综合能源局域网聚合商的能量管理平台

Energy management platform for aggregators in integrated local energy systems

刘学智

liuxz@sjtu.edu.cn

2020年8月7日

饮 水 思 源 • 爱 国 荣 校

SNEC
ENERGY STORAGE
HYDROGEN EXPO

上海交通大學
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

目录

1 聚合商介绍

2 聚合商模型

3 算例分析

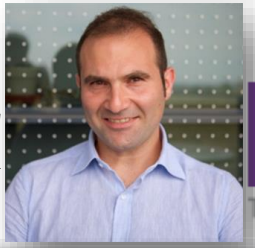
刘学智个人简介

2016 – 至今 **上海交通大学，电子信息与电气工程学院电气工程系，讲师 /硕士生导师**

2013 – 2015 **英国曼彻斯特大学 电气与能源工程 博士后**

导师：Pierluigi Mancarella，方向：综合能源系统

参与欧盟FP7项目DIMMER (District Information Modelling and Management for Energy Reduction)



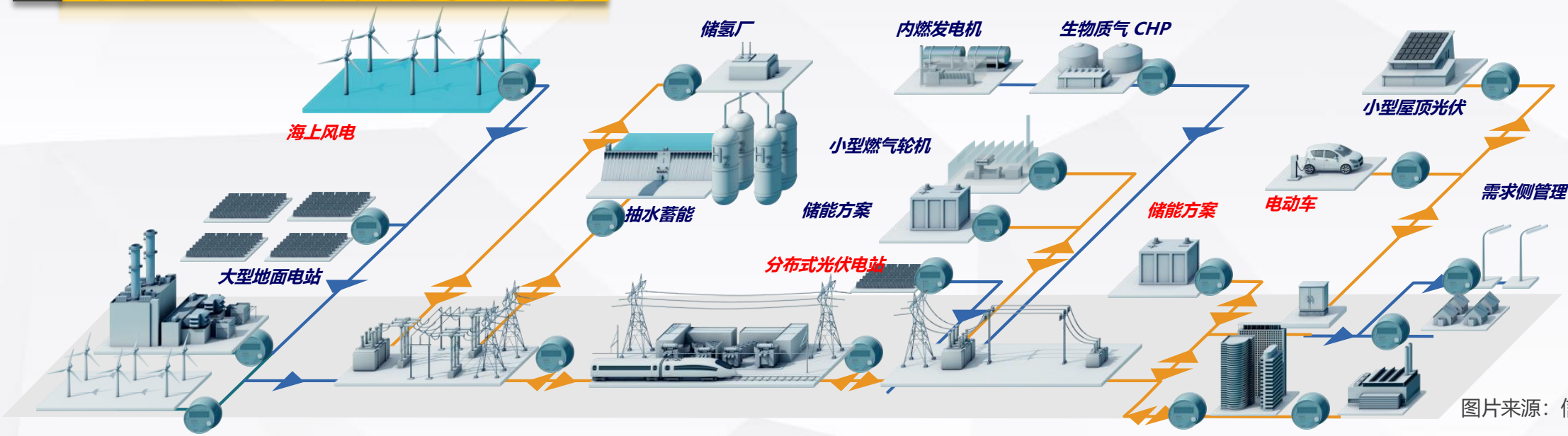
2010 – 2013	**英国卡迪夫大学 电气与能源工程 博士** 导师：Nick Jenkins 教授(**英国皇家工程院院士，IEEE Fellow**) 博士论文：电网与热网的联合分析，英国自然科学研究委员会EPSRC HiDEF (Highly Distributed Energy Future) 项目资助
2008 – 2010	**武汉大学电气工程学院 硕士（免试推荐）**
2007 – 2008	**台湾义守大学电机工程系 交换生**
2003 – 2007	**武汉大学电气工程学院 学士**

2015 伦敦政治经济学院-北京大学LSE-PKU暑期学校

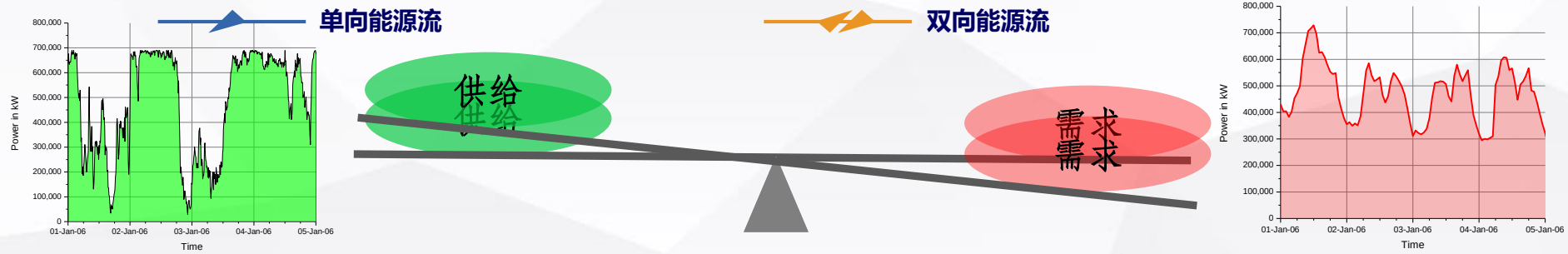
2012 英国能源研究中心UKERC暑期学校

选题背景

未来电力系统复杂性剧增



图片来源：信达证券



源：可再生能源波动性明显

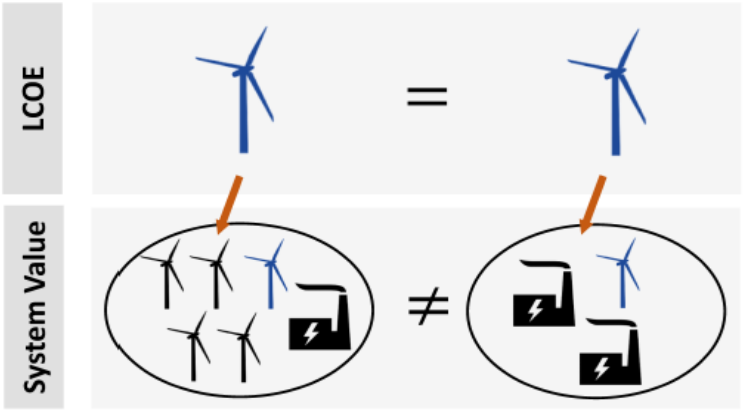
网：能源输配网络日益复杂

荷：消费侧随机性不断加剧

储：储能配置方式纷繁复杂

可再生能源与负荷侧两端不确定性同时不断增加，是电力系统低碳安全运行面临的最大机遇与挑战。

高比例可再生能源引起的系统灵活性不足



不确定性与波动性区别?

- **可再生能源的波动性与不确定性。**

  波动性是小时时间尺度，主要日前市场；

  不确定性是更短的时间尺度，依靠预测，主要是日内市场或现货市场。

- 可再生能源的接入对系统造成的额外成本，如电网加强的成本、系统备用要求提高的成本、传统电源的调节成本等也应考虑，这类成本统称为**系统集成成本**System Integration Cost (SIC)。

- 德国学者定义集成成本为可再生能源发电的市场值与平均电价之差，首次提出了对系统集成成本SIC进行分解：不确定性导致的平衡成本（balance cost）、位置不灵活导致的网络成本（grid cost）与时域波动性导致的形态成本（profile cost）。

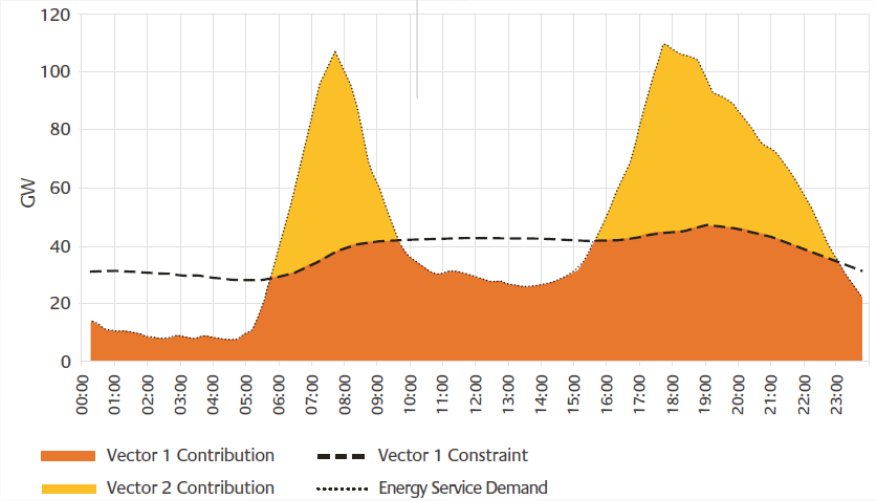
- 假设可以完全预测可再生能源且整个市场传输容量不受限制，这将消除平衡成本与电网成本，但可再生能源的波动性仍会带来经济后果，此即为形态成本。

- **高渗透率可再生能源消纳问题归根结底是电力系统的灵活性不足。**

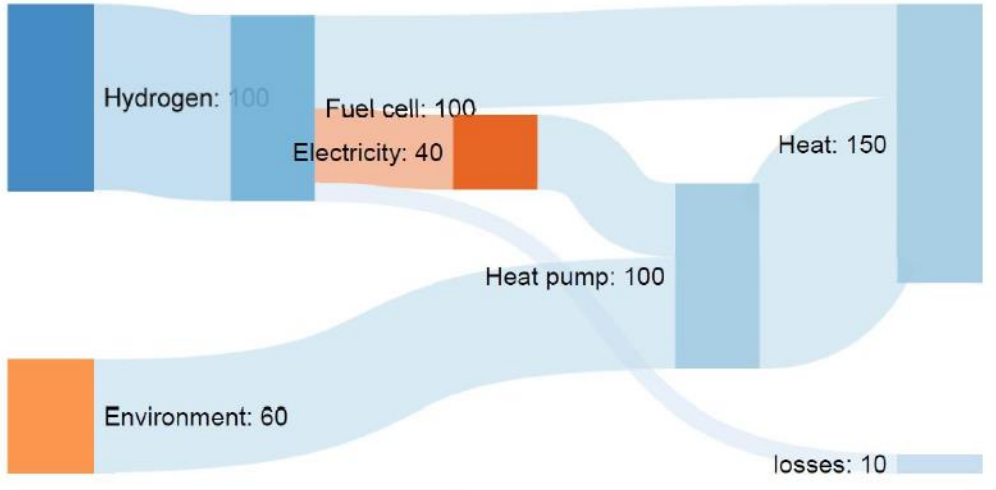
综合能源局域网多能互补案例

综合能源一体化优化

适应灵活性需求



①混合配置热泵与锅炉供热可能优于单独的热泵或锅炉，比如电力富余时，燃气锅炉供热转换为用热泵消耗电力供热，反之电力需求高峰时，转换到燃气锅炉供热。



②微型燃料电池热电联供（Fuel cell micro-CHP，FC mCHP）装置与热泵互补运行，mCHP多余的电力供给热泵

③微型CHP与光伏互补运行:

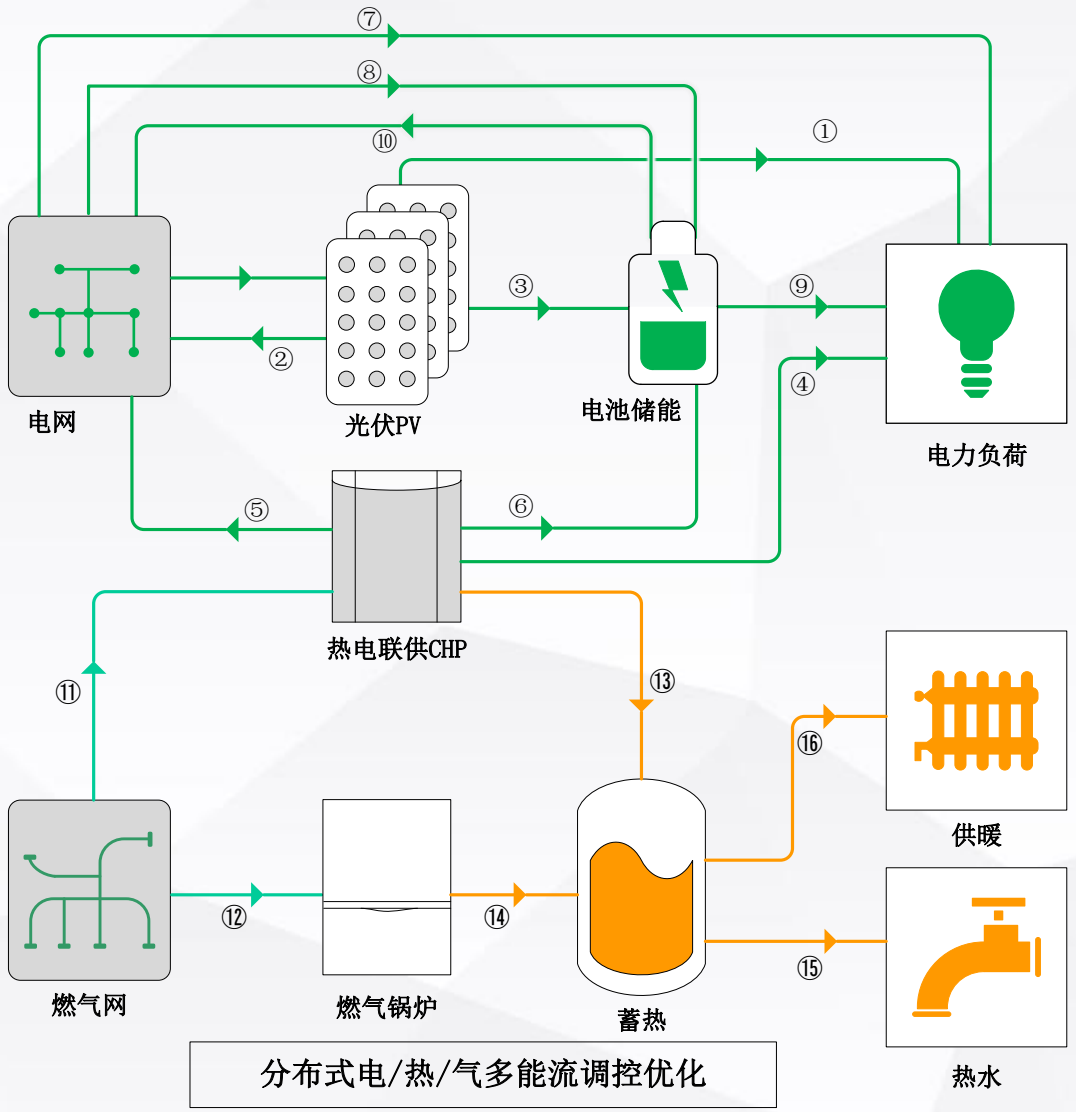
- 冬季：热负荷最大，mCHP发电最大，而此时光伏一般也最弱
- 夏季：热负荷最小，mCHP发电最小，而此时光伏最强

电/热/气多能流调控优化与聚合商

光伏发电
风力发电
燃气轮机
热电联供
燃气锅炉
热泵
太阳能集热器
电池储能
冰/水蓄冷
储热
吸收式制冷
Power-to-x

能源储存与转换设备

- 光伏发电
- 风力发电
- 燃气轮机
- 光热发电
- 电池储能
- 冰/水蓄冷
- 蓄热
- 热电联供
- 燃气锅炉
- 热泵
- 吸收式制冷



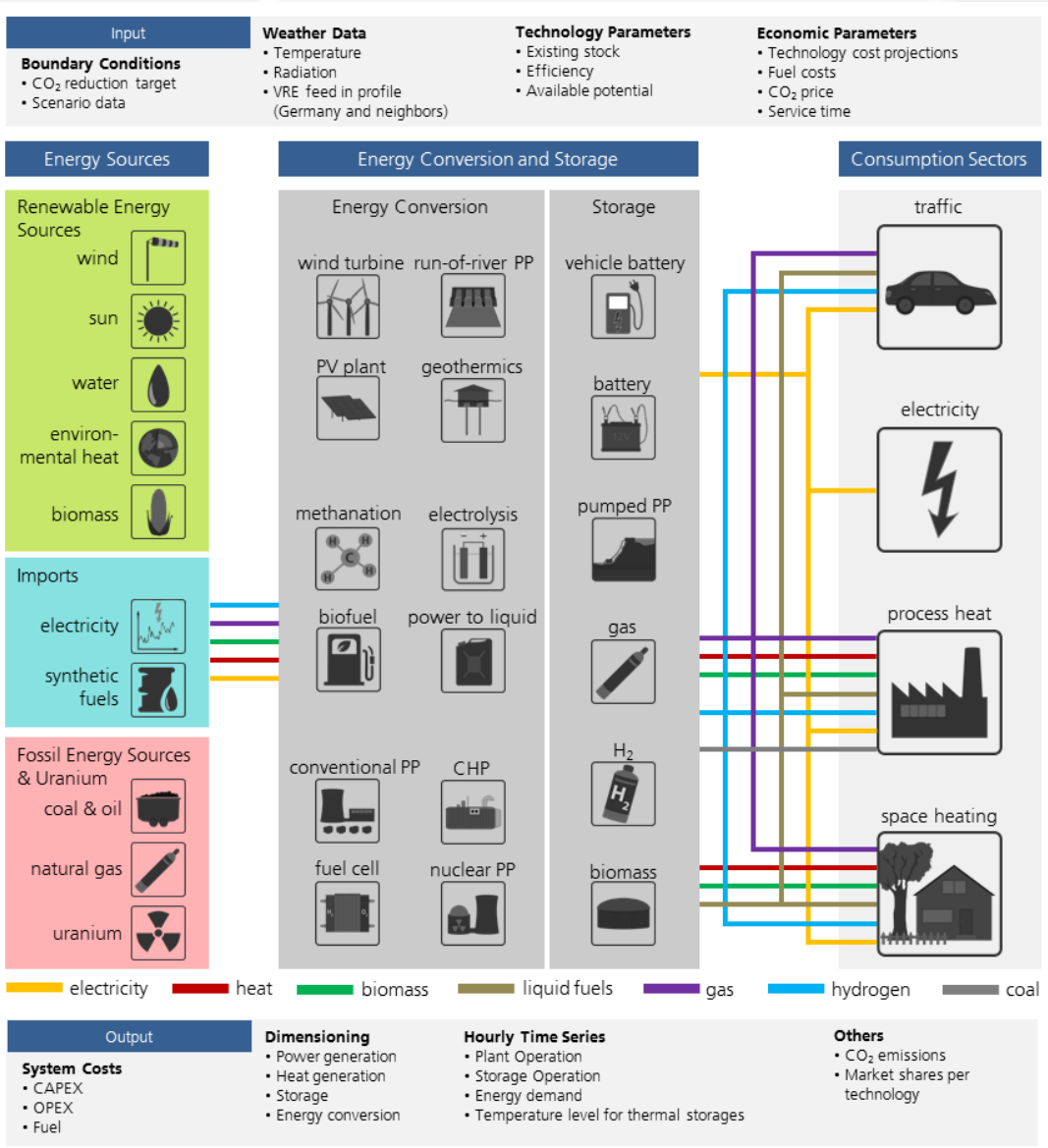
能量流

①光伏→负荷
②光伏→电网
③光伏→电池
④CHP→负荷
⑤CHP→电网
⑥CHP→电池
⑦电网→负荷
⑧电网→电池
⑨电池→负荷
⑩电池→电网
⑪燃气→CHP
⑫燃气→锅炉
⑬CHP→蓄热
⑭锅炉→蓄热
⑮蓄热→热水
⑯蓄热→供暖

聚合商

- Multi-energy systems
- Local energy systems
- P2P (peer-to-peer) energy trading
- VPP (virtual power plant)
- Energy internet

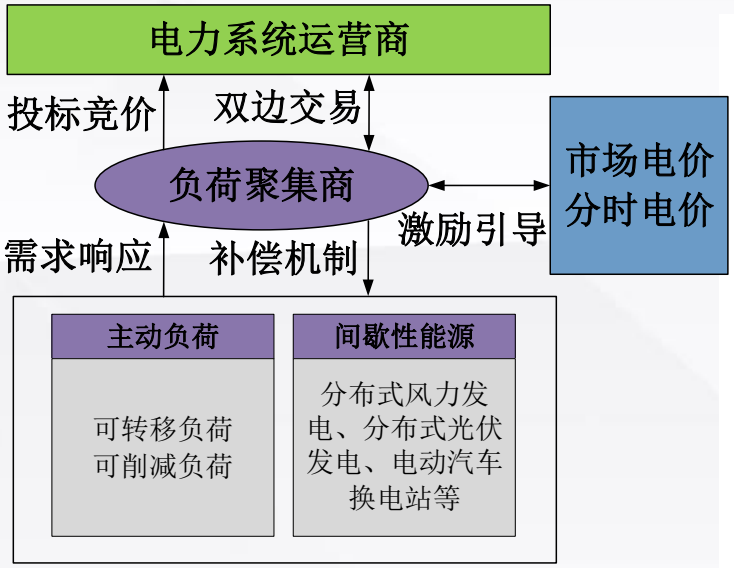
综合能源局域网聚合商

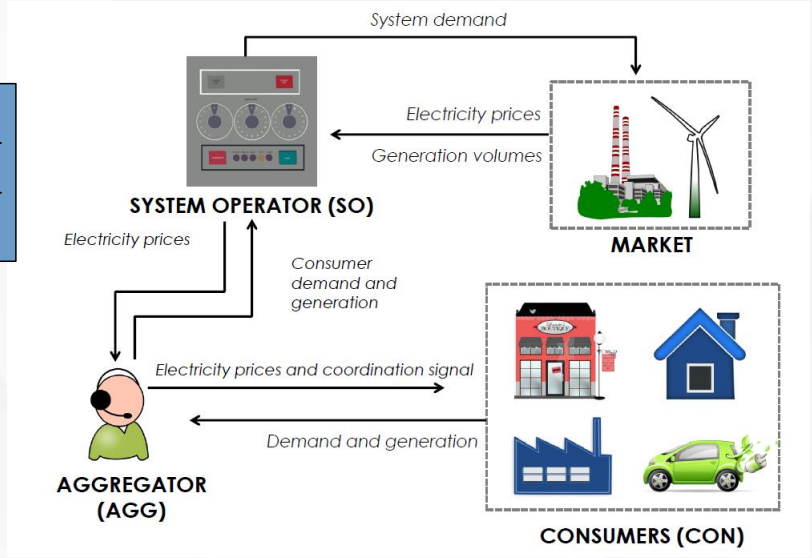


Source: REmod

- **综合能源局域网**，通过整合其内部能源供应资源和电、热、交通等能源需求，构建适应本地能源供应能力及结构的能源需求曲线，可以显著地提高系统运行效率。
- **负荷聚合商**，或**电力零售商**（Load service entity, LSE），是整合用户需求侧响应提供给市场购买者的**综合能源服务商**，主要是为中小负荷提供参与市场调节的机会，整合需求侧资源并与其他市场主体进行交易。
- 分布式电/热/气资源的协调优化解决方案，合理配置储能容量，确定各能源存储与转换设备的优化运行策略，提高能源系统灵活性。
- 通过聚合商调控源-荷-储多能流，实现平抑能源局域网的不确定性与波动性目标，有助于减轻电网公司的调峰难题。

聚合商与其他市场实体





随着DER渗透率进一步提高，综合能源局域网起着与上级电网之间的双向功率交换通道的作用，因此成为局部区域各种能源的交换中心。

- **聚合商与其他市场实体如分布式能源DER、发电公司、系统运营商的关系**：分布式能源受聚合商管理，接收聚合商传递的价格或激励信号并调整出力；发电公司的发电量和报价曲线会直接影响市场的电力价格；系统运营商负责市场出清并保障系统的安全稳定运行。聚合商在市场中作为分布式能源与系统运营商间的中间层存在，亦是电力批发市场和零售市场的中间层。

- **聚合商通过“虚拟电厂”源网荷聚合优化**的先进信息通信技术和软件系统，新一代智能控制技术和互动商业模式，实现分布式发电、储能系统、可控负荷等分布式资源的聚合和协调优化，并为电网提供能量与辅助服务。

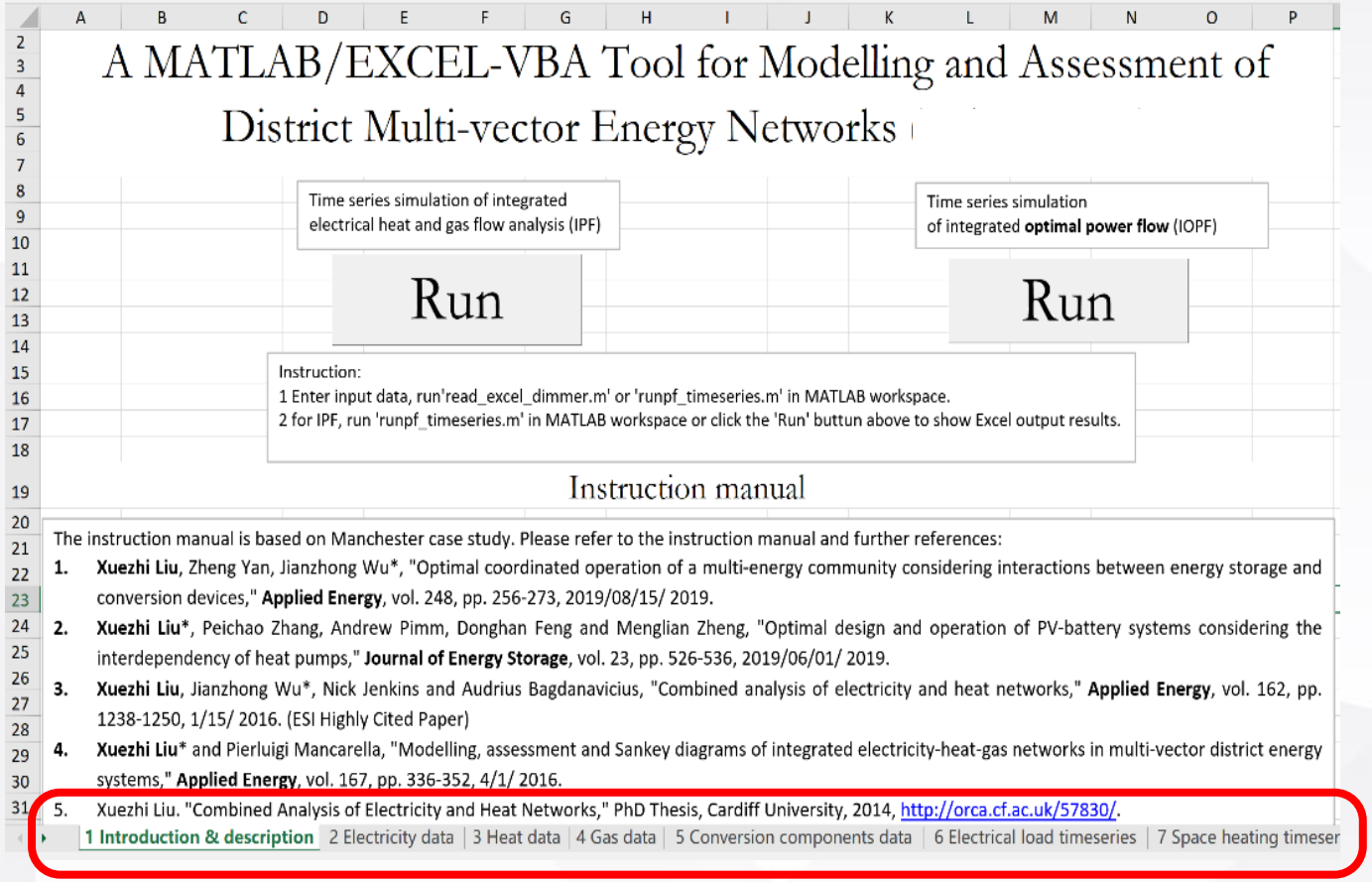
能源局域网的技术指标

APP应用

智能电表

- 提出与可再生能源不确定性与波动性分别相对应的调度弹性和调度适应性，建立了微网与上级电网（Microgrid/Macrogrid）的电力交换模型。
- **能源局域网调度弹性**（Schedule elasticity）：调度弹性是在发生罚款之前与馈线电力交换计划的最大允许偏差。**该指标与可再生能源不确定性（uncertainty）相对应**。较大的弹性给予聚合商较大的自由依据不确定性更新馈线电力交换功率，而较小的弹性减小了净负荷的不确定性。
- **能源局域网调度适应性**（Schedule adaptability）：调度适应性是最大的每小时馈线电力交换计划之差。**该指标与可再生能源波动性（variability）相对应**。相邻每小时的交换电力不能超过计划最大值，若发生偏离，聚合商会被高额罚款。
- 能源局域网较高的调度适应性使聚合商有较大的自由度来调整其馈线电力交换计划，以匹配预测的可再生能源输出，而较低的适应性则降低了大电网发电厂的爬坡需求。通过对调度弹性与适应性两个可调参数的选择能够减小上级电网的爬坡需求与发电成本。

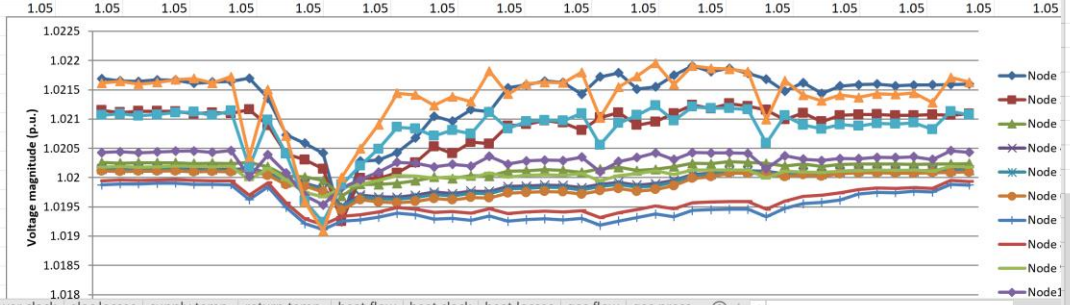
聚合商能源管理平台的EXCEL用户界面



- 本人基于国内外10余年经验开发的模型与平台，展示综合能源局域网（配电网、热力网与燃气网）及各类能源转换设备与储存设备的优化运行，输入输出如下：
- 1）Excel文件格式输入数据：**配电网、热力网与燃气网**节点详细页面、节点**能源转换设备**页面、**电/热节点负荷**时域页面、光伏-储能节点数据页面、经济数据页面；
- 2）实时生成Excel文件的输出数据：1**各类设备出力**动态效果；2各网络状态变量（**电压幅值与相角、热网节点供水与回水温度、管道质量流量、节点压力**等；3 综合能源系统技术经济性指标分析(投资成本CAPEX/运行成本OPEX、净现值NPV、内部收益率IRR、平准化度电成本LCOE等)。

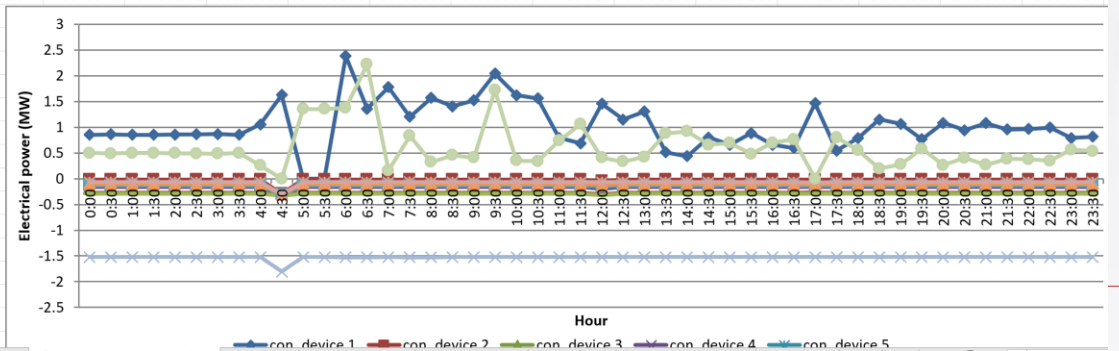
聚合商能源管理平台的EXCEL用户界面

	0:00	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	6:30	7:00	7:30	8:00
Node 1	1.021691	1.021654	1.021643	1.021671	1.021665	1.021611	1.021633	1.021643	1.021697	1.021357	1.020728	1.020589	1.020418	1.019243	1.020282	1.020303	1.020428
Node 2	1.021148	1.021112	1.021134	1.021133	1.02113	1.021088	1.021109	1.021097	1.021162	1.020892	1.020405	1.020305	1.020149	1.019251	1.019987	1.019987	1.020079
Node 3	1.020257	1.020247	1.020254	1.020253	1.020254	1.02024	1.020247	1.020242	1.02026	1.020186	1.02003	1.020012	1.019951	1.019683	1.019887	1.019883	1.019901
Node 4	1.020154	1.020144	1.020152	1.020152	1.020154	1.020137	1.020146	1.020137	1.020157	1.02008	1.019924	1.019902	1.019813	1.019518	1.019702	1.01967	1.019664
Node 5	1.020141	1.02013	1.020128	1.020138	1.02014	1.020123	1.020132	1.020123	1.020143	1.020066	1.01991	1.019886	1.019794	1.019496	1.019676	1.019638	1.019629
Node 6	1.020114	1.020103	1.020112	1.020112	1.020114	1.020097	1.020106	1.020096	1.020116	1.020039	1.01988	1.019855	1.019758	1.019447	1.019622	1.019583	1.019568
Node 7	1.019874	1.019894	1.019894	1.019902	1.019907	1.019886	1.019884	1.01988	1.019622	1.019841	1.019489	1.019214	1.019111	1.019254	1.019277	1.019323	1.019392
Node 8	1.019943	1.019956	1.019953	1.019959	1.019965	1.019951	1.019945	1.019944	1.019699	1.019914	1.019563	1.019298	1.019197	1.019337	1.019369	1.019413	1.019489
Node 9	1.02018	1.020188	1.02018	1.020187	1.020195	1.020194	1.020182	1.020195	1.019962	1.020159	1.019959	1.01975	1.019671	1.019822	1.019886	1.019951	1.020037
Node10	1.020428	1.020442	1.020426	1.020437	1.020452	1.020455	1.02043	1.020462	1.020015	1.02039	1.020078	1.019695	1.019535	1.019826	1.019964	1.020094	1.020262
Node11	1.021065	1.021089	1.021055	1.021075	1.02111	1.02112	1.021065	1.02114	1.020176	1.020988	1.020404	1.019599	1.019242	1.019878	1.020204	1.020489	1.02086
Node12	1.021615	1.021645	1.021597	1.021626	1.021674	1.021693	1.021614	1.021724	1.020351	1.021505	1.020712	1.019588	1.019091	1.020006	1.020492	1.020906	1.021442
Node13	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
Node14	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
Node15	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05



voltage | elec.power slack | elec.losses | supply temp. | return temp. | heat flow | heat slack | heat losses | gas flow | gas press ...

con_device 4	-0.15668	-0.15668	-0.15668	-0.15668	-0.15668	-0.15668	-0.15668
con_device 5	-0.07735	-0.07735	-0.07735	-0.07735	-0.07735	-0.07735	-0.07735
con_device 6	-0.09635	-0.09635	-0.09635	-0.09635	-0.09635	-0.09635	-0.09635
con_device 7	-0.10068	-0.10068	-0.10068	-0.10068	-0.10068	-0.10068	-0.10068
con_device 8	-0.26868	-0.26868	-0.26868	-0.26868	-0.26868	-0.26868	-0.26868
con_device 9	-0.29101	-0.29101	-0.29101	-0.29101	-0.29101	-0.29101	-0.29101
con_device 10	-0.12268	-0.12268	-0.12268	-0.12268	-0.12268	-0.12268	-0.12268
con_device 11	-0.12768	-0.12768	-0.12768	-0.12768	-0.12768	-0.12768	-0.12768
con_device 12	-0.10201	-0.10201	-0.10201	-0.10201	-0.10201	-0.10201	-0.10201
con_device 13	-1.52335	-1.52335	-1.52335	-1.52335	-1.52335	-1.52335	-1.52335
con_device 14	-0.06568	-0.06568	-0.06568	-0.06568	-0.06568	-0.06568	-0.06568
con_device 15	0.49978	0.488101	0.499365	0.498533	0.495909	0.488588	0.485113



voltage | elec.power generation | elec.loss | supply temp. | return temp. | heat flow | heat generation | heat loss | gas flow | g ...

Local node	No. in elec.	No. in heat	No. in gas r	Componen	Efficiency	Heat-to-po	Input (MW	Output (M	Heating/Co	Max.outpu	Min. outpu	Ramp up li	Ramp dow
1	13	36	1	2	0.42	1.515152	0	0	0				
2	2	0	0	50	3	0	0	0.036225	0				
3	3	0	0	50	3	0	0	0.22	0				
4	2	0	0	50	3	0	0	0.464	0				
5	2	0	0	50	3	0	0	0.226	0				
6	1	0	0	50	3	0	0	0.283	0				
7	1	0	0	50	3	0	0	0.296	0				
8	1	0	0	50	3	0	0	0.8	0				
9	12	0	0	50	3	0	0	0.867	0				
10	12	0	0	50	3	0	0	0.362	0				
11	12	0	0	50	3	0	0	0.377	0				
12	12	0	0	50	3	0	0	0.3	0				
13	12	0	0	50	3	0	0	4.564	0				
14	9	0	0	50	3	0	0	0.191	0				
15	14	35	15	2	0.42	1.515152	0	1	0				

1. scenario 2 (district CHP + local heat pumps) is used to illustrate the process of building the model and the simulation results
2. Local gas boilers in the gas network were replaced by local heat pumps, so these local heat pumps were neither linked to the gas network nor to the heat network.

... | 2 Electricity data | 3 Heat data | 4 Gas data | 5 Conversion components data | 6 Electrical load timeseries | 7 Space heating timeseries | 8 Hot water timeserie

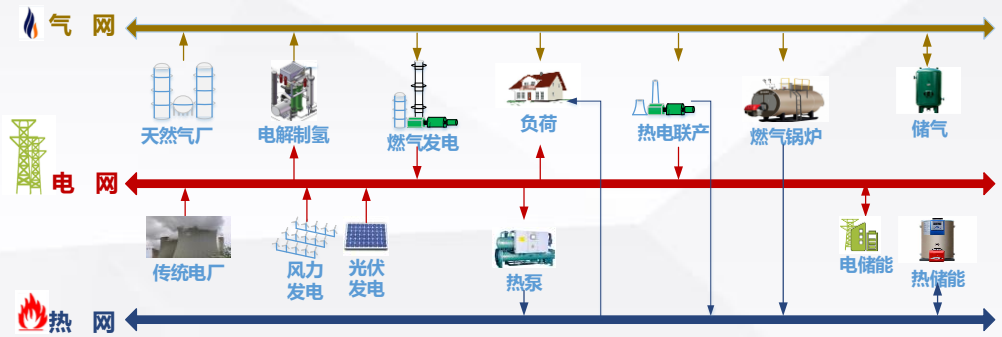
Conversion component types:

1 – gas-fired generator
2 – gas-fired CHP
    20 – micro-CHP
    22 – extraction steam turbine CHP
3 – non-gas-fired CHP
    30 – micro-CHP
    32 – extraction steam turbine CHP
4 – large gas boiler
    40 – local gas boiler
5 – large heat pump
    50 – local heat pump
6 – large electric heater
    60 – local electric heater
7 – electrolyser
80 – local electric chiller
90 – local absorption chiller
100 – local gas engine chiller

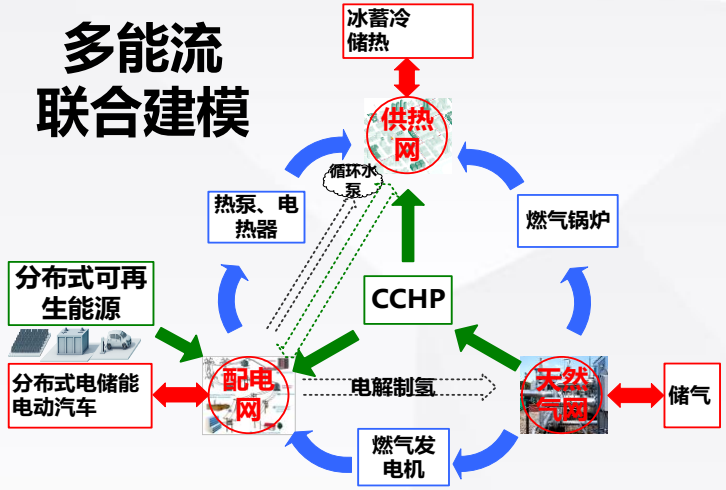
Parameters:
thermal efficiency and heat-to-power ratio for CHP
efficiencies for all other kinds of conversion components

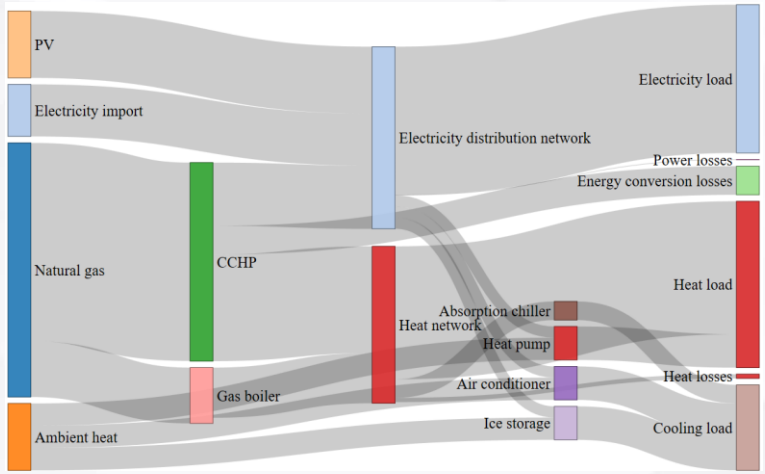
Heating/Cooling indicator:
Default 0: heating load in general or space heating
1: hot water heating load
2: cooling

电热气网多能流分析



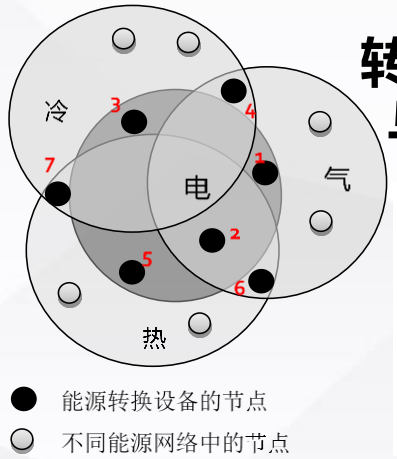
多能流联合建模





多种能源转换与存储设备紧密链接天然气网、电力网与供热网的示意图

电网	热网	已知量节点
电压相角 θ	压力 H	平衡节点
有功 P	热功率 Φ	非平衡节点
电压幅值 |V|	供水温度 T_s	源节点
无功 Q	回水温度 T_r	负荷节点
电流 I	质量流量 $\dot{m}$	



转换效率矩阵与置换矩阵

1 燃气轮机
2 CHP
3 空调
4 燃气制冷机
5 热泵
6 燃气锅炉
7 吸收式制冷机

多能流联合物理方程

$$P^{sp} - Real\{V(YV)^*\} = 0 \quad \leftarrow \text{有功潮流平衡}$$

$$Q^{sp} - Imag\{V(YV)^*\} = 0 \quad \leftarrow \text{无功潮流平衡}$$

$$C_p A_h \ \dot{m}(T_s - T_o) - \Phi^{sp} = 0 \quad \leftarrow \text{KCL 热功率平衡}$$

$$B_h \ K_h \ \dot{m}|\dot{m}| = 0 \quad \leftarrow \text{KVL 环压降方程 – 热}$$

$$C_s T_s - b_s = 0 \quad \leftarrow \text{供水温度降}$$

$$C_r T_r - b_r = 0 \quad \leftarrow \text{回水温度降}$$

$$A_g v_g - v_q^{sp} = 0 \quad \leftarrow \text{KCL 天然气流量平衡}$$

$$B_g \ K_g \ v_g|v_g^{k-1}| = 0 \quad \leftarrow \text{KVL 环压降方程 – 气}$$

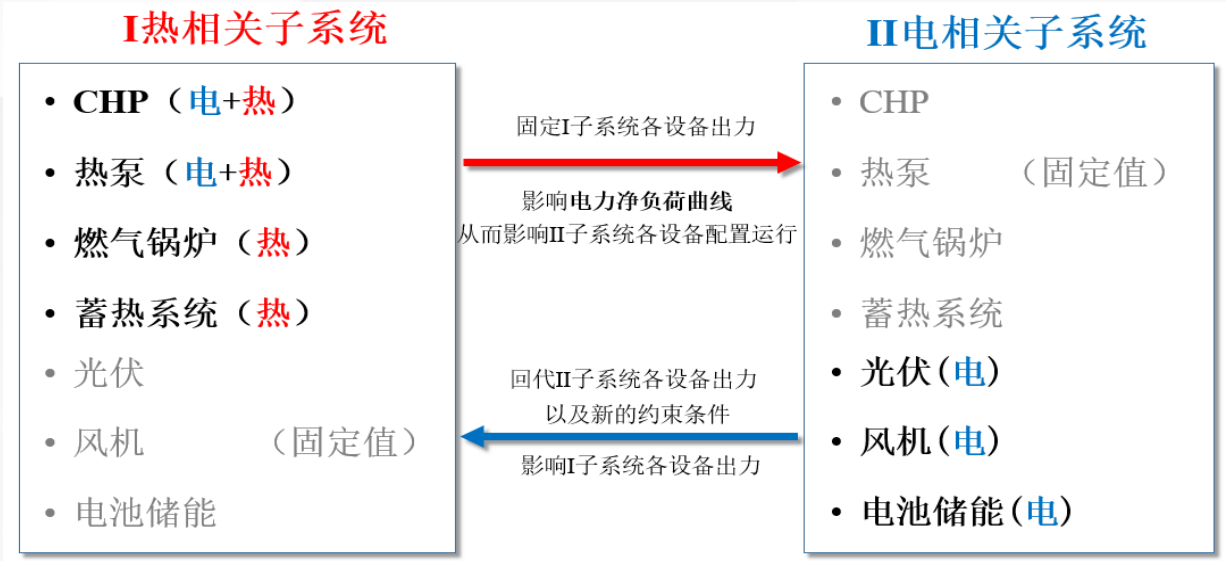
- 传统电力网、供热网、燃气网是独立规划运行的系统，较早地将多能源网络系统的物理方程进行类比，然后联立成整体系统进行求解。
- 充分利用不同能源系统之间的协同作用，将多种能源网络系统作为整体进行规划运行，应用于英国曼彻斯特大学校园电热气能源网。

- Xuezhi Liu, Jianzhong Wu*, Nick Jenkins, Audrius Bagdanavicius. Combined analysis of electricity and heat networks [J]. Applied Energy, 2016, 162: 1238-50.
- Xuezhi Liu*, Pierluigi Mancarella. Modelling, assessment and Sankey diagrams of integrated electricity-heat-gas networks in multi-vector district energy systems [J]. Applied Energy, 2016, 167: 336-52

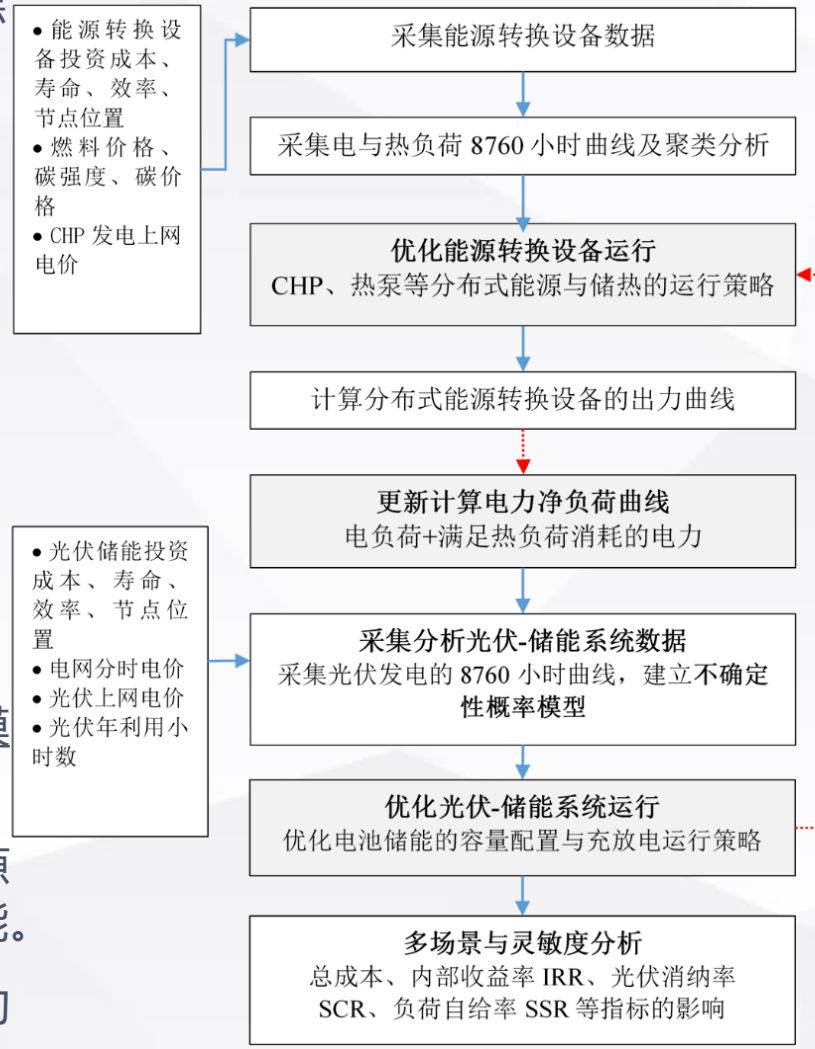
综合能源系统优化

- 光伏发电
- 风力发电
- 燃气轮机
- 热电联供
- 燃气锅炉
- 热泵
- 太阳能集热器
- 电池储能
- 冰/水蓄冷
- 储热
- 吸收式制冷

- 一种系统化建模方法集成广泛的各类能源存储与转换设备,并考虑综合能源网电/热/气多能流运行约束



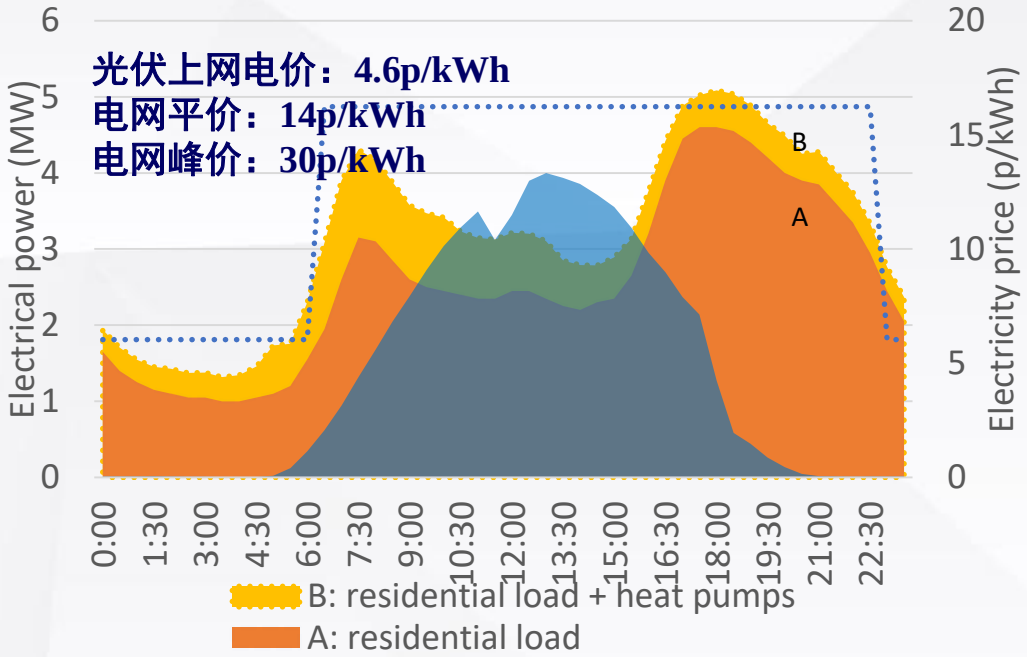
- 综合能源系统（电热气）设备统筹优化配置：相互独立→统一建模→一体化规划→**分解协调**
- 综合能源系统分为两大子系统：一类子系统I是与热相关的多能源转换设备；另一类子系统II是只与电相关的可再生能源与电池储能。
- 子系统I到II，增加了电力净负荷曲线的变化，从而影响子系统II的配置运行；子系统II到I，增加了子系统I运行方式的变化。

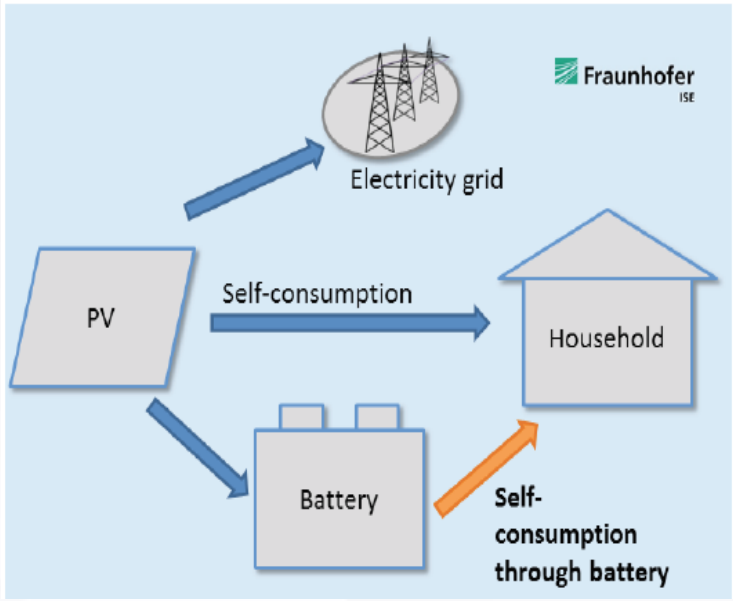


能源转换设备和光伏-储能系统协调优化的顺序方法流程图

- Xuezhi Liu, Zheng Yan, Jianzhong Wu*. Optimal coordinated operation of a multi-energy community considering interactions between energy storage and conversion devices[J]. Applied Energy, 2019/08/15/, 2019, 248: 256-273.

光伏-储能系统的经济性影响



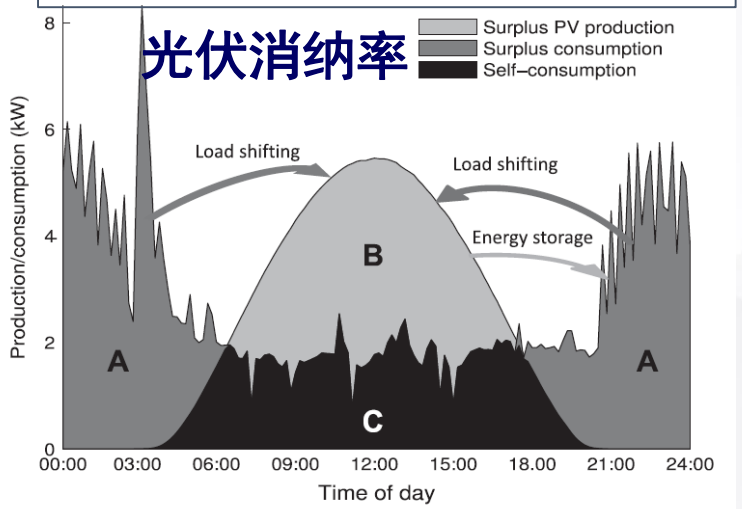


经济性影响因素

1. 电池储能价格
2. 电网峰谷电价差(2部式与3部式电价)
3. 光伏上网电价
4. 光伏曲线与负荷曲线(居民与商业负荷)
5. 光伏年利用小时数
6. 光伏板、电池储能寿命与效率
7. 折现率、融资成本

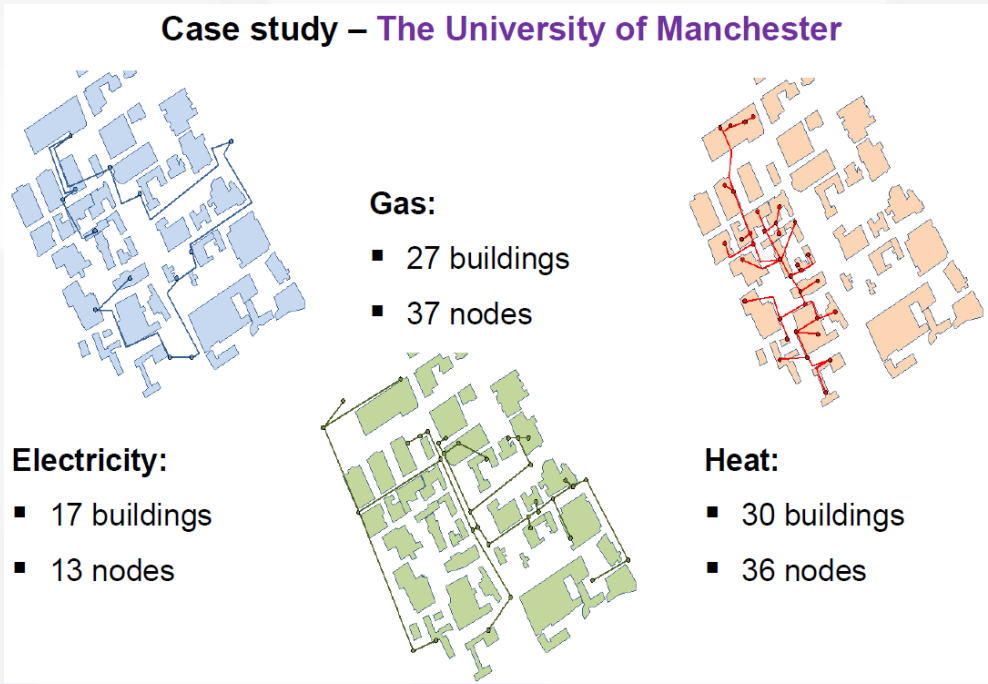
- 对于A、B负荷曲线，比较电池储能配置容量、光伏-储能系统内部收益率IRR?
- **光伏发电流向储能的功率$P_{PV\to bess}$**是光伏-储能优于单独储能峰谷套利的关键
- 单独储能只能利用峰谷电价差，光伏-储能系统经济性在于与光伏的结合，将光伏外送电量转移至傍晚负荷高峰时段
- 储能配置的重点在于$P_{PV\to bess}$：多余光伏发电上网电价只有0.32元，而通过储能存储转移到峰价放电时的电价1.07元，正是这样的策略实现光伏-储能系统盈利

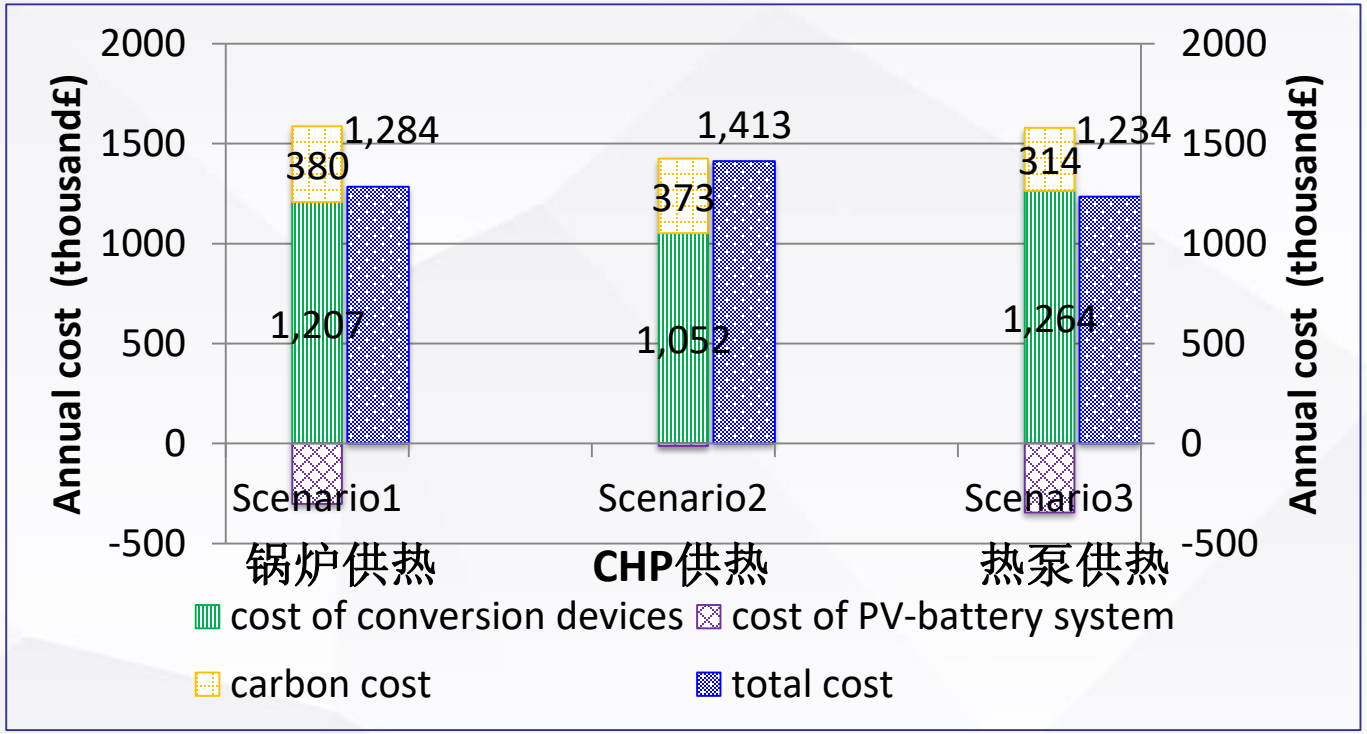
光伏消纳率



- Xuezhi Liu*, Peichao Zhang, Andrew Pimm, Donghan Feng and Menglian Zheng. Optimal design and operation of PV-battery systems considering the interdependency of heat pumps[J]. Journal of Energy Storage, 2019/06/01/, 2019, 23: 526-536.

综合能源系统优化算例



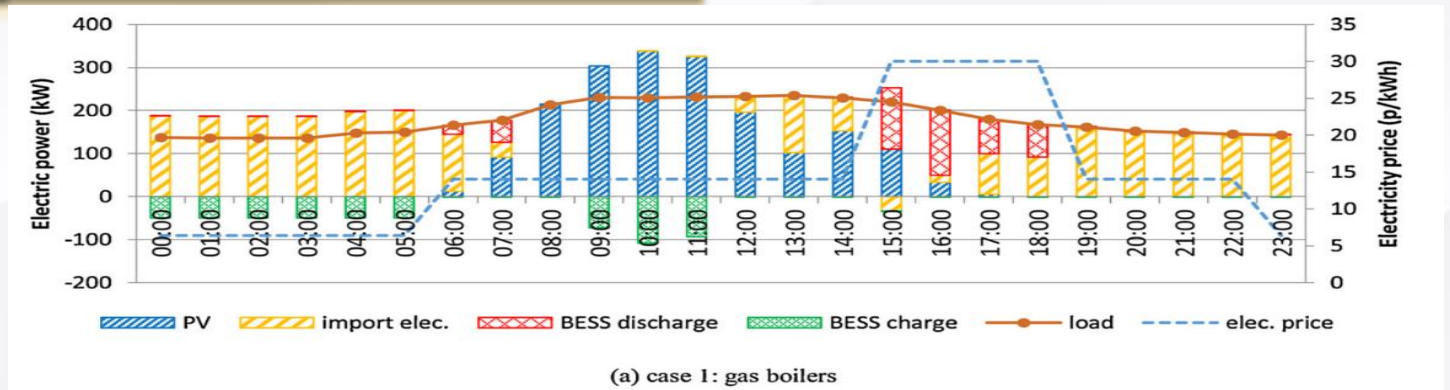


- 情景1：锅炉供热；情景2：CHP供热；情景3：热泵供热
- 不考虑碳排放，CHP供热占优；考虑碳排放与未来电网碳强度下降，热泵供热占优；考虑光伏-储能系统的叠加效应，热泵供热占优

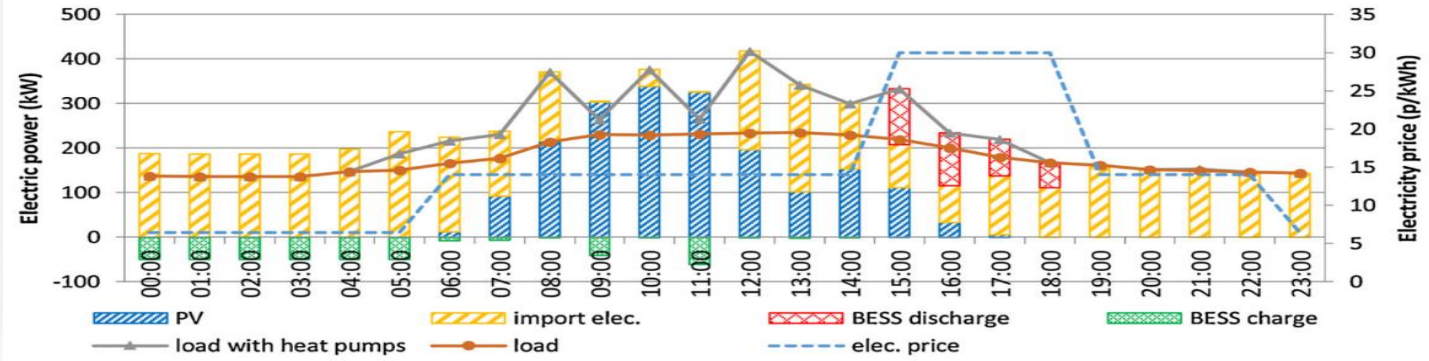
- Xuezhi Liu, Zheng Yan, Jianzhong Wu*. Optimal coordinated operation of a multi-energy community considering interactions between energy storage and conversion devices[J]. Applied Energy, 2019/08/15/, 2019, 248: 256-273.
- 刘学智，陈思捷，严正. 一种光伏储能与分布式能源联合的容量配置与运行优化方法. 公开号：CN109510224A，2019.

光伏-储能系统与热泵

热泵对光伏-储能系统的影响



(a) case 1: gas boilers



(b) case 2: heat pumps

热泵影响

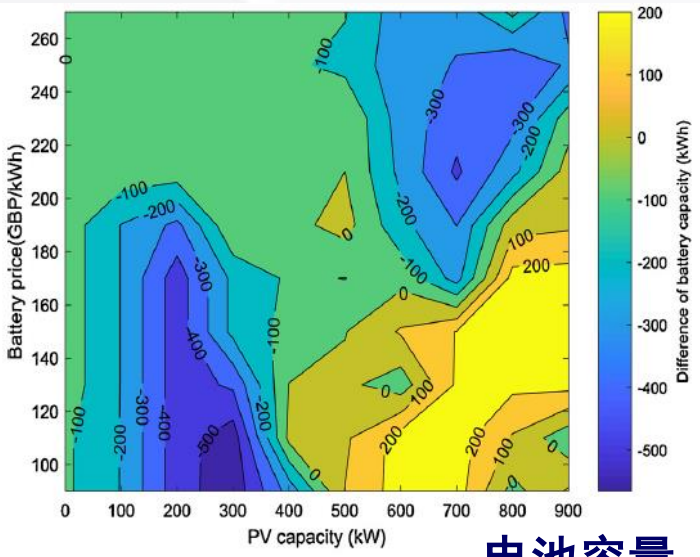
- 在热泵/电动汽车等电气化比例较高地区，安装光伏-储能系统一般可减小储能容量并提高整体收益。
- 但并不是绝对的，在三部制电价下，且负荷曲线有晚高峰时，不一定成立。
- 因为此时电池的套利比热泵提高光伏消纳率的收益大。

一般地，热泵的使用→增加电力负荷→增加光伏消纳率→增加光伏-储能系统收益（电网峰谷电价差及电网与光伏上网电价之差）。但是可能被热泵消纳的光伏发电收益<存储此部分光伏电力用于傍晚峰价时释放的收益。

研究表明：
不一定增加？

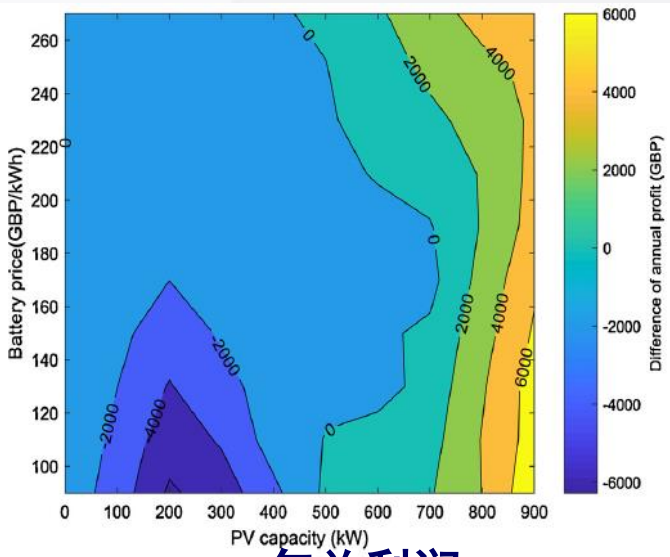
- Xuezhi Liu*, Peichao Zhang, Andrew Pimm, Donghan Feng and Menglian Zheng. Optimal design and operation of [illegible] systems considering the interdependency of heat pumps[J]. Journal of Energy Storage, 2019/06/01/, 2019, 23: 526-536.

热泵对光伏-储能系统的影响



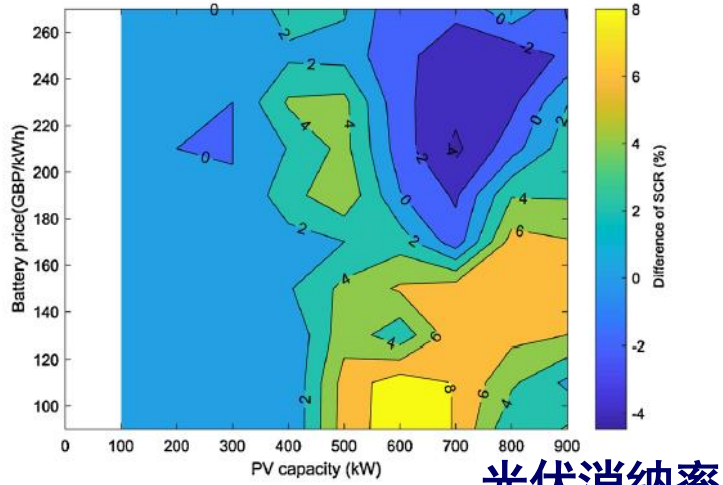
(a) Difference of battery capacity

电池容量



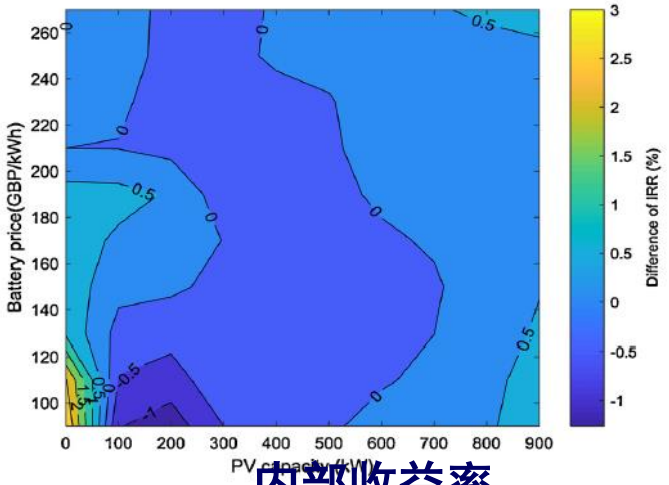
(b) Difference of annual profit

年总利润



(c) Difference of SCR for a typical summer day

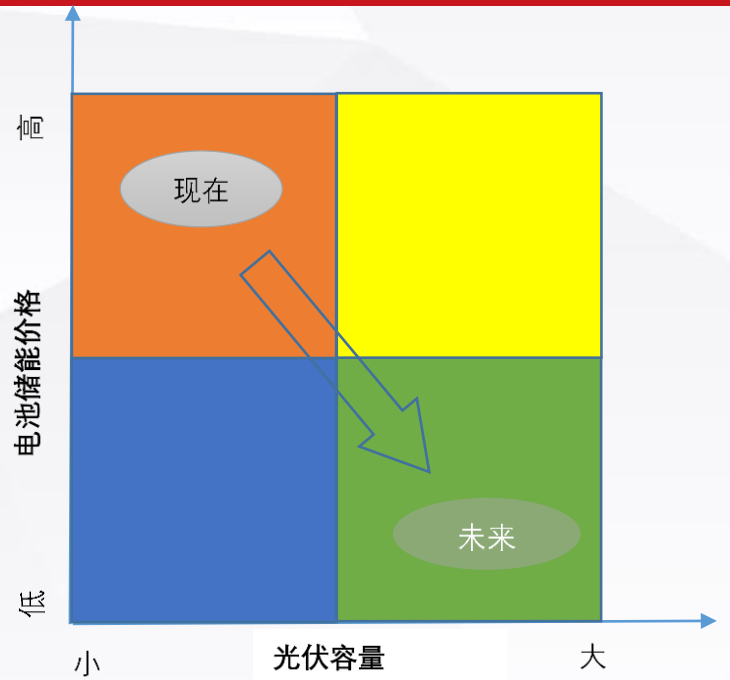
光伏消纳率



(d) Difference of IRR

内部收益率

等高线图中数值表示两种情景有热泵与无热泵的差值



热泵的使用：

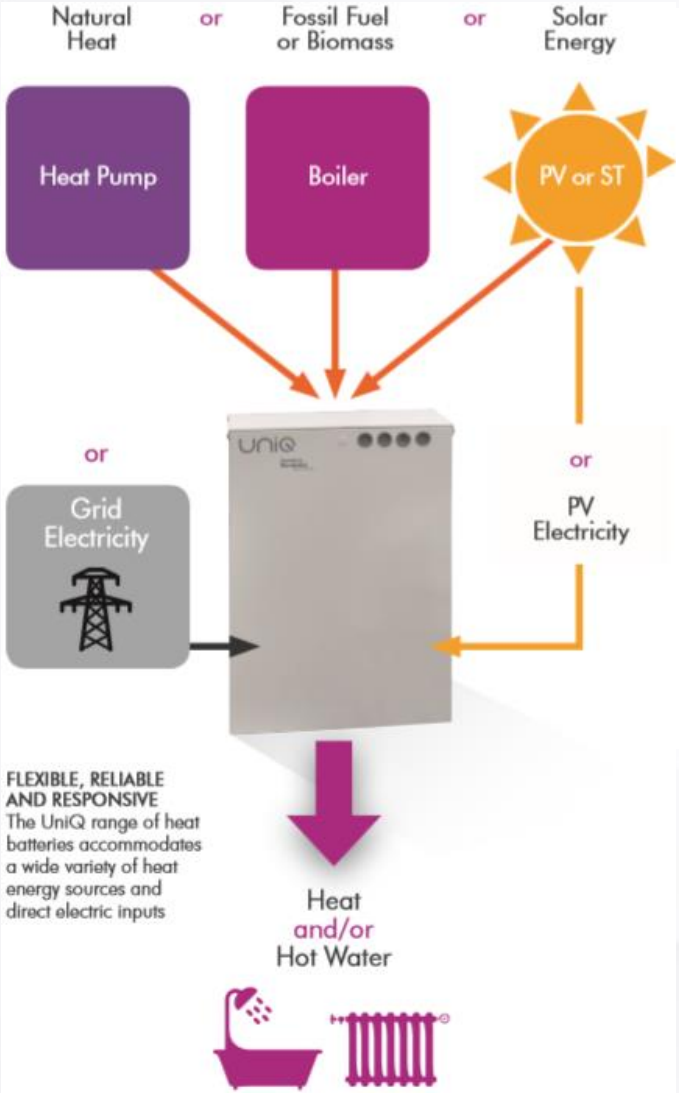
一般会增加光伏消纳率；

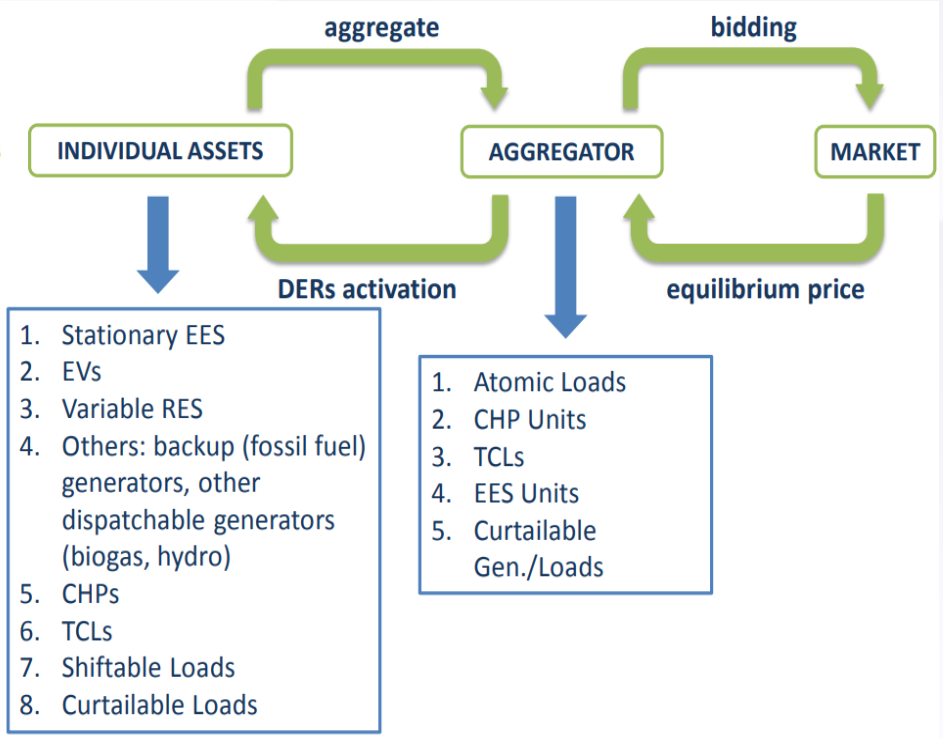
一般会减小电池容量的配置；

当光伏容量相对小（大）时减小（增加）光伏-储能系统的收益

- Xuezhi Liu*, Peichao Zhang, Andrew Pimm, Donghan Feng and Menglian Zheng. Optimal design and operation of PV-battery systems considering the interdependency of heat pumps[J]. Journal of Energy Storage, 2019/06/01/, 2019, 23: 526-536.

能源局域网聚合商的商业模式





- **适合聚合商的几个案例：**
- **Multi-vector heating systems**
- **Power-to-gas**
- **Vehicle-to-grid**

- 小红书、抖音、B站的商业模式
- 节能产业的合同能源管理EMC的商业模式
- BOT（建设-运营-移交）、EPC（设计-采购-施工）与PPP（公私合营投融资建设）的商业模式
- 基于园区增量配电网的综合能源服务业态体系

Source: SMARTNET aggregation models report

能源聚合商初创企业

Aggregator		
Actility	KiWiPOWER demand management See: Kiwi Power website	DSR/DSF for businesses, looking to enter potential local flexibility markets
See: ThingPark Energy website	limejump See: Limejump website	Aggregation for NG, mainly for businesses, 'Virtual Power Plant' (VPP) platform
AMERESCO Green • Clean • Sustainable See: Ameresco DSR website	npower See: Npower DSR website	DSR/DSF for businesses, NG scheme
EDF See: EDF DSR website	open energi See: Open Energi website	DSR/DSF, aggregated from local generation through 'Dynamic Demand 2.0' platform
GridBeyond formerly Endeco Technologies See: Endeco website	origamienergy See: Origami Energy website	Ancillary/balancing services flexibility, NG scheme
Energy Pool See: Enery Pool website	PEARLSTONE ENERGY See: Pearlstone Energy website	Aggregates from C&I clients to create VPP of 'Negawatts', Automated Demand Response (ADR) for DSR flexibility
ENERNOC See: EnerNOC DSR website	reactive technologies See: Reactive Tradenergy website	DSR flexibility for businesses, NG scheme, 'Tradenergy' platform
e·on See: E.ON VPP/DSR website	REstore See: REstore website	'FlexPond' DSR flexibility for industrial consumers through IoT
Flexitricity See: Flexitricity DSR website	V P S Virtual Power Solutions See: VPS website	Aggregation from individual buildings into VPP. Kiplo, Kisense and Cloogy platforms
ENGIE See: Engie Energy website	ukpowerreserve See: UKPR website	Aggregates flexible small-scale power generation/storage
	upside See: Upside Energy website	Aggregates small-scale capacity and would look to be active in local flexibility markets

- EnerNoc从能源管理这一个细分市场出发，开发了一套完整的系统，提供系列解决方案。
- 他们的客户类型分两类，一类是工商业用户，EnerNoc向他们售卖能源智能管理软件；一类是电力公司，EnerNoc向他们售卖解决方案和特定的模块系统。
- 2018年意大利国家电力公司**Enel公司收购了美国电力需求响应服务商EnerNOC公司**

代表论文

1. **Xuezhi Liu**, Zheng Yan, Jianzhong Wu*. **Optimal coordinated operation of a multi-energy community considering interactions between energy storage and conversion devices**[J]. Applied Energy, 2019/08/15/, 2019, 248: 256-273.

2. **Xuezhi Liu***, Peichao Zhang, Andrew Pimm, Donghan Feng and Menglian Zheng. **Optimal design and operation of PV-battery systems considering the interdependency of heat pumps**[J]. Journal of Energy Storage, 2019/06/01/, 2019, 23: 526-536.

3. **Xuezhi Liu**, Jianzhong Wu*, Nick Jenkins, Audrius Bagdanavicius. **Combined analysis of electricity and heat networks** [J]. Applied Energy, 2016, 162: 1238-50. (***ESI高被引论文，谷歌学术引用300次以上***)

4. **Xuezhi Liu***, Pierluigi Mancarella. **Modelling, assessment and Sankey diagrams of integrated electricity-heat-gas networks in multi-vector district energy systems** [J]. Applied Energy, 2016, 167: 336-52. (**谷歌学术引用100次以上**)

5. **Xuezhi Liu**. Combined Analysis of Electricity and Heat Networks [D]. **英国卡迪夫大学博士学位论文**, 2013.

6. 张雨曼，**刘学智***，严正，张沛超. 光伏-储能-热电联产综合能源系统分解协调优化运行研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(9): 210-24.

第一作者发表的2篇综合能源领域论文（1篇ESI高被引）被广泛引用500次以上（谷歌学术搜索），开发了英国Barry岛与曼侧斯特大学电/热/气标准算例，被广泛应用

上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

汇报结束，衷心感谢！

刘学智
邮箱：liuxz@sjtu.edu.cn
手机/微信：18601766581

饮水思源 爱国荣校