



مدیریت انرژی تراکنشی برای شبکه های توزیع مسکونی فشار ضعیف با منابع انرژی پراکنده

سینا صمدی قره‌ورن^{1*}، مهروز نصیری²

1- دکتری مهندسی برق دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، s.samadi@tabrizu.ac.ir

2- دکتری مهندسی برق، شرکت توزیع نیروی برق استان آذربایجان شرقی، تبریز، ایران، m.nasiry@eaedc.ir

خلاصه

ساختمان‌های مسکونی مدرن اکنون با منابع انرژی پراکنده مختلفی مانند پنل‌های خورشیدی، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی، پمپ‌های حرارتی الکتریکی، خودروهای الکتریکی با قابلیت اتصال به شبکه مجهز شده‌اند. گسترش سریع چنین منابعی و معرفی پاسخگویی به تقاضا و انرژی تراکنشی مصرف‌کنندگان برق سنتی را به تولیدکنندگان کوچک‌مقیاس تبدیل کرده است. یک تولیدکننده کوچک‌مقیاس، علاوه بر مصرف برق از شبکه، قادر به فروش انرژی الکتریکی به شبکه نیز هست. پاسخگویی تقاضا مصرف‌کنندگان را تشویق می‌کند تا پروفایل‌های تقاضای خود را بر اساس نیاز شبکه برق با استفاده از تعرفه یا سیگنال‌های تشویقی تغییر دهند. با این حال می‌توانند مشکلات ظرفیت مختلفی را برای شبکه‌های توزیع محلی برق فشار ضعیف ایجاد کنند. انرژی تراکنشی استفاده مؤثر از انعطاف‌پذیری سمت تقاضا را با دیکته کردن مبادلات انرژی در شبکه با استفاده از سیگنال‌های اقتصادی درونی در حالی که محدودیت‌های شبکه را در نظر می‌گیرد، تسهیل می‌کند. این مقاله روش‌شناسی جامع مدیریت انرژی تراکنشی برای شبکه‌های توزیع مسکونی فشار ضعیف یکپارچه برای استفاده مؤثر از انعطاف‌پذیری سمت تقاضا به منظور حل مشکلات شبکه‌ای شبکه‌های محلی با محدودیت ظرفیت ارائه می‌دهد. نتایج مطالعات موردی نشان می‌دهند که چارچوب‌های بازار این روش‌شناسی صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه برای تولیدکنندگان مسکونی به همراه دارند بدون اینکه بر حریم خصوصی، خودمختاری، اختیار تصمیم‌گیری، ترجیح، راحتی یا راحتی آنها تأثیر بگذارد.

کلمات کلیدی: انرژی تراکنشی، شبکه‌های توزیع مسکونی، منابع انرژی پراکنده، چارچوب‌های بازار

1. مقدمه

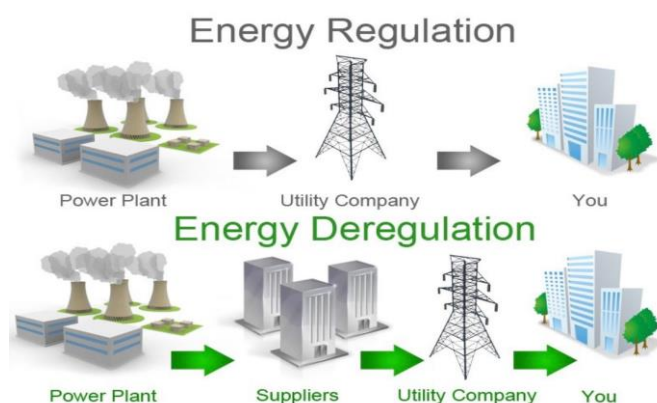
بخش تقاضای مسکونی سیستم برق به دلیل غیرمتمرکز شدن شبکه برق و افزایش برق‌رسانی به تقاضای انرژی مسکونی به سرعت در حال تغییر است. ساختمان‌های مسکونی مدرن اکنون با استفاده از واحدهای مختلف تولید برق در محل یا بدون سیستم‌های ذخیره‌سازی، خود را تأمین برق می‌کنند. علاوه بر این، بارهای نوظهور با راندمان بالا و قابل کنترل در حال ادغام با ساختمان‌های مسکونی هستند، مانند پمپ‌های حرارتی الکتریکی برای تهویه مطبوع، خودروهای الکتریکی با قابلیت



اتصال به شبکه و غیره. نفوذ این بارها و منابع انرژی پراکنده به همراه رفتار انسان کوتاه‌بینانه، نحوه مصرف برق در ساختمان‌های مسکونی را از شبکه برق تغییر داده است. علاوه بر پیچیده کردن تعادل عرضه و تقاضای شبکه برق، پروفایل‌های تقاضای در حال تحول اغلب چالش‌های ظرفیتی را برای اپراتور شبکه برق منطقه‌ای ایجاد می‌کنند، مانند اضافه‌بار شبکه، ترافیک خط، نوسانات ولتاژ و غیره [1].

باین‌حال، مصرف‌کنندگانی که دارای چنین منابعی و بارهای نوظهوری هستند نیز می‌توانند انعطاف‌پذیری زیادی را برای بهبود عملکرد سیستم برق ارائه دهند [2]؛ بنابراین، استراتژی‌های مختلفی برای مدیریت سمت تقاضا در سراسر جهان به اجرا گذاشته شده‌اند تا انعطاف‌پذیری سمت تقاضا را برای بهبود تعادل عرضه و تقاضای شبکه و ارائه خدمات مختلف پشتیبانی از شبکه به کار گیرند [3]. پاسخگویی به تقاضا و انرژی تراکنشی استراتژی‌های کلیدی فعال‌سازی هستند که بر استفاده مؤثر از انعطاف‌پذیری سمت تقاضا متمرکز هستند.

به طور سنتی، صنعت برق شرکت‌های توزیع یکپارچه عمودی با انحصار منطقه‌ای داشت که مالکیت تولید، انتقال و توزیع برق را بر عهده داشتند. اگرچه برخی از کشورها هنوز چنین بازار سنتی دارند، اما بیشتر بازار برق به یک بازار غیرمتمرکز یا باز تبدیل شده‌اند. یک بازار غیرمتمرکز به رقبا اجازه می‌دهد تا در تجارت برق در بخش‌های تولید و خرده‌فروشی شرکت کنند. باین‌حال، بخش‌های انتقال و توزیع در اکثر سیستم‌های برق همچنان یک انحصار طبیعی دارند، زیرا معمولاً توسط یک نهاد نظارتی ملی نظارت و کنترل می‌شوند [4]. اگرچه ساختار بازار برق و انواع رقابت در مناطق مختلف جهان متفاوت است، اما ساختار اساسی نسبتاً مشابه است. در یک بازار ایده‌آل باز، خرده‌فروشان برق را از شرکت‌های تولیدی در یک بازار عمده‌فروشی خریداری می‌کنند و سپس آن را به مصرف‌کنندگان می‌فروشند. در یک بازار باز، مصرف‌کنندگان می‌توانند از بین خرده‌فروشان مختلف و ساختار قراردادهای مختلف که طرح‌های قیمت‌گذاری را مشخص می‌کنند، انتخاب کنند. مصرف‌کنندگان بزرگ اغلب برق را مستقیماً از بازار عمده‌فروشی خریداری می‌کنند. باین‌حال، تأمین فیزیکی برق همچنان توسط شرکت‌های برق یا اپراتورهای شبکه انجام می‌شود که از خرده‌فروشان برای استفاده از زیرساخت‌های خود هزینه دریافت می‌کنند.



شکل 1 - بازار برق متعارف در مقابل بازار مقررات زدایی شده

مولفین سهام‌داران عمده درگیر در بازارهای برق مدرن شامل اپراتور شبکه، مولد، بازار یا اپراتور سیستم، مصرف‌کننده و خرده‌فروش است. اپراتورهای سیستم انتقال* مدیریت و بهره‌برداری از سیستم انتقال را بر عهده دارند، درحالی‌که سیستم

* transmission system operators (TSO)



توزیع توسط اپراتورهای سیستم توزیع* مدیریت می‌شود. شرکت‌های مولدها، مالک نیروگاه‌ها هستند و برق را در بازارها می‌فروشند. آنها همچنین می‌توانند در بازار خدمات جانبی شرکت کنند تا خدمات جانبی مختلفی را بفروشند. اپراتور بازار مدیریت عملیات روزانه بازار برق را بر عهده دارد. در اکثر بازارها، نقش‌های اپراتور بازار و سیستم یکپارچه هستند و اپراتور بازار همچنین مسئولیت عملکرد ایمن و قابل اعتماد سیستم برق را بر اساس مقررات دولتی بر عهده دارد. به عنوان مثال، اپراتور بازار انرژی استرالیا[†] بازار برق ملی استرالیا را هماهنگ می‌کند که یک بازار لحظه‌ای است [5]. این اپراتور بازار را بر اساس پیشنهادهای تولیدکنندگان و تقاضای بازار پاک‌سازی می‌کند و همچنین مسئول هماهنگی دیسپاچ مرکزی است، یعنی تصمیم می‌گیرد که کدام تولیدکنندگان باید مستقر شوند و چه زمانی آنها را مستقر کنند تا تقاضا به صورت مقرون به صرفه برآورده شود [6].

مصرف کنندگان برق کاربران نهایی هستند. به طور معمول، همه مصرف کنندگان مسکونی و صنعتی کوچک برق را از خرده‌فروشان خریداری می‌کنند، در حالی که برخی از مصرف کنندگان صنعتی بزرگ به طور مستقیم در بازار نقدی عمده‌فروشی شرکت می‌کنند تا برق خود را خریداری کنند. در یک بازار برق غیرمتمرکز، مصرف کنندگان می‌توانند از بین چندین خرده‌فروش محلی بر اساس پیشنهادهای آنها انتخاب کنند. خرده‌فروشان برق را از بازار آتی و عمده‌فروشی خریداری می‌کنند تا آن را به کاربران نهایی مانند مصرف کنندگان مسکونی و صنعتی کوچک بفروشند. مصرف کنندگان صنعتی بزرگ معمولاً برق را به طور مستقیم از بازار عمده‌فروشی خریداری می‌کنند. خرده‌فروشان بر اساس یک طرح تعرفه از پیش تعیین شده در یک قرارداد بلندمدت (معمولاً به روزرسانی سالانه) از مشتریان خود هزینه دریافت می‌کنند.

بازارهای معمولی در سیستم‌های قدرت مدرن عموماً شامل بازار آتی/قراردی، عمده‌فروشی نقدی، و بازار خدمات جانبی است. در بازار آتی/قراردی[‡] خرده‌فروشان انرژی را پیشاپیش (تا چند سال) از تولید کنندگان در بازار آتی از طریق قراردادهای پوشش دوطرفه خریداری می‌کنند؛ بنابراین، این بازار اغلب بازار قرارداد نامیده می‌شود. این امر مانع از قرار گرفتن خرده‌فروشان در معرض نوسانات قیمت عمده‌فروشی می‌شود. در نتیجه، آنها می‌توانند قراردادهای خرده‌فروشی پایدار را به مصرف کنندگان ارائه دهند که معمولاً به صورت سالانه به روز می‌شوند. از سوی دیگر، چنین معاملات آتی جریان‌های نقدی بلندمدتی را برای تولید کنندگان به منظور تأمین مالی عملیات و سرمایه‌گذاری‌های آنها تضمین می‌کند [7]. بازار نقدی عمده‌فروشی[§] معمولاً در یک سیستم استخر مجازی کار می‌کند. خریداران و فروشندگان به ترتیب پیشنهادهای تقاضا و عرضه را ارائه می‌دهند، در حالی که یک اپراتور بازار عرضه و تقاضا را مطابقت می‌دهد و حجم و قیمت پاک‌سازی بازار که معمولاً قیمت نقدی نامیده می‌شود، را تعیین می‌کند. بازار نقدی عمده‌فروشی از یک ساختار بازار چندمرحله‌ای در برخی از نقاط جهان (مانند آمریکای شمالی و اروپا [4]) استفاده می‌کند، در حالی که در برخی بازارها مانند بازار برق ملی در استرالیا [5] به صورت لحظه‌ای کار می‌کند. ساختار چندمرحله‌ای شامل یک بازار نقدی روزانه و یک بازار عدم تعادل لحظه‌ای است. شرکت کنندگان بازار تولید و مصرف برق را یک روز قبل بر اساس قیمت‌های نقدی روزانه تعهد می‌کنند و انحرافات از این تعهد در زمان واقعی در بازار عدم تعادل معامله می‌شود. برخی از بازارها (مانند بازار برق اسکندیناوی در اروپا [8]) همچنین دارای یک بازار درون روزی هستند که یک ساعت قبل از دوره عملیاتی واقعی کار می‌کند.

در بازار برق اصلاح شده، بازار خدمات جانبی از بازار عمده‌فروشی جدا است. این معمولاً یک بازار تک خریدار است که در آن نهاد مسئول ارائه خدمات جانبی، خدمات مختلف را یک روز قبل یا در زمان واقعی خریداری می‌کند. نمونه‌هایی از خدمات جانبی شامل تنظیم فرکانس، کنترل توان راکتیو و ولتاژ و غیره است.

* distribution system operators (DSO)

† Australian energy market operator (AEMO)

‡ Forward/contract market

§ wholesale spot market



2. پاسخگویی به تقاضا

پاسخگویی به تقاضا را می‌توان به‌طور کلی به‌عنوان تغییرات در استفاده از برق مصرف‌کنندگان برای یک دوره خاص در پاسخ به یک سیگنال قیمت یا تشویقی تعریف کرد که به‌طور خاص برای برآورده کردن نیازهای شبکه برق یا بازار برق طراحی شده‌اند [9]. پاسخ تقاضا به دنبال استفاده از انعطاف‌پذیری سمت تقاضا برای بهبود قابلیت اطمینان، کارایی و اقتصاد مطابقت عرضه و تقاضا در حالی است که منافع اقتصادی را برای مصرف‌کنندگان شرکت‌کننده فراهم می‌کند. برنامه‌های پاسخگویی به تقاضا را می‌توان به‌طور کلی به دو گروه تقسیم کرد: برنامه‌های مبتنی بر قیمت و مبتنی بر تشویق، که می‌توان آنها را بر اساس طرح‌های قیمت‌گذاری یا تشویقی بیشتر طبقه‌بندی کرد.

جدول 1- برنامه‌های پاسخگویی به تقاضا

برنامه	نوع برنامه	تعریف	مراجع
زمان استفاده Time-of-use (TOU)	مبتنی بر قیمت	تعرفه‌های برق در زمان تقاضای بالای شبکه بالاتر از حد معمول تنظیم می‌شوند و برعکس، در دوره‌های تقاضای پایین، تعرفه‌های پایین‌تری اعمال می‌شود	[10]
زمان واقعی Real-time pricing (RTP)	مبتنی بر قیمت	از قیمت‌گذاری پویا استفاده می‌کند، جایی که تعرفه برق به‌صورت پویا در طول روز تغییر می‌کند و هزینه تولید، هزینه استفاده از شبکه یا قیمت‌های عمده‌فروشی را دنبال می‌کند	[11] [12]
پیک بحرانی critical peak pricing (CPP)	مبتنی بر قیمت	به‌طور قابل‌توجهی تعرفه برق را از خط پایه برای یک دوره کوتاه در طول یک رویداد پیک بحرانی، مانند نوسانات قیمت عمده‌فروشی، شرایط اضطراری شبکه، کمبود تولید و غیره افزایش می‌دهد	[13]
نرخ بلوک شیب‌دار inclining block rate (IBR)	مبتنی بر قیمت	اگر مصرف برق ساعتی/روزانه/ماهانه مصرف‌کنندگان از یک سطح آستانه فراتر رود، آنها را با تعرفه بلوکی بالاتر هزینه می‌کند.	[14]
تخفیف زمان پیک peak time rebate (PTR)	مبتنی بر قیمت	تخفیف صورت‌حساب برق را به مصرف‌کنندگانی که کاهش مصرف انرژی آنها از خط پایه در دوره‌های پیک تقاضا باشد، ارائه می‌دهد.	[15]



[16]	جایی که یک اپراتور شبکه یا شرکت توزیع به طور مستقیم بار مصرف‌کنندگان را کنترل می‌کند (برخی از مصرف‌کنندگان بر اساس یک برنامه تشویقی از پیش تعیین شده برای کاهش خود تشویق می‌شوند. این طرح معمولاً به مصرف‌کنندگان مسکونی و صنعتی کوچک مقیاس ارائه می‌شوند.	مبتنی بر تشویق	کنترل بار مستقیم direct load control (DLC)
[17]	معمولاً مصرف‌کنندگان بزرگ تجاری یا صنعتی هدف قرار داده می‌شوند. شرکت‌کنندگان مصرف خود را با خاموش کردن بارهای خاص برای یک دوره خاص طبق دستور شرکت توزیع (اپراتور برنامه) قبلاً (دقیقه تا ساعت) قطع یا کاهش می‌دهند.	مبتنی بر تشویق	خدمات قابل قطع یا محدودیت Interruptible or curtailable (I/C)
[9]	عمدتاً به مصرف‌کنندگان بزرگ ارائه می‌شوند و انعطاف‌پذیری کاهش تقاضای مصرف‌کنندگان مسکونی یا سایر مصرف‌کنندگان کوچک مقیاس معمولاً توسط یک طرف سوم جمع‌کننده پاسخگویی به تقاضا تجمیع می‌شود.	مبتنی بر تشویق	برنامه مناقصه تقاضا demand bidding program (DBP)
[9]	پرداخت‌های تشویقی را به مصرف‌کنندگان شرکت‌کننده برای کاهش تقاضای خود در طول دوره‌های اضطراری شبکه، مانند کمبود ذخیره، ارائه می‌دهند. معمولاً به شرکت‌کنندگان اطلاعیه کوتاهی در مورد یک رویداد اضطراری داده می‌شود و مصرف‌کنندگان انعطاف‌پذیر تقاضای خود را در طول چنین دوره‌هایی کاهش می‌دهند و مانند یک ذخیره چرخنده مجازی رفتار می‌کنند.	مبتنی بر تشویق	پاسخگویی تقاضای اضطراری Emergency DR
[13]	به شرکت‌کنندگان معمولاً در هنگام ثبت‌نام مشوق‌هایی داده می‌شود، یک	مبتنی بر تشویق	بازار ظرفیت



	روز قبل از خدمات کاهش تقاضای خود اطلاع داده می‌شود و در صورت عدم انطباق جریمه می‌شوند.		capacity market programs
[14]	به مصرف‌کنندگان اجازه می‌دهند تا برای کاهش تقاضا به‌عنوان یک ذخیره عملیاتی در بازار خدمات جانبی مزایده کنند. اگر پیشنهادهای آنها پذیرفته شود، آنها با قیمت بازار برای تعهد کاهش تقاضا پرداخت می‌شوند و در صورت کاهش تقاضای آنها توسط اپراتور بازار جانبی با قیمت انرژی عمده‌فروشی تشویق می‌شوند.	مبتنی بر تشویق	بازار خدمات جانبی Ancillary service market

منابع انرژی پراکنده و بارهای کنترل‌پذیر متعلق به مصرف‌کننده از زمان محبوب‌شدن برنامه‌های پاسخگویی به تقاضا به طور فزاینده‌ای رایج شده‌اند. علاوه بر این، واحدهای مختلف مستقل نیز به طور فزاینده‌ای در بازارهای برق مختلف شرکت می‌کنند که به دلیل مقررات و برنامه‌های تشویقی مطلوب است. چارچوب انرژی تراکنشی به‌عنوان یک جایگزین کارآمد برای استفاده از پتانسیل کامل انعطاف‌پذیری سمت تقاضا برای بهبود مطابقت عرضه و تقاضا در شبکه برق معرفی شده است. مفهوم انرژی تراکنشی برای اولین بار توسط شورای معماری GridWise (GWAC) برای بهبود مشارکت سمت تقاضا در بازار برق و عملیات شبکه برق معرفی شد. شورای معماری GridWise TE را در [18] به شرح زیر تعریف کرد: یک سیستم مکانیسم‌های اقتصادی و کنترلی که تعادل پویا بین عرضه و تقاضا را در سراسر زیرساخت الکتریکی با استفاده از ارزش به‌عنوان یک پارامتر عملیاتی کلیدی امکان‌پذیر می‌کند.

مقیاس و اندازه یک شبکه انرژی تراکنشی می‌تواند به یک محله مسکونی محلی، یک ریزشبکه یا یک فیدر توزیع فشارضعیف محدود شود. همچنین می‌تواند شامل یک خوشه از جوامع، ریزشبکه‌ها یا فیدرهای فشارضعیف باشد. همچنین می‌تواند به یک شبکه توزیع محلی اعمال شود و حتی می‌تواند به کل سیستم الکتریکی منطقه‌ای یا ملی گسترش یابد که مبادله انرژی را بین جوامع مسکونی، ریزشبکه‌ها یا شبکه‌های توزیع محلی امکان‌پذیر می‌کند. این مفهوم از انعطاف‌پذیری سمت تقاضا برای اهداف شبکه برق استفاده می‌کند که همچنین تمرکز اصلی پاسخ تقاضا است. با این حال، می‌توان انرژی تراکنشی را به‌عنوان یک نسخه پیشرفته از پاسخ تقاضا مبتنی بر بازار تصور کرد، زیرا هم سمت عرضه و هم سمت تقاضا را برای تعادل پویای انرژی در یک محیط در حال تغییر بانفوذ بالای منابع پراکنده مدیریت می‌کند [19].

3. مدیریت انرژی تراکنشی شبکه‌های توزیع فشار ضعیف

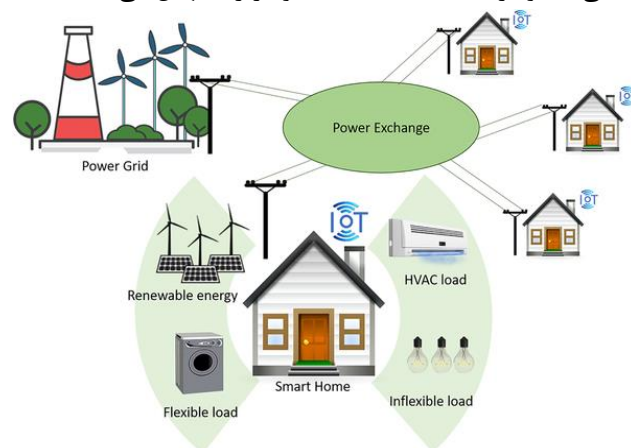
الگوی مدیریت انرژی تراکنشی* به مدیریت انرژی در یک شبکه انرژی تراکنشی اشاره دارد که از یک سیگنال اقتصادی درونی به‌عنوان یک‌زبان جهانی برای دیکته‌کردن مبادله فیزیکی انرژی الکتریکی در شبکه استفاده می‌کند. در این سیستم همه موجودیت‌های تولید و مصرف با یکدیگر تعامل دارند (مستقیم یا از طریق میانجی‌ها) و برق را بر اساس ارزش اقتصادی مبادله می‌کنند [20]. یک سیستم مدیریت انرژی تراکنشی شامل یک بازار تراکنشی و مکانیسم کنترل است، جایی که بازار یک پلتفرم برای تجارت انرژی فراهم می‌کند و سیستم کنترل دستگاه‌های تراکنشی شرکت‌کنندگان را بر اساس سیگنال‌های

* Transactive energy management (TEM)



بازار مدیریت می‌کند [19]. ویژگی‌های کلیدی مدیریت انرژی تراکنشی را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- یک سیستم غیرمتمرکز است که ادغام و مشارکت فعال منابع تولید پراکنده را تسهیل می‌کند. منابع به صورت محلی برای برآورده کردن تقاضا و حل مشکلات شبکه استفاده می‌شوند. مصرف محلی در یک سیستم غیرمتمرکز همچنین باعث کاهش تلفات انتقال و هزینه کل سیستم می‌شود. مبادله سیگنال‌ها و انرژی تراکنشی برای مدیریت انرژی تراکنشی به صورت غیرمتمرکز انجام می‌شود، بنابراین مقیاس‌پذیری آن را افزایش می‌دهد. در نتیجه، می‌تواند به یک منطقه خاص از شبکه برق اعمال شود یا می‌تواند کل شبکه را پوشش دهد.
 - به شرکت‌کنندگان (هر دو سمت عرضه و تقاضا) خودمختاری کامل می‌دهد. در یک چارچوب مدیریت انرژی تراکنشی، منابع تولید، منابع پراکنده و سایر دستگاه‌های کنترل‌پذیر توسط مالکان آنها مدیریت می‌شوند؛ باین‌حال، مکانیسم‌های تراکنش برای هماهنگ کردن آنها با نیازهای شبکه برق طراحی شده‌اند.
 - یک سیستم خودکار است. شرکت‌کنندگان در یک سیستم مدیریت انرژی تراکنشی به عنوان مجهز به یک سیستم کنترل مناسب در نظر گرفته می‌شوند که به سیگنال کنترل تراکنشی واکنش نشان می‌دهند تا تقاضا یا عرضه برق را تنظیم کنند.
- بنابراین، انتظار می‌رود مدیریت انرژی تراکنشی شبکه‌های توزیع مسکونی فشارضعیف تعادل لحظه‌ای عرضه و تقاضا را در شبکه محلی با افزایش مشارکت از منابع تولید پراکنده خودکنترل شبکه و دستگاه‌های کنترل‌پذیر بهبود بخشد. می‌تواند به طور خاص برای بهینه‌سازی اهداف همه ذی‌نفعان، از جمله مصرف‌کنندگان و طرف‌های شبکه طراحی شود. مزایای کلیدی مدیریت انرژی تراکنشی شبکه‌های توزیع مسکونی فشارضعیف را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:
- مصرف محلی برق تولید شده در محل را تسهیل می‌کند، بنابراین فشار بر شبکه عمومی را کاهش می‌دهد، تلفات انتقال را به حداقل می‌رساند و جریان معکوس توان را در ترانسفورماتور توزیع محدود می‌کند.
 - به مصرف‌کنندگان فعال، تولیدکنندگان کوچک‌مقیاس و مالکان محلی منابع تولید پراکنده اجازه می‌دهد تا به طور فعال انرژی را بر اساس اهداف خود مبادله کنند درحالی‌که حریم خصوصی، ترجیحات و خودمختاری آنها را حفظ می‌کند.
 - می‌تواند سودآوری مصرف‌کنندگان یا تولیدکنندگان کوچک‌مقیاس شرکت‌کننده را افزایش دهد، به‌ویژه در جاهایی که طرح‌های پاسخ تقاضا معمولی سودآور نیستند.
 - اقتصاد محلی را تقویت می‌کند و فرصت‌های جدید کسب‌وکار را تسهیل می‌کند.

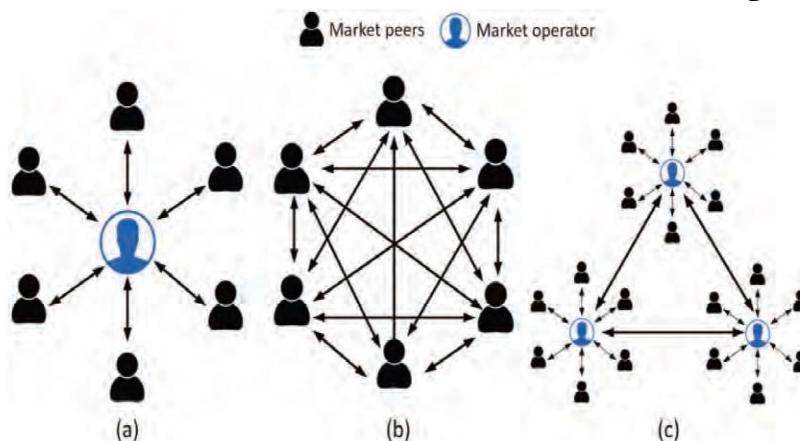


شکل 2 - سیستم مدیریت انرژی انتقالی برای شبکه‌های توزیع مسکونی فشار ضعیف



4. بازار انرژی تراکنشی

یک بازار تراکنشی به یک بازار اشاره دارد که در آن شرکت کنندگان برق را بر اساس یک چارچوب انرژی تراکنشی مبادله می‌کنند، یعنی هر دو طرف عرضه و تقاضا به طور فعال برای معاملات انرژی مزایده و مذاکره می‌کنند. یک شبکه معمولی می‌تواند به کل سیستم برق برسد؛ با این حال، بازار تراکنشی برای یک شبکه فشار ضعیف به‌طور کلی به بازار برق محلی در سطوح توزیع اشاره دارد. بازار تراکنشی محلی با شبکه برق بالادست و بازار عمده‌فروشی تعامل دارند تا پیچیدگی تجمیع منابع تولید پراکنده را کاهش دهند. بازیگران اصلی درگیر در بازار معاملات محلی را می‌توان به چهار نوع گروه‌بندی کرد: خریدار، فروشنده، اپراتور بازار و میانجی. برخی از خریداران و فروشندگان توسط یک میانجی در بازار تراکنشی نمایندگی می‌شوند و به طور فعال در بازار تجارت نمی‌کنند. به عنوان مثال، مصرف کنندگان با بارهای انعطاف پذیر می‌توانند توسط یک تجمیع کننده هماهنگ شوند که به نمایندگی از آنها در بازار تجارت می‌کند. این کار بار محاسباتی را از مصرف کنندگان منتقل می‌کند. علاوه بر این، شبکه بالادست معمولاً توسط اپراتور شبکه توزیع نمایندگی می‌شود و بازار بالادست می‌تواند از طریق یک نماینده بازار محلی شرکت کند.



شکل 3 – ساختارهای مختلف بازارهای تراکنش (الف) بازار مبتنی بر جامعه، (ب) بازار همتا به همتا، و (ج) بازار ترکیبی [20].

تجارت انرژی تراکنشی محلی می‌تواند به عنوان یک بازار مبتنی بر جامعه یا یک بازار همتا به همتا ساختار بندی شود. همچنین اغلب از یک ساختار بازار هیبریدی استفاده می‌شود که شامل هر دو تجارت مبتنی بر جامعه و P2P است. یک ساختار بازار مبتنی بر جامعه عملکرد یک اپراتور بازار را برای هماهنگ کردن تجارت انرژی بین خریداران و فروشندگان ضروری می‌کند [22]. در یک بازار تراکنشی مبتنی بر جامعه، خریداران و فروشندگان به ترتیب پیشنهادها تقاضا و عرضه خود را مستقیماً به بازار یا از طریق یک میانجی ارائه می‌دهند. اپراتور بازار پیشنهادها تقاضا و عرضه را برای پاک سازی بازار تجمیع می‌کند. سپس اطلاعات پاک سازی بازار (قیمت و مقدار) به پیشنهاد دهندگان برای دیسپاچ ارسال می‌شود. به طور کلی، مصرف کنندگان و یا تولید کنندگان کوچک مقیاس که از نظر جغرافیایی به هم نزدیک هستند، بازارهای مبتنی بر جامعه را تشکیل می‌دهند [23]؛ با این حال، مصرف کنندگان و تولید کنندگان کوچک مقیاس با منافع مشترک (به عنوان مثال استفاده از انرژی تجدید پذیر) نیز می‌توانند بازارهای مبتنی بر جامعه را علی رغم دوری از یکدیگر تشکیل دهند.

از سوی دیگر، بازار همتا به همتا بر اساس تجارت دوجانبه بین همتایان در بازار (خریداران و فروشندگان) است. در یک بازار P2P، همتایان با یکدیگر مذاکره می‌کنند تا در مورد قیمت و مقدار مبادلات انرژی به توافق برسند و برخلاف ساختار مبتنی بر جامعه، به نظارت متمرکز شخص ثالث برای پاک سازی بازار نیاز ندارد [24]. یک بازار هیبریدی ترکیبی از ساختار



مبتنی بر جامعه و P2P را در لایه‌های مختلف بازار استفاده می‌کند. این نوع بازار معمولاً شامل یک ساختار مبتنی بر جامعه در سطح پایین برای تجارت انرژی در داخل جامعه و مبادلات دو جانبه بین جوامع در سطح بالا است [22]. مکانیسم بازار به‌شدت به ساختار بازار و رفتارهای شرکت‌کنندگان بازار بستگی دارد. پاک‌سازی بازار تراکنشی در دو کلاس اصلی قرار می‌گیرند: روش‌های متمرکز و پراکنده. هر دو روش مزایا و محدودیت‌های ذاتی خود را دارند. به‌عنوان مثال، روش‌های متمرکز مستعد یک نقطه شکست واحد هستند، درحالی‌که روش‌های پراکنده به زیرساخت ارتباطی پیچیده نیاز دارند. علاوه بر این، امکان‌پذیری یک روش خاص به‌شدت به ساختار بازار و رفتار شرکت‌کنندگان بستگی دارد. در جدول زیر، خلاصه‌ای از هر دو روش متمرکز و پراکنده برای مکانیسم بازار تراکنشی محلی ارائه شده است.

جدول 2- مکانیسم‌های بازار انرژی

مکانیسم بازار	مفهوم	مراجع
متمرکز	رایج‌ترین دسته مدل بازار مبتنی بر حراج است. در یک بازار مبتنی بر حراج، شرکت‌کنندگان بازار پیشنهادها یا مزایده‌های خود را برای تجارت انرژی در بازار ارائه می‌دهند. این روش معمولاً با یک بازار مبتنی بر جامعه مرتبط است؛ با این حال، می‌تواند به بازار P2P یا هیبریدی نیز اعمال شود که در آن مجموعه‌ای از قوانین از پیش تعریف شده بازار را به‌صورت خودکار تسویه می‌کنند.	[26,25, 24]
پراکنده	وظیفه تسویه بازار بین هم‌تایان بازار توزیع می‌شود که علاوه بر ساده‌سازی قابل‌توجه مشکل پاک‌سازی، مسائل حریم خصوصی شرکت‌کنندگان بازار را نیز برطرف می‌کند. تکنیک‌های کلاسیک مبتنی بر بهینه‌سازی پراکنده به دنبال تجزیه مشکل تسویه بازار متمرکز به تعدادی زیر مسئله پراکنده هستند که باید توسط شرکت‌کنندگان بازار به‌صورت پراکنده حل شوند.	[28,27, 21]

5. مسئله زمانبندی سیستم مدیریت انرژی مسکونی

سیستم‌های مدیریت انرژی خانگی* اغلب از یک استراتژی مبتنی بر قانون برای برنامه‌ریزی و مدیریت بارهای مختلف

* home energy management system (HEMS)



ساختمان یا واحدهای منابع پراکنده استفاده می‌کنند. در یک روش مبتنی بر قانون، مسئله زمان‌بندی در زمان‌های خاص ساختمان خاصی را روشن یا خاموش می‌کند که بر اساس ترجیحات یا اولویت‌های از پیش تعیین شده کاربر است. مدل برنامه‌ریزی در یک سیستم‌های مدیریت انرژی خانگی معمولی مبتنی بر بهینه‌سازی به صورت یک مسئله کمینه‌سازی به طبق رابطه (1) فرمول‌بندی می‌شود:

$$\begin{aligned} \min_{x_i} f(x_i) \\ \text{s.t. } g(x_i) > 0, \\ h(x_i) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن $f(x)$ تابع هدف و x_i متغیر بهینه‌سازی برای هر دستگاه ساختمان است، i از سوی دیگر، محدودیت‌های برابری و نابرابری، همان‌طور که به ترتیب با $h(x)$ و $g(x)$ نشان داده شده‌اند، محدودیت‌های عملیاتی، فنی و کاربر را برای مشکلات زمان‌بندی مسکونی مدل می‌کنند. در یک ساختار متعارف بازار، مصرف‌کنندگان مسکونی قیمت‌گذار هستند و فقط انرژی را از شبکه خریداری می‌کنند هدف زمان‌بندی برای سیستم‌های مدیریت انرژی خانگی معمولاً طبق رابطه (2) فرموله می‌شود:

$$\min f(x_i) = \left\{ \begin{array}{l} \min \sum_{i,t} (c_i x_{i,t} \Delta t); LP \\ \min \sum_{i,t} (c_i x_{i,t} P_i \Delta t); MIP \end{array} \right\} \quad (2)$$

اکثر چارچوب‌های انرژی تراکنشی امکان تجارت دوطرفه برق را می‌دهند که در آن مصرف‌کنندگان به عنوان قیمت گیرنده یا قیمت دهنده مدل‌سازی می‌شوند. یک مصرف‌کننده قیمت‌گذار فقط مقدار انرژی را پیشنهاد می‌دهد تا در بازار معاملاتی معامله شود در این حالت مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\min f(x_i) = \min \sum_{i,t} (c_i^+ x_{i,t}^+ - c_i^- x_{i,t}^-) \Delta t \quad (3)$$

که در آن بالانویس‌های + و - به ترتیب قیمت (توان) برق مصرفی و عرضه از/به شبکه را نشان می‌دهند.

5. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک بررسی جامع مطالعات مربوط به چارچوب‌هایی برای استفاده مؤثر از انعطاف‌پذیری سمت تقاضا از مصرف‌کنندگان مسکونی ارائه شده است. در حالی که روش‌شناسی پاسخگویی به تقاضا طیف وسیعی از خدمات شبکه برق و کاهش قابل توجه صورت حساب برق را ارائه می‌دهند، آنها محدودیت‌های ذاتی خود را برای مدیریت انرژی در شبکه‌های توزیع مسکونی فشارضعیف دارند. از سوی دیگر، انرژی تراکنشی، علاوه بر ارائه خودمختاری، اختیار تصمیم‌گیری و افزایش سود اقتصادی، می‌تواند به طور مؤثر انعطاف‌پذیری سمت تقاضای محلی را برای حل مشکلات ظرفیت شبکه‌های مسکونی فشارضعیف به کار گیرد. با این حال، شکاف‌های تحقیقاتی عمده شناسایی شده از طریق بررسی مقالات شامل عدم وجود یک چارچوب جامع مدیریت انرژی تراکنشی است که به اپراتورهای شبکه محلی اجازه می‌دهد تا انعطاف‌پذیری مصرف‌کنندگان مسکونی را برای اضافه بار شبکه محلی و مشکلات ولتاژ به صورت اقتصادی خریداری کنند، در حالی که مشارکت فعال مزایده تراکنشی از مصرف‌کنندگان مسکونی را با ارائه خودمختاری کامل، اختیار تصمیم‌گیری و همچنین حفظ حریم خصوصی آنها تسهیل می‌کند. علاوه بر این، یک سیستم مدیریت انرژی مسکونی مناسب که می‌تواند استفاده از انرژی را در داخل ساختمان بهینه کند و معاملات انرژی را در این چارچوب بر اساس ترجیحات مصرف‌کنندگان مذاکره کند، در حالی که به طور مؤثر چند هدفی بودن و عدم قطعیت مربوط به مدیریت انرژی مسکونی را مدل می‌کند، ضروری است.



6. مراجع

1. Haque, A. N., Nguyen, P. H., Vo, T. H., & Bliet, F. W. (2017). Agent-based unified approach for thermal and voltage constraint management in LV distribution network. *Electric Power Systems Research*, 143, 462-473.
2. Torriti, J. (2024). Governance perspectives on achieving demand side flexibility for net zero. *Energy Policy*, 191, 114148.
3. Singh, C., Singh, N., & Sood, Y. R. (2024). Restructured electricity market strategies for the Indian utility system using Support Vector Regression and Energy Valley Optimizer. *Results in Control and Optimization*, 100445.
4. Colelough, B. C. (2024). Australian Energy Market Operator National Electricity Market Network Optimal Power Flow Modelling. *arXiv preprint arXiv:2403.18851*.
5. Colelough, B. C. (2024). Australian Energy Market Operator National Electricity Market Network Optimal Power Flow Modelling. *arXiv preprint arXiv:2403.18851*.
6. Mountain, B. (2024). The national electricity market 25 years on: outcomes and prospects. *Captured: How neoliberalism transformed the Australian state*.
7. Ghebretsadik, M. (2024). Nord pool Day-ahead Electricity Price Forecasting using machine learning (Master's thesis, Inland Norway University).
8. Bakare, M. S., Abdulkarim, A., Zeeshan, M., & Shuaibu, A. N. (2023). A comprehensive overview on demand side energy management towards smart grids: challenges, solutions, and future direction. *Energy Informatics*, 6(1), 4.
9. Sousa, J., & Soares, I. (2023). Benefits and barriers concerning demand response stakeholder value chain: A systematic literature review. *Energy*, 280, 128065.
10. Gharehveran, S. S., Zadeh, S. G., & Rostami, N. (2023). Resilience-oriented planning and pre-positioning of vehicle-mounted energy storage facilities in community microgrids. *Journal of Energy Storage*, 72, 108263.
11. Kansal, G., & Tiwari, R. (2024). A Comprehensive and Preferential Analysis of Demand Response Programs Considering Demand Uncertainty. *IEEE Transactions on Industry Applications*.
12. Medeiros, A., Canha, L. N., Garcia, V. J., de Azevedo, R. M., & dos Santos, R. B. (2024). Demand side and flexible energy resource management when operating smart electric vehicle charging stations. In *Advanced Technologies in Electric Vehicles* (pp. 363-384). Academic Press.
13. Gharehveran, S. S., Ghassemzadeh, S., & Rostami, N. (2022). Two-stage resilience-constrained planning of coupled multi-energy microgrids in the presence of battery energy storages. *Sustainable Cities and Society*, 83, 103952.
14. Kafash Farkhad, M., & Akbari Foroud, A. (2023). Adaptive distributed scheduling of the resources in smart grids with considering demand response. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 45(14), 2779-2793.



15. Kim, H. J., & Kim, M. K. (2024). New Customized Bi-Directional Real-Time Pricing Mechanism for Demand Response in Predictive Home Energy Management System. *IEEE Internet of Things Journal*.
16. Sousa, J., & Soares, I. (2023). Benefits and barriers concerning demand response stakeholder value chain: A systematic literature review. *Energy*, 280, 128065.
17. Fan, X. M., Li, X. H., Ding, Y. M., He, J., & Zhao, M. (2023). Demand response scheduling algorithm for smart residential communities considering heterogeneous energy consumption. *Energy and Buildings*, 279, 112691.
18. Tariq, M., Kazmi, S. A. A., Altamimi, A., Khan, Z. A., Alharbi, B., Alafnan, H., & Alshehry, H. (2024). Smart transactive energy based approach for planning and scheduling in multi-looped microgrid distribution network across planning horizon. *Heliyon*, 10(5).
19. Abrishambaf, O., Lezama, F., Faria, P., & Vale, Z. (2019). Towards transactive energy systems: An analysis on current trends. *Energy Strategy Reviews*, 26, 100418.
20. Pratt, A., Krishnamurthy, D., Ruth, M., Wu, H., Lunacek, M., & Vaynschenk, P. (2016). Transactive home energy management systems: The impact of their proliferation on the electric grid. *IEEE Electrification Magazine*, 4(4), 8-14.
21. Gorbacheva, A., Watson, N., Schneiders, A., Shipworth, D., & Fell, M. J. (2024). Defining characteristics of peer-to-peer energy trading, transactive energy, and community self-consumption: A review of literature and expert perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 202, 114672.
22. Tarashandeh, N., & Karimi, A. (2024). Peer-to-peer energy trading under distribution network constraints with preserving independent nature of agents. *Applied Energy*, 355, 122240.
23. Hashemipour, N., Pedrero, R. A., del Granado, P. C., & Aghaei, J. (2024). Smart coordination of buildings to incentivise grid flexibility provision: A virtual energy community perspective. *Energy and Buildings*, 310, 114078.
24. Zahraoui, Y., Korotko, T., Rosin, A., Zidane, T. E. K., Agabus, H., & Mekhilef, S. (2024). A Competitive Framework for The Participation Of Multi-Microgrids in The Community Energy Trading Market: A Case Study. *IEEE Access*.
25. Islam, S. N. (2024). A Review of Peer-to-Peer Energy Trading Markets: Enabling Models and Technologies. *Energies*, 17(7), 1702.
26. Huty, T. D., & Brown, S. (2024). P2P trading of heat and power via a continuous double auction. *Applied Energy*, 369, 123556.
27. Singh, S., Gard, G. K., Varshney, N., Rao, A. K., Kumar, N., & Sharma, D. (2024, February). Distributed Consensus Algorithms for Reliable Communication in Multi-Agent Systems. In *2024 4th International Conference on Innovative Practices in Technology and Management (ICIPTM)* (pp. 1-6). IEEE.
28. Aghamohammadi, F., Abbaspour, A., Saber, H., Fattaheian-Dehkordi, S., & Lehtonen, M. (2024). Decentralized Energy Management of Multiagent Distribution Systems Considering the Grid Reliability and Agent Misbehavior. *IEEE Systems Journal*.