

探索电气化供暖的需求响应潜力

陈晶莹

睿博能源智库

引言¹

在“双碳”目标的推动下，建筑供暖的电气化比例将显著提升，热泵在建筑供暖中的部署也应随之增加。热泵有促进电网和供热高效协同的潜力，在推进热泵部署时，还可以考虑其附加用途，例如为电力系统提供需求响应支持。热泵参与需求响应对供热和供电双方都有益处。对供热方而言，这种做法有助于降低热泵运行成本，拓宽供热企业的收入渠道，从而提升热泵的市场竞争力。对供电方而言，这能保障电力系统的安全稳定运行、减轻电网扩容压力，降低供电成本，并促进可再生能源电力消纳。

随着新型电力系统里新能源比重逐渐提升，对灵活性资源的需求也日益提高。需求响应²作为一种关键的灵活性资源，指电力用户根据电网需求主动调整用电量，以帮助电网削峰填谷、保障电力系统稳定、并促进可再生能源电力消纳。我国已为这一重要资源制定了相应的指导政策：2023年，《电力需求侧管理办法》³提出：“到2025年，各省需求响应能力达到最大用电负荷的3%—5%”。随后，《加快构建新型电力系统行动方案（2024—2027年）》⁴进一步提出，在

¹ 感谢睿博能源智库的何泉、Max Dupuy、王轩，以及段婧琳对本文提出的关键建议。

² 睿博能源智库. (2015). 需求响应：通过市场机制管理高峰缺电. <https://www.raponline.org/knowledge-center/需求响应：通过市场机制管理高峰缺电/>

³ 国家发展改革委等部门. (2023年9月15日). 《电力需求侧管理办法（2023年版）》发改运行规〔2023〕1283号.

https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202309/t20230927_1360902.html

⁴ 国家发展改革委 国家能源局 国家数据局. (2024年7月25日). 《加快构建新型电力系统行动方案（2024—2027年）》发改能源〔2024〕1128号.

https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content_6966863.htm

尖峰负荷或新能源消纳压力突出的地区，需求响应能力需提升至 5%—10%。而实际上，各领域的需求响应潜力仍待开发，其潜能更有望超越这些目标。

热泵能够通过灵活用电配合电力系统的供需平衡。它可以灵活调整运行时间和强度⁵：在新能源高发或电力需求低谷时段增加输出，从而缓解电网的可再生能源消纳压力；在新能源低发或需求高峰时段减少输出，以减轻电网负荷并确保供热稳定。建筑本身也具有热惯性，热泵可以在电力峰值前或在可再生能源发电充裕的时间提前预热，在良好建筑隔热下保证用户使用时温度的舒适性。这种调节对单个供热用户的影响较小，但当多个热泵系统聚集起来时，可以为电网提供显著的调节能力。

本文将主要探讨在中型区域供热（如小区、大型建筑）中安装的大型热泵，业内称之为“分布式热泵”。在中国北方，部分区域供热的换热站或分布式热源站已试点使用分布式热泵系统。这类供热系统具备集中管理和灵活调度的优势，是电热协同的重要潜在主体。通过电价机制激励热泵响应潜力、完善需求侧资源的补偿机制、添加储热设备提升热泵系统的调节能力，不仅可以拓宽供热企业的收入渠道，提升热泵的市场竞争力，还能保障电力系统的安全稳定运行，实现电网与供热系统的协同优化。

关于推进分布式热泵参与需求响应的方法，可考虑从以下三个方面着手：

一、优化电价机制，激励潜在需求侧资源

国内已有热泵参与“源网荷储”协同调控并实现运行费用下降的成功案例。例如，2021年3月，山东威海完成了全国首次省市两级的空气源分布式热泵日内万千瓦级负荷动态调控试验⁶。该试验通过调节空气源热泵出力，实现了1.2万千瓦的最大调节功率，占威海电网最高负荷的0.5%，成为柔性调控领域的重要技术突破，更证实分布式热泵拥有优先的调节能力。据报道，通过执行分时电价政策，参与电网自动调节的热泵用户每年可节省约10%的运行成本。这一成果不仅为电网提供了显著的灵活调节能力，还帮助用户节约了费用，展现了热泵作为需求侧资源的潜在价值。

为了更大程度挖掘和激励热泵的需求响应潜力，可以进一步完善电力市场和电价机制。优化分时电价的设计，可以更准确地反映电力系统运行状况，并鼓励热泵在适合时段提供需求侧资源。例如，可以科学透明地完善分时电价⁷和季节性电价⁸设计，将电力系统的短期和长期边际成本纳入考虑。此外，面对供热企业，政策制定者可以引入动态电价机制，如尖峰电价或实时电价⁹，

⁵ 王轩. (2022). 解锁灵活性资源促进建筑电气化-以热泵为例. <https://www.raonline.org/knowledge-center/heat-pumps-as-flexible-resources-cn/>

⁶ 牟金磊. (2021). 国网威海供电公司完成全国首次省市两级日内万千瓦级空调负荷调控试验. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_11894685

⁷ 张俊, Zachary Ming, 高驰, Max Dupuy. (2023). 分时电价优化设计的若干实用建议. https://www.raonline.org/knowledge-center/rap-time-of-use-whitepaper_cn/

⁸ 陈晶盈. (2024). 优化季节性电价 推动电气化供暖. https://www.cpn.com.cn/news/zngc/202406/t20240613_1709234.html

⁹ 睿博能源智库. (2023). 北美实践：向大型用户开启实时电价. <https://www.raonline.org/knowledge-center/us-experience-real-time-price-for-large-customers/>

让电价随电力供需变化动态调整，激励用户在电价低时段增加用电，而在电价高时段减少用电，从而提高用电的灵活性。

二、完善需求侧资源的补偿机制

分时电价可以作为引导需求侧资源参与需求响应的价格信号，其作用更多是潜移默化地改变用户用电习惯，但就其本身而言可能无法主动调动资源。特别是当分时电价未能准确反映实际电网状况，或其设计不够完善时，其激励效果可能大打折扣。为充分挖掘需求响应的价值，应该设计一套更完善、全面的补偿机制，以补偿需求响应为电力系统提供的服务价值。其中，“容量补偿”--类似于发电机组因可用发电容量获得的补偿--也可以用于激励需求响应资源。

美国在需求响应的市场化容量补偿机制方面已有一些尝试。在部分区域，负荷聚合商或工商业用户的需求侧资源会参与电力容量市场，通过容量市场确定需要提供的负荷，并由此获取电能量市场之外的补偿。例如，新英格兰独立系统运营商（ISO-NE）允许需求侧资源参与容量市场¹⁰，中标资源需在未来一定时间内参与日前和实时电能量市场，并随时准备调度，以兑现在容量市场中的承诺。值得注意的是，容量市场的补偿独立于电能量市场，需求响应资源在日前和实时电能量市场亦可获取收益。

在国内，今年6月发布的《江苏省电力需求响应实施细则》¹¹为需求响应补偿机制进行了积极的尝试，其机制及后续结果值得被关注。简单来讲，江苏省需求响应补偿采用“市场化竞价+合理补偿”的模式，根据实际响应的负荷和持续时长给予度电补偿，并设立了较高的补贴最高限价。对于能迅速达到响应标准的实时需求响应资源，在度电补偿上更增设容量补偿份额，即使在响应执行期间未被调用、无法获得度电补偿，仍可获得容量补偿。这种容量补偿的设计有两种优势：1.更准确地反映了可快速响应资源的价值，2.实时响应资源通常需要投入资源待命，容量补偿是对其前期准备工作的合理回报。

以上两个案例为完善需求响应补偿机制提供了初步思路。通过更准确、合理的补偿机制，可以充分激活需求侧资源的全面价值。热泵作为具备快速启停能力的设备，能够很好地适应新能源的波动特性。供热企业和用户可以通过优化热泵的运行策略，根据调度灵活调节热泵的运行，提供高价值的需求响应服务，同时获得更高的经济回报。这不仅能提升热泵系统的竞争力，也将进一步促进电网与供热系统的协同优化。

三、推广分布式热源站配置储热设备，提升电气化供热系统的灵活调节能力

配置储热设备能够显著增强供热系统的灵活调节能力，适应可再生能源出力的波动，还能优化供热和电力系统的协同运行，促进热泵系统形成规模化错峰用电。储热设备可以在电价低谷时

¹⁰ 高驰. (2024). 容量补偿机制设计思路探讨. <https://www.raponline.org/knowledge-center/dr-in-capacity-market/>

¹¹ 江苏省发展和改革委员会. (2024年6月13日). 《江苏省电力需求响应实施细则》苏发改规发〔2024〕2号.

<https://www.haimen.gov.cn/hmsfghjxw/xxgkzd/content/7f3b3a8a-3f9d-4311-9ddd-7d1487b69e67.html>

段存储热量，在电价高峰或供热需求增加时释放热量，即减轻了电网的负荷压力，又延长了热泵参与需求响应的时间窗口，提升了整体系统的经济效益。尽管节省电力成本的幅度因各地电价低谷差异而不同，节省力度也会有所差距，但储热平衡供需和延长调节能力的特点，使其成为推动电气化供热系统发展的关键技术选择。

丹麦已经在分布式供热系统中广泛配置储热设备。例如，哥本哈根区域供热系统配置了大型蓄热罐¹²或浅层储热设施¹³，在电力价格较低或风电出力较高时利用热泵将电能转化为热能并存储；当电价较高或供热需求增加时释放热量，为城市供热提供保障。通过利用当地丰富的风电资源和高效的储热装置，哥本哈根实现了更大规模的可再生能源消纳，同时为供热企业带来了更高的经济效益。

中国北方的区域供热换热站或分布式热源站具备添加储热设备的空间和技术条件，是推广储热技术的理想场景。例如，北京市6号能源站¹⁴以热泵为主，水储热为辅，形成了供热与电力系统协同运作的示范项目。这种配置显著提升了供热系统的错峰用电能力，充分利用低谷电价，既降低了供热运营成本，也为电网带来了削峰填谷的积极效果。供热企业可以将储热技术视作降低成本和拓展需求响应能力的方式，通过在新建或现有的电气化供热系统中加装储热设备，进一步增强供热与电力系统的协同效应。

后话

我国正在逐步扩大需求响应的应用，多个省份已经出台了支持需求响应的试点政策，但相关机制仍在持续完善，参与主体也需扩展。供热企业具有集中管理供热资源兼灵活用电的能力，并且获得的需求响应补偿也更能形成规模，是推进供热领域参与需求响应的优选机构。在推广热泵参与需求响应的初始阶段，可以由城市政府牵头，推动电网企业和负荷聚合商等机构与拥有需求响应潜力的供热企业参与需求响应。同时，持续探索虚拟电厂、负荷聚合商等主体参与电力市场的方式，进一步扩展企业提供需求响应的渠道，并通过市场决定合理补偿。对未参与电力市场、由电网直接调控的需求侧资源，建议建立完善的补偿机制¹⁵，激励更多用户参与。通过这些措施，不仅能够提升需求侧资源存量，还能增强热泵的市场竞争力，达成保障电力系统稳定运行、减轻供热碳排放的双重目标。

¹² Danish Board of District Heating. "Thermal Energy Storage for District Heating." <https://dbdh.dk/all-about-district-energy/technology/thermal-energy-storage-for-district-heating/>

¹³ Lars Gullev. (2021). "New Pit Thermal Energy Storage (PTES) in Greater Copenhagen--A business case for sharing investment and benefit." <https://dbdh.dk/new-pit-thermal-energy-storage-ptes-in-greater-copenhagen/>

¹⁴ 李博. (2023). 6号能源站助力北京城市副中心“近零碳”排放. <http://bj.people.com.cn/n2/2023/0706/c14540-40483485.html>

¹⁵ 见脚注10.



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

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

+86 10 8526 2241
china@raponline.org
raponline.org

中国北京市建国门外大街 19 号
国际大厦 2504 室
100004