مروری بر رویکردهای نظریه بازی در شبکه توزیع هوشمند با تاکید بر بازی های همکارانه

فرزام متین فر[۱]، فرشته آزادی پرند[۲]، عبدالله لونی[۳]

[۱]استادیار علوم رایانه، دانشگاه علامه طباطبایی، f.matinfar@atu.ac.ir

[۲]استادیار علوم یارانه، دانشگاه علامه طباطبایی، parand@atu.ac.ir

[۳] کارشناسی ارشد علوم رایانه، دانشگاه علامه طباطبایی، loni931@atu.ac.ir

چکیده:

شبکه هوشمند برق یک شبکه مقیاس عظیم با استفاده از فناوری دیجیتال است که مولفه های تولیدی برق)تولیدکنندگان و مصرف کنندگان(را به منظور بهبود قابلیت اطمینان، امنیت و بهره وری با استفاده از سنجش، پردازش، اندازه گیری و کنترل یکپارچه و متحد می سازد. این تولید انرژی می تواند آن ها را نسبت به خرید انرژی از شبکه اصلی توزیع بی نیاز کند یا حتی باعث شود مشتریان بتوانند میزان اضافی انرژی خود را به همسایگان و دیگر مصرف کنندگانی که مایل به خرید انرژی هستند بفروشند. کاربران در سیستم جدید شبکه برق قادرند تا انرژی های مورد نظر خود را با استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی مانند صفحه های خورشیدی، مولد های الکتریکی و... تولید کنند. با این وجود، این فناوری ها باید بر پایه ابزارهای ریاضی محض قرار گیرند تا بطور قاطع و صریح چنین عملیات های پیچیده ای را کنترل و مدلسازی نمایند. در نظریه بازی به مدلسازی رفتار عامل های مستقل و عقلانی پرداخته می شود که هر کدام خواستار بیشینه کردن سود خود هستند. در این مقاله به بررسی کامل کارهای انجام شده در حوزه شبکه های هوشمند برق با اتخاذ از نظریه بازی، بالاخص بازی های همکارانه پرداخته ایم. در ادامه کاربرد های نظریه بازی در سه حوزه شبکه هوشمند شامل ریزشبکه، مدیریت سمت تقاضا و ارتباطات ارائه شده است که مفصلا در ادامه به تشریح آنها می پردازیم.

کلیدواژه:

شبکه هوشمند، مدیریت سمت تقاضا، بازی های همکارانه، ائتلاف، تابع مطلوبیت.

مقدمه

شبکه‌های برق امروزی با مسائل گوناگونی از قبیل مسائل زیست محیطی، مدیریتی و حوزه امنیت مواجه هستند. در مقابل، ساختار پیچیده شبکه های هوشمند آتی استفاده از مجموعه تکنولوژی های پیشرفته را به همراه دارد. در حقیقت یک شبکه هوشمند شامل گره های هوشمند است (مدیریت مولفه های شبکه هوشمند توسط عامل های هوشمند انجام می شود و پشت هر عامل هوشمند یک تصمیم گیرنده عقلانی- انسان- وجود دارد) که می تواند بصورت کارامد با مشتریان خود تعامل و مبادله انرژی نماید. . ساختارشبکه هوشمند برق در مقایسه با شبکه برق سنتی بگونه ای تغییر کرده است که تمام موجودیت ها می توانند نقش تولیدکننده و مصرف کننده داشته باشند یعنی موجودیت ها می توانند هم به تولید و هم به مصرف انرژی پردازند. اینکار به چنددلیل صورت گرفته است که می توان به افت فشار در زمان اوج مصرف برای تولیدکنندگان و کمترشدن هزینه نهایی برای مصرف کنندگان اشاره کرد. این تولید انرژی می تواند آن ها را نسبت به خرید انرژی از شبکه اصلی توزیع بی نیاز کند یا حتی باعث شود مشتریان بتوانند میزان اضافی انرژی خود را به همسایگان و دیگر مصرف کنندگانی که مایل به خرید انرژی هستند بفروشند. ماهیت پیچیده این شبکه ما را بر این می دارد تا از ابزارهای پیشرفته و دقیق به منظور غلبه بر چالش های موجود درسطوح مختلف کنترل، طراحی و اجرا استفاده کنیم. . در این مقاله به بررسی کارهای انجام شده در حوزه شبکه های هوشمند برق با اتخاذ از نظریه بازی، بالاخص بازی های همکارانه پرداخته ایم. در حوزه بازی‌های همکارانه، تمرکز این مقاله برروی پاسخ به سه سوال می باشد که:

الف)چرا همکاری بین عامل ها ارزشمند است؟

ب) چگونه ائتلاف هایی به منظور همکاری در حال تشکیل و شکل گیری هستند؟

ج) چرا و چطور نظریه بازی می تواند همکاری بین عامل ها را مدلسازی نماید؟

از دلایل تشکیل ائتلاف ریزشبکه ها می توان به رسیدن به سودبیشتر و اتلاف انرژی کمتر اشاره کرد.حال باید ببینیم کدام یک از ائتلاف های موجود به منظور همکاری از دید هرریزشبکه بهینه می‌باشد. در این مورد انتظار می رود نظریه بازی به عنوان ابزاری قدرتمند و تحلیلی در جهت بهبود و مدلسازی عملکرد سیستم در این شبکه و شبکه‌های آتی مورد استفاده قرار گیرد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۱۶

به منظور گردآوری چنین شبکه مقیاس بزرگی نیاز است از مدل‌ها و الگوریتم های قدرتمندی استفاده شود تا بتوان ویژگی‌های مورد نیاز چنین شبکه ای را بخوبی ارائه نمود. از مهم ترین ویژگی های این شبکه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱]:

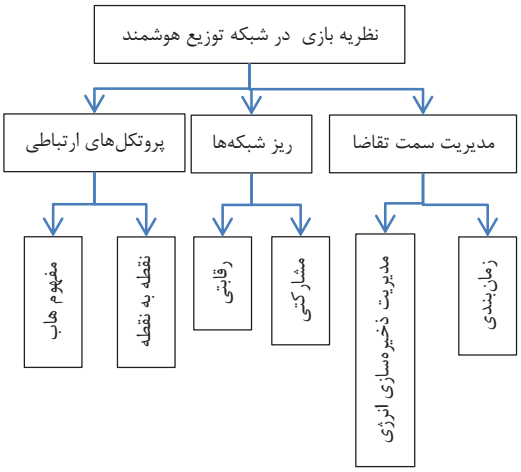
۱- نیاز به عملیات های توزیع شده در شبکه های هوشمند برای اهداف کنترلی و ارتباطی.

۲- ماهیت غیرهمگن شبکه های هوشمند که شامل گره های هوشمند گوناگون با توانایی ها و اهداف مختلف است مانند مترهای هوشمند و وسایل برقی و ... .

۳- نیاز به الگوریتم هایی با پیچیدگی کم زمانی که به خوبی بتوانند سناریوهای همکارانه و رقابتی درون شبکه های هوشمند را بررسی نمایند.

شبکه هوشمند با ادغام تکنیک های مهندسی برق و فناوری ارتباطات از طریق حسگرهای ابزار دقیق برقی و مترهای هوشمند جایگزین مناسبی برای شبکه برق قدیم می باشد. انتظار می رود شبکه های ارتباطی داده تحت تاثیر فاکتورهای تصمیم گیری که مسایل تصمیم گیرندگان را هدایت می کند قرار گیرند.

به منظور رفع چالش‌ها و غلبه بر آنها، بر حَسب ماهیت حوزه‌ها، تکنیک های گوناگونی (مانند شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی، الگوریتم های تکاملی و ازدحامی، بهینه سازی ریاضی و...) برای مدل کردن این سیستم بکار می روند. ولی هیچ کدام از تکنیک های مذکور پارامتر عقلانی بودن عامل‌های توزیع شده در مدل هایشان قید نمی کنند. در حقیقت پشت هر عامل هوشمند یک تصمیم گیرنده عقلانی/منطقی وجود دارد که در صدد رسیدن به خواسته خود یا حداکثر کردن سود حاصله است. در نتیجه، نظریه بازی با در نظر گرفتن این مهم، بعنوان عاملی برای رسیدن به نقطه تعادل و همگرایی می تواند بعنوان یک چارچوب قدرتمند برای پاسخگویی به این نیازها در فاز طراحی و تحلیل سیستم های ارتباطی درنظر گرفته شود. تمام رویکردهای نظریه بازی در این حوزه به منظور افزایش کارایی می باشند که بافرضیاتی در نهایت بهینگی شبکه را به همراه دارند.



شکل ۱: تقسیم‌بندی پژوهش‌های انجام شده در رابطه با کاربرد نظریه بازی‌ها در شبکه توزیع هوشمند

در ادامه روند مقاله بصورت زیر می باشد. در ابتدا به بررسی مفاهیم بنیادی نظریه بازی و ارتباط آن‌ها با شبکه هوشمند برق پرداخته شده است. سپس در ادامه به کاربرد نظریه بازی‌ها در شبکه هوشمند در سه حوزه کلیدی پرداخته شده است که عبارتند از: مدیریت سمت تقاضا[1]، شبکه‌های توزیع در ریزشبکه‌ها[2]، و پروتکل‌های ارتباطی[3]. پژوهش‌های انجام شده در زمینه کاربرد نظریه بازی‌ها در شبکه توزیع هوشمند، مربوط به یکی از سه حوزه مطرح شده می‌باشند. در شکل ۱، تقسیم‌بندی پژوهش‌های صورت گرفته در رابطه با کاربرد نظریه بازی‌ها در شبکه‌های هوشمند انرژی نشان داده شده است. بنابراین در ادامه علاوه بر توضیح و معرفی هر حوزه، نمونه‌های پژوهشی گوناگونی آورده شده است.

بررسی مفاهیم نظریه بازی[4]

به طور خلاصه نظریه بازی مطالعه تصمیم گیری استراتژیک است. به بیان دیگر، نظریه بازی مطالعه مدلسازی ریاضی تعامل یا رقابت بین تصمیم گیران عقلانی و منطقی است. در نظریه بازی انتخاب استراتژی بازیکنان متاثر از سایر بازیکنان است که هر بازیکن در نهایت به دنبال رسیدن به مطلوبیت و حداکثر کردن سود خویش است. نظریه بازی در حالت کلی به دو شاخه اصلی تقسیم می شود: الف) بازی های غیر مشارکتی (رقابتی)[5] و ب) بازی های مشارکتی یا همکارانه. بازی های رقابتی به تصمیم گیرندگان این امکان را می دهد تا بدون هماهنگی و ارتباط با دیگران و بصورت خودخواهانه و مستقل در پی بهینه کردن خواسته خویش باشند. این شاخه شامل دو بخش بازی های ایستا و پویا است. یکی از مهم ترین راه حل ها در این

1 Demand-side management
2 Micro-grid distribution networks
3 Communication protocols
4 Game Theory
5 Non-Cooperative Games

بازی ها تعادل نش[6] است که در این تعادل هیچ بازیکنی از تغییر استراتژی در جهت افزایش مطلوبیت با ثابت ماندن استراتژی های دیگر بازیکنان سود بیشتری نمی برد. در بازی های همکارانه، ممکن است که بازیکنان به منظور برخورداری از سود با هم رقابت نکنند، بلکه به منظور دستیابی به منافع بیشتر بر سر انتخاب برخی از استراتژی ها با هم توافق کنند. این بازیکنان مجاز به برقراری ارتباط و هماهنگی هستند. درسمت دیگر، نظریه بازی مشارکتی شامل دو بخش بازی های ائتلافی (در این بخش بازیکنان با تشکیل گروه های ائتلافی و مشارکتی در پی رسیدن به مطلوبیت ائتلاف و در نهایت مطلوبیت خود هستند) و چانه زنی نش (در چانه زنی نش بازیکنان به منظور رسیدن به سود خود با هم راه چانه زنی را پیش می گیرند که می تواند در نهایت به توافق بیا نجامد). در [۲] ، راه حل بازی های همکارانه ارائه شده است. دراین تحقیق چگونگی ایجاد گروه هایی به جهت همکاری برای افزایش سود و در نهایت رسیدن به نقطه تعادل ارائه شده است. بعلاوه در یک شبکه هوشمند بیش از یک عرضه کننده انرژی وجود دارد و در کنار آن، تمامی عرضه کنندگان و مصرف کنندگان تصمیم گیرانی هستند که براساس میزان مصرف انرژی و هزینه آن، نوع رفتار و استراتژی خود در مقابل دیگر تصمیم گیرندگان سیستم را تعیین می کنند.

بازی‌های غیرمشارکتی

بازی های غیر مشارکتی[۳] بازی هایی را شامل می شود که در آن ها فرآیند تصمیم گیری موجودیت ها، بدون تعامل و همکاری با یکدیگر انجام می شود. نکته حائز اهمیت آن است که در بازی های غیرمشارکتی ممکن است نوعی از تعامل یا همکاری بین بازیکنان مشاهده شود اما این فرآیند به صورت آگاهانه و براساس هماهنگی بازیکنان با یکدیگر نبوده است. همانطور که بطور مختصر در بالا اشاره شد این بازی ها به دو بخش ایستا و پویا تقسیم می شوند که در حالت ایستا سابقه بازی و اطلاعات قبلی اعم از انتخاب استراتژی ها و مطلوبیت انتخاب استراتژی، بازیکنان را تحت تاثیر قرار نمی دهد و بازی غیر مشاکتی به عنوان فرایندی تک مرحله ای تصور می شود. بازیکنان در حالت پویا اطلاعات گذشته، سابقه یا تاریخچه بازی را در انتخاب استراتژی های خود دخیل می کنند و اقدامات بازیکنان متاثر از این اطلاعات است. بازی های غیرمشاکتی می تواند برای مدلسازی مدیریت مستقل سمت تقاضا، نظارت بلادرنگ، پیاده سازی و کنترل ریزشبکه ها، بازار و قیمت گذاری پویا و ... مورد استفاده قرار گیرد [۱].

بازی‌های مشارکتی

در بازی های مشارکتی[۴] گروه هایی (ائتلاف[7]) از بازیکنان به منظور همکاری و رسیدن به مطلوبیت بصورت جمعی تشکیل می شود. بنابراین در این بازی ها این گروه ها هستند که با یکدیگر رقابت می کنند. بازی های رقابتی این امکان را فراهم می کنند که بدانیم چگونه می توانیم این انگیزه را در افراد ایجاد کنیم که به صورت یک گروه با یکدیگر همکاری کرده و یک موجودیت واحد را تشکیل دهند. باید به این نکته توجه کنیم که زمانی بازیکنان در یک گروه خاص برای همکاری شرکت می کنند که سود عایدی هر بازیکن از آن گروه بیشتر از زمانی باشد که فرد بصورت انفرادی عمل می کند. در غیر اینصورت هیچ انگیزه ای برای تشکیل ائتلاف از طرف بازیکنان وجود ندارد.

بازی های پتانسیل[8]

در نظریه بازی به یک بازی، بازی پتانسیل[۵] گویند اگر انگیزه تمام بازیکنان برای تغییر تصمیمات شان را بتوان به صورت یک تابع جامع به نام تابع پتانسیل بیان کرد. این ویژگی ابزار مناسبی است که به وسیله آن می توان تعادل را در یک بازی بررسی کرد زیرا تمامی سودهای کاربران در یک تابع تجمیع شده است. در ادامه به بررسی کارهای انجام شده و کاربردهای متنوع نظریه بازی در حوزه های مختلف شبکه های هوشمند پرداخته شده است.

نظریه بازی و تصمیم گیران توزیع شده[9]

یکی از ویژگی های شبکه های هوشمند وجود تصمیم گیران توزیع شده است. عرضه کنندگان و مشتریان موجودیت هایی منطقی هستند که نفع شخصی خود را دنبال می کنند و تلاش می کنند سود خود را حداکثر نمایند. نظریه بازی به طور ذاتی تصمیم‌گیران توزیع شده را در نظر می‌گیرد و رفتار موجودیت‌ها را در چنین سیستمی مدل‌سازی می کند.

مدیریت سمت تقاضا

در این بخش به بررسی مساله مدیریت سمت تقاضا در شبکه‌های هوشمند پرداخته شده است. مدیریت سمت تقاضا یکی ازبخش های اصلی شبکه های هوشمند آتی است که به منظور کنترل مصرف انرژی مشتری پیاده سازی می شود [۶]. مدیریت سمت تقاضا تعامل میان دو موجودیت درون شبکه را شامل می شود: شرکت های ارائه دهنده انرژی و مشتریان. مدیریت سمت تقاضا شامل برنامه‌های نگهداری و بهبود مصرف

[6] Nash Equilibrium

[7] Coalition
[8] Potential Games
[9] Distributed Decision Maker

انرژی، برنامه های جایگزینی سوخت، برنامه های پاسخ تقاضا و برنامه های مدیریت بار خانگی و تجاری است [۷].

در تحقیق [۶] یک تکنیک مدیریت سمت تقاضا بدیع به منظور کاهش بار اوج مصرف سیستم ارائه شده است. در این تحقیق درسیستم برقی هوشمند فرض می شود که کاربران توزیع شده تقاضای انرژی خود را از درخواست کننده انرژی مطالبه می کنند و ارائه دهنده انرژی بصورت پویا قیمت انرژی را بر پایه پروفایل بار کاربران به روز رسانی می کند. کاربران سعی در حداقل کردن نرخ متوسط اوج مصرف[۱۰] سیستم برق با استفاده از شارژ کردن باطری ها در زمان های غیر اوج مصرف و تخلیه انرژی در زمان های اوج مصرف دارند. بعلاوه یک الگوریتم مدیریت سمت تقاضا با رویکرد نظریه بازی ارائه شده است بطوریکه کاربران سعی در حداقل کردن هزینه انرژی نهایی دارند.

نظریه بازی به طور گسترده برای مدل‌سازی مدیریت سمت تقاضا مورد استفاده قرار گرفته است. به طور کلی پژوهش‌های انجام شده در این قسمت به دو دسته زمان‌بندی[۱۱] و مدیریت ذخیره‌سازی[۱۲] تقسیم می‌شوند که در ادامه به بررسی موضوعی کارهای صورت گرفته در این حوزه‌ها می پردازیم.

مدیریت سمت تقاضا – زمان‌بندی

پژوهش‌های این قسمت بر تعامل بین فراهم کنندگان انرژی و مصرف کنندگان نهایی متمرکز هستند. در این پژوهش‌ها با بکارگیری استراتژی‌هایی نظیر قیمت‌گذاری هوشمند سعی بر کنترل زمان مصرف انرژی مصرف کنندگان است. مصرف کنندگان به عنوان تصمیم گیران مستقل وعقلانی در نظر گرفته می شوند که انتخاب برنامه ریزی زمان و میزان مصرف انرژی آن ها بر روی یکدیگر تاثیر می گذارد. وسایل مصرفی برقی خانگی به دوگروه "قابل تعویض یا انتقال[۱۳]" و "غیر قابل تعویض یا انتقال[۱۴]" تقسیم می شوند. دستگاه های قابل تعویض شامل وسایل برقی هستندکه مصرف کننده با توجه به نیاز خود، زمان مصرف آن دستگاه را می تواند به تعویق بیاندازد، مانند اتو، تلویزیون و.... برعکس، وسایل برقی غیرقابل تعویض به دستگاه هایی اشاره دارد که مصرف کننده معمولا بطورمداوم از آنها استفاده می کند و زمان مصرف را نمی تواند به زمان دیگری موکول نماید، مانند یخچال و وسایل برقی گرمایشی و سرمایشی. درحقیقت زمانبندی مصرف انرژی راه حل هایی را به مصرف کنندگان برای وسایل برقی قابل تعویض ارائه می دهد. هدف از زمان بندی مصرف انرژی این است که ابزارهای هوشمد مشتری مانند حسگرهای و مترهای هوشمند و... قادر به مشخص کردن زمانبندی خودکار زمان مصرف انرژی باشند که درحقیقت ابزارها چه زمانی از انرژی استفاده نمایند با این هدف که هزینه هر مشتری درون شبکه نیز کمینه گردد.

برای پاسخ به تمامی درخواست های مشتریان درون شبکه از سوی عرضه کننده انرژی، ظرفیت شبکه باید بیشتر از ظرفیت نقطه اوج مصرف باشد تا شبکه بتواند پایداری خود را حفظ نماید و در ساعات اوج مصرف نیز قادر به پاسخگویی باشد. برنامه های مدیریت سمت تقاضا باید دارای برنامه ریزی هایی باشند که بتوانند با کنترل الگوی مصرف انرژی و پروفایل بار کاربران، نسبت اوج به میانگین را کاهش دهند. هر چه این نسبت به یک نزدیک تر باشد تعادل شبکه در میزان مصرف انرژی بیشتر است که می تواند باعث پایداری شبکه گردد. انتقال درخواست ها به ساعت های غیر اوج مصرف، از اهداف مهم مدل های مدیریت سمت تقاضا-زمان‌بندی است.

یکی از راهکارهای مهم در این مدل، قیمت گذاری بلادرنگ می‌باشد. برنامه های قیمت گذاری مصرف براین اساس مورد توجه قرار می گیرند که قیمت گذاری انرژی برق در طول زمان به تغییر الگوی مصرف می انجامد [۸]. قیمت گذاری بلادرنگ مدلی را پیاده سازی می کند که در آن قیمت انرژی برق به طور متناوب تغییر می کند که نشان دهنده هزینه تولید وعرضه آن میزان از انرژی است. یکی از روش های معمول در قیمت گذاری بلادرنگ، قیمت گذاری روزانه است که براساس آن مشتریان قیمت انرژی برق در هر روز را یک روز زودتر دریافت می کنند [۹].

در [۷] یک برنامه مدیریت سمت تقاضای مستقل و توزیع شده پیشنهاد شده است. براساس این مدل، یک بازی زمان بندی مصرف انرژی معرفی شده است که در آن بازی مصرف کنندگان بصورت زمان بندی مصرف انرژی و انتخاب استراتژی است. درحقیقت، این برنامه زمانبندی باید راحتی کاربر را هم در نظر داشته باشد. طبق این کار کافی است هر مصرف کننده استراتژی بهترین پاسخ[۱۵] را در پیش گیرد که نیازی نیست کاربران اطلاعات مصرف انرژی و پروفایل بار خود را بین یکدیگر به اشتراک بگذارند. بدین ترتیب نگرانی ها و دغدغه هایی که از جهت پخش اطلاعات مصرف انرژی افراد و حفظ حریم خصوصی حفاظت اطلاعات پیش می آید برطرف می گردد. این انگیزه در مصرف کنندگان وجود دارد تا در این بازی شرکت کنند با این هدف که هزینه های انرژی خود را کمینه گردانند.

تحقیق [۱۰]، یک روش زمان بندی مصرف انرژی را برای مدیریت تقاضای بار خانگی و محلی با استفاده از روش برنامه ریزی خطی و نظریه بازی معرفی می کند. این مدل می تواند

[10] Peak-Average-Ratio

نقطه بهینه مصرف انرژی و مدل زمانی بهینه مصرف را شناسایی کند. برای این منظور نتایج شبیه سازی های توزیع شده و متمرکز در این مقاله آورده شده است. در مقاله ای دیگر در [۸]، یک روش خودکار پاسخ به تقاضا معرفی شده است که استقلال هر کدام از مشتریان و همچنین همکاری های بین آن‌ها را در نظر گرفته است. برای این منظور از نظریه بازی برای مدل‌سازی رفتار کاربران در یک بازار با استفاده از مدل قیمت گذاری روز قبلی معرفی شده است که نقطه بهینه زمان بندی مصرف را جستجو می کند. همچنین در این مدل‌سازی، زمان بندی خودکار مصرف انرژی ابزارهای خانگی مورد استفاده قرار گرفته است. شبیه سازی انجام شده بر روی ۲۰ خانه و هر کدام شامل ۲۰ وسیله مصرفی انرژی بوده است. تحقیق [۱۱] یک روش ارزیابی بلادرنگ عملکرد شبکه را معرفی کرده است. دراین تحقیق تمرکز اصلی بر روی مشکلات احتمالی شبکه است که ممکن است شبکه را مختل نماید و تلاش شده است آن ها پیش از رخ دادن شناسایی شوند. برای این منظور از اصول نظریه بازی و درخت تصمیم و مساله مشهور زندانی[۱۶] استفاده شده است. الگوریتم معرفی شده در این مقاله شرایط شبکه را بررسی می نماید و حالت تعادل شبکه را با یافتن نقاط دارای ضعف عملکرد و بهبود آن نقاط حفظ می کند.

در [۱۲] تعادل عرضه و تقاضا درون شبکه های هوشمند بررسی شده است که در آن مصرف کنندگان نقش عمده ای را بازی می کنند. هدف اصلی این است که کاربران چه به عنوان خریدار یا فروشنده راغب به مبادله انرژی بین خود باشند تا به بهبود وضعیت شاخص اوج به میانگین بیانجامد. بدین منظور یک بازی اشتاکلبرگ معرفی شده است. در [۱۳] رویکرد متفاوتی در برابر مدیریت سمت تقاضا اتخاذ شده است. مدل معرفی شده در این مقاله براساس ایجاد تمایل بین مصرف کنندگان در یک بازی غیرمشارکتی است که اجازه می دهد رفتار مصرف کنندگان برای رسیدن به نقطه بهینه سود کنترل شود. در این مدل نشان داده شده است که نقطه تعادل نش بازی معرفی شده، در انتخاب هایی در بین کاربران است که هزینه های آن ها را کمینه می کند. سپس دو روش برای یافتن تعادل نش بهینه معرفی شده است. مدل اول براساس ویژگی های یک کلاس خاص از بازی های پتانسیل است که نقطه تعادل نش، نقطه کمینه تابع پتانسیل است. روش دوم براساس یک رویکرد کنترل محور وابسته به پویایی بازی است. در [۱۴] یک چارچوب چند هدفه تصادفی براساس نظریه بازی معرفی شده است که تعامل های بازیکنان درون گروه و بیرون از گروه را در گستره وسیع از بازیکنان مدل می کند. بازی معرفی شده در دو شرایط متفاوت براساس ریسک پذیری یا عدم ریسک پذیری مورد مطالعه قرار گرفته است.

در تحقیق [۹] یک بازی برای قیمت گذاری بلادرنگ بهینه ارائه شده است. در این مدل شرکت های عرضه کننده مصرف انرژی تلاش می کنند سود خود را بهینه کنند. قیمت ها از طرف این شرکت ها به وسایل هوشمند مصرف کنندگان ارسال می شود. سپس مصرف کنندگان براساس قیمت دریافتی مصرف انرژی خود را برنامه ریزی و زمانبندی می کنند. بدین منظور یک بازی اشتاکلبرگ با یک سردسته و n دنبال کننده مدل شده است. در طرف شرکت عرضه کننده انرژی یک الگوریتم ژنتیک برای حداکثر کردن میزان سود ارائه شده است. در طرف مشتریان نیز از روش های آنالیزی براساس برنامه ریزی خطی[۱۷] استفاده شده است. در تحقیق [۱۵] بررسی شده که چگونه استراتژی های قیمت گذاری و تکنیک های بهینه سازی براساس نظریه بازی می توانند در شبکه هوشمند برای بهینه کردن پاسخ به تقاضا مورد استفاده قرار گیرد.

یکی از راهکارهای مهم در شبکه توزیع هوشمند، قیمت‌گذاری متغیر در زمان‌های مختلف به منظور کنترل عرضه و تقاضا می‌باشد [۱۶و۱۷و۱۸]. در تحقیق [۱۸]، زمان‌بندی منجر به مزایای قابل توجه اقتصادی و عملیاتی شده است.

مدیریت سمت تقاضا – مدیریت ذخیره‌سازی انرژی

در شبکه های هوشمند آتی، ابزارهای ذخیره سازی از بخش های بسیار مهم هستند که می توانند تاثیر قابل توجهی بر روی مدیریت سمت تقاضا داشته باشند. یک مصرف کننده می تواند انرژی را در زمان های غیراوج مصرف ذخیره کرده و در زمان های اوج مصرف به جای درخواست انرژی برق از شبکه، از انرژی ذخیره شده استفاده کند. به کمک ابزارهای بهبودیافته و ارزان ذخیره سازی انرژی، مصرف کنندگان می توانند انرژی مورد نیاز خود را برای مدت های طولانی ذخیره نمایند.

در تحقیق [۶] یک روش مدیریت سمت تقاضا معرفی شده است که باعث کاهش نسبت اوج به میانگین می شود. بدین منظور، فرض شده است که مشتریان از ابزارهای ذخیره سازی انرژی استفاده می کنند. در این مدل شرکت های عرضه کننده، انرژی قیمت انرژی را براساس رفتار مشتریان به روزرسانی می کنند. بازی معرفی شده در این مدل، با هدف کمینه کردن هزینه های انرژی هر کدام از مشتریان است. الگوریتم توزیع شده ای برای این منظور معرفی شده است که صرفا به اطلاعات مبادله شده بین شرکت عرضه کننده انرژی و مشتری نیاز دارد و نیازی به تبادل اطلاعات در بین کاربران نیست. در [۱۹] تبادل انرژی در بین ذخیره سازها مورد بررسی قرار گرفته است. این ذخیره سازها از نظر جغرافیایی پراکنده هستند. سپس یک

بازی غیرمشارکتی معرفی شده است که هر دارنده ذخیره ساز می تواند در مورد حداکثر میزان انرژی در نظر گرفته شده برای فروش در یک بازار محلی با هدف حداکثر کردن سود خود تصمیم گیری کند. قیمت گذاری در این مدل براساس مدل چانه زنی تعیین می شود. بازی معرفی شده دارای یک نقطه تعادل نش است و الگوریتمی معرفی شده است که به این نقطه همگرا می شود. در [۲۰] مدیریت مستقل سمت تقاضا در حضور ابزارهای ذخیره سازی انرژی مطالعه شده است. در نتیجه یک بازی غیرمشارکتی معرفی شده است. در این بازی، بازیگران یا همان مصرف کنندگان که به مصرف یا ذخیره سازی انرژی می پردازند. مشتریان درخواست های انرژی خود را به شرکت عرضه کننده ارسال می کنند. براین اساس قیمت تمام شده انرژی براساس درخواست های تمامی کاربران درون سیستم تعیین می شود. به وسیله یک کنترل کننده مرکزی و زمان بندی مصرف و ذخیره سازی انرژی، شرک عرضه کننده در صدد است تا فاصله زمانی بین درخواست انرژی و تامین انرژی را کمینه گرداند. حفظ حریم خصوصی اطلاعات کاربران در این مدل پیش بینی شده است به طوریکه حداقل اطلاعات بین کاربران مبادله شود.

تحقیق [۲۱] بررسی جامعی از مدیریت سمت تقاضا به وسیله بازی های غیرمشارکتی و مشارکتی است. در این مدل شبکه هوشمندی مدل‌سازی شده است که شامل کاربران قدیمی در کنار کاربران جدید است که این کاربران دارای ابزارهای توزیع شده تولید و ذخیره سازی انرژی هستند. برای مثال این کاربران ممکن است از صفحه های خورشیدی در پشت بام خانه های خود استفاده نمایند تا بتوانند نیازهای خود به انرژی را تامین کنند یا حتی مازاد انرژی خود را ذخیره نمایند. به وسیله یک سازوکار قیمت گذاری روز گذشته که به وسیله یک واحد مرکزی مستقل انجام می شود، کاربران جدید خواستار کاهش هزینه های انرژی خود با استفاده از تامین و ذخیره سازی انرژی هستند بطوریکه کمترین درخواست ممکن را به شبکه اصلی داشته باشند. دو روش بهینه سازی در این مقاله معرفی شده است. روش اول بر پایه بهبود تابع سود کاربران و روش دوم روش بهینه سازی برای کل سیستم است. در روش اول یک بازی غیر مشارکتی برای هر کدام از کاربران مطرح شده است. روش دوم همکاری بین کل کاربران سیستم است و در جهت بهبود عملکرد کلی سیستم مطرح شده است.

در [۲۲] رویکردی متفاوت درباره مشکلات حاصل از تولید توزیع شده انرژی توسط کاربران با علایق مختلف، تولید نامتوازن، روش‌های تولید انرژی های نو و هزینه بالای نگهداری و ذخیره سازی انرژی است. در این مقاله الگوریتمی برای فائق آمدن بر این مشکلات نیز معرفی شده است.در تحقیق [۲۳] دو مدل بازار برای هماهنگی عرضه و شکل گیری تقاضا در سیستم شبکه هوشمند ارائه شده است. در این تحقیق تمرکز اصلی بر ارائه بازار هایی است که مشتریان بسته به مقدار انرژی که دارند، مقدار بار خود را منطبق بر مقدار عرضه افزایش یا کاهش می دهند.

در تحقیق [۲۴] مدل های بیشتری ارائه شده است که برای هماهنگی عرضه و تقاضا در سیستم شبکه هوشمند مناسب هستند. در این مدل تابع قیمت گذاری برق بصورت متغیر با زمان در راستای تابع هدف وسایل خانگی مشتری با رفاه اجتماعی است. در تحقیق [۲۴] ، قیمت گذاری پویا برای کنترل تقاضای برق با هدف دستیابی به صرفه جویی انرژی با استفاده از بازی های تراکم در نظریه بازی های غیر مشارکتی ارائه و مطرح شده است. در این تحقیق همچنین ویژگی های مهم بازی تراکم مدیریت سمت تقاضا بررسی شده و نشان داده شده که چگونه تعادل با استفاده از الگوریتم توزیع شده بدست خواهد آمد.

تحقیق[۲۵]، مثال‌هایی در مورد ذخیره‌سازی انرژی و تاثیر آن بر دامنه نوسانات درخواست‌ها و نقاط تعادل در بازی ارائه کرده است و در [۲۶]، به مجموعه‌ای از ساختمان‌ها به عنوان یک خوشه نگاه شده است و یک روش بر مبنای نظریه بازی برای ذخیره‌سازی انرژی در خوشه‌ها ارائه شده است.

در ادامه به کارهای انجام شده در حوزه ریز شبکه ها (دسته دوم پژوهش‌ها) و مدلسازی آنها با اتخاذ از نظریه بازی پرداخته شده است.

ریزشبکه ها و تشکیل ائتلاف

مفهوم ریزشبکه ها به صورت مجموعه ای از تولیدکنندگان انرژی های نو مانند صفحه های خورشیدی، توربین های بادی، مولدهای الکتریکی و... تعریف می شود که در درون شبکه توزیع قرار دارد و می تواند انرژی مورد نیاز یک منطقه محدود جغرافیایی را تامین کند. مفهوم ریز شبکه به عنوان گروه شبکه منابع انرژی توزیع شده می باشد واین ریز شبکه ها انرژی برق را برای نواحی کوچک جغرافیایی فراهم می کنند. شبکه های هوشمند آتی مجموعه ای از تعداد زیاد این ریزشبکه ها خواهند بود. بنابراین هر ریزشبکه که مازاد انرژی یا درخواستی برای انرژی برق ازطرف ریزشبکه دیگر دارد، برای این ریزشبکه ها و مشتریان درون این نواحی سودمند خواهد بود که به جای درخواست این انرژی از شبکه اصلی، انرژی را بین خود مبادله کنند [۱]. در این راستا، بازی‌های همکارانه به منظور تبادل انرژی بین ریزشبکه‌ها از اهمیت به سزایی برخوردار هستند که در آن ریزشبکه های درون یک شبکه توزیع و تولید می‌توانند با یکدیگر ائتلاف تشکیل داده و همکاری می نمایند. در سیستم

مشتریان را با استفاده از انتقال انرژی بوسیله خطوط انتقال به ایستگاه های فرعی دارد که در نهایت برق با ولتاژ پایین به دست مشتریان خواهد رسید. حال با وجود اینکه تعداد ریز شبکه ها رو به افزایش است و بحث توزیع شدگی این شبکه بسیار مهم است ریزشبکه ها به منظور تامین تقاضای برق مشتریان بصورت محلی و توزیع شده می توانند این کار را انجام دهند. در نتیجه، ریز شبکه ها می توانند بصورت محلی با هم همکاری نمایند و ائتلاف تشکیل دهند.

در راستای اهمیت این حوزه از پژوهش لازم به ذکر است که مبادله انرژی ریزشبکه ها با شبکه برق اصلی دارای معظلاتی است که می توان به این موارد اشاره کرد:

۱- انتقال انرژی نیازمند استفاده از مبدل[18] ها است که با کاهش سطح ولتاژ همراه است و برای جبران این افت ولتاژ نیازمند افزایش ولتاژ مبدل ها و استفاده بیشتر برق هستیم.

۲- افزایش وابستگی ریز شیکه ها به شبکه برق اصلی و تهدید ماهیت توزیع شدگی سیستم.

۳- اتلاف انرژی به اندازه I^2R وافزایش آن در فواصل طولانی.

ائتلاف ها می توانند انرژی را از ائتلافی دیگر خریداری کرده و یا به فروش برسانند. بنابراین ارتباط با شبکه اصلی کاهش یافته و اتلاف انرژی در طول مسیر انتقال نیز کاهش می یابد. بنابراین به دلایل مذکور برای ریزشبکه ها بعتراست با یکدیگر همکاری نمایند.

اگرهمه موجودیت های شبکه هوشمند برقی، اعم از عامل های تولید کننده و مصرف کننده، بعنوان موجودیت های منطقی و عقلانی درنظر گرفته شوند، آنگاه بدیهی است که این موجودیت‌ها بدنبال رسیدن به حداکثر سود خود با خرید/ فروش انرژی هستند. حال بین ریزشبکه ها همکاری ارزشمند خواهدبود که سودعایدی هرریزشبکه از همکاری حداقل برابر با سود زمانی باشد که بصورت مستقل و انفرادی کار می کند. درحقیقت سود حاصل از همکاری انگیزه ای برای ایجاد تعامل بین ریزشبکه هاست. در غیراینصورت هیچ ریزشبکه ای تمایل به همکاری با سایرین ندارد. درادامه باید به این نکته اشاره کرد که ائتلاف هایی در حال شکل گیری هستند که برای هر ائتلاف، هیچ یک از اعضا از همکاری ضرر نکند و ریز شبکه ها رسیدن به مطلوبیت بیشتر را در گرو تشکیل ائتلاف ببینند.

درشبکه هوشمندبرقی هر تولیدکننده به دنبال کنترل زمان اوج مصرف و افت فشار خود از طرف مشتری است و هر مشتری به دنبال کمینه کردن هزینه خود است.

همکاری ریزشبکه ها می تواند به سه دسته تقسیم شود.

الف)همکاری بین تولیدکننده-تولیدکننده که به منظور مدیریت و کنترل زمان اوج مصرف و پشتیبانی انرژی مشتریان صورت می گیرد.

ب) همکاری بین مصرف کننده-مصرف کننده که می تواند به کاهش هزینه مصرف کننده منجرشود

ج) همکاری بین تولیدکننده-مصرف کننده که باهدف کمک به تولیدکننده برای تولید انرژی و ارائه الگوهای مصرف از سوی مشتری است.

نظریه بازی با فرض عقلانی بودن موجودیت ها وارائه استراتژی های مناسب، آنها را به سمت رسیدن به مطلوبیت بیشتر سوق می دهد. درادامه به تفصیل، به معرفی رویکردهای همکارانه و رقابتی نظریه بازی دراین حوزه اشاره شده است.

ریزشبکه ها - مشارکتی

در تحقیق [۲۷] الگوریتمی ارائه شده است که در آن هر ریزشبکه می تواند با دیگر ریزشبکه ها ائتلاف تشکیل داده و با آن ها همکاری کند. بنابراین می تواند اتلاف انرژی حاصل از تعامل با دیگر ریزشبکه ها و یا شبکه اصلی را کاهش دهد.

همانطور که در کار [۲۷] ارائه شده است، می‌توان از بازی های مشارکتی برای ارائه‌ی سازوکار مبادله‌ی انرژی مشارکتی در شبکه‌های فشار قوی آتی استفاده کرد. شبکه‌ی توزیع متشکل از ایستگاه فرعی[19] را در نظر بگیریدکه به شبکه‌ی فشار قوی اصلی برق و ریزشبکه ها (با تعدادN) متصل شده است. هر ریزشبکه $i \in N$ تقاضای انرژی موجودیت خاصی را تأمین می‌کند (برای مثال گروه مصرف‌کنندگان یا تقاضای ناحیه ای کوچک) و اختلاف بین تقاضا و تولید آن با متغیر Q_i تعریف شده است که می تواند برای هر ریزشبکه متغیر باشد. در مدت زمان مشخص، بسته به تولید برق و تقاضای مصرف‌کنندگان، هر ریزشبکه $i \in N$ یا برق مازاد برای فروش دارد، $Q_i > 0$ ، یا باید برق را برای تأمین نیاز خود مصرف نماید، $Q_i < 0$.

بدون درنظر گرفتن ذخیره‌سازی، هر ریزشبکه $i \in N$ به مقدار Q_i با شبکه‌ی هوشمند اصلی با استفاده از ایستگاه فرعی انرژی مبادله می‌کند. این انتقال با اتلاف برق در طول خطوط توزیع همراه است. در این شرایط، با تمرکز بر این اتلاف برق، مطلوبیت غیرمشارکتی هر ریزشبکه کمتر می شود .در نتیجه‌ی انتقال برق به عنوان اتلاف برق در طول خط توزیع بصورت زیر بیان می‌شود:

$$u(\{i\}) = -\omega_i P_{i0}^{loss} \qquad (1)$$

که P_{i0}^{loss} اتلاف برق در مدت زمان تبادل برق بین ریزشبکه i و ایستگاه فرعی است و، ω_i قیمت پرداخت شده بوسیله‌ی ریزشبکه i در هر واحد اتلاف برق و علامت منها برای حداکثرسازی مسئله، اضافه شده است. اتلاف برق P_{i0}^{loss} تابع

[18] Transformer

[19] Sub-Station

عوامل گوناگون مانند فاصله‌ی جغرافیایی بین ریزشبکه ها و ایستگاه فرعی، ولتاژ انتقال برق، مقدار برق منتقل شده Q_i و همچنین اتلاف در ایستگاه فرعی است. به جای تبادل برق تنها با ایستگاه فرعی، ریزشبکه هامی‌توانند گروه مشارکتی (ائتلاف) که بازار مبادله‌ی انرژی محلی را تشکیل می‌دهد، ایجاد کنند. در داخل این ائتلاف، ریزشبکه ها ، برق را به طور محلی در بین یکدیگر منتقل خواهند کرد، در نتیجه اتلاف‌های برق کاهش و استقلال ریزشبکه ها بهبود می یابد. این کاهش اتلاف برق عمدتا نتیجه‌ی دو عامل است: ۱) ریزشبکه های گوناگون نزدیک به هم قرار خواهند داشت، در نتیجه برق را در طول فواصل کوتاه‌تر منتقل خواهند کرد و ۲) مبادله‌ی برق بصورت محلی به جلوگیری از اتلاف برق در سطح ایستگاه فرعی کمک خواهد کرد. در نتیجه، بسته به محل و نیازهای برق ، ریزشبکه ها انگیزه و سود متقابلی برای همکاری دارند تا برق را به صورت محلی در شبکه‌ی توزیع مشخص شده خود خرید و فروش نمایند.

در ادامه بازی مشارکتی بین ریزشبکه ها ارانه می شود. ائتلاف $S \subseteq N$ به عنوان تعداد ریزشبکه هایی که همکاری می کنند تعریف می‌شود که به دو گروه تقسیم خواهند شد : گروه فروشندگان که بوسیله‌ی $S_s \subset S$ و گروه خریداران که که با $S_b \subset S$ بیان شده است، به طوری که $S_s \cup S_b = S$. در هر ائتلاف، فروشندگان در S_s برق را با خریداران در S_b همچنین با ایستگاه فرعی مبادله خواهند کرد.

درحقیقت زمانی یک ائتلاف تشکیل خواهد شد که انگیزه تشکیل ائتلاف از طرف بازیکنان وجود داشته باشد. معیاری که نشان دهنده سود عایدی هر ائتلاف است تابع مطلوبیت نامیده می شود. این تابع به هر ائتلاف عددی حقیقی نسبت می دهد که نشان دهنده سود آن ائتلاف است. در نهایت هر ریز شبکه با استفاده از سود ائتلاف، مقدار سود عایدی خود را از ائتلاف محاسبه می کند.

مطلوبیت ائتلاف S و نحوه‌ی هماهنگی و ارتباط بین فروشندگان و خریداران بیان خواهد شد (یعنی کدام خریدار انرژی را برای کدام فروشنده ارائه می کند). هماهنگی فروشندگان و خریداران وظیفه‌ی چالش‌برانگیزی است که با استفاده از تکنیک های نظریه بازی به آن خواهیم پرداخت.

با ارائه‌ی ارتباط بین خریداران و فروشندهگان که حاصل از الگوریتم هماهنگی بین خریداران و فروشندگان داخل ائتلاف S است مطلوبیت ائتلاف S بصورت زیر خواهد بود:

$$u(S,\prod) = -(\sum_{i\in S_b, j\in S_s} \omega_i P_{ij}^{loss} + \sum_{i\in S_s} \omega_i P_{i0}^{loss} + \sum_{j\in S_b} \omega_i P_{j0}^{loss}) \quad (2)$$

که ω_i عامل قیمت‌گذاری، و P_{i0}^{loss} و P_{i0}^{loss} اتلاف برق در طول توزیع برق بین فروشندگان و خریداران در S و ایستگاه فرعی است در حالی که P_{ij}^{loss} اتلاف برق در طول خط تولید در طول انتقال برق محلی در S بین فروشنده‌ی i و خریدار j را نشان می‌دهد. این اتلاف برق همانطور که قبلاً بیان شد، تابع عوامل گوناگون مانند فاصله و ولتاژ توزیع است.

در تحقیق [۲۸]، یک سازوکار تشکیل ائتلاف بهینه برای ریز شبکه ها در شبکه هوشمند بررسی شده است که در آن هدف از تشکیل ائتلاف ۱- حداقل کردن بار انرژی و وابستگی به شبکه برق اصلی ۲- حداقل کردن اتلاف شبکه برق کلی و ۳- حاداکثر کردن انتقال انرژی درون ائتلاف است. بدین منظور دو الگوریتم سلسله مراتبی پیشنهادی ارائه شده که در نهایت می تواند بهینگی ائتلاف را در پی داشته باشد. همچنین تحقیق [۲۸] ارائه دهنده تابع مطلوبیت مشابه کار [۲۷] است که لزوم تشکیل ائتلاف بین ریز شبکه ها را بررسی می نماید. در این کار ریز شبکه ها با معیار تابع مطلوبیت که در ادامه بیان خواهد شد سعی در ایجاد همکاری با یکدیگر دارند. در ابتدا یک حاشیه سود[۲۰] بصورت زیر تعریف شده است که ارائه دهنده هرواحد سود ریزشبکه هاست هنگامی که با سایرین تبادل انرژی دارند.

$$uf = \begin{cases} 0 & pm \le 0 \\ 1 & pm \ge \delta \\ \frac{pm}{\delta} & o.w \end{cases} \quad (3)$$

که در آن pm حاشیه سود دلخواه و δ به عنوان مقادیر مطلوب حاشیه سود در نظر گرفته می شود. مطلوبیت هر ریز شبکه بصورت $U_i = \frac{uf}{1+|D_i - S_i|}$ می باشد که $|D_i - S_i|$ اختلاف مقدار تولید و تقاضای انرژیی برای هر ریزشبکه است. در نهایت تابع مطلوبیت هر ائتلاف در هر مان بصورت زیر محاسبه می شود.

$$U_C = \frac{1}{1+E_C+L_C} \quad (4)$$

که در آن $L_C = \sum loss(i,j)$ مجموع اتلاف انرژی درون هر ائتلاف است و مشابه کار [۲۷] تابع عواملی مانند فاکتور اتلاف انتقال، فاصله جغرافیایی، برق مورد نیاز برای انتقال و ... است. همچنین $E_C = \sum|D_i - S_i|$ مقدار برق موجود برای تقاضا و تولید در هر ائتلاف است.

دررابطه با تخصیص عقلانی سود ائتلاف بین اعضای هر ائتلاف روش های گوناگونی مانند راه حل هسته، ارزش شاپلی، راه حل نیاکلوس، راه حل چانه زنی نش و شاخص قدرت شپلی-شوبیک وجود دارند. در این تحقیق برای تخصیص عقلانی این سود بین اعضای هر ائتلاف از روش ارزش شاپلی بصورت زیر استفاده کرده است که این روش درمقایسه با روش هسته به هر ریزشبکه یک مقدار منحصربفرد تخصیص می دهد.

$$\phi_i(N,v) = \sum_{S\subseteq N\setminus\{i\}} \frac{|S|!(|N|-|S|-1)!}{|N|!}[v(S\cup i) - v(S)] \quad (5)$$

[20] Profit Margin

حال در اینجا دو سوال چالش برانگیز مطرح می شود. ۱) چگونه می توان در هر ائتلاف خاص خریداران را با فروشندگان هماهنگ و مرتبط کرد؟ و ۲) چگونه ریزشبکه ها می توانند ائتلاف هایی را به منظور حداقل کردن اتلاف انرژی تشکیل دهند؟

دررابطه با سوال‌اول، می‌توان روش های پیشرفته از دو شاخه‌ی اصلی نظریه بازی را انتخاب کرد : ۱-نظریه مزایده[۲۱] و بازی های هماهنگی[۲۲]. نظریه مزایده لزوما یک چارچوب تحلیلی برای بررسی تعاملات بین فروشنده‌ها است که هر یک از آن‌ها کالا یا لوازمی برای فروش به تعدادی خریدار علاقه‌مند به خرید کالا برای بهینه‌سازی عملکردهای مورد نظر خود دارند. نتیجه‌ی مزایده کالای فروخته شده و همچنین قیمتی است که برای آن معامله انتخاب می شود. در مدل بررسی شده، مشخص می شود که در هر گروه مزایده(در اینجا مزایده به گروه‌بندی ثابت شبکه‌های فشار قوی خریدار و فروشنده اشاره دارد)، خریداران و فروشندگان گوناگون وجود خواهند داشت، یک چارچوب مناسب برای ایجاد هماهنگی بین خریداران و فروشندگان از طریق مزایده وجود خواهد داشت. استراتژی های هر بازیکن در گروه های مزایده تعیین قیمتی است که مشتاق به خرید/ فروش انرژی دارد و همچنین مقداری است که می‌خواهد بخرد یا بفروشد. هدف هر بازیکن تعیین قیمت و پارامتر بهینه است که می‌خواهد آن را با استفاده از تابع هدف بهینه کند.

با استفاده از روش هایی مانند آن‌چه که در [۲۹] ،[۳۰] ارائه شده است، می‌توان قیمت متعادل یا مقادیری که مبادله می‌شوند، یعنی هماهنگی فروشندگان با خریداران را تعیین کرد. سپس، کمیت‌ها برای تعیین مقادیر پرداختی هر بازیکن درائتلاف تعیین می شوند. از این رو، جواب پرسش دوم یعنی چگونه ریزشبکه‌ها می‌توانند ائتلاف هایی را تشکیل دهند با استفاده از چارچوب بازی های مزایده ای به دست خواهد آمد.

به عنوان مثال، تحقیق در [۲۷]،[۳۱] راه‌حلی را برای پرسش دوم ارائه کرده است. در ابتدا به هر ائتلاف تابع مطلوبیتی مطابق بالا اطلاق شده است . در نهایت از دو مفهوم ادغام[۲۳] و انفصال[۲۴] برای تشکیل ائتلاف بصورت زیر استفاده شده است.

دو ائتلاف مجزا C, K مفروضند که پیامد هر ائتلاف با استفاده از تابع مطلوبیت بدست می آید. حال طبق پرتو اردر ائتلاف C به K ترجیح داده می شود اگر و تنها اگر $C \rhd K \Longleftrightarrow \{\varphi j(C) \geq \varphi j(K) \forall j \in C,K\}$ ، که در آن $\varphi j(C)$ تابع مطلوبیت ائتلاف C است. در نهایت مفهوم ادغام (شرکت در یک ائتلاف) و انفصال(جداشدن از یک ائتلاف) این امکان را به هر ریزشبکه می دهد تا در جهت حداکثر سازی سود خود با یافتن بهترین ائتلاف طبق پرتو اردر حرکت کند. در حقیقت هر ریزشبکه با شروع از یک نقطه صفر با ادغام و انفصال در هر ریزشبکه پی آمد عایدی از آن ائتلاف را برای خود متصور می شود و در نهایت بهترین ائتلاف را جهت همکاری انتخاب می کند.

در [۳۱]،[۳۲]یک چارچوب برای الگوی تولید انرژی در ریزشبکه ها معرفی شده است. دراین تحقیق تمرکز اصلی بر روی مسئله هماهنگی تزریق برق فعال به شبکه با استفاده از ریز تولید کننده ها[۲۵]ست. هدف هر یک از این تولیدکنندگان برق، تزریق حداکثر مقدار برق است بطوریکه برخی محدودیت های موثر مانند محدودیت های ولتاژ برآورده شود. در این کار در ابتدا منطقه ای که مازاد برق فعال دارد مشخص شده است (یعنی مجموعه ای از تمام موجودیت هایی که مازاد انرژی دارند و محدودیت های ولتاژ را ارضا می کنند). براساس این یافته، این مسئله در نظریه بازی مطرح شده است که این تحقیق ارائه یک رویکرد نظریه بازی با اشتراک منصفانه تزریق برق بین تولید کنندگان است در حالیکه در همه زمان ها محدودیت های مذکوربرآورده شوند. یک بازی تکرارشونده معرفی شده که میزانی از انرژی را که هر ریز شبکه می تواند به شبکه تزریق کند مشخص می نماید.

در تحقیق [۳۲]،[۳۳]،[۳۴] یک سازوکار قیمت گذاری بین ریزشبکه های متصل به هم با استفاده از نظریه بازی مطالعه شده است. در این کار به عدم پایداری انرژی های نو در تولید برق توجه شده است و براین اساس، یک مدل ریاضی در یک بازار آزاد با عرضه کنندگان و مصرف کنندگان انرژی معرفی شده است. در این مدل اتلاف انرژی، قیمت گذاری بلادرنگ و نرخ تولید در جهت کمینه کردن هزینه های انرژی مورد استفاده قرار گرفته است. سازوکار قیمت گذاری انرژی با استفاده از تابع مشخصه برای هر ریز شبکه صورت می گیرد و این ماهیت ناهمگون ریزشبکه ها که می توانند شامل توربین های بادی، صفحه های خورشیدی، مولدها و... شود دلیل انتخاب چنین تکنیک های تحلیلی مانند نظریه بازی در این حوزه است. نظریه بازی با کنترل و بهینه سازی سیستم های شبکه هوشمند به این مهم دست پیدا می کند. درتحقیق [۳۵] و [۳۶]،[۳۷]به این مسایل باز در این حوزه با استفاده از نظریه بازی پرداخته شده است.

همچنین در تحقیق [۳۸]، یک چارچوب از نظریه بازی ارائه شده که در آن شبکه های فشار قوی می توانند تصمیم بگیرند که برای تامین تقاضای پیش بینی شده مصرف کنندگان از انرژی استفاده کنند یا آن را ذخیره نمایند. این چارچوب بر

[21] Auction Theory
[22] Matching Games
[23] Merge
[24] Split

[25] Micro-generators

مبنای دو نوع بازی قرار دارد : بازی مزایده (برای تعیین قیمت گذاری) و بازی غیر مشارکتی برای مشکل پوتلاک (فراهم بودن امکان دسترسی برای همه) . این تحقیق نشان می دهد که رسیدن به نقطه تعادل در گرو عملکرد منطقی تصمیم گیرندگان است و در غیر اینصورت رسیدن به به نقطه تعادل امکان پذیر نمی باشد.

فراتر از کارهای انجام شده در [۳۹] تحقیق انجام شده در [۴۰]،[۴۱] به مسایل و چالش هایی از قبیل قیمت گذاری انرژی در ریزشبکه ها، کنترل توربین های بادی و همچنین نحوه مشارکت ریز شبکه ها اشاره کرده است.

ریزشبکه‌ها – رقابتی

در سیستم های مقیاس عظیم هر عدم هماهنگی بین تقاضا و تولید انرژی به وسیله اسلک باس[۲۶] جبران می شود که در ریز شبکه ها اغلب چنین ذخیره انرژی در دسترس نیست. با این شرایط فراهم آوردن سازوکاری که امکان فعالیت توزیع شدگی را به ریزشبکه ها بدهد مورد توجه است بطوریکه اهداف، ظرفیت ها و محدودیت های هر قسمت را در نظر می گیرد. حال اگر چارچوب کلی ریزشبکه ها توسعه یابد هم رقابت بر سر منابع انرژی که بین بار ها است افزایش می یابد و هم رقابت بر سر انرژی که بین منابع است. تکنیک های مدیریتی بصورت بازی های غیر مشارکتی (رقابتی) برای کنترل بار و منابع انرژی در سیستم های برقی کوچک مقیاس مانند ریزشبکه ها در تحقیق [۲۷] بحث شده است. بدین منظور بازی های غیرمشارکتی ایستا در این زمینه مطرح شده است [۴۲]. بطور صریح مجموعه بازیکنان به دو بخش گروه بارها و گروه منابع برقی تقسیم می شود. در تحقیق [۳۴] چگونگی انتخاب استراتژی برای بارها و گروه منابع برقی شرح داده شده است. همینطور به این پرسش پاسخ داده شده است که "چگونه بار(منبع) یک استراتژی برای بهینه کردن تابع هدف است؟".

در [۴۳]،[۴۴] یک مدل عمومی قیمت گذاری معرفی کرده است. برای این منظور یک بازی غیرمشارکتی معرفی شده است که بیش از یک عرضه کننده انرژی برق در آن وجود دارد. سپس الگوریتمی معرفی شده است که عرضه کننده ای را که به نقطه نش تعادل سیستم نزدیک تر است معرفی می کند. بدین ترتیب تشکیل ائتلاف ریزشبکه ها درون شبکه مدلسازی شده است. برای این منظور یک بازی مشارکتی معرفی شده است که نشان می دهد ائتلاف ها چگونه شکل می گیرند. در [۴۵] نیز، یک بازار خرده فروشی (انرژی) به منظور خرید و فروش انرژی طراحی شده است که منجر به افزایش منافع اقتصادی گردیده است.

پروتکل‌های ارتباطی

واضح است که تمام موضوعات بیان شده درون یک شبکه هوشمند از جمله مدیریت سمت تقاضا، تعاملات بین ریزشبکه ها و ساختمان های هوشمند نیازمند شبکه ای قدرتمند، بهینه و قابل اعتماد است که بتواند زمینه لازم برای عملیات های هوشمند درون شبکه را فراهم کند. شبکه های هوشمند آتی مجموعه از تکنولوژی های ارتباطی هستند که باید به صورت موازی در کنار شبکه توزیع انرژی برق قرار گیرند. در [۴۶]، یک پروتکل ارتباطی نقطه به نقطه با استفاده از نظریه بازی‌ها معرفی شده است. استفاده از مفهوم هاب نیز می‌تواند جهت کنترل ارتباطات درون شبکه محلی و همچنین ارتباطات با شبکه اصلی به کار گرفته شود [۴۷]،[۴۸]،[۴۹]. در تحقیق [۴۷]،[۴۸] یک چارچوب محاسباتی ابری برای حجم گسترده ارتباطات بلادرنگ درون شبکه معرفی شده است. برای این منظور یک هاب جهت کنترل ارتباطات درون شبکه محلی و همچنین ارتباطات با شبکه اصلی معرفی شده است و از نظریه برای مدیریت سمت تقاضا به وسیله این هاب استفاده شده است. دراین تحقیق یک بازی مدیریت سمت تقاضا بین گروهی از هاب های انرژی هوشمند در چارچوب محاسبات ابری ارائه شده است. نتایج شبیه سازی رویکرد ارائه شده دراین مقاله در نهایت به کاهش نرخ متوسط اوج مصرف تقاضای نهایی برق و هزینه انرژی می انجامد.

در [۴۲]، عنوان شده است که پروتکل‌های ارتباطی نقطه به نقطه نیز منجر به افزایش انگیزه در مشتریان به منظور مشارکت در تبادل انرژی در شبکه هوشمند می‌شود. این ارتباط می‌تواند بین ابزارهای هوشمند نیز صورت گیرد که در نهایت کاهش نوسانات شبکه را به دنبال دارد [۴۴].

پروتکل‌های ارتباطی – امنیت

در شبکه هوشمند امروزی تعداد قابل توجهی از توابع هوشمند به منظور هوشمندسازی تامین برق ارائه، پیاده سازی وطراحی شده اند. با وجود این، توابع پیچیده درمترهای هوشمند خطرهایی را به همراه دارد که آنها را مستعد به آسیب و حمله می کند. در تحقیق [۳۹] حمله گروهی موش ها[۲۷] ارائه شده است که آسیب پذیری مترهای هوشمند را در دنیای سایبری بررسی می کند . همینطور آنها را به دلیل سودآوری مستقیم اقتصادی در دنیای واقعی انتشار می دهد. طبق این تحقیق، بطور جدی تا بحال هیچ کار سیستماتیکی در جهت رفع این مشکل انجام نشده است. نظریه بازی یک چارچوب بسیار مناسب برای تحلیل و مقابله با این حملات است و بدین منظور قابل اتخاذ است. در این کار دو مدل بازی تحت فرضیات

[26] Slack Bus

[27] Rat-group Attack

مختلف ارائه و مقایسه شده است. نتایج تحلیل ها طبق نظریه بازی بررسی شده است و درنهایت به شرکت های برق پیشنهاد می شود این سیاست ها را جهت انجام این مهم پیگیری نمایند که شامل فاش کردن پارامترهای دفاعی به تمامی کاربران (یعنی فاش نمودن مهاجمان بالقوه) و همینطور فاش کردن مقدار کمتر نتایج از دست رفته درحمله است. با توجه نوع عملکرد هکرها و شرکت های ارائه دهنده انرژی دو نوع بازی ایستا و پویا معرفی شده است که در این دو بازی شرکت دهنده ارائه دهنده انرژی تلاش می کند از هرگونه دست کاری در وسایل اندازه گیری جلوگیری کند. نتایج نشان می دهد بازی پویای معرفی شده، باعث از دست رفتن مقدار کمتر انرژی برای شرکت ارائه دهنده خواهد بود.

نتیجه گیری

در این مقاله، بررسی کاملی از مقالات در حوزه کاربردهای نظریه بازی در شبکه های هوشمند مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور کاربرد نظریه بازی در مدل‌سازی مسائل موجود در مدیریت سمت تقاضا، ریزشبکه ها، ارتباطات و امنیت مورد بررسی قرار گرفت. آنچه از این بررسی نتیجه می شود این است که نظریه بازی می تواند به عنوان ابزاری قدرتمند در شبکه های هوشمند جهت مدلسازی و بهبود کارایی این شبکه ها مورد استفاده قرار گیرد. مقالات بررسی شده نشان می دهند که تلاش ها برای ارائه تابع هزینه های کلی در شبکه های هوشمند ادامه دارد. همچنین ویژگی شبکه های بزرگی چون شبکه هوشمند برق نیاز به الگوریتم های با پیچیدگی کم را نشان می دهد. به طور خاص نیاز به الگوریتم های بهبودیافته و توزیع شده در مدیریت سمت تقاضا و تشکیل ائتلاف ریزشبکه ها همچنان حس می شود. همچنین مدل های براساس بازی های تکرارشونده می توانند در تحقیقات آتی بیش از پیش مورد بررسی قرار گیرند.

مراجع

[1] W. Saad, H. Zhu, H.V. Poor, T. Basar, "Game-Theoretic methods for the smart grid: an overview of microgrid systems, demand-side management, and smart grid communications", IEEE Signal Processing Magazine, Volume 29, Issue 5, page 86 – 105, Sept. 2012

[2] Z. Han, D. Niyato, W. Saad, T. Bas¸ar, and A. Hjørungnes, Game Theory in Wireless and Communication Networks: Theory, Models and *Applications*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, Oct. 2011.

[3] Noam, Nisan's book (2007), Algorithmic Game Theory, Non-cooperative games, page 20

[4] Noam, Nisan's book (2007), Algorithmic Game Theory, Cooperative games, page 21

[5] Noam, Nisan's book (2007), Algorithmic Game Theory, Potential games, page 494

[6] H. K. Nguyen, J.B. Song, Han Zhu, "Demand side management to reduce Peak-to-Average Ratio using game theory in smart grid", IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), page 91-96, March 2012.

[7] Marzband, M. et al. 2017. Distributed generation for economic benefit maximization through coalition formation based game theory concept. International Transactions on Electrical Energy Systems,. (2017), 1–16.

[8] A.-H. Mohsenian-Rad, V.W.S. Wong, J. Jatskevich, R. Schober, A. Leon-Garcia, "Autonomous demand-side management based on gametheoretic energy consumption scheduling for the future smart grid", IEEE Transactions on Smart Grid, Volume 1, Issue 3, Page 320 – 331, Dec. 2010.

[9] S. Dave, M. Sooriyabandara, Zhang Luyang, "Application of a gametheoretic energy management algorithm in a hybrid predictive-adaptive scenario", 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), page 1-6, Dec. 2011.

[10] Marzband, M. et al. 2016. Non-cooperative game theory based energy management systems for energy district in the retail market considering DER uncertainties. IET Generation, Transmission & Distribution,. 10, 12 (2016), 2999–3009.

[11] F.L. Meng, X.J. Zeng, "A Stackelberg game-theoretic approach to optimal real-time pricing for the smart grid", Soft Computing, Volume 17, Issue 12, pp 2365-2380, Springer, December 2013.

[12] Z. Zhu, J. Tang, S. Lambotharan, W.H. Chin, Z. Fan, "An integer linear programming and game theory based optimization for demand-side management in smart grid", GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), page 1205 – 1210, Dec. 2011.

[13] Marzband, M. et al. 2018. Smart transactive energy framework in grid-connected multiple home microgrids under independent and coalition operations. Renewable Energy. 126, (2018), 95–106.

[14] M. Swearingen, " Real time evaluation and operation of the smart grid using game theory", Rural Electric Power Conference (REPC), April 2011, B3-1 - B3-6.

[15] W. Tushar, J.A. Zhang, D.B. Smith, S. Thiebaux, H.V. Poor, "Prioritizing consumers in smart grid: Energy management using game

theory", IEEE International Conference on Communications (ICC), Budapest, page 4239 – 4243, June 2013.

[16] Makhlouf Hadji, Marc Girod-Genet, Hossam Affifi, “A game theory approach with dynamic pricing to optimize smart grid operation”, *International Journal of Smart Grid and Clean Energy,* vol. 4, no. 3, July 2015: pp. 186-198.

[17] Rui Tang, Shengwei Wang, Hangxin Li, “Game theory based interactive demand side management responding to dynamic pricing in price-based demand response of smart grids”, Applied Energy, Volume 250, 15 September 2019, Pages 118-130.

[18] Khouloud Salameh, Richard Chbeir, Haritza Camblong, “Multi-objective cooperative scheduling: An application on smart grids”, Applied Computing and Informatics, Volume 15, Issue 1, January 2019, Pages 67-79.

[19] T. Tatarenko, L. Garcia-Moreno, "A game theoretic and control theoretic approach to incentive-based demand management in smart grids", 22nd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Palermo, page 634 – 639, June 2014.

[20] Q. Zhu, T. Basar, "Multi-Resolution large population stochastic differential games and their application to demand response management in the smart grid", Dynamic Games and Applications, Volume 3, Issue 1, pp 68-88, March 2013.

[21] F.B. Saghezchi, F.B. Saghezchi, A. Nascimento, J.Rodriguez, " Game theory and pricing strategies for demand-side management in the smart grid", IEEE/IET International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP), page 883 - 887, July 2014

[22] Yunpeng Wang, W. Saad, Han Zhu, H.V. Poor, T. Basar, " A gametheoretic approach to energy trading in the smart grid", IEEE Transactions on Smart Grid, Volume 5, Issue 3, page 1439-1450, April 2014.

[23] H. K. Nguyen, J. Song, Z. Han, " Distributed demand side management with energy storage in smart grid", IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, Volume PP, Issue 99, November 2014.

[24] I. Atzeni, L.G. Ordonez, G. Scutari, D.P. Palomar, J.R. Fonollosa, "Noncooperative and cooperative optimization of distributed energy generation and storage in the demand-side of the smart grid", IEEE Transactions on Signal Processing, Volume 61, Issue 10, page 2454 – 2472, February 2013.

[25] Weidong Chen, Yu Zeng, Chongqing Xu, “Energy storage subsidy estimation for microgrid: A real option game-theoretic approach”, Applied Energy, Volume 239, 1 April 2019, Pages 373-382.

[26] Rui Tang, Hangxin Li, Shengwei Wang, “A game theory-based decentralized control strategy for power demand management of building cluster using thermal mass and energy storage”, Applied Energy, Volume 242, 15 May 2019, Pages 809-820.

[27] M.O. Spata, S. Rinaudo, F. Gennaro, "A novel matchmaking algorithm for smart grid applications", International ICE Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE), page 1-6, June 2014.

[28] L. Chen, N. Li, S. H. Low, and J. C. Doyle, “Two market models for demand response in power networks,” in *Proc. International Conference*.

[29] Tavakoli, M. et al. 2018. CVaR-based energy management scheme for optimal resilience and operational cost in commercial building microgrids. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 100, (2018), 1–9.

[30] Marzband, M. et al. 2018. Framework for smart transactive energy in home-microgrids considering coalition formation and demand side management. Sustainable Cities and Society. 40, (2018), 136–154.

[31] N. Li, L. Chen, and S. H. Low, “Optimal demand response based on utility maximization in power networks,” in *Proc. IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Detroit, MI, USA, Jul. 2011.

[32] W. Saad, Han Zhu, H.V. Poor, "Coalitional game theory for cooperative micro-grid distribution networks", Communications Workshops (ICC), page 1 – 5, June 2011.

[33] Sh Chakraborty , Sh Nakamura, T Okabe , “Real-time energy exchange strategy of optimally cooperative microgrids for scale-flexible distribution system”. Smart Energy Research Laboratories, Central Research Laboratories,NEC Corporation, Japan 2015.

[34] D. Friedman, D. P. Friedman, and J. Rust, *The Double Auction Market: Institutions, Theories, and Evidence*. Boulder, CO, USA: Westview Press, 1993

[35] Marzband, M. et al. 2017. Distributed generation for economic benefit maximization through coalition formation based game theory concept. International Transactions on Electrical Energy Systems,. (2017), 1–16.

[36] P. Huang, A. Scheller-Wolf, and K. Sycara, “Design of a multi-unit double auction e-market,” *Computational Intelligence*, vol. 18, no. 4,pp. 596–617, Feb. 2002.

[37] G. Cavraro,L. Badia, " A game theory framework for active power injection management with voltage boundary in smart grids", European Control Conference (ECC), page 2032 – 2037, July 2013.

[38] A. Belgana, B.P. Rimal, M. Maier, "Multi-objective pricing game among interconnected smart microgrids", PES General Meeting Conference & Exposition, page 1-5, July 2014.

[39] I. Maity and S. Rao, “Simulation and pricing mechanism analysis of a solar-powered

electrical microgrid," *IEEE Systems Journal*, vol. 4,no. 3, pp. 275–284, Aug. 2010.

[40] W. W. Weaver and P. T. Krein, "Game-theoretic control of small-scale power systems," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 24, no. 3, pp. 1560–1567, Jul. 2009.

[41] Z. Alibhai, W. A. Gruver, D. B. Kotak, and D. Sabaz, "Distributed coordination of micro-grids using bilateral contracts," in *Proc. IEEE* International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, The Hague, Netherlands, Oct. 2004.

[42] Chunyan Li, Wenyue Cai, Hongfei Luo, Qian Zhang, "Power utilization strategy in smart residential community using non-cooperative game considering customer satisfaction and interaction", Electric Power Systems Research, Volume 166, January 2019, Pages 178-189.

[43] Chong Huang, S. Sarkar, " Dynamic pricing for distributed generation in smart grid", IEEE Green Technologies Conference, page 422-429, April 2013.

[44] A. Sheikhi, M. Rayati, S. Bahrami, A. M. Ranjbar, S. Sattarit, "A cloud computing framework on demand side management game in smart energy hubs", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 64, Pages 1007–1016, January 2015.

[45] Ds Marzband, M. et al. 2018. An advanced retail electricity market for active distribution systems and home microgrid interoperability based on game theory. Electric Power Systems Research. 157, (2018), 187–99.

[46] Wayes Tushar, Tapan Kumar Saha, Chau Yuen, Thomas Morstyn, Malcolm D. McCulloch, H. Vincent Poor, Kristin L. Wood, "A Motivational Game-Theoretic Approach for Peer-to-Peer Energy Trading in the Smart Grid", Applied Energy, Volume 243, 1 June 2019, Pages 10-20.

[47] S. Ming, L. Jingqiang, Z. Xiaokun, X. Changwei, "A game-theory analysis of the rat-group attack in smart grids", IEEE Ninth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), Singapore, page 1-4, April 2014.

[48] E. B. Tchawou Tchuisseu, D. Gomila, P. Colet, "Reduction of power grid fluctuations by communication between smart devices", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 108, June 2019, Pages 145-152.

[49] Seyed Omid Sobhani, Siamak Sheykhha, Mohammad Reza Azimi, Reinhard Madlener, "Two-Level Distributed Demand-Side Management Using the Smart Energy Hub Concept ", Energy Procedia, Volume 158, February 2019, Pages 3052-3063.