可再生能源社区中的本地灵活性显式奖励机制

Thomas Stegen[1], Julien Allard[1],No´e Diffels[1,2],Franc¸ois Vall´ee[1],Mevludin Glavic[2],Zacharie De Gr`eve[1] 和 Bertrand Corn´elusse[2]1电力系统与市场研究组，蒙斯大学，比利时2蒙特菲奥里研究所，列日大学，比利时

arXiv:2601.05756v1 [eess.SY] 9 Jan 2026

摘要——激励终端用户灵活用电，是最大化可再生能源社区中本地交换价值的关键。如果对灵活资源规划进行集中式协调会引发数据隐私和收益公平分配方面的担忧，那么当前最先进的方法（例如双层方法、交替方向乘子法）通常会面临计算复杂度和凸性挑战，从而限制嵌入式灵活性模型的精确性。本文提出了一种迭代求解程序，用于解决由中央运营商在社区内担任协调者的分散式灵活性规划问题。社区运营商根据整体需求提出向上或向下灵活性需求，而成员则可分别针对灵活容量提出报价。该方法在确保个体最优性的同时收敛至全局最优；在一项20户居民案例研究中得到验证，其中分散式协调方案与集中式协调方案之间的集体账单差距不超过3.5%。

索引词—**分散式控制、配电网、能源社区、隐式灵活性、奖励机制**

表 I：模型变量

	Dim	Dom	Unit	描述
e^{com}	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	kW	社区外送功率
i^{com}	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	kW	社区输入功率
e^{ret}	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	kW	零售商输出功率
i^{ret}	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	kW	零售商输入功率
P^{PV}	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	kW	光伏发电功率
P^{cha}	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	kW	电池储能系统充电功率
P^{dis}	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	kW	电池储能系统放电功率
P^{inj}	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	kW	节点注入功率
P^{flex}	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	kW	柔性负荷功率
P^{EV}	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	kW	电动汽车充电功率
P^{WB}	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	kW	WB功率设定值
P^{HP}	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	kW	HP功率设定值
s^{EV}	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$[0,1]$	-	电动汽车荷电状态
T^{WB}	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	°C	WB水箱温度
T^{HP}	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	°C	热泵室内温度
J^{EV}	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	€	电动汽车灵活性带来的不适
J^{WB}	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	€	热水器灵活性带来的不适
J^{HP}	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	€	热泵灵活性带来的不适

I. 引言

可再生能源社区（REC）被提出作为一种自下而上的方式，以加速能源转型。事实上，可再生能源社区是一种很有前景的模式，能够通过促进本地能源

本研究得到 LECaaS项目、UNLEASH项目和 EFESproject 的支持。

表 II：模型的输入或参数

	Dim	Dom	Unit	描述
P^{fix}	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	kW	固定功耗
$\bar{P}^{PV}$	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	kW	最大光伏发电功率
C^{PV}	$\mathcal{U}$	$\mathbb{R}_+$	kWp	光伏额定功率
$s^{init,BSS}$	$\mathcal{U}$	$[0,1]$	-	电池初始荷电状态
C^{BSS}	$\mathcal{U}$	$\mathbb{R}_+$	kWh	电池容量
η^{BSS}	$\mathcal{U}$	$[0,1]$	-	电池效率
$\pi_e^{i,ret}$	$\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	€/千瓦时	零售商购电价格
$\pi_e^{,ret}$	$\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	€/千瓦时	零售商出口收益
γ^{com}	$\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	€/千瓦时	社区费用
P^{ref}	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	kW	参考灵活性负荷曲线
E^{Cap}	$\mathcal{U}$	$\mathbb{R}_+$	kWh	总灵活负荷
电动汽车				
a^{EV}	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\{0,1\}$	-	电动汽车接入
$t^{arr,EV}$	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\{0,1\}$	-	电动汽车到达
$t^{dep,EV}$	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\{0,1\}$	-	电动汽车离开
$s^{arr,EV}$	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$[0,1]$	-	电动汽车到达时的荷电状态
$s^{ref,EV}$	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$[0,1]$	-	电动汽车参考荷电状态
$P^{ref,EV}$	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	kW	参考曲线功率
$\bar{s}^{EV}$	$\mathcal{U}$	$[0,1]$	-	目标荷电状态
$s^{init,EV}$	$\mathcal{U}$	$[0,1]$	-	初始荷电状态
η^{EV}	$\mathcal{U}$	$[0,1]$	-	电池效率
C^{EV}	$\mathcal{U}$	$\mathbb{R}_+$	kWh	电池容量
$\bar{P}^{EV}$	$\mathcal{U}$	$\mathbb{R}_+$	kW	充电器最大功率
$\boldsymbol{\alpha}^{EV}$	$\mathcal{U}$	$\mathbb{R}_+$	€/千瓦时²	不适厌恶度
$E^{Cap,EV}$	$\mathcal{U}$	$\mathbb{R}_+$	kWh	总能耗
热水锅炉				
$T^{ref,WB}$	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	°C	参考温度
$T^{set,WB}$	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	°C	设定温度
$P^{l,WB}$	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	kW	围护结构热损失
$P^{u,WB}$	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	kW	用水损失
$P^{ref,WB}$	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	kW	参考功率
$\mathbf{t}^{u,\ WB}$	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\{0,1\}$	-	用水事件
$T^{init,WB}$	$\mathcal{U}$	$[0,1]$	-	初始温度
$C^{th,WB}$	$\mathcal{U}$	$\mathbb{R}_+$	°/千瓦时	热系数
$\bar{P}^{WB}$	$\mathcal{U}$	$\mathbb{R}_+$	kW	用水事件
$\boldsymbol{\alpha}^{WB}$	$\mathcal{U}$	$\mathbb{R}_+$	€/°h	不适厌恶度
$E^{Cap,\ WB}$	$\mathcal{U}$	$\mathbb{R}_+$	kWh	总能耗
热泵				
$T^{ref,\ HP}$	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	°C	参考温度
$T^{set,HP}$	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	°C	设定温度
$P^{l,HP}$	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	kW	墙体热损失
$P^{ref,HP}$	$\mathcal{U}\times\mathcal{T}$	$\mathbb{R}_+$	kW	参考曲线功率
$T^{init,HO}$	$\mathcal{U}$	$[0,1]$	-	初始温度
$C^{th,HP}$	$\mathcal{U}$	$\mathbb{R}_+$	°/千瓦时	热系数
$\bar{P}^{HP}$	$\mathcal{U}$	$\mathbb{R}_+$	kW	额定热功率
$\mathbf{COP}^{HP}$	$\mathcal{U}$	$\mathbb{R}_+$	-	性能系数
$\boldsymbol{\alpha}^{HP}$	$\mathcal{U}$	$\mathbb{R}_+$	€/°h	不适厌恶度
$E^{Cap,HP}$	$\mathcal{U}$	$\mathbb{R}_+$	kWh	总能耗

交换来降低配电网的运行压力，同时为其用户带来收益；与传统零售商之间的交易相比，这种交换在经济上更具优势。要充分释放住宅可再生能源社区的潜力，就必须激励终端用户灵活用电 [1], [2], [3]。一些研究指出，与单个消费者相比，可再生能源社区框架提高了消费者灵活用电的意愿 [4], [5]。此外，住宅负荷中低碳技术（电动汽车、热水锅炉和热泵）的普及率不断提高，增加了响应住宅需求的必要性和可能性 [6] ，而这些技术在住宅领域最大限度提升效用的潜力也已得到证实 [7]。

本文研究了对终端用户灵活资源进行协调管理，以最大化能源社区中本地套利的价值。为此，作者提出了一种直观的序贯方法，用于确定社区运营商的激活动作与成员独立提供的灵活容量之间的均衡。社区运营商通过请求容量与奖励价格这一对信号，激励能源社区成员调动其灵活性。消费者根据自身能力对这些明确信号作出理性响应；在本文中，这些能力由以下灵活负荷表示：热水锅炉、热泵和电动汽车。这些负荷无需用户交互即可实现内在可控；在配备这些设备时，它们构成家庭用能的重要部分。最后，除向能源社区参与者发送激励信号外，社区运营商还通过一种基于规则的方法，依据受监管要求约束的分摊规则（KoRs）对激活容量进行公平分配；该方法受比利时框架启发 [8], [9]。

在先前的工作中 [2], , 我们研究了如何通过奖励REC成员转移的电量和不适，来调动需求侧灵活性。为此，我们提出了一个两步模型：第一步优化激活所提供的灵活性，第二步则通过基于规则或基于优化的方法分配收益。在 [10] 中，相关工作将REC成员的集体能源消费与生产协调建模为一个带有耦合约束的混合整数线性问题。该优化问题采用分散式方式，并使用分解法求解。

交替方向乘子法（ADMM）已在 [11], [12] 中用于分布式优化。在 [11], 中，作者重点研究日前运行计划，并通过交替方向乘子法实现隐私保护计算；而 [12] 则探讨了如何提升 REC 的自我消纳率。后一项研究中，当电网购电功率低于预设阈值时，社区运营商与社区成员之间达成了均衡，而非着眼于满足用户偏好。

集体自发自用是 [9]的重点。本文提出了一种两阶段方法，将运行阶段与能源分配结算阶段解耦。在 [13] 中构建了一个双层模型，以解决考虑可再生能源不确定性和需求响应的调度问题，并重点关注电动汽车的灵活性潜力。

基于我们先前的研究 [2],，我们的目标是量化终端用户柔性资源采用集中式协调与分布式协调时，在最大化能源社区集体自给自足和自发自用方面所产生的集体成本节省差距。与上述研究相比，我们提出了一种直观且保护隐私的方法来解决分布式问题，该方法允许嵌入更精确（且可能非凸）的柔性电器模型，而这会显著增加当前最先进的双层模型和交替方向乘子法的计算复杂度。因此，我们的主要贡献如下：

1）我们提出一种兼顾隐私保护且直观的序贯方法，用于解决能源社区中灵活资源的分布式协调问题；2）我们实施并比较了明确的、基于规则的灵活性激活机制，该机制在分布式协调方案中采用符合监管要求的分配键；

为对灵活资源建模，我们将四种相关家用灵活性电器（电池、电动汽车、热泵、热水锅炉）的等效储能模型嵌入运行负荷调度问题中。

本文其余部分的安排如下：第二节介绍所提出工作的框架及相关关键假设。随后，第三节介绍集中式灵活性模型，并对灵活设备采用了相较于 [2] 更完善的建模方式；之后，第四节介绍所提出的直观序贯方法，以实现模型求解的去中心化。接着，第五节介绍案例研究并展示结果。最后，第六节给出主要结论。

II. 框架与关键假设

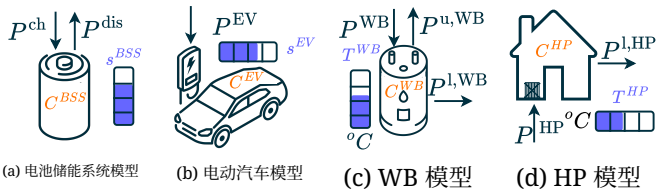
本文研究的对象是一个可再生能源社区（REC）实体，该实体由一组家庭消费者和产消者组成（即配备光伏设备的消费者），他们既可以相互交换电力，也可以与传统零售商进行电力交换。参与者之间本地电力共享的组织工作由社区运营商（CO）负责。除了确保社区内的本地平衡并对成员的基线电量交换进行计费外，CO还负责协调灵活性调度，这也是本文的主要研究重点。

为执行这一任务，在假设发电量和基线用电量均可完美预测的情况下，CO将识别社区当天在向上和向下方向上的灵活性需求，以最大化本地套利的价值。随后，CO将相关信息连同奖励价格传递给成员。能源社区成员根据这一容量—价格组合，向运营商申报灵活性容量（即基于负荷转移）。最后，CO通过应用分配键，明确激活所申报的容量。

下文将详细介绍本研究考虑的不同灵活负荷，以及为实现可再生能源社区内部灵活性的公平激活而比较的分配键。

A. 灵活负荷模型

随着能源需求电气化程度不断提高，终端用户消费曲线中的灵活性蕴含着新的开发机遇。在居民层面，本研究确定并考虑了三种主要设备：电动汽车（EVs）、热水锅炉（WBs）和热泵（HPs）。第一种设备接入电源后，可根据车主需求调整充电策略；后两种设备的灵活性则源自热需求的弹性，因为部分终端用户只要求温度处于舒适温度范围内，而非达到某个特定值。本研究将这三种灵活负荷类型（或相关需求）均建模为类似电池储能系统（BSS）的形式，如图1所示。这意味着每种负荷都具有一个状态变量（即电动汽车的电池荷电状态、锅炉水温和室内空气温度）、输入/输出电功率流，以及一个用于将功率交换转换为状态变化的容量（以千瓦时或 ℃为单位）。



(a) 电池储能系统模型　(b) 电动汽车模型　(c) WB 模型　(d) HP 模型

图 1：所考虑的四种家用灵活设备的等效电池模型。

B. 分配键

关于灵活性激活，社区运营商采用基于规则的方法。这些规则由分配键表示，通常用于在一些国家的成员之间分配当地可用能源（例如，瓦隆（比利时）或法国）。灵活性激活的一般分配键机制可表示为：

$$\mathrm{P}^{\mathrm{act}}_{u,t} = \min(k_{u,t}\mathrm{P}^{\mathrm{cap}}_{0,t}, \mathrm{P}^{\mathrm{cap}}_{u,t}) \qquad \forall u \in \mathcal{U}, t \in \mathcal{T} \quad (1)$$

其中，$\mathrm{P}^{\mathrm{cap}}_{u\,t\,,}$ 是每个成员申报的灵活功率容量，$\mathrm{P}^{\mathrm{cap}}_{0\,t\,,}$ 是社区运营商请求的容量，$\mathrm{P}^{\mathrm{act}}_{u\,,\,t}$ 是每个成员已激活的灵活功率，$k_{u,\,t}$ 是每个成员的分配键值。

在现有的 KoRs 中， [8], [9],三种特定机制（即均分、按比例分配和级联）会被纳入考虑，并针对灵活性成员之间的收益分配进行比较。其原则定义如下：

1）均分键：该键最为简单，它将请求的灵活容量在提供个人灵活容量的参与者之间进行均等分配。

$$k_{u,t} = \begin{cases} \frac{1}{|\mathcal{U}^{flex}_t|} & \forall u \in \mathcal{U}^{flex}_t, \forall t \in \mathcal{T}, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

与 $\mathcal{U}^{flex}_t = \{u \in \mathcal{U} | \mathrm{P}^{\mathrm{cap}}_{u\,,t} > 0\}$ 在期间 t 申报灵活容量的可再生能源社区参与者集合。

2) 比例分摊键：此键根据每个成员申报的容量，$\mathrm{P}^{\mathrm{cap}}_{u\,t\,,}$，按比例分配其灵活性容量，使其与可再生能源社区内可用的总容量相对应。

$$k_{u,t} = \frac{\mathrm{P}^{\mathrm{cap}}_{u,t}}{\sum_{u\in\mathcal{U}} \mathrm{P}^{\mathrm{cap}}_{u,t}} \quad \forall u \in \mathcal{U}, \forall t \in \mathcal{T}. \quad (3)$$

3）级联键：该键通过迭代应用均分键，以最大化激活容量并满足请求。在每次迭代中，根据每个成员在前几轮激活后剩余的未激活容量，重新计算灵活性提供者集合 $\mathcal{U}^{flex}_t$。当不再有申报容量或社区运营商的请求得到满足时，该过程停止。在每个时间段$t \in \mathcal{T}$内，级联键的实际应用遵循算法1。

算法1： 级联键原理

输入：$\mathrm{P}^{\mathrm{cap}}_{u\,t\,,}, \mathrm{P}^{\mathrm{cap}}_{0\,t\,,}$, 1 初始化剩余的个体灵活容量和请求灵活容量：2 $\mathrm{P}^{\mathrm{cap\,rem}}_{u\,,\,t} = \mathrm{P}^{\mathrm{cap}}_{u\,,\,t} \quad \forall u \in \mathcal{U}$; 3 $\mathrm{P}^{\mathrm{cap\,rem}}_{0\,,\,t} = \mathrm{P}^{\mathrm{cap}}_{0\,t\,,}$; 4 初始化个体激活容量：5 $\mathrm{P}^{\mathrm{act}}_{u\,,t} = 0 \quad \forall u \in \mathcal{U}$; 6 当 $\sum_{u\in\mathcal{U}} \mathrm{P}^{cap\,rem}_{u\,,\,t} > 0$ 且 $\mathrm{P}^{cap\,rem}_{0\,,\,t} > 0$ 时 7 计算剩余灵活性提供者的数量：8 $\mathcal{U}^{flex}_t = \{u \in \mathcal{U} | \mathrm{P}^{\mathrm{cap\,rem}}_{u\,,\,t} > 0\}$; 9 应用均分键以激活灵活性：$\mathrm{P}^{\mathrm{act}}_{u\,,t} = \max(\mathrm{P}^{\mathrm{cap}}_{u\,t}, \mathrm{P}^{\mathrm{act}}_{u\,,t} + \mathrm{P}^{\mathrm{cap\,rem}}_{0\,,\,t} / |\mathcal{U}^{flex}_t|) \quad \forall u \in \mathcal{U}$; 10 更新剩余的个体灵活容量和请求灵活容量：11 $\mathrm{P}^{\mathrm{cap\,rem}}_{u\,,\,t} = \mathrm{P}^{\mathrm{cap}}_{u\,,t} - \mathrm{P}^{\mathrm{act}}_{u\,,t} \quad \forall u \in \mathcal{U}$; 12 $\mathrm{P}^{\mathrm{cap\,rem}}_{0\,,\,t} = \mathrm{P}^{\mathrm{cap}}_{0\,,\,t} - \sum_{u\in\mathcal{U}} \mathrm{P}^{\mathrm{act}}_{u\,,t}$;

13 结束

III. 集中式灵活性激活问题

在前期工作 [2], 的基础上，本节介绍日前协调式集中式能源社区最优运行规划问题的数学表述，并对所考虑的三种灵活设备（即电动汽车、热泵和热水器）进行状态空间建模。该问题旨在通过调度可控负荷的使用，在考虑负荷转移造成的不适的同时，利用本地光伏发电，最大限度地降低可再生能源社区的电费。该完整问题记为 *ECFlex*，表示如下：

$$\min_{\mathbf{\Omega}} \quad \sum_{u\in\mathcal{U}} (\mathrm{B}_u + \mathrm{J}^{\mathrm{flex}}_u) \quad (4a)$$

满足：

$$\mathrm{B}_u = \Delta_T \sum_{t\in\mathcal{T}} (\pi^{\mathrm{i,ret}}_{u,t} \mathrm{i}^{\mathrm{ret}}_{u,t} - \pi^{\mathrm{e,ret}}_{u,t} \mathrm{e}^{\mathrm{ret}}_{u,t} + \gamma^{\mathrm{com}} (\mathrm{i}^{\mathrm{com}}_{u,t} + \mathrm{e}^{\mathrm{com}}_{u,t})), \quad \forall u \in \mathcal{U} \quad (4b)$$

$$\mathrm{J}^{\mathrm{flex}}_u = \sum_{t\in\mathcal{T}} (\mathrm{J}^{\mathrm{EV}}_{u,t} + \mathrm{J}^{\mathrm{WB}}_{u,t} + \mathrm{J}^{\mathrm{HP}}_{u,t}), \quad \forall u \in \mathcal{U} \quad (4c)$$

$$\mathrm{P}^{\mathrm{inj}}_{u\,,\,t} = \mathrm{P}^{\mathrm{dis}}_{u\,,\,t} - \mathrm{P}^{\mathrm{cha}}_{u\,,\,t} - \mathrm{P}^{\mathrm{flex}}_{u\,,\,t} - \mathrm{P}^{\mathrm{cha}}_{u\,t,}, \quad \forall u \in \mathcal{U}, t \in \mathcal{T} \quad (4d)$$

$$\mathrm{P}^{\mathrm{inj}}_{u,t} = \mathrm{e}^{\mathrm{ret}}_{u,t} + \mathrm{e}^{\mathrm{com}}_{u,t} - \mathrm{i}^{\mathrm{ret}}_{u,t} - \mathrm{i}^{\mathrm{com}}_{u,t}, \quad \forall u \in \mathcal{U}, t \in \mathcal{T} \quad (4e)$$

$$\sum_{u\in\mathcal{U}} \mathrm{e}^{\mathrm{com}}_{u,t} = \sum_{u\in\mathcal{U}} \mathrm{i}^{\mathrm{com}}_{u,t}, \quad \forall t \in \mathcal{T} \quad (4f)$$

$$\mathrm{P}^{\mathrm{cha}}_{u,} \leq \bar{\mathrm{P}}^{\mathrm{BSS}}_{u}, \quad \forall u \in \mathcal{U}, \ t \in \mathcal{T} \quad (4g)$$

$$P_{u,t}^{dis} \le \bar{P}_u^{BSS}, \quad \forall u \in \mathcal{U}, t \in \mathcal{T} \text{(4小时)}$$

$$s_u^{BSS} \le s_{u,t}^{BSS} \le \bar{s}_u^{BSS}, \quad \forall u \in \mathcal{U}, t \in \mathcal{T} \quad (4i)$$

$$s_{u,t}^{BSS} = s_{u,t}^{prev\,BSS} + \Delta_T(\eta_u^{BSS} P_{u,t}^{cha} - P_u^{dis}) / C_u^{BSS}, \quad \forall u \in \mathcal{U}, t \in \mathcal{T} \quad (4j)$$

$$s_{u,T}^{BSS} = s_u^{init,BSS}, \quad \forall u \in \mathcal{U} \quad (4k)$$

$$P_{u,t}^{flex} = P_{u,t}^{EV} + P_{u,t}^{WB} + P_{u,t}^{HP}, \quad \forall u \in \mathcal{U}, t \in \mathcal{T} \quad (4l)$$

$$P_{u,t}^{EV} \le \bar{P}_u^{EV}, \quad \forall u \in \mathcal{U} \quad (4m)$$

$$s_{u,t}^{EV} = a_{u,t}^{EV} s_{u,t}^{arr} + (1 - a_{u,t}^{EV}) s_{u,t}^{prev} + \Delta_T \eta_u^{EV} P_{u,t}^{EV} / C_u^{EV}, \quad \forall u \in \mathcal{U}, \ t \in \mathcal{T} \quad (4n)$$

$$t_{u,t}^{dep\,EV} s_{u,t}^{ref\,EV} \le s_{u,t}^{EV} \le 1, \quad \forall u \in \mathcal{U}, t \in \mathcal{T} \quad (4o)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} P_{u,t}^{EV} = \sum_{t \in \mathcal{T}} P_{u,t}^{ref,EV}, \quad \forall u \in \mathcal{U} \quad (4p)$$

$$J_{u,t}^{EV} \ge \alpha_u^{EV} \left(s_{u,t}^{ref,EV} - s_{u,t}^{EV} \right), \quad \forall u \in \mathcal{U}, t \in \mathcal{T} \quad (4q)$$

$$P_{u,t}^{WB} \le \bar{P}_u^{WB} \quad \forall u \in \mathcal{U}, t \in \mathcal{T} \quad (4r)$$

$$T_{u,t}^{WB} = T_u^{prev\,WB} + \Delta_T(P_{u,t}^{WB} - P_u^{u,WB}) / C_u^{th\,WB}, \quad \forall u \in \mathcal{U}, \ t \in \mathcal{T} \quad (4s)$$

$$T_{u,t}^{WB} \ge t_{u,t}^{u\,WB} T_{u,t}^{lim\,WB}, \quad \forall u \in \mathcal{U}, t \in \mathcal{T} \quad (4t)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} P_{u,t}^{WB} = \sum_{t \in \mathcal{T}} P_{u,t}^{ref,WB}, \quad \forall u \in \mathcal{U} \quad (4u)$$

$$J_{u,t}^{WB} \ge \alpha_u^{WB} (T_{u,t}^{lim,WB} - T_{u,t}^{WB}), \quad \forall u \in \mathcal{U}, \ t \in \mathcal{T} \text{(4v)}$$

$$P_{u,t}^{HP} \le \bar{P}_u^{HP}, \quad \forall u \in \mathcal{U}, \ t \in \mathcal{T} \text{(4w)}$$

$$T_{u,t}^{HP} = T_u^{prev\,HP} + \Delta_T(COP_u^{HP} P_u^{HP} - P_{u,t}^{l\,HP}) / C_u^{th\,HP}, \quad \forall u \in \mathcal{U}, t \in \mathcal{T} \quad (4x)$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} P_{u,t}^{HP} = \sum_{t \in \mathcal{T}} P_{u,t}^{ref,HP}, \quad \forall u \in \mathcal{U} \quad (4y)$$

$$J_{u,t}^{HP} \ge \alpha_u^{HP} (T_{u,t}^{lim\,HP} - T_{u,t}^{HP}) 。 \quad \forall u \in \mathcal{U}, t \in \mathcal{T} \quad (4z)$$

其中 $\boldsymbol{\Omega} = [P^{cha}, P^{dis}, P^{EV}, P^{WB}, P^{HP}, i^{com}, e^{com}]$ 是社区运营商根据参与者输入确定的决策变量。关于目标函数，(4b)描述了电费的组成部分：从外部零售商购买补充电力的成本、出售剩余产能所得的收益，以及社区能源交换的运营成本（例如用于支付 CO 工作量补偿或电网费用）。公式(4c)表明，灵活使用所考虑的三类资产可能会带来不适，后文将对此作具体说明。(4d)–(4f)分别表示能源社区成员与电网在公共耦合点处的物理功率平衡、本地交换与外部交换之间的经济平衡，以及社区层面购入与售出电量之间的平衡。对于电池储能系统，(4g)–(4i)对受控功率和电池荷电状态变量施加物理边界，而(4j)则表示电池荷电状态随时间变化的动态，其中 $s_{u,t}^{prev\,BSS}$ 等于 $s_{u,t-1}^{BSS}$，但时间段 $t = 1$ 除外，该时段采用初始水平 $s_u^{init\,BSS}$。通过(4k)要求在优化周期结束时恢复至该初始水平。最后，图1所示的灵活设备模型也以类似方式转化为数学约束，所有设备的功耗则在(4l)中汇总到灵活功率变量下。首先，(4m)、(4r) 和 (4w) 根据设备额定值（以及充电点是否有电动汽车）设定功率上限。(4n)、(4s) 和 (4x) 分别描述电动汽车、热水器和热泵状态变量的演变，即车辆电池的荷电状态、热水温度和环境空气温度。这些变量的演变均受消耗的电功率、最终能源使用和耗散损耗影响。与电池储能系统类似，上标 prev 对应于 $t-1$ 时的状态，但 $t = 1$ 除外；对于 $t = 1$，需要设定一个初始参考状态（即，电动汽车的 $s_{u\,1}^{ref\,EV}$，热水器的 $T_{u\,1}^{lim\,WB}$，以及热泵的 $T_{u\,1}^{lim\,HP}$）。此外，在 (4n) 中，当车辆抵达充电站时，其荷电状态会在行程结束后更新。(4o) 和 (4t) 分别确保电动汽车在出发时间达到目标充电水平，以及热水在使用时达到要求的温度。最后，(4p)、(4u) 和 (4y) 保证相对于参考值的每日负荷保持恒定，因为只允许负荷转移；(4q)、(4v) 和 (4z) 则定义了未达到目标状态时的线性不适度响应。

其他基准模型

为了评估最优灵活设备协调所带来的本地套利收益，必须定义基准框架。本文研究了另外三种模型，它们通过在问题 (4) 中添加特定约束得出。

1) 基准问题（*SoloFix*）：这是基准情形，与独立终端用户模型的概念相关联（即，没有本地共享活动），且不涉及灵活性问题（即，采用固定功耗曲线）。这一典型情形作为后续模型的基准。该模型通过在问题 (4) 中添加以下约束得到：

$$e_{u,t}^{com} = i_{u,t}^{com} = 0 \quad \forall u \in \mathcal{U}, t \in \mathcal{T} \quad (5a)$$

$$P_{u,t}^{flex} = P_{u,t}^{ref,EV} + P_{u,t}^{ref,WB} + P_{u,t}^{ref,HP} \quad \forall u \in \mathcal{U}, t \in \mathcal{T} \quad (5b)$$

2) 个人自发自用问题（*SoloFlex*）：随后，第二个基准模型纳入参与者的灵活性潜力，以利用个人本地可再生能源发电并最大限度地提高其自发自用量。与基准问题相比，该情形仅在问题 (4) 中添加约束 (5a)。

3) 非灵活性社区问题（*ECFix*）：最后，可以构建一个集体问题，但不涉及灵活资源的管理，电池除外。从数学角度来看，该情形通过添加非灵活性约束 (5b) 对问题 (4) 进行调整，同时允许本地电力交换。

4) 优先考虑个人自发自用（*ECFlex*’）：通常用作比较基准，例如在 [2]，*SoloFlex* 模型中；也可以将其视为协调式灵活性规划之前的初步行动。本文通过将个人自发自用问题中得到的 P^{EV}、P^{WB}&P^{HP}输出值替换可控电器的参考功耗曲线，研究了这一方面。在这一新的

框架下，在采取 EC 的协调式灵活性行动[1]之前，设计上优先考虑个人自发自用。在后续模型中使用这些新的参考功率时，将以撇号表示（$P'^{\text{ref EV}}_{u,t}$、、、$P'^{\text{ref WB}}_{u,t}$、、、$P'^{\text{ref HP}}_{u,t}$、）。

IV. 提出的分布式求解方法

尽管集中式方法能够保证集体最优性，如 [2], 所述，但它会引发隐私问题，并限制终端用户积极参与灵活性提供。后者还可能对收益分配公平性产生负面影响，因为这种方法可能根据个人拥有的资源而非其参与意愿优先考虑某些人。为缓解这一问题，作者将在下文介绍第三节所述灵活性激活问题的分布式求解方法。

首先，将决策变量集拆分为 $\Omega_u = [P^{cha}, P^{dis}, P^{EV}, P^{WB}, P^{HP}, P^{cap,+}, P^{cap,-}]$，它们是REC成员的个体决策变量；而 $\Omega_{CO} = [P^{com}_{u,t}, P^{com}_{u,t}, P^{act,+}_{u,t}, P^{act,-}_{u,t}]$，$i^{ret}_{0,t}$, $e^{ret}_{0,t}$, $P^{ref}_{u,t}$, $P^{flex}_{u,t}$, $P^{cha}_{u,t}$, $P^{dis}_{u,t}$ 则是社区运营商的决策变量。接着，将 $i^{ret}_{0,t}$ 和 $e^{ret}_{0,t}$ 分别定义为REC公共耦合点（PCC）处的净输入和净输出，它们表示非灵活社区问题求解后得到的集体外部交换。如算法2所示，它们作为社区运营商在每个时间步的初始向下和向上灵活性请求（即容量限制）。第三个输入是灵活设备参考功率总和 $P^{ref}_{u,t} = P^{flex}_{u,t} + P^{cha}_{u,t} - P^{dis}_{u,t}$。

一旦社区运营商确定了可再生能源社区的初始灵活性需求，终端用户将提供灵活容量，并由运营商反复进行验证（或不予验证），直至集体层面不再存在灵活性请求（即，不再有可加以利用的本地发电量），或没有成员愿意提供额外的灵活容量。

在每次迭代中，可再生能源社区成员与社区运营商之间会就灵活性的激活进行双向通信，具体包括以下三个步骤：

1) 根据社区层级灵活性请求，每位成员都试图通过向社区运营商提交容量报价，使其灵活性提供所带来的收益最大化，同时知晓每转移 1 千瓦时可获得 $\pi^{act} = \pi^{i,ret} - \pi^{e,ret} - 2\gamma^{com}$。这些个体问题受到灵活资源运行约束集合以及以下附加约束的限制：

$$P^{cap,+/-}_{u,t} \le \bar{P}^{cap,+/-}_{0,t}, \qquad \forall u \in \mathcal{U}, t \in \mathcal{T}, \quad (6a)$$

$$\sum_{t\in\mathcal{T}} P^{cap,+}_{u,t} = \sum_{t\in\mathcal{T}} P^{cap,-}_{u,t}, \qquad \forall u \in \mathcal{U}, \quad (6b)$$

$$P^{flex}_{u,t} = P^{ref}_{u,t} + P^{cap,+}_{u,t} - P^{cap,-}_{u,t}, \qquad \forall u \in \mathcal{U}, t \in \mathcal{T}. \quad (6c)$$

2) 社区运营商获得的容量报价未考虑其他成员的决策。它们是按照每个终端用户都是可再生能源社区唯一成员的情况提供的。因此，为确保每个人都公平地为灵活性激活作出贡献，运营商会细化个人激活边界，$\bar{P}^{act,+/-}_{u,t}$，通过使用第II-B节所定义的分配键机制，将灵活性需求分配给各成员。

3) 最后，由于为每个时间步新计算的个体边界不一定能确保约束条件 (6b) 得到满足，消费者使用更新后的边界再次求解灵活性收益最大化问题，如下所示：

$$P^{cap,+/-}_{u,t} \le \bar{P}^{act,+/-}_{u,t}, \qquad \forall u \in \mathcal{U}, t \in \mathcal{T}. \quad (7)$$

由此产生的灵活资源使用决策将被有效激活，并为下一次迭代设定新的基准用电量。从社区运营商的角度来看，能源社区层面的请求将进行更新，以考虑已激活的灵活性。

算法2： 拟议的去中心化协调算法 *ECFlexIt*

输入： i^{ret}_0, e^{ret}_0, P^{ref}

将社区运营商的初始灵活性请求设为能源社区成员报价的上限：成员报价：

$\bar{P}^{cap,+}_{0,t} \leftarrow e^{ret}_{0,t} \quad \forall u \in \mathcal{U}, t \in \mathcal{T}$；

$\bar{P}^{cap,-}_{0,t} \leftarrow i^{ret}_{0,t}$；$\Delta\bar{P}^{cap,+}_{0,t} \leftarrow 0 \quad \forall u \in \mathcal{U}, t \in \mathcal{T}$；**当** $\bar{P}^{cap,+/-}_{0,t} > 0$ 且 $\Delta\bar{P}^{cap,+/-}_{0,t} > 0$ **时执行**

  对每个 $u \in \mathcal{U}$ **执行**

    个体求解灵活性容量问题：

    $P^{cap,+/-}_{u,t} \leftarrow \{$ 最大化 $\sum_{\Omega_u} \sum_{t\in\mathcal{T}} P^{+cap}_{u,t} \pi^{act} \Delta_T - J^{flex}_u$，满足（4g）–(4z),(6a) –(6c)$\}$；

  end

  社区运营商应用分配键来定义个体灵活性激活边界：$\bar{P}^{act,+/-}_{u,t} \leftarrow KoR(P^{cap,+/-}) \quad \forall u \in \mathcal{U}, t \in \mathcal{T}$；

  对每个 $u \in \mathcal{U}$ **执行**

    每个成员根据新的个体限制激活其灵活性：$P^{act,+/-}_{u,t} = P^{cap,+/-}_{u,t} \leftarrow \{$ 最大化 $\sum_{\Omega_u} \sum_{t\in\mathcal{T}} P^{+cap}_{u,t} \pi^{act} \Delta_T - J^{flex}_u$，满足条件 (4g) –(4z), (6b) –(6c), (7)$\}$；

    激活的灵活性将纳入通过更新参考负荷曲线：$P^{ref}_{u,t} \leftarrow P^{ref}_{u,t} + P^{act,+}_{u,t} - P^{act,-}_{u,t}$；

  end

  社区运营商更新其 EC 级灵活性请求，并跟踪激活容量：

  $\bar{P}^{cap,+}_{0,t} \leftarrow \bar{P}^{cap,+}_{0,t} - \sum_{u\in\mathcal{U}} P^{act,+/-}_{u,t}, \quad \forall u \in \mathcal{U}, \forall t \in \mathcal{T}$；

  $\Delta\bar{P}^{cap,+/-} \leftarrow \sum_{u\in\mathcal{U}} \sum_{t\in\mathcal{T}} P^{act,+/-}_{u,t}$；

结束

[1]请注意，问题（4）的不适函数中未调整状态变量参考值，这意味着个体灵活性行动所造成的不适会传递到协调问题中。

V. 案例研究与结果

本节给出了全年仿真的详细结果，并将所提出的分布式求解方法的经济和能源使用性能，与第三节介绍的基准模型以及 [2] 中提出的集中式方法进行了比较。

所研究的能源社区由20户家庭组成，其非柔性和柔性组件均使用随机住宅负荷曲线生成器*Resflex* [14]生成。四类柔性

资产在20户家庭中的渗透率分别为：热水器70%、电动汽车60%、热泵50%和电池储能系统25%。其中，15户家庭还安装了容量范围为2至20千瓦的光伏装置^{peak}，社区层面的总容量为147千瓦^{peak} 。在电价方面，仅考虑固定电价：购电价格（包括零售和电网费用）为0.4 C/千瓦时，售电价格为0.1 C/千瓦时，社区运营商收取的社区费用为0.01 C/千瓦时。因此，每激活1千瓦时灵活性所获得的奖励值提高至0.28 C/千瓦时。

社区成员会对其柔性电器（电动汽车充电和 HP/WB 温度设定点及预测损耗）的使用进行日前规划，并通过顺序求解每日问题，对模型进行为期一整年的模拟。最后，针对所研究的不同情景开展事后 </style潮流分析，假设可再生能源社区参与者接入基准低压配电网 [15]。

表 III：所选情景的结果汇总。

	SoloFlex	ECFix	ECFlex	ECFlexIt	ECFlexIt'
[€]					
B	6,549	6,831	5,243	5,576	5,412
J^{EV}	79	0	188	36	802
J^{WB}	0	0	0	0	0
J^{HP}	0	0	0	0	0
[兆瓦时]					
E^{act}	40.6	0	44.9	23.7	12.7
$E^{act,EV}$	2.3	0	4.1	0.8	0.6
$E^{act,WB}$	27.4	0	30.7	17.1	8.5
$E^{act,HP}$	10.9	0	10.2	5.9	3.6
$E^{dis,BSS}$	7.3	10.2	7.4	10.1	8.6

A. 保护隐私并不意味着效益大幅损失

本研究的一项关键发现是，第四节所述的协调式分布式迭代方法会收敛至先前工作中提出的集中式方法 [2]。如图2所示，所提出的*ECFlex* 和 *ECFlexIt'* （即，采用或不采用个人优先级设置，并使用均分键）模型能够对决策过程完全由社区运营商协调的情形进行较为接近但并非最优的近似。事实上，如表 III 所示，仍存在一定的计费效率损失：与集中式基准相比，整体社区成本分别偏差 6.35% 和 3.22%。尽管如此，这种偏差是提升用户隐私并将决策过程分散给社区成员所需付出的代价，从而确保与运营商优化可再生能源社区整体结果的完全集中式情形相比，能够更明确地考虑个人偏好。

此外，还应考察目标函数的另一项组成部分，即所产生的不适
通过灵活性资源的激活。从这一角度来看，表 III 中观察到的首个有趣结果是，尽管 α^{HP} 和 α^{WB} 均等于 1，热水锅炉和热泵仍有潜力在不造成任何不适的情况下激活大量灵活性（热水器最高可达 30.7%，热泵最高可达 10.2%）这是因为只有低于参考温度的情况才会受到惩罚。这样一来，热力资产便可将晚间用电转移至太阳能

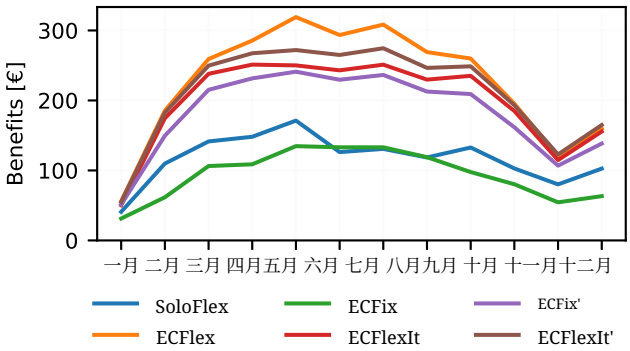


图 2：SoloFix 模型的总收益

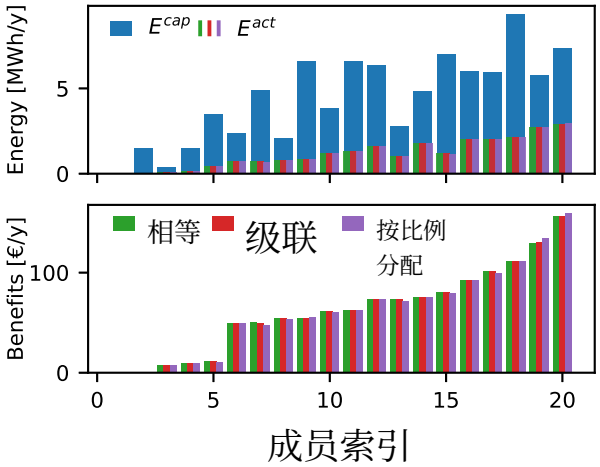


图3：与固定用电量的社区相比，收益的个性化分配

时段，通过将水和空气“过热”，使其在一天结束时缓慢冷却，同时不低于限值。这凸显了除典型电池储能系统之外的其他资产也能以低成本或几乎零成本提供灵活性的潜力；而在此类研究中，电池储能系统往往是唯一被考虑的灵活资源。

另一方面，调整电动汽车的充电功率只会带来不适成本，因为这会延迟充满电的时间，并限制预期的出发时间灵活性。因此，只有在其他资产的潜力不足以利用当地可用的整体产能时，才会采用这种方式。

综合比较不同情景还可以发现，在分散式框架中，若未优先考虑自发自用，在启用其他灵活性手段之前先使用储能系统，会限制后者发挥作用。相反，集中式方法可以直接在闲置的热水器和热泵所提供的灵活性与效率不完美的电池系统（即 95 % 的效率）之间进行套利。优先考虑个人自发自用，则可以先在个人层面进行类似的套利，再协调响应社区运营商剩余的灵活性请求。

B. KoRs 对公平收益分配的影响有限

所提出的分布式求解方法已应用于第二节B部分所介绍的不同收益分配方案，且未进行优先级排序，以评估其对个人收益分配的影响。

然而，图3所示结果表明，就柔性能源激活及由此产生的收益而言，三种不同的分配机制之间差异非常小。事实上，正如上一节结果中所讨论的，个人参与柔性协调过程的主要驱动因素是其所拥有的柔性资产。因此，仅拥有电动汽车的用户（图3中的用户2）可能具有较大的灵活容量（即其所拥有柔性资产的总消耗量），E^{cap}，但由于这会造成不适，他们往往会向运营商提供有限的容量。与此同时，同时拥有两种热力资产（热水器和热泵）的REC成员（例如图3中的用户20）可以在不产生负面影响的情况下提供其大部分灵活容量，从而提高其经济收益。关于热泵，需要指出的是，当仅将其用于家庭供暖时，其在夏季时段的作用有限；而拥有热水器的家庭用户则表现出最高的本地交换潜力。

尽管如此，所选的分配键会影响迭代过程的收敛性，因为级联激活和比例激活会在每一步调度所有可用的灵活性，从而减少所需的迭代次数。

表IV：优先级排序的影响

	采用自优先级排序				不采用优先级排序			
	B [k€]	Δ B	J [€]	E^{act}	B [k€]	Δ B	J [€]	E^{act}
SoloFix	7.9				7.9		0	0
SoloFlex	6.5	-1.4	79	40				
ECFix	5.7	-0.8	79	40	6.8	-1.1	0	0
ECFlexIt	5.4	-0.3	803	53	5.6	-1.2	37	24

C. 电网灵活性影响需要明确的激励机制

就电网性能而言，观察发现，在允许激活灵活性的情景中，年度平均指标有所改善。具体来说，在所研究的配电网中，总功率损耗从840千瓦时（*ECFix*）降至690千瓦时（*ECFlex'*），提升了本地电网效率。此外，灵活性机制的激活使与上游电网双向交换的电能（包括输入和输出电能）减少约12兆瓦时。社区自发自用和自给自足能力的提升也有益于整个电网，因为这减少了上游线路中的功率流。

VI. 结论

本研究旨在提出一种直观的求解方法，用于协调可再生能源社区内的灵活资源，以解决典型集中式方法（如 [2] 中提出的方法）所引发的隐私问题，同时避免增加先进的双层优化或交替方向乘子法技术带来的计算负担。在一个由 20 户家庭用户组成的案例研究中，结果表明，集体收益可接近集中式协调所获得的水平，最佳情况下仅有 3.22% 的差异。作者还指出，热水锅炉和热泵等热负荷是很有前景的灵活资源，因为智能管理能够改善其使用方式，同时不会给成员带来任何不适。最后，对多种用于激活所提供灵活容量的分配键机制进行研究后发现，这些机制之间并无显著差异，因为个人收益分配主要取决于灵活资产所有权。

参考文献

[1] P. Pannaganti, R. Sinha, J. R. Pillai, and B. Bak-Jensen, 《通过本地能源社区提供灵活性：综述》，*Next Energy*，第1卷，第100022页，2023年。[2] J. Allard, F. Vall´ee, Z. De Gr`eve, T. Stegen, M. Glavic, and B. Corn´elusse, 《量化、激活并奖励可再生能源社区中的灵活性》，载于*2024*年*IEEE PES*欧洲创新智能电网技术会议，2024年，第1–5页。[3] M. Askeland, S. Bjarghov, R. Rana, A. Morch, and H. Taxt, 《能源社区中的智能灵活性：配电网影响与经济影响的情景分析》，*Smart Energy*，第18卷，第100184页，2025年。[4] T. Luzzati et al., 《能源社区成员比个人产消者更灵活吗？来自严肃游戏的证据》，*Journal of Cleaner Production*，第444卷，第141114页，2024年。[5] A. Dudka, 《通过能源社区进行产消的关系方法：法国CIREN案例》，*Energy Policy*，第206卷，114761，2025年。[6] J. L. Mathieu et al., 《分布式能源资源时代需求响应的新定义与研究议程》，*IEEE*能源市场、政策与监管汇刊，第3卷，第324–339页，2025年。[7] I. Lopez, N. Goitia-Zabaleta, A. Milo, J. Gomes-Cornejo, I. Aranzabal, H. Gaztanaga, and E. Fernandez, 《欧洲能源社区：特征、趋势、商业模式与法律框架》，*Renewable and Sustainable Energy Reviews*，第197卷，第114403页，2024年。[8] CWAPE, 《能源共享（法语）》，https://www.cwape.be/node/ 访问日期：--。[9] A. D. Mustika, R. Rigo-Mariani, V. Debusschere, and A. Pachurka, 《采用集体自发自用的能源社区最优运行与计费两阶段管理策略》，*Applied Energy*，第310卷，2022年。[10] I. Dukovska, J. G. Slootweg, and N. G. Paterakis, 《通过分布式混合整数线性规划实现电力产消者社区的分布式协调》，*IEEE*电力系统汇刊，第36卷，5589，2021年，第5578–页。[11] S. Lilla, C. Orozco, A. Borghetti, F. Napolitano, and F. Tossani, 《本地能源社区日前调度：一种交替方向乘子法》，*IEEE*电力系统汇刊，第35卷，第1132–1142页，2020年。[12] M. Stephant, D. Abbes, K. Hassam-Ouari, A. Labrunie, and B. Robyns, 《通过优化能源曲线提升本地能源社区的光伏自发自用》，*Simulation Modelling Practice andTheory*，第108卷，第102242页，2021年。[13] Y. Li, M. Han, Z. Yang, and G. Li, 《协调灵活需求响应与可再生能源不确定性，对配备电动汽车充电站的社区综合能源系统进行调度：一种双层方法》，*IEEE*可持续能源汇刊，第12卷，第2321–2331页，2021年。[14] T. Stegen, J. Castiaux, N. Diffels, M. Duchesne, and B. Corn´elusse, 《用于评估电价和需求响应对配电网及能源账单影响的住宅灵活负荷曲线生成器》，载于第*28*届电力配电会议暨展览会（*CIRED 2025*），2025年。[15] J. Dickert, M. Domagk, and P. Schegner, 《基于实际电网特性聚类分析的基准低压配电网》，载于*2013*年*IEEE*格勒诺布尔*Powertech*会议，2013年，第1–6页。