

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.007

社区型能源互联网下的虚拟电厂参与 电力市场策略分析

唐虎¹, 陈爱伦¹, 崔浩², 冯政松¹, 张甦¹, 陈琨¹

(1. 国网四川省电力公司德阳供电公司, 德阳 618000; 2. 国网湖北省电力公司襄阳供电公司, 襄阳 412000)

摘要: [目的]为了减少风能和太阳能为代表的 DERs 产能间歇性、随机性、不可控的影响, 以及参与电力市场竞争出现不利因素, 提出了社区型能源互联网模型。[方法]考虑了由风电场、光伏电站和负荷组成的虚拟电厂 (virtual power plant, VPP) 集群所构成的社区型能源互联网模型, 将单 VPP 进行互联, 在满足单 VPP 内部供需平衡基础上, 将盈余电量通过 VPP 集群进行博弈共享, 最后与电力市场进行交易, 实现逆向售电。[结果]模型实现了社区型能源互联网利益最大化目标, 同时加上需求响应 (demand response, DR) 实现用户节约使用电费的目的。[结论]通过社区能源互联网示范工程, 提出适合 VPP 运行策略模型, 通过建立的收益在不同场景下验证发用电策略的可行性, 为社区能源互联网的建设及交易指明方向。

关键词: 虚拟电厂; 需求响应; 电价; 社区能源互联网

中图分类号: TM7

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)03-0040-08

Strategy Analysis of Virtual Power Plants Participation in Electric Power Market with Community Energy Internet

TANG Hu¹, CHEN Ailun¹, CUI Hao², FENG Zhengsong¹, ZHANG Su¹, CHEN Kun¹

(1. Deyang Power Supply Company of State Grid Sichuan Electric Power Company, Deyang 61800, China;
2. Xiangyang Power Supply Company of State Grid Hubei Electric Power Company, Xiangyang 41200, China)

Abstract: [Introduction] The paper aims to reduce the intermittent, random, uncontrollable effects of DERs capacity represented by wind and solar energy, and to participate in the competition in the power market, a community-based energy Internet model is proposed. [Method] Considering a community-based energy Internet model consisting of a virtual power plant (VPP) cluster consisting of a wind farm, a photovoltaic power station, and a load, interconnecting a single VPP, and based on the balance of supply and demand within a single VPP, the surplus power game sharing through VPP clusters, and finally trading with the electricity market to achieve reverse sales. [Results] The results we obtained demonstrate that the goal of maximizing the benefits of community-based energy Internet, and adding demand response (DR) to achieve the purpose of saving electricity for users. [Conclusion] This work through the community energy Internet demonstration project, the VPP operation strategy model is proposed, and the feasibility of verifying the power generation strategy in different scenarios is established through the established benefits, which indicates the direction for the construction and transaction of the community energy Internet.

Key words: virtual power plant (VPP); demand response (DR); power price; community energy internet

过去的半个多世纪, 世界能源消耗总量从 1965 年的 53 亿吨标准煤增加到 185 亿吨标准煤, 而这其中化石能源的消耗比重尤为突出。化石能源在生

产、运输、使用的各个环节都将对环境造成污染。解决环境问题成为重中之重, 各国电力研究学者也在积极探索新的能源供应形势, 清洁可再生能源也逐步受到青睐, 特别对目前泛在电力物联网的建设来说尤为重要^[1]。

新形势下的智能电网以分布式可再生能源为主要的能源形式,而分布式可再生能源因其间歇、随机性等缺点制约其发展,目前较多的是采用微网对地理位置相近的能源、负荷进行统一管理,以解决大电网和 DERs 间的技术问题。而微电网通常以分布式能源为主要能源形式,因地域限制多采用就地消纳,对于不同地区、不同规模的 DERs 的有效利用和参与市场运营也无法实现^[3]。不少文献对微网有很详细的研究,文献[4]的微网是解决大规模 DERs 并网在技术上、市场上的问题,以发挥其在经济、能源和环境中的优势,实现供电可靠性的需求;文献[5]的微网作为 DREs 的并网形式,能较好的协调 DG 与大电网的矛盾。DG 因其容量小,对大电网来说是不可见的,甚至是不可控的,致使其无法参与市场交易。基于上述问题,本文提出虚拟电厂(virtual power plant, VPP)为上述问题提供了有效的解决方案。虽 VPP 和微网在 DG 的运用上有诸多相似之处,但其也呈现出诸多区别,如文献[6]所示。然而这些文献都没有考虑在满足自身需求的情况下与外部进行交易,同时对于不同的博弈模型也未作具体研究。

本文在上述研究的基础上,提出在社区能源互联网环境下,考虑了不同 VPP 下能源自用、共享和电网交互,用户可以选择购用所属地区的 VPP 能源,多余电能可以在不同 VPP 间进行共享,最后与电力市场进行交互。在三步制电价基础上,电力用户合理安排其可参与需求响应用电计划。鉴于此,本文提出 VPP 博弈模型,其目标是最大化社会福利。通过实际算例仿真,验证了模型和算法的有效性。同时为解决我国分布式能源有效利用提供了一个很好的途径,对推动社区能源互联网的发展起到了积极作用,并有可观的运用前景。

1 VPP 的概述

VPP 与传统电厂的区别在于,前者聚合多种不同形式的发、用电单元,更加趋向于微型化、智能化,同时分布区域不在局限。目前对 VPP 的研究仍处于一个假想阶段,没有一个国际化的统一定论,基本的构成元素如图 1 所示,发电单元、储能、负荷等运用先进技术(控制协调技术、信息通信技术、智能计量技术等)聚合在一起协调运行,并参与到电力市场和电力辅助服务市场中^[7]。

对于 VPP 的研究项目主要集中在欧洲和北美,据 Pike Research 公布的数据显示截至 2011 年底,全球的总装机容量突破 55.6 GW^[8]。根据不同的地域形式,欧洲和北美对 VPP 的应用研究体现出不同的形式,同时对于北美和欧洲的各国也各有侧重点。以欧盟为代表的欧洲 VPP 项目重点研究 VPP 中 DG 的并网及参与市场交易;以美国为代表的北美 VPP 项目重点研究 VPP 的 DR 计划及能源利用效率。

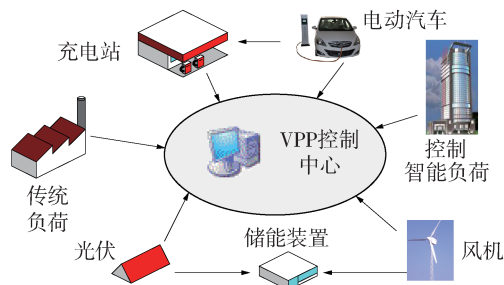


图 1 VPP 组件示意图

Fig. 1 Sketch of VPP components

2 不确定因素分析

2.1 电力负荷

电力负荷预测是配电网规划的前提和基础,是电力系统安全、经济运营的重要保障,也是电力市场安排供电、交易、调度计划的基本依据^[9]。传统的电力负荷预测依赖于供电公司提供的行业用电统计报表,这些数据资料的实时性和正确性较差,使得进行电力负荷预测较为粗糙。《全球能源互联网》中分布式可再生清洁能源在发电中所占的比例将呈现逐步增长的趋势,并加上 VPP 中电力生产、消费和电力市场联系越来越紧密,因而对负荷预测的精确性、可靠性、实时性的要求日趋苛刻^[10]。对于原有的配电网负荷预测已经不能适应现阶段能源互联网与 VPP 下新型负荷和 DERs 的影响,此部分采用适合于 VPP 的概率型负荷预测方法,得出负荷预测值^[11]。

2.2 供电单元

随着光伏发电成本不断下降,我国光伏发电产业呈现逐步增长的态势,然而光伏发电短期出现的不确定性和间歇性给 VPP 系统的调度和运营带来不可估量的风险,一般采用确定性方法对光伏发电进行预测,然而这种方法不能准确表示各种情况下光

发电的出力情况,因此对光伏发电的有效预测可以有效缓解其对 VPP 的影响^[12]。根据实时自然条件因素影响及光伏发电自身因素,建立光伏发电系统的功率输出模型^[13],可以得到太阳能光伏发电的预测出力曲线 P_{PV} 。

风力发电是目前 DERs 发电中最具规模和技术最为成熟的发电方式之一,以清洁风能为发电资源,得到各国积极开发和利用。然而风力资源因不同的自然环境条件使得风力发电不能持续、稳定的输出电能,因而对风力发电功率 P_w 的输出预测具有非常重要的意义^[14]。

2.3 电价

市场化交易中电力作为特殊商品逐步实现自由交易,价格也会随机波动。因 VPP 内部能源属于不可控微源,在不同时期发电量会发生变化,并且对于 VPP 内部负荷用电存在竞争,本文波动电价涉及到单 VPP 内部售电电价、VPP 间交易电价和社区能源互联网与电力市场交易电价。鉴于此根据本文建立的特殊模型构造具有一定意义的三部制电价函数且各部分电价相互间不受影响,以此来更加准确、直接和有效的反应供需关系,第一步电价由 VPP 内部负荷和电力供应商同时报价,由报价低高逐一成交,最终由成交的电力满足负荷需求的最后一个电能供应者的报价为最终交易电价;第二步电价由 VPP 集群间的合作博弈来确定;第三阶段同电力市场签订供用电协议来确定^[15]。

3 社区型能源互联网简化模型

因单个光伏(风力)发电机对大电网的不可见性无法独自参与市场运行,本文将光伏(风力)发电机连同储能电池、负荷等组成的单 VPP 系统,并由能量管理系统(Energy Management System, EMS)进行统一协调管控,如图 2 所示。考虑元素包括 VPP、电力市场。对于单 VPP 系统而言,其构造形式也各不相同,基本上都包含微型发电单元(光伏发电或风力发电)、负荷(可中断负荷、可平移负荷、不可中断负荷)、储能(蓄电池、电动汽车)。VPP 供电策略包括第一阶段单 VPP 内部供需平衡,第二阶段 VPP 集群间互补供电,第三阶段 VPP 集群组成的社区能源互联网与电力市场进行交互,实现逆向售电,不同阶段间的协调配合旨在获得最大利润。

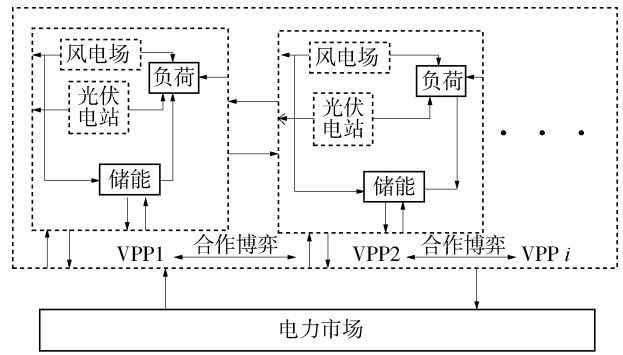


图 2 VPP 构成元素及能量流通示意图

Fig. 2 Sketch of VPP constitute elements and energy flow

3.1 用户需求响应模型

需求响应(Demand Response, DR)主要是指电网中以电力批发市场为导向的消费行为,电力用户在和供电方签订 DR 协议,在接受补偿情况下改变自身原有用电行为协助供电方削峰填谷^[16]。根据美国能源部的一份报告,将需求响应明确定义为基于价格的需求响应和基于激励的需求响应两种基本形式^[17]。为达到削峰填谷和负荷平衡的目的,在用电低谷时用电价格将低于平时用电价格,反之亦然。为刺激电力消费,根据 DR 将转移部分高峰电力负荷到低谷,但负荷总量不发生变化:

$$X_q^t = L^t + \alpha_u^t \cdot L_u^t - \alpha_d^t \cdot L_d^t, t \in (0, T) \quad (1)$$

$$\sum_{t \in T} X_q^t = \sum_{t \in T} L^t \quad (2)$$

$$\alpha_u^t + \alpha_d^t \leq 1 \quad (3)$$

$$0 \leq L_u^t \leq \varepsilon_u^t \cdot L^t \quad (4)$$

$$0 \leq L_d^t \leq \varepsilon_d^t \cdot L^t \quad (5)$$

式中: L^t 为负荷在 t 时刻的实时预测值; α_u^t , α_d^t 为二进制数; L_u^t , L_d^t 为基于价格需求响应的转移负荷; X_q^t 为 t 时刻转移负荷后的新负荷值; ε_u^t , ε_d^t 为负荷转移上下限。

在 VPP 中,负荷大小及其分布位置可由 EMS 进行预测分析,不同类型的负荷拥有不同的负荷特性,同时负荷又参与到基于价格的需求响应,对于 VPP 中各用户的需求响应前后的平均功率模型为:

$$L_i = [L_i^1, L_i^2, \dots, L_i^t] \quad (6)$$

$$X_{qi} = [X_{qi}^1, X_{qi}^2, \dots, X_{qi}^t] \quad (7)$$

3.2 VPP 供电单元模型

组成 VPP 中供电电源受 EMS 统一调度管理,且互不影响,但对于不稳定微电源来说无法保证对外表现为线性,因太阳能和风能在时间和空间上有

一定的互补性,聚合 VPP 时加上储能装置,有望对外输出恒定电能。VPP 能量管理系统来确定内部元件光伏、太阳能的发电曲线和储能装置充放电行为,对于 VPP 中各供电单元模型为:

$$P_i = [P_{PVi}^1, P_{PVi}^2, \dots, P_{PVi}^i; P_{Wi}^1, P_{Wi}^2, \dots, P_{Wi}^i; P_{ESi}^1, P_{ESi}^2, \dots, P_{ESi}^i] \quad (8)$$

对于不同模型下的供用电模型:

$$P_E^t = \sum_{i \in N} (L_i^t - P_i^t) \quad (9)$$

$$P_E^t = \sum_{i \in N} (X_{qi}^t - P_i^t) \quad (10)$$

式中: $P_i^t = \sum_{i \in n} (P_{PVi}^t + P_{Wi}^t + P_{ESi}^t)$ 为 t 时刻 VPP i 的供电电量值。其中,若 $P_{ES} > 0$ 表示储能装置放电,可看做电源; $P_{ES} < 0$ 表示储能装置正在充电,可看做负荷。同时对于 VPP 用户集群,若 $P_E < 0$ 表示 VPP 群的电量有剩余,可出售给电网; $P_E > 0$ 表示 VPP 群的电力供应不能满足其基本需求,需要向大电网购电的电量。

VPP 内部发电单元发电的间歇性和用户电力需求的不确定性,使得 VPP 的供电模式在先满足自身需求的同时,并同其他 VPP 进行能量的交互,来弥补用电缺额,在所有 VPP 能量交互后仍不能满足的情况下,由大电网提供。不仅有助于 VPP 的自主运行,减少对大电网的依赖,同时对于 VPP 之间的能量交互可以减少输电线路上的能量损耗。

3.3 电力市场

电力市场的决策变量是实时电价序列,一方面,电力市场同 VPP 签订购售电合同,电力市场以一定的价格接受社区能源互联网的多余电量;另一方面,电力市场在社区能源互联网供电量不足以支撑内部需求时以某一价格售出电量。这里假设电力市场足够大,有足够的购买(出售)电量,这里假设 VPP 中的供电单元优先选择内部用户供电。对于电力市场的定价问题要同时兼顾用户和自身利益,过高的市场价格可能导致用户减少自身用电计划,过低的市场电价导致自身利益得不到保障。同时又有 VPP 多余的电量被电力市场收购的电价小于电力市场出售的电价。

4 社区能源互联网市场交易分析

4.1 目标函数

VPP 系统中电力用户所有用电首先从 VPP 自

身中获得,在 VPP 的供电需求仍不能满足的情况下同 VPP 集群通过竞价博弈获得,最后产生的盈余差额由电力市场供给。VPP 中装备的分布式可再生能源系统,利用气候变化和日照变化的差异产生能源,以供用户使用。本文构建的 VPP 系统不仅在经济利益、社会利益、环境利益有着不可估量的作用,并且为目前提倡的社区能源互联网的构建提供了可靠的经济依据。

4.1.1 单 VPP 内部优化问题

单 VPP 的决策变量是边际电价序列 $[p_{i}^t]$, 对于 $\forall t$ 的 VPP 决策模型为:

$$R^t = \sum_{i \in T} \sum_{i \in N} p_{i}^t P_{i}^t - \xi_i L_{zi}^t \quad (11)$$

式中:单 VPP 的总收入由两部分构成。第一部分是基于用户满意度和电力需求模式下的 VPP 售电收入;第二部分为基于需求响应下对用户舒适度和满意度的补偿,其中为 VPP i 用户 i 对舒适度和满意度敏感系数。

约束条件

1) 储能单元约束

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in N} P_{ESi}^t \cdot \Delta t = 0 \quad (12)$$

$$E_{imin} \leq E_{ESi}^0 + \sum_{t=1}^T P_{ESi}^t \cdot \Delta t \leq E_{imax} \quad (13)$$

$$E_{ESi}^t = E_{ESi}^{t-1} - P_{ESi}^{d,t} + \zeta \cdot P_{ESi}^{c,t} \quad (14)$$

$$E_{ESi}^0 = E_{ESi}^{init} \quad (15)$$

$$-P_{imax}^c \leq P_{ESi}^t \leq P_{imax}^d \quad (16)$$

式中: E_{max} 、 E_{min} 为储能装置的储能上、下限; E_{ES}^0 为初始储能;为简化,本文假设所有的储能设备都具有同样的物理特性。

2) 用户需求响应约束

为满足用户舒适度和满意度要求,对参加需求响应的负荷除给予一定的激励补偿外,同时应满足在连续响应时间约束内,避免同一用户负荷处于高度的调用状态^[15]。

$$0 \leq \frac{L_{zi}^t}{L_i^t} \leq \eta_{max} \quad (17)$$

$$0 \leq \frac{L_{zi}^t}{L_i^t} + \frac{L_{zi}^{t+1}}{L_i^{t+1}} \leq \eta_{max}^c \quad (18)$$

式中: η_{max} 为电力用户负荷最大调用率,通常取 3%; η_{max}^c 为电力负荷连续时间调用率的最大值,取值为 5%。

3) 功率平衡约束

$$P'_{PVi} \leq P'_{PVi}{}^{\max}; P'_{Wi} \leq P'_{Wi}{}^{\max} \quad (19)$$

$$P' \leq P_{PV, \max} + P_{W, \max} + P_{ES, \max} \quad (20)$$

上述不等式中, (19)为光伏发电和风力发电最大功率约束; (20)为组成VPP元件最大供能约束。

4) VPP及网络输电容量约束

$$S_{ij} \leq S_{ij}{}^{\max} \quad (21)$$

式中: S_{ij} 为任意支路*i, j*的电力输送容量; $S_{ij}{}^{\max}$ 为任意支路*i, j*的最大电力输送容量。

4.1.2 VPP电能共享模型

针对4.1.1所介绍的单VPP供电情况, 可以将内部优化后的VPP看作供电单元或负荷。其优化后所构成的集群模型采用合作博弈的方法来确定能源消耗调度策略。VPP电能共享模型所构成的智能用电博弈模型为:

1) 博弈方: 优化后的VPP集群。

2) 行为空间: VPP集群的供用电安排计划和内部交易电价制定。

3) 报酬函数: VPP集群的报酬函数

$$R^2 = R_i(L_i; L_{-i}) = \sum_{t \in T} L_i^t \cdot p_{r2}^t \quad (22)$$

式中: $L_i \geq 0$ 表示VPP_{*i*}等同负荷看待; $L_i < 0$ 表示VPP_{*i*}等同供电单元看待; $L_{-i} \triangleq [L_1, \dots, L_{i-1}, L_{i+1}, \dots, L_N]$ 表示除VPP_{*i*}以外的其他VPP的供用电计划。

根据VPP内部优化后的报价 pr_2 , VPP将根据智能仪表之间的信息交流调整其供用电计划, 从而达到集群利润最优。本部分将根据VPP间的合作博弈理论给出一种能源消耗调度策略。对于社区能源互联网有内部单VPP为负荷或供电单元情况, 在VPP内部进行电能共享, 多余电量卖给电力市场, 不足电量从大电网中购得。

同时, 可实现高于市场上网电价售电, 低于市场购电电价购电。基于上述博弈模型, 在第二阶段策略和收益函数中, 所有VPP供用电将参与到博弈中来使博弈收益最优, 直到达到博弈纳什均衡点:

$$R_i(L_i^*; L_{-i}^*) \geq R_i(L_i; L_{-i}^*), \forall i \in N \quad (23)$$

表明: 在该博弈达到均衡时, 组成单元对其供用电策略进行变更均不会影响其收益情况。

4.1.3 社区型能源互联网与电力市场

社区能源互联网的建立将传统电力市场从垄断模式向自由开放模式转变, 使得社区型能源互

联网下的VPP能合理有效的参与电力市场, 为了简化本模型, 本文建立的经过二级优化后的VPP模型, 在日前市场与电力市场签订供用电合同, 根据合同在发生供用电缺额时可以直接和电力市场进行交互, 其价格将按照合同电价收购和卖出。式中, 收益函数为VPP和电力市场签订供用电交易合同获得的收入以及不满足合同的供用电补偿, pr_{31} 、 pr_{32} 为社区能源互联网与电力市场交易签订的售电电价、不满足合同的补偿电价, 有 $pr_{32} = 1.2 pr_{31}$, P^{-t} 、 L^{-t} 为社区能源互联网与电力市场签订的供用电合同。

$$R^3 = \sum_{t \in T} p_{r31}^t \cdot P_3^t - \sum_{t \in T} p_{r32}^t \cdot [(P^{-t} - P_3^t) + (L_3^t - L^{-t})] \quad (24)$$

对于社区型能源互联网的整体收益函数可以综合(11)(22)(24)得:

$$\max \sum_{j=1}^3 R^j \quad (25)$$

对于上述收益函数特有约束条件:

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} \sum_{k=1,2,3} p_{ki}^t P_{ki}^t - \xi_i L_{-i}^2 \quad (26)$$

$$P'_{1i} + P'_{2i} + P'_{3i} \leq P'_i \quad (27)$$

5 算例分析

5.1 基础数据

为验证上述模型, 本文选取德阳市旌阳区由VPP集群构成的社区能源互联网。算例中考虑1个电力市场和4种VPP结构, 同时以某典型日来研究所提模型的有效性。

算例中4种类型VPP分布如下: VPP1有光伏发电系统(150 MW)、风力发电系统(100 MW)、负荷(可转移和不可转移289.5 MW); VPP2有光伏发电系统(100 MW)、负荷(可转移和不可转移210.3 MW); VPP3有风力发电系统(100 MW)、负荷(可转移和不可转移190 MW); VPP4有光伏发电系统(150 MW), 不同VPP负荷预测情况如图3所示。

5.2 场景划分

对于由不同元件组成的VPP所构成的社区型能源互联网来参与电力市场, 本文构建4种不同场景对社区性能能源互联网参与电力市场进行研究, 不同场景间即相互独立, 同时也互相关联, 基于以上研究本文设置如表1所示场景。

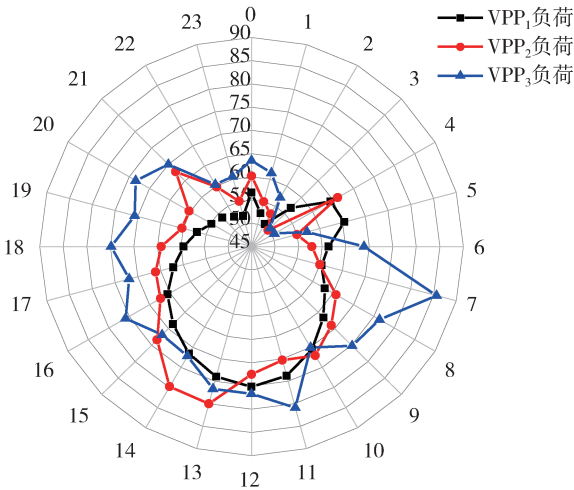


图3 VPP 负荷预测值 (单位: MW)

Fig. 3 Load forecast of VPP (Unit: MW)

表1 场景划分

Tab. 1 Scenario setting

| 场景 | 需求响应 | 博弈 | 场景 | 需求响应 | 博弈 |
|----|------|----|----|------|----|
| 1 | × | × | 3 | √ | × |
| 2 | × | √ | 4 | √ | √ |

注: 上述表格中“√”表示参与需求响应/参与博弈; “×”表示不参与需求响应/博弈。

5.3 结果及讨论

对于4节所介绍的社区能源互联网针对不同场景下的调度策略如图3所示, 收益情况如表2所示。

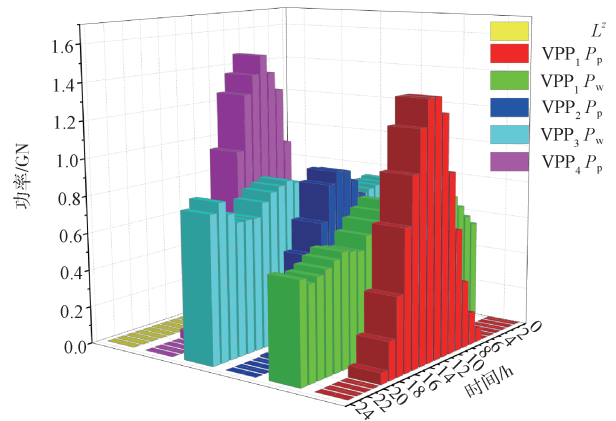
根据负荷转移约束条件, 以及用户舒适度和满意度需求, 其可转移负荷最大量如图场景3、4(a)所示。针对本社区能源互联网下的VPP实际系统而言, 对于不同VPP的负荷转移情况优化结果如图场景3、4(b)所示。

表2 不同场景下调度收益

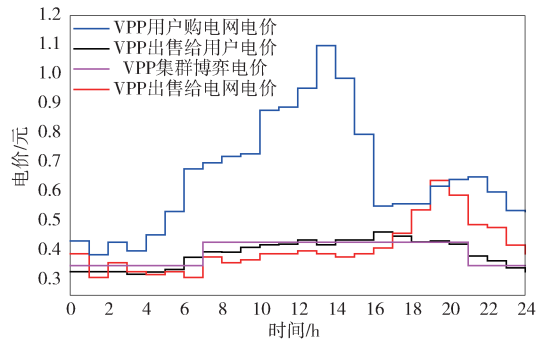
Tab. 2 Dispatch results under different scenarios $\times 10^3$ 万元

| 场景 | 收益 | 用电成本 | 补偿 | 净收益 |
|----|----------|----------|---------|---------|
| 1 | 24.374 6 | 20.494 1 | 0 | 3.880 5 |
| 2 | 24.232 7 | 19.629 5 | 0 | 4.603 2 |
| 3 | 24.381 0 | 19.346 8 | 0.854 5 | 4.179 7 |
| 4 | 24.361 9 | 18.477 9 | 0.854 5 | 5.029 5 |

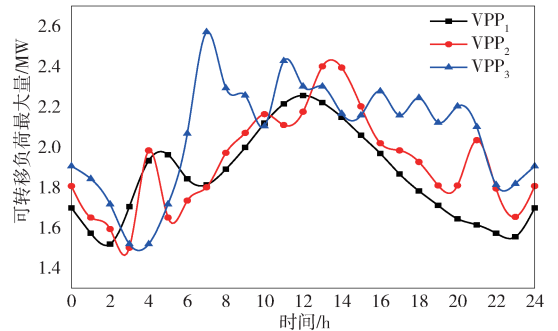
对于用户的补偿, 因第1、2场景下, 用户不参与需求响应中, 并无负荷转移或切除情况, 故无补偿费用; 对于场景3、4, 都有参与需求响应,



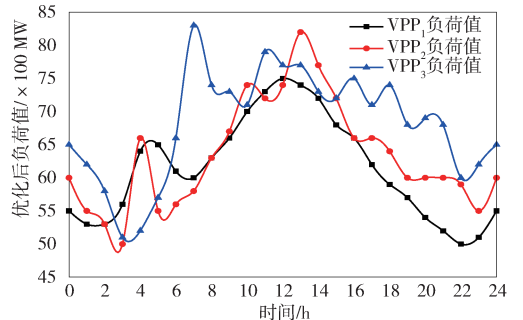
(a) 场景1、2 a VPP供电及负荷转移



(b) 场景1、2 b 电价曲线



(c) 场景3、4 a 负荷转移最大量



(d) 场景3、4 b 优化后的负荷值
(d) SCENARIO 3、4 b The optimized load

图4 不同场景下的优化曲线

Fig. 4 The optimization curves under different scenarios

不同的是场景3参与需求响应后的VPP并不参与社

区能源互联网下的 VPP 博弈, 场景 4 是在场景 3 的基础上来进行优化, 故其在费用补偿这一块是相同的。不同场景间虽看似相互独立, 但层层递进, 相互关联。

电力用户与 DERs 组成的 VPP, 原则上其用电行为由 VPP 来协调控制, 但因用户用电舒适度和满意度的限制, 用户会设置部分负荷来响应 VPP, 同时为社区整体福利提供部分贡献。

从计算上述不同场景下的社区型能源互联网收益过程和结果分析来看:

1) 单独依靠一种供电单元(光伏或风电)为本 VPP 内部的电力负荷提供电力, 并不能完全满足其供电需求, 需要从其他 VPP 或外部电力市场购买。

2) 从社区能源互联网的收益来看, 不同场景下的收益相差不大, 在 $-0.58\% \sim 0.02\%$ 范围内波动, 但对于用户用电成本来说, 却因不同的环境条件相差巨大。

3) VPP 内部负荷直接从电网购电同与从本地可再生能源组成 VPP 购电能节约更多成本。

4) 用户在其参与需求响应或与 VPP 形式参与市场博弈能节约用电成本, 同时能获得由 VPP 能量管理系统提供的需求响应用电补偿, 为其节约更多的成本。能为社区型能源互联网创造更多的社会福利。

从表 2 可以看出构建的社区能源互联网在同时参与需求响应和 VPP 间的博弈才能使得社区型能源互联网获得最大社会效益。电力用户应积极参与到 VPP 的需求响应和社区能源互联网的博弈中去。

本文由 VPP 组成的社区型能源互联网未考虑储能装置的作用, 主要原因是本社区型能源互联网只在试用初期阶段, 而储能装置对于资金的投入占了很大比例, 对于后期的建设将逐步完善对社区能源互联网内部元件的构建。

6 结论

本文针对某社区能源互联网示范工程, 提出适合 VPP 运行策略模型, 并建立收益函数, 其特点在于:

1) 将不同组成形式的 VPP 进行优化设计, 首先, 将单 VPP 模型进行自身内部优化; 其次, 在 VPP 集群之间进行博弈优化; 最后, 将多 VPP 构成社区能源互联网与电力市场进行交互。

2) 对于集成成的 VPP 模型, 在电力市场用电低谷阶段, 正处于 VPP 用电出现缺额阶段, 而此时市场电价较低; 反之, 在电力市场用电峰值阶段, VPP 的用电处于盈余, 可将其多余的电量卖给电力市场, 由此可以获得更高的收益。

3) 以 VPP 电力用户支出作为社区型能源互联网收益的约束函数, 打破传统的以自身条件约束及固定网络约束限制, 很好的体现了 VPP 的作用。

4) 为 VPP 和内部负荷确定合理方案, 协调收益和支出, 来提高社区型能源互联网整体净利润。

参考文献:

- [1] Anon. Renewables global status report 2014 [J]. Galvanotechnik, 2014, 105(9): 2016-2021.
- [2] 范松丽, 艾芊, 贺兴. 基于机会约束规划的虚拟电厂调度风险分析 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4025-4034.
FAN S L, AI Q, HE X. Risk analysis on dispatch of virtual power plant based on chance constrained programming [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4025-4034.
- [3] Peter Asmus. Microgrids, virtual power plants and our distributed energy future [J]. The Electricity Journal, 2010, 23(10): 72-82.
- [4] MORREN J, DE H S W H, FERREIRA JA. Distributed generation units contributing to voltage control in distribution networks [C]// 39th International Universities Power Engineering Conference, 2004: 789-793.
- [5] 丁明, 罗魁, 毕锐. 孤岛模式下基于调度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 +43.
DING M, LUO K, BI R. An energy coordination control strategy for islanded microgrid based on a multi-agent system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 1-8 +43.
- [6] CHAOUACHI A, NAGASAKA K, KAMEL RM, et al. Multiobjective intelligent energy management for a microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1688-1699.
- [7] 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 develop of virtual power plant [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 1-9.
- [8] 刘继春, 唐虎, 向月, 等. 考虑多个虚拟发电厂参与的多阶段市场交易方法 [J]. 电力建设, 2017, 38(3): 137-144.
LIU J C, TANG H, XIANG Y, et al. Multi-stage market transaction method with participation of virtual power plants [J]. Electric Power Construction, 2017, 38(3): 137-144.

- [9] 赵鸿图,朱治中,于尔铿. 电力市场中需求响应市场与需求响应项目研究[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 146-153.
ZHAO H T, ZHU Z Z, YU E K. Study on demand response markets and programs in electricity markets [J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 146-153.
- [10] MASHHOUR E, MOGHADDAS-TAFRESHIS 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.
- [11] 康重庆,夏清,张伯明. 电力系统负荷预测研究综述与发展方向的探讨[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(17): 1-11.
KANG C Q, XIA Q, ZHANG B M. Review of power system load forecasting and its development [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(17): 1-11.
- [12] 董雷,周文萍,张沛,等. 基于动态贝叶斯网络的光伏发电短期概率预测[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(增刊1): 38-45.
DONG L, ZHOU W P, ZHANG P, et al. Short-term photovoltaic output forecast based on dynamic Bayesian network theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33 (Supp.1): 38-45.
- [13] 张坤,毛承雄,谢俊文,等. 风电场复合储能系统容量配置的优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 79-87 +13.
ZHANG K, MAO C X, XIE J W, et al. Optimal design of hybrid energy storage system capacity for wind farm [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 79-87 +13.
- [14] 董文略,王群,杨莉. 含风光水的虚拟电厂与供电公司协调调度模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 75-81 +207.
DONG W L, WANG Q, YANG L. A coordinated dispatching model for a distribution utility and virtual power plant [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 75-81 +207.
- [15] 艾欣,许佳佳. 基于互动调度的微网与配电网协调运行模式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 143-149.
AI X, XU J J. Study on microgrid and distribution network cooperation model based on interactive scheduling [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 143-149.
- [16] YANG X S. Firefly algorithm for multimodal optimization [C]// Proc of the 5th International Conference on Stochastic Algorithm: Foundations and Applications. Berlin: Springer Verlag, 2009: 169-178.

作者简介:



TANG H

唐虎(通信作者)

1990-, 男, 湖北襄阳人, 助理工程师, 电气工程硕士学位, 主要从事高压用电检查及反窃电工作、电力市场研究、电能替代等工作 (e-mail) 1066852552@qq.com.

(责任编辑 李辉)

中国能建广东院与西门子签署全面战略合作关系协议

2019年9月12日, 西门子粤港澳大湾区论坛在广州举行。中国能建广东院总经理乔旭斌应邀出席论坛并发表主题演讲。论坛期间, 中国能建广东院与西门子签署全面战略合作伙伴关系协议。

乔旭斌在论坛上分享了中国能建广东院对粤港澳大湾区能源发展的研究成果。他表示, 中国能建广东院作为国际工程公司, 可在能源和基础设施建设领域为国内外客户提供一站式综合解决方案和全生命周期管理服务, 西门子是世界先进的火力发电和可再生能源产品的供应商, 中国能建广东院期待与西门子在能源建设新技术领域进一步深化合作, 共同为推动粤港澳大湾区繁荣发展作出新的更大贡献。

西门子(中国)有限公司执行副总裁兼大中华区发电与天然气集团总经理姚振国高度评价了中国能建广东院在能源基础设施建设领域取得的突出成绩。他表示, 中国能建广东院业务覆盖全面、技术实力雄厚、熟悉大湾区情况, 双方发展渊源深厚, 战略契合, 有着良好的合作基础。西门子将与中国能建广东院强强联合, 充分发挥各自优势, 进一步加强在大湾区及更大市场范围内的合作, 提升双方核心竞争力, 实现共赢。

根据合作协议, 中国能建广东院与西门子将发挥各自优势, 在电力设备与技术综合解决方案、全球市场开拓、培训、数字化等领域加强合作, 密切沟通, 共同为大湾区能源发展、“一带一路”建设贡献力量。

(郑文棠)