



Research
Smart Grid and Energy Internet—Article

使用 IEEE 2030.5 标准在电网边缘进行可交易需求响应操作

Javad Fattahi, Mikhak Samadi, Melike Erol-Kantarci, Henry Schriemer *

School of Electrical Engineering and Computer Science, University of Ottawa, Ottawa ON K1N 6N5, Canada

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 February 2019

Revised 7 March 2020

Accepted 16 June 2020

Available online 25 June 2020

关键词

可交易需求响应

IEEE 2030.5

智能电网

多代理系统

领域协调

摘要

本文提出一种针对拥有发电资产的住宅客户网络的可交易需求响应 (TDR) 方案, 该方案强调了交易能源架构内的互操作性。完整的基于实验室的实施 (据我们所知) 首次实现了全面的 TDR 案例, 该案例完全符合电气与电子工程师协会 (IEEE) 2030.5 标准, 解决了网络安全智能能源规范 (SEP) 应用协议的互操作性。通过使用基于 Internet 协议 (IP) [局域网 (LAN) 和 Wi-Fi] 的通信协议和传输层安全性 (TLS) 1.2 加密协议的商业硬件的完整系统集成来提供验证, 而实证通过大量住宅智能电表数据仿真提供。需求响应 (DR) 方案旨在兼顾隐私问题, 允许客户选择其 DR 响应水平, 并提供激励措施以最大程度地提高其参与度。本文提出的 TDR 方案通过在交易代理 (TA) 和家庭能源管理系统 (HEMS) 代理之间实施 SEP 2.0 通信协议来解决隐私问题。客户响应由一个多入多出 (MIMO) 模糊控制器处理, 该控制器管理客户代理和 TA 之间的协商。我们采用多代理系统方法实现邻域协调, 通过 TA 在一个公共变压器上为多个客户提供服务, 并在基于事件的优化过程中利用激励机制最大化客户的参与度。基于在较长时间内获取的一组智能电表数据, 我们参与了多个 TDR 场景, 并通过符合 IEEE 2030.5 标准的全功能实现证明了我们的方案可以在现实条件下将网络峰值功耗降低 22%。

© 2020 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

分布式能源 (DER) 和可延迟负荷 [如电动汽车 (EV)] 的高渗透率, 由于其间歇性固有的不确定性, 正在给现代电网带来新的挑战 [1,2]。人们预计这将极大地影响电力系统的运行和控制 [2]。负荷曲线和 DER 供应的不确定性要求在客户端采用更灵活的方法。传统上由公用事业部门与他们的大客户使用的需求响应 (DR), 现在可能会随着双向通信的发展而被应用到住宅中 [3]。参考文献 [4] 提到了 DR 的基本原理, 参考文献 [5] 对其进行了全面讨论。有关需求侧管理中的 DR 的讨论, 请参

见 Nadel [6] 的文献。有关 DR 文献的详尽调查, 请参见 Vardakas 等 [7] 的文献。DR 通过特定的方法解决了消耗调整问题。DR 方法包括那些没有调度能力的方法, 如使用时间 (TOU) [8,9]、关键峰值定价 (CPP) [4,10,11] 和实时定价 (RTP) [12], 以及那些具有调度能力的方法, 如可用需求侧资源容量控制 (ADSRCC) [13,14] 和可用需求侧储备管理 (ADSRM) [15–17]。

现有的 DR 方法分为集中式或分层/分散式方法 [18]。在集中式方法中, 最佳解决方案是寻求使用跨电网扩展数据, 以最大化 DR 结果。然后, 该方法使用直接控制策略来追求理想的电网状态, 在这种策略中, 基于配电

* Corresponding author.

E-mail address: hschriemer@uottawa.ca (H. Schriemer).

系统运营商 (DSO) 和客户之间的协议, 其允许运营商对客户资产进行远程管理[19]。相比之下, 分层/分散式DR是一种间接控制策略, 其中控制器是具有一定程度的智能和决策自主权的本地代理。分层式DR方案可以通过主从方法实现, 其中本地控制器负责平衡本地生成和消耗[20]。

使公用事业部门能够吸引客户DER的控制策略可以采取多种方法[21]。其中, 交易式框架采用基于代理的方法来激励和管理系统行为[22-24]。与传统的DR项目类似, 交易式平台可以使用激励措施来确保必要的资源。Behboodi等[25]提出了一种交易式控制范式, 使恒温控制负荷能够参与实时零售电力市场。最近, 一种用于DR的交易式方法被用于商业建筑的供暖、通风和空调 (HVAC) 系统[26]。Daneshvar等[27]提议, 为部分配备了DER的不同农村地区进行能源整合, 以降低社区的总能源成本。交易式方法通常通过一些价格信号来解决DER管理, 这些信号可能是独立系统运营商提供的市场清算价格。实际实施的障碍仍然存在。最显著的是, 客户很少成为激励措施的参与者, 电力市场也缺乏统一的DR标准。

实际实施DR并不简单。在DER和非传统负荷预计会激增的电网边缘环境中, 在实现DR的全部潜力之前, 人们必须解决一些重大挑战。现有的集中式和分散式方法都假定必要的客户数据可用, 这可能会危害客户的隐私[28]。此外, 实际的实施还存在两个重大障碍: 如何解决动态系统状态调节, 以及如何确保可伸缩性。因此, 大多数方法都缺乏以下一个或多个因素: ①准确控制低延迟的时间尺度; ②响应灵活, 同时保持互操作性; ③遵守隐私要求的同时充分确保合法性; ④在保证边际成本较低的同时确保通信的可靠性; ⑤网络安全。参考文献[29,30]中提出了一种聚类方法, 用于解决客户生活方式和响应的弹性。在电网中使用交易方法的分布式控制器有助于减少延迟、增加灵活性和可伸缩性, 但在一个平台中解决所有需要的因素仍是一项正在进行的研究。

我们在交易能源 (TE) 框架中解决上述挑战, 该框架利用互操作性作为参考架构来实现我们的DR方案。TE框架提供了一种从经济和控制系统的联合角度解决智能电网运行目标的方法, 该方法将价值作为关键运行参数[31]。该方法具有描述特定方法特征的属性。Chen和Liu [22]回顾了DR以及TE新方法的研究和行业实践, 指出人们在提高性能方面仍需克服的巨大障碍, 特

别是在技术、可伸缩性、系统管理和消费者行为方面。Nunna和Srinivasan [32]为基于微电网间竞价的电力市场提出了一种基于代理的TE框架, 该框架将DR纳入了其能源管理策略。Good等[33]最近讨论了DR业务案例的TE建模和评估框架。Zia等[34]最近提出了一个多层TE架构以及验证经济交易所需的分布式账本方法。

互操作性是关键TE属性[35], 因此, 与上述自上而下的方法相反, 为了解决所观察到的缺陷, 我们使用电气和电子工程师协会 (IEEE) 2030.5标准的智能能源规范 (SEP) 应用协议[36]作为参考架构的核心, 来实施TDR方案。该标准使用基于传输控制协议 (TCP)/互联网协议 (IP) 的HTTP请求/响应模型, 并采用可扩展标记语言 (XML) 作为数据交换格式。传输层安全性 (TLS) 1.2提供了机密信息交换协议, 以确保通信的不同方的真实性及消息的完整性。在TDR设计实现中所表达的信息 (语义) 和网络物理 (句法) 互操作性可以确保: 如果我们可以通过基于实验室的仿真将数据加载到实际硬件上进行演示, 就可以以安全和可扩展的方式满足经济和商业目标的实际需求, 进而通过交易的价格信号来提高聚合用户的DR响应度。

我们使用事件驱动的自主分布式体系结构, 在交易代理 (TA) 和符合IEEE 2030.5标准的多个家庭能源管理系统 (HEMS) 代理[37,38]之间进行实时通信。除了具有受HEMS控制的各种负荷外, 住宅客户还拥有发电和存储资产。我们的TDR方案采用多代理系统方法[37]对这些代理进行领域协调。位于聚合TA和每个HEMS代理之间的交易是分层的。也就是说, HEMS代理不直接交易, 它们与TA合作, 但彼此不合作。这种方法通过设计增强了隐私性, 同时让HEMS的认知智能与TA社区中的所有其他房屋进行协调, 使其能够找到DR请求的最佳自主性调节。TA会通过每个HEMS代理商来寻求最大化此网络上的DR请求, 但要遵守每个业主在他们可能愿意配合此类请求的程度方面设置的约束。TA通过向每位业主/客户传达一个不断变化的价格信号, 作为他们积极参与交易谈判的激励, 以经济方式促进合作。

本文的结构如下。第2节描述了系统架构及其通信层次结构, 同时对IEEE 2030.5标准进行简要概述, 将TDR必需的函数集和必要元素的摘要归纳至Appendix A。第3节介绍了HEMS代理操作。第4节对过去和现在的顾客行为进行量化, 前者通过对顾客消费的描述进行预测使用, 后者通过激励函数进行调解交易式谈

判。第5节介绍了TDR算法，并详细说明了协商的优化方法。第6节给出了各种情况下的仿真结果。第7节得出结论。

2. 系统架构和 SEP 2.0 通信

TE框架利用互操作性作为一个参考架构来实现DR方案。我们使用事件驱动的自主分布式架构，并在代理之间进行实时通信。TE框架利用IEEE 2030.5 SEP 2.0标准[36]实现互操作性。使用SEP 2.0作为数据模型，该模型基于IEC 61968通用信息模型[39]，我们的应用程序编程接口(API)以“RESTful”(其中REST表示状态传输)[40]方式使用电网边缘资源。公钥基础结构(PKI)[41]用于提供针对不可抵赖性攻击的保护。

如图1(a)所示，TDR系统的结构配置由TA和作为主要电网边缘代理的HEMS代理的聚合体组成。TA在物理上与邻域配电变压器在同一位置。TA与公用事业部门的通信提供了集中的电网状态监测和控制。TA与HEMS代理的沟通，协调了所有DR请求和回应，并监控变压器低压侧的本地微电网。如图1(a)所示，TA通过与每个客户的主动协商，采取了一种优化方法来分配DR请求，如下所述。

HEMS代理是一个居住单元，负责客户资产(简称“负荷”)的控制和调度。它在SEP 2.0框架内运行，根据客户对消费模式、舒适度和负荷优先级的选择来处理TA请求，详见第3节。根据TDR需求，HEMS代理将此类服务中的数据转换为SEP 2.0推荐的XML文件[参见图1(a)中的青色框]，该数据包含了本地功率测量，以便验证DR的作用。HEMS代理通过设计维护客户隐私，以及充当客户代理对来自TA的负荷特定活动和客户行为的任何知识进行防火墙处理。HEMS代理通过与TA协商来保证对DR请求进行最佳响应，并使用模糊推理引擎来适应客户的喜好和舒适度，以响应TA所提供的激励(其也可能被指示响应强制性的DR事件)。下一节将更详细地描述这种行为。

图1(b)显示了在实验室测试配置中的TDR系统的物理实现。在左侧面板中，直流电从顶部光伏(PV)面板传到变压器②，然后传到Tabuchi电动生态智能电池系统[42](逆变器③和电池④)。TA①在配电板上。底部面板显示了与TA通信的HEMS代理⑥，并且HEMS代理与Energate[43]HöIHöm智能恒温器和负荷控制器⑦(HEMS)进行交易，底部面板还显示了用户界面⑤。

图2描述了通过XML文件的GET命令进行的SEP 2.0消息传递序列。高级DR事件由实用程序服务器启动，

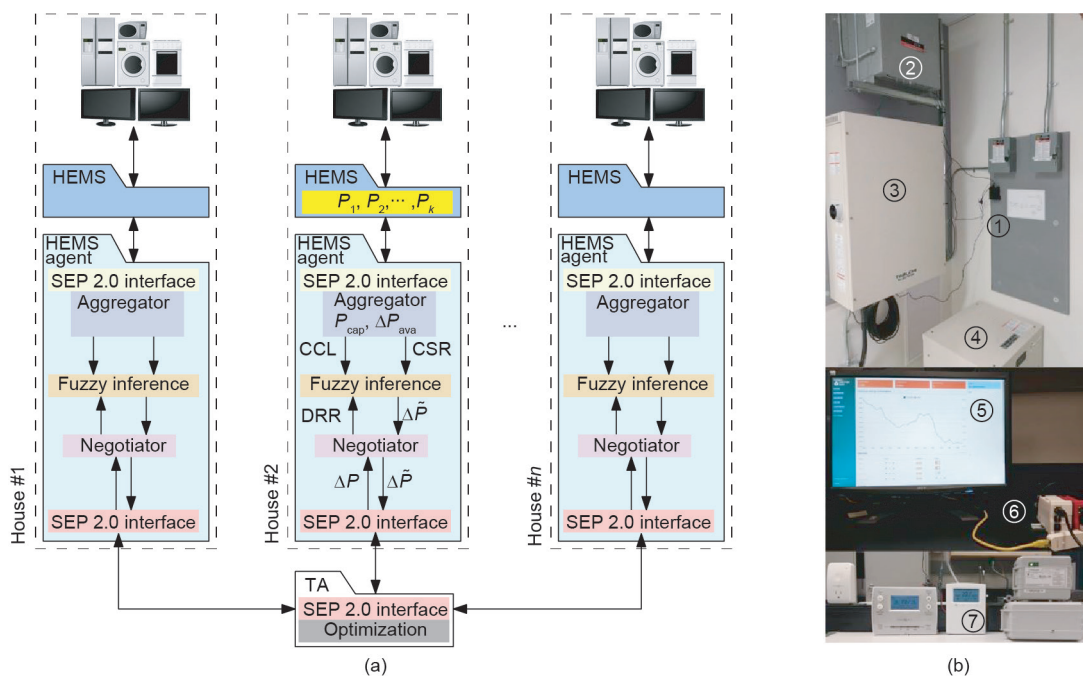


图1. (a) TDR的结构架构。(b) 在实验室测试配置中的TDR系统的物理实现。顶部面板显示TA①、变压器②、光伏(PV)逆变器③、电池④；底部面板显示用户界面⑤和HEMS代理⑥、HEMS⑦、智能恒温器和开关。CCL: 客户合作级别；CSR: 客户预定的退货；DRR: 动态DR请求； P_{cap} : 住宅容量； ΔP_{ava} : 甩负荷能力； ΔP : 潜在的负荷减少； $\Delta \bar{P}$: TDR协商期间请求的负荷减少； P_k : 此客户的负荷 k 的功耗(以前为 $P_k^{(0)}$)，其中所有负荷的总和给出了客户 i 的当前功耗，在本文中用 P_i 表示。

并与TA进行通信。低级DR事件由TA发起，以响应本地资产监视（如变压器运行状况）。TA与各个HEMS代理，按照所示顺序发送XML函数集及其相应的元素。作为交易式协商和监视过程的一部分，HEMS代理向TA发送类似的消息，TA同样向DSO发送消息。在我们的体系结构中，根据下游设备的要求，HEMS代理是客户端，而TA是客户端或服务器。由于TA被防火墙阻止直接与客户端资产接触，因此我们采用分布式智能[44]方法进行基于代理的能源管理[45]。在以下各节中，我们会说明HEMS和模糊逻辑控制器（FLC）如何将通过SEP检索的信息用作HEMS代理来执行协商。Appendix A描述了用于实现必需的TDR活动的SEP 2.0函数集。值得注意的是，尽管当前的TDR方案仅使用了其一小部分功能，但在执行了完整的SEP服务器之后，所有代理都完全符合IEEE 2030.5智能电网互操作性标准。

3. HEMS 代理操作

HEMS代理负责与TA进行主动协商。该代理是使用FLC实现的。它与HEMS进行通信，以确定聚合的负荷和甩负荷能力，并传递DR请求以实施。下面，我们描

述了TA如何与邻域中的所有其他HEMS代理协调，并利用FLC的认知智能来找到DR请求的最佳自愿适应条件。一旦与HEMS代理进行的DR协商被完成，它将把此信息发送给HEMS，并由HEMS负责响应负荷。为此，我们使用了Energate [43]的商用HEMS，通过一个单独的应用程序编程接口确保IEEE 2030.5与此专有HEMS的兼容性。给定住宅容量 P_{cap} （即所有可控负荷的总铭牌功率），它基于HEMS提供的数据，用于确定甩负荷能力； ΔP_{ava} （即当前使用的所有可控负荷的总消耗，是最大的DR能力）用于计划间隔。HEMS代理确定了实现甩负荷的最有效的方法，无论是通过直接削减、更改负荷设定点和占空比，还是通过本地DER调度（在此视为负负荷）。

IEEE 2030.5标准描述了可实现智能电网功能的过程，但未定义实现它们的方式。这种区别是互操作性框架的核心。我们在该交易规范中执行此标准，并使用下面描述的归一化数量更好地揭示HEMS代理如何在交易过程中展示认知能力。通过客户合作级别（CCL）[46]启发式地实施客户约束，以表明响应TDR请求的意愿程度。在不失一般性的前提下，仅定义两种模式就足够了：①良好，当客户将进行一些行为修改以符合TDR要求时使用；②不良，用于客户希望在TDR事件期间对其使用行为产生最小影响的情况。也就是说，CCL是一种由客户设置的HEMS代理操作模式，它定义了FLC如何响应DR请求。

在进行主动协商期间，我们需要确定客户 i 的HEMS代理愿意承受的负荷减少量 ΔP_i ，该值小于或等于甩负荷能力 ΔP_{ava} 。我们通过住宅容量（即所有可控负荷的铭牌功率之和） P_{cap} 对 ΔP_i 进行归一化，以将客户计划收益（CSR）定义为

$$CSR = \frac{\Delta P_i}{P_{cap}} \quad (1)$$

以补充方式，将动态DR请求（DRR）定义为协商期间潜在需求减少量 ΔP 与住宅容量的比例：

$$DRR = \frac{\Delta P}{P_{cap}} \quad (2)$$

式中， ΔP 在第5节中有更详细的描述，并且是由TA根据各个客户的历史记录（见第4节）发起的。

我们使用多输入多输出（MIMO）模糊控制方法[47]为每个家庭和指定的CCL提取TDR协商期间的需求减

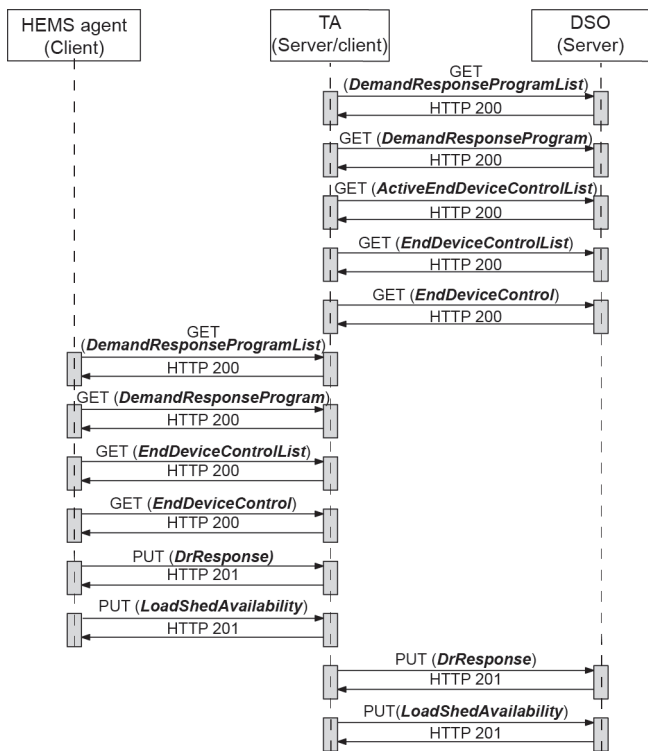


图2. 在TDR的DSO、TA和HEMS代理之间使用SEP 2.0的通信层次结构。

少量 $\Delta\tilde{P}$ ，即

$$\Delta\tilde{P} = \tilde{x} P_{\text{cap}} \quad (3)$$

式中， \tilde{x} 是FLC的归一化输出。遵循以下三个步骤确定此输出：模糊化、模糊推理和去模糊化。等式(1)、(2)提供了论域。

模糊化处理了FLC输入的清晰数据，并将这些数据转换为语言变量，本文选择的是Low-Low (LL)、Low (L)、Medium (M)、High (H)和High-High (HH)变量。每个变量都与由三角波函数 $\mu(x)$ 定义的隶属函数相关，其中 x 是介于0和1之间的隶属度值，该隶属度值描述了输入空间(CSR或DRR)中的一个点。图3给出了输入(以及输出)的隶属函数，这些函数定义了论域中每个点如何被映射成介于0和1之间的隶属度值(或隶属度)。

模糊推理过程将隶属函数与控制规则结合在一起，以在查找表中呈现模糊输出，该查找表使用语言变量描述了输入和输出之间的功能映射。使用基于规则的FLC可以使我们最大限度地捕获相关问题的知识多样性，以及其变量之间的相互作用和关系，并最大限度地适应系统中的不确定性[48]。表1和表2分别给出了不良CCL模式和良好CCL模式的规则库。

去模糊化用于将模糊输出转换为清晰的值。给定隶属函数的对称性，利用面积重心(COA)方法从被评估的隶属函数中确定 \tilde{x} 。然后，通过等式(3)确定协商的负荷减少量，并使用LoadShedAvailability、DrResponse和DER函数集将信息发送到TA，如Appendix A所述。

4. 量化顾客行为

我们使用真实数据模拟客户消费行为。Hydro Ottawa [49]服务区内的智能电表数据是在45 d内以1 min的间隔为10个匿名住宅用户收集的。然后，使用 k 均

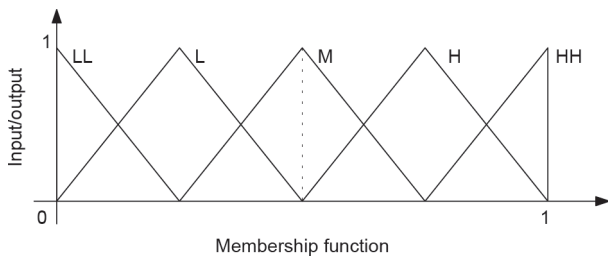


图3. 输入(DDR、CSR)或输出(\tilde{x} ，去模糊值)的隶属度值(水平轴)的隶属函数(垂直轴)。图中显示了与每个隶属函数相关的语言变量LL、L、M、H和HH。

值聚类对客户进行分类。TA使用此信息来启动与每个HEMS代理的交易协商过程，具体请参见第5节中的等式(7)。

k 均值方法将数据划分为多个族，其中族群的隶属是通过最小化目标函数来确定的，该目标函数由每个时间 t 的所有 N 个数据点与族中心之间的平方距离之和定义[50]。因此

$$J(t) = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{n^{(i)}} \left[\mathbf{P}_j^{(i)}(t) - \mathbf{P}_c^{(i)}(t) \right]^2 \quad (4)$$

式中，在每个时间 t ， $\mathbf{P}_c(t)$ 是聚类中心的 K 个元素向量； $\mathbf{P}^{(i)}(t)$ 是消耗数据的 $n^{(i)}$ 个元素向量； $N = \sum_{i=1}^K n^{(i)}$ 。 $N = 470$ 和 $K = 3$ 的

表1 用于不符合TDR请求的模糊规则库，其中输入为DDR和CSR，结果输出显示在灰色区域中

CCL = poor		CSR				
DRR	—	LL	L	M	H	HH
	LL	LL	LL	LL	LL	LL
	L	LL	L	L	L	L
	M	L	L	M	M	M
	H	L	M	M	H	H
	HH	M	M	H	H	HH

表2 用于符合TDR请求的模糊规则库，其中输入为DDR和CSR，结果输出显示在灰色区域中

CCL = good		CSR				
DRR	—	LL	L	M	H	HH
	LL	LL	LL	LL	LL	L
	L	L	L	L	M	M
	M	L	M	M	M	M
	H	M	M	M	H	H
	HH	M	M	H	H	HH

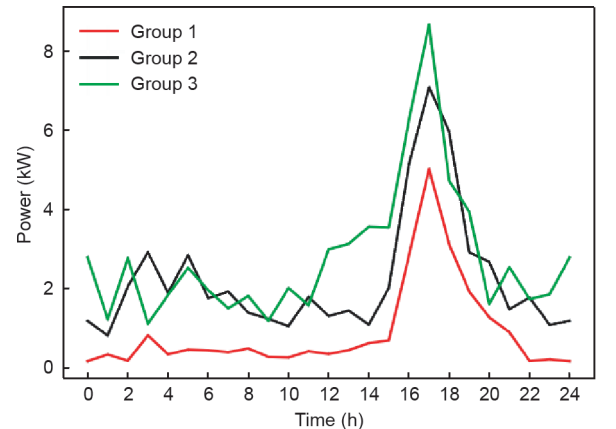


图4. 三类客户的消费行为。

聚类分析结果如图4所示。单个聚类大小 n 为3、2和5。

为了进一步量化客户行为并实现有效的协商，我们的TDR算法（在第5节中进行了详细介绍）结合了灵活的激励功能，以适应功耗和TDR响应量方面的差异。它也可以用于从参与TDR请求中获利，并可以通过调整以适应市场信号。对于每个协商时间间隔，我们为每个客户 i 定义一个激励函数：

$$r_i = r_0 + c_0 \left[c_1 (\bar{P} - P_i) / P_T + c_2 (d_i - \bar{d}) / d_T \right] \quad (5)$$

式中， r_0 是TDR参与的基本激励； P_i 是客户的当前功耗； \bar{P} 是过去24 h内所有参与者的平均功耗； P_T 是所有参与者的当前总功耗； d_i 是客户在谈判过程中的任何阶段的DR响应量； \bar{d} 是所有参与者的平均响应量； d_T 是所有参与者的总响应量。相对功耗和响应量分别由正系数 c_1 和 c_2 缩放，其中 $c_1 + c_2 = 1$ 。这样可以在TDR协商中动态加权以降低功耗或增加响应量，这可能是改进协商过程所必需的。本文中，我们默认静态加权相等。最后，为了解决族群的隶属问题，选择 c_0 作为总体加权因子，从而略微偏向于减少消耗的传统。我们采用[1.0, 1.3]的范围，而 c_0 与客户消费量成反比。这促进了族群之间的竞争。

在协商过程中（通过 r_0 ）持续更新激励函数，以鼓励增加DR响应量的趋势。激励函数还包含在*MirrorUsagePoint*函数集中，以更新和记录用电量指标，并计算每个住宅的当前消耗和激励。我们将使用这些数据并通过优化方法提出DR请求。

5. TDR 算法

现在，我们使用流程图来描述TDR方案在算法上的实现方式，在该流程图中，TA和HEMS代理之间的协商通过IEEE 2030.5 SEP 2.0功能集的TCP/IP交换完成。DR请求可能来自实用程序端，也可能来自转换器级别，通过*EndDeviceControl*对其寻址。对于跨时间范围 t_h （这是SEP 2.0定义的时间间隔）的特定部署时间 t ，我们用TA将目标DRR值表示为 ΔP_{DR} 。

图5中给出了简化的TDR算法。在TA端，如果接收到新的DRR值，则TA将启动与HEMS代理的TDR协商。当HEMS代理确认响应时，将与其余的HEMS代理继续进行协商，如下所述。在HEMS代理侧，如果HEMS代理使用 $drProgramMandatory = FALSE$ 获取DRR值，则它将确定甩负荷能力并将其发送给TA。与不响

应的HEMS代理继续进行协商，直到确认不断发展的DRR值（或达到迭代限制）并终止协商为止。然后，通过设置 $drProgramMandatory = TRUE$ 将最终DRR值分配给每个HEMS代理，最后HEMS代理实现其请求。TDR算法在协商的每个阶段为每个HEMS代理优化目标DR减少量。优化是基于使用线性规划方法的模型预测控制（MPC）[51]。对于像我们这样具有复杂动态和约束条件的系统，这种基于事件的DR优化是一种很好的方法[52]。

对于每个协商 j ($1 \leq j \leq 10$)，可通过以下方式确定各个潜在的负荷减少量 ΔP_i （控制变量），

$$\begin{aligned} & \max \left(\sum_{i=1}^k \chi_i r_i \Delta P_i \right) \\ & \text{s.t.} \\ & \sum_{i=1}^k \chi_i \Delta P_i \geq \Delta P_{dr}, \quad 0.8 \bar{\Delta P} \leq \Delta P_i \leq 1.2 \bar{\Delta P} \end{aligned} \quad (6)$$

式中， k 是交易网络中可用客户的数量； $\Delta P_{dr} = \Delta P_{DR} - \Delta P_a$ 是不断发展的DRR值，其中 ΔP_a 是已同意满足其个人要求的那些客户的总需求减少量； $\bar{\Delta P}$ 是该次协商剩余的客户的平均

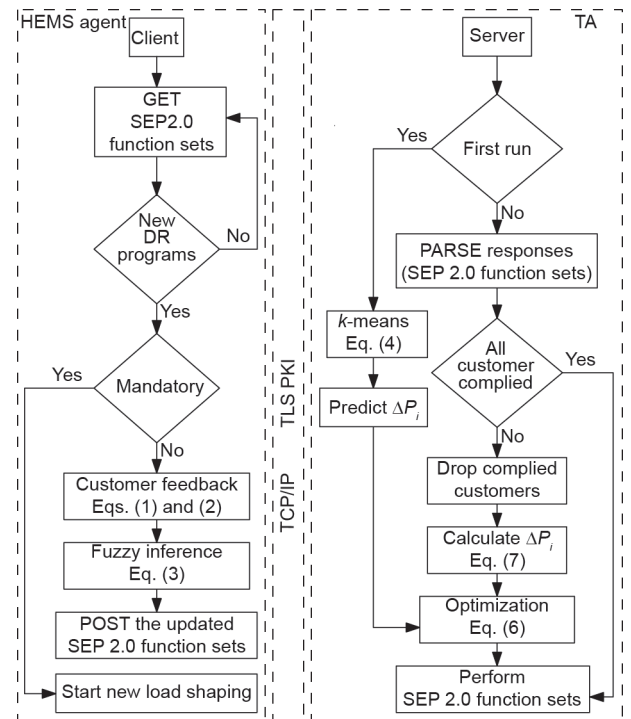


图5. TDR算法的流程图，左侧为HEMS代理，右侧为TA流。中间方框指示通信过程。PARSE是指使用由符合IEEE 2030.5的TDR平台实现的SEP 2.0协议对XML文件进行解码。GET和POST是分别对对应读取和创建操作的HTTP方法。

DR可用性。请注意，为了成功进行TDR操作，随着 j 的增加， ΔP_{dr} 应该趋于0。引入指标函数 χ 显示客户是否仍在协商中（ $\chi = 1$ 表示仍在协商中， $\chi = 0$ 表示已确认的减少）。第一个约束条件要求单个请求的负荷减少量之和要满足目标DR请求，而第二个约束条件将单个请求减慢到平均DR可用性控制的时间间隔内。后一个约束在维持客户选择的CCL模式的同时，保持了请求的公平性，从而允许超出要求20%以上的客户在协商过程中尽早“锁定”。

分配是由一个迭代过程确定的，该过程结合了等式(5)的激励函数来驱动HEMS代理操作，以便根据等式(3)确定每个 $j > 1$ 的最佳可能负荷减少量的集合。通过在DR时间间隔的端点使用 k 均值聚类数据(图4)进行负荷预测，针对 $j = 1$ 启动此过程，然后通过协商进行以确定每个客户的DR可用性。此处

$$\Delta P_i = \begin{cases} P_i(t + t_h) - P_i(t) & j = 1 \\ \tilde{\Delta P}_i(t) & j > 1 \end{cases} \quad (7)$$

注意，根据等式(3)， $\tilde{\Delta P}_i(t)$ 是在时间 t 上由HEMS代理为客户 i 在使用FLC的输出进行协商 j 时确认的负荷减少量。协商一直持续直到满足目标DR请求为止，或者直到无法进一步促进个人需求减少为止，此时通过设置 $drProgramMandatory = TRUE$ 将控制变量应用于每个家庭。请注意，这不会强制要求响应DR请求。这是纯自愿交易，尽管不响应可能会受到处罚(请参阅Appendix A, *EndDeviceControl*)。我们还定义了响应度指标，即

$$S = \frac{\Delta P_a}{\Delta P_{DR}} \quad (8)$$

以量化交易过程在实现目标DR请求中的功效。

对于3个集群中的10个客户(如第4节所述)，根据等式(7)启动协商。每个负荷预测是根据给定时间范围内的集群消耗行为(图4)确定的。客户当前功耗的差异以及他们对TDR的响应，可以确保谈判过程中激励的多样性。后者的现实值是通过运行多个不同的需求案例(以固定的激励 r_0 发起)来生成的，以建立名义上的响应历史记录集。谈判通过等式(6)进行，通过参与每个HEMS FLC，对于给定的CCL模式进行模糊化，该模糊输出是根据CSR比(即 ΔP_i)和不断发展的DRR比(即 ΔP)生成的。这在TA和HEMS代理之间的对话中引入了必要的“给予和接受”(give and take)，正在进行的协商为确定性响应提供了输入变化。

6. 仿真结果

在开发了TDR方案并使用图1所示的设备实现了该方案之后，我们现在执行完整的操作检验，其中包括与所有代理和负荷的协商和通信。如前文所述，我们通过使用真实住宅能耗数据进行系统仿真来检验TDR平台的效果。这些数据用于定义甩负荷能力(通常由HEMS提供给HEMS代理)，如下文所述。仿真是在一个由10个客户组成的交易式网络上进行的，总容量固定为20 kW，总DR能力为12 kW。假定所有客户具有相同的个体容量 P_{cap} 。作为对交易式方法的严格测试，从下午5点至晚上8点，在整个下午/晚上需求高峰期间研究了两种特定的DR场景(见图4)：①目标DR降低量等于总DR能力(即12 kW)，②目标DR降低量约为总DR能力的90%(即11 kW)。我们研究了3种不同的CCL模式场景：良好——所有客户；不良——所有客户；混合——CCL模式为良好和不良的客户的随机分配(即10个场景均匀分布在良好和不良模式之间)。在保持每日能源不变的情况下，通过对源配置文件的每小时消费施加随机扰动，可以为每个客户导出10种不同的负荷配置文件。这就为每个顾客创建了一个数据集，数据集在统计学上是独立的，但在名义上相同，其模拟了日常消费的变化。平均响应度 \bar{S} 参见等式(8)，是通过平均10个不同的负荷分配模拟得出的。

图6展示了CCL混合模式网络中11 kW的目标DR请求的协商演变，其中三角形符号表示在每个协商步骤中所有家庭的总需求减少量 ΔP_a 增加，而正方形表示演变中的目标DR请求 ΔP_{dr} 。请注意，在首次协商之后，许多客户已经确认了他们要求的减少量，总共减少了5 kW。然后，该算法将剩余的6 kW减少DR请求发送给其余参与者，并且继续进行协商。在第5次协商之后，没有进一步的变化，因此该算法将请求减少了10%，并且继续进行协商。这导致响应量立即显著提高，但是正在进行的协商不会影响进一步的变化。经过10次迭代后，协商终止，最终网络响应度为98%。

在图7中可以看到类似于CCL混合模式的表现，其中比较了CCL模式为良好和CCL模式为不良的所有住所的协商响应。总体而言，响应是相似的——在最初的协商中它们几乎是相同的——但是在第4次协商中出现了很大的差异。在第5次协商之后，DR请求的后续减少减轻了，但没有完全消除这种差别。与所有协商一样，在第6次迭代之后，没有发现响应量有明显改善。最

终结果是，仅以CCL不良模式响应的网络的响应度为95%，而仅以CCL良好模式响应的网络的响应度达到最佳。

对10个家庭网络中的不同负荷需求分布重复上述操作，以创建一个统计学上等效的结果集合，其结果大致反映了可以满足目标DR请求的可能性。我们发现，在所有情况下协商的进展都是相似的。表3总结了上面介绍的所有方案的平均响应度 \bar{S} 。即使是最严格的请求，即DR目标等于网络能力，无论响应模式如何，响应度都超过了90%。对于约为90%的总DR能力的目标请求，即使在最坏的情况下，响应度也超过95%，在最佳情况下响应度是完美的。CCL混合模式的结果都介于良好模式和不良模式之间，这表明客户同意配合的程度与满足目标DR请求的程度之间可能存在线性关系。以上所有表明，我们的方法可能能够容纳容量更小的客户。

从总体上观察DR响应之后，让我们现在更普遍地

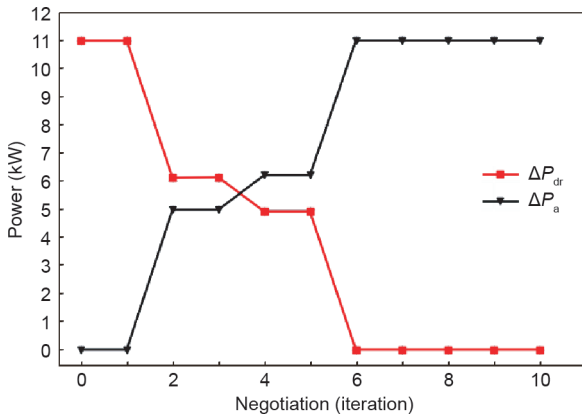


图6. 在CCL混合模式下针对11 kW的目标DR请求进行协商的演变情况，其中特定负荷需求在整个网络中有所不同。

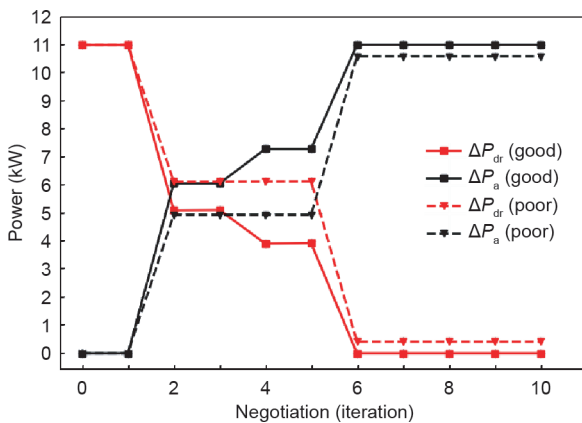


图7. 对于11 kW的目标DR请求，CCL良好模式和不良模式之间的协商演变比较，其中特定负荷需求在整个网络中有所不同。

研究个体对正在进行的DR请求的响应情况。对于我们拥有10个客户的网络，其目的是深入了解名义上独立的DR事件下的响应范围，但激励函数不断变化。具体来说，我们希望知道在实际操作的情况下，客户的历史响应度如何影响协商和响应量，以及激励的含义。为此，对于每个DR事件，我们再次为每个客户随机调整测得的负荷曲线，创建统计学上独立但名义上等效的曲线数据集，以模拟每天的消费变化。然后，我们针对30个连续的DR事件，在CCL混合模式下对11 kW目标DR请求重复上述分析（即对CCL不良和CCL良好的10种不同组合进行平均），并在每个DR事件之后更新激励函数。

图8展示了对于每个客户，正在进行的协商响应量的增量。图8(a)给出了第一个DR事件的结果，图8(b)给出了第30个事件的结果。用彩色条代表的瓦数表示客户DR响应量。首先，请注意，由于客户的消费率和消费历史不同，协商始于对每个客户的不同请求——参见等式(6)。其次，请注意，许多客户通常会在协商过程早期就锁定了其响应量，这在图中由水平彩色条的长度表示。再次，由于等式(6)中的第2个约束，我们看到在协商过程中客户响应存在一些变化（响应增加和减少，从颜色变化中可以看到）。这种变化促进了更优的网络响应。最后，对比图8(a)和(b)（分别是DR事件#1和#30），可以发现个体响应量的变化，包括所需协商的规模和数量。客户2、3和10进行了一轮或两轮以上的谈判，他们的DR响应有所提高（约10%），而其他客户的DR相应实际上保持不变。我们需要更具体地研究个体行为是如何驱动的，以及如何被激励演变驱动的。

我们研究了3个有代表性的客户：3、7和10。图9展示了他们的激励（黑色曲线）如何随着正在进行的DR请求（即事件）而演变：左列——图9(a)、(c)和(e)——展示了他们的消费量函数（红色曲线），而右列——图9(b)、(d)和(f)——展示了他们的响应量函数（红色曲线）。另外还展示了消费量和响应量平均

表3 对10个家庭网络的负载需求分布的整体评估，评估了20 kW总容量和12 kW总DR能力的交互能源目标DR请求的效能

Target DR request (kW)	CCL mode	Actual reduction (kW)	\bar{S} (%)
12	Good	11.40	94.6
	Poor	11.03	92.0
	Mixed	11.27	93.9
11	Good	11.00	100.0
	Poor	10.50	95.6
	Mixed	10.82	98.3

值（绿色曲线）以进行比较。请注意，事件之间的消费波动（以及由此产生的响应量变化）是由用于生成每个DR请求的数据集负荷配置文件的随机扰动引起的。因此，只有总体趋势才有意义。客户3 [图9 (a) 和 (b)] 既有高消费量，又具有高响应量，趋势远高于他们的平均水平。客户3的激励实际上是不变的，在基本激励 $r_0 = 1000$ 附近波动。客户7 [图9 (c) 和 (d)] 的消费量略高（约5%），但是其响应量与平均值没有区别。他的激励减少了近一半。客户10 [图9 (e) 和 (f)] 的消费量较低，但最初的响应量较低，趋向于均值。因此，其激励有小幅上升的趋势。这些观察表明，激励偏向于保

持有效参与的低消费客户，而不是参与比例相似（即平均）的高消费客户。高消费用户必须以高于平均水平的价格参与进来，以维持同等激励，否则，随着时间的流逝，他们将遭受巨额惩罚。相比之下，低消费客户不会受到负面影响，随着他们的响应量增加，他们将优先受益。这些激励趋势影响了协商过程，可分别通过等式(5)的消费系数和响应系数 c_1 和 c_2 进行控制。我们选择了一个相等的权重来证明什么可以被称为公平分配过程，从而不会明显偏向消费量或响应量。这些系数可以调整，其效果是可以改变激励曲线的斜率和方向以促进或惩罚特定行为。

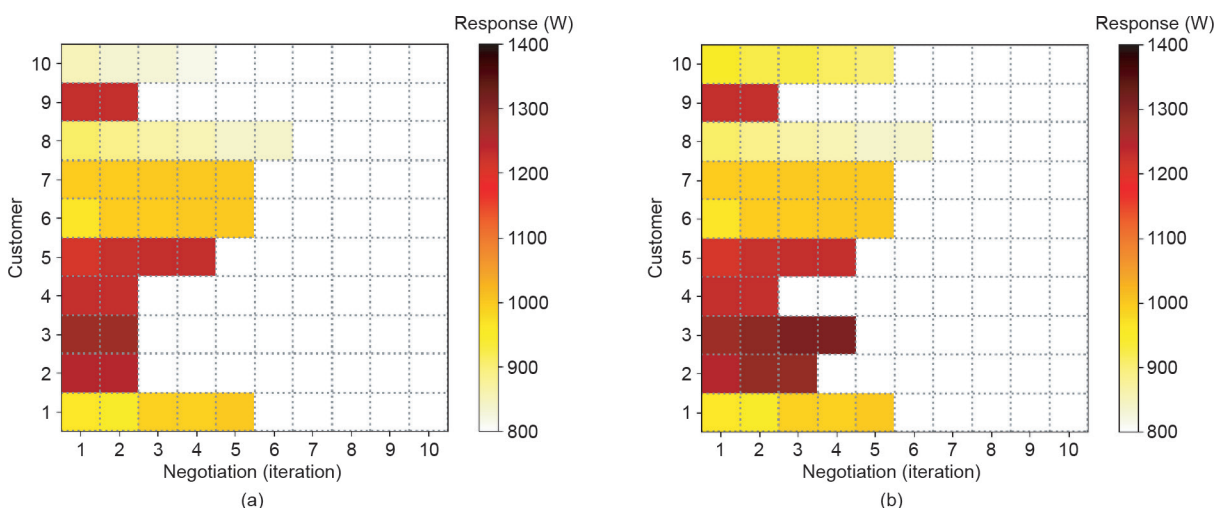


图8. 在第一个DR事件 (a) 和最后一个DR事件 (b) 下，以CCL混合模式进行的持续协商中客户响应量的演变。

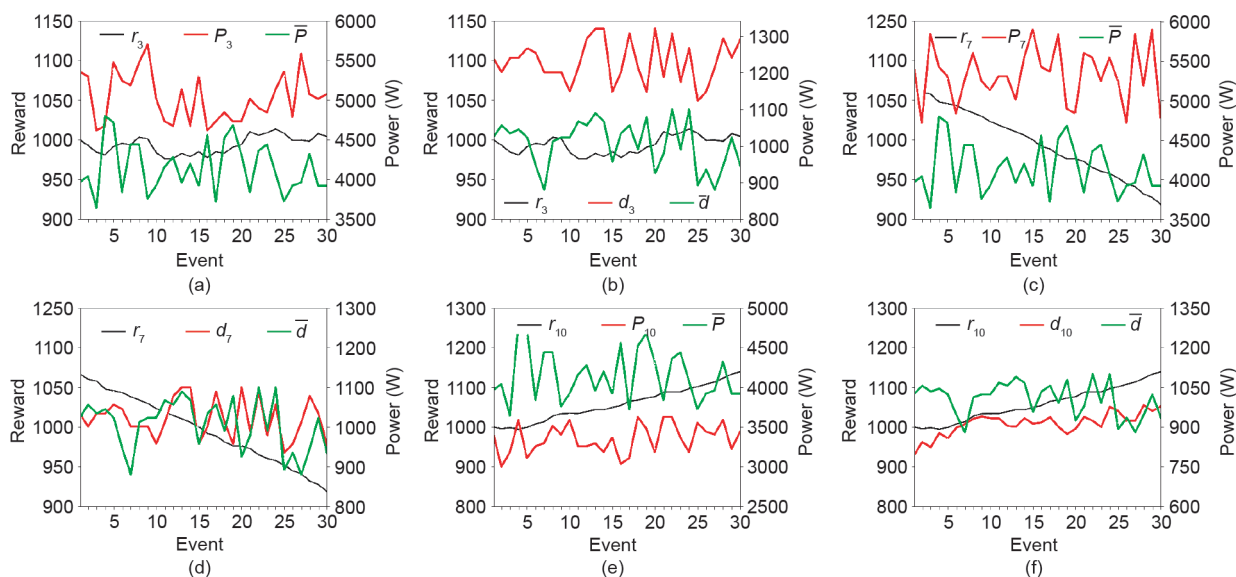


图9. 带有连续DR请求的激励 r_i (黑色曲线) 的演变，左列显示了消费量，右列显示了响应（红色曲线）行为；图中还显示了他们的平均行为（绿色曲线）。客户3 (a~b) 和客户7 (c~d) 属于III类（高消费），而客户10 (e~f) 属于I类（低消费）。

网络消费多样性通过与各个客户约束条件（即CCL、CSR和DRR）的交易来推动优化过程。与FLC交易作为实现需求减少的本地代理。如包含在等式（6）中的函数约束所述，有界输出由容量和可用性的固有输入范围来确保。通过考虑表3数据的子种群统计数据（即负荷分布数据集的采样），并验证不确定性随交易网络规模的增加而减小，可以得到对有界响应的算法鲁棒性的简单说明（10和50）。我们认为，对于CCL混合模式（再次平均10种以上的CCL不良和CCL良好组合），目标DR减少量等于总DR能力。我们确定3种情况的平均响应度 \bar{S} ，每种情况都有其不同的负荷分布。表4显示的结果证实了有界输出的预期行为。该平均值对参与者的数量基本不敏感，但是在3种情况下，网络规模增大的不确定性（即标准差）减小，而名义上保持不变（可能有一个异常值除外）。

图10显示了在下午/晚上需求高峰期间，在CCL混合模式下将11 kW DR请求应用于10个家庭网络之前和之后，交易协商对总需求趋势的影响。观察显示，峰值降低了22%（从45 kW减少到35 kW），需求转移到了晚上。这种由独立的HEMS代理实现的需求转换，是通过重新安排典型住宅可中断和不可中断负荷的同等权重来实现的。图11使用峰均比（PAR）[53]提供了DR事件在

表4 客户响应度统计（CCL混合模式）对网络规模和负载分布采样的依赖

Number of participants	\bar{S} with standard deviation (%)		
	Case I	Case II	Case III
10	91.0 ± 3.5	90.5 ± 2.5	91.0 ± 2.4
50	91.6 ± 1.6	91.0 ± 1.5	91.0 ± 1.5

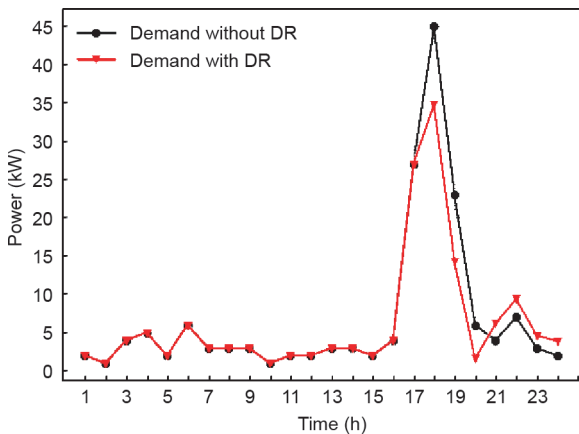


图10. 在对CCL混合模式响应应用11 kW DR请求之前和之后的总需求趋势。

网络上影响的补充视图。每个客户聚合网络的PAR（不带DR请求和带DR请求）被展现出来。所有客户都为减少需求做出了贡献，减少需求最多的客户产生了最大的影响。在整个网络（所有客户）中，PAR被降低了14%（从3.42降低到2.92）。注意，由于PAR是指平均需求，它是对DR事件的即时性不太敏感的指标，因此在某种程度上实验低估了其影响。

7. 结论

我们提出了一种DR方案，该方案在住宅网络中采用了变压器级别的交易协商。我们采用了多代理手段，致力于满足客户舒适度和隐私性需求。TA使用基于事件的优化技术和灵活的激励机制，与客户代理（他们的HEMS代理）协商DR请求。代理通过根据其舒适度期望值（通过模糊规则库表示）的响应度水平减少消耗量来响应DR请求。本文表明，我们的主动式DR方案可以将高峰需求降低22%，相当于PAR降低14%。结果是以真实客户的匿名智能电表数据为基础的。值得注意的是，我们的方案使用IEEE 2030.5 SEP互操作性标准在代理之间传输数据，因此构成了该标准的第一个已知TDR用例。尽管我们在此TDR方案中仅使用了部分IEEE 2030.5功能，但仍开发了完整的SEP服务器以确保代理完全符合该标准。在这种受限环境下展示出的功效表明，其全部功能包括分布式能源资源管理系统的聚合和虚拟电厂控制，具有市场准入和所有必要的货币化要求，即将在所有选择遵循这种可扩展方法的供应商和解决方案提供商中实现，以达成智能电网的愿景。

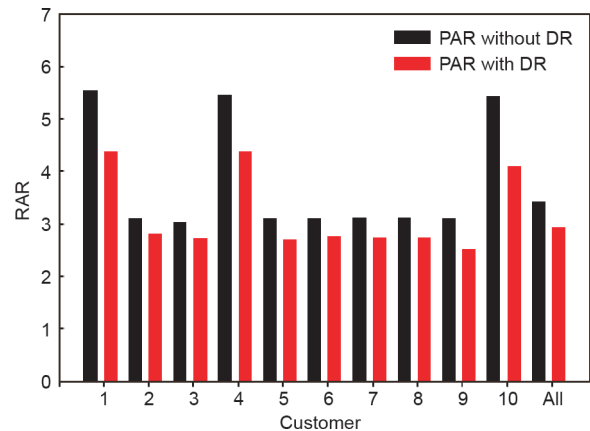


图11. DR事件之前和之后所有参与者的峰均比（PAR）。

Acknowledgements

This work is supported in part by Natural Sciences and Engineering Council of Canada (CRDPJ 477238-14) and Hydro Ottawa. The Hydro Ottawa led “GREAT-DR” project is gratefully funded in part by the Ontario Ministry of Energy’s Smart Grid Fund and the LDC Tomorrow Fund, and generously supported by the University of Ottawa, Carleton University, CIMA Canada Inc., Panasonic Eco-Solutions Canada Inc. (with Tabuchi Electric Company of America Limited), Quadra Power Inc., Energate Inc., Thorium Technologies Inc., and the IEEE Standards Association. The authors wish to acknowledge the vision and encouragement provided by Raed Abdullah (Hydro Ottawa Limited), The “GREAT-DR” project’s initiator and leader.

Compliance with ethics guidelines

Javad Fattahi, Mikhak Samadi, Melike Erol-Kantarci, and Henry Schriemer declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.06.005>.

References

- [1] Gellings CW. The concept of demand-side management for electric utilities. *Proc IEEE* 1985;73(10):1468–70.
- [2] Masoum AS, Deilami S, Moses PS, Masoum MAS, Abu-Siada A. Smart load management of plug-in electric vehicles in distribution and residential networks with charging stations for peak shaving and loss minimisation considering voltage regulation. *IET Gener Transm Distrib* 2011;5(8):877–88.
- [3] Erol-Kantarci M, Mouftah HT. Wireless sensor networks for cost-efficient residential energy management in the smart grid. *IEEE Trans Smart Grid* 2011;2(2):314–25.
- [4] River C. Primer on demand-side management with an emphasis on pricerresponsive programs. Technical report. Washington, DC: The World Bank by Charles River Associates; 2005.
- [5] US Department of Energy. Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them. Technical report. Washington, DC: US Department of Energy; 2006.
- [6] Nadel S. Utility demand-side management experience and potential—a critical review. *Annu Rev Energy Environ* 1992;17(1):507–35.
- [7] Vardakas JS, Zorba N, Verikoukis CV. A survey on demand response programs in smart grids: pricing methods and optimization algorithms. *IEEE Commun Surv Tutor* 2015;17(1):152–78.
- [8] Li R, Wang Z, Gu C, Li F, Wu H. A novel time-of-use tariff design based on Gaussian Mixture Model. *Appl Energy* 2016;162:1530–6.
- [9] Henley A, Peirson J. Time-of-use electricity pricing: evidence from a British experiment. *Econ Lett* 1994;45(3):421–6.
- [10] Aslam S, Iqbal Z, Javaid N, Khan ZA, Aurangzeb K, Haider SI. Towards efficient energy management of smart buildings exploiting heuristic optimization with real time and critical peak pricing schemes. *Energies* 2017;10(12):2065.
- [11] Herter K. Residential implementation of critical-peak pricing of electricity. *Energy Policy* 2007;35(4):2121–30.
- [12] Baughman ML, Siddiqi SN. Real-time pricing of reactive power: theory and case study results. *IEEE Trans Power Syst* 1991;6(1):23–9.
- [13] Mortaji H, Ow SH, Moghavvemi M, Almurib HAF. Smart grid demand response management using internet of things for load shedding and smart-direct load control. In: *Proceedings of the 2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*; 2016 Oct 2–6; Portland, OR, USA; 2016. p. 1–7.
- [14] Luo F, Zhao J, Dong ZY, Tong X, Chen Y, Yang H, et al. Optimal dispatch of air conditioner loads in southern China region by direct load control. *IEEE Trans Smart Grid* 2016;7(1):439–50.
- [15] Vale ZA, Ramos C, Faria P, Soares JP, Canizes B, Khodr HM. Ancillary services market clearing simulation: a comparison between deterministic and heuristic methods. In: *Proceedings of the 2010 IEEE PES General Meeting*; 2010 Jul 25–29; Providence, RI, USA; 2010. p. 1–6.
- [16] Martinez VJ, Rudnick H. Active participation of demand through a secondary ancillary services market in a smart grid environment. *IEEE Trans Smart Grid* 2013;4(4):1996–2005.
- [17] Ela E, Kirby B, Navid N, Smith JC. Effective ancillary services market designs on high wind power penetration systems. In: *Proceedings of the 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*; 2012 Jul 22–26; San Diego, CA, USA; 2012. p. 1–8.
- [18] Olivares DE, Cañizares CA, Kazerani M. A centralized optimal energy management system for microgrids. In: *Proceedings of the 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*; 2011 Jul 24–28; Detroit, MI, USA; 2011. p. 1–6.
- [19] Ruiz N, Cobelo I, Oyarzabal J. A direct load control model for virtual power plant management. *IEEE Trans Power Syst* 2009;24(2):959–66.
- [20] Tsikalakis AG, Hatziaargyriou ND. Centralized control for optimizing microgrids operation. In: *Proceedings of the 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*; 2011 Jul 24–28; Detroit, MI, USA; 2011. p. 1–8.
- [21] Schneider KP, Fuller JC, Chassin D. Analysis of distribution level residential demand response. In: *Proceedings of the 2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*; 2011 Mar 20–23; Phoenix, AZ, USA; 2011. p. 1–6.
- [22] Chen S, Liu CC. From demand response to transactive energy: state of the art. *J Mod Power Syst Clean Energy* 2017;5(1):10–9.
- [23] Ghamkhari M. Transactive energy versus demand response in cutting wholesale electricity prices. In: *Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Smart Grid and Smart Cities*; 2019 Jun 25–28; Berkley, CA, USA; 2019. p. 182–7.
- [24] Huang P, Kalagnanam J, Natarajan R, Sharma M. Analytics and transactive control design for the pacific northwest smart grid demonstration project. In: *Proceedings of the 2010 1st IEEE International Conference on Smart Grid Communications*; 2010 Oct 4–6; Gaithersburg, MD, USA; 2010. p. 449–54.
- [25] Behboodi S, Chassin DP, Djilali N, Crawford C. Transactive control of fast-acting demand response based on thermostatic loads in real-time retail electricity markets. *Appl Energy* 2018;210:1310–20.
- [26] Hao H, Corbin CD, Kalsi K, Pratt RG. Transactive control of commercial buildings for demand response. *IEEE Trans Power Syst* 2017;32(1):774–83.
- [27] Daneshvar M, Pesaran M, Mohammadi-ivatloo B. Transactive energy integration in future smart rural network electrification. *J Clean Prod* 2018;190:645–54.
- [28] Yan Y, Qian Y, Sharif H, Tipper D. A survey on cyber security for smart grid communications. *IEEE Commun Surv Tutor* 2012;14(4):998–1010.
- [29] Zhou K, Yang S, Shao Z. Household monthly electricity consumption pattern mining: a fuzzy clustering-based model and a case study. *J Clean Prod* 2017;141:900–8.
- [30] Tyagi R, Chen W, Black J, Tiwari P, Lecours B, Shaver J. Transforming electrical load from an operational constraint to a controllable resource. *INFORMS J Appl Anal* 2017;47(4):292–304.
- [31] Council TGA. Gridwise transactive energy framework version 1.1. Technical report. Richland: The GridWise Architecture Council 2019.
- [32] Nunna HK, Srinivasan D. Multiagent-based transactive energy framework for distribution systems with smart microgrids. *IEEE Trans Ind Inf* 2017;13(5):2241–50.
- [33] Good N, Martínez Ceseña EA, Heltop C, Mancarella P. A transactive energy modelling and assessment framework for demand response business cases in smart distributed multi-energy systems. *Energy* 2019;184:165–79.
- [34] Zia MF, Benbouzid M, Elbouchikhi E, Mueen SM, Techato K, Guerrero JM. Microgrid transactive energy: review, architectures, distributed ledger technologies, and market analysis. *IEEE Access* 2020;8:19410–32.
- [35] Gungor VC, Sahin D, Kocak T, Ergut S, Buccella C, Cecati C, et al. Smart grid technologies: communication technologies and standards. *IEEE Trans Ind Inf* 2011;7(4):529–39.
- [36] 2030.5-2018-IEEE standard for smart energy profile application protocol. New York: COM/PLC- Power Line Communications; 2018.
- [37] McArthur SDJ, Davidson EM, Catterson VM, Dimeas AL, Hatziaargyriou ND, Ponci F, et al. Multi-agent systems for power engineering applications—part I: concepts, approaches, and technical challenges. *IEEE Trans Power Syst*

- 2007;22(4):1743–52.
- [38] Han DM, Lim JH. Smart home energy management system using IEEE 802.15.4 and zigbee. *IEEE Trans Consum Electron* 2010;56(3):1403–10.
- [39] Uslar M, Specht M, Rohjans S, Trefke J, González JM. The common information model CIM: IEC 61968/61970 and 62325—a practical introduction to the CIM. Berlin: Springer; 2012.
- [40] Richardson L, Ruby S. RESTful web services. Cambridge: O'Reilly Media Inc.; 2007.
- [41] Santesson S, Myers M, Ankney R, Malpani A, Galperin S, Adams C. X.509 internet public key infrastructure online certificate status protocol—OCSP. RFC Editor 2013;6960:1–41.
- [42] tabuchiamerica.com [Internet]. Osaka: Tabuchi Electric CO., LTD.; C2020 [cited 2020 Jun 5]. Available from: <http://www.tabuchiamerica.com>.
- [43] HöHöm solution overview [Internet]. Ottawa: Energate; [cited 2020 May 8]. Available from: <http://www.energateinc.com/solutions/hhplus-solution-overview/>.
- [44] Parker LE. Distributed intelligence: overview of the field and its application in multi-robot systems. *J Physical Agents* 2008;2(1):5–14.
- [45] Ramchurn SD, Vytelingum P, Rogers A, Jennings N. Agent-based control for decentralised demand side management in the smart grid. In: Proceedings of the 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent System; 2011 May; Taipei, China; 2011. p. 5–12.
- [46] Zhang J, Tang C, Guo L, Xu H. A longitudinal investigation of customer cooperation in services: the role of appraisal of cooperation behaviors. *Psychol Mark* 2018;35(12):957–67.
- [47] Tu KY, Lee TT, Wang WJ. Design of a multi-layer fuzzy logic controller for multi-input multi-output systems. *Fuzzy Sets Syst* 2000;111(2): 199–214.
- [48] Kacprzyk J, Pedrycz W, editors. Springer handbook of computational intelligence. Berlin: Springer-Verlag; 2015.
- [49] hydroottawa.com [Internet]. Ottawa: Hydro Ottawa; c2020 [cited 2020 Mar 5]. Available from: <https://hydroottawa.com/>.
- [50] Alpaydin E. Introduction to machine learning. 2nd ed. Cambridge: The MIT Press; 2009.
- [51] Bemporad A, Borrelli F, Morari M. Model predictive control based on linear programming—the explicit solution. *IEEE Trans Autom Contr* 2002;47(12):1974–85.
- [52] Camacho EF, Alba CB. Model predictive control. Berlin: Springer Science & Business Media; 2013.
- [53] Han SH, Lee JH. An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission. *IEEE Wireless Commun* 2005;12(2):56–65.