

解锁灵活性资源促进建筑电气化

以热泵为例

王轩

睿博能源智库

背景

在中国总的碳排放中，建筑运行产生的排放大概贡献了约20%，其中3/4来自于与建筑相关的用电和供热的化石燃料非直接燃烧¹。2020年，供暖和热水占到中国建筑运行总能源消耗的60%。最近几年，由于中国城市化进程和经济水平的提高，建筑领域的碳排放增长相比其他国家更快，并且这种趋势可能在未来几十年还会继续。

根据IEA的估计，为了满足中国政府提出的2030碳达峰和2060碳中和目标，高比例发展可再生能源，大力开发建筑节能潜力以及电气化将是建筑领域脱碳的关键。电能占总的建筑能耗的比例需要从2020年的35%增长到2060年60%，而热泵将会从目前仅满足3%发展到满足超过20%空间供暖需求²。

热泵对于电力系统的贡献在于1) 热泵是一种极为高效的电气化供热/制冷方式，从而减少能耗，降低排放；2) 热泵可以更多地利用清洁的可再生能源发电（风电、光伏）；3) 由于其灵活可控的特点，可以通过低谷用电减少用电峰值负荷，以及在系统需要时提供辅助服务以增加系统的可靠性；4) 减少输配电扩容和升级需要，降低所需的可再生能源投资。

¹ 中国建筑能耗与碳排放数据平台<http://www.cbeed.cn/#/calculate>

² International Energy Agency. (2021). *An energy sector roadmap to carbon neutrality in China*.

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/6689062e-43fc-40c8-9659-01cf96150318/AnenergysectorroadmaptocarboneutralityinChina.pdf>

我们希望进一步讨论如何更好地利用热泵，并促进热泵在提供电力系统灵活性方面的作用。要实现这一目标，需要市场和政策的共同作用，并加强电力系统改革的多个方面。本篇文章主要在结合具体案例的基础上，分两个部分为中央和地方政策制定者给出建议：热泵作为一种灵活的资源，发挥需求响应的潜力；电力和供热综合资源规划。

热泵作为一种灵活的资源，发挥需求响应的潜力

1. 智能供热低碳化的一些原则

中国的供热体系目前仍然高度依赖化石能源，在国务院发布的《2030年前碳达峰行动方案》³中指出要加快提升建筑能效水平，优化建筑用能结构，因地制宜地推动热泵、生物质能、地热能、太阳能等清洁供暖，正是为了更好地促进建筑行业能源转型。在南方还没有集中供暖的地区，例如长三角地区，是否能够直接跨越传统的供暖方式，而转为采用更为高效和清洁的技术至关重要。这是因为伴随着电力行业的低碳化和建筑行业的电气化，热泵可以发挥节能降耗，以及为电力系统提供所需的灵活性的潜力⁴。在国际上，智能供热一般需要遵守以下几个原则⁵，才能更为成本有效地满足低碳转型的需要：

- 能效第一原则。要大规模的减少建筑行业碳排放，仅靠低碳供热技术很难达到预设的目标，必须把提高终端能效放在第一位，减少由于满足供热需求而产生的不必要的对发电和供热系统的投资。这可以通过提高建筑能效标准和降低终端用能水平来实现。例如，加强建筑围护结构的节能措施，可以减少不必要的热能损失，提高供热效率。改善建筑的围护结构具有很高的成本有效性，应该作为建筑电气化的重要组成部分。
- 认识到供热需求灵活性的价值。需要将供热需求有机地纳入电力系统中，从而为电力系统高效运行提供所需的灵活性，以帮助高比例可再生能源并网，并减少高峰需求，降低发输配等各个环节的扩容需要。特别地，由于建筑本身和储热装置具有热

³ 国务院关于印发《2030年前碳达峰行动方案》的通知，国发[2021]23号。

http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm

⁴ 比起一般的电阻采暖设备和集中供暖，热泵由于采用环境中的可再生能源因此效率更高，同时，比起燃气锅炉，热泵能够提供电力系统所需的灵活性。更多细节请参考European Heat Pump Association, European Copper Institute. (2018). *Heat pumps: Integrating technologies to decarbonise heating and cooling*. https://www.ehpa.org/fileadmin/user_upload/White_Paper_Heat_pumps.pdf

⁵ Rosenow, J., & Lowes, R. (2020). *Heating without the hot air: Principles for smart heat electrification*. Regulatory Assistance Project. <https://www.raonline.org/knowledge-center/heating-without-hot-air-principles-smart-heat-electrification/>

惯性，热泵的灵活性会进一步增加⁶，热泵可以在峰值来临之前或者可再生能源发电充裕的时间预热空间，在良好的建筑隔热作用下保证室内温度的舒适性。例如，可以将热泵转移到下午光伏多发的时候运行，减少晚高峰用电，并降低成本⁷。灵活运行带来的成本节约能够和终端用户分享，从而激励他们改变用电行为，更好地利用清洁发电。

- 深化电力体制改革，将建筑电气化政策与电力市场和规划改革等政策相协调，使电价更准确地反映电力系统的成本（在理想情况下，包括排放成本），从而更好地优化电力、热力系统资源。发挥电力市场在更大范围内配置资源的作用，促进热泵等清洁用能终端更多使用可再生能源发电，推进建筑用电全绿色化、建筑用能全清洁化，促进净零排放建筑发展。

2. 解锁需求侧的灵活性

通过使用成熟的技术，包括发电侧的可再生能源和用电侧的清洁供暖和热水技术，实现建筑电气化是未来的一种必然趋势。而如何更好地发掘智能供热的灵活性，还需要一系列政策和市场的激励机制。其他国家也面临着和中国一样的机遇和挑战，同样也在探索解锁需求侧灵活性的最佳实践。基于美国和欧洲对供热灵活性的经验，我们认为中国可以找到更适合中国的激励政策和商业模式，从而进行跨越式的发展。近年来，由于智能化和数字化技术赋能，中国电网的输配电能力、调度水平、对新型负荷的适应能力大大提升，很多新的热泵应用情景变得可能，从热泵响应灵活的分时电价机制到电力调度直接控制都为开发需求侧灵活性带来了新的增长点。

2.1 实施分时零售电价

2021年7月，国家发改委发布的《进一步完善分时电价机制的通知》为分时电价的设计和 implement 提出了新的要求。分时电价能够为电力用户发送信号，更好地引导用户将电力消费转移到清洁能源多发的、电价较低的时段，从而更好地利用现有的系统资源，同时减少个人的电费支出⁸。对于建筑领域的居民和商业用户来说，让电价反映用电的成本是非常重要的，这可以通过将不仅仅是发电，也包括输配电的成本合理地分配到随时间变化的零售电价中。国际上，除了传统的分时电价（TOU），还有更为灵活的零售电

⁶ Heinen, S., Mancarella, P., O'Dwyer, C., & O'Malley, M. (2018, June 18). Heat electrification: The latest research in Europe. *IEEE Power & Energy Magazine*.
https://www.ieee.org/ns/periodicals/PES/Articles/PE_JulAug-HeatElectrification.pdf

⁷ 一部分原因是需求侧储热比蓄电成本更低，是更理想的灵活性措施。

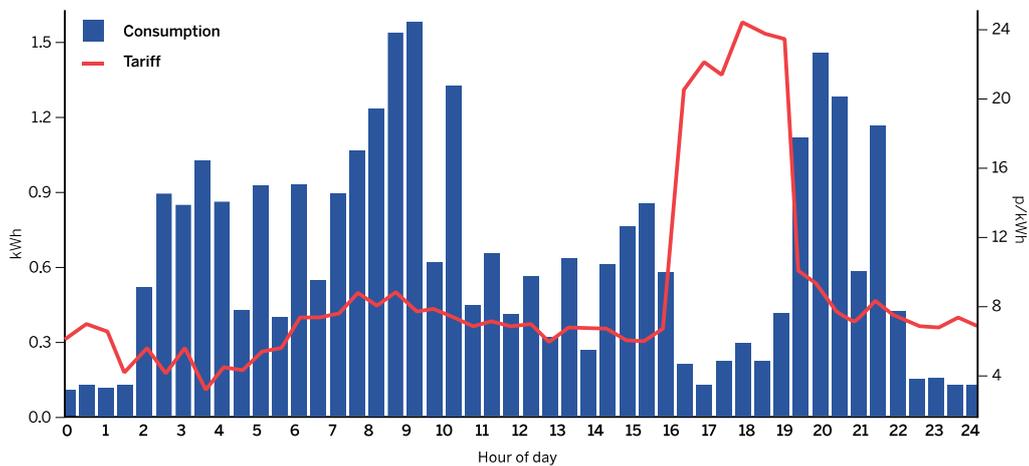
⁸ 睿博能源智库（2021年11月）为电力用户实施分时零售电价的国际视野和几点建议。
https://www.raonline.org/knowledge-center/rap_time-varying-pricing_cn/

价形式，例如，动态尖峰电价（CPP）和实时电价（RTP）。可调节的智能终端（例如热泵）在这些电价信号的作用下，就可以按照用户的设置，进行需求响应，帮助电网灵活应对未来较短时间内的变化，消纳更多的间歇性可再生能源，维护电网的安全可靠运行。另外，中国也有待进一步加强电力零售市场监管，以确保电力零售商所推出的价格套餐仍然能够为电力用户传达有效的分时电价信号。

热泵响应实时电价信号的商业模式

用户可以主动或对热泵控制系统进行设置使得热泵自动对分时价格信号进行响应，起到削峰填谷的作用。我们已经知道设计良好的峰谷分时价格可以推动用户改变用电行为，而在智能终端，例如自动热泵控制系统作用下，电价的有效性会进一步发挥出来⁹。英国的 Octopus Energy 电力零售商于 2018 年推出了新的电价套餐，通过直接和日前电力批发市场的半小时电价挂钩制定动态实时零售电价，并借助通讯设备为用户在前一天下午 4 点半沟通第二天 24 小时电价，以促进用户做出用电决策。在出现负电价的时段，用户还能收到系统通知，及时调整用电负荷；有自动控制的终端（例如热泵和电动汽车）可以根据预先设置自动开启运行，以帮助消纳可再生能源。初步结果表明 Octopus Energy 公司的平均峰值负荷减少了 28%，因此带来了巨大的系统收益，95% 的用户相比之前的电价水平，也有不同程度的电费降低¹⁰。图中显示了装有热泵的用户 24 小时的负荷曲线以及实时电价（便士/千瓦时）。说明用户通过将负荷转移到非峰值时段积极响应了这种电价结构。

图1. 热泵用户的实时电价以及负荷转移¹¹



⁹ Blonz, J., Palmer, K., Wichman, C. J., & Wietelman, D. C. (2021, July 21). *Smart thermostats, automation, and time-varying prices*. Resources for the Future. <https://www.rff.org/publications/working-papers/smart-thermostats-automation-and-time-varying-prices/>

¹⁰ Octopus Energy. *Agile Octopus — A consumer-led shift to a low carbon future*. <https://octopus.energy/static/consumer/documents/agile-report.pdf>

¹¹ Rosenow & Lowes, 2020, Page 20, Figure 4.

2.2 电力调度直接控制热泵的模式和案例

除了基于灵活电价做出需求响应以外，还有一种是电力调度中心直接控制热泵的模式。由于对大量电气化终端的接入对配电系统可能造成的拥堵以及容量超载的担忧，为了更好地匹配用电负荷和可再生能源发电，以及更简单有效地保障系统可靠性，一些电力系统运行商或者通过第三方在和用户产生约定的前提下，直接控制用户的热泵系统，提供需求侧管理服务，并支付用户一定的经济补偿。国际上，由于电力用户对项目的不理解，和对电力公司的不信任等原因，目前有较少直接负荷控制（DLC）现实案例，通常也仅仅作用在电网的紧急状态下¹²。中国已经开展了一些电力调度直接控制热泵的试点并取得了一定的实战经验。例如，2021年4月23日，山东省调度利用源网荷储协同调度和控制平台，对山东威海的十个小区的楼宇空气源热泵进行了直接控制，提升大电网的短时功率平衡能力，促进风电、光伏等可再生能源的消纳利用¹³。在用户无感知的情况下，利用峰谷电价，预计能够节省用户10%的电费。

3. 探索基于电力市场机制

国家发改委和国家能源局在2018年2月发布的《关于提升电力系统调节能力的指导意见》¹⁴中提出需要从电源、电网和需求侧提升灵活性，并将完善电力辅助服务补偿市场机制和推进电力市场建设作为体系支撑。在国际上，允许需求侧资源特别是需求响应参与电力批发市场和辅助服务市场，与传统资源同台竞争，并获得合理的回报被认为是需求响应发挥巨大潜力的重要途径。

3.1 需求侧资源参与电力批发市场（电能量市场和辅助服务市场）

在美国，区域电力市场允许需求响应参与容量、电能量和辅助服务市场。针对规模小和分布分散的分布式资源，主要模式是通过需求侧资源集成商对用户的灵活终端进行集成虚拟电厂（VPP），并在电力批发市场上竞标。由于热泵技术灵活智能可控而且对用户无感操作的特点，成为市场化需求响应的新的增长点，并在可再生能源和制热耦合方面产生了新的应用情景。虽然，用于供暖和热水的热泵由于机械构成原因，很难提供

¹² Stenner, S., Frederiks, E. R., Hobman, E. V., & Cook, S. (2017, March 1). Willingness to participate in direct load control: The role of consumer distrust. *Applied Energy*, 189, 76-88. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0306261916315458?token=10B1D9D208B1E8D999005C67E4EBC11EF61FBFDC23272D831135A8C0EB2847893AD8FCBF2D25E2FEB483C7F57BB4EA31&originRegion=us-east-1&originCreation=20211229024729>

¹³ 持续攻坚 为新型电力系统“接力续航” 国网山东电科院凭技术实力支撑全国首次万千瓦级别空气源热泵负荷省调侧直接调控试验。 <https://w.dzwww.com/p/8719867.html>

¹⁴ 国家发展改革委 国家能源局《关于提升电力系统调节能力的指导意见》。发改能源〔2018〕364号。 http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-09/29/content_5434855.htm

超短期（低于分钟）的辅助服务，但是热泵供暖和热水都可以满足负荷曲线重塑、负荷削减和转移的功能¹⁵。在中国，电力批发市场特别是现货市场还处在建设发展阶段，如何让电力市场与分布式资源发展起到互推作用，还是一个有待完善的领域。在 2015 年电力体制改革以来，许多省都建立了中长期和现货相结合的电力市场，并对辅助服务市场进行了一些尝试。以广东为例，通过完善市场规则允许包括用户侧制冷/制热和储能在内的需求响应资源参与电力市场，并基于市场价格对需求响应进行补偿，为中国其他地区的需求响应参与市场模式提供了有益的参考。目前起步阶段，广东仅在系统预测出现紧急状况时，进行电网公司邀约的日前削峰和填谷需求响应，未来需求响应有机会常态化参与现货市场日前和实时电能量市场联合优化出清，并逐步放开至辅助服务市场¹⁶。

3.2 电网灵活性资源采购

输电和配电系统运行商为了确保资源充足性和电网可靠性，减少电网扩容，可以利用基于市场的方法来采购灵活性资源。这种方法通常是在没有完善的电力市场的细分环节，特别是在配电侧由系统运行商组织的以竞价为基础的灵活性资源采购。由于比起发电侧，电网侧灵活性具有更好的成本优势，包括热泵在内的分布式能源资源成为提供灵活性的主要来源。由于输电和配电运行商在同一时刻可能对灵活性的需求不同（或存在冲突），一些欧洲国家（例如，丹麦）开发了基于服务的灵活性交易平台¹⁷，以方便从多个负荷聚合商采购包括降低高峰负荷，消纳分布式发电，减少电网阻塞，提供调频备用等服务，并进行灵活性评估、市场出清、合同签订和结算等服务。然而，目前还需要在一些方面继续完善，特别是 1) 更好地协调输电和配电系统运行商，以优化叠加价值，满足不同服务需求；2) 准确地计量分布式能源所提供的灵活性服务；3) 建立清晰明确的监管框架。

¹⁵ Shipley, J., Lazar, J., Farnsworth, F., & Kadoch, C. (2018). *Beneficial electrification of space heating*. Regulatory Assistance Project. <https://www.raonline.org/knowledge-center/beneficial-electrification-of-space-heating/>; and Farnsworth, D., Lazar, J., & Shipley, J. (2019). *Beneficial electrification of water heating*. Regulatory Assistance Project. <https://www.raonline.org/knowledge-center/beneficial-electrification-of-water-heating/>

¹⁶ 广东能源局、南方能监局印发《关于征求〈广东电力市场容量补偿管理办法（试行，征求意见稿）〉等文件意见的函》附件，广东省市场化需求响应方案（试行，征求意见稿）
<https://chuneng.bjx.com.cn/news/20201216/1122577.shtml>

¹⁷ 例如，FLECH是一个灵活性服务出清平台，由丹麦Ipower consortium开发和演示。请见从基于服务的灵活性交易到跨行业能源系统的集成设计、规划和运行：丹麦的能源互联网理念。中国电机工程学报，第35卷第14期。2015年7月。

电力和供热综合资源规划

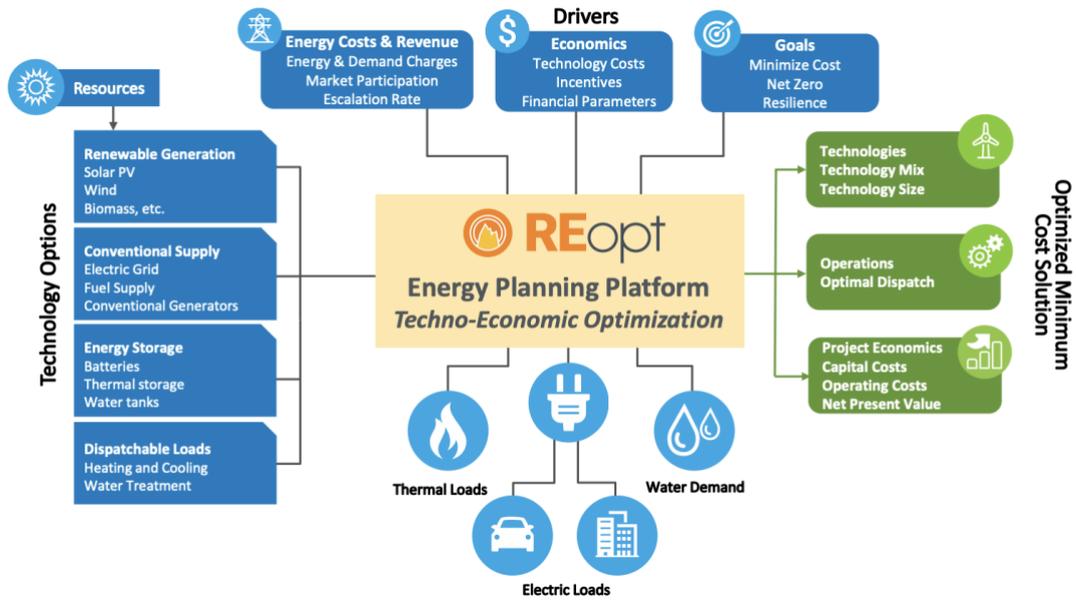
中央以及地方的十四五发展规划将热泵作为节能和低碳技术，却并没有重视热泵能够为电力系统提供灵活性方面的作用。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》¹⁸中提出推进能源革命，建设清洁低碳、安全高效的能源体系，提高能源供给保障能力。加快发展非化石能源，坚持集中式和分布式并举，提高电力系统互补互济和智能调节能力，加强源网荷储衔接，提升清洁能源消纳和存储能力。近几年的国家和地方政策也将热泵作为可再生能源供热的范畴，例如，能源局在2017年的《关于促进可再生能源供热的意见》¹⁹中强调通过可再生能源与化石能源耦合、可再生能源系统集成等模式，建立一批分布式能源站示范工程，利用“互联网+能源”建立能源供给侧和需求侧响应机制。

在国际社会，人们更多关注如何使用清洁发电和电气化产品来替代传统化石能源在供热系统中的使用，减少未来对新增燃煤、燃气调峰电厂的需求。因此，也出现了一些跨行业的综合资源规划方法，例如，电力和供热综合资源规划，从而更好地为电力和热力系统提供灵活性，优化电力和热力的生产和使用。它的主要工作步骤包括：

- 目标是在保障电力和供热系统运行可靠的前提下，利用综合能源满足电力和热力需求，减少成本，降低 CO₂ 和其他污染物排放。
- 在电力领域，需要充分考虑到电气化和气候变化对负荷增长和输配电的影响，以及所产生的成本和排放的改变。
- 在热力领域，需要充分考虑到低碳供暖技术的分布和组成以及供暖网络和储能在匹配热力供应和需求方面的作用。
- 从经济、社会、环境方面综合评估，确定最优综合资源方案，允许清洁需求侧资源替代传统燃煤燃气发电或供热机组。

¹⁸ 《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》
http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm

¹⁹ 能源局《关于促进可再生能源供热的意见》
<http://zfxqk.nea.gov.cn/auto87/201704/P020170424554048673218.pdf>

图表 2 REopt模型的输入和输出²⁰

随着能源转型的步伐加快，传统的分部门规划已经不能适合多能互补的需要。一些电力公司、综合能源服务公司以及政府机构越来越多地采用电力和热力综合资源规划，将其应用于资源组合筛选、项目开发、资源运行的各个阶段。美国国家可再生能源实验室基于这个理念开发了REopt模型²¹。图2简要展示了这其中一些关键内容。它在负荷预测的基础上，采取技术中性的态度，公平比较包括需求侧在内的措施（例如，储能、需求响应和能效），以经济、低碳、安全、韧性作为驱动力，不断对资源组成和规模进行优化，并支持调度运行决策，同时满足电力、空间供暖/制冷和热水的需求。美国许多州都开展了电力行业的综合资源规划，最近几年来一些比较先进的州，如加州和华盛顿州才开始探索综合建筑、交通和电力的资源规划。类似的跨行业综合能源规划也被应用于欧洲国家，例如，丹麦、英国和德国。

在苏格兰，这种综合能源规划被称为Energy Masterplanning。苏格兰政府于2009年出台气候变化法案，并于2013和2015年陆续发布了电力和热力政策声明向低碳综合能源方向转型。在这些国家政策目标下，区域和城市制定了综合能源发展策略，根据区域和城市的资源情况在电力和热力领域找到了一系列技术选择，特别是发展分布式能源的机会。在此基础上，针对单个项目进行全生命周期社会、经济、环境评估和模拟分析来支持最优

²⁰ National Renewable Energy Laboratory. *REopt: Renewable Energy Integration & Optimization*. <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/76700.pdf>

²¹ 信息来源同上，目前利用REopt开展的项目和案例，请见<https://reopt.nrel.gov/projects/index.html>

决策，最后再通过可行性分析确定包括商业模式以及热力电力传输等具体实施细节²²。

综合资源规划也面临着一些挑战，特别是需要完善对热负荷和电负荷的预测方面，除了在电力系统内部协调发电、输电和配电规划，还要进一步将研究领域扩展到其他能源和基础设施，例如，天然气、生物质能、地热能和供热网络，并需要进行时间、空间多维度的优化，以及应对不确定性和风险管理。最后，在整个电力和热力综合资源规划的过程中，需要有负责热力和电力的监管者，能源服务公司以及终端用户等各个相关方的参与才能更好地合作协调，实现综合资源规划所带来的多重收益。

总结

中国电力系统的清洁转型为建筑行业低碳化提供了必要条件，建筑电气化以及提高供热的灵活性将成为建筑行业碳达峰碳中和的重要途径之一。本文在借鉴国际经验的基础上，通过梳理智能供热低碳化的基本原则，从电力市场、电价机制、电力系统运行、综合资源规划等方面讨论了解锁供热灵活性的政策机制，并介绍了电力和供热综合资源规划在满足多重目标，减少系统成本，更好地利用清洁能源和灵活运行方面的作用。

中国建筑低碳化的一些关键技术（例如，热泵）的发展已经趋于成熟，未来的政策应该从提供经济补贴支持技术本身，逐步将重点转移到顶层设计以及电力和热力系统能源结构的转变（减少化石能源的使用）。我们建议中央和地方政府创造协同机制，在电力和热力行业继续深化体制改革：

- 中央政府可以出台相关法律法规，要求区域和城市制定清晰的综合能源发展政策目标和路线图，在具体项目层面通过综合资源规划进行技术经济分析，确定包括热泵在内的清洁技术在满足供暖/制冷和热水需求的规模，以充分发挥新技术在节能减排和降低成本的作用。
- 通过改善电力市场的设计，使得灵活性资源（例如，储能、需求响应）能够公平参与竞争，获得合理回报。
- 更好地实施分时电价，反映电力系统不同时间发输配环节的成本，从而激励电力用户灵活使用建筑电气化终端。
- 在监管允许的情况下，没有现货市场或者现货市场发展还不够完善的地区可以尝试采用电力调度直接控制灵活终端和电网灵活性采购等新型的商业模式和运营平台，为进一步挖掘电力灵活性创造条件。

²² 有关Energy Masterplanning的具体方法、步骤以及所需的数据等内容见 Scottish Enterprise. (2015). *Developing Scotland's energy infrastructure — A guide to energy masterplanning*. <https://www.districtheatingscotland.com/sites/default/files/A%20Guide%20to%20Energy%20Masterplanning%202015.pdf>



Energy Solutions for a Changing World

Regulatory Assistance Project (RAP)[®]
Belgium · China · Germany · India · United States

CITIC Building, Room 2504
No. 19 Jianguomenwai Dajie
Beijing, 100004

中国北京市建国门外大街 19 号
国际大厦 2504 室
邮编: 100004
raponline.org

© Regulatory Assistance Project (RAP)[®]. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial License (CC BY-NC 4.0).