

# 考虑电能共享的楼宇虚拟电厂协调优化调度

杨 秀<sup>1</sup>, 胡晓龙<sup>1</sup>, 孙改平<sup>1</sup>, 方 陈<sup>2</sup>, 田英杰<sup>2</sup>, 杜楠楠<sup>1</sup>

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437)

**摘 要:**为促进楼宇节能, 实现不同楼宇内分布式能源的协调控制管理, 首先搭建包含风电、光伏、储能设备、电动汽车以及柔性负荷的楼宇虚拟电厂框架, 并阐述虚拟电厂内能量与信息的流向; 然后, 构建楼宇虚拟电厂的协调优化调度模型, 以净成本最低为目标函数, 并考虑不同楼宇间电能的优化共享; 最后, 以一个包含居民楼、商业楼、办公楼的楼宇虚拟电厂为例, 针对不构建虚拟电厂、楼宇虚拟电厂调度楼宇内各单元、楼宇虚拟电厂调度楼宇内各单元及楼宇间电能共享 3 种场景进行分析, 对比 3 种场景下的调度结果以验证上述模型的有效性。结果表明: 该模型可以实现楼宇内以及不同楼宇间电能的协调优化, 有效地改善了虚拟电厂的经济性和负荷情况。

**关 键 词:**虚拟电厂; 分布式能源; 楼宇; 日前调度; 电能共享

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.012 中图分类号: TM732 文章编号: 1673-9140(2022)01-0096-10

## Coordinated optimization scheduling of building virtual power plant considering power sharing

YANG Xiu<sup>1</sup>, HU Xiaolong<sup>1</sup>, SUN Gaiping<sup>1</sup>, FANG Chen<sup>2</sup>, TIAN Yingjie<sup>2</sup>, DU Nannan<sup>1</sup>

(1. College of Electric Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China)

**Abstract:** In order to promote building energy conservation and realize the coordinated control and management of distributed energy in different buildings, this paper firstly builds a building virtual power plant framework including wind power, photovoltaics, energy storage equipment, electric vehicles and flexible loads, and expounds the flow of energy and information in the virtual power plant. Then, taking the lowest net cost as the objective function, a coordinated and optimized scheduling model of building virtual power plant is constructed, which also considers the optimal sharing of electric energy between different buildings. Finally, taking a building virtual power plant including a residential building, a commercial building and an office building as an example, three scenarios, i. e., not constructing a virtual power plant, building virtual power plant scheduling each unit in the building and building virtual power plant scheduling units in a building and power sharing between buildings, are analyzed. The scheduling results in the three scenarios are compared to verify the effectiveness of the above models. The results show that the model can realize the coordinated optimization of electric energy within the building and among different buildings, and effectively improve the economy and load of the virtual power plant.

**Key words:** virtual power plant; distributed energy; building; day-ahead scheduling; power sharing

随着能源短缺和温室效应的日益加重,国家对清洁能源的重视程度不断地提高,这使得具有节能、环保等优点的分布式能源被广泛应用<sup>[1]</sup>,楼宇侧也开始集成越来越多的分布式能源<sup>[2-4]</sup>。通过对分布式能源的协调优化管理,可以提高楼宇运行的经济性,充分挖掘楼宇建筑节能减排与调峰的潜力<sup>[5-6]</sup>。然而,由于各楼宇通常都是独立运行,彼此间缺乏信息交流以及能量交互,难以实现整体经济效益的最大化<sup>[7]</sup>。构建以楼宇为主体的楼宇虚拟电厂(virtual power plant, VPP)系统,为解决上述问题提供了手段。VPP 通过先进的信息通信技术对各楼宇内分布式能源进行协调优化管理,可以有效地解决楼宇内分布式能源随机性大、可控性低等问题,充分利用不同楼宇用电行为的良好互补特性,提升系统整体的经济效益。如何对楼宇 VPP 进行协同优化管理是目前研究的热点。

国内外已有众多学者针对 VPP 的优化调度展开相关研究。文献[8]考虑了可削减负荷、可转移负荷以及可平移负荷 3 类柔性负荷,以柔性负荷作为虚拟电厂主要的可调度资源,建立了成本最低、环保效益最优的多目标优化模型;文献[9]计及分布式储能对虚拟电厂收益的影响,比较了不同类型储能设备参与下的调度结果;文献[10]提出了一种含新能源发电机组、电动汽车以及燃气轮机的 VPP 经济调度优化模型,通过电动汽车和可控电源的配合平抑新能源出力的偏差,并且分析了在不同渗透率下电动汽车对 VPP 经济性和各单元出力的影响;文献[11]研究了多区域 VPP 的经济调度,实现了不同区域、不同类型分布式能源间的协调互补,以多区域间电能共享的方式提高了 VPP 内电能的利用率,有效地降低 VPP 的总成本。

上述文献侧重地考虑了柔性负荷、储能设备、电动汽车以及新能源机组等分布式能源的优化,但极少有文献将楼宇内多种类分布式能源作为调度对象,而且针对 VPP 内不同性质区域间协调优化的研究相对较少。在此背景下,本文提出一种考虑不同性质楼宇间电能共享的楼宇 VPP 日前优化调度模型。首先,综合考虑楼宇内风电、光伏(photo voltaic, PV)、储能设备(energy storage system, ESS)、电动汽车(electric vehicle, EV)以及柔性负荷,阐述

了楼宇 VPP 的结构与基本原理,其中柔性负荷在楼宇中主要包含以下 3 类。

1)可削减负荷。可承受一定中断或降功率、减少时间运行的负荷,根据供需情况对其进行部分或全部削减。

2)可转移负荷。各时间段用电量可灵活调节,但要满足转移后整个周期负荷总量与转移前保持不变。

3)可平移负荷。负荷供电时间可按计划变动,负荷需整体平移,用电时间跨越多个调度时段。

其次,建立以 VPP 净成本最低为目标的优化模型,制定楼宇内各单元的日前出力计划,并通过楼宇间的电能共享实现电能的就近消纳,提高了电能在内部的利用效率,进一步降低了 VPP 的净成本。最后,以一个包含居民楼、商业楼、办公楼的楼宇 VPP 为例进行分析,验证了上述模型的有效性。

## 1 楼宇 VPP 的结构与基本原理

根据功能不同,楼宇通常分为居民楼宇、商业楼宇以及办公楼宇,本文所研究的楼宇类型主要包括这 3 种类型。不同性质的楼宇在负荷特征、新能源以及储能等方面具有一定区别。在负荷特征上,由于 3 类楼宇社会职能不同,居民楼宇全天负荷波动不大,而商业楼宇与办公楼宇负荷规律较为相似,即在营业时间负荷较大,停业时间负荷几乎为零。由于楼宇功能性不同,因此与商业楼宇相比,办公楼宇的特征在于各时刻负荷总量较小。新能源发电和储能容量的大小通常与楼宇规模有关,通常居民楼宇和商业楼宇规模较大,其新能源出力以及储能容量不小于办公楼宇。由于不同楼宇的在负荷、新能源和储能上的区别,使得楼宇间电能具有一定互补性,因此楼宇间电能共享具有可行性。楼宇 VPP 的结构如图 1 所示。考虑每个楼宇内部均包含风电、PV、ESS、EV 以及柔性负荷,由 VPP 控制中心对 VPP 内部各聚合单元进行统一协调控制。VPP 控制中心负责收集电网以及楼宇内部各单元的信息,根据所整合的信息,实现经济高效日前用电计划的制定,并发送调度指令控制各单元的运行。

为了实现电能在 VPP 内部的高效利用,减少因

电网购售电的电价差所带来的运行费用<sup>[12-13]</sup>,由VPP控制中心控制协调楼宇间电能的双向流动,考虑楼宇间电能的共享,当某个楼宇出现缺电的情况,VPP控制中心将会发送调度指令,控制余电的楼宇向缺电的楼宇传输电能,多余的部分电能直接在VPP内部消耗,而不再向电网售电。单栋楼宇内部的结构如图2所示<sup>[7]</sup>。

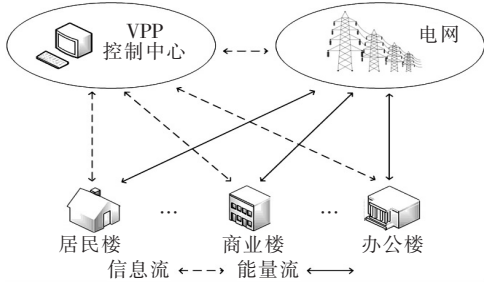


图1 楼宇虚拟电厂

Figure 1 Structure of building VPP

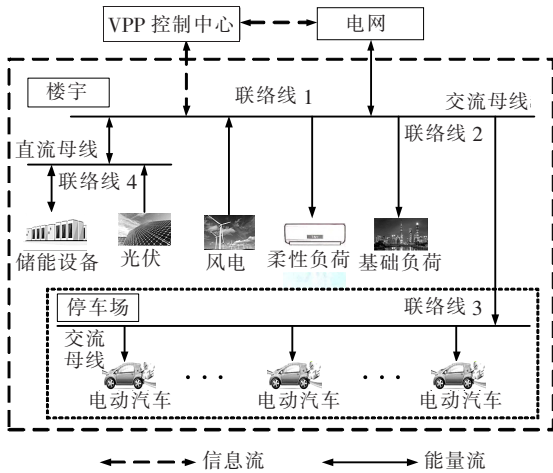


图2 楼宇内部结构

Figure 2 Internal structure of the building

## 2 楼宇VPP的优化调度模型

### 2.1 目标函数

VPP控制中心根据收集到的信息,合理地控制楼宇内部各单元的出力,协调楼宇间的电能共享过程,优先在VPP内部消纳电能,当VPP整体出现电能缺额时,再与电网进行交互。VPP以整体的净成本最小为优化目标,其最小净成本为

$$C =$$

$$\min \left[ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (C_{i,t}^M + C_{i,t}^G + C_{i,t}^{ES} + C_{i,t}^{EV}) + C_{com}^L \right] \quad (1)$$

式中  $T$  为调度周期内的总时段数;  $N$  为楼宇数量;  $C_{i,t}^M$  为同电网的交互成本;  $C_{i,t}^G$  为新能源发电机组的维护成本;  $C_{i,t}^{ES}$  为ESS的运行维护成本;  $C_{i,t}^{EV}$  为EV电池的损耗成本;  $C_{com}^L$  为柔性负荷用户的补偿成本。

1) 楼宇VPP同电网的交互成本为

$$C_{i,t}^M = \omega_{i,t}^{net} C_t^{buy} P_{i,t}^{buy} - (1 - \omega_{i,t}^{net}) C_t^{sell} P_{i,t}^{sell} \quad (2)$$

式中  $C_t^{buy}$ 、 $C_t^{sell}$  分别为  $t$  时段电网的购电价格以及售电价格,本文购电、售电价格均采用分时电价;  $P_{i,t}^{buy}$ 、 $P_{i,t}^{sell}$  分别为楼宇  $i$  在  $t$  时段的购电功率与售电功率。若楼宇购电,则布尔变量  $\omega_{i,t}^{net}$  置1,售电则置0,保证了楼宇每个时段不能同时购电和售电。

2) 为了维护风电、光伏的正常运行,通常会产生一定的维护费用,即

$$C_{i,t}^G = C_w P_{i,t}^W + C_{PV} P_{i,t}^{PV} \quad (3)$$

式中  $C_w$ 、 $C_{PV}$  分别为风、光单位出力时产生的维护成本;  $P_{i,t}^W$ 、 $P_{i,t}^{PV}$  分别为楼宇  $i$  在  $t$  时段的风、光出力。

3) ESS充放电会产生一定的运行维护费用,即

$$C_{i,t}^{ES} = C_{ES} |P_{i,t}^{ES}| \quad (4)$$

式中  $C_{ES}$  为ESS的单位维护成本;  $P_{i,t}^{ES}$  为楼宇  $i$  在  $t$  时段ESS的充放电功率。

4) 由于EV电池总循环寿命有限,随着充电次数增加,EV电池会不断损耗<sup>[14]</sup>。本文只考虑EV集群的有序充电状态,不考虑EV集群的放电情况,因此EV电池损耗成本为

$$C_{i,t}^{EV} = C_{EV} P_{i,t}^{EV} \quad (5)$$

式中  $C_{EV}$  为EV电池的单位损耗成本;  $P_{i,t}^{EV}$  为楼宇  $i$  在  $t$  时段EV集群的充电功率。

5) 为了激励电力用户参与需求响应,实现削峰填谷,需要给予用户一定的补偿费用<sup>[15-16]</sup>,即

$$C_{com}^L = C_{com}^{cut} + C_{com}^{tr} + C_{com}^{sh} \quad (6)$$

式中  $C_{com}^{cut}$  为可削减负荷的补偿成本;  $C_{com}^{tr}$  为可转移负荷的补偿成本;  $C_{com}^{sh}$  为可平移负荷的补偿成本。以下分别对3类负荷的补偿成本做详细介绍。

可削减负荷根据供能的充裕程度,对该时段的负荷功率进行一定比例的削减。可削减负荷的补偿成本为

$$C_{com}^{cut} = C_{cut} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (P_{i,t}^{cut,old} - P_{i,t}^{cut}) \omega_{i,t}^{cut} \quad (7)$$

式中  $C_{cut}$  为可削减负荷的单位补偿费用;  $P_{i,t}^{cut,old}$

为可削减负荷的预测量;  $P_{i,t}^{\text{cut}}$  为楼宇  $i$  在  $t$  时段削减后的负荷功率; 布尔变量  $\omega_{i,t}^{\text{cut}}$  表示楼宇  $i$  在  $t$  时段是否削减负荷, 是则置 1, 否则置 0。

在可调度的时段内, 可转移负荷能够在用户总用电量保持不变的情况下进行负荷功率的转移, 灵活的调节各时段功率。假设楼宇  $i$  用户可接受的转移时段区间为  $[t_i^r-, t_i^r+]$ 。可转移负荷的补偿成本为

$$C_{\text{com}}^{\text{tr}} = C_{\text{tr}} \sum_{t=t_i^r-}^{t_i^r+} \sum_{i=1}^N P_{i,t}^{\text{tr}} \omega_{i,t}^{\text{tr}} \quad (8)$$

式中  $C_{\text{tr}}$  为可转移负荷的单位补偿费用;  $P_{i,t}^{\text{tr}}$  为楼宇  $i$  在  $t$  时段参与转移的负荷功率;  $\omega_{i,t}^{\text{tr}}$  为楼宇  $i$  在  $t$  时段的转移状态, 转移则置 1, 否则置 0。

可平移负荷只能实现整体负荷在一定范围内的平移, 其用电时间不可中断, 必须保持用能的连续性。假设楼宇  $i$  内可平移负荷原始用能区间为  $[t_i^{\text{start}}, t_i^{\text{end}}]$ , 可接受的平移时段区间为  $[t_i^{\text{sh-}}, t_i^{\text{sh+}}]$ ,  $t_i^{\text{sh}}$  为平移后负荷的起始时刻。可平移负荷的补偿成本为

$$C_{\text{com}}^{\text{sh}} = C_{\text{sh}} \sum_{t=t_i^{\text{sh}}}^{t_i^{\text{sh}}+t_i^{\text{end}}-t_i^{\text{start}}} \sum_{i=1}^N P_{i,t}^{\text{sh}} \omega_{i,t}^{\text{sh}} \quad (9)$$

式中  $C_{\text{sh}}$  为可平移负荷的单位补偿费用;  $P_{i,t}^{\text{sh}}$  为楼宇  $i$  在  $t$  时段参与平移的负荷功率;  $\omega_{i,t}^{\text{sh}}$  为楼宇  $i$  在  $t$  时段的平移状态, 平移则置 1, 否则置 0。

## 2.2 约束条件

1) 楼宇内部功率平衡。

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\text{W}} + P_{i,t}^{\text{PV}} + P_{i,t}^{\text{ESD}} + P_{i,t}^{\text{buy}} + \sum_{k=1, k \neq i}^N P_{i,k,t}^{\text{IN}} = \\ P_{i,t}^{\text{ESC}} + P_{i,t}^{\text{L}} + P_{i,t}^{\text{EV}} + P_{i,t}^{\text{sell}} + \sum_{k=1, k \neq i}^N P_{i,k,t}^{\text{OUT}} \\ P_{i,t}^{\text{L}} = P_{i,t}^{\text{L-base}} + P_{i,t}^{\text{L-cut}} + P_{i,t}^{\text{L-tr}} + P_{i,t}^{\text{L-sh}} \end{cases} \quad (10)$$

式中  $P_{i,t}^{\text{ESC}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{ESD}}$  分别为楼宇  $i$  在  $t$  时段 ESS 的充、放电功率;  $P_{i,t}^{\text{L}}$  为楼宇  $i$  在  $t$  时段的总负荷功率;  $P_{i,t}^{\text{L-base}}$  为基础负荷功率;  $P_{i,t}^{\text{L-cut}}$  为可削减负荷功率;  $P_{i,t}^{\text{L-tr}}$  为可转移负荷功率;  $P_{i,t}^{\text{L-sh}}$  为可平移负荷功率;  $P_{i,k,t}^{\text{IN}}$ 、 $P_{i,k,t}^{\text{OUT}}$  分别为  $t$  时段楼宇  $k$  输入到楼宇  $i$  的功率以及楼宇  $i$  输出到楼宇  $k$  的功率。

2) 储能设备约束。

$$S_{i,t}^{\text{ES}} = S_{i,t-1}^{\text{ES}} + \eta_i^{\text{ESC}} P_{i,t}^{\text{ESC}} - \frac{P_{i,t}^{\text{ESD}}}{\eta_i^{\text{ESD}}} \quad (11)$$

$$S_{i,t}^{\text{ES, min}} \leq S_{i,t}^{\text{ES}} \leq S_{i,t}^{\text{ES, max}} \quad (12)$$

$$S_{i,0}^{\text{ES}} = S_{i,T}^{\text{ES}} \quad (13)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{ESC}} \leq \omega_{i,t}^{\text{ESC}} P_{i,t}^{\text{ESC, max}} \quad (14)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{ESD}} \leq \omega_{i,t}^{\text{ESD}} P_{i,t}^{\text{ESD, max}} \quad (15)$$

$$0 \leq \omega_{i,t}^{\text{ESC}} + \omega_{i,t}^{\text{ESD}} \leq 1 \quad (16)$$

式(11)~(16)中  $S_{i,t}^{\text{ES}}$  为楼宇  $i$  在  $t$  时段 ESS 的蓄电量;  $S_{i,t}^{\text{ES, min}}$ 、 $S_{i,t}^{\text{ES, max}}$  分别为楼宇  $i$  中 ESS 的最小、最大容量;  $\eta_i^{\text{ESC}}$ 、 $\eta_i^{\text{ESD}}$  为楼宇  $i$  中 ESS 的充、放电效率;  $S_{i,0}^{\text{ES}}$ 、 $S_{i,T}^{\text{ES}}$  分别为楼宇  $i$  中 ESS 的始末状态;  $\omega_{i,t}^{\text{ESC}}$ 、 $\omega_{i,t}^{\text{ESD}}$  分别为楼宇  $i$  在  $t$  时段 ESS 是否充、放电, 是则置 1, 否则置 0。式(11)、(13)保证 ESS 在调度周期内的连续性, 式(16)保证一个时段内 ESS 不能同时充放电。

3) EV 集群约束。本文考虑 EV 集群有序充电的建模, 并未考虑 EV 的放电情况, 因此楼宇  $i$  内的 EV 集群在  $t$  时段的充电功率要小于该时段可调度电动汽车的最大充电功率, 即

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{EV}} \leq P^{\text{EV, max}} N_{i,t}^{\text{EV}} \quad (17)$$

式中  $P^{\text{EV, max}}$  为单辆 EV 的最大充电功率;  $N_{i,t}^{\text{EV}}$  为楼宇  $i$  在  $t$  时段可调度 EV 的数量。

同时, 由于本文考虑楼宇内 EV 集群参与调度的情况, EV 数量较多, 因此采用宏观上平均化出力<sup>[17]</sup>, 对 EV 集群的电量做如下约束:

$$S_{i,t}^{\text{EV}} \leq \gamma N_i^{\text{EV}} S^{\text{EV, max}} \quad (18)$$

式中  $N_i^{\text{EV}}$  为楼宇  $i$  中 EV 的总数量;  $S^{\text{EV, max}}$  为 EV 电池的最大容量;  $\gamma$  为状态系数, 其值小于 1, 用来保证 EV 充电的安全性。

此外, 调度周期内各楼宇中 EV 的充电电量总额应满足调度周期内 EV 的充电电量需求, 即

$$\sum_{t=1}^T P_{i,t}^{\text{EV}} \geq P_i^{\text{EV, demand}} \quad (19)$$

式中  $P_i^{\text{EV, demand}}$  为楼宇  $i$  调度周期内 EV 的充电电量需求。

最后, 鉴于目前文献中关于 EV 的调度模型均未计及 EV 用户出行的满意度情况, 本文考虑 EV 用户的满意度约束, 指标详见文献[18]。假设 EV 用户根据自身出行习惯进行充电时, 其满意度最高, 则约束为

$$\partial_i^{\text{EV}} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T |P_{i,t}^0 - P_{i,t}^{\text{EV}}| \Delta t}{\sum_{t=1}^T P_{i,t}^0 \Delta t} \geq \partial_i^{\text{EV, min}} \quad (20)$$



式中  $\partial_i^{EV}$  为调度后 EV 用户的满意度;  $\partial_i^{EV, \min}$  为 EV 用户最低的满意度需求;  $P_{i,t}^0$  为用户满意度最高情况下楼宇  $i$  在  $t$  时段 EV 的充电功率。

4) 柔性负荷约束。对于可削减负荷, 为了保证用户用电的舒适性, 不能频繁的对用户负荷进行削减, 需要对削减次数以及削减时间进行约束<sup>[19]</sup>, 即

$$\sum_{t=1}^T \omega_{i,t}^{\text{cut}} \leq N_i^{\text{cut}} \quad (21)$$

$$\sum_{t=1}^{t+T_i^{\text{cut}, \max}+1} (1 - \omega_{i,t}^{\text{cut}}) \geq 1 \quad (22)$$

$$\sum_{t=1}^{t+T_i^{\text{cut}, \max}-1} \omega_{i,t}^{\text{cut}} \geq T_i^{\text{cut}, \min} (\omega_{i,t}^{\text{cut}} - \omega_{i,t-1}^{\text{cut}}) \quad (23)$$

式(21)~(23)中  $N_i^{\text{cut}}$  为楼宇  $i$  可削减负荷的最大削减次数;  $T_i^{\text{cut}, \min}$ 、 $T_i^{\text{cut}, \max}$  为楼宇  $i$  的最小、最大连续削减时间。

对于可转移负荷, 由于设备的频繁启停会影响用户的正常用电, 因此除了对转移功率进行约束外, 还需要对可转移负荷的最小持续时间进行约束, 即

$$\omega_{i,t}^{\text{tr}} P_i^{\text{tr}, \min} \leq P_{i,t}^{\text{tr}} \leq \omega_{i,t}^{\text{tr}} P_i^{\text{tr}, \max} \quad (24)$$

$$\sum_{t=t_i^{\text{tr}}-1}^{t_i^{\text{tr}}+T_i^{\text{tr}, \min}-1} \omega_{i,t}^{\text{tr}} \geq T_i^{\text{tr}, \min} (\omega_{i,t}^{\text{tr}} - \omega_{i,t-1}^{\text{tr}}) \quad (25)$$

式中  $P_i^{\text{tr}, \min}$ 、 $P_i^{\text{tr}, \max}$  为楼宇  $i$  可转移负荷的最小值和最大值;  $T_i^{\text{tr}, \min}$  为楼宇  $i$  可转移负荷的最小持续时间。

对于可平移负荷, 只需满足平移后负荷的运行时间在用户可接受的时间范围内, 即

$$t_i^{\text{sh}-} \leq t_i^{\text{sh}} \leq t_i^{\text{sh}+} \quad (26)$$

$$t_i^{\text{sh}-} \leq t_i^{\text{sh}} + t_i^{\text{end}} - t_i^{\text{start}} \leq t_i^{\text{sh}+} \quad (27)$$

5) 楼宇间电能交互约束。

$$P_{i,k,t}^{\text{OUT}} = P_{k,i,t}^{\text{IN}} \quad (28)$$

$$0 \leq P_{i,k,t}^{\text{OUT}} \leq P_{i,k}^{\text{EX}, \max} \omega_{i,k,t}^{\text{EX}} \quad (29)$$

$$0 \leq P_{i,k,t}^{\text{IN}} \leq P_{i,k}^{\text{EX}, \max} (1 - \omega_{i,k,t}^{\text{EX}}) \quad (30)$$

式中  $P_{i,k}^{\text{EX}, \max}$  为楼宇  $i$  与楼宇  $k$  功率交互的上限值;  $\omega_{i,k,t}^{\text{EX}}$  为在  $t$  时段楼宇  $i$  是否输送电能至楼宇  $k$ , 是则置 1, 否则置 0。  $\omega_{i,k,t}^{\text{EX}}$  的引入保证了每个时段电能的输送方向唯一。

## 2.3 模型求解

由于上述模型为混合整数线性规划模型, 因此

本文在 MATLAB2016b 平台下调用 CPLEX 线性求解器对模型进行求解。

## 3 算例分析

### 3.1 算例数据

本文以一个包含居民楼、商业楼、办公楼的楼宇 VPP 作为研究对象验证上述模型的合理性。每个楼宇均含有风电、PV、ESS、EV 以及柔性负荷, 每个楼宇在满足自身用电需求的前提下均可对外输送电能。

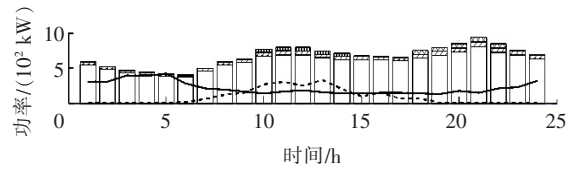
1) 电价参数。本文以 1 h 为一个时段, 共 24 个调度时段。本文所用分时电价见表 1, 其中峰时段为 10:00—15:00、18:00—21:00; 平时段为 07:00—10:00、15:00—18:00、21:00—23:00; 谷时段为 00:00—7:00、23:00—24:00。

2) 风光预测值以及负荷相关数据。居民楼、商业楼、办公楼的风光出力以及负荷的预测情况如图 3 所示。3 类柔性负荷的相关参数如表 2~4 所示。

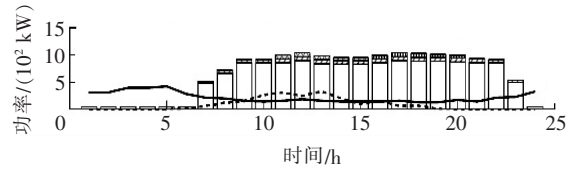
表 1 系统购电及售电价格

Table 1 Purchase and sale price of electricity 元

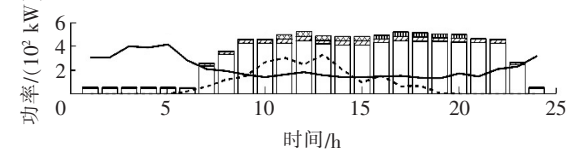
交易方式	购电及售电价格		
	峰时段	平时段	谷时段
购电	0.83	0.49	0.17
售电	0.65	0.38	0.13



(a) 居民楼风光及负荷情况



(b) 商业楼风光及负荷情况



(c) 办公楼风光及负荷情况

□ 基础负荷    ▨ 可削减负荷    ▩ 可转移负荷  
▤ 可平移负荷    — 风电预测出力    - - 光伏预测出力

图 3 风光出力和负荷的预测情况

Figure 3 Predicted power curve of photovoltaic, wind and load



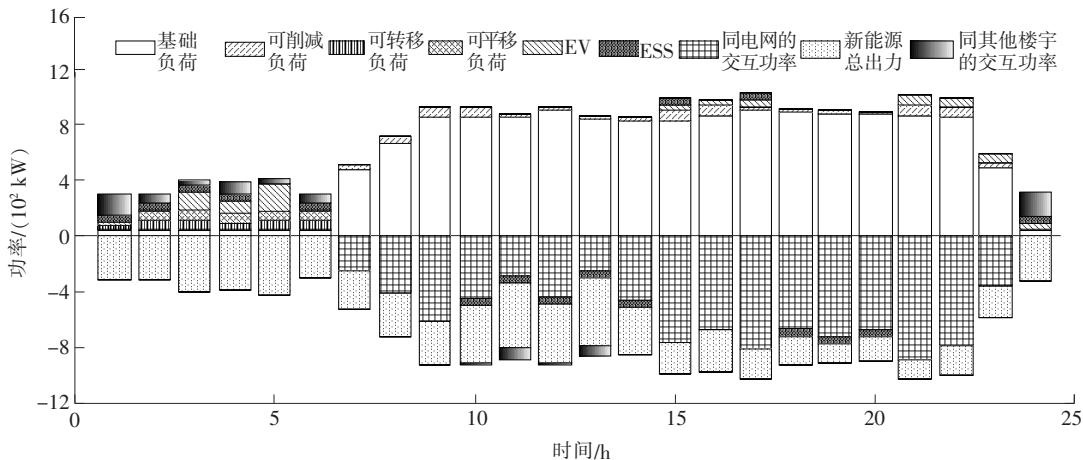


图 6 商业楼功率分配情况

Figure 6 Power distribution of commercial building

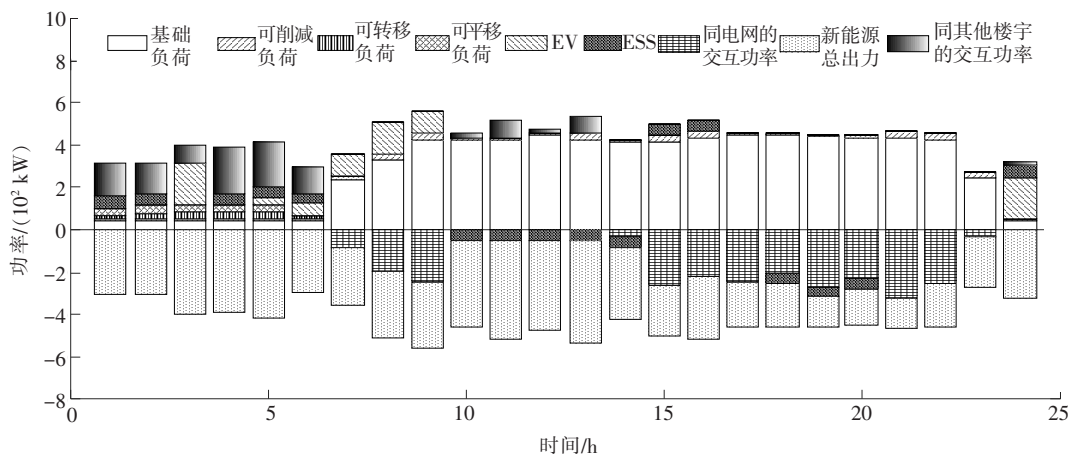


图 7 办公楼功率分配情况

Figure 7 Power distribution of office building

由图 5 可知, VPP 通过对分布式能源的合理调度使得楼宇同电网的交互电量发生了变化。由于风电、PV 属于可再生能源, 因此设置风光维护成本低于购电价格, 激励用户对风光出力进行全消纳, 减少用户从电网的购电量。在分时电价的引导下, EV 用户选择在电价较低的时段充电, 但在满意度的约束下, 用户不能完全摒弃原有的充电习惯。EV 原本的充电高峰期在 18:00—21:00 时段, 而其中 18:00—20:00 恰好处于电价的峰时段, 因此用户避免了在该时段充电, 选择在晚间凌晨低电价时段充电。柔性负荷的分布也发生了变化。由于削减次数限制, 可削减负荷优先在 10:00—13:00 及 18:00—21:00 这 2 个负荷高峰时段进行削减; 由于最小持续时间的限制, 可转移负荷转移到了 04:00—08:00 负荷低谷时段; 可平移负荷整体平移至 05:00—

09:00, 保持了负荷的连续性。在电价低谷时段 ESS 选择充电储存电量, 而在 10:00—14:00 和 19:00—20:00 电价较高, 因此 ESS 在该时段内向楼宇供电, 降低了楼宇在电价高峰时段的购电量, 从而减少楼宇的净成本。另外, 在 00:00—06:00, 其他楼宇的电能有所剩余, 而居民楼宇自给的电能不足以满足用能需求, 因此其他楼宇向居民楼宇供电, 若仍未满足电能需求再向电网购电。由于电能共享具有不计成本、共享互惠的特点, 因此通过楼宇间的电能交互, 可以减少居民楼宇的购电费用。

由图 6 可知, 商业楼宇的负荷特性与居民楼宇不同, 其负荷的峰谷差远远大于居民楼宇。在 00:00—06:00, 商业楼宇负荷量很小, 因此除了用于满足用户负荷以及 ESS 的充电外, 大量的风电出力输送至其他楼宇。由于电价较低, 多数 EV 用户也

选择在 00:00—06:00 充电,减少其充电成本,同样存在部分用户不愿完全放弃原有的充电习惯,选择在原有的时段进行充电。可削减负荷在 11:00—14:00 与 17:00—20:00 这 2 个负荷高峰时段进行削减;可转移负荷转移至 01:00—06:00,可平移负荷平移至 01:00—05:00,均实现了一定程度上的削峰填谷。而在电价的峰时段,ESS 向商业楼宇供电,使得商业楼宇从电网购入的电功率减少。除此之外,在 10:00—13:00 存在余电楼宇向商业楼宇供电,进一步减少了该时段商业楼宇的购电量。

由图 7 可知,办公楼宇的负荷特性与商业楼宇相似,但其负荷总量小于商业楼宇。因此,除 00:00—06:00,办公楼宇在 10:00—13:00 同样出现电能过剩,在这 2 个时段内办公楼宇向缺电楼宇供电,减轻其供电压力。由于负荷特性相似,因此办公楼宇柔性负荷优化后的分布相似于商业楼宇。而办公楼宇和商业楼宇中 EV 用户的充电习惯不同,因此其 EV 充电负荷的分布有一定的区别,但在电价引导下,EV 用户仍选择电价较低的时段进行充电。

图 8 为 VPP 内楼宇的电能共享情况。在 00:00—06:00,商业楼宇以及办公楼宇向居民楼宇传输电能,以满足居民楼宇的用能需求。通过电能共享,居民楼宇从电网的购电量大大减少,在 03:00—05:00 甚至无需从电网购电。另外,由于商业楼宇与办公楼宇的负荷曲线规律较为相似,缺电与余电时段大致相同,电能的互补性、共享性相对较弱,因此在大多数时段两者间不存在电能共享,但办公楼宇各个时段负荷量较少,在 10:00—13:00 电能有所剩余,而商业楼宇负荷较重,在该时段缺电较为严重,因此办公楼宇的剩余的电量并没有出售给电网,而是输送给负荷较重的商业楼宇,在一定程度上减少了其购电成本。

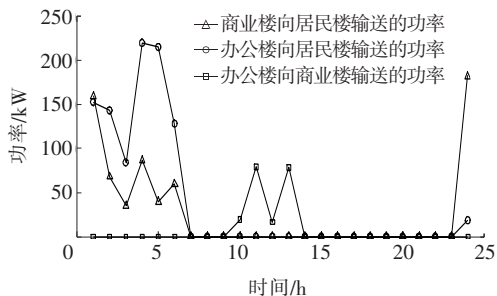


图 8 电能共享情况

Figure 8 Power sharing between buildings

### 3.3 场景分析

为验证楼宇内部单元合理调度以及楼宇间电能共享对 VPP 净成本的影响,本文设置 3 种场景进行对比分析。场景 1,楼宇内部单元不参与 VPP 的优化调度;场景 2,楼宇内部单元参与 VPP 的调度,但不考虑楼宇间的电能共享;场景 3,楼宇内部单元参与 VPP 的调度,考虑楼宇间的电能共享。

楼宇 VPP 的构建不仅可以减少净成本、提高经济性,还能对负荷起到一定的调节作用。本文将除去楼宇 VPP 自给电能后,需要由电网供电的负荷定义为等效负荷,等效负荷的峰谷差可以反映 VPP 的优化运行对系统负荷的影响,因此本文将 VPP 的净成本和等效负荷的峰谷差作为评估优化结果的 2 个指标。

1) 成本对比。表 5 对比了 3 种场景下的各项成本。由表 5 可知,场景 1 中柔性负荷用户不参与需求响应,ESS 不工作,无需支付柔性负荷的补偿费用以及 ESS 的维护费用,因此其补偿成本和维护成本均低于场景 2。但场景 2 中楼宇内部单元参与 VPP 的优化调度,各单元相互协调配合,充分地利用了 VPP 内部资源实现电能自给,减少了向电网的购电电量,因此场景 2 的购电成本相较于场景 1 减少了 18.9%,反而使得场景 2 的净成本减少了 12.8%;

相比于场景 2,场景 3 的购电成本进一步减少。这是由于场景 3 中考虑了楼宇间的功率的共享,实现了重负荷楼宇向轻负荷楼宇供电,减少了重负荷楼宇的购电电量,从而使净成本减少了 2.31%。说明与各个楼宇单独优化相比,多个楼宇联合调度的 VPP 模型能够更加有效地利用楼宇内的电能,实现资源的合理分配,从而获得更好的经济效益。

2) 等效负荷对比。表 6 对比了 3 种场景下等效负荷的相关数据。

表 5 3 种场景下的成本对比

Table 5 Comparison of costs under different

场景	scenarios			元
	补偿成本	维护成本	购电成本	净成本
1	0	2 406	14 742	17 148
2	413	2 587	11 959	14 959
3	413	2 596	11 605	14 614



表 6 3种场景下的等效负荷对比

Table 6 Comparison of equivalent loads under different scenarios kW

场景	等效负荷		峰谷差
	最大值	最小值	
1	2 142	-721	2 863
2	1 992	-259	2 251
3	1 992	0	1 992

由表 6 可知,与场景 1 相比,场景 2 中由于 EV、ESS、柔性负荷的调节,VPP 在峰时段和平时段从电网购入的电能减少,更多的在谷时段购入电能,这使得其等效负荷的最小值从-721 kW(等效负荷为负表示向电网卖电)增加到-259 kW,最大值从 2 142 kW 减少到 1 992 kW,等效负荷的峰谷差值降低了 21.38%。与场景 2 相比,由于场景 3 中考虑了电能共享,余电楼宇会将电能传输至缺电楼宇,减少了负荷低谷时段向电网的馈电量,进一步提高了电能在内部的利用率,使得等效负荷的峰谷差减少了 11.51%。

综合上述分析,楼宇内部单元的优化协调和楼宇间的电能共享均可以有效地降低 VPP 的净成本、减少等效负荷的峰谷差。证明了本文所提模型,无论在经济性上还是对负荷的改善作用上均有一定优势。

## 4 结语

本文以聚合了风电、PV、ESS、EV 以及柔性负荷等分布式能源的楼宇作为研究对象,构建了考虑楼宇间电能共享的楼宇 VPP 优化调度模型,可以实现不同性质楼宇和不同类型聚合单元电能的协调优化,在降低 VPP 净成本的同时,可以有效改善系统的负荷情况。通过算例分析以及场景比对,得到以下结论。

1)通过楼宇内部不同类型聚合单元的协调优化互补,提高了各单元出力在楼宇内部的利用效率,减少了从电网的购电量,使系统更具经济性。另外,由于分时电价对用户的引导作用,更多用户选择在负荷低谷时段用电,改善了系统的负荷水平。

2)通过楼宇间的电能共享,使得余电楼宇向缺电楼宇供电,实现楼宇间电能的互补,促进了电能 VPP 内部的高效利用,进一步改善了 VPP 的经济

性和负荷水平。

3)本文构建的楼宇 VPP 优化调度模型只考虑了电能的协调优化。而在能源互联网的背景下,未来可以考虑楼宇内部以及楼宇之间的电、热、冷多能互补,针对楼宇综合能源系统的优化调度做进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 刘铠诚,何桂雄,郭炳庆.考虑电价碳价及风功率不确定性的风—火虚拟电厂运行优化策略[J].电力科学与技术学报,2018,33(3):99-105.  
LIU Kaicheng, HE Guixiong, GUO Bingqing. Optimal strategy for wind-fire virtual power plant considering uncertainties of wind power fluctuations and price randomness of electricity and Carbon[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(3): 99-105.
- [2] 韩啸,张潮海.基于物理-数据融合的楼宇用电需求响应潜力分析[J].供用电,2020,37(8):10-15.  
HAN Xiao, ZHANG Chaohai. Demand response potential analysis of buildings based on physical-data fusion method [J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(8): 10-15.
- [3] 童光毅.基于双碳目标的智慧能源体系构建[J].智慧电力,2021,49(5):1-6.  
TONG Guangyi. Construction of smart energy system based on dual carbon goal [J]. Smart Power, 2021, 49 (5): 1-6.
- [4] 石坤,李德智,杨斌,等.面向市场化的智能楼宇互动调控技术[J].电力科学与技术学报,2017,32(3):114-120.  
SHI Kun, LI Dezhi, YANG Bin, et al. Market oriented interactive control technology for intelligent building [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3): 114-120.
- [5] 倪平波,周丹,朱海萍,等.智能楼宇中的电-热储能系统双层优化配置模型研究[J].电测与仪表,2021,58(9):122-128.  
NI Pingbo, ZHOU Dan, ZHU Haiping, et al. Research on double-layer optimal configuration model of electric-thermal energy storage system in smart building [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(9): 122-128.
- [6] 张世斌,李敬光,陈威洪,等.基于改进精简爆炸烟花的区域商业楼宇日前电能交易[J].电网与清洁能源,2020,36(4):14-22.  
ZHANG Shibin, LI Jingguang, CHEN Weihong, et al. Day-ahead energy transaction for commercial buildings based on improved bare bones fireworks algorithm [J].

- Power System and Clean Energy,2020,36(4):14-22.
- [7] 任文诗,高红均,刘友波,等.智能建筑群电能日前优化共享[J].电网技术,2019,43(7):2568-2577.  
REN Wenshi,GAO Hongjun,LIU Youbo,et al. Optimal day-ahead electricity scheduling and sharing for a smart buildingcluster[J]. Power System Technology,2019,43(7):2568-2577.
- [8] 王晗,徐潇源,严正.考虑柔性负荷的多目标安全约束机组组合优化模型及求解[J].电网技术,2017,41(6):1904-1912.  
WANG Han,XU Xiaoyuan,YAN Zheng. Multi-objective optimization of security constrained unit commitment model and solution considering flexible load[J]. Power System Technology,2017,41(6):1904-1912.
- [9] 王世龙,宋双商,林清华,等.计及分布式储能的虚拟电厂优化调度[J].可再生能源,2019,37(8):1214-1219.  
WANG Shilong,SONG Shuangshang,LIN Qinghua,et al. Virtual power plant optimal scheduling considering distributed energy storage[J]. Renewable Energy Resources,2019,37(8):1214-1219.
- [10] 袁桂丽,王宝源.含电动汽车的虚拟电厂经济性优化调度[J].太阳能学报,2019,40(8):2395-2404.  
YUAN Guili,WANG Baoyuan. Economic optimal dispatch of virtual power plant with electric vehicles[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica,2019,40(8):2395-2404.
- [11] 孙惠娟,蒙锦辉,彭春华.风—光—水—碳捕集多区域虚拟电厂协调优化调度[J].电网技术,2019(11):4037-4048.  
SUN Huijuan,MENG Jinhui,PENG Chunhua. Coordinated optimization scheduling of multi-region virtual power plant with wind-power photovoltaic hydropower carbon-capture units[J]. Power System Technology,2019(11):4037-4048.
- [12] HUANG C X,YUE D,XIE J,et al. Economic dispatch of power systems with virtual power plant based interval optimization method[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems,2016,2(1):74-80.
- [13] 胡鹏,艾欣,杨昭,等.考虑电能共享的综合能源楼宇群日前协同优化调度[J].电力自动化设备,2019,39(8):239-245.  
HU Peng,AI Xin,YANG Zhao,et al. Day-ahead optimal scheduling for cluster building with integrated energy system considering power sharing [J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(8):239-245.
- [14] 张晓波,张保会,董梁,等.微电网中电动汽车充电模式与换电模式的运行优化[J].电力系统自动化,2016,40(9):56-63.  
ZHANG Xiaobo,ZHANG Baohui,DONG Liang,et al. Operation optimization of electric vehicles in battery swapping mode and direct charging mode in microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(9):56-63.
- [15] 王磊,姜涛,宋丹,等.基于灵活热电比的区域综合能源系统多目标优化调度[J].电力系统保护与控制,2021,49(8):151-159.  
WANG Lei,JIANG Tao,SONG Dan,et al. Multi-objective optimal dispatch of a regional integrated energy system based on a flexible heat-to-electric ratio[J]. Power System Protection and Control,2021,49(8):151-159.
- [16] MAZIDI M,ZAKARIAZADEH A,JADID S,et al. Integrated scheduling of renewable generation and demand response programs in a microgrid[J]. Energy Conversion and Management,2014,86:1118-1127.
- [17] 陈中,陆舆,邢强,等.考虑电动汽车碳配额的电力系统调度分析[J].电力系统自动化,2019,43(16):44-53.  
CHEN Zhong,LU Yu,XING Qiang,et al. Dispatch analysis of power system considering carbon quota for electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(16):44-53.
- [18] 王行行,赵晋泉,王珂,等.考虑用户满意度和配网安全的电动汽车多目标双层充电优化[J].电网技术,2017,41(7):2165-2172.  
WANG Xingxing,ZHAO Jinqian,WANG Ke,et al. Multi-objective bi-level electric vehicle charging optimization considering user satisfaction degree and distribution grid security[J]. Power System Technology,2017,41(7):2165-2172.
- [19] 李东东,徐连连,刘翔,等.考虑可削减负荷参与的含风光储微网经济优化调度[J].电力系统保护与控制,2017,45(2):35-41.  
LI Dongdong,XU Lianlian,LIU Xiang,et al. Optimal dispatching of microgrid considering the participation of reducible loads,distributed generators (DG) and energy storage units[J]. Power System Protection and Control,2017,45(2):35-41.
- [20] 张洪财,胡泽春,宋永华,等.考虑时空分布的电动汽车充电负荷预测方法[J].电力系统自动化,2014,38(1):13-20.  
ZHANG Hongcai,HU Zechun,SONG Yonghua,et al. A prediction method for electric vehicle charging load considering spatial and temporal distribution[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(1):13-20.