉¹, 袁阳¹, 王丹²

(1. 河海大学可再生能源发电技术教育部工程研究中心, 江苏省南京市 210098;

2. 智能电网教育部重点实验室, 天津大学, 天津市 300072)

摘要: 首先分析了虚拟电厂的产生背景, 给出了虚拟电厂的不同文献定义, 并提炼出虚拟电厂的核心思想。在此基础上, 结合微网的研究, 分析比较了虚拟电厂与微网的主要区别; 详细阐述了虚拟电厂的关键技术, 其中包括协调控制技术、智能计量技术以及信息通信技术; 同时按虚拟电厂功能的不同, 将其划分为商业型虚拟电厂和技术型虚拟电厂两大模块, 并基于此对虚拟电厂的运行框架进行了详细解释。结合中国电力工业的发展现状, 对虚拟电厂在中国的发展前景和开展形式进行了探讨。最后, 对虚拟电厂未来研究的重点方向进行了展望。

关键词: 分布式电源; 分布式能源; 虚拟电厂; 微网(微电网)

0 引言

随着世界能源紧缺、环境污染等问题的日益突出, 分布式电源(distributed generator, DG)以其可靠、经济、灵活、环保的特点而被越来越多的国家所采用。然而, 尽管 DG 优点突出, 但仍存在诸多问题^[1-4]。首先, DG 容量小、数量大、分布不均, 使得单机接入成本高, 对系统操作员常不可见乃至管理困难; 其次, DG 的接入给电网的稳定运行带来了许多技术难题, 如潮流改变、线路阻塞、电压闪变、谐波影响等; 再次, 目前“安装即忘记(fit-and-forget)”的 DG 操作方式以及电力市场容量的限制亦更加阻碍了 DG 的大规模并网。

当今, 全世界的电力行业正在迅速转型, 电力系统应该基于市场运营, 但是, 由于 DG 的特点, 如容量小或其具有的间断性和随机性, 仅靠它们本身加入电力市场运营并不可行。然而, 将 DG 聚合成一个集成的实体(integrated entity)为这一问题提供了解决途径^[5]。目前, 中国大多采用微网^[6-10]的概念作为 DG 的并网形式, 它能够很好地协调大电网与 DG 的技术矛盾, 并具备一定的能量管理功能, 但微网以 DG 与用户就地应用为主要控制目标, 且受到地理区域的限制, 对多区域、大规模 DG 的有效利用及在电力市场中的规模化效益具有一定的局限性^[11]。主动配电网^[12]是实现大规模 DG 并网运行的另一种有效解决方案, 它的概念将 DG 的接入半

径进行了一定的扩展, 能够对配电网实施主动管理, 但对 DG 能够呈现给大电网及电力市场的效益考虑不足。虚拟电厂(virtual power plant, VPP)的提出则为解决这些问题提供了新的思路。

“虚拟电厂”这一术语源于 1997 年 Shimon Awerbuch 博士在其著作《虚拟公共设施: 新兴产业的描述、技术及竞争力》一书中对虚拟公共设施的定义: 虚拟公共设施是独立且以市场为驱动的实体之间的一种灵活合作, 这些实体不必拥有相应的资产而能够为消费者提供其所需要的高效电能服务。正如虚拟公共设施利用新兴技术提供以消费者为导向的电能服务一样, 虚拟电厂并未改变每个 DG 并网的方式, 而是通过先进的控制、计量、通信等技术聚合 DG、储能系统、可控负荷、电动汽车等不同类型的分布式能源(distributed energy resource, DER), 并通过更高层面的软件构架实现多个 DER 的协调优化运行, 更有利于资源的合理优化配置及利用^[11, 13-15]。虚拟电厂的概念更多强调的是对外呈现的功能和效果, 更新运营理念并产生社会效益, 其基本的应用场景是电力市场。这种方法无需对电网进行改造而能够聚合 DER 对公网稳定输电, 并提供快速响应的辅助服务, 成为 DER 加入电力市场的有效方法, 降低了其在市场中孤独运行的失衡风险, 可以获得规模经济的效益。同时, DER 的可视化及虚拟电厂的协调控制优化大大减小了以往 DER 并网对公网造成的冲击, 降低了 DG 增长带来的调度难度, 使配电管理更趋于合理有序, 提高了系统运行的稳定性。

收稿日期: 2012-10-18; 修回日期: 2013-05-03。

国家自然科学基金资助项目(51277052, 51107032, 61104045)。

1 虚拟电厂的定义

目前,从整个世界范围来看,虚拟电厂的研究和实施主要集中于欧洲和北美。根据派克研究公司(Pike Research)公布的数据,截至2009年底,全球虚拟电厂总容量为19.4 GW,其中欧洲占51%,美国占44%;截至2011年底,全球虚拟电厂总容量增至55.6 GW^[11]。然而,欧洲与美国虚拟电厂的应用形式有着显著的不同,欧洲各国的虚拟电厂亦各具特色。欧洲现已实施的虚拟电厂项目^[13,16-19],如欧盟虚拟燃料电池电厂(virtual fuel cell power plant, VFCPP)项目、荷兰基于功率匹配器的虚拟电厂项目、欧盟 FENIX (flexible electricity network to integrate expected)项目以及德国专业型虚拟电厂(professional VPP, ProViPP)试点项目,主要针对实现 DG 可靠并网和电力市场运营的目标考虑而来, DG 占据 DER 的主要成分;而美国的虚拟电厂主要基于需求响应计划发展而来,兼顾考虑可再生能源的利用,因此可控负荷占据主要成分。因此,尽管虚拟电厂的概念已提出十余年之久,但对于虚拟电厂的框架尚无统一的定义^[20]。

在文献[11]中,虚拟电厂被定义为依赖于软件系统远程、自动分配和优化发电、需求响应和储能资源的能源互联网;在文献[21]中,虚拟电厂被定义为与自治微网相同的网络;在文献[22-23]中,虚拟电厂被定义为众多连接于低压配电网的热电联发电机组的组合;在文献[24]中,虚拟电厂被定义为不同类型的分散在中压配电网不同节点的 DER 的集合;在文献[25]中,虚拟电厂被定义为一个多技术和多站点异质实体;在文献[26]中,虚拟电厂由可接于配电网任意节点的具有丰富操作模式和可用性的一系列技术组成;在文献[27]中,虚拟电厂被定义为以直接集中控制方式聚合可控分布式能源(controllable distributed energy, CDE)单位或主动用户网(active customer network, ACN)的信息通信系统。

欧洲 FENIX 项目将虚拟电厂的概念(如图1所示)定义为:虚拟电厂聚合众多不同容量的 DER,通过综合表征各 DER 的参数建立整体的运行模式,并能够包含聚合 DER 输出的网络影响。虚拟电厂是 DER 投资组合的一种灵活表现,可以在电力市场签订合同并为系统操作员提供各种服务^[19]。图1中:G表示机组;L表示负荷。

综合看来,虚拟电厂概念的核心可以总结为“通信”和“聚合”。虚拟电厂可认为是通过先进信息通信技术和软件系统,实现 DG、储能系统、可控负荷、电动汽车等 DER 的聚合和协调优化,以作为一个特

殊电厂参与电力市场和电网运行的电源协调管理系统。

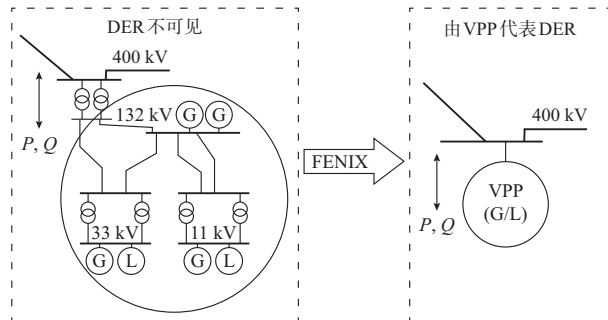


图1 FENIX项目中虚拟电厂的概念
Fig. 1 VPP concept of FENIX project

目前,国内有些文献将“能效电厂”称之为虚拟电厂,这与文中所述“虚拟电厂”的概念有所不同,但二者都属于广义上的虚拟电厂。能效电厂是指通过采用高效用电设备和产品、优化用电方式等途径,形成某个地区、行业或企业节电改造计划的一揽子行动方案,降低用电负荷,等效产生富余电能,从而达到与实际电厂异曲同工的效果^[28-30]。可以看出,能效电厂的实现形式在于需求侧的有效节电,而虚拟电厂的实现形式在于电源侧有效分配和管理 DG 发电、储能充放电和可控负荷。

2 虚拟电厂与微网的区别

虚拟电厂和微网是目前实现 DG 并网最具创造力和吸引力的2种形式^[5]。对于微网的定义,国内一般认为:微网是指由 DG、储能装置、能量转换装置、相关负荷和监控、保护装置汇集而成的小型配电系统,是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统,既可以与外部电网并网运行,也可以孤立运行^[6-7]。微网技术的提出旨在解决 DG 并网运行时的主要问题,同时由于它具备一定的能量管理功能,并尽可能维持功率的局部优化与平衡,可有效降低系统运行人员的调度难度^[7]。实际上,尽管虚拟电厂和微网都是基于考虑解决 DG 及其他元件整合并网问题范畴,但二者仍有诸多区别。

1)设计理念。微网采用自下而上的设计理念,强调“自治”,即以 DG 与用户就地应用为主要控制目标,实现网络正常时的并网运行以及网络发生扰动或故障时的孤岛运行。而虚拟电厂的概念强调“参与”,即吸引并聚合各种 DER 参与电网调度和电力市场交易,优化 DER 组合以满足电力系统或市场要求为主要控制目标,强调对外呈现的功能和效果。

2)构成条件。微网的构成依赖于元件(DG、储能、负荷、电力线路等)的整合,由于电网拓展的成本

昂贵,因此微网主要整合地理位置上接近的 DG,无法包含相对偏远和孤立的分布式发电设施。虚拟电厂的构成则依赖于软件和技术;其辖域(聚合)范围以及与市场的交互取决于通信的覆盖范围及可靠性;辖域内各 DER 的参数采集与状态监控取决于智能计量(smart metering)系统的应用;DER 的优化组合由中央控制或信息代理单元进行协调、处理及决策。因此,引入虚拟电厂的概念不必对原有电网进行拓展,而能够聚合微网所辖范围之外的 DG。

3)运行模式。微网相对于外部大电网表现为单一的受控单元,通过公共耦合开关,微网既可运行于并网模式,又可运行于孤岛模式。而虚拟电厂始终与公网相连,即只运行于并网模式。

4)运行特性。微网的运行特性包含 2 个方面的含义,即孤岛运行时配电网自身的运行特性以及并网运行时与外部系统的相互作用^[9-10]。而虚拟电厂作为聚合能量资源构成的特殊电厂,其与系统相互作用的要求比微网更为严格,可用常规电厂的统计数据 and 运行特性来衡量虚拟电厂的效用,如有功/无功负载能力、出力计划、爬坡速度、备用容量、响应特性和运行成本特性等^[26];其辖域内配电网的运行特性则由配电系统操作员(distribution system operator, DSO)进行衡量。

3 虚拟电厂的关键技术

3.1 协调控制技术

虚拟电厂的控制对象主要包括各种 DG、储能系统、可控负荷以及电动汽车。由于虚拟电厂的概念强调对外呈现的功能和效果,因此,聚合多样化的 DER 实现对系统高要求的电能输出是虚拟电厂协调控制的重点和难点。实际上,一些可再生能源发电站(如风力发电站和光伏发电站)具有间歇性或随机性以及存在预测误差等特点,因此,将其大规模并网必须考虑不确定性的影响。这就要求储能系统、可分配发电机组、可控负荷与之合理配合,以保证电能质量并提高发电经济性。为实现上述目标,文献^[31-32]指出通常规划入虚拟电厂的 DG 一般由若干可再生能源发电站和至少一座传统能源发电站构成,并建立了线性规划优化分配模型;文献^[33]则认为虚拟电厂可由若干可再生能源发电站组成,但其中至少一座电站需完全可控,并建立了基于加速粒子群算法的优化分配模型;文献^[34]将区域风力发电机组和常规水、火电机组及储能设备聚合为虚拟电厂,建立虚拟电厂数据模型,并采用实际电网运行数据验证了方案的可行性;文献^[35]研究了小型核反应堆与沿海风电场以虚拟电厂形式聚合后风电

的波动问题;文献^[36]研究了高风电渗透率电力系统中聚合需求响应资源的优化运行问题。

此外,对于不具有不确定性的 DER 聚合,文献^[37]基于热电联产发电系统和储能装置建立混合整数优化模型,并基于 CPLEX 软件进行了仿真;文献^[38]针对虚拟电厂优化的多目标问题提出了加权多目标协同管理方法;文献^[39]提出了聚合居民热控负荷的控制模型;文献^[40]对由电动汽车、可控负荷和联合发电系统以虚拟电厂方式聚合管理以提供负荷频率控制功能进行了研究;文献^[41]提出了基于虚拟电厂的直接负荷控制模型并进行了实地测试;文献^[42-44]提出了考虑用户舒适约束的聚合家居温控负荷的控制策略和维持电压稳定性、提供系统旋转备用辅助的虚拟电厂模型;文献^[45-47]考虑将上述虚拟电厂模型应用到风电场有功调度、配用电侧可再生能源集成等领域;文献^[48-49]针对大规模电动汽车作为储能系统以虚拟电厂形式调度管理并参与电力市场的问题进行了研究;文献^[50]基于系统工程理论提出了虚拟电厂系统的概念,并在随后的虚拟电厂试点实验中测试了平衡功能。

虚拟电厂的控制结构主要分为集中和分散控制。在集中控制结构下,虚拟电厂的全部决策由中央控制单元——控制协调中心(control coordination center, CCC)制定。如图 2 所示^[38],虚拟电厂中的每一部分均通过通信技术与 CCC 相互联系,CCC 多采用能量管理系统(energy management system, EMS),其主要职责是协调机端潮流、可控负荷和储能系统。图中:ICT 表示信息通信技术。

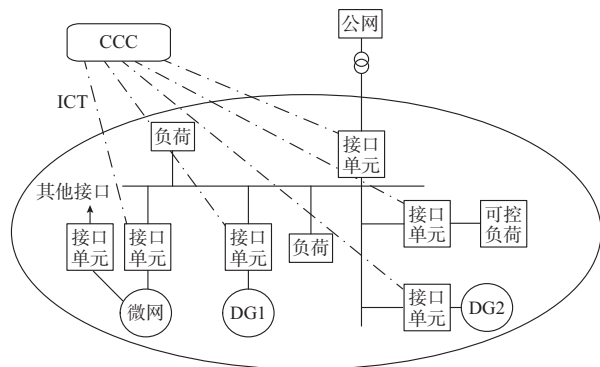


图 2 虚拟电厂的集中控制结构
Fig. 2 Centralized control structure of VPP

EMS 根据其优化目标进行工作,其优化目标包括:发电成本最小化、温室气体排放量最小化、收益最大化等^[51]。为达到上述优化目标,EMS 需要接收各个单位的状态信息并据此作出预测,尤其对于可再生能源发电机组,如风力发电和光伏发电机组。

此外,电网中可能发生阻塞问题的信息在虚拟电厂运行的优化过程中也起到至关重要的作用。根据接收到的信息,EMS 可以选择最佳解决方案,优化电网运行^[52]。集中控制结构最易于实现虚拟电厂最优运行,但扩展性和兼容性受到一定的限制。

在分散控制结构中,决策权完全下放到各 DG,且其中心控制器由信息交换代理取代,如图 3 所示。信息交换代理只向该控制结构下的 DER 提供有价值的服务,如市场价格信号、天气预报和数据采集等。由于依靠即插即用能力,因而分散控制结构比集中控制结构具有更好的扩展性和开放性。

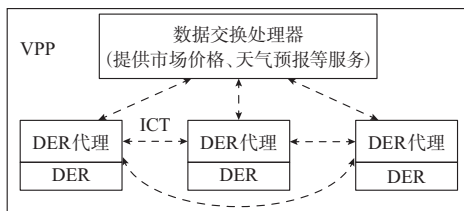


图 3 虚拟电厂的分散控制结构

Fig. 3 Decentralized control structure of VPP

3.2 智能计量技术

智能计量技术是虚拟电厂的一个重要组成部分,是实现虚拟电厂对 DG 和可控负荷等监测和控制的重要基础。智能计量系统最基本的作用是自动测量和读取用户住宅内的电、气、热、水的消耗量或生产量,即自动抄表(automated meter reading, AMR),以此为虚拟电厂提供电源和需求侧的实时信息。作为 AMR 的发展,自动计量管理(automatic meter management, AMM)和高级计量体系(advanced metering infrastructure, AMI)能够远程测量实时用户信息,合理管理数据,并将其发送给相关各方。对于用户而言,所有的计量数据都可通过用户室内网(home area network, HAN)在电脑上显示。因此,用户能够直观地看到自己消费或生产的电能以及相应费用等信息,以此采取合理的调节措施。

3.3 信息通信技术

虚拟电厂采用双向通信技术,它不仅能够接收各个单元的当前状态信息,而且能够向控制目标发送控制信号。应用于虚拟电厂中的通信技术主要有基于互联网的技术,如基于互联网协议的服务、虚拟专用网络、电力线路载波技术和无线技术(如全球移动通信系统/通用分组无线服务技术(GSM/GPRS)、3G 等)。在用户住宅内,WiFi、蓝牙、ZigBee 等通信技术构成了室内通信网络^[13]。

根据不同的场合和要求,虚拟电厂可以应用不同的通信技术。对于大型机组而言,可以使用基于

IEC 60870-5-101 或 IEC 60870-5-104 协议的普通遥测系统。随着小型分散电力机组数量的不断增加,通信渠道和通信协议也将起到越来越重要的作用,昂贵的遥测技术很有可能被基于简单的 TCP/IP 适配器或电力线路载波的技术所取代^[51,53]。在欧盟 VFCPP 项目中,设计者采用了互联网虚拟专用网络技术;荷兰功率匹配器虚拟电厂采用了通用移动通信技术(UTMS)无线网通信技术;在欧盟 FENIX 项目中,虚拟电厂应用了 GPRS 技术和 IEC 104 协议通信技术;德国 ProViPP 的通信网络则由双向无线通信技术构成。

4 虚拟电厂的运行

虚拟电厂最具吸引力的功能在于能够聚合 DER 参与电力市场和辅助服务市场运行,为配电网和输电网提供管理和辅助服务。为实现其最佳效益,进行了诸多研究,例如:文献[54]建立了 DG 和可控负荷参与日前电力市场的运行框架和模型;文献[55]对文献[54]进行了改进;文献[56-57]设计了基于市场运营框架和不同的运行策略;文献[58-59]则提出了虚拟电厂的优化竞价策略;文献[60-61]提出将功率匹配器技术应用于虚拟电厂等。按功能不同,虚拟电厂可划分为两大模块——商业型虚拟电厂(commercial VPP, CVPP)和技术型虚拟电厂(technical VPP, TVPP)^[19,26,51,62],其运行的基本框架如图 4 所示。图中:TSO 表示输电系统操作员。下文将基于此两大模块,对虚拟电厂的运行进行具体阐述。

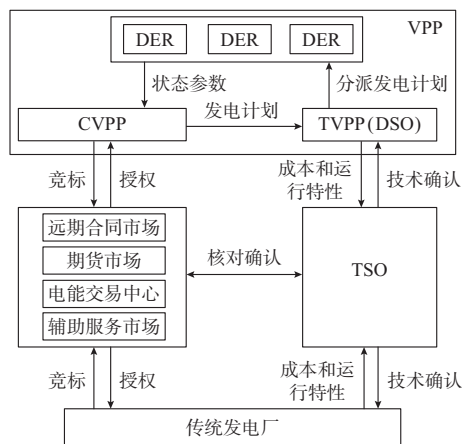


图 4 虚拟电厂运行的基本框架

Fig. 4 Basic operating structure of VPP

4.1 商业型虚拟电厂

商业型虚拟电厂是从商业收益角度考虑的虚拟电厂,是 DER 投资组合的一种灵活表述。其基本功能是基于用户需求、负荷预测和发电潜力预测,制定

最优发电计划,并参与市场竞标。商业型虚拟电厂不考虑虚拟电厂对配电网的影响,并以与传统发电厂相同的方式将 DER 加入电力市场。

图 5 具体说明了商业型虚拟电厂活动的输入与输出^[19]。商业型虚拟电厂投资组合中的每个 DER 向其递交运行参数、边际成本等信息。将这些输入数据整合后创建唯一配置文件,它代表了投资组合中所有 DER 的联合容量。结合市场情报,商业型虚拟电厂将优化投资组合的潜在收益,制定发电计划,并同传统发电厂一起参与市场竞标。一旦竞标取得市场授权,商业型虚拟电厂与电力交易中心和远期市场签订合同,并向技术型虚拟电厂提交 DER 发电计划表和运行成本信息^[26]。

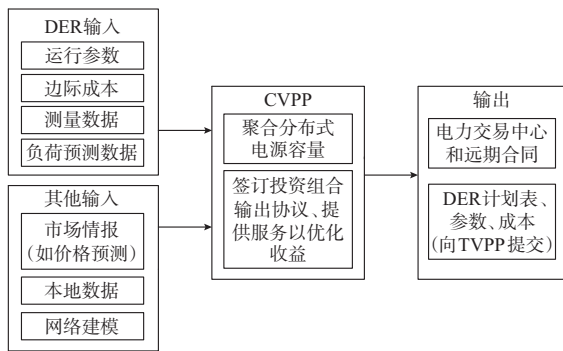


图 5 商业型虚拟电厂的输入与输出
Fig. 5 Input and output of CVPP

商业型虚拟电厂可代表任意数量的 DER,同时 DER 也可以自由选择一个商业型虚拟电厂代表其加入电力市场。商业型虚拟电厂的商业职责可以由许多市场活动者来履行,包括现任能源供应商、独立第三方或新的市场准入者。

4.2 技术型虚拟电厂

技术型虚拟电厂是从系统管理角度考虑的虚拟电厂,考虑 DER 聚合对本地网络的实时影响,并代表投资组合的成本和运行特性。技术型虚拟电厂提供的服务和功能包括为 DSO 提供系统管理、为 TSO 提供系统平衡和辅助服务。

图 6 概括了技术型虚拟电厂活动的输入和输出^[19]。本地网络中,DER 运行参数、发电计划、市场竞价等信息由商业型虚拟电厂提供。技术型虚拟电厂整合商业型虚拟电厂提供数据以及网络信息(拓扑结构、限制条件等),计算本地系统中每个 DER 可作出的贡献,形成技术型虚拟电厂成本和运行特性。技术型虚拟电厂的成本及运行特性同传统发电厂一起由 TSO 进行评估,一旦得到技术确认,技术型虚拟电厂将控制 DER 执行发电计划^[26]。

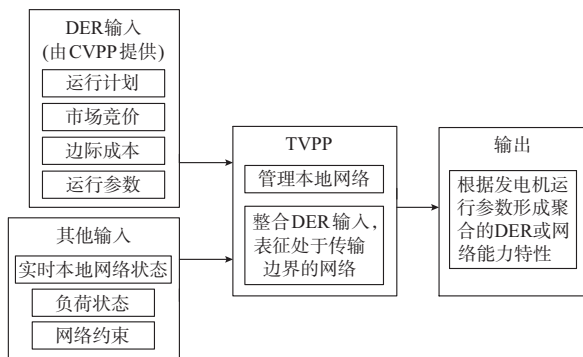


图 6 技术型虚拟电厂的输入和输出
Fig. 6 Input and output of TVPP

技术型虚拟电厂的运行需要本地网络信息和网络控制功能,因此,DSO 是最适合实现技术型虚拟电厂运行的选择。运用技术型虚拟电厂的概念,DSO 也可视为主动配电网操作员,通过使用 DER 提供的辅助服务以优化网络操作。同时,主动配电网操作员可以将这些服务提供给其他系统操作员。商业型虚拟电厂和技术型虚拟电厂的主要功能及虚拟电厂所能提供的辅助服务总结如表 1 所示。

表 1 商业型虚拟电厂和技术型虚拟电厂的主要功能及辅助服务

Table 1 Main functionalities and ancillary services of CVPP and TVPP

商业型虚拟电厂的主要功能	技术型虚拟电厂的主要功能	辅助服务
①聚合分布式发电容量	①本地网络管理	①调节和频率响应
②提交 DER 特性	②确认发电计划表	②电压控制
③发电和负荷预测	③状态监视	③阻塞管理
④制定 VPP 竞价并向市场提交竞价	④资产管理	④能量平衡
⑤优化投资组合收益	⑤故障定位	⑤旋转备用
⑥制定发电计划	⑥数据分析和投资组合优化	⑥补充备用
⑦内部投资组合平衡		⑦事故备用

5 虚拟电厂在中国的发展前景与开展建议

目前,虚拟电厂在中国还是一个崭新的概念,但虚拟电厂的特点符合中国电力发展的需求与方向,在中国有着广阔的发展前景,具体体现在以下几个方面。

1) 虚拟电厂是高效利用和促进新能源和可再生能源发电的有效形式。近年来,中国的新能源和可再生能源发电规模持续快速增长。如前所述,可再生能源发电具有单机容量小、出力具有间歇性和随机性等特点,其单独并网往往会对大电网造成诸多影响。然而,可再生能源发电连同其他 DG 聚合成虚拟电厂的形式参与大电网的运行,通过内部的组

合优化,可消除可再生能源发电对外部系统的间歇性和随机性影响,提高电能质量,实现对可再生能源发电的高效利用。与此同时,开展虚拟电厂将使可再生能源发电从电力市场中获取最大的经济收益,缩短成本回收周期,吸引和扩大对可再生能源发电的投资,从而促进新能源和可再生能源的发展。此外,现行的可再生能源发电工程补贴仅考虑了电量就地消纳的接网工程建设运行费用,没有考虑可再生能源发电远距离送出、送受端电网扩建等因素^[63],不利于可再生能源发电的发展。虚拟电厂的概念强调 DER 对大电网呈现的功能和效用,很大机会上需要进行中、远距离输电。因而,虚拟电厂在中国的开展将对解决这一问题起到重要的促进作用。

2) 虚拟电厂是推动智能电网建设的重要环节。中国《能源发展“十二五”规划》已将大力发展 DER,推进智能电网建设作为推动能源方式变革的重点任务。虚拟电厂的社会经济效益符合智能电网解决能源安全与环保问题,应对气候变化,保证安全、可靠、优质、高效的电力供应,满足经济社会发展对电力多样化需求的总体目标和基本要求。虚拟电厂技术的基础是通信技术、协调控制技术、智能计量技术,这也是智能电网发展所需的关键技术。虚拟电厂的运行方式符合智能电网信息化、自动化、互动化的基本特征。总的来说,虚拟电厂技术的发展对推动中国智能电网的建设具有重要的作用。在未来,虚拟电厂应当成为智能电网的重要组成部分。

3) 虚拟电厂对于完善中国的电力市场体制具有重要的促进作用和指导意义。虚拟电厂的一大重要特征是能够聚合 DER 参与电力市场的运营。电价是电力市场建设的核心问题,而虚拟电厂的盈利正是源于动态电价的激励。虚拟电厂在中国的开展将加快电价由政府定价向政府与市场定价协同并重的转变。在电力市场中,虚拟电厂既具有传统电厂的某些特征,如稳定出力、批量售电,同时又具有特殊性,主要表现在多样化的电能来源。正是由于其多样化的发电资源,虚拟电厂既可参与前期市场、实时市场,又可参与辅助平衡市场。借鉴虚拟电厂参与多种电力市场的运营模式及调度框架,将对完善中国的电力市场体制起到积极的促进和指导作用。

当然,虚拟电厂并非完全适合中国电力工业的现状,针对中国实际情况,对未来开展虚拟电厂提出以下几点建议。

1) 鼓励用户积极参与虚拟电厂。虚拟电厂在中国还是一个崭新的概念,用户及 DG 所有者对其知之甚少。然而,虚拟电厂的实施需要用户及大量私有 DG 的支持,这就要求相关部门积极宣传参与虚

拟电厂的益处,并制定一系列的鼓励机制,从而在不同地区建立虚拟电厂试点项目。

2) 合理规划虚拟电厂的范围及职能。尽管虚拟电厂能够代表不同 DER 所有者的需求并能够为系统提供多种服务,但在中国电力市场并不完善的情况下,为避免管理和调度混乱,应当合理规划虚拟电厂的范围和职能,如在城区等负荷密集地区以可控负荷构成虚拟电厂,作为系统备用,或削减高峰用电;在乡村或郊区,以大规模 DG、储能等构成虚拟电厂,实现对系统的稳定和持续供电。

3) 制定合理的竞争机制和有针对性的政策,完善电力市场运营机制。虚拟电厂与传统电厂的效用基本相同,但发电来源丰富多样。为鼓励新能源和可再生能源发电的发展,中国制定了一系列相应的优惠和补贴政策。一方面,为了避免投机倒把行为以及不必要的购电支出,虚拟电厂的实施应由政府主导,系统调度机构和供电公司负责实施,购电电价应根据虚拟电厂中的可再生能源所占成分区别设定,同时规定可再生能源发电应尽量并网,并进一步完善现行的分时电价办法,鼓励和促进用电高峰时用户节电和 DG 发电。另一方面,应区别对待不同职能的虚拟电厂(如以 DG 尤其是可再生能源发电为主的供电虚拟电厂,以参与前期市场为主,实时市场为辅,辅助服务市场为补充;以可控负荷和少量 DG 为主的备用或平衡虚拟电厂,以参与辅助服务市场为主,实时市场为辅)。

6 结语

虚拟电厂是通过先进通信技术和软件架构,实现地理位置分散的各种 DER 的聚合和协调优化,以作为一个特殊电厂参与电力市场和电网运行的电源协调管理系统。它的概念更多强调的是对外呈现的功能和效果,更新运营理念并产生社会效益,符合中国电力发展的需求与方向。虚拟电厂的协调控制技术实现 DER 的协调优化,以达到对系统高要求的电能输出;虚拟电厂的智能计量技术监测和采集 DER 的参数,是虚拟电厂优化和控制的重要基础;虚拟电厂的通信技术传递数据信息和控制信号,是实现 DER 聚合的关键。虚拟电厂的功能主要包括两大模块,即商业型虚拟电厂模块和技术型虚拟电厂模块,分别考虑虚拟电厂的市场运营和系统管理。虚拟电厂的理念对中国电网的发展具有重要的借鉴意义。目前,虚拟电厂技术尚未达到成熟,很多方面仍需进行深入研究,主要包括:①虚拟电厂的运行框架及对电力市场和系统操作员的影响;②更为合理的控制策略和运行策略的建立;③DER 组合的数学

模型及优化算法;④新通信技术的应用和标准化通信协议的制定;⑤安全性和鲁棒性分析。中国对虚拟电厂的研究处于起步阶段,应当引起工业和学术领域的充分重视。

参考文献

- [1] 梁才浩,段献忠.分布式发电及其对电力系统的影响[J].电力系统自动化,2001,25(12):53-56.
LIANG Caihao, DUAN Xianzhong. Distributed generation and its impact on power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(12): 53-56.
- [2] 王志群,朱守真,周双喜,等.分布式发电对配电网电压分布的影响[J].电力系统自动化,2004,28(16):56-60.
WANG Zhiqun, ZHU Shouzheng, ZHOU Shuangxi, et al. Impacts of distributed generation on distribution system voltage profile [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 56-60.
- [3] 韦刚,吴伟力,胡丹云,等.分布式电源及其并网时对电网的影响[J].高电压技术,2007,33(1):36-40.
WEI Gang, WU Weili, HU Danyun, et al. Distributed generation and effects of its parallel operation on power system [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 36-40.
- [4] 王建,李兴源,邱晓燕.含有分布式发电装置的电力系统研究综述[J].电力系统自动化,2005,29(24):90-95.
WANG Jian, LI Xingyuan, QIU Xiaoyan. Power system research on distributed generation penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 90-95.
- [5] MASHHOUR E, ELAHEH, MOGHADDAS S M. A review on operation of microgrids and virtual power plants in the power markets[C]// The 2nd International Conference on Adaptive Science and Technology, January 14-16, 2009, Accra, Ghana: 273-277.
- [6] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等.微电网研究综述[J].电力系统自动化,2007,31(19):100-107.
LU Zongxiang, WANG Caixia, MIN Yong, et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100-107.
- [7] 王成山,李鹏.分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J].电力系统自动化,2010,34(2):10-14.
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the microgrid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14.
- [8] 李鹏,张玲,王伟,等.微网技术应用与分析[J].电力系统自动化,2009,33(20):109-115.
LI Peng, ZHANG Ling, WANG Wei, et al. Application and analysis of microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 109-115.
- [9] 杨艳红,裴玮,齐智平.基于动态运行策略的混合能源微网规划方法[J].电力系统自动化,2012,36(19):30-36.
YANG Yanhong, PEI Wei, QI Zhiping. Planning method for hybrid energy microgrid based on dynamic operation strategy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 30-36.
- [10] 丁明,罗魁,毕锐.孤岛模式下基于多代理系统的微电网能量协调控制策略[J].电力系统自动化,2013,37(5):1-8.
DING Ming, LUO Kui, BI Rui. An energy coordination control strategy for islanded microgrid on a multi-agent system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 1-8.
- [11] ASMUS P. Microgrids, virtual power plants and our distributed energy future[J]. The Electricity Journal, 2010, 23(10): 72-82.
- [12] 尤毅,刘东,于文鹏,等.主动配电网技术及其进展[J].电力系统自动化,2012,36(18):10-16.
YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.
- [13] YOU S. Developing virtual power plant for optimized DG operation and integration[D]. Denmark; Technical University of Denmark, 2010.
- [14] YOU S, TRAEHOLT C, POULSEN B. Generic virtual power plants; management of distributed energy resources under liberalized electricity market[C]// The 8th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSOM 2009), November 8-11, 2009, Hong Kong, China: 1-6.
- [15] 王成山,李鹏.2011年国际供电会议系列报道:分布式能源发展与用户侧电能的高效利用[J].电力系统自动化,2012,36(2):1-5.
WANG Chengshan, LI Peng. A review of CIRED 2011 on development of distributed energy resources and energy efficiency improvement on customer side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 1-5.
- [16] NIKONOWICZ L, MILEWSKI J. Virtual power plant general review: structure, application and optimization[J]. Journal of Power Technologies, 2012, 92(3): 135-149.
- [17] European virtual fuel cell power plant management summary report[EB/OL]. [2012-08-13]. <http://ec.europa.eu/energy/efficiency/industry/doc/euvpp.pdf/>.
- [18] ROOSSEN B, HOMMELBERG M, WARMER C, et al. Virtual power plant field experiment using 10 micro-CHP units at consumer premises [C]// CIRED Seminar 2008: Smart Grids for Distribution, June 23-24, 2008, Frankfurt, Germany: 1-4.
- [19] FENIX. Flexible electricity network to integrate expected "energy solution" [EB/OL]. [2012-05-20]. <http://www.fenix-project.org/>.
- [20] SABOORI H, MOHAMMADI M, TAGHE R. Virtual power plant (VPP), definition, concept, components and types[C]// 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, March 25-28, 2011, Wuhan, China: 1-4.
- [21] MORAIS H, KADAR P, CARDOSO M, et al. VPP operating in the isolated grid [C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, July 20-24, 2008, Pittsburgh, PA, USA: 1-6.
- [22] SCHULZ C, RÖDER G, KURRAT M. Virtual power plants with combined heat and power micro-units[C]// International

- Conference on Future Power Systems, November 16-18, 2005, Amsterdam, the Netherlands; 1-5.
- [23] SCHULZ C. Business models for distribution power generation with combined heat and power micro-unit [C]// The 3rd International Conference on the European Electricity Market, May 24-26, 2006, Warsaw, Poland; 1-8.
- [24] BIGNUCOLO F, CALDON R, PRANDONI V, et al. The voltage control on MV distribution networks with aggregated DG units (VPP) [C]// Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference, September 6-8, 2006, Newcastle Gateshead, UK; 187-192.
- [25] MORAIS H, CARDOSO M, CASTANHEIRA L, et al. VPP information needs for effective operation in competitive electricity markets [C]// International Conference on Industrial Informatics, July 23-26, 2007, Vienna, Austria; 1183-1188.
- [26] PUDJANTO D, RAMSAY C, STRBAC G. Virtual power plant and system integration of distributed energy resources [J]. *IET Renewable Power Generation*, 2007, 1(1): 10-16.
- [27] BRAUN M, STRAUSS P. A review on aggregation approaches of controllable distributed energy units in electrical power systems [J]. *International Journal of Distributed Energy Resources*, 2008, 4(4): 297-319.
- [28] 姜海洋, 谭忠富, 胡庆辉, 等. 用户侧虚拟电厂对发电产业节能减排影响分析 [J]. *中国电力*, 2010, 43(6): 37-40.
JIANG Haiyang, TAN Zhongfu, HU Qinghui, et al. Action analysis of nominal power plants on energy saving and emission controlling of power industry [J]. *Electric Power*, 2010, 43(6): 37-40.
- [29] 周景宏, 胡兆光, 田建伟, 等. 含能效电厂的电力系统生产模拟 [J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(18): 27-31.
ZHOU Jinghong, HU Zhaoguang, TIAN Jianwei, et al. Power system production simulation including efficiency power plant [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(18): 27-31.
- [30] 谭显东, 胡兆光, 彭谦. 考虑能效电厂的供需资源组合优化模型 [J]. *电网技术*, 2009, 33(20): 108-112.
TAN Xiandong, HU Zhaoguang, PENG Qian. A resource combination optimization model considering efficiency power plant [J]. *Power System Technology*, 2009, 33(20): 108-112.
- [31] KUZLE I, ZDRILIC M, PANDZIC H. Virtual power plant dispatch optimization using linear programming [C]// The 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), May 8-11, 2011, Rome, Italy; 1-4.
- [32] ZDRILIC M, PANDZIC H, KUZLE I. The mixed-integer linear optimization model of virtual power plant optimization [C]// The 8th International Conference on the European Energy Market (EEM), May 25-27, 2011, Zagreb, Croatia; 467-471.
- [33] HROPKO D, IVANECKY J, TURCEK J. Optimal dispatch of renewable energy sources included in virtual power plant using accelerated particle swarm optimization [C]// 2012 ELEKTRO, May 21-22, 2012, Rajec Teplice, Slovakia; 196-200.
- [34] 张小敏. 虚拟发电厂在大规模风电电网中的应用 [J]. *电力建设*, 2011, 32(9): 11-13.
- ZHANG Xiaomin. Application of virtual power plant on large-scale wind power grid integration [J]. *Electric Power Construction*, 2011, 32(9): 11-13.
- [35] SHROPSHIRE D, PURVINS A, PAPAIOANNOU I, et al. Benefits and cost implications from integrating small flexible nuclear reactors with off-shore wind farms in a virtual power plant [J]. *Energy Policy*, 2012, 46: 558-573.
- [36] KWANE A, TUOHY A, MEIBOM P, et al. Demand side resource operation on the Irish power system with high wind power penetration [J]. *Energy Policy*, 2011, 39: 2925-2934.
- [37] HAUSSMANN W B, ERGE T, WITTEW C. Decentralized optimization of cogeneration in virtual power plant [J]. *Solar Energy*, 2010, 84: 604-611.
- [38] GONG Jinxia, XIE Da, JIANG Chuanwen, et al. Multiple objective compromised method for power management in virtual power plants [J]. *Energies*, 2011, 4(4): 700-716.
- [39] PERFUMO C, KOFMAN E, BRASLAVSKY H J, et al. Load management: model-based control of aggregate power for populations of thermostatically controlled loads [J]. *Energy Conversion and Management*, 2012, 55: 36-48.
- [40] GALUS M D, KOCN S, ANDERSSON G. Provision of load frequency control by PHEVs, controllable loads, and a cogeneration unit [J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2011, 58(10): 4568-4582.
- [41] RUIZ N, COBELO I, OYARZABAL. A direct load control model for virtual power plant management [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2009, 24(2): 959-966.
- [42] WANG D, PARKINSON S, MIAO W, et al. Online voltage security assessment considering comfort-constrained demand response control of distributed heat pump systems [J]. *Applied Energy*, 2012, 96: 104-114.
- [43] PARKINSON S, WANG D, CRAWORD C, et al. Comfort-constrained distributed heat pump management [J]. *Energy Procedia*, 2012, 14: 849-855.
- [44] WANG D, PARKINSON S, MIAO W, et al. Hierarchical electricity market-integration of disparate responsive load groups using comfort-constrained load aggregation as spinning reserve [J]. *Applied Energy*, 2013, 104: 229-238.
- [45] MIAO W, JIA H, WANG D, et al. Active power regulation of wind power system through demand response [J]. *Science China: Technological Sciences*, 2012, 55(1): 1667-1676.
- [46] PARKINSON S, WANG D, CRAWORD C, et al. Wind integration in self-regulating electric load distributions [J]. *Energy Systems*, 2012, 3(4): 341-377.
- [47] WILLIAMS T, WANG D, CRAWORD C, et al. Integrating renewable energy using a smart distribution system: potential of self-regulating demand response [J]. *Renewable Energy*, 2013, 52: 46-56.
- [48] BINDING C, GANTENBEIN D, JANSEN B, et al. Electric vehicle fleet integration in the Danish EDISON project—a virtual power plant on the island of Bornholm [C]// Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, USA; 1-8.
- [49] RAAB A F, FERDOWSI M, UNDA I G, et al. Virtual power plant control concepts with electric vehicles [C]// International

- Conferences on Intelligent System Application to Power Systems, September 25-28, 2011, Athens, Greece: 1-6.
- [50] EL B K, KLING L W. Development and operation of virtual power plant system[C]// The 2nd International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT Europe), December 5-7, 2011, Manchester, UK: 1-5.
- [51] 季阳. 基于多代理系统的虚拟发电厂技术及其在智能电网中的应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [52] RAHIMI K A, GHASEMI H, ALIZADEH B. Optimal operation of a virtual power plant with risk management[C]// IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, January 20-26, 2012, Washington, USA: 1-7.
- [53] SUCIC S, DRAGICEVIC T, CAPUDER T, et al. Economic dispatch of virtual power plants in an event-driven service-oriented framework using standards-based communications[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(12): 2108-2119.
- [54] BEHNKE P R, CERDA L J, VARGAS S L, et al. A distribution company energy acquisition market model with integration of distributed generation and load curtailment options[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(4): 1718-1727.
- [55] LI Haiying, LI Yupeng, LI Zuyi. A multiperiod energy acquisition model for a distribution company with distributed generation and interruptible load[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(2): 588-596.
- [56] YOU S, TRAEHOLT C, POULSEN B. A market-based virtual power plant[C]// International Conference on Clean Electrical Power, June 9-11, 2009, Capri, Italy: 460-465.
- [57] DIMEAS A L, HATZIARGYRIOU N D. Agent based control of virtual power plant [C]// International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, November 5-8, 2007, Toki Messe, Niigata: 1-6.
- [58] MASHHOUR E, TAFRESHI M S. Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets: Part one problem formulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(2): 949-956.
- [59] HEREDIA F, RIDER J M, CORCHERO C. Optimal bidding strategies for thermal and generic programming units in the day-ahead electricity market [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(3): 1504-1518.
- [60] KOK K J, WARMER J C, KAMPHUIS G I. Power matcher: multiagent control in the electricity infrastructure [C]// Proceedings of the 4th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2005, New York, NY, USA: 75-82.
- [61] KOK K J, WARMER J C, KAMPHUIS G I. The power matcher: multiagent control of electricity demand and supply [J]. IEEE Intelligent Systems, 2006, 21(2): 89-90.
- [62] KIENY C, BERSENEFF B, HADJSAID N, et al. On the concept and the interest of virtual power plant: some results from the European project FENIX [C]// IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, Canada: 1-6.
- [63] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

卫志农(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统运行分析与控制、输配电系统自动化等。E-mail: wzn_nj@263.net

余爽(1991—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:新能源接入。E-mail: hhuyushuang@gmail.com

孙国强(1978—),男,博士,副教授,主要研究方向:电力系统及其新型输电的分析与控制。E-mail: hhusunguoqiang@163.com

(编辑 孔丽蓓)

Concept and Development of Virtual Power Plant

WEI Zhinong¹, YU Shuang¹, SUN Guoqiang¹, SUN Yonghui¹, YUAN Yang¹, WANG Dan²

(1. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

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

Abstract: The definitions of the virtual power plant (VPP) in different literature are given first after analyzing the background of the emergence of VPP, and the nuclear concept of VPP is distilled. Accordingly, a comparison between VPP and microgrid is made with reference to relevant researches. The key technical know-how of VPP are discussed systematically, which includes coordinated control, smart metering and information and communication skills. Depending on the differences in functions, VPP is then divided into two major modules, the commercial VPP (CVPP) and the technical VPP (TVPP), based on which the operating structure of VPP is elaborated. Then, with the status quo of China's power systems taken into account, the developing potentials and suggestions for further advances of VPP in China are discussed. Finally, some future research directions are envisaged.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277052, No. 51107032, No. 61104045).

Key words: distributed generators; distributed energy resources; virtual power plant; microgrid