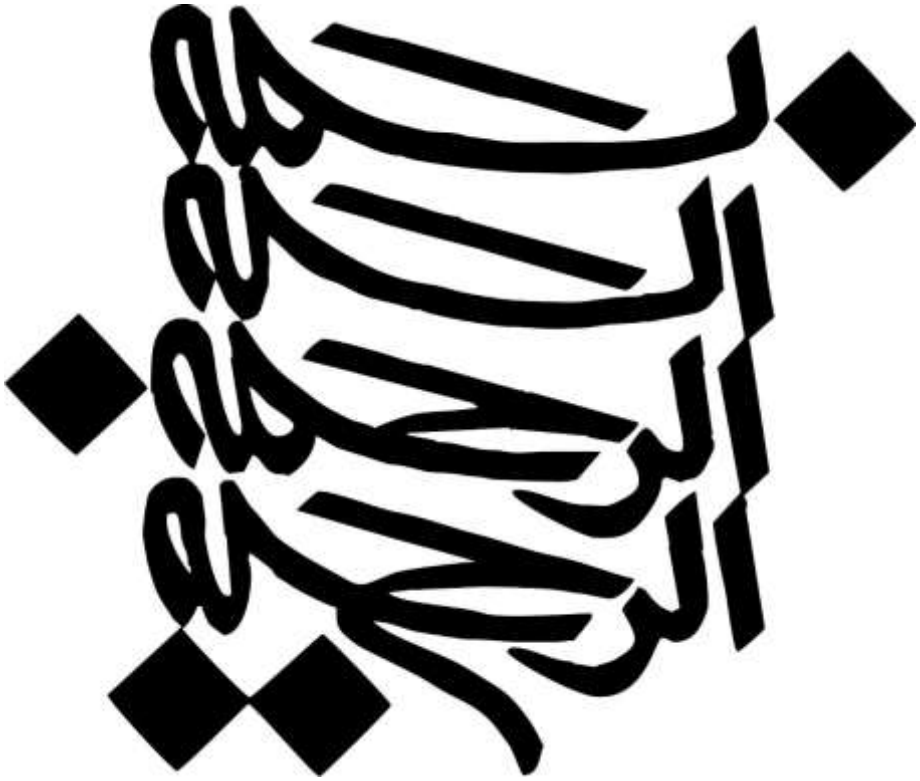

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

بهره‌برداری بهینه‌ی یک نیروگاه مجازی همزمان با مشارکت در بازار برق

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت

حسن ابراهیمی

استاد راهنما
دکتر محمد اسماعیل همدانی گلشن

۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق- قدرت آقای حسن ابراهیمی

تحت عنوان

بهره‌برداری بهینه‌ی یک نیروگاه مجازی همزمان با مشارکت در بازار برق

در تاریخ ۱۳۹۳/۱۰/۹ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر محمد اسماعیل همدانی گلشن
۲- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر سید یاسر درخشنده
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر سید محمدعلی خسروی‌فرد

از پدر و مادرم که در تمامی مراحل زندگی حامی و پشتیبانم بودند تشکر می‌کنم. همچنین از راهنمایی‌های اساتیدم آقای دکتر همدانی گلشن و آقای دکتر درخشنده کمال تشکر را دارم.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به:

بانوی دوعالم حضرت فاطمة الزّهرا (سلام الله علیها) و فرزند

برومندشان حضرت صاحب الزّمان (روحی فداه)

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱ نیروگاه مجازی و ضرورت شکل‌گیری آن ۲

۱-۲ مروری بر مراجع مرتبط ۳

۱-۳ اهداف تحقیق ۷

۱-٤ ساختار پایان‌نامه ۸

فصل دوم: تعاریف و مفاهیم نیروگاه مجازی

۲-۱ مقدمه ۹

۲-۲ برخی تعاریف ارائه شده برای نیروگاه مجازی ۱۰

۲-۳ اجزای تشکیل دهنده‌ی نیروگاه مجازی ۱۱

۲-۳-۱ روش‌های طراحی و کنترل VPP ۱۳

۲-٤ چالش‌های ارتباطی و نرم‌افزاری VPP ۱۵

۲-۵ انواع نیروگاه مجازی معرفی شده ۱٦

۲-۵-۱ VPP مبتنی بر بازار برق MBVPP ۱٦

۲-۵-۲ نیروگاه مجازی عام GVPP ۲۰

۲-۵-۳ VPP تجاری CVPP و VPP فنی TVPP ۲۱

۲-۵-٤ VPP محیطی EVPP ۲۳

۲-۵-۵ VPP خودروهای الکتریکی EV-VPP ۲۳

۲-۵-٦ VPP مقیاس بزرگ LSVPP ۲٤

۲-٦ جنبه‌های حقوقی VPP ۲٦

۲-۷ جمع‌بندی ۲٦

فصل سوم: مدل بهینه‌سازی سود VPP بر اساس حل مسئله‌ی SCPBUC

۳-۱ مقدمه ۲۸

۳-۲ ویژگی مسئله‌ی به مدار آوردن واحدها در یک VPP ۲۸
۳-۳ مدل اول تشکیل VPP ۲۹
۳-۳-۱ اجزای VPP ۳۰
۳-۳-۲ فرضیات حاکم بر VPP ۳۰
۳-۳-۳ تابع هدف مسئله ۳۲
۳-۳-٤ قیود حاکم بر مسئله‌ی SCPBUC ۳٤
۳-٤ مدل دوم تشکیل VPP ۳۸
۳-٤-۱ اجزای VPP در مدل دوم ۳۸
۳-٤-۲ فرضیات حاکم بر VPP در مدل دوم ۳۹
۳-٤-۳ تابع هدف مسئله‌ی مرحله‌ی دوم ٤۰
۳-٤-٤ قیود حاکم بر مسئله در مدل دوم ٤۳
۳-۵ مدل سوم تشکیل VPP ٤۹
۳-۵-۱ اجزای LSVPP در مدل سوم ٤۹
۳-۵-۲ فرضیات حاکم بر LSVPP ۵۰
۳-۵-۳ تابع هدف مدل سوم ۵۱
۳-۵-٤ قیود حاکم بر مسئله ۵۵
۳-٦ جمع‌بندی ۵۹

فصل چهارم: مدل جامع بهینه‌سازی سود VPP بر اساس حل مسئله‌ی SCPBUC

٤-۱ مقدمه ٦۱
٤-۲ اجزای VPP پیشنهادی ٦۱
٤-۳ فرضیات حاکم بر VPP ٦۲
٤-٤ تابع هدف مدل جامع ٦۳
٤-۵ قیود حاکم بر مسئله ٦۷

٤-٦ جمع‌بندی ٧٦

فصل پنجم: مطالعه‌ی VPP های مختلف روی شبکه‌ی توزیع ۳۳ باس

۵-۱ مقدمه ۷۷

۵-۲ سیستم مورد مطالعه ۷۷

۵-۳ پیاده سازی VPP معرفی شده در بخش ۳-۳ ..... ۷۷

۵-۳-۱ نتایج تحقق مدل اول VPP روی شبکه‌ی ۳۳ باس ۷۸

٥-٤ پیاده‌سازی مدل دوم VPP روی شبکه‌ی ۳۳ باس ٨٤

٥-٤-١ نتایج پیاده‌سازی مدل VPP بخش ۳-٤ روی شبکه‌ی ۳۳ باس ٨٥

۵-۵ تحقق مدل VPP بخش ۳-۵ روی شبکه‌ی ۳۳ باس ۹۳

۵-۵-۱ نتایج پیاده‌سازی مدل VPP بخش ۳-۵ روی شبکه‌ی ۳۳ باس ۹٤

٦-٥ مطالعه‌ی مدل جامع VPP بر روی سیستم تست ۳۳ باس ١٠٠

٦-٥-١ نتایج پیاده‌سازی مدل جامع بر روی شبکه‌ی ۳۳ باس ١٠١

۵-۷ جمع‌بندی ۱۱۰

فصل ششم: برنامه‌ریزی احتمالاتی سود VPP جامع

٦-١ مقدمه ١١١

٦-٢ برنامه‌ریزی تصادفی ١١١

٦-٣ فرآیندهای تصادفی ١١٢

٦-٣-١ مدل‌سازی بار مصرفی ١١٣

٦-٤ برنامه‌ریزی تصادفی بر مبنای شبیه‌سازی ١١٤

٦-٥ برنامه‌ریزی تصادفی VPP ١١٥

٦-٥-١ مدل‌سازی عدم قطعیت بار ١١٦

٦-٥-٢ مدل‌سازی عدم قطعیت تولید خورشیدی ١١٦

٦-٦ فرمول‌بندی مسئله‌ی احتمالاتی بیشینه سازی سود یک LSVPP ١١٧

٦-٦-١ تابع هدف مسئله ١١٧
٦-٦-٢ قیود حاکم بر حالت اصلی ١٢٢
٦-٦-٣ قیود حاکم بر هریک از سناریوها ١٣٢
٦-٧ بهره‌برداری احتمالاتی بهینه برای شبکه‌ی تست ٣٣ باس ١٣٧
٦-٧-١ اطلاعات مورد نیاز برای حل مسئله ١٣٧
٦-٧-٢ تولید سناریوها جهت انجام مطالعات ١٣٨
٦-٧-٣ نتایج بهره‌برداری احتمالاتی مدل جامع VPP ١٣٩
٦-٨ جمع‌بندی ١٥٠
فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
٧-١ مقدمه ١٥١
٧-٢ نتایج و دستاوردها ١٥٣
٧-٣ پیشنهادها ١٥٣
پیوست ١٥٥
مراجع ١٨٣

چکیده

مزایای فنی، اقتصادی و زیست محیطی منابع پراکنده بخصوص منابع مبتنی بر تجدیدپذیرها سرعت ورود این منابع در بسیاری از سیستم‌های قدرت را افزایش داده است. با وجود این افزایش نفوذ، این منابع در سیستم‌های قدرت چالش‌های جدیدی را فراروی بهره-برداران سیستم قرار می‌دهند. امکان تغییر جهت توان در برخی از فیدرهای توزیع، متغیر و غیرقابل پیش‌بینی بودن خروجی منابع تجدیدپذیر و عدم امکان ورود مستقیم منابع به بازار برق از جمله‌ی این چالش‌ها است که ضمن کاهش انگیزه‌ی مالکین منابع برای سرمایه‌گذاری بیش‌تر و عدم بهره‌برداری کامل از مزایای منابع پراکنده، می‌تواند منجر به مشکلات جدیدی در عملکرد سیستم‌های قدرت شود. یکی از مفاهیم جدیدی که برای حل این چالش‌ها و امکان بهره‌وری هرچه بیش‌تر از منابع مطرح شده است، ایجاد ساختاری برای مدیریت و بهره-برداری هماهنگ منابع توزیع شده در یک سطح جغرافیایی بزرگ تحت عنوان نیروگاه مجازی است. نیروگاه مجازی مجموعه‌ای از واحدهای قابل کنترل غیرمتمرکز و توزیع شده در یک وسعت جغرافیایی است که هر واحد می‌تواند شامل منابع تولیدی تحت مالکیت مصرف کننده‌ها یا تولید کننده‌های مستقل، بارهای قابل کنترل و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی باشد. مدیر نیروگاه مجازی از طریق بستر مخابراتی مناسب، نرم‌افزارهای مدیریتی و الگوریتم‌های بهره‌برداری، برای رسیدن به بیش‌ترین منفعت اجزای تشکیل دهنده و بهترین عملکرد سیستم واحدها را به صورت هماهنگ بهره‌برداری و مدیریت می‌کند. با تحقق نیروگاه مجازی، علاوه بر امکان استفاده‌ی بهتر از مزایای بالقوه‌ی منابع پراکنده، راه مناسبی برای ورود منابع پراکنده به انواع بازار برق فراهم می‌شود. به این منظور طراحی مدل و الگوریتم-های بهره‌برداری کارآمد برای حداکثر کردن سود نیروگاه مجازی اهمیت ویژه‌ای دارد. بر این اساس هدف این پایان‌نامه مروری بر تعاریف و مفاهیم نیروگاه مجازی و بررسی ابعاد و جنبه‌های مختلف آن و معرفی برخی از مدل‌های ارائه شده برای بهینه کردن عملکرد نیروگاه مجازی است. به علاوه در این پایان‌نامه با تجمیع و تکمیل مدل‌های مذکور مدل جامعی برای بهره‌برداری بهینه از یک نیروگاه مجازی مقیاس بزرگ پیشنهاد می‌شود که در آن با در نظر گرفتن هم‌زمان منابع و بارهای الکتریکی و حرارتی، ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی و حرارتی، انواع تکنولوژی منابع پراکنده و خودروهای الکتریکی و شرکت نیروگاه مجازی در هر دو بازار انرژی و رزرو، سود آن با توجه به قیود واحدها و قیود امنیت شبکه حداکثر می‌شود. مدل جامع پیشنهادی در دو قالب برنامه‌ریزی قطعی و احتمالاتی SCPBUC فرمول‌بندی و روی شبکه‌ی توزیع تست ۳۳ باس پیاده‌سازی و نتایج آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در برنامه‌ریزی احتمالاتی عدم قطعیت در پیش‌بینی بار مصرفی و توان خروجی منابع خورشیدی در نظر گرفته می‌شود.

کلیدواژه : نیروگاه مجازی، بهینه‌سازی سود، برنامه‌ریزی احتمالاتی

فصل اول
مقدمه

در این فصل پس از معرفی اجمالی مفهوم نیروگاه مجازی[1] (VPP) و ضرورت شکل‌گیری آن، به بیان لزوم ارائه‌ی مدل‌هایی برای بهینه‌سازی سود VPP پرداخته می‌شود. پس از آن به مرور مراجع مرتبط پرداخته و اهداف پایان‌نامه بیان می‌شوند و در پایان، نحوه‌ی دستیابی به اهداف و ساختار پایان‌نامه معرفی خواهد شد. .

۱-۱ نیروگاه مجازی و ضرورت شکل‌گیری آن

جهت توان در سیستم‌های قدرت مرسوم از نیروگاه‌های بزرگ مرکزی به سمت مصرف کننده‌های نهایی متصل به شبکه‌های توزیع است. در این سیستم‌ها، توان الکتریکی در نیروگاه‌های بزرگ مرکزی و توسط ژنراتورهای سنکرون تولید می‌شود. این نیروگاه‌ها اغلب در فواصل دور از مراکز مصرف همچون نقاط شهری و پرجمعیت قرار گرفته‌اند. به همین منظور، برای انتقال توان الکتریکی به نقاط مصرف نیاز به خطوط انتقال و توزیع و صرف هزینه‌های زیاد است. از طرف دیگر، تولید انرژی و الگوی انتقال آن در شبکه‌ی هوشمند از انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردار بوده و توانایی تولید انرژی الکتریکی در سیستم توزیع نیز وجود دارد. یکی از مفاهیم کلیدی برای تحقق انعطاف‌پذیری تولید در شبکه‌های هوشمند، تولید پراکنده[2] (DG) است [۱].

با توجه به این که DG ها با استفاده از فناوری‌های جدید ساخته می‌شوند و بسیاری از آن‌ها نیز مبتنی بر منابع تجدیدپذیر هستند، از لحاظ تولید کمتر آلودگی محیطی در مقایسه با نیروگاه‌های بزرگ در وضعیت مناسبی قرار

[1] Virtual Power Plant
[2] Distributed Generation

دارند. علاوه بر این با توجه به نصب آن‌ها در شبکه‌ی توزیع و در نزدیکی نقاط مصرف، نیازی به انتقال انرژی تولید شده توسط آن‌ها به نقاط دوردست نیست و به همین خاطر با تولید انرژی توسط آن‌ها تلفات ناشی از سیستم‌های انتقال و توزیع به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا می‌کند. با توجه به مزایای حاصل از به‌کارگیری DG ها و قوانین حمایتی به منظور افزایش نفوذ آن‌ها در نقاط مختلف جهان، این منابع پتانسیل بالایی برای نصب در سیستم دارند و می‌توانند بخش قابل ملاحظه‌ای از تولید الکتریسیته را به خود اختصاص دهند [۲].

با وجود مزایای به‌کارگیری DG ها در سیستم قدرت، نصب آن‌ها به خصوص در تعداد و ظرفیت زیاد چالش-هایی را نیز ایجاد می‌کند. از یک سو برخی از این منابع از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند باد و خورشید استفاده می‌کنند که با توجه به طبیعت تصادفی این منابع، توان خروجی تولیدات مبتنی بر تجدیدپذیرها متغیر و غیر قابل کنترل است. علاوه بر این تعداد زیاد توربین‌های بادی گاهی اوقات موجب بروز محدودیت‌هایی در برخی از شبکه‌های انتقال می-شود و بهره‌برداران شبکه برای حفظ امنیت و پایداری شبکه مجبور به خاموش کردن برخی از آن‌ها می‌شوند. همچنین با توجه به روش مرسوم برای تولید انرژی الکتریکی توسط نیروگاه‌های مرکزی بزرگ، زیرساخت‌های شبکه از جمله خطوط و طرح‌های حفاظتی، برای نفوذ زیاد DG ها طراحی نشده‌اند و تعداد و ظرفیت زیاد DG ها می‌تواند موجب تغییر در جهت جریان توان و بروز تراکم در برخی از خطوط شود [۳].

یکی از راه حل‌های مناسب برای استفاده از پتانسیل‌ها و مزایای منابع پراکنده و غلبه بر چالش‌های پیش رو، مدیریت و بهره‌برداری هماهنگ آن‌ها است. یکی از ساختارها برای بهره‌برداری هماهنگ منابع پراکنده، نیروگاه مجازی است که به مفهوم تجمیع منابع انرژی پراکنده و بهره‌برداری از آن‌ها به عنوان یک واحد نیروگاهی است. بنابراین با تحقق VPP بستر مناسبی برای استفاده از پتانسیل‌های منابع پراکنده ایجاد شده و گام مهمی در جهت هوشمندتر شدن سیستم قدرت برداشته خواهد شد. از این رو VPP به عنوان روشی برای ترویج و گسترش شبکه‌ی هوشمند به شمار می‌آید.

از مهمترین مزایای شکل‌گیری VPP، ایجاد بستری مناسب به منظور شرکت منابع پراکنده در بازار برق است در این راستا VPP با توجه قابلیت منابع پراکنده و مدیریت و برنامه‌ریزی آن‌ها سعی در بهینه‌سازی سود اقتصادی و بهبود موقعیت خود در بازار می‌نماید. برای دستیابی به این هدف، VPP نیازمند مدل‌های کارآمد به منظور برنامه‌ریزی منابع پراکنده برای شرکت در بازارهای انرژی و خدمات جانبی است. به همین منظور در ادامه به مرور برخی از مراجع مرتبط با برنامه‌ریزی و شرکت VPP در بازار برق می‌پردازیم.

۲-۱ مروری بر مراجع مرتبط

از چند سال پیش مفهوم VPP معرفی و ترویج شده است. ایده‌ای که علاوه بر نیروگاه‌های کوچک نزدیک مصرف، ذخیره‌سازهای انرژی، سیستم‌های CHP، منابع انرژی تجدیدپذیر، بارهای قابل کنترل و همچنین اشکال

مختلف منابع تولید کوچک را در نظر می‌گیرد. در ابتدای طرح مفهوم VPP، همه‌ی منابع در اختیار یک متولی و مدیر در نظر گرفته می‌شدند و همه‌ی واحدها در VPP، یک نقطه‌ی اتصال مشترک با شبکه لحاظ می‌شد. بنابراین VPP متشکل از واحدهای جداگانه به عنوان یک واحد نیروگاهی به حساب می‌آمد. پس از آن در [٤] مدل جدیدی از VPP ها تحت عنوان VPP مقیاس بزرگ[١] (LSVPP) ارائه شد که در آن منابع تولید مختلف، ذخیره‌سازها و بارها در یک ناحیه‌ی جغرافیایی بزرگ توزیع شده‌اند و هرکدام از آن‌ها می‌توانند نقطه‌ی اتصال به شبکه‌ی جداگانه و مالکین متفاوت داشته باشند؛ اما همه‌ی منابع توسط یک VPP یا چند VPP هماهنگ، مدیریت و برنامه‌ریزی می‌شوند که نشان دهنده‌ی اتصال تجاری واحدها با بازار و اپراتورهای شبکه است. در این مرجع یک مدل برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی الکتریکی و حرارتی LSVPP پیشنهاد شده است. مدل پیشنهادی موقعیت قرارگیری واحدها و همچنین ویژگی‌ها و قابلیت‌های هر کدام از آن‌ها را در نظر می‌گیرد. در این مدل، علاوه بر تأمین بار الکتریکی مورد نیاز LSVPP، با انجام برنامه‌ریزی حرارتی، بار حرارتی آن نیز تأمین می‌شود. در این کار حضور CHP[٢]ها، بویلرها، ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی، بارهای الکتریکی و حرارتی و همچنین منابع تولید تجدیدپذیر در LSVPP به عنوان اجزای تشکیل دهنده‌ی آن در نظر گرفته شده است. مدل پیشنهادی در این کار، مشوق‌های منابع انرژی تجدیدپذیر را نیز در نظر می‌گیرد.

در [٥] مدلی بر اساس برنامه‌ریزی مبتنی بر قیمت مشارکت واحدها[٣] (PBUC) به منظور طراحی راهبرد پیشنهاد VPP برای شرکت در بازار ارائه شده است. در مدل پیشنهادی، قیود مربوط به واحدهای DER، قید توازن تولید و تقاضا و همچنین قیود امنیت VPP و قیود شبکه لحاظ شده است. در این مدل VPP می‌تواند به عنوان تولید کننده و یا مصرف کننده در بازار عمل کند که نقش VPP در بازار بسته به جهت تبادل توان با شبکه، متفاوت است. چارچوب در نظر گرفته شده برای بازار، یک مدل توأم برای بازارهای انرژی و ذخیره‌ی چرخان است و در این میان هدف VPP حداکثر کردن سود خود از طریق پیشنهادات مناسب برای بازارهای انرژی و ذخیره‌ی چرخان روز- پیش[٤] است. در [٦] نیز مدل پیشنهادی ارائه شده در [٥] با انجام مطالعات مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در [٧]، VPP به معنی تجمیع DG های نصب شده در یک ناحیه‌ی جغرافیایی وسیع در نظر گرفته شده است که خروجی کل آن‌ها مانند یک نیروگاه مرکزی بزرگ، قابل کنترل است. در این کار یک استراتژی کنترل توزیع شده در بهینه شدن خروجی VPP و همگرا شدن به یک نقطه‌ی بهره‌برداری بهینه ارائه شده است. نقطه‌ی بهینه‌ی مورد نظر جایی است که خروجی DG ها با در نظر گرفتن توابع هزینه و فراهم کردن خدمات موردنیاز، بهینه باشد. در روش پیشنهاد شده هر DG تنها از اطلاعات واحدهای کناری استفاده می‌کند و یک کنترل کننده‌ی متمرکز به منظور جمع-آوری اطلاعات نیاز نیست.

---

[١] Large scale VPP
[٢] Combined Heat and Power
[٣] Price-based Unit Commitment
[٤] Day-ahead

در [۸] یک PBUC احتمالاتی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مربوط به منابع تولید تجدیدپذیر و قیمت بازار با استفاده از روش تخمین نقطه[۱] انجام شده است. در این مرجع اپراتور VPP قادر است نقطه‌ی بهره‌برداری بهینه را با در نظر گرفتن قیود فنی و اقتصادی مربوطه و عدم قطعیت‌های موجود تعیین کند. تابع هدف مسئله نیز حداکثر کردن سود VPP با ارائه‌ی پیشنهادات خرید یا فروش در بازار انرژی روز قبل است.

میزان توان تولیدی منابع تجدیدپذیر که خروجی آن‌ها به طور دقیق قابل پیش‌بینی نیست و قیمت بازار که پس از ارائه‌ی همه‌ی پیشنهادها توسط تولیدکنندکان و مصرف کنندگان مشخص می‌شود دو مورد از عدم قطعیت‌های موجود در مسئله‌ی عملکرد بهینه‌ی VPP در بازار هستند. در [۹] به منظور در نظر گرفتن این عدم قطعیت‌ها از برنامه-ریزی تصادفی استفاده شده است. در این کار سه عنصر منبع تولید تجدیدپذیر، ذخیره‌ساز انرژی و منبع قابل کنترل به عنوان اجزای تشکیل دهنده‌ی VPP در نظر گرفته شده‌اند. مدل پیشنهادی، دو بازار انرژی و تعادل روز بعد را برای مشارکت VPP در نظر می‌گیرد و هدف بیشینه ساختن سود مورد انتظار VPP است. در این مدل VPP پیشنهاد خود را در بازار انرژی روز بعد ارائه می‌کند که این کار قبل از مشخص شدن خروجی واحدهای تولید انرژی تجدیدپذیر و قیمت‌های بازار انجام می‌شود. متولی VPP بعد از مشخص شدن خروجی واحدهای تجدیدپذیر و قیمت در بازار انرژی روز بعد، درباره‌ی بهره‌برداری ذخیره‌ساز انرژی و منبع تولید قابل کنترل تصمیم‌گیری می‌کند که این کار قبل از مشخص شدن قیمت‌ها در بازار تعادل انجام خواهد شد. در پایان نیز قیمت‌ها در بازار تعادل مشخص می‌شود.

در [۱۰] مدلی برای برنامه‌ریزی میان مدت[۲] یک VPP شامل تولید تجدیدپذیر، ذخیره‌کننده‌ی انرژی و منبع قابل کنترل، پیشنهاد شده است. VPP قراردادهای دوطرفه‌ی بلند مدت دارد و هدف از برنامه‌ریزی آن است که ضمن رعایت قراردادها، سود هفتگی VPP با شرکت در بازار حداکثر شود. مدل پیشنهادی در این کار ضمن ارائه‌ی یک فرمول‌بندی که سه مؤلفه‌ی تولید تجدیدپذیر، ذخیره‌کننده‌ی انرژی و منبع قابل کنترل را برای VPP در نظر می‌گیرد، هماهنگی بین قراردادهای دوطرفه‌ی بلند مدت و پیشنهاد برای بازار انرژی روز بعد را مدل‌سازی می‌کند.

در [۱۱] بهره‌برداری بهینه‌ی VPP با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مربوط به قیمت انرژی و سوخت انجام شده است. تابع هدف مسئله حداکثر سازی سود VPP است و مصالحه‌ای بین حداکثر سود VPP و حداقل ریسک ناشی از عدم قطعیت‌های قیمت انرژی و سوخت انجام شده است. برنامه‌ریزی تصادفی در این کار با روش مبتنی بر سناریو انجام شده که برای حل مسئله سناریوهای با احتمال کم حذف می‌شوند و هدف مسئله، بیشینه ساختن سود مورد انتظار VPP با در نظر گرفتن سناریوهای باقی‌مانده است.

در [۱۲] مفهوم ریزشبکه‌ی صنعتی معرفی و پس از بررسی ساختار یک ریزشبکه‌ی صنعتی، مزایای تشکیل ریزشبکه در مناطق و شهرک‌های صنعتی تبیین شده است. با توجه به اهمیت تشکیل ریزشبکه در مناطق صنعتی، در

---

[۱] Point estimate method
[۲] Mid-term

این کار مسئله‌ی به مدار آوردن تولیدات پراکنده در یک ریزشبکه‌ی صنعتی به منظور حداقل کردن هزینه‌ی تأمین انرژی الکتریکی و حرارتی مطرح شده است و فرمول‌بندی پیشنهادی علاوه بر قیود مرتبط با سیستم و امنیت آن، قیود مربوط به تجهیزات کارخانجات را نیز در نظر می‌گیرد. در این کار حضور خودروهای برقی و سلول‌های خورشیدی نیز مورد توجه قرار گرفته است و یک راه حل مناسب به منظور ترغیب کارخانجات مختلف واقع در یک منطقه‌ی صنعتی جهت حضور و مشارکت در ساختار ریزشبکه ارائه شده است. در راه حل پیشنهادی با استفاده از تقسیم سود ریزشبکه بین کارخانجات مختلف با توجه به میزان مشارکت آن‌ها در سود بدست آمده، توجیه اقتصادی برای مشارکت آن‌ها در ساختار ریزشبکه ایجاد می‌شود. همچنین با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در میزان مصرف الکتریکی و میزان تولید سلول‌های خورشیدی، فرمول بندی احتمالاتی به مدار آوردن واحدها در یک ریزشبکه‌ی صنعتی ارائه و با استفاده از روش مبتنی بر سناریو تحلیل شده است.

در [۱۳] یک الگوریتم بهینه‌سازی به منظور مدیریت یک VPP که شامل تعداد زیادی از بارهای قابل کنترل است، ارائه می‌شود. این الگوریتم برنامه‌ی کنترل بهینه برای بارهای VPP را به منظور بهینه‌سازی کاهش بار در یک بازه‌ی زمانی خاص، تعیین می‌کند. با پیاده‌سازی این الگوریتم، VPP قادر خواهد بود با پیشنهاد کاهش بار خود در بازار شرکت کرده و همچنین به بهره‌برداران سیستم قدرت در مدیریت مسائلی مانند تراکم در شبکه و اختلاف بین تولید و مصرف، کمک کند.

در [۱٤] یک روش بهینه‌سازی به منظور مدیریت یک VPP شامل سیستم‌های CHP، بویلرها و ذخیره‌سازهای حرارتی معرفی شده است. هدف از بهینه‌سازی برنامه‌ریزی تولید حرارت و الکتریسیته به منظور بیشینه ساختن سود VPP است.

کاربران شبکه‌ی توزیع باید هزینه‌هایی را برای جبران خسارت‌های اپراتور سیستم توزیع[۱] (DSO) بپردازند زیرا این خسارت‌ها نتیجه‌ی تزریق انرژی این کاربران به شبکه است. در شبکه‌ی توزیع دو نوع هزینه وجود دارد. هزینه‌ی اتصال[۲] که تنها یک بار پرداخت می‌شود و هزینه‌ی استفاده از سیستم[۳] که به صورت دوره‌ای توسط کاربر باید پرداخت شود. در [۱۵] هدف، انجام بهینه‌سازی به گونه‌ای است که اپراتور VPP قادر به بهره‌برداری بهینه‌ی اقتصادی با در نظر گرفتن قیود فنی مربوطه و عدم قطعیت‌های موجود در مسئله باشد. تابع هدف، حداکثر سازی سود VPP برای مشارکت در بازار انرژی روز بعد است. منابع انرژی پراکنده[٤] (DER) متعلق به VPP می‌توانند در شبکه‌های توزیع مختلفی قرار داشته باشند و امکان تفاوت بین قیمت‌های بازار در باس‌های اتصال به شبکه وجود دارد و همچنین VPP باید هزینه‌های استفاده از سیستم را به اپراتور سیستم توزیع پرداخت کند این هزینه‌ها توسط اپراتور سیستم

---

[۱] Distribution System Operator
[۲] Connection Charge
[۳] Use of System Charge
[٤] Distributed Energy Resources

توزیع تعیین می‌شود و به محل قرار گرفتن واحدهای DER و زمان وابسته است. در این کار این هزینه‌ها بر اساس محاسبه‌ی سهم افزایشی واحدهای DER در تلفات سیستم توزیع محاسبه می‌شوند.

۱-۳ اهداف تحقیق

همان طور که در بخش ۱-۲ دیده شد، مراجع متعددی در سال‌های اخیر به مسئله‌ی بهینه‌سازی سود VPP و شرکت در بازار برق پرداخته‌اند. هریک کارهای انجام شده در مواردی نظیر اجزای تشکیل دهنده‌ی VPP، قیود در نظر گرفته شده برای مسئله و بازارهای هدف برای شرکت VPP، متفاوت هستند. در این میان مطرح شدن مفهوم شبکه‌ی هوشمند[۱] و لزوم حرکت شبکه‌ها به سمت هوشمندتر شدن از یک سو و پیشرفت زیرساخت‌های اندازه‌گیری، مخابراتی و پردازش داده در سیستم‌های قدرت از سوی دیگر، موجب اهمیت روزافزون ارائه‌ی مدل‌های جامع‌تر برای بهینه‌سازی سود VPP به عنوان بخشی از زیرساخت تولید هوشمند انرژی به منظور شرکت در بازارهای انرژی و خدمات جانبی شده است. مدل‌های پیشنهادی نیز باید مشارکت اجزای مختلفی را در VPP مد نظر قرار دهند.

بر این اساس هدف از این پایان‌نامه، ارائه‌ی یک مدل مبتنی بر SCPBUC[۲] به منظور بهینه‌سازی سود VPP با در نظر گرفتن بازارهای انرژی و ذخیره‌ی چرخان روز بعد است. مدل پیشنهادی علاوه بر نیازهای مربوط به تأمین بار الکتریکی VPP، قیود امنیت شبکه و نیازهای حرارتی VPP را مد نظر قرار می‌دهد. از ویژگی‌های مهم مدل پیشنهادی انعطاف‌پذیری آن در حضور اجزای مختلف نظیر CHP ها، بویلرها، ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی، منابع تولید تجدیدپذیر، خودروهای برقی و بارهای قابل قطع در VPP است که امکان استفاده از آن به منظور بهینه‌سازی سود VPP هایی با اجزای مختلف را ممکن می‌سازد. به عبارتی در این پایان‌نامه یک مدل جامع VPP نسبت به کارهای قبلی از لحاظ در نظر گرفتن هم‌زمان دو بازار، از لحاظ در نظر گرفتن انواع واحدها و عناصری که با کنترل آن‌ها می‌توان سود VPP را افزایش و برقراری قیود را تسهیل کرد، از لحاظ در نظر گرفتن هم‌زمان بارهای الکتریکی و حرارتی و از لحاظ در نظر گرفتن منابع تجدیدپذیر، ارائه و مسئله‌ی بهینه‌سازی متناظر با آن فرموله می‌شود.

در این پایان‌نامه پس از مروری بر تعاریف و مفاهیم VPP، برای دستیابی به هدف بالا با استفاده از برخی مدل‌های ارائه شده در مراجع مختلف و جمع‌بندی آن‌ها یک مدل جامع پیشنهاد می‌شود. مدل پیشنهادی با استفاده از یک سیستم تست ۳۳ باس مورد ارزیابی قرار گرفته است. از دیگر موضوعات مهم در مسئله‌ی بهینه‌سازی سود VPP، عدم قطعیت‌های موجود در مسئله از قبیل عدم قطعیت موجود در بار مصرفی VPP و عدم قطعیت موجود در تولیدات تجدیدپذیر است. به همین منظور در این پایان‌نامه علاوه بر برنامه‌ریزی قطعی، برنامه‌ریزی احتمالاتی نیز جهت حل مسئله‌ی بهینه‌سازی سود VPP انجام شده است. برای حل مسائل بهینه‌سازی از جعبه‌ابزار الگوریتم ژنتیک پیاده‌سازی شده در نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

---

[۱] Smart Grid
[۲] Security-constrained Price-based UC

۱-٤ ساختار پایان‌نامه

در این بخش ساختار پایان‌نامه و مطالب ارائه شده در هر فصل به منظور دستیابی به اهداف بالا توضیح داده می-شود. در فصل دوم مروری بر تعاریف و مفاهیم VPP انجام شده است و ضمن معرفی اجزای تشکیل دهنده‌ی VPP و روش‌های طراحی و کنترل آن، رویکردهای مختلف به موضوع تجمیع منابع انرژی پراکنده و تشکیل VPP مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل سوم بر اساس مدل‌های پیشنهادی در برخی از مراجع، سه مدل برای بهینه‌سازی سود VPP ارائه و توضیح داده می‌شود. در این فصل ضمن معرفی مفصل هر یک از مدل‌ها، فرضیات و اجزای تشکیل دهنده‌ی هریک از آن‌ها توضیح داده می‌شود.

در ادامه و در فصل چهارم با جمع‌بندی ساختارها و مدل‌های ارائه شده در فصل سوم، یک مدل جامع مبتنی بر SCPBUC برای بهینه‌سازی سود VPP با شرکت در بازارهای انرژی و ذخیره‌ی چرخان روز بعد، پیشنهاد می‌شود. همان‌طور که اشاره شد مدل پیشنهادی اجزای مختلفی نظیر CHP ها، بویلرها، ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی، تولیدات تجدیدپذیر، خودروهای برقی و بارهای قابل قطع را در نظر می‌گیرد.

در فصل پنجم با استفاده از شبکه‌ی توزیع ۳۳ باس، مطالعات مختلفی برای ارزیابی قابلیت‌های مدل‌های ارائه شده در فصل‌های سوم و چهارم انجام شده است. در این فصل با مطالعه‌ی VPP ها با اجزای مختلف، مسئله‌ی بهینه‌سازی سود برای آن‌ها حل شده و در هر مطالعه با تحلیل نتایج بدست آمده، کارایی مدل‌ها در بهینه‌سازی سود VPP مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

در مدل‌های ارائه شده در فصل های سوم و چهارم کلیه‌ی پارامترها به صورت قطعی[۱] مدل می‌شوند. در عمل برخی از پارامترهای موجود در مسئله‌ی بهینه‌سازی سود VPP دارای عدم قطعیت‌هایی هستند که می‌توانند بر نتایج بدست آمده از حل مسئله تأثیر گذار باشند. به همین منظور در فصل ششم ضمن مرور مختصر مفاهیم برنامه‌ریزی تصادفی، یک مدل احتمالاتی برای بهینه‌سازی سود VPP با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در بار مصرفی VPP و تابش خورشیدی ارائه می‌شود. در این فصل نیز به منظور ارزیابی مدل ارائه شده، پیاده‌سازی آن بر روی شبکه‌ی توزیع ۳۳ باس انجام شده است.

در نهایت در فصل هفتم، ضمن مرور نتایج بدست آمده، برخی پیشنهادات جهت ادامه‌ی کار ارائه می‌شود.

---

[۱] Deterministic

فصل دوم
تعاریف و مفاهیم نیروگاه مجازی

۲-۱ مقدمه

هدف از این فصل، ارائه‌ی مفاهیم و تعاریف اولیه‌ی نیروگاه مجازی و معرفی اجزای تشکیل دهنده‌ی آن است. در سیستم‌های قدرت مرسوم، انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های مرکزی بزرگ تولید و از طریق خطوط انتقال و توزیع و طی مسافت‌های طولانی به دست مصرف‌کنندگان می‌رسد. انتقال توان از دوردست موجب بروز مسائل پایداری و کنترل ولتاژ، تلفات توان قابل توجه و سرمایه‌گذاری‌های بزرگ در ساخت نیروگاه‌های بزرگ مرکزی و خطوط انتقال طولانی است. برای کاهش این گونه مشکلات، تأمین بخشی از توان موردنیاز سیستم در نزدیک مصرف‌کننده-ها به شکل منابع تولید پراکنده مطرح شده است. افزایش ضریب نفوذ و ظرفیت نصب شده‌ی منابع پراکنده به همراه برخی از مشخصات آن‌ها مثل متغیر و غیرقابل پیش‌بینی بودن منابع مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر، می‌تواند مشکلات جدیدی مثل تغییر جهت جریان توان در فیدرهای توزیع، اضافه بار خطوط و سایر عناصر سیستم را ایجاد نماید. بخصوص هنگامی که هر منبع پراکنده به طور مستقل نسبت به سایر منابع و وضعیت عملکردی شبکه، نصب و مقدار آن‌ها زیاد شود علاوه بر ایجاد مشکلاتی برای شبکه، از پتانسیل آن‌ها نیز به‌طور کامل بهره‌برداری نمی‌شود. به منظور استفاده‌ی حداکثری از توانایی‌ها و پتانسیل‌های منابع پراکنده و حداقل کردن اثرات نامطلوب آن‌ها روی شبکه، مفهوم نیروگاه مجازی ارائه شده است. نیروگاه مجازی، مجموعه‌ای از واحدهای تولید پراکنده، بارهای قابل کنترل و سیستم‌های ذخیره‌کننده‌ی انرژی هستند که به منظور بهره‌برداری به عنوان یک واحد نیروگاهی با هم مدیریت می-شوند[۱۶].

۲-۲ برخی تعاریف ارائه شده برای نیروگاه مجازی

تولید توان در جهان به سمت افزایش استفاده از DG ها برای بهبود بازده انرژی و استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر است. سیاست حال حاضر بیشتر بر روی اتصال DG ها به شبکه به جای ترکیب و هماهنگی بین DG های نصب شده تمرکز دارد. واضح است که تحت این سیاست، کار DG ها برای کنترل کننده‌ی سیستم قابل رؤیت نیست و سیستم برای مدیریت انرژی به واحدهای مرکزی بزرگ متکی خواهد بود. با افزایش مشوق‌ها برای به‌کارگیری روزافزون DG ها، این روش منجر به بالا رفتن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری سیستم و عدم بهره‌برداری مناسب از DGهای نصب شده می‌شود. برای کاهش این مشکل، DG باید به گونه‌ای بهره‌برداری شود که امکان مشارکت در بازارهای انرژی و خدمات جانبی را داشته باشد. این هدف با طرح مفهوم نیروگاه مجازی که تجمیع منابع انرژی پراکنده به منظور مبادله‌ی انرژی الکتریکی با شبکه و یا فراهم کردن خدمات پشتیبانی، امکان پذیر شده است. در حال حاضر یک توافق عام در مورد تعریف VPP وجود ندارد. در ادامه به برخی از تعاریف ارائه شده برای VPP اشاره می‌شود.

پروژه‌ی نیروگاه مجازی پیل سوختی اتحادیه‌ی اروپا، نیروگاه مجازی را به عنوان گروهی از CHP های کوچک غیرمتمرکز مرتبط به هم تعریف می‌کند که از فناوری پیل سوختی نصب شده در خانه‌ها، کارخانه‌های کوچک و اماکن عمومی، برای تولید حرارت و الکتریسیته استفاده می‌کنند.

براساس تعریف پروژه‌ی تحقیقاتی موسوم به Fenix، نیروگاه مجازی به عنوان ویژگی انعطاف‌پذیری واحدهای DER درنظر گرفته می‌شود که برای قرارداد در بازار عمده فروشی و پیشنهاد خدمات به اپراتور سیستم استفاده می‌شود[۵].

در [۱۷]، VPP به عنوان یک ریزشبکه‌ی مستقل تعریف شده است و در [۱۸]، VPP به عنوان تجمیع انواع منابع تولیدی که در نقاط مختلف شبکه‌ی توزیع، پراکنده شده‌اند تعریف می‌شود. در [۱۹]، VPP به عنوان تجمیع واحدهای CHP که به شبکه‌ی توزیع ولتاژ پایین متصل‌اند، تعریف شده است.

یکی از اهداف ارائه‌ی مفهوم VPP، هماهنگ کردن منابع پراکنده به منظور مبادله‌ی انرژی الکتریکی بین هم یا با شبکه‌ی بالادست یا فراهم کردن خدمات پشتیبانی برای سیستم است. نیروگاه مجازی، می‌تواند ترکیب انواع تولیدات تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر و وسایل ذخیره‌کننده‌ی انرژی باشد، به گونه‌ای که در بازار به عنوان یک نیروگاه با خدمات مورد انتظار ظاهر می‌شوند. به عبارت دیگر می‌توان تولید توان توسط منابع مختلف انرژی و وسایل ذخیره‌کننده‌ی انرژی با توجه به نقاط ضعفی همچون خروجی متغیر و نقاط قوتی مثل ذخیره‌ی کوتاه مدت انرژی به مقدار زیاد را برای تکمیل یکدیگر، با هم ترکیب نمود. مفهوم VPP می‌تواند به اجتماع واحدهای تولید پراکنده‌ی توزیع شده در یک ناحیه‌ی جغرافیایی بزرگ به عنوان یک واحد تولید توان بزرگ قابل کنترل تعمیم یابد[۵].