需求响应对能源消费和经济效益的影响

**摘要**：2022 年和 2023 年，英国电力系统运营商 (Electricity System Operator of Great Britain) 推出了“需求灵活性服务”(Demand Flexibility Service, DFS) 计划，旨在鼓励公用事业单位和普通民众在高峰时段缩减能源需求。公用事业公司 Octopus Energy 实施了该计划的自创版本，名为“节能时段”(Saving Sessions)。这一举措包括向 Octopus Energy 的 140 万客户提供的 13 个不同需求响应时段，并向减少能源消费的客户提供奖励。我们利用全面的消费者数据和各种识别方法，估算了这项覆盖全国的计划对能源需求和经济效益的影响。此外，我们还进行了一次自然实地实验 (natural field experiment)，涉及不同的提前通知期，以及为客户参与“节能时段”提供的不同激励。我们发现：(i) 伴随着客户获邀参与“节能时段”，能源需求相应减少了 10%，并且，根据当地平均因果效应 (Average Treatment Effect) 估算水平，主动选择参与“节能时段”（个人在家中进行手动调整以改变需求）的家庭减少了 40% 的能源需求；(ii) 根据我们的首选模型参数，缩短签约客户的提前通知期使这些家庭的需求响应缩减了 25%；(iii) “节能时段”显示出介于 1.05 到 2.6 之间的公共资金边际价值 (marginal value of public funds, MVPF)，这取决于电网临近停电的时间，表明相对于所涉及的成本，该计划产生了积极的效益。

**结论**

随着可再生但不可调度能源在全球电网中的发电比例增加，需求侧响应对电网稳定的重要性也将增加 (Lever et al., 2021, Mata et al., 2020, National Grid, 2023*j*, Sanders et al., 2016)。过去，需求侧响应大部分来自于工商业消费者 (Element Energy, 2012, Warren, 2014)。家庭消费者是进一步响应的重要来源。

我们分析了英国有史以来最大的需求响应计划，以衡量其对能源需求和经济效益的影响。为了弄清该计划的影响，英国国家电网电力系统运营公司 (UK National Grid Electricity System Operator, NGESO) 根据英国电力平衡与结算法规 (electricity balancing and settlement code) P376 修正案，采用了一套特定方法来计算需求减少情况。这种方法类似于“前-后”对比，即以客户在“节能时段”之前的消费量为“基线”，并据此计算出需求减少量，定义为该基线结果与实际消费量之间的差额。我们担心这种方法可能存在偏误（如选择），这是我们研究动力的主要来源。

通过对比我们的 Octopus 与 Bulb DiD，我们发现，只需邀请客户签约“节能时段”，“节能时段”期间的用电量就相应减少了 ≈10%。通过使用我们的全部三个 DiD（双重差分，difference-in-differences/DiD)，我们发现，在“节能时段”期间，签约参加 DFS 活动减少了 ≈25% 的需求量。此外，我们还发现，在活动期间，“主动选择”参加“节能时段”使需求量减少了 ≈40%。

这些效果大于大样本随机对照试验 (large-sample randomized control trial) 中通常看到的效果。例如，据估计，家庭能源报告使客户的能源消费减少了 1-3% (Allcott and Rogers (2014), Brandon et al. (2017))。然而，我们发现的效果与分时定价 (time-of-use tariff) 和减少一天中特定时段需求的其他技术的影响相一致，这些影响常见于更小样本的观察中 (Crawley et al., 2021, Mata et al., 2020, Stromback et al., 2011)。正如对在主要高峰时段减少消费的努力进行的这些分析一样，“节能时段”只需人们在冬季减少 29 个半小时的需求。

我们发现，我们估计的需求减少量与使用 NGESO 认可方法估计的需求减少量之间存在差异。在这些半小时（即 14.5 小时）内，Octopus Energy 的客户群共减少了 1,642 兆瓦时的需求。相较于 Octopus Energy 按照 NGESO 的“前-后”比较法官方测得的 1,860 兆瓦时需求减少量，这一估算值低了 13% 左右。我们认为，这表明 NGESO 方法存在向上偏误，这种偏误既来自测量误差，也来自选择。尽管如此，对于使用 NGESO 首选方法得出的每次独立事件的结果，我们的 DiD 得出的结果与之存在相对密切的一致性。

我们还考察了通知期和激励水平（每千瓦时需求减少量对应的英镑金额）的变化如何改变客户的响应。几乎所有“节能时段”都会提前一天通知，而且对于任何给定的“时段”，客户往往会差不多同时收到提前一天的通知。此外，尽管激励水平在不同“时段”有所差异，但在同一“时段”内，不同客户的激励水平绝无差异。

两次“节能时段”（即 2023 年 2 月 13 日和 2023 年 3 月 15 日）具有不同的通知期，提供给客户的财务激励也不同。通过分析 2023 年 2 月 13 日“时段”的数据，我们发现，当日（而非提前一日）通知使“时段”内的消费量增加了 ≈7.1%。根据我们的 DiD，这部分额外消费量约占客户“节能时段”需求响应的 25%。2023 年 3 月 15 日的“时段”为大多数客户发送了当日通知，其中一部分随机客户还收到了一封特别的“预告提醒”电子邮件。可以说，这封补充邮件比标准的提前一日通知“更软性”，因为客户无法通过预告提醒邮件主动选择参加“节能时段”。而且，虽然邮件中说第二天可能会有一个“时段”，但这并不能保证一定有。尽管未作承诺，但我们发现，提前一天发送的预告提醒电子邮件使“时段”内消费进一步降低了 2-3%，约占该“时段”内签约客户实现的需求减少量典型值的 7%。就“时段”参与情况而言，我们还发现，当提前更长时间通知客户时，主动选择参与率会更高。我们发现，在收到短信（告知如果减少需求则可额外收到 1.25 英镑激励）的随机客户子群体中，主动选择参与率提高了、消费量降低了。然而，消费差异并不够精确，无法排除这些客户与未收到该短信的“一切照旧”的客户之间没有差异的可能性。

总体而言，我们的效益分析表明，相对于所涉及的成本，该计划产生了积极的效益。具体而言，当忽略“负荷停电损失”(value of lost load) 时，MVPF 为 1.05，边际效益非常低。然而，当我们将英国官方公布的负荷停电损失值归因于每兆瓦时的需求减少量时，我们发现 DFS 的 MVPF 很大，为 2.6。换言之，当负荷停电损失概率较高时，DFS 更有价值，而随着可再生能源渗透率的提高，以及英国燃煤电厂会在未来两年内退役，负荷停电损失概率可能会增加。此外，如果随着时间的推移，较高的“保证接受价格”（Guaranteed Acceptance Price，2022-23 “节能时段”为每兆瓦时 3,000 英镑）降低或不再必要，则 MVPF 可能会增加。

我们的效益分析做出了重要的简单化假设。特别地，我们假定这两种情况都是无成本的：1) 诸如 Octopus Energy 的 DFS 提供商实施诸如“节能时段”的 DFS；以及 2) 客户实际减少需求。不同客户每千瓦时需求减少量的激励有所不同，对这方面情况的进一步研究将对阐明提供灵活性的消费者效益成本至关重要。

最后，我们的分析表明，灵活性响应的价值和程度之间存在矛盾。我们认为，可以合理地假定，对于更远未来的那些半小时时段，电网运营商（如 NGESO）会发现更难预测某个给定半小时时段的负荷停电损失。“当所述半小时时段临近时，负荷损失变得更加确定”，如果这种说法正确，则我们的断点回归 (regression discontinuity design, RDD) 和实地实验结果表明，电网运营商和政策制定者可能面临权衡取舍。如果 NGESO 和电网运营商要求的通知期缩短，则灵活性的价值就会提高。然而，我们的研究结果表明，当家庭客户收到通知的时间更接近灵活性“交付”的时间时，他们的灵活性响应会更小，尽管仍然很可观。