



دانشکده مهندسی کامپیوتر

بهینه سازی فرایند تشکیل نیروگاه برق مجازی با استفاده از نظریه بازی ها

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی

در رشته مهندسی کامپیوتر - گرایش معماری سیستم های کامپیوتری

نام دانشجو:

سهیل رستگار

استاد راهنما:

دکتر ناصر مزینی

بهمن ماه ۱۳۹۸



دانشکده مهندسی کامپیوتر

بهینه سازی فرایند تشکیل نیروگاه برق مجازی با استفاده از نظریه بازی ها

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی

در رشته مهندسی کامپیوتر - گرایش معماری سیستم های کامپیوتری

نام دانشجو:

سهیل رستگار

استاد راهنما:

دکتر ناصر مزینی

بهمن ماه ۱۳۹۸

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تأییدیه هیأت داوران جلسه دفاع از پایان نامه /رساله

نام دانشکده: مهندسی کامپیوتر

نام دانشجو: ...

عنوان پایان نامه: ...

تاریخ دفاع: ... ماه ۱۳۸

رشته: مهندسی کامپیوتر

گرایش: ...

ردیف	سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبه دانشگاهی	دانشگاه یا مؤسسه	امضاء
۱	استاد راهنما			دانشگاه علم و صنعت ایران	
۲	استاد راهنما				
۳	استاد مشاور				
۴	استاد مشاور				
۵	استاد مدعو خارجی				
۶	استاد مدعو خارجی				
۷	استاد مدعو داخلی			دانشگاه علم و صنعت ایران	
۸	استاد مدعو داخلی				

تأییدیه صحت و اصالت نتایج

باسمه تعالی

اینجانب به شماره دانشجویی دانشجوی رشته،
گرایش مقطع تحصیلی تایید می‌نمایم که کلیه نتایج مندرج در این
رساله/پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظارت و راهنمایی عضو هیأت علمی دانشگاه علم و
صنعت ایران بدون هر گونه دخل و تصرف انجام گرفته و به موارد نسخه برداری شده از آثار دیگران، مطابق
مقررات و ضوابط، ارجاع داده شده و مشخصات کامل منابع را در فهرست منابع ذکر کرده‌ام. این
رساله/پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرکی ارائه نگردیده است.
در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت
از حقوق مولفان و منصفان و قانون ترجمه، تکثیر و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی و
پژوهشی، انضباطی و غیره) با اینجانب رفتار خواهد شد و حق هرگونه اعتراض در خصوص احقاق حقوق
مکتسب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن، مسئولیت هرگونه
پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده اینجانب
خواهد بود و دانشگاه هیچ گونه مسئولیتی در این خصوص نخواهد داشت.
کلیه نتایج و حقوق حاصل از این **رساله/پایان نامه** متعلق به دانشگاه علم و صنعت ایران است. هرگونه استفاده
از نتایج علمی و عملی و واگذاری اطلاعات به دیگران یا چاپ و تکثیر، نسخه برداری ترجمه و اقتباس از این
رساله/پایان نامه بدون موافقت کتبی دانشگاه علم و صنعت ایران ممنوع است. نقل مطالب با ذکر منبع بلامانع
است.

نام و نام خانوادگی:....

امضا و تاریخ:

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

- ☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه برای همگان بلامانع است.
- ☒ بهره‌برداری از این پایان‌نامه با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.
- ☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه تا تاریخ ممنوع است.

نام استاد:

تاریخ:

امضا:

چکیده

با سرعت گرفتن رشد شبکه‌های هوشمند برق، چالش‌های متعددی نیز برای استفاده از این شبکه‌ها به وجود می‌آید. با افزایش تعداد اعضای شبکه‌های هوشمند، ارائه‌ی مکانیزمی برای کنترل آن‌ها دشوارتر می‌شود. خصوصاً که تعداد زیادی از این اعضا شامل مولدهای خورشیدی و بادی و همینطور مولدهای کوچک خانگی می‌شود. این مولدها به دلیل کوچک بودن و غیرقابل اطمینان بودن از دید شبکه قابل اتکا نبوده و نمی‌توانند نقشی موثر در شبکه ایفا کنند.

نیروگاه برق مجازی مکانیزمی است که برای حل این مسائل معرفی شده است. به این ترتیب که اعضا با یافتن اعضای مکمل، تولید کلی و ضریب اطمینان تولید خود را افزایش می‌دهند و به عنوان یک مجموعه‌ی قابل اتکا از طرف شبکه نیز پشتیبانی شوند. با این کار هم ارزش سرویس‌های انرژی اعضا بیشینه می‌شود، و هم با خطای پیش بینی کمتر مجموعه، شبکه با قابلیت اطمینان بیشتری می‌تواند سرویس دهی کند. در این پایان نامه، مکانیزمی برای شکل گرفتن نیروگاه برق مجازی معرفی می‌گردد و ارتباط میان سود شبکه و مولد بررسی می‌شود.

در مکانیزم ارائه شده از نظریه‌ی بازی‌ها برای مسئله‌ی شکل گیری نیروگاه برق مجازی، به صورتی که هم اعضا هم شبکه سود کنند استفاده شده است. بدین منظور یک مکانیسم قیمت گذاری به کار برده شده که شامل پاداش برای انگیزه بخشی به اعضا جهت تشکیل نیروگاه برق مجازی است. سپس توابع و پارامترهای مختلف و تاثیر آن‌ها در فرایند شکل گرفتن نیروگاه برق مجازی و میزان سود موجودیت‌های مختلف بررسی شده است. چارچوب پیشنهادی با استفاده از زبان پایتون پیاده‌سازی شده است.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌ی هوشمند برق، نیروگاه برق مجازی، نظریه‌ی بازی‌ها، مکانیسم قیمت گذاری.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل ۱: مقدمه	۱
۱-۱- شرح مسأله.....	۲
۲-۱- انگیزه و هدف پژوهش.....	۳
۳-۱- ساختار پایاننامه.....	۴
فصل ۲: مروری بر ادبیات موضوع	۵
۱-۲- مقدمه.....	۶
۲-۲- سیستمهای چندعامله.....	۶
۱-۲-۲-۱- عامل.....	۶
۲-۲-۲- محیط.....	۷
۲-۲-۳- سیستم چندعامله.....	۷
۲-۲-۴- مزایای سیستم های چندعامله.....	۷
۲-۲-۵- موارد کاربرد سیستمهای چندعامله.....	۸
۳-۲- نظریهی بازیها.....	۹
۱-۳-۲- ارزش شیلی.....	۹
۲-۴-۲- سازمان در سیستم چندعامله.....	۹
۱-۴-۲- سلسه مراتبی.....	۱۰
۲-۴-۲- هولونی.....	۱۰
۳-۴-۲- ائتلاف.....	۱۱
۵-۲- شبکهی برق هوشمند.....	۱۱
۱-۵-۲- مدیریت تقاضا.....	۱۲
۲-۵-۲- نیروگاه برق مجازی.....	۱۳
۶-۲- نتیجه گیری.....	۱۳
فصل ۳: مروری بر کارهای مرتبط	۱۵
۱-۳- مقدمه.....	۱۶
۲-۳- مروری بر تحقیقات.....	۱۶
۱-۳-۲-۱- تحلیل جامع سیستم.....	۱۶
۲-۳-۲- پاسخ تقاضا.....	۱۷
۳-۳-۲- تولید توزیع شده.....	۱۷
۴-۳-۲- سایر موارد در شبکهی برق هوشمند.....	۱۸
۳-۳- نتیجه گیری.....	۱۹
فصل ۴: روش پیشنهادی	۲۰

۲۱	۱-۴- مقدمه
۲۱	۲-۴- روش استفاده شده
۲۱	۴-۲-۱- روش قیمتگذاری
۲۳	۴-۲-۲- پرداخت شبکه به هولونها (نیروگاه برق مجازی یا تولیدکننده انفرادی)
۲۳	۴-۲-۳- پرداختهای داخلی یک هولون
۲۴	۴-۲-۴- پیادهسازی

فصل ۵: ارزیابی روش پیشنهادی ۲۵

۲۶	۱-۵- مقدمه
۲۶	۲-۵- دادههای آزمایش
۲۶	۳-۵- نتایج
۲۹	۴-۵- نتیجه گیری

فصل ۶: جمعبندی و کارهای آینده ۳۰

۳۱	۱-۶- جمعبندی
۳۱	۲-۶- کارهای آینده

مراجع ۳۲

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۲.....	شکل (1-1) : میزان مصرف انرژی الکتریکی در طول زمان
۱۰.....	شکل (2-1) نمونه‌های از یک ساختار سلسه‌مراتبی
۱۱.....	شکل (2-2) : نمونه‌های از یک ساختار هولونی [13]
۱۲.....	شکل (۳-۲) : تفاوت‌های شبکه‌های سنتی با شبکه‌های هوشمند
۲۶.....	شکل (5-1) : میزان درآمد متوسط عاملها
.....	شکل (۲-۵) : میزان درآمد متوسط عاملها در سه شبیه‌سازی
۲۷.....	متفاوت
.....	شکل (۳-۵) : تعداد متوسط عاملها در نیروگاه مجازی، با
۲۸.....	درصدهای رضایت متفاوت
.....	شکل (۴-۵) : تغییرات خطای پیش‌بینی از دید شبکه در طول
۲۹.....	زمان

فهرست جدول‌ها

عنوان

صفحه

جدول (۱-۲) عنوان يك جدول نمونه Error! Bookmark not defined.

فصل ۱:

مقدمه

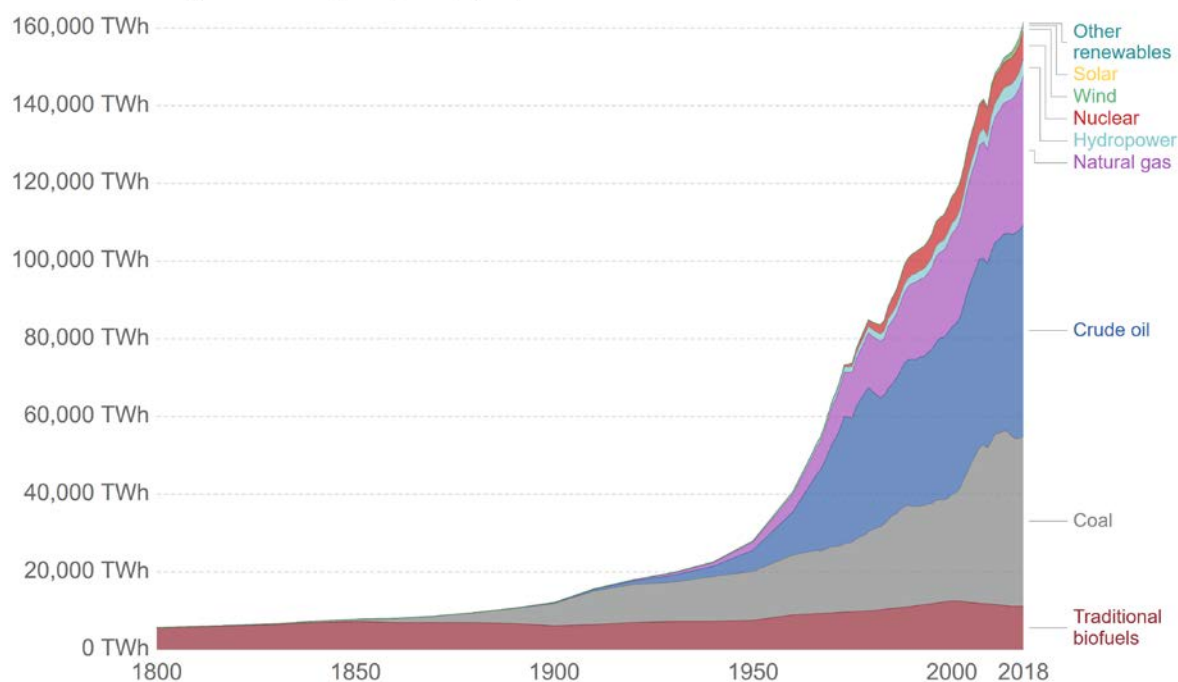
1-1- شرح مسأله

برای سالیان متمادی، سوخت‌های فسیلی به عنوان منبع اصلی تولید انرژی در نظر گرفته می‌شد. در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های متعدد و افزایش امکانات در زمینه بهره‌برداری از این نوع سوخت‌ها باعث شده که استفاده از سوخت‌های فسیلی در نگاه کوتاه مدت روشی ارزان برای تولید انرژی به نظر برسد که ظرفیت و پتانسیل بالایی نیز دارد. اما با نگاه بلند مدت، این حقیقت آشکار می‌شود که این سوخت‌ها راه حل همیشگی برای نیاز به انرژی نیستند، چراکه روند تقاضای انرژی در حال افزایش یافتن است، و این افزایش روزی از توان تولید سوخت‌های فسیلی پیشی می‌گیرد. از طرف دیگر بسیاری از منابع این نوع سوخت‌ها در حال اتمام است [1]. همین‌طور مشکلات و آثار سوء زیست محیطی سوخت‌های فسیلی را نمی‌توان نادیده گرفت. به همین منظور، نسل بعدی شبکه‌های برق برای رفع این مشکلات معرفی شدند که به عنوان راه حلی امیدوار کننده به نظر می‌رسند و در حال پیشرفت هستند [2].

Global primary energy consumption

Global primary energy consumption, measured in terawatt-hours (TWh) per year. Here 'other renewables' are renewable technologies not including solar, wind, hydropower and traditional biofuels.

Our World
in Data



Source: Vaclav Smil (2017) and BP Statistical Review of World Energy

CC BY

شکل 1-1 (: میزان مصرف انرژی الکتریکی در طول زمان

شبکه‌ی هوشمند^۱ یک شبکه‌ی برق است که زیرساختی برای اندازه‌گیری هوشمند میزان مصرف و نیاز کاربران و ارتباط دوطرفه میان تولیدکننده و مصرف‌کننده فراهم می‌کند، به صورتی که در آن مصرف‌کننده می‌تواند در تولید نیز نقش ایفا کند و همزمان هردو نقش را داشته باشد [3]. درین حالت، استفاده از منابع تولید انرژی تجدیدپذیر کوچک، میسر و همه‌گیر شده و انرژی تولید شده از این منابع می‌تواند با انرژی تولید شده از منابع تجدیدناپذیر (مانند سوخت‌های فسیلی) رقابت کند. همینطور با مدیریت اطلاعات کنترلی کسب شده از تولیدکننده‌ها و مصرف‌کننده‌ها، قابلیت اطمینان انرژی تولید شده به میزان زیادی بالا می‌رود [4].

مصرف بهینه انرژی و متعاقب آن، کاهش هزینه‌ها از اهداف اصلی شبکه‌های برق هوشمند است. پاسخ تقاضا^۲، تولید توزیع شده و ذخیره‌سازی توزیع شده را می‌توان از اجزای اصلی شبکه‌ی برق هوشمند دانست. در این شبکه‌ها از یک جریان دوطرفه‌ی اطلاعات و انرژی (به جای جریان یک طرفه انرژی در شبکه‌های کلاسیک) استفاده می‌شود تا به یک شبکه‌ی توزیع شده و هوشمند دست پیدا کنیم. بدین ترتیب، یک بازار بر اساس این تعاملات دوطرفه بوجود می‌آید. قابلیت اطمینان و کارآمدی شبکه تحت تاثیر نوسانات و غیرقابل پیش‌بینی بودن تولید و تقاضا است. به همین دلیل است که به یک سیستم برای مدیریت شبکه نیاز داریم. اما هرچه تعداد اعضای شبکه بیشتر می‌شود، مدیریت آن‌ها دشوارتر می‌گردد. برای این منظور، راه-حل‌های موجود، پیشنهاد تجمیع تولیدات اعضا و همینطور برآیندگیری از پیش‌بینی‌های تولید آن‌ها را تحت عنوان یک نیروگاه برق مجازی^۳ (VPP) می‌دهد. در این صورت، قابلیت اطمینان بیشتری نیز حاصل می‌شود. در این پایان‌نامه، مکانیزمی جهت شکل‌گیری نیروگاه‌های برق مجازی با استفاده از نظریه‌ی بازی‌ها^۴ ارائه شده است.

2-1- انگیزه و هدف پژوهش

مزایای منحصر به فردی که تشکیل نیروگاه برق مجازی در شبکه‌های هوشمند ایجاد می‌کند باعث می‌شود که به عنوان یک بخش اصلی در شبکه‌ها استفاده شود. هرچند که روش و فرایند قطعی برای تشکیل نیروگاه برق مجازی وجود ندارد و شرایط تشکیل این نیروگاه‌ها بسته به نیازها و انتظارات اعضا و شرایط شبکه متغیر است. با اینحال ارائه یک مکانیزم جامع که پارامترهای مختلفی برای تنظیم در شرایط مختلف داشته باشد

¹ Smart grid

² Demand response

³ Virtual Power Plant

⁴ Game theory

مطلوب است. در این پایان نامه سعی شده است مکانیزمی جهت شکل گیری نیروگاه‌های برق مجازی معرفی شود که خطای خالص پیش‌بینی را از دید شبکه کاهش دهد و همینطور برای تولیدکنندگان نیز سودآور باشد. پس از آن با بررسی تاثیر پارامترهای معرفی شده بر میزان رضایت شبکه و تولیدکنندگان، تعاملات و وضعیت شبکه را در شرایط مختلف بررسی می‌کنیم و برای آن پارامترهای مناسب را در نظر می‌گیریم.

3-1- ساختار پایان‌نامه

ساختار این پایان‌نامه در ادامه به شرح زیر است:

در فصل ۲ مروری بر ادبیات حاکم بر موضوع داریم و مفاهیم و اصطلاحات مورد نیاز برای تشریح روش پیشنهادی تفسیر شده‌اند.

در فصل ۳ مروری بر کارهای انجام شده در زمینه‌ی شبکه‌های هوشمند برق انجام شده است.

در فصل ۴ به شرح روش و چارچوب پیشنهادی با ذکر جزئیات پیاده‌سازی پرداخت شده است.

در فصل ۵ نتایج بدست آمده را ارزیابی و تحلیل نموده و همینطور کارایی روش پیشنهادی را بررسی کردیم.

در فصل ۶ به جمع بندی موضوع و پیشنهاداتی جهت ادامه راه این پایان‌نامه پرداخته شده است.

فصل ۲:

مروری بر ادبیات موضوع

1-2- مقدمه

در این فصل تعاریفی در مورد سیستم‌های چندعامله^۱ و انواع سازمان‌های مختلف ارائه می‌گردد و به مزایا و کاربردهای هر کدام اشاره می‌گردد. پس از در مورد شبکه‌های هوشمند و دلیل همه‌گیر شدن و چالش‌های آن خلاصه‌ای ارائه می‌گردد. در نهایت به نیروگاه‌های برق مجازی و کارهای انجام شده در مورد آن می‌پردازیم.

2-2- سیستم‌های چندعامله

یک سیستم چندعامله به سیستمی گفته می‌شود که متشکل از چند عامل هوشمند و روشی برای تعامل^۲، مذاکره^۳ و هماهنگ‌سازی^۴ رفتار این عامل‌هاست [5]. سیستم‌های چندعامله قادر به حل مسائلی هستند که برای سیستم‌های انفرادی غیرقابل حل یا دشوارند. حال به تعریف عامل به عنوان جزء سازنده‌ی این سیستم‌ها می‌پردازیم.

۱-۲-۲- عامل

تعاریف مختلفی برای عامل وجود دارد. راسل^۵ و نورویگ^۶ عامل را هر موجودیتی که از طریق حسگرهایش^۷ محیط^۸ خود را درک نموده و توسط اثرکننده‌هایش^۹ بر روی آن تاثیر می‌گذارد تعریف می‌کنند [6]. شوهام^{۱۰}، عامل را یک موجودیت نرم‌افزاری معرفی می‌کند که به صورت خودمختار^{۱۱} در یک محیط عمل می‌کند [7]. محیط مربوط به یک عامل به معنای سایر چیزهایی که اطراف آن عامل (به جز خودش) قرار داد و عامل می‌تواند با آن تعامل کند. ویژگی عامل‌ها را به طور کلی می‌توان خودمختاری و استقلال آن‌ها در تصمیم‌گیری و عملکرد دانست.

¹ Multi agent systems

² Interaction

³ Negotiation

⁴ Coordination

⁵ russel

⁶ norvig

⁷ sensors

⁸ environment

⁹ effectors

¹⁰ shoham

¹¹ autonomous

۲-۲-۲- محیط

به آن چیزی که عامل در آن قرار دارد و می‌تواند بخشی از آن را مشاهده کند و با آن تعامل کند محیط گفته می‌شود. محیط می‌تواند فیزیکی باشد مانند محیطی که یه ربات مونتاژ کننده در آن فعالیت می‌کند و می‌تواند از طریق انواع سنسورها مانند دوربین آن را مشاهده کند. و یا می‌تواند یک محیط غیر فیزیکی باشند مانند محیط سیستم عامل برای وب‌سرور که شامل تعدادی کارگر^۱ است که با فراخوانی سیستمی فعال می‌شوند. عامل می‌تواند بر حسب نیاز تغییرات مختلفی را در سیستم انجام دهد که این تغییرات نیز می‌تواند فیزیکی (حرکت و جابجایی) و یا غیر فیزیکی (ارسال پیام و ذخیره اطلاعات) باشند.

۲-۲-۳- سیستم چندعامله

یک سیستم چندعامله را می‌توان به عنوان مجموعه‌ای از عامل‌های خودمختار، هوشمند و مستقل تعریف کرد که در تعامل با یکدیگر قرار دارند [5]. برای اینکه این تعاملات با موفقیت صورت بگیرند، نیاز است که قابلیت‌های مذاکره، همکاری و هماهنگی به شکل مطلوبی وجود داشته باشند.

۲-۲-۴- مزایای سیستم‌های چندعامله

روش‌های کنترل کلاسیک که از قدیم در شبکه‌های برق استفاده می‌شود، در شبکه‌های آینده قابل استفاده نیست. چراکه شبکه‌های هوشمند آینده از تعداد بسیار زیادی تولیدکننده، مصرف‌کننده و ابزارهای اندازه‌گیری تشکیل شده‌اند که باید با وجود مقیاس بزرگ و سیستم‌های معیوب نیز به کار خود ادامه دهند. سیستم‌های چندعامله ویژگی‌های مناسبی برای ارضای محدودیت‌های موجود و پاسخ به نیازهای شبکه-هوشمند دارد [8]:

آن‌ها به محیط به صورت محلی نگاه می‌کنند و دانش محدودی دارند. دید آن‌ها می‌تواند به همسایه‌ها و تعداد محدودی عامل که ارتباط با آن‌ها لازم است محدود باشد و با این وجود فعالیتی که از آن‌ها انتظار می‌رود را انجام دهند. این ویژگی زمانی که سیستم بسیار بزرگ می‌شود ضروری است، چرا که کنترل یک سیستم بسیار بزرگ به صورت متمرکز بسیار پرهزینه است و در مقیاس-های آینده قابل دست‌یابی نیست. وقتی یک عامل هوشمند با ریزشبکه^۲ی خود تعامل می‌کند تنها به اطلاعات آن ریزشبکه نیاز دارد و داشتن اطلاعات عامل کوچک و محلی در فاصله‌ی بسیار دور برای او لازم نیست. این ویژگی باعث مقیاس‌پذیری شبکه‌ی هوشمند می‌شود.

¹ worker

² microgrid

عامل‌ها انعطاف‌پذیر، مقاوم در برابر خطا و مقیاس‌پذیرند.

یکی از ویژگی‌های مثبت سیستم‌های چندعامله این است که در صورت تغییر محیط، سیستم می‌تواند به نوعی خودش را وفق دهد که تغییر قابل توجهی در ساختار سیستم ایجاد نشود. به طور مثال با اضافه شدن یا کم شدن یک عضو جدید، سیستم خود را وفق می‌دهد و سایر اعضا با این عضو جدید شروع به تعامل می‌کنند یا رابطه‌ی خود را با عضو کم شده قطع می‌کنند. این ویژگی یک بهبود قابل توجه نسبت به سیستم‌های کلاسیک است که در آن تمام تغییرات ممکن و احتمالات باید در زمان طراحی سیستم محاسبه و اعمال شود. همین‌طور ویژگی دیگر این است که هنگامی که یکی از اجزا به طور مثال یک کانال ارتباطی یا یکی از اعضا دچار مشکل می‌شود سیستم می‌تواند خود را ترمیم کند و کار را ادامه دهد. از جنبه‌های مهم دیگر سیستم‌های چندعامله انعطاف‌پذیری در برابر اضافه کردن ویژگی‌های جدید است، که باعث کاهش زمان و هزینه‌ی طراحی مجدد سیستم می‌شود.

عامل‌ها برای حل مسائل توزیع شده مناسب هستند

برای مسائلی که پیچیدگی آن‌ها را بتوان به قسمت‌های کوچک‌تر تبدیل نمود و آن‌را بین عامل‌های مختلف توزیع کرد، سیستم‌های چند عامله به خوبی از پس حل آن‌ها برمی‌آیند. همین اتفاق در شبکه‌های هوشمند می‌افتد، به طوری که کل شبکه به ریزشبکه‌هایی تقسیم می‌شود که هرکدام اجزای لازم از قبیل مصرف‌کننده، تولیدکننده و تجهیزات ذخیره‌سازی را داشته باشند. به این ترتیب کنترل شبکه غیرمتمرکز می‌شود و مشکل کنترل دشوار و پرهزینه‌ی شبکه‌ی متمرکز حل می‌شود.

علاوه بر این ویژگی‌ها سیستم‌های چندعامله مزایای دیگری نیز دارند. برای مثال معماری سیستم چند-عامله به تکنولوژی خاصی وابسته نیست و مادامی که از پروتکل‌های ارتباطی تعریف شده پشتیبانی گردد، هرعاملی با هر معماری که باشد و هر زبان برنامه‌نویسی که نوشته شده باشد می‌تواند به شبکه اضافه شود.

۵-۲-۲- موارد کاربرد سیستم‌های چندعامله

لزومی ندارد که در همه‌ی مسائل از سیستم‌های چندعامله استفاده شود و اکثر اوقات راه‌حل‌های ساده‌تر می‌تواند جایگزین گردد. به همین دلیل در این قسمت به ویژگی‌هایی که استفاده از سیستم‌های چندعامله را موجه می‌کند اشاره می‌کنیم [5]:

- محیط‌هایی که تغییرات در آن‌ها سریع اتفاق می‌افتد.
- محیط‌هایی که غیرقطعی و پیچیده اند.
- فضاهای که به طور طبیعی شامل عواملی باشند که باهم همکاری یا رقابت می‌کنند.
- موازی‌سازی و انجام محاسبات به صورت غیرهمزمان ممکن باشد.

3-2- نظریه‌ی بازی‌ها

نظریه‌ی بازی‌ها در واقع بیان فرایندهای رقابت و همکاری میان تصمیم‌گیرنده‌های منطقی هوشمند^۱ در قالب ریاضیات است. از نظریه‌ی بازی‌ها در علوم مختلفی مانند اقتصاد، سیاست، منطق، زیست‌شناسی، روانشناسی و علوم کامپیوتر استفاده می‌شود.

نظریه‌ی بازی‌ها در ابتدا برای بازی‌های مجموع-صفر^۲ معرفی شد اما امروزه در تحلیل بسیاری از فرایندهای رفتاری و همکاری‌ها و رقابت‌ها استفاده می‌شود.

شاخه از نظریه‌ی بازی‌ها به بررسی نحوه شکل‌گیری ائتلاف‌ها^۳ می‌پردازد که در این پایان‌نامه از آن استفاده شده و در فصل‌های بعد به ذکر جزئیات آن پرداخته می‌شود. یک ائتلاف زمانی شکل می‌گیرد که گروهی از عامل‌ها قصد همکاری جهت رسیدن به هدف مشترک را داشته باشند. تشکیل این ائتلاف‌ها در زمینه‌های گوناگونی از قبیل اقتصاد، سیاست و تحلیل رفتارهای اجتماعی کاربرد دارد [9].

۱-۳-۲- ارزش شپلی^۴

یکی از اهداف مهم در بازی‌های همکارانه تخصیص سود به صورت عادلانه بین اعضای سازمان یا ائتلاف است. ارزش شپلی برای محاسبه‌ی سود اختصاص یافته به هر عضو استفاده می‌شود.

4-2- سازمان در سیستم چندعامله

زمانی که تعداد عامل‌های یک سیستم چندعامله زیاد شود، مدیریت آن‌ها به صورت کلاسیک بسیار دشوار خواهد بود، زیرا تعداد روابط موجود و پیچیدگی آن‌ها با افزایش عامل‌ها به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. برای این منظور پیشنهاد می‌شود که از سازمان –مانند سازمان‌های جامعه‌ی انسانی– استفاده شود.

سازمان در یک سیستم چندعامله، عبارت است از مجموعه‌ای از نقش‌ها و الگوهای برقراری ارتباط که طریقه‌ی رفتار عامل‌ها را کنترل می‌کند. مانند سازمان‌های انسانی که روش تعامل بین اعضای مختلف را مشخص می‌کنند. به طور کلی نشان داده شده است که هیچ نوع سازمانی نیست که به تنهایی برای همه‌ی مسائل و شرایط مناسب باشد [10].

البته سازمان اشکالاتی هم دارد. برای مثال بار محاسباتی و ارتباطی را تا حدی بالا می‌برند، انعطاف‌پذیری

¹ Intelligent rational decision makers

² Zero-sum

³ coalition

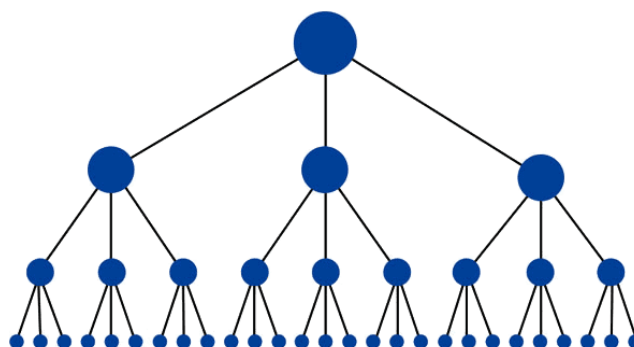
⁴ Shapley value

یا واکنش‌پذیری سیستم را کاهش می‌دهند و همین‌طور پیچیدگی سیستم را به دلیل افزودن لایه‌های اضافی افزایش می‌دهند [11].

سازمان‌های مختلفی برای سیستم‌های چندعامله تعریف شده‌اند. برای مثال سلسله مراتبی^۱، هولونی^۲، ائتلاف^۳ که در ادامه آن‌ها را توضیح می‌دهیم.

۱-۴-۲- سلسله مراتبی

سازمان سلسله مراتبی را می‌توان جزو اولین سازمان‌هایی دانست که برای سیستم‌های چندعامله به کار گرفته شده است. عامل‌ها در یک ساختار درختی همانند شکل قرار می‌گیرند و تعامل فقط میان عامل‌هایی صورت می‌گیرد که در ساختاری درختی مجاور هستند [12]. معمولاً عامل‌های سطح پایین اطلاعاتی به عامل‌های سطح بالاتر ارسال می‌کنند و عامل‌های سطح بالاتر دید کلی‌تری دارند. فرمان‌های کنترلی نیز از عامل‌های سطح بالاتر به عامل‌های سطح پایین‌تر ارسال می‌شود.



شکل 1-2 (نمونه‌ای از یک ساختار سلسله‌مراتبی)

۲-۴-۲- هولونی

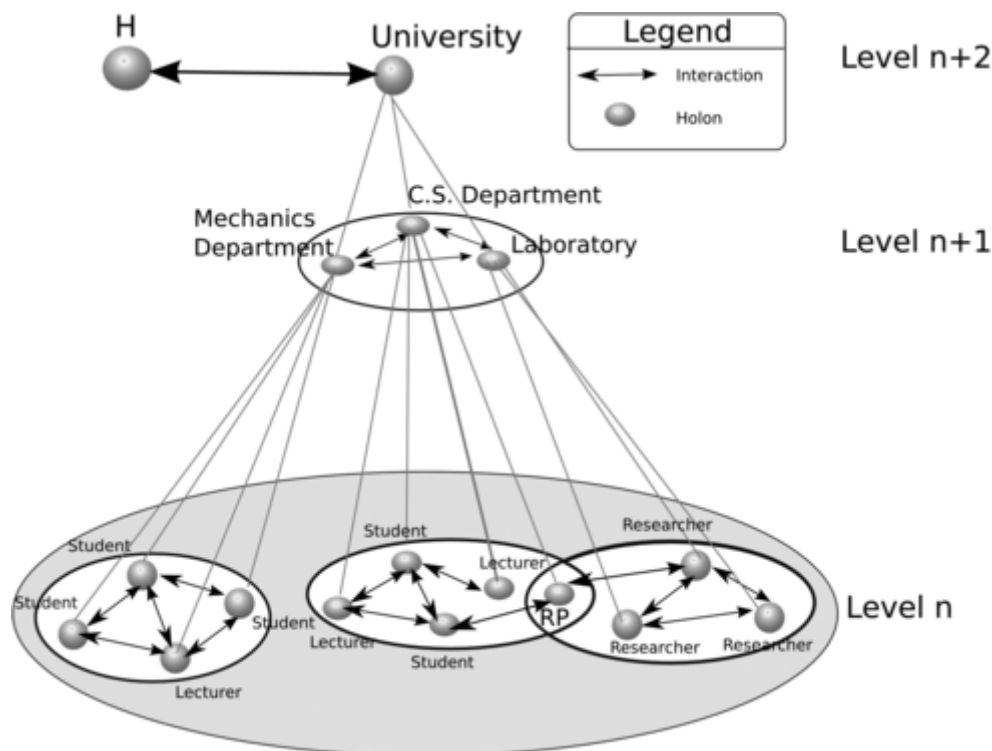
سازمان هولونی مشابه سلسله مراتبی است با این تفاوت که واحدهای سازمانی آن به جای عامل، هولون است. این سازمان علاوه بر خواص سلسله مراتبی، خاصیت هولونی نیز دارد.

هر هولون به طور همزمان هم به عنوان موجودیت مجزا و هم بخشی از یک موجودیت بزرگتر در نظر گرفته می‌شود. نمونه‌ای از سازمان هولونی در شکل قابل مشاهده است.

¹ Hierarchical

² Holarchical

³ Coalition



شکل 2-2 (نمونه‌ای از یک ساختار هولونی [13])

مشخصه‌ی اصلی این نوع سازمان‌ها، هولون‌های نیمه خودمختار است و هر هولون بخشی از خودمختاری خود را به هولون‌های سطح بالاتر واگذار می‌کند.

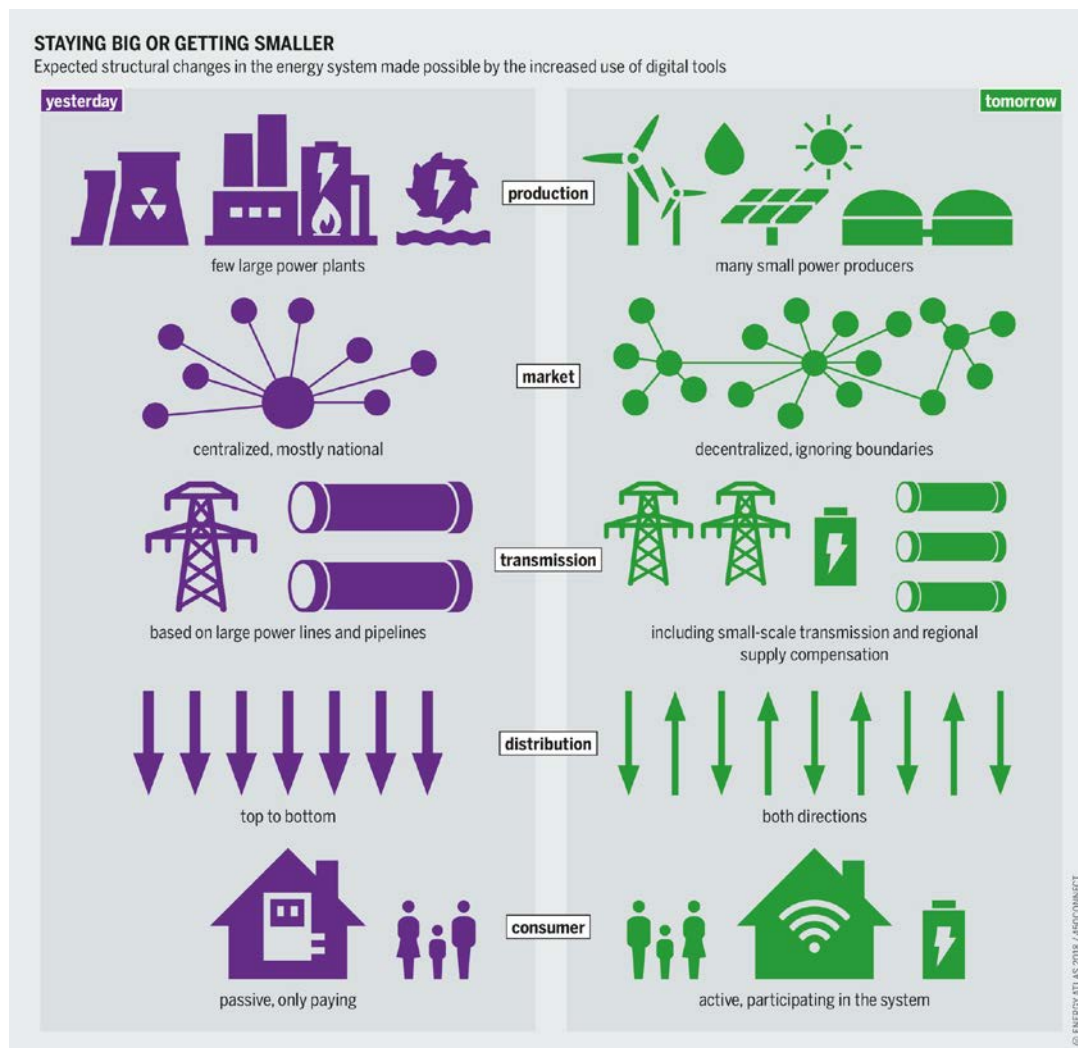
۳-۴-۲- ائتلاف

مفهوم ائتلاف در نظریه‌ی بازی‌ها مطرح شده است و در زمینه‌های گوناگون مانند اقتصاد، سیاست و همین‌طور سیستم‌های چندعامله کاربرد دارد. ائتلاف می‌تواند هر زیرمجموعه‌ای از مجموعه‌ی عامل‌ها باشد. ائتلاف‌ها به صورت کوتاه مدت برای برآورده کردن هدفی خاص تشکیل می‌شوند و می‌توانند پس از آن منحل شوند. ساختار ائتلاف به صورت مسطح است، البته یکی از اعضا می‌تواند نقش نماینده‌ی ائتلاف را داشته باشد و عملیات مذاکره را انجام دهد [13].

5-2- شبکه‌ی برق هوشمند

به شبکه‌ای از خطوط انتقال، ایستگاه‌ها، مبدل‌ها و سایر اجزا که برق را از نیروگاه‌ها به مصرف‌کننده‌ها می‌رساند شبکه‌ی برق می‌گویند. در دهه‌های اخیر تکنولوژی رابطه‌ی اجزای شبکه را به صورت دوطرفه کرده است، همین‌طور فرایندهای اندازه‌گیری و کنترل دیجیتال باعث بهبود عملکرد شبکه شده است. به این شبکه‌ی

بهبود یافته شبکه‌ی برق هوشمند گفته می‌شود.



شکل (2-3): تفاوت‌های شبکه‌های سنتی با شبکه‌های هوشمند

عوامل متعددی باید برای طراحی این شبکه‌ها در نظر گرفته شود تا عملکرد کارآمدی داشته باشند. در ادامه بخش‌های مختلف این شبکه‌ها را معرفی می‌کنیم.

۲-۵-۲- مدیریت تقاضا

برقراری تعادل میان عرضه و تقاضا از اصلی‌ترین نیازهای شبکه برق است. در شبکه‌های سنتی این نیاز با تغییرات لحظه‌ای در عرضه در راستای تطابق با تقاضا صورت می‌گیرد. هرچند که طبق تحقیقات انجام شده، تقاضا باید بیشتر خود را با شرایط عرضه هماهنگ کند [14]. در این صورت، حجم تقاضا در ساعات اوج مصرف کاهش می‌یابد که این خود فواید مختلفی دارد. برای مثال نیاز به تجهیزات پرهزینه‌ای که تنها در ساعات اوج مصرف کاربرد دارند از بین می‌رود، اگر ظرفیت تولید انرژی محدود شود با مدیریت تقاضا می‌-

توان از به وجود آمدن سربار جلوگیری کرد و همینطور در هنگام پیش آمدن خرابی، با کنترل تقاضا می توان به ترمیم سریعتر شبکه کمک کرد.

در شبکه هایی که از انرژی های تجدیدپذیر استفاده می کنند، نیاز به مدیریت تقاضا دوجندان می شود. چرا که درین شبکه ها، در بازه هایی ممکن است که تولید کافی نباشد (برای مثال شب ها در شبکه هایی که از انرژی خورشیدی استفاده می کنند). همینطور در بازه هایی نیز تولید به اندازه کافی انجام می شود و تقاضا باید افزایش یابد تا به خوبی ازین انرژی استفاده شود.

۳-۵-۲- نیروگاه برق مجازی

یکی از مشکلاتی که در شبکه های برق مجازی خود را نشان می دهد، وجود تعداد بسیار زیاد تولیدکنندگانی است که اکثرا ظرفیت کمی برای تولید دارند و بیشتر خانگی هستند. این تولیدکنندگان کوچک از دید شبکه نمی تواند قابل اتکا باشد، چون هم ظرفیت کم باعث می شود در محاسبه و ارزیابی منابع شبکه در نظر گرفته نشوند، هم ظریب اطمینان پایین تولید مانعی برای پاسخ تقاضای شبکه به صورت قابل اطمینان است. از طرف دیگر، بعضی ازین تولیدکنندگان در ساعاتی تولید مناسب دارند، و برخی دیگر در ساعاتی دیگر که اگر کنار هم کار کنند باعث تولید یکنواخت تر و قابل اطمینان تر می شود (حتی دستگاه های قابل شارژ مانند وسایل نقلیه الکتریکی نیز می توانند به نوعی تولید کننده در نظر گرفته شوند، به این نحو که در زمان تقاضا، با تزریق شارژ خود در شبکه، کارایی شبکه را بهبود دهند). از این رو، این تولیدکنندگان کوچک در کنار هم جمع می شوند و با تشکیل یک نیروگاه برق مجازی، واحدی به وجود می آورند که ظرفیت قابل توجه تولید و همینطور ظریب اطمینان بالا دارد.

۶-۲- نتیجه گیری

برای رسیدن به جهانی سبز، نمی توان تنها به سوخت های کربنی اکتفا کرد و اگر بخواهیم اتکای خود به سوخت های کربنی از بین ببریم، نیاز به مدیریت عرضه و تقاضا، افزایش ضریب اطمینان تولید و استفاده از منابع تجدید پذیر وجود دارد. ارضای این نیازها احتیاج به بازنگری و طراحی جدید شبکه های برق دارد و شبکه های برق هوشمند پاسخی برای این نیازها هستند.

استفاده از شبکه های برق هوشمند با نگاه به اجزای شبکه به صورت عامل هایی هوشمند امکان پذیر است، زیرا که نگاه سنتی به شبکه که در آن تمامی محاسبات و توزیع به صورت متمرکز انجام می شود، با افزایش بسیار زیاد اعضا ممکن نیست. استفاده از عامل های هوشمند هرچند که محدودیت های موجود را حل

می‌کند و مزایای زیادی دارد، اما در عین حال چالش‌هایی نیز دارد که باید حل شوند. در نهایت، باید یادآوری کرد که مسائلی که در زمینه شبکه‌های برق هوشمند مطرح می‌شود، قابل تعمیم به حوزه‌های دیگر مانند توزیع آب و گاز، حمل و نقل و شبکه‌های ارتباطی که تعداد زیادی از موجودیت‌های مستقل باهم تعامل دارند، است و با حل این مسائل می‌توان تکنولوژی دست یافته را به سایر حوزه‌ها نیز منتقل کرد.

فصل ۳:

مروری بر کارهای مرتبط

1-3- مقدمه

در این فصل مروری خواهیم داشت بر کارهای انجام شده در زمینه‌ی شبکه‌های برق هوشمند.

2-3- مروری بر تحقیقات

۱-۲-۳- تحلیل جامع^۱ سیستم

ابتدا مطالعاتی را بررسی می‌کنیم که به طور جامع به شبکه‌های برق هوشمند پرداخته‌اند.

[15] برای بازارهای برقی که به صورت غیرمتمرکز عمل می‌کنند، رویکردی چندعامله پیشنهاد کرده است. هدف از این تحقیق، بازسازی صنعت عرضه‌ی انرژی الکتریکی به صورتی است که علاوه بر غیرمتمرکز سازی، نگاه بازاری بر آن حاکم باشد. طراحی این مدل به کمک شبیه‌ساز سیستم چندعامله‌ی بازار برق^۲ انجام شده است. در این طراحی، دو مدل عامل پایه^۳ و عامل ترکیبی^۴ در نظر گرفته شده است که دومی در واقع ترکیب تعداد از عامل‌های پایه است. عامل پایه می‌تواند یک مصرف‌کننده، تولیدکننده، اپراتور سیستم انتقال، توزیع‌کننده، عمده‌فروش، خرده‌فروش یا یک تنظیم‌کننده باشد.

[16] و [17] برای بررسی چالش‌های شبکه‌ی توزیع برق هنگام وقوع نوساناتی که در سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر توزیع شده به وجود می‌آیند، یک سیستم چندعامله ارائه داده‌اند. مدل‌های شبیه‌سازی مبتنی عامل، قابلیت مدل‌سازی سری‌های زمانی تقاضا و تولید برق، شبکه‌های توزیع و تولید را دارند. در [17]، مدل ذکر شده جهت تولید بار به صورت مستقیم و همچنین تولید انواع عامل استفاده شده است. طبق آنچه نویسندگان بیان کرده‌اند، نتایج حاصل از سیستم‌های چندعامله می‌تواند توسط اپراتورهای شبکه‌ی هوشمند در حین فرایند برنامه‌ریزی اکتشافی^۵ مورد استفاده قرار گیرد. جزئیاتی در مورد فرضیات رفتاری عامل‌ها داده نشده است.

[18] یک ابزار جهت مدل‌سازی سیستم برق منعطف ارائه می‌کند، که با استفاده از عامل‌های هوشمند، برای شبیه‌سازی مفاهیم شبکه‌ی برق هوشمند نظیر پاسخ تقاضا، ذخیره‌سازی انرژی، بازارهای خرد، وسایل نقلیه‌ی الکتریکی و سیستم‌های خودکار جدید استفاده کرده است.

¹ holistic

² Electricity Market Multi-Agent System

³ Atomic agent

⁴ Synthetic agent

⁵ Investment planning process

۲-۲-۳- پاسخ تقاضا

پاسخ تقاضا، تولید توزیع شده^۱ و ذخیره سازی انرژی توزیع شده^۲ از ارکان مهم شبکه ی برق توزیع شده ی جدید هستند [19].

[20] بررسی می کند که چگونه پاسخ تقاضا بر اساس قیمت^۳ می تواند کارایی و قابلیت اطمینان سیستم های برق را بهبود ببخشد. پاسخ تقاضا در مدل ارائه شده، برای ساختمان های تجاری فراهم شده که سهم به سزایی در مجموع مصرف نهایی برق^۴ در ایالات متحده دارند.

نویسندگان به جای آنکه یک میزان ثابت بار را برای ساختمان ها در نظر بگیرند، یک روش جدید برای یکپارچه کردن ساختمان های تجاری در قالب عامل های خودمختار و تعاملی در یک چارچوب شبیه سازی ارائه کرده اند. انواع مختلفی از ساختمان ها در شبیه سازی در نظر گرفته شده اند. به جهت بررسی آثار پاسخ تقاضای این ساختمان ها، یک مدل برای بازار برق معرفی شده است که اجزای آن، شرکت های تولید کننده، موجودیت های سرویس دهنده ی بار، ساختمان های تجاری و یک سیستم اپراتور مستقل هستند.

بر اساس شبکه ی انتقال فیزیکی، اپراتور مستقل متوجه قیمت نهایی می شود. شرکت های تولید کننده می توانند از قدرت بازار استفاده کرده و هزینه های نهایی خود را تنظیم کنند. رفتار ارسال پیشنهادات استراتژیک^۵ با استفاده از الگوریتم یادگیری تقویتی روث-ارو^۶ مدل شده است.

جمع آورندگان ساختمان های تجاری^۷، بار را از تمام ساختمان های عضو جمع کرده و میزان انرژی الکتریکی مورد نیاز را محاسبه می کنند. از قیمت واحد انرژی از حدی فراتر رفت، این جمع آورندگان می کوشند با کنترل تقاضا و کاهش بار الکتریکی واکنش نشان دهند (برای مثال با خاموش کردن وسایل خاص). چگونگی تاثیرگذاری پاسخ تقاضا بر قیمت برق در سطوح مختلف رقابتی بررسی شده است.

۳-۲-۳- تولید توزیع شده

ساختار تازه ظهور تولید توزیع شده در کارهای زیر بررسی شده است.

[21] بر چگونگی شکل گیری نیروگاه های برق مجازی، و نحوه عملکرد آن ها در شبکه ی برق تمرکز کرده

¹ Distributed Generation (DG)

² Distributed energy storage (DES)

³ Priced-based demand response

⁴ Total end-use electricity

⁵ Strategic bidding behavior

⁶ Roth-Erev

⁷ Commercial building aggregators

است. بدین منظور، نیروگاه‌های برق مجازی در یک مدل بر پایه‌ی عامل معرفی و با استفاده از داده‌های بدست آمده از بازار برق جزیره‌ی ایبری آزمایش شده‌اند.

تحلیلات بر اساس مدل شبیه‌ساز بر پایه عامل MASCEM^۱ ارائه شده‌اند. این شبیه‌ساز شامل چندین نوع بازار، از جمله بازارهای حوضچه‌ای^۲، قراردادهای دوطرفه^۳، بازارهای تعدیل^۴ و بازارهای رو به جلو^۵ می‌شود و همچنین ارائه از شبکه‌ی انتقال را درون خود دارد.

نیروگاه‌های برق مجازی، انرژی را بر اساس قرارداد های بسته شده می‌فروشند. هدف بشینه کردن سود با تنظیم تولید و با فراهم کردن ظرفیت ذخیره‌سازی است. در این مدل، الگوریتم‌هایی جهت شکل‌دهی و مدیریت نیروگاه‌های مجازی نیز ارائه و آزمایش شده است. از دید پیاده سازی هر نیروگاه برق مجازی به عنوان یک سیستم چندعامله مستقل به حساب می‌آید.

۴-۲-۳- سایر موارد در شبکه‌ی برق هوشمند

سایر مواردی که در شبکه‌های برق هوشمند دخیل هستند و کارهای مرتبط با آن‌ها را در این قسمت بررسی می‌کنیم.

[22] به بررسی انواع مختلف مصرف‌کنندگانی که در یک شبکه‌ی برق هوشمند وجود دارند و همینطور تعامل آن‌ها با همسایگان‌شان پرداخته است. در مدل شبیه‌سازی شده، یک مصرف‌کننده می‌تواند از میان انرژی تولید شده‌ی محلی، مصرف انرژی ذخیره شده در باتری، شارژ انرژی در باتری، کاهش بار و یا تبادل انرژی انتخاب کند. نتایج نشان می‌دهد که مصرف‌کنندگان می‌توانند هزینه‌های برق مصرفی خود را با تنظیم الگوی تقاضای خود کاهش دهند.

[23] در این مقاله از سه الگوریتم مختلف برای پیش‌بینی تقاضا در محیط شبکه‌های هوشمند برق استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک^۶، الگوریتم بهینه‌سازی توده‌ی ذرات^۷ و الگوریتم کرم شبتاب^۸. کارایی و میزان بازدهی الگوریتم‌های مختلف استفاده شده، با استفاده از داده‌های بازار الکتریکی ISO-NE آموزش داده شده و همینطور مورد ارزیابی قرار گرفته است.

¹ Multi agent Simulation of Competitive Electricity Markets

² Pool markets

³ Bilateral contracts

⁴ Balancing markets

⁵ Forward markets

⁶ Genetic Algorithm

⁷ Particle Swarm Optimization

⁸ Firefly Algorithm

[24] به بررسی موارد امنیتی لازم در شبکه‌های برق هوشمند پرداخته‌اند. در این مقاله یک روش برای برقراری امنیت سایبری شبکه‌ی برق هوشمند براساس نظریه‌ی تعامل انسان و اتوماسیون^۱ و به خصوص مفهوم استقلال تطبیقی^۲ ارائه می‌دهد.

3-3- نتیجه‌گیری

در این فصل به بررسی کارهای انجام شده در زمینه‌ی شبکه‌های برق هوشمند پرداخته شد. با وجود دستاوردهایی که این تحقیقات داشته‌اند، هنوز راه زیادی برای پیاده‌سازی شبکه‌های برق هوشمند به طور عملی و جایگزینی کامل آن‌ها با شبکه‌های سنتی به طوری که به اهداف تعریف شده دست‌یابند، در پیش است. گستردگی موضوعاتی که برای حل چالش‌های شبکه‌های هوشمند برق نیازمند تحقیق و توسعه هستند نیز نشان‌دهنده‌ی همین امر است.

در تحقیقات انجام شده به صورت محدود به تاثیرات شکل‌گیری نیروگاه برق مجازی پرداخته شده است. برای مثال تاثیر تشکیل نیروگاه مجازی بر کاهش خطای پیش‌بینی بررسی نشده است و همچنین به طور همزمان مزایای تشکیل نیروگاه مجازی از دید شبکه و تولیدکننده بررسی نشده است.

¹ Human Automation Interaction (HAI)

² Adaptive Autonomy (AA)

فصل ۴:

روش پیشنهادی

1-4- مقدمه

در این بخش به توضیح روش پیشنهادی و طریقه‌ی پیاده‌سازی آن می‌پردازیم. ابتدا نیاز به یک ساختار مناسب برای شکل‌گیری نیروگاه‌های مجازی داریم. آقای روبو و همکارانش [25] برای پیاده‌سازی نیروگاه-مجازی ساختاری مسطح ارائه کرده‌اند. اگرچه این ساختار بر روی داده‌های موجود به خوبی عملکرد داشته، اما به دلیل اینکه تمامی اعضا برای تشکیل نیروگاه وارد مذاکره می‌شوند، با بالارفتن وسعت شبکه، اعضا باید هزینه‌ی محاسباتی و زمانی زیادی بپردازند. این امر خود باعث کاهش درآمد می‌شود، چراکه هرچقدر اعضا بتوانند سریعتر خود را با نیازهای شبکه وفق دهند و به پایداری برسند، درآمد بیشتری نصیب آن‌ها خواهد شد. برای حل این مشکل خانم پورشجاعی [26] استفاده از ساختار سلسله‌مراتبی هولونی را پیشنهاد کرده‌اند که در آن هر هولون یک رئیس دارد و مذاکرات در سطح رئیس‌های هولون‌ها انجام می‌شود که با این کار از اتلاف وقت و هزینه‌ای که در ساختار مسطح وجود دارد جلوگیری می‌شود. در این پایان‌نامه ما از ساختار هولونی استفاده کرده‌ایم.

2-4- روش استفاده شده

جهت تعریف یک ساختار برای به‌وجود آمدن نیروگاه‌های مجازی، چند بخش باید در نظر گرفته شود. اول یک روش قیمت‌گذاری است که انگیزه‌ی تشکیل نیروگاه مجازی را در اعضا ایجاد کند. این روش باید به گونه‌ای باشد که هرچقدر نیروگاه‌ها اهداف تعریف شده را بهتر برآورده کردند، پاداش بیشتری بگیرند. بخش بعدی که باید طراحی در نظر گرفته شود، یک ساختار برای مذاکره‌ی اعضا و به‌وجود آمدن هولون-هاست که در واقع در نقش نیروگاه مجازی هستند.

1-2-4- روش قیمت‌گذاری

در ساختار قیمت‌گذاری که پیاده شده است، سه اصل در نظر گرفته شده. اول اینکه هرچقدر تولید نیروگاه مجازی بیشتر باشد، پاداش بیشتری به ازای هر واحد از انرژی پرداخت می‌شود. این اصل باعث می‌شود که تولیدکننده‌ها به سمت همکاری جهت تولید تجمیعی بیشتر جلب شوند و نیروگاه مجازی تشکیل دهند. دوم این است که هرچقدر دقت پیش‌بینی تولید کننده بیشتر باشد و میزان تولید خود را دقیق‌تر پیش‌بینی کند، پاداش بیشتری دریافت خواهد کرد. اصل سوم نیز به میزان قابل اطمینان بودن پیش‌بینی‌های تولید-کننده با توجه به پیش‌بینی‌های قبلی که انجام گرفته است توجه می‌کند.

برای تابع امتیازدهی به پیشنهاد [25] و [28] از امتیاز احتمال رتبه‌بندی شده پیوسته (CRPS) استفاده

شده که برای اولین بار توسط ماتسون و وینکلر در سال ۱۹۷۶ معرفی شد. این تابع، یک تابع امتیازدهی است که برای متغیرهای پیوسته استفاده می‌شود.

$$CRPS(F, x) = - \int_{-\infty}^{\infty} (F(y) - 1\{y \geq x\})^2 dy \quad (۱-۴)$$

که در آن F توزیع احتمال گزارش شده برای متغیر تصادفی و x یک نمونه‌ی ثبت شده از آن متغیر تصادفی است. خاصیت این تابع امتیازدهی این است که جهت ماکزیمم کردن پاداش، توزیع احتمال باید یک توزیع نرمال با واریانس صفر باشد (به این معنا که سابقه‌ی پیش‌بینی‌های انجام شده کاملاً بدون خطا باشد) و همین‌طور این توزیع به درستی و دقیق گزارش شده باشد (اگر تولیدکننده توزیع را از قصد غیرواقعی گزارش دهد حتماً مقداری از پاداش خود را از دست می‌دهد). متغیر تصادفی مشاهده شده نیز باید نزدیک صفر باشد به این معنا که خطای پیش‌بینی بسیار ناچیز یا صفر باشد.

اما در کاربرد ما تعدادی مشاهده از این متغیر تصادفی ثبت شده است و حال گسسته دارد. جهت تخمین تابع امتیاز می‌توان از رابطه‌ی زیر استفاده کرد.

(۲-۴)

$$\begin{aligned} CRPS(E_i, x) = & - \sum_{k=1}^{pos(x)-2} (e_{i,k+1} - e_{i,k}) \left(\frac{k}{N}\right)^2 \\ & - (x - e_{i,pos(x)-1}) \left(\frac{pos(x)}{N}\right)^2 \\ & - (e_{i,pos(x)} - x) \left(1 - \frac{pos(x)}{N}\right)^2 \\ & - \sum_{k=pos(x)}^{N-1} (e_{i,k+1} - e_{i,k}) \left(1 - \frac{k}{N}\right)^2 \end{aligned}$$

که در آن E_i بردار خطاهای نسبی پیش‌بینی دوره‌های قبل عامل است که براساس اندازه عوامل مرتب شده (ترتیب زمانی ندارد). x خطای دوره‌ی جاری است. $pos(x)$ اندیس خطای جاری در صورت اضافه شدن به بردار E_i با حفظ ترتیب اندازه است. N تعداد پیش‌بینی‌های انجام شده و طول بردار E_i است. $e_{i,k}$ میزان خطای نسبی پیش‌بینی در دوره‌ی k است که در معادله‌ی (۳-۴) نحوه‌ی محاسبه‌ی آن مشخص شده است.

$$e_{i,k} = \frac{prod_{i,k} - \widetilde{prod_{i,k}}}{\widetilde{prod_{i,k}}} \quad (3-4)$$

برای تبدیل امتیاز CRPS به ضریبی بین صفر و یک، از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود و درنهایت این ضریب در محاسبه‌ی پاداش استفاده می‌شود.

$$\varphi(E_i, e_{i,t}) = \frac{1}{1 - CRPS(E_i, e_{i,t})} \quad (4-4)$$

۲-۲-۴- پرداخت شبکه به هولون‌ها (نیروگاه برق مجازی یا تولیدکننده انفرادی)

میزان پرداخت از شبکه به هولون‌ها که در واقع همان نیروگاه‌های برق مجازی یا تولیدکنندگانی هستند که به صورت انفرادی بدون تشکیل نیروگاه مجازی با شبکه به تبادل می‌پردازند از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$\pi_t^{G,i} = prod_{i,t} * \pi_B * \varphi_{i,t} * \log(prod_{i,t}) \quad (5-4)$$

تابع فوق از چهار بخش تشکیل شده است. $prod_{i,t}$ که میزان تولید هولون است. π_B که قیمت پایه‌ی هر واحد انرژی است. ضریب $\varphi_{i,t}$ که توسط تابع CRPS تعیین می‌شود و مقداری بین ۰ و ۱ دارد و انگیزه‌ی لازم را جهت پیش‌بینی هرچه دقیق‌تر تولید توسط تولیدکنندگان ایجاد می‌کند. $\log(prod_{i,t})$ نیز ضریبی است که جهت افزایش قیمت واحد انرژی با افزایش تولید به کار می‌رود و این انگیزه را در تولیدکنندگان کوچک ایجاد می‌کند که با تشکیل نیروگاه مجازی و تحویل مقادیر بیشتر انرژی به شبکه، درآمد بیشتری به ازای هرواحد از انرژی خود دریافت کنند.

۳-۲-۴- پرداخت‌های داخلی یک هولون

اگر مجموعه‌ای از تولیدکنندگان تحت عنوان یک هولون (نیروگاه مجازی) به یکدیگر بپیوندند، این هولون مقادیر انرژی تولید شده و پیش‌بینی‌های انجام شده را جمع‌آوری کرده و به شبکه ارائه می‌دهد. سپس درآمد دریافتی را توسط فرمول زیر بین اعضا توزیع می‌کند.

$$\pi_t^{H,i} = \frac{prod_{i,t} * \varphi_{i,t}}{prod_{i,t} + \sum_{j \neq i} prod_{j,t} * \varphi_{j,t}} \pi_t^{G,H} \quad (6-4)$$

در این معادله، هر عضو به میزان کمکی که به فروش کرده است، از مبلغ دریافت شده‌ی نهایی سهم دریافت می‌کند.

۴-۲-۴- پیاده‌سازی

در این پایان‌نامه شبیه‌سازی شبکه‌ی برق هوشمند توسط زبان پایتون انجام شده است. دو کلاس مختلف Grid (شبکه) و Agent (عامل) وجود دارد. در ابتدا توسط داده‌های موجود، عامل‌های مختلفی که هر کدام نماینده‌ی تولیدکننده‌ای هستند ایجاد می‌شوند. این عامل‌ها هر کدام به عنوان رئیس یک هولون تک‌نفره به شبکه‌ی هوشمند داده می‌شوند. در هر مرحله پرداخت توسط شبکه به رئیس‌های هولون‌ها با توجه به تولید و پیش‌بینی‌های آن‌ها انجام می‌شود. سپس رئیس هر هولون مبلغ دریافتی را با توجه به نقش هر کدام از اعضا بین آن‌ها تقسیم می‌کند.

در مرحله‌ی دوم، رئیس‌های هولون‌ها به مذاکره با یکدیگر جهت ادغام و تشکیل هولون بزرگتر می‌پردازند. به این شیوه که رئیس هولونی که اخیراً درآمد کمتری دریافت کرده‌است، به صورت تصادفی به یک هولون که درآمد بیشتری داشته است درخواست ادغام می‌فرستد، هولون بزرگتر بررسی می‌کند که آیا تولید این هولون کوچک‌تر از درصدی از درآمد خودش بزرگ‌باشد، در این صورت با درخواست موافقت می‌کند، وگرنه چون فرایند ادغام سود کمی برای این هولون دارد و با توجه به هزینه‌ی فرایند ادغام، درخواست رد می‌شود. تعداد درخواست‌ها به گونه‌ای است که در عرض ۲۴ ساعت تمامی هولون‌ها حداقل یک درخواست ادغام ارسال کرده باشند.

در مرحله آخر، اعضا با توجه به درآمد دریافت شده، میزان رضایت خود را بررسی می‌کنند، اگر مبلغ دریافت شده به ازای هر واحد انرژی، از درصدی از میانگین بیشترین و کمترین مبلغ دریافت شده توسط کل اعضای شبکه کمتر باشد، این عضو اعلام نارضایتی کرده و از هولونی که عضو آن است جدا می‌شود و خود تشکیل یک هولون تک‌عضوه جدید می‌دهد.

در این پیاده‌سازی زمان به بازه‌های ۱ ساعته تقسیم شده و هر بار اجرای برنامه، یک ماه را شبیه‌سازی می‌کند.

فصل ۵:

ارزیابی روش پیشنهادی

5-1- مقدمه

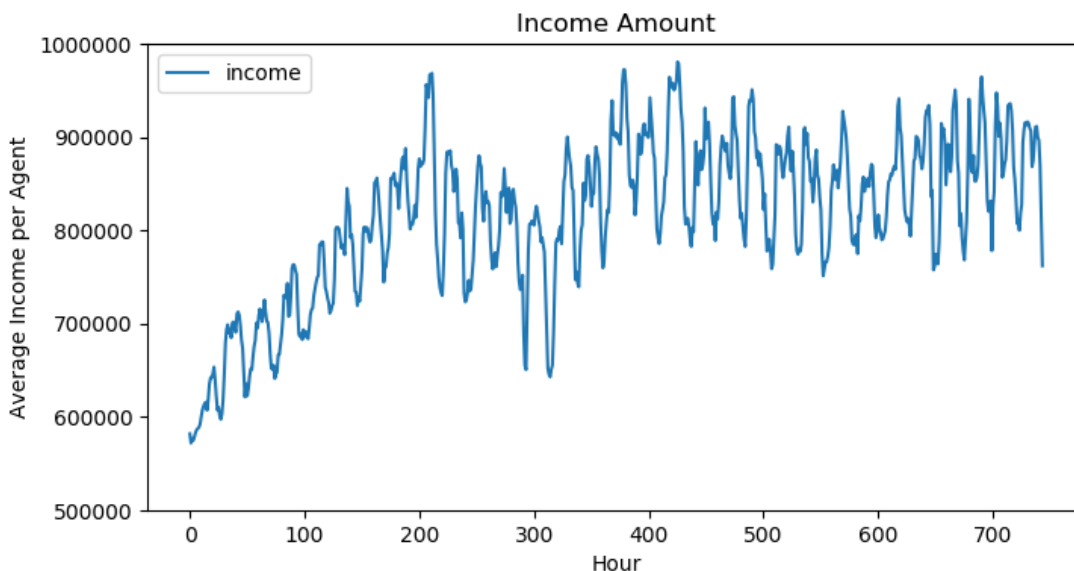
در این فصل ابتدا داده‌های مورد استفاده برای شبیه‌سازی را معرفی کرده و پس از آن به بررسی و نتایج حاصل تحت شرایط و پارامترهای مختلف می‌پردازیم.

5-2- داده‌های آزمایش

داده‌های آزمایش از اپراتور مستقل سیستم الکتریکی کانادا (IESO¹) جمع‌آوری شده است. داده‌ها به صورت ساعتی و در بازه‌ی یک ماهه ارائه شده‌اند و شامل میزان تولید و پیش‌بینی است. برای شبیه‌سازی‌های انجام شده در این پایان‌نامه، از داده‌های مربوط به ژانویه ۲۰۲۰ استفاده شده است. با حذف مولدینی که گزارش تولید خود را کامل ارائه نکرده‌اند، ۱۷۵ تولیدکننده باقی می‌ماند که برای هرکدام یک عامل تخصیص می‌دهیم.

5-3- نتایج

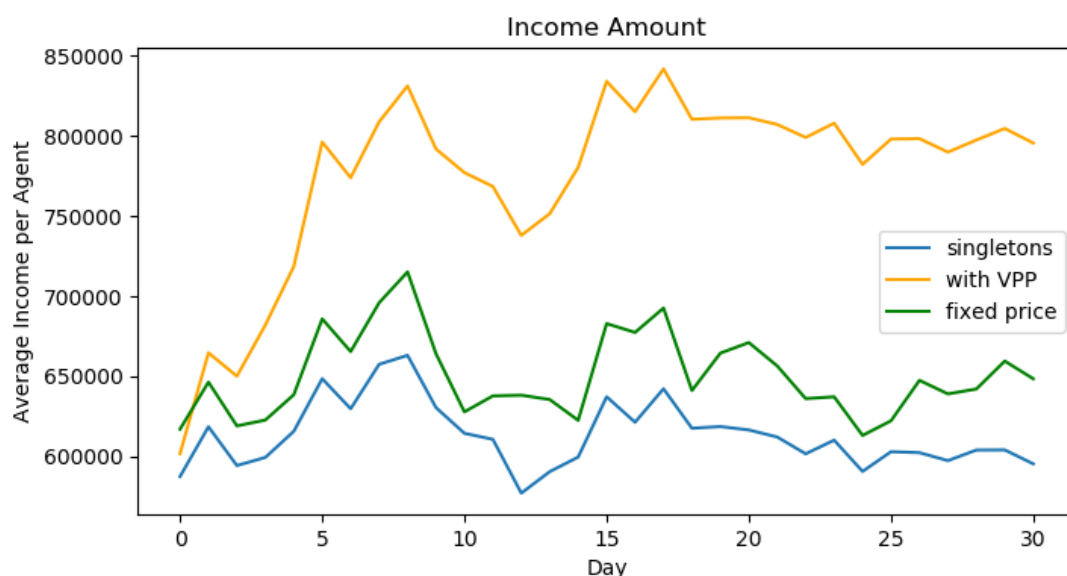
در اولین آزمایش، تاثیر چارچوب معرفی شده بر شکل‌گیری نیروگاه برق مجازی بررسی شده است. ابتدا روند ساعتی درآمد متوسط تولیدکنندگان در چارچوب ارائه شده را بررسی می‌کنیم.



شکل 5-1 (: میزان درآمد متوسط عامل‌ها

¹ The Independent Electricity System Operator

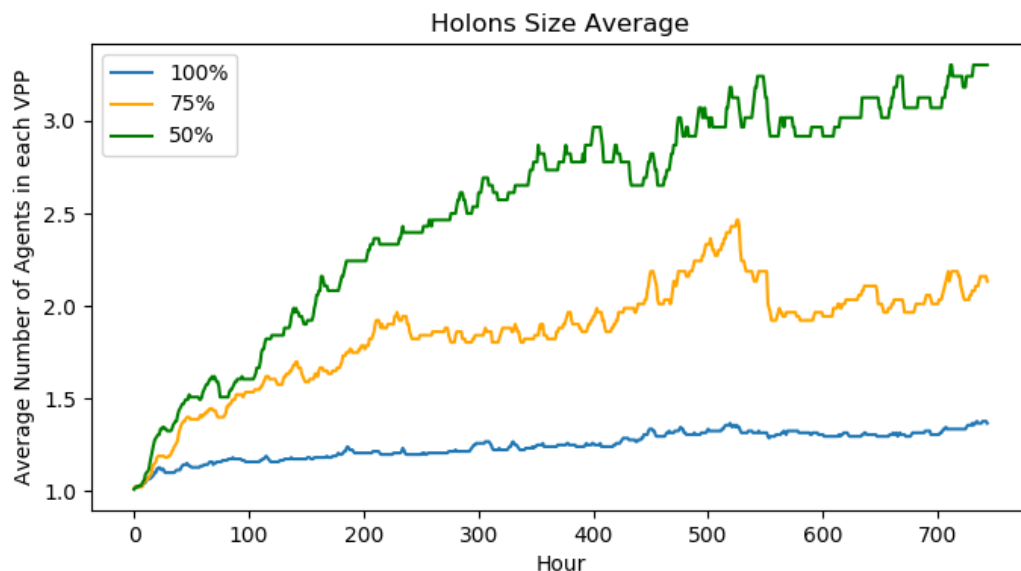
همانطور که مشخص است با وجود افزایش تدریجی درآمد، اما نوسان زیادی در درآمد مشاهده می‌شود که علت آن میزان تولید مختلف در ساعات مختلف شبانه‌روز است. برای حل این مشکل ازین پس به جای گزارش ساعتی، گزارش روزانه ارائه می‌شود و از داده‌های ساعتی هرروز میانگین‌گیری می‌شود.



شکل (2-5): میزان درآمد متوسط عامل‌ها در سه شبیه‌سازی متفاوت

همانطور که در شکل ۵-۲ مشاهده می‌کنید، شکل‌گیری نیروگاه برق مجازی تاثیر قابل توجهی بر درآمد دریافتی توسط تولیدکننده‌ها دارد. واضح است که زمانی از مکانیزم پاداش بدون شکل‌گیری نیروگاه مجازی استفاده کنیم (singletons)، درآمد حاصله کمتر از یک مکانیزم پرداخت ثابت باشد (fixed price). چراکه عامل‌ها نمی‌توانند با تشکیل نیروگاه از پاداش تعریف شده استفاده کنند. در حالت قیمت ثابت، نیروگاه مجازی تشکیل می‌شود و بنابراین با خطای کمتری در پیش‌بینی تولید مواجهیم، اما به میزان بیشتر تولید توسط نیروگاه مجازی، پاداشی تعلق نمی‌گیرد. در نهایت، در چارچوب پیشنهادی، تولیدکنندگان بیشترین درآمد را کسب می‌کنند و انگیزه‌ی بالایی برای تشکیل نیروگاه برق مجازی دارند.

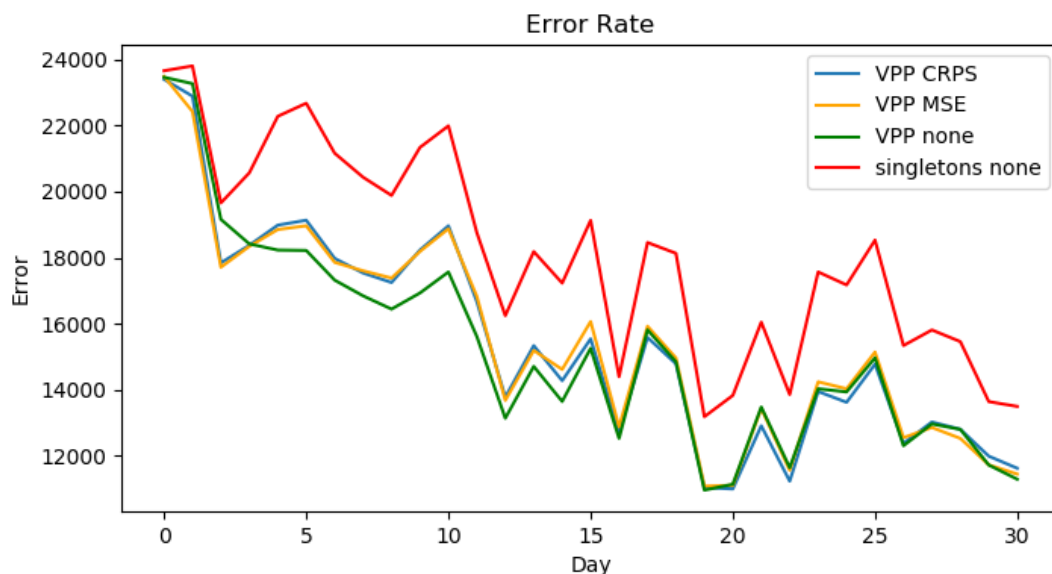
در قسمت بعد، تاثیر درصد بررسی رضایت را بر تعداد متوسط عامل‌ها درون هر نیروگاه بررسی می‌کنیم. یادآوری می‌شود که عامل‌ها اگر از درصدی از میانگین کمینه و بیشینه قیمت واحد انرژی، مبلغ کمتری دریافت کنند، از هولون جدا شده و تشکیل هولون مستقل می‌دهند.



شکل 3-5 (: تعداد متوسط عامل‌ها در نیروگاه مجازی، با درصدهای رضایت متفاوت

همانطور که انتظار می‌رفت، هرچه درصد رضایتمندی کوچک‌تر باشد، عامل با میزان کمتری از دریافت به ازای واحد انرژی در هولون باقی می‌ماند. بدیهی است که تشکیل هولون‌های بزرگتر به میزان تحویل تولید انرژی بزرگتر به شبکه و به تبع آن، دریافت مبلغ بیشتری به ازای واحد انرژی است. اما باید دقت کرد که ساده‌گیری در تشکیل هولون و قبول تعداد زیادی از اعضای ضعیف، از طرف دیگر باعث کاهش دقت پیش‌بینی می‌شود. بنابراین باید درصد رضایت را طوری در نظر گرفت که هم میزان تولید نیروگاه از حداقلی بیشتر باشد، و هم دقت پیش‌بینی که به شبکه اعلام می‌شود مناسب باشد.

در قسمت بعد به بررسی تاثیر تشکیل نیروگاه مجازی بر کاهش خطای پیش‌بینی می‌پردازیم.



شکل (5-4): تغییرات خطای پیش‌بینی از دید شبکه در طول زمان

همانطور که مشاهده می‌شود، حالت بدون نیروگاه مجازی کمترین بهبود را در خطای اعلام شده داده است. در سه حالت دیگر که ۲ تابع مختلف امتیازدهی به خطا (CRPS و ¹MSE) و همینطور حالت بدون تابع است، رقابت زیادی برای کاهش خطا وجود داشته است. البته ذکر این نکته ضروری است که این خطا مربوط به خطای تمامی عوامل است، حتی آن‌هایی که به دلیل خطای پیش‌بینی زیاد موفق به عضویت در نیروگاه مجازی نشده‌اند و تابع امتیازدهی به خطا در واقع از عضویت عامل‌های با خطای زیاد در هولون‌ها جلوگیری می‌کند و در نهایت نمی‌تواند تاثیری بر میزان خطای عامل بگذارد. به همین دلیل با حذف عامل-های انفرادی، تاثیر تابع خطا بر کاهش خطای پیش‌بینی بهتر مشخص می‌شود.

5-4- نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده در دو زمینه‌ی افزایش درآمد و کاهش خطای پیش‌بینی نشان می‌دهد که تشکیل نیروگاه برق مجازی هم برای تولیدکنندگان مزایایی دارد (افزایش درآمد) و هم به بهبود عملکرد شبکه‌ی هوشمند کمک می‌کند (کاهش خطای پیش‌بینی اعلام شده). البته، برقراری تعادل میان این دو معیار خود از اهمیت برخوردار است که باید با توجه به شرایط و نیازهای شبکه و تولیدکنندگان برقرار شود.

¹ Mean Squared Error

فصل ۶:

جمع‌بندی و کارهای آینده

1-6- جمع‌بندی

در این پایان‌نامه به ارائه‌ی روشی برای تشکیل نیروگاه‌های برق مجازی مبتنی بر نظریه‌ی بازی‌ها و سیستم‌های چندعامله پرداخته شد. بدین منظور یک مکانیزم قیمت‌گذاری بر پایه‌ی پاداش ارائه شد که در آن میزان تولید نیروگاه و همچنین دقت پیش‌بینی تولید اثر داشتند و هرکدام سیستم چندعامله را به سمت ارضای بخشی از نیازهای شبکه هدایت می‌کرد. همینطور عامل‌هایی که نقش بیشتری در این امر ایفا می‌کرد، با دریافت پاداش بیشتر رضایت بیشتری می‌یافتند. در چارچوب ارائه شده، عامل‌ها که بیانگر تولیدکنندگان انرژی هستند، تحت یک هولون که بیانگر نیروگاه برق مجازی است جمع می‌شوند. یکی از عامل‌ها در هر هولون نقش رئیس هولون را ایفا می‌کند و با سایر هولون‌ها جهت ادغام و افزایش تولید کلی مذاکره می‌کند. پس از دریافت درآمد توسط رئیس هولون، این درآمد میان اعضا با توجه به اثرگذاری آن‌ها که شامل دقت پیش‌بینی و میزان تولید است تقسیم می‌شود. سپس هر عضو بررسی می‌کند که آیا با عضویت در این هولون رضایت کافی دارد و اگر اینطور نبود، از هولون جدا می‌شود.

با بررسی این روش پی‌بردیم که تشکیل نیروگاه مجازی تحت چارچوب ارائه شده هم با افزایش درآمد باعث رضایت تولیدکنندگان می‌شود، و هم با کاهش خطای پیش‌بینی رضایت شبکه را به دنبال دارد. البته برقراری تعادل میان رضایت تولیدکنندگان و شبکه نیازمند توجه است.

2-6- کارهای آینده

یکی از نکات حائز توجه این است که تولیدکنندگان بادی و خورشیدی هم تولید کمی دارند و هم خطای پیش‌بینی آن‌ها با توجه به ذات منبع انرژی زیاد است. این امر باعث می‌شود که این تولیدکنندگان در نیروگاه‌های مجازی مورد استقبال قرار نگیرند. می‌توان روش‌هایی را بررسی کرد که انگیزه نیروگاه‌های مجازی برای پذیرفتن این تولیدکنندگان بیشتر شود. برای مثال پاداشی به ازای واحد انرژی برای نوع منبع انرژی و پاک بودن آن در نظر گرفته شود.

همینطور تابع CRPS استفاده شده در این پایان‌نامه، تمامی پیش‌بینی‌های قدیمی را در خود به صورت مرتب شده نگه‌داری می‌کند و این امر باعث می‌شود که با گذشت زمان و افزایش داده‌ها، پردازش آن‌ها بسیار وقت‌گیر و سنگین شود. به همین دلیل ایجاد تغییراتی در این روش که بار محاسباتی را نیز در نظر بگیرد، به طور مثال تنها نگه‌داری داده‌های ماه اخیر، باعث پویاتر شدن این چارچوب چندعامله و قابلیت فعالیت در زمان طولانی می‌شود.

مراجع

- [1] S. D. Ramchurn, P. Vytelingum, A. Rogers and N. R. Jennings, "Putting the'smarts' into the smart grid: a grand challenge for artificial intelligence", *Communications of the ACM*, vol. 55, pp. 86-97, 2012.
- [2] W. Wang, Y. Xu and M. Khanna, "A survey on the communication architectures in smart grid", *Computer Networks*, vol. 55, pp. 3604-3629, 2011.
- [3] M. Yu and S. H. Hong, "A Real-Time Demand-Response Algorithm for Smart Grids: A Stackelberg Game Approach", *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 879–888, 2016.
- [4] P. Siano, "Demand response and smart grids - A survey", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 30, pp. 461–478, 2014.
- [5] M. Wooldridge, *An introduction to multiagent systems*, John Wiley & Sons, 2009.
- [6] S. J. Russell and P. Norvig, *Artificial intelligence: a modern approach*, Malaysia: Pearson Education Limited, 2016.
- [7] Y. Shoham, "Agent-oriented programming", *Artif. Intell.*, vol. 60, no. 1, pp. 51–92,, 1993.
- [8] R. Roche, B. Blunier, A. Miraoui, V. Hilaire and A. Koukam, "Multi-agent systems for grid energy management: A short review", *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 3341–3346, 2010.
- [9] D. Ray and R. Vohra, "Coalition formation", *Handbook of game theory*, vol. 4, pp. 239-326, 2014.
- [10] G. Weiss, *Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence*, MIT press, 1999.
- [11] B. Horling, R. Mailler and V. Lesser, "A case study of organizational effects in a distributed sensor network", *Proc. - IEEE/WIC/ACM Int. Conf. Intell. Agent Technol. IAT 2004*, pp. 51–57, 2004.
- [12] P. Mathieu, "Session_1D__self-organizing_systems__Dynamic_organization_of_multi-agent_systems", pp. 1–2, 2002.
- [13] R. S., H. V., G. N., G. S. and K. A., *Holonic Multi-Agent Systems*, Berlin, Heidelberg: Di Marzo Serugendo G., Gleizes MP., Karageorgos A. (eds) *Self-organising Software. Natural Computing Series*. Springer, 2011.
- [14] B. Horling and V. Lesser, "A survey of multi-agent organizational paradigms", *Knowl. Eng. Rev.*, vol. 19, no. 4, pp. 281–316, 2004.
- [15] F. C. Schweppe, R. D. Tabors, J. L. Kirtley, H. R. Outhred, F. H. Pickel and A. J. Cox, "Homeostatic utility control", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 1151-1163, 1980.
- [16] E. Gnansounou, S. Pierre, A. Quintero, J. Dong and A. Lahlou, "A multi-agent approach for planning activities in decentralized electricity markets", *Knowledge-Based Syst.*, vol. 20, no. 4, pp. 406–418, 2007.
- [17] J. Kays, A. Seack, C. Rehtanz and D. Ä. g. Rahmenbedingungen, "Analyse der Verteilnetzbelastung durch Simulation in einem Multiagentensystem", in *Proceedings of the International ETG-Congress*, vol. 2011, 2011.
- [18] A. Seack, J. Kays, L. Jendernalik and D. Giavarra, "Potentiale Und Risiken Bei Der Verwendung Innovativer Netzplanungsansätze", *Symposium Energieinnovation*, vol. 13, pp. 1–10, 2014.

-
- [19] D. P. Chassin, J. C. Fuller and N. Djilali, "GridLAB-D: An Agent-Based Simulation Framework for Smart Grids", J. Appl Math., vol. 2014, pp. 1–12, 2014.
- [20] F. Rahimi and A. Ipakchi, "Demand response as a market resource under the smart grid paradigm", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 1, no. 1, pp. 82–88, , 2010.
- [21] Z. Zhou, F. Zhao and J. Wang, "Agent-based electricity market simulation with demand response from commercial buildings", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 2, no. 4, pp. 580–588, 2011.
- [22] T. Pinto, H. Morais, P. Oliveira, Z. Vale, I. Praça and C. Ramos, "A new approach for multi-agent coalition formation and management in the scope of electricity markets", Energy, vol. 36, no. 8, pp. 5004–5015, 2011.
- [23] S. Kahrobaee, R. A. Rajabzadeh, L. K. Soh and S. Asgarpour, "Multiagent study of smart grid customers with neighborhood electricity trading", Electr. Power Syst. Res., vol. 111, pp. 123–132, 2014.
- [24] A. U. Haque, P. Mandal, J. Meng and R. L. Pineda, "Performance evaluation of different optimization algorithms for power demand forecasting applications in a smart grid environment", Procedia Comput. Sci., vol. 12, no. 915, pp. 320–325, 2012.
- [25] F. Boroomand and M. A. Zamani, "Cyber Security for Smart Grid", pp. 1–6, 2000.
- [26] V. Robu, G. Chalkiadakis, R. Kota, A. Rogers and N. R. Jennings, "Rewarding cooperative virtual power plant formation using scoring rules", Energy, vol. 117, pp. 19–28, 2016.
- [27] ا. پورشجاعی, همکاری در تشکیل نیروگاه برق مجازی با استفاده از نظریه بازی, ۱۳۹۸.
- [28] م. ز. جهرمی, ارائه روشی برای تشکیل نیروگاه مجازی در شبکه ی هوشمند با استفاده از نظریه ی بازی ها, ۱۳۹۶.

Abstract

By speeding up the growth of smart grids, many challenges have appeared for using this grids. By increasing the number of smart grids members, development of a mechanism that can control them become harder. Specially that many of this members contain solar and wind generators and also small household generators. This generators –because of being small and unreliable- cannot be considered by the grid and cannot play an important rule in the grid.

Smart grid is a mechanism which is proposed to solve this kind of problems. Members increase their total product and reliability by finding complementary members, and then considered as a reliable entity by the grid. By this approach, not only price of members energy services get increased, but also by less forecasting error of the set, the grid can operate with more reliability. In this thesis, a mechanism is proposed for formation of virtual power plants and we discuss the relationship between grid and generator profits.

In the proposed mechanism we used game theory for the problem of virtual power plant formation, in a way that both the grid and the members profits. For achieving that, a pricing mechanism is used that includes rewards to motivate members to form virtual power plant. We then study different functions and parameters and their influence on the virtual power plant formation and the profit of different entities. The proposed mechanism is implemented using Python.

Keywords: smart grid, virtual power plant, game theory, pricing mechanism.



IU I ST

**Iran University of Science and Technology
School of Computer Engineering**

Optimization of Virtual Power Plant formation process using Game Theory

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Bachelor of Science in Computer Engineering – Computer
Systems Architecture**

**By:
Soheil Rastegar**

**Supervisor:
Dr. Naser Mozayani**

February 2020