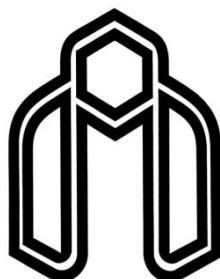


به نام خداوند جان و خرد

کزین برتر اندیشه برنگذرد



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات

گروه: هوش مصنوعی

تأثیر شبکه هوشمند بر امنیت سیستم قدرت

محمود سلیمی

استاد راهنما:

دکتر علی اکبر پویان

اساتید مشاوره:

دکتر مرتضی رحیمیان

مهندس فاطمه جعفری نژاد

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : مهندسی کامپیوتر

گروه : هوش مصنوعی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محمود سلیمی

تحت عنوان: تأثیر شبکه هوشمند بر امنیت سیستم قدرت

در تاریخ ۹۲/۱۱/۲۷ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی کامپیوتر- گرایش هوش مصنوعی مورد ارزیابی و با درجه خوب مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : دکتر علی اکبر پویان
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
ع.ع	نام و نام خانوادگی : مهندس علی بازقندی		نام و نام خانوادگی : دکتر حسین مروی
			نام و نام خانوادگی : دکتر وحید ابوالقاسمی
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم به پدر و مادر کرامی ام آمان که وجودم برایشان همه نخب بود و وجودشان برایم، همه مهر.

توانشان رفت تا به توانایی برسم و مویشان سید کشت تا رویم سید بماند.

آمان که راستی قاسم، در شکستی قاشان تجلی یافت و آمان که فروغ نگاهشان، گرمی کلاشان و روشنی رویشان سرمایه‌های

جادوئی زندگانی ام است.

در برابر وجود کرامیشان زانوی ادب بر زمین می‌نم و با دلی مملو از عشق و محبت و خضوع بردستان پر مهرشان بوسه می‌زنم.

و

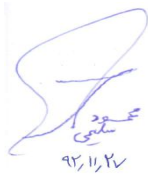
تقدیم به همسری دلوز و هم‌ای مهربان.

سر و وجودشان، همواره سرسبز و استوار باد.

تعهد نامه

اینجناب محمود سلیمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی کامپیوتر گرایش هوش مصنوعی دانشکده مهندسی کامپیوتر دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تأثیر شبکه هوشمند بر امنیت سیستم قدرت تحت راهنمایی آقای دکتر علی اکبر پویان متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجناب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .



محمود سلیمی
۹۳/۱۱/۲۷

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

رشد سریع تقاضا و گسترش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در سیستم قدرت، حفظ امنیت در این صنعت را دچار چالش کرده است. رویکرد این سیستم در تأمین به موقع و بهینه الکتریسیته مورد نیاز مصرف‌کننده، استفاده از منابع تجدیدپذیر است. بکارگیری این منابع، افزایش عدم قطعیت در تخمین دقیق توان خروجی را بدنبال داشته و کنترل خروجی سیستم قدرت را دشوارتر نموده است. نتیجه آن کاهش توانایی سیستم قدرت در تأمین به موقع و کم هزینه بار مصرفی می‌باشد.

در سال‌های اخیر از فناوری شبکه هوشمند برای رفع مشکلات سیستم قدرت موجود استفاده شده است. ساختار این شبکه، با استفاده از فناوری اطلاعات و ارتباطات^۱ (ICT) و ارتباط دوطرفه^۲، به تعامل هرچه بهتر مصرف‌کننده و تولیدکننده کمک می‌کند. در حقیقت وجود این بستر مخابراتی هوشمند، دقت پیش بینی بار مصرفی توسط بخش تولید را افزایش می‌دهد و امنیت سیستم قدرت را تقویت می‌کند. همچنین، کیفیت سرویس‌دهی برای تأمین اقتصادی بار را بهبود می‌بخشد.

در این پایان‌نامه، به بررسی روش ارائه شده برای بهبود امنیت دینامیک پایدار^۳ (RDS) در برابر افزایش عدم قطعیت ناشی از وجود منابع انرژی تجدیدپذیر^۴ (RE) و نیز فرموله‌سازی پخش بار دینامیک^۵ (DELD) در فاصله اطمینان پرداخته شده است. این نوع پخش بار، عملکرد امن سیستم قدرت را تضمین می‌کند. برای کنترل کردن عمل پخش بار در فاصله اطمینان در این روش از شبکه هوشمند به عنوان کنترل‌کننده زمانبندی تولید استفاده شده است.

کلمات کلیدی: پارامترهای عدم قطعیت، شبکه هوشمند، فناوری انتقال اطلاعات و ارتباطات دوطرفه،

^۱ - Information and Communication Technology

^۲ - Interactive Customer Gateway

^۳ - Robust Dynamic Security

^۴ - Renewable Energy

^۵ - Dynamic Economic Load Dispatch

امنیت، پخش بار اقتصادی بار، فاصله اطمینان، امنیت دینامیک پایدار، پخش بار دینامیک.

- ۱- M. salimi, Ali a. pouyan, "A Generalized Stochastic Petri Nets based model for intelligent self-healing in smart grid", JournalofTelecommunications, submitted

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول (مفاهیم اولیه و تعاریف)
۲	مقدمه
۴	۱-۱ تعاریف
۲۸	۲-۱ بیان مسئله
۲۸	۳-۱ ساختار پایان نامه
۳۱	فصل دوم (مروری تحلیلی بر کارهای انجام شده)
۳۲	۱-۲ مروری بر کارهای انجام شده
۴۳	فصل سوم (شبکه هوشمند)
۴۴	۱-۳ شبکه هوشمند
۵۰	۲-۳ دلایل رویکرد ما به شبکه هوشمند
۵۲	۳-۳ مقایسه شبکه‌های هوشمند و سیستم قدرت موجود
۵۹	فصل چهارم (روش پیشنهادی تأثیر شبکه هوشمند بر امنیت سیستم قدرت)
۶۲	۱-۴ تعریف امنیت سیستم قدرت پایدار
۶۷	۲-۴ محدوده عملکرد دینامیک
۶۸	۳-۴ محدوده امنیت دینامیک پایدار
۷۲	۴-۴ مسئله پخش بار اقتصادی دینامیک به همراه عدم قطعیت
۷۳	۵-۴ مسئله پخش بار اقتصادی دینامیک پایدار

۷۴	۶-۴ بیان عدم قطعیت
۷۵	۷-۴ محدوده عملکرد دینامیک پایدار (RTDF)
۷۷	۸-۴ تعمیم به امنیت دینامیک پایدار
۷۷	۹-۴ محدودیت‌های امنیتی جریان خط برای مفهوم RSS
۸۰	۱۰-۴ DELD با امنیت پایدار
۸۱	۱۱-۴ شکل کنترل پایدار لحظه‌ای
۸۴	۱۲-۴ نتیجه‌گیری
۸۵	فصل پنجم (محدودیت‌ها، کارهای مربوط به آینده و نتیجه‌گیری)
۸۶	۱-۵ شبیه‌سازی شرایط
۹۲	۲-۵ نتایج و بحث‌ها
۹۶	۳-۵ نتیجه‌گیری از مطالب بیان شده در مورد DELD
۹۶	۴-۵ آزمایش کلی پایداری گذرا
۱۰۴	۵-۵ آزمایش TS برای غرب ژاپن
۱۰۷	۶-۵ امنیت آینده با افزایش سطح نفوذ PV
۱۰۹	۷-۵ نتیجه‌گیری
۱۱۰	۸-۵ برآورد و تخمین توان خروجی مولد الکتریسیته مربوط به انرژی خورشیدی
۱۱۴	۹-۵ شبیه‌سازی
۱۲۱	۱۰-۵ نتیجه‌گیری
۱۲۲	۱۱-۵ محدودیت‌های موجود در روش معرفی شده
۱۲۳	۱۲-۵ راهکارها و پیشنهادهای جهت بهبود سیستم قدرت

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۴	شکل (۱-۱): ساختار پایه‌ای سیستم قدرت
۵	شکل (۲-۱): تفاوت تولید توزیع شده و تولید متمرکز
۱۱	شکل (۳-۱): رسم توضیحی
۱۳	شکل (۴-۱): نمودار تغییرات عرضه و تقاضا
۲۴	شکل (۵-۱): ابعاد زمان و سناریو در پخش بار هوشمند
۳۴	شکل (۱-۲): مدل همه جانبه از COP
۳۵	شکل (۲-۲): کنترل پخش بار
۳۹	شکل (۳-۲): الگوریتم کنترل پخش بار هوشمند
۴۵	شکل (۱-۳): تجهیزات شبکه هوشمند در بخش مصرف
۵۴	شکل (۲-۳): ساختار یک طرفه سیستم قدرت موجود
۵۴	شکل (۳-۳): ساختار سلسله مراتبی سیستم قدرت
۵۶	شکل (۴-۳): ساختار سیستم قدرت هوشمند
۶۶	شکل (۱-۴): محدوده اطمینان برای پارامترهای غیرقطعی
۷۰	شکل (۲-۴): محدوده عملکرد و امنیت دینامیک
۷۸	شکل (۳-۴): تعیین حدود امنیت به کمک جریان بار تصادفی
۸۲	شکل (۴-۴): کنترل هوشمند تولید و پخش بار DELD در RDS
۸۷	شکل (۱-۵): شبیه‌سازی مدل

- ۸۸ شکل (۲-۵). الگوی تقاضا، PV و عملکرد باطری
- ۹۰ شکل (۳-۵). نمودار موقعیت ذرات در الگوریتم PSO
- ۹۲ شکل (۴-۵). تحمل خطای پیش‌بینی
- ۹۳ شکل (۵-۵). محدوده عملکرد (RTDF) و زمانبندی در طول روزهای هفته
- ۹۴ شکل (۶-۵). محدوده عملکرد (RTDF) در ساعت ۱۰:۰۰ در طول روزهای هفته
- ۹۵ شکل (۷-۵). زمانبندی پخش بار
- ۹۷ شکل (۸-۵). مدل معادل ۳- ماشین در سیستم غرب ژاپن
- ۹۸ شکل (۹-۵). تنظیم محدوده اطمینان (توان خروجی مولد PV)
- ۹۹ شکل (۱۰-۵). محدوده امنیت استاتیک پایدار برای مورد ۱ (خطا در A)
- ۱۰۰ شکل (۱۱-۵). محدوده RSS برای مورد ۱ (همه خطاهای A, B, C)
- ۱۰۰ شکل (۱۲-۵). عدم وجود محدوده RSS برای مورد ۲ (همه خطاهای A, B, C)
- ۱۰۱ شکل (۱۳-۵). سناریوی افزایش تقاضای توان الکتریکی در t_1 و t_2 (a)
- ۱۰۲ شکل (۱۴-۵). توان الکتریکی حاصل از تولید PV در t_1 و t_2 (b)
- ۱۰۲ شکل (۱۵-۵). تغییرات RSS
- ۱۰۳ شکل (۱۶-۵). بازگشت به محدوده‌های عملکرد
- ۱۰۳ شکل (۱۷-۵). محدوده امنیت دینامیک پایدار (RDS)
- ۱۰۶ شکل (۱۸-۵). منحنی تقاضای موجود روزانه
- ۱۰۷ شکل (۱۹-۵). منحنی تقاضای بار و RDS برای سیستم قدرت فعلی
- ۱۰۸ شکل (۲۰-۵). سناریوهای تقاضای بار و نصب PV
- ۱۰۹ شکل (۲۱-۵). RDS در حداکثر تقاضای بار

- ۱۱۱ شکل (۲۲-۵). مفهوم پنجره زمانی برای محاسبه نوسان توان خروجی PV
- ۱۱۲ شکل (۲۳-۵). MFR (%) برای چند فاصله پنجره زمانی
- ۱۱۴ شکل (۲۴-۵). دامنه نوسان توان خروجی PV قبل (بالا) و بعد (پایین) نصب باطری ها
- ۱۱۹ شکل (۲۵-۵): نموداری که نشان دهنده ارتباط بین نفوذ PV و ناحیه RDS می باشد.
- ۱۲۱ شکل (۲۶-۵). موقعیت سنجی متقابل RSS، RTA و RDS که از ایمنی سیستم انرژی پایدارا بدست آمده است

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۵۳	جدول (۳-۱). مقایسه بین دو شبکه قدرت موجود و هوشمند
۸۲	جدول (۴-۱). مراحل زمانبندی تولید در الگوریتم جامع
۹۱	جدول (۵-۱). مشخصات مولدها
۹۱	جدول (۵-۲). مقادیر محاسبه شده به کمک الگوریتم PSO
۹۱	جدول (۵-۳). زمان‌های شروع و توقف
۹۱	جدول (۵-۴). اطلاعات خط
۹۵	جدول (۵-۵). هزینه سوخت و زمان CPU
۹۷	جدول (۵-۶). پیش‌بینی توان خروجی مولد PV
۱۰۳	جدول (۵-۷). ظرفیت‌های عرضه انرژی و تقاضاهای بار ماکزیمم در هر ناحیه [Unit: GW]
۱۰۵	جدول (۵-۸). تقاضاهای بار در t_1 و t_2 [Unit: GW]
۱۰۷	جدول (۵-۹). مقادیر RDS
۱۱۳	جدول (۵-۱۰). MFR برای ۱ دقیقه، ۲ دقیقه، ۱۰ دقیقه، ۲۰ دقیقه. پنجره‌های زمانی با یا بدون اثر هموارسازی
۱۱۵	جدول (۵-۱۱): نفوذ PV در هر ناحیه (واحد: GW)
۱۱۶	جدول (۵-۱۲). دامنه پیش‌بینی توان خروجی PV در t_1 و t_2 قبل از نصب و تنظیم باتری‌ها
۱۱۷	جدول (۵-۱۳). تنظیم باتری‌ها در هر ناحیه

فصل اول

مقدمه و تعاریف

(Introduction and Fundamental Definitions)

مقدمه

از سیستم قدرت به عنوان یکی از مهم‌ترین صنایع موجود در جهان می‌توان نام برد که همواره مهندسان در این حوزه‌ی انرژی سعی دارند تا این مجموعه را بهبود بخشند. سیستم‌های قدرت، مجموعه‌ای از تولید، انتقال و توزیع الکتریسیته هستند که به صورت یکپارچه و منظم در کنار هم کار می‌کنند. اولین شبکه برق با جریان مستقیم^۶ در ایالت متحده در سال ۱۸۸۲ در نیروگاه پرل استریت در شهر نیویورک توسط توماس ادیسون تاسیس گردید. این نیروگاه برای روشنایی منطقه جنوبی منهتن، جریان الکتریسته مستقیم^۷ تحویل می‌داد[۵]. در قرن ۲۰م این شبکه گسترده‌تر شد، طوری که در سال ۱۹۶۰ به بیش از هزاران مولد مرکزی رسید که به یکدیگر متصل شده بودند تا انرژی الکتریکی در بخش‌های مسکونی و صنعتی با قابلیت اطمینان بیشتر و ارزانتر تأمین شود[۱].

در طول سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۰، با رشد میزان تقاضا، تعداد ایستگاه‌های تولید هم زیاد شد طوریکه، تعدادی از آنها فقط برای حفظ تأمین بار بخش‌های مسکونی و صنعتی در ساعات اوج مصرف و سطوح مختلف قابلیت اطمینان استفاده می‌شد. در اواخر قرن ۲۰م با افزایش این مولدها، در کنار افزایش رشد میزان تقاضا، الگوی مصرف پایدارتری نسبت به گذشته حاصل شد[۸۵].

با افزایش تقاضا و پیچیده‌تر شدن صنعت برق، مفهوم امنیت در تأمین بار درخواستی اهمیت بیشتری پیدا کرد. از امنیت سیستم قدرت به عنوان مهم‌ترین جنبه در برنامه‌ریزی، طراحی و بهره‌برداری می‌توان نام برد که تحلیل آن از سال ۱۹۲۰ به رسمیت شناخته شده است[۳]. حساسیت این موضوع به اندازه‌ای است که در برخی موارد، عدم پایداری و اختلال در یک بخش کوچک از سیستم قدرت موجب قطعی و

^۶ - Alternative Current

^۷ - Direct Current

خاموشی گسترده در سیستم می‌شود. رشد سریع تقاضا و نیاز به منابع انرژی بیشتر برای تولید انرژی الکتریکی، باعث افزایش میزان استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر برای تولید الکتریسیته در سیستم قدرت شد. این امر، چالش‌های زیادی در تأمین امنیت بوجود آورد که موضوع بحث ما در این پایان نامه می‌باشد.

امنیت سیستم قدرت، توانایی تحمل و پایداری سیستم در مقابل اختلالات ناگهانی است. برای اینکه امنیت را تقویت کنیم، بایستی که میزان پاسخگویی به موقع و اقتصادی به تقاضای مصرف‌کنندگان را در هر لحظه بررسی کنیم و آن را به حداکثر کیفیت ارتقاء دهیم. پیش‌بینی کوتاه مدت بار مصرفی برای بررسی امنیت در سیستم قدرت نقش حیاتی دارد [۳]. بطور کلی، از یک ساعت تا حداکثر یک روز قبل، میزان تقاضای مصرف‌کنندگان را پیش‌بینی می‌کنیم و خروجی ساعت یا روز بعد را مطابق با پیش‌بینی همان لحظه تأمین می‌کنیم. اما، این تنها بخشی از عمل تقویت امنیت است چرا که، چالش امنیتی منابع انرژی تجدیدپذیر برای تولید انرژی الکتریکی مربوط به وجود پارامترهای غیر قطعی مثل عدم قطعیت در تغییر خروجی‌ها به واسطه وجود شرایط غیرقطعی آب و هوایی و نیز خطا در پیش‌بینی میزان تقاضای مصرف‌کنندگان است [۴]. بنابراین، برای داشتن یک سیستم قدرت امن، حفظ پایداری در برابر این چالش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

فناوری "شبکه هوشمند" نتیجه تکامل شبکه‌های موجود (اتوماسیون شبکه) است که شامل کنترل پیشرفته و اتوماسیون و نظارت بر تولید و توزیع آن می‌باشد [۴۴]. هدف طراحان از به کارگیری فناوری شبکه هوشمند حول سه محور اصلی مشترکین، ارتباطات و تجهیزات می‌باشد. شبکه هوشمند یک بستر ارتباطی دوسویه بین مصرف‌کننده و تولیدکننده ایجاد می‌کند، که از نظر اقتصادی و امنیت و بهره‌وری انرژی، مزایایی مثل کاهش خاموشی و تلفات، مدیریت مصرف، توسعه بازار خرده فروشی، یکپارچه‌سازی مولدهایی پراکنده و بسیار کوچک در مصرف برق را دارا می‌باشد. اما استفاده از این فناوری، چالش‌هایی را

نیز به همراه دارد، که از جمله: ضعف سیستم‌های مخابراتی فعلی در پیاده‌سازی شبکه هوشمند و نیاز به آموزش همگانی برای آشنایی با این فناوری می‌باشد.

۱-۱- تعاریف

کلیه تعاریف مربوط این بخش در منبع [۸] قابل مشاهده است.

۱-۱-۱- شبکه قدرت^۸

یک شبکه پیوسته از تجهیزات الکتریکی (شکل (۱-۱))، برای تحویل انرژی الکتریکی است. عملیات آن شامل تولید، انتقال توان الکتریکی و توزیع آن است.



شکل (۱-۱): ساختار پایه‌ای سیستم قدرت

۱-۱-۲- عناصر بخش تولید

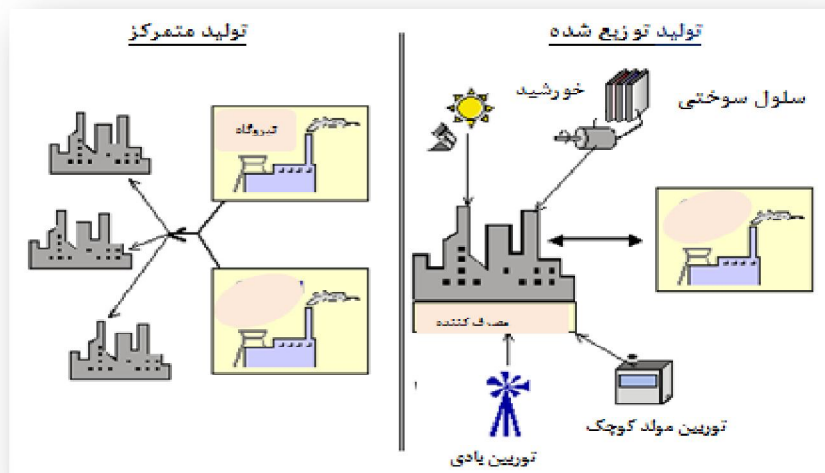
عناصر اصلی این بخش عبارتند از: مولد^۹، که وظیفه تولید انرژی الکتریکی را به عهده دارد. ترانسفورماتور^{۱۰}،

^۸ - Power Grid

که میزان ولتاژ را از یک سطح به سطح دیگری تبدیل می‌کند. منابع انرژی برای تولید الکتریسیته به دو دسته تجدیدپذیر^{۱۱} (تمام نشدنی)، شامل انرژی باد^{۱۲}، انرژی خورشید^{۱۳}، انرژی گرمایی زمین^{۱۴}، زیست سوخت^{۱۵} و... و تجدیدنپذیر (تمام شدنی)، شامل انرژی حاصل از سوختن زغالسنگ، گاز، نفت و ...، تقسیم می‌شوند [۶].

۱-۱-۳- تولید توزیع شده^{۱۶}

تولید توزیع شده (DG) یا پراکنده، یک رویکرد جدید در صنعت برق می‌باشد. از این نوع تولید با نام‌های دیگری از قبیل تولید نامتمرکز، انرژی نامتمرکز و انرژی توزیع شده نیز یاد می‌شود. برخلاف تولید متمرکز که از منابع متمرکز و اندک استفاده می‌شود، در تولید توزیع شده، منابع تولید زیادی به کار گرفته می‌شود و تلفات انتقال بار، کمتر و امنیت بیشتری برقرار است [۵۲] و [۵۳]. شکل (۱-۲)



شکل (۱-۲): تفاوت تولید توزیع شده و تولید متمرکز

- ^۹ - Generator
- ^{۱۰} - Transformer
- ^{۱۱} - Renewable
- ^{۱۲} - Wind
- ^{۱۳} - Solar Energy
- ^{۱۴} - Geothermal energy
- ^{۱۵} - Biomass
- ^{۱۶} - Distributed Generation

۱-۱-۴-بخش انتقال

ساختار این بخش به شکل شبکه هوایی یا زمینی با ولتاژ ۴۰۰، ۲۳۰ و ۱۳۲ کیلو ولت است. هدف آنانتقال انرژی الکتریکی از بخش تولید به سایر نواحی و سیستم توزیع می‌باشد. بخش‌های تشکیل دهنده آن، خطوط و پست‌های انتقال^{۱۷} و شبکه فوق توزیع^{۱۸} می‌باشد[۸]. اولین هدف یک سیستم انتقال، منتقل نمودن انرژی الکتریکی از یک شبکه(اعم از توزیع یا تولید) به شبکه دیگر(شبکه توزیع انتقال یا پست‌ها) در فاصله دورتر می‌باشد.

۱-۱-۵-باس^{۱۹}

یک باس از یک هادی یا گروهی از هادی‌ها تشکیل شده است که برای ارتباط بین دو یا چند مدار استفاده می‌شود. هدف از باس الکتریکی انتقال جریان است. در پست‌های الکتریکی برای اتصال تجهیزات استفاده می‌شود.

۱-۱-۶- تلفات

انرژی تولید شده منهای انرژی مصرف شده را تلفات گوئیم و مجموعه اقداماتی که برای حفظ پایداری و قابلیت اطمینان و غیره انجام می‌گیرد، کنترل شبکه گوئیم.

۱-۱-۷- فیدر

به معنای ورودی یا خروجی می‌باشد و معنای لغوی آن، تغذیه کننده است.

^{۱۷} - Transmission Substation

^{۱۸} - Hyperdistribution

^{۱۹} - Bus

۱-۱-۸- سویچینگ^{۲۰}

دستگاهی برای باز یا قطع کردن مدار الکتریکی و یا منحرف نمودن جریان از یک هادی به هادی دیگر را سوئیچ و عمل سوئیچ کردن را سوئیچینگ می‌نامیم.

۱-۱-۹- پست^{۲۱} (ایستگاه برق قدرت)

محل نصب و نگهداری ادوات و دستگاه‌های مربوط به انتقال برق را پست می‌نامیم. در حقیقت، عملی که پست انجام می‌دهد، تبدیل ولتاژ یا سویچینگ برق و یا ترکیب هر دو عمل است.

۱-۱-۱۰- پایداری در سیستم قدرت

پایداری سیستم قدرت عبارتست از توانایی سیستم قدرت در حفظ حالت تعادل در شرایط بهره‌برداری سیستم و یافتن نقطه عملیاتی متعادل جدید پس از ایجاد خطا.

۱-۱-۱۱- انواع پایداری در سیستم قدرت

پایداری در سیستم قدرت‌های قدرت به سه دسته تقسیم می‌شود:

پایداری ماندگار، پایداری گذرا و پایداری دینامیک

• پایداری ماندگار

به توانایی سیستم در حفظ پایداری پس از یک اغتشاش بسیار کوچک گفته می‌شود.

^{۲۰} - Switching

^{۲۱} - Substation

• پایداری گذرا

به توانایی سیستم در حفظ پایداری و میرا کردن نوسانات پس از یک اغتشاش شدید گفته می‌شود. یک سیستم واقعی در صورت اعمال خطا زمانی پایدار است که متغیرهای آن، وقتی که زمان به سمت بینهایت میل می‌کند، به مقادیر حالت ماندگار نزدیک شود. بررسی پایداری بعد از یک اغتشاش شدید، مطالعات پایداری گذرا نامیده می‌شود.

ساده‌ترین روش برای تحلیل پایداری گذرا، روش گام به گام حل معادلات دیفرانسیلی است.

• پایداری دینامیک

به توانایی سیستم در حفظ شرایط جدید پس از نوسانات ایجاد شده توسط یک اغتشاش با دامنه کم گفته می‌شود. اگر به یک سیستم قدرت اغتشاشی وارد شود فرکانس، زاویه بار و ولتاژ تمام واحدها دچار نوساناتی می‌شود که معمولاً در طول چند ثانیه از بین می‌روند و سیستم در شرایط جدید آرام می‌گیرد.

۱-۱-۱۲-بخش توزیع

بخش توزیع بخشی از سیستم قدرت است که پست‌های توزیع را به تجهیزات برق در محل مصرف‌کننده متصل می‌کند، که به دو بخش اولیه و ثانویه تقسیم می‌شود. خطوط توزیع اولیه در محدوده ۴ تا ۵/۳۴ کیلو ولت است و بار را در مناطق جغرافیایی کاملاً تعریف شده، تأمین می‌کنند. برخی از مصرف‌کنندگان صنعتی مستقیماً از طریق فیدرهای اولیه^{۲۲} تأمین می‌شوند. توزیع ثانویه، ولتاژ را برای مصرف‌کنندگان تجاری و خانگی کاهش می‌دهد. خطوط و کابل‌هایی که کمتر از چندین کیلومتر طول دارند انرژی الکتریکی را به هر یک از مصرف‌کنندگان تحویل می‌دهند.

^{۲۲} -Primery Feeders

۱-۱-۱۳-بخش بار

بار سیستم‌های قدرت به صنعتی، تجاری و خانگی تقسیم بندی می‌شوند. بخش بزرگی از بار تجاری و خانگی شامل روشنایی، گرمایش و سرمایش است. این نوع بار مستقل از فرکانس است.

۱-۱-۱۴-تأمین برق^{۲۳}

عبارت است از پاسخگویی توسط سیستم توزیع به مصرف‌کنندگان انرژی در سطح متعهد شده، با ولتاژ استاندارد فرکانس ۵۰ هرتز که میزان نوسان آن $0/3$ مثبت و منفی، است.

۱-۱-۱۵-مشتری^{۲۴}

منظور، استفاده کننده نهایی انرژی یا خدمات است. مشتری مدیریت بخش مصرف را بر عهده دارد و می‌تواند انرژی را هم تولید و هم ذخیره کند. بطور کلی، سه نوع مصرف کننده با حوزه‌های کاری مخصوص به خود وجود دارد: مسکونی، تجاری و صنعتی.

۱-۱-۱۶-مشتری توزیع

یک مشتری در محدوده خدمات یک کمپانی می‌باشد که توسط آن کمپانی سرویس‌دهی می‌شود.

۱-۱-۱۷-سرویس توزیع

منظور از سرویس توزیع، تحویل انرژی و توان الکتریکی با ولتاژ کمتر از $34/5$ کیلو ولت به مشتریان برای مصرف نهایی است.

^{۲۳} - Power Supply

^{۲۴} -Customer

۱-۱-۱۸-زمانبندی تولید

زمانبندی تولید با برنامه‌ریزی نحوه استفاده از منابع، روندی را تعیین می‌کند که با توجه به محدودیت‌های منابع، نتایج حاصل از بهره‌برداری از آنها در دراز مدت ماکزیمم شود.

۱-۱-۱۹-سرویس انتقال

منظور، انتقال انرژی و توان الکتریکی با ولتاژ مشخص در طول تعرفه‌های مورد دسترسی شرکت توزیع نیرو می‌باشد.

۱-۱-۲۰-نمودار استخوان ماهی^{۲۵}

نمودار ایشیکاوا (استخوان ماهی) روشی مفید و ارزشمند در حل و شناسایی مسائل است. علت نامگذاری این فرایند حل مسئله به « استخوان ماهی »، به دلیل شکلی است که این نمودار بعد از جمع آوری اطلاعات به صورت بصری به خود می‌گیرد که شبیه به اسکلت ماهی است. ایشیکاوا در این فرایند(شکل(۱-۳))، مسئله خود را روی سر ماهی می‌نویسد و اجزاء و اطلاعات مسئله به صورتی در نمودار و شاخه‌ها قرار می‌گیرد که در نهایت، تمامی اطلاعات به همراه نمودار به صورت تصویری و به شکل اسکلت ماهی ترسیم می‌شود.

چند نمونه از مزایای این الگو را در ادامه بیان شده است:

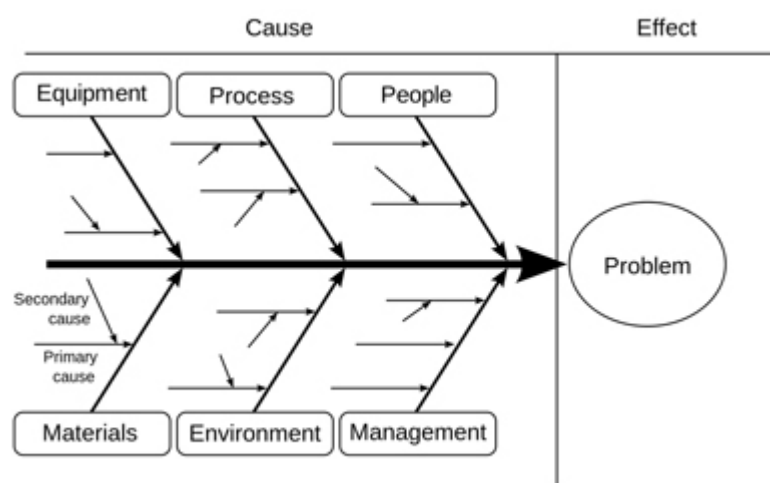
✓ با استفاده از این روش، فرد یا گروه، می‌تواند تمام اجزای مسئله را بررسی کند و بعدتصمیم گیری کند.

^{۲۵} - Fish-Bone

✓ این تکنیک، روابط بین علل را به شکل بصری نمایش می دهد و باعث می شود اهمیت نسبی علتها مشخص گردد.

✓ باعث تشویق و بروز خلاقیت می شود زیرا توجه فرد را به ابعاد مسئله کانالیزه می کند.

✓ باعث جلوگیری از محدود نگری و افزایش کل نگری می شود و به فرد یا گروه این امکان را می دهد تا تمام ابعاد مسئله را بررسی کند.



شکل (۱-۳). رسم توضیحی [۸۲]

۱-۱-۲۱- شبکه دسترسی^{۲۶}

شبکه دسترسی، بخشی از یک شبکه است که مشترکین را به سرویس دهنده فوری (ISP) متصل می کند.

۱-۱-۲۲- ساختار اندازه گیری پیشرفته (AMI)^{۲۷}

این ساختار وابسته به اندازه گیری انرژی الکتریکی و ارتباطات است، که شامل اندازه گیریهای با قابلیت ارتباط دوطرفه است [۳۶]. در حال حاضر، بهره برداران سعی دارند که بخش عرضه/تقاضای مسکونی و

^{۲۶} - Access network

^{۲۷} - Advanced Metering Infrastructure

مکانیزم اصلی محاسبه هزینه دینامیک برق مصرفی را با این فناوری (AMI) مجهز کند.

۱-۱-۲۳- جمع آوری کننده^{۲۸}

یک سیستم در شبکه هوشمند است که برای جمع آوری انرژی تولیدی استفاده می‌شود.

۱-۱-۲۴- سیستم مدیریت باطری^{۲۹} (BMS)

این سیستم کار کنترل و نظارت بر انرژی ذخیره شده را انجام می‌دهد.

۱-۱-۲۵- تحلیل احتمال^{۳۰} (CA)

تحلیل احتمال به عنوان راهکاری در مقابله با مسئله عدم قطعیت در سیستم قدرت استفاده می‌کند. در واقع، این راهکار یک نوع تحلیل "چه می‌شد اگر" است. با این عبارت، یک راه حل خارجی برای اتفاقات شبکه ارائه می‌دهد. زمانی که تعداد پارامترهای مسئله متنوع هستند، این روش، کاربردی تر می‌باشد.

۱-۱-۲۶- سیستم اطلاعات مصرف کننده^{۳۱} (CIS)

یک عملیات نرم افزاری است که کار هماهنگ کردن ارتباط با مصرف کننده، ارائه صورت حساب و دیگر عملیات وابسته را انجام می‌دهد.

۱-۱-۲۷- عرضه تقاضا^{۳۲} (DR)

یک ویژگی شبکه هوشمند است که به مشتریان این اجازه را می‌دهد که الگوی مصرفی خود را در طول

^{۲۸}- Aggregator

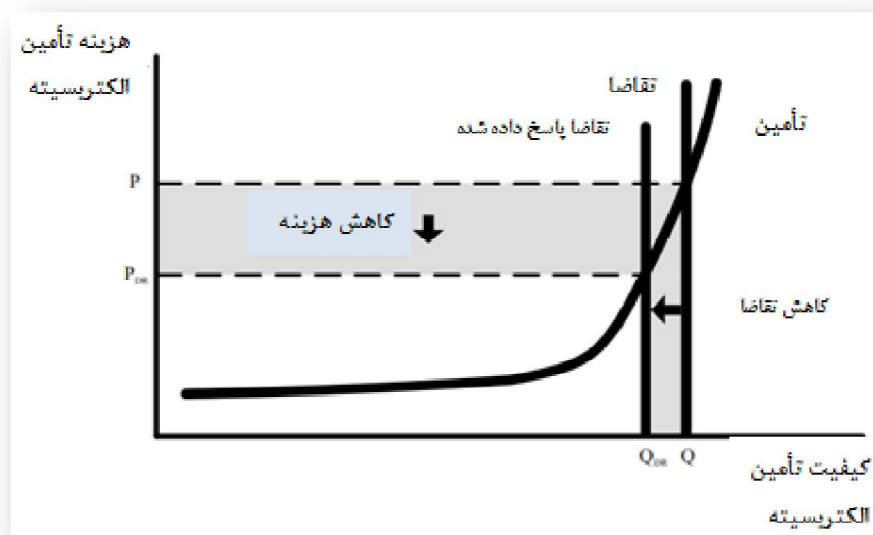
^{۲۹}-Battery Management System

^{۳۰}-Contingency Analysis

^{۳۱}-Customer Information System

^{۳۲}-Demand Response

زمان اوج مصرف، کاهش و یا تغییر دهند [۱۰]. مکانیزم‌ها و تسهیلات برای بهره‌برداری مشتریان تجاری و مسکونی برای قطع کردن انرژی در حال مصرف در زمان اوج مصرف یا وقتی که قابلیت اطمینان در معرض خطر قرار دارد، در نظر گرفته می‌شود. برای بهینه سازی در تعادل بین تأمین و تقاضای برق، عرضه/تقاضا نقش اساسی دارد، (شکل (۱-۴)).



شکل (۱-۴). نمودار تغییرات عرضه و تقاضا [۴۳]

۱-۱-۲۸- منابع انرژی توزیع شده (DER)^{۳۳}

منظور از DER، تسهیلات انرژی تولیدی و ذخیره شده محلی در سیستم توزیع و انتقال قدرت یا در بخش امکانات مشتری است.

۱-۱-۲۹- سیستم مدیریت توزیع (DMS)^{۳۴}

این سیستم، در مقابل سیستم مدیریت انرژی قرار دارد و مرکز کنترل برای شبکه توزیع می‌باشد.

^{۳۳}-Distributed Energy Resources

^{۳۴}-Distribution Management System

۱-۱-۳۰- حوزه عملکرد^{۳۵} (DF)

یک حوزه عملکرد در شبکه هوشمند جایگزین یک مجموعه از دستگاه‌ها و امکانات مجزا است. این حوزه بوسیله اپراتورها و مشتریان سیستم قدرت برای رسیدن به اهداف خاصی به کار می‌رود که شامل [۱۱]: تولید پراکنده، انتقال، توزیع، مشتریان، عملکردها، بازارها و سرویس‌های تولید می‌باشد.

۱-۱-۳۱- برنامه کنترل تولید^{۳۶} (GCA)

برنامه کنترل تولید یک نرم‌افزار طراحی شده برای ارائه یک پخش کننده‌ی بار در مراکز بزرگ کنترل شبکه قدرت است. این نرم‌افزار قابلیت مدیریت تغییرات تولید بار، زمانبندی مبادلات و انتقال بار در محدوده‌های مشخص در طول روز و تقریباً به صورت لحظه‌ای را دارد [۱۱].

۱-۱-۳۲- تعیین هزینه دینامیک^{۳۷}

تعیین هزینه دینامیک، یک سیاست برای شارژ کردن مشتریان در نرخ‌های متنوع است، در حقیقت، این سیاست نوسانات قیمت را که در هر لحظه اتفاق می‌افتد به مشتریان اطلاع رسانی می‌کند.

۱-۱-۳۳- دستگاه انرژی^{۳۸}

این دستگاه، ابزاری است که در مراحل انتهایی شبکه قدرت قرار دارد و انرژی الکتریکی را استفاده، کنترل، نظارت، ذخیره و بازیابی و تأمین می‌کند.

^{۳۵} -Domain

^{۳۶} -Generation Control Application

^{۳۷} -Dynamic Pricing

^{۳۸} -Energy device

۱-۱-۳۵-عدم قطعیت در سیستم قدرت^{۳۹}

منظور از اصطلاح "عدم قطعیت" در سیستم قدرت، شرایط غیرقابل پیش‌بینی در برآورد برخی پارامترها شامل میزان تقاضای مشتریان (برای یک روز یا چند لحظه‌ی بعد) و میزان خروجی منابع انرژی تجدیدپذیر مثل توربین بادی که تحت تأثیر شرایط آب و هوایی می‌باشد، است.

۱-۱-۳۶-سیستم مدیریت انرژی^{۴۰} (EMS)

یک سیستم کامپیوتری، که شامل یک محیط نرم افزاری است. این سیستم، سرویس‌های پشتیبانی پایه‌ای و یک سری امکانات برای ایجاد تسهیلات در تولید و انتقال الکتریسیته را فراهم می‌سازد تا امنیت کافی در تأمین بار با کمترین هزینه وجود آید.

۱-۱-۳۷-گذرگاه^{۴۱} (GW)

گذرگاه، یک مجموعه از توابع است که تجهیزات شبکه مشتری را به یک شبکه دسترسی متصل می‌کند.

۱-۱-۳۸-شبکه خانگی^{۴۲}

این شبکه، توزیع انرژی الکتریکی در داخل محیط خانه را فراهم می‌سازد.

۱-۱-۳۹-سرور خانگی^{۴۳}

یک سرور جای داده شده در خانه می‌باشد که کار کنترل و مدیریت تجهیزات مشتری را انجام می‌دهد.

^{۳۹} - Uncertainty in powr system

^{۴۰} -Energy Management System

^{۴۱} - Gateway

^{۴۲} - Home Grid

^{۴۳} -Home Server

۱-۱-۴۰- اپراتور سیستم مستقل^{۴۴} (ISO)

اپراتور سیستم مستقل، وسیله‌ای برای دسترسی به تسهیلات ضروری سیستم می‌باشد.

۱-۱-۴۱- فناوری ارتباطات و اطلاعات^{۴۵} (ICT)

این فناوری اغلب مفهومی گسترده‌تر از فناوری اطلاعات (IT) دارد، اما معمولاً یک مفهوم عمومی‌تر در بخش ارتباطات و ساختار سیگنال‌های بیسیم و خطوط تلفن (Telecommunication)، سیستم‌های مدیریت ساختار هوشمند و سیستم‌های صوتی-تصویری است که در فناوری اطلاعات نقش پررنگ‌تری دارد. ICT شامل همه تکنیک‌های هماهنگی اطلاعات و ارتباط هدفمند است.

۱-۱-۴۲- دستگاه الکترونیکی هوشمند^{۴۶} (IED)

این دستگاه در صنعت برق برای توصیف کنترل‌کننده‌های برپایه‌ی ریز پردازنده، که به ارتقاء سیستم قدرت منجر می‌گردد، استفاده می‌شود. این ارتقاء شامل اجزائی همچون قطع‌کننده، ترانسفورمر و بانک‌های خازنی می‌باشد [۱۳].

۱-۱-۴۳- مدیریت بار^{۴۷}

مجموعه استراتژی‌هایی است که برای کاهش یا انتقال تقاضا از زمان اوج مصرف به دیگر زمان‌های مصرف به کار برده می‌شود.

^{۴۴} -Independent Systems Operator

^{۴۵} -Information and Communications Technology

^{۴۶} -Intelligent Electronic Device

^{۴۷} -Load Managment

۱-۱-۴۴-سنسور^{۴۸}

یک سنسور یک جزء مشخص از شبکه الکتریکی می‌باشد که شامل حسگرهای استفاده شده در راه‌ها، نظارت بر دما، تأمین داده برای متعادل کردن تقاضا در زمان اوج مصرف است. این حسگرها یک جزء از ساختار شبکه هوشمند می‌باشند.

۱-۱-۴۵-سنسورهای اندازه‌گیری^{۴۹}

این سنسورها یک مجموعه از حسگرها هستند که جزئیات استفاده انرژی الکتریکی برای هر دستگاه مصرف انرژی در خانه را نظارت می‌کند.

۱-۱-۴۶-اپراتور^{۵۰}

ساختاری است که مسئول انتقال و یا توزیع انرژی الکتریکی است.

۱-۱-۴۷-اوج تقاضا^{۵۱}

یک دوره زمانی است که میزان تقاضا برای انرژی الکتریکی به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

۱-۱-۴۸-وظایف سیستم قدرت

هر سیستم قدرت وظیفه دارد که با حفظ سه ویژگی زیر، توان الکتریکی را تولید و تحویل مشتری بدهد. این ویژگی‌ها عبارتند از :

▪ ارزان بودن انرژی و توان تحویلی به مصرف کنندگان

^{۴۸}-Sensor

^{۴۹}- Metering Sensor

^{۵۰}-Operator

^{۵۱}-Peak Demand

- با کیفیت بودن انرژی و توان تحویلی به مصرف کنندگان
- تأمین امنیت انرژی و توان تحویلی به مصرف کنندگان

۱-۱-۴۹- کیفیت انرژی و توان الکتریکی

کیفیت انرژی و توان الکتریکی توسط شاخصهای زیر اندازه گیری می شوند [۱۴]

۱- شاخص دامنه ولتاژ :

- حالت عادی $0.95^{P.U} \leq V < 1.05^{P.U}$ (منظور میزان ولتاژ هر واحد است)

- حالت اضطراری $0.90^{P.U} \leq V < 1.05^{P.U}$

۲- شاخص فرکانس سیستم

$$49.75^{HZ} \leq V < 50.25^{HZ}$$

۱-۱-۵۰- قابلیت اطمینان^{۵۲} (امنیت و کفایت)

ابتدا مفهوم قابلیت اطمینان را مرور می کنیم؛ قابلیت اطمینان بر اساس دو معیار، ۱- امنیت ۲- کفایت، محاسبه می شود که هر کدام شاخصهای مخصوص به خود را دارند.

نیاز اولیه مشتریان در سیستم قدرت، در دسترس بودن انرژی در هر زمان است. طبق تعریف انجمن قابلیت اطمینان آمریکای شمالی (NERC)^{۵۳}، قابلیت اطمینان به عنوان درجه ای از عملکرد سیستم الکتریکی است که از مقایسه انرژی تحویل داده شده به مشتریان با استانداردهای قابل قبول و میزان درخواست آنها نتیجه گیری می شود [۶۱].

^{۵۲}- Reliability

^{۵۳}-North Energy Reliability Company

مهم‌ترین هدف سیستم قدرت افزایش قابلیت اطمینان در تحویل بار به مصرف‌کننده می‌باشد. معیار امنیت، هدف بررسی ما در این پایان‌نامه می‌باشد. به بیان ساده‌تر، امنیت در سیستم قدرت، حفظ پایداری سیستم در تحویل بار به مصرف‌کننده است و اینکه پخش اقتصادی بار به صورت پایدار در هر شرایطی همچنان ادامه داشته باشد. هر چقدر میزان عرضه به تقاضا نزدیکتر بشود، سیستم از امنیت بیشتری برخوردار است.

مفهوم امنیت خود شامل دو قسمت است، امنیت استاتیک^{۵۴} و امنیت دینامیک^{۵۵}. از یک سیستم قدرت باید به نحوی بهره‌برداری شود که در مقابل رخداد خطا پایدار باشد [۸۰].

۱-۱-۵۱-کفایت^{۵۶}

توانایی سیستم قدرت برای تأمین انرژی و برق مورد نیاز مشتری، در همه حالات با توجه به خروجی‌های برنامه‌ریزی شده و نشده اجزاء سیستم است.

۱-۱-۵۲-امنیت^{۵۷}

توانایی سیستم قدرت برای تحمل اختلالات ناگهانی همچون اتصال کوتاه یا تلفات پیش‌بینی نشده در اجزاء سیستم قدرت است.

۱-۱-۵۳-امنیت دینامیک

امنیت دینامیک سیستم معرف توانایی سیستم قدرت برای حفظ دامنه ولتاژ و توان عبوری از خطوط،

^{۵۴}-Static Security

^{۵۵}-Dynamic Security

^{۵۶}-Adequacy

^{۵۷}-Security

تغییرات فرکانس و حد حرارتی خطوط و ژنراتور در شرایط لحظه‌ای وقوع خطا در سیستم می‌باشد.

۱-۱-۵۴-امنیت استاتیک

امنیت استاتیک، توانایی سیستم در شرایط بعد از وقوع خطا برای کارکرد در محدوده‌ی مجاز می‌باشد (با فرض دارا بودن امنیت دینامیک)

۱-۱-۵۵-رمپ

رویداد رمپ به عنوان رویداد تغییر قدرت در هر بازه زمانی تعریف شده است. اگر تغییر قدرت مثبت است، آن را به عنوان یک رویداد سطح شیب‌دار بالا تعریف شده است. اگر تغییر قدرت منفی است، آن را به عنوان یک رویداد سطح شیب‌دار به پایین تعریف می‌شود. نرخ که رویداد سطح شیب‌دار است که به نام نرخ سطح شیب‌دار، که به عنوان تفاوت قدرت از دقیقه به دقیقه تعریف شده است، بنابراین واحد آن [MW/minute][۸۳].

۱-۱-۵۶-اسکادا (SCADA)^{۵۸}

اسکادا، مخفف عبارات (Acquisition Supervisory Control And Data) به معنای کنترل نظارتی و دستیابی به اطلاعات است. در واقع، اسکادا به عنوان یک بخش کنترلی در شبکه قدرت، عمل نظارت متمرکز بر داده‌های جمع‌آوری شده از دستگاه‌ها در طول شبکه، انتقال آنها به بخش کنترل مرکزی و کنترل از راه دور سنسورها و قطع‌کننده‌ها و ایستگاه‌ها توسط بخش کنترل مرکزی را به عهده دارد. این عملکرد توسط ماژول‌های سخت افزاری و مجموعه‌ای نرم افزار و یک ذخیره کننده انرژی برای مواقع اضطراری انجام می‌شود. به طور خلاصه عملکرد اسکادا شامل موارد زیر است [۴] و [۱۶]:

^{۵۸}- Supervisory Control And Data Acquisition

در اسکادا فرآیندهای زیر دنبال می‌شود:

- جمع‌آوری اطلاعات؛
- انتقال اطلاعات به مرکز کنترل؛
- تحلیل اطلاعات؛
- تهیه گزارش عملکرد و نتیجه‌گیری؛
- ارسال دستورات کنترلی؛

سامانه‌ای، شامل سیگنال‌های ورودی/خروجی، کنترل‌کننده‌ها، ذخیره‌کننده انرژی، دستگاه‌های ارتباط متقابل کاربر^{۵۹}، شبکه‌ها و ارتباطات، پایگاه داده و نرم‌افزار را ساختار اسکادا می‌نامند.

۱-۱-۵۷- پخش اقتصادی بار^{۶۰}

امروزه صنعت برق از مراکز تولید زیادی که همگی با هم مرتبط هستند، برای تولید برق استفاده می‌کند. در مجموع ظرفیت تولیدی حاصل از همه این مولدها بسیار بزرگتر از بار مورد تقاضای شبکه است. اینجاست که نقش مفهوم پخش اقتصادی بار و تنظیم بهینه میزان کار هر مولد از اهمیت بالایی برخوردار می‌شود، طوریکه مسئله پخش اقتصادی بار به بنیادی‌ترین چالش‌های سیستم قدرت تبدیل شده است. اساساً، این مسئله، یک مسئله بهینه‌سازی است و هدف آن کاهش هزینه نهایی واحدهای تولید انرژی الکتریکی، همراه با رعایت کردن محدودیت‌های هر مولد (نرخ رمپ، محدودیت تولید مولد) است. زیرا هر مولد علاوه بر محدودیت‌ها، هزینه‌های همچون هزینه سوخت مصرفی و هزینه تعمیر و نگهداری خود را دارد. هدف ما در مسئله پخش اقتصادی بار، به کارگیری این مولدها با حداقل هزینه است [۱۸] و [۱۹].

^{۵۹} - Interface Device

^{۶۰} - Economic Dispatching

به طور کلی، بهره برداری از امکانات تولید برای تولید انرژی، با هدف توزیع انرژی از مولدها به مصرف-کنندگان، طوری که سطح قابلیت اطمینان افزایش یابد و هزینه تولید به حداقل مقدار برسد را پخش اقتصادی بار می‌نامیم. دو مؤلفه اساسی برای پخش اقتصادی بار وجود دارد [۲۰] و [۴۹]:

○ برنامه‌ریزی روز بعد برای پخش بار

- برنامه‌ریزی واحدهای تولید برای هر ساعت از پخش بار برای روز بعد
- بر اساس پیش بینی بار برای روز بعد
- انتخاب واحدهای تولید برای در دسترس بودن پخش بار برای روز بعد
- تشخیص حدود عملکرد واحدها که شامل: الف) نرخ تغییرات سریع خروجی که مولد می‌تواند داشته باشد. ب) ماکزیمم و مینیمم سطوح تولید. ج) مینیمم و ماکزیمم مقدار توان که مولد تولید می‌کند. د) مینیمم زمانی که مولد خاموش می‌ماند.
- تشخیص ویژگی‌هایی که شامل هزینه تولید، که به دو عامل نرخ گرما و هزینه‌های عملکرد متغیر (هزینه متغیر سازگاری با شرایط محیطی و هزینه‌های راه‌اندازی) می‌باشد.
- زمانبندی برای روز بعد که توسط گروهی از اپراتورهای مستقل انجام می‌شود.

○ پخش بار امروز سیستم قدرت

- نظارت بر بار، تولید و مبادلات (ورودی‌ها و خروجی‌ها) برای اطمینان از متعادل بودن عرضه و تقاضا که شامل نظارت و حفظ فرکانس سیستم در ۶۰ هرتز در طول پخش بار و مطابق با استانداردهای انجمن قابلیت اطمینان برق آمریکای شمالی (NERC) و زمانبندی ساعتی پخش بار برای اطمینان از متعادل بودن عرضه و تقاضا برای یک ساعت بعد.

- نظارت بر جریان سیستم انتقال، که شامل الف) حفظ جریان‌ها در محدوده‌ی قابلیت اطمینان. ب) حفظ سطوح ولتاژ در محدوده‌ی قابلیت اطمینان. ج) اتخاذ بهترین تصمیم در هر موقعیت سیستم.

جدول زمانی تکامل پخش اقتصادی بار شامل دوره‌های زیر می‌باشد [۴۳]:

- پخش بار کلاسیک^{۶۱}: از شروع به کار کنترل اولین سیستم مدیریت انرژی، این نوع پخش بار برای نظارت بر بار مصرفی، تولید برای متعادل کردن عرضه و تقاضا و نیز حفظ پایداری فرکانس سیستم جهت کمک به کنترل کننده خودکار بار استفاده می‌شده است. این نوع پخش بار نخستین شیوه پخش بار در سیستم قدرت می‌باشد [۴۵].
- پخش بار بر پایه بازار^{۶۲}: در این نوع مکانیزم از پخش بار، میزان نیاز برق برای روز بعد توسط تولید کنندگان پیش‌بینی می‌شود. هدف از این کار کاهش خطرات ناشی از عدم تأمین به موقع بار مصرف کننده و کاهش عدم قطعیت در پاسخ به تقاضا می‌باشد [۴۶] و [۴۷] و [۴۸] و [۴۳].
- پخش بار هوشمند^{۶۳}: این نوع پخش بار به عنوان راه‌کاری برای کار در محیط شبکه هوشمند ارائه شده است. هوشمندی این نوع پخش بار، کمک زیادی به مدیریت دقیق‌تر منابع عرضه/تقاضا می‌کند [۴۳].

۱-۱-۵۸- پخش بار هوشمند

دوره‌ای جدید در پخش بار است که به صورت مستقیم و غیرمستقیم شبکه توزیع شده را مدیریت می‌-

^{۶۱}-Classical Dispatch

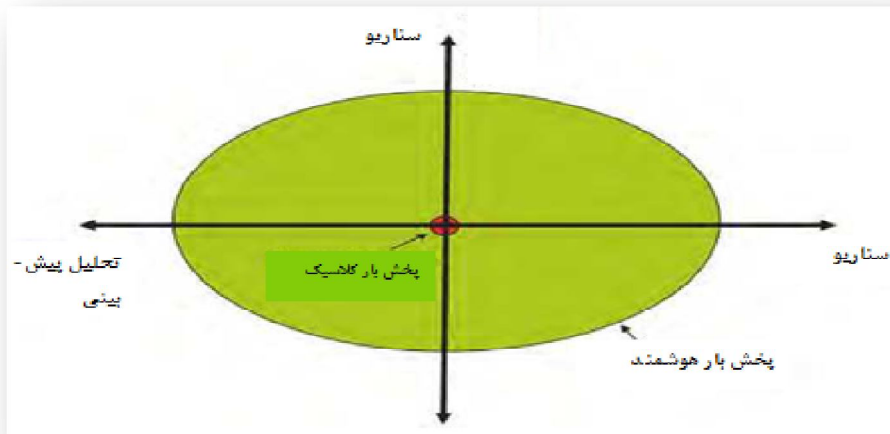
^{۶۲}-Market Based Dispatch

^{۶۳}-Smart Dispatch

کند. وجود منابع توزیع شده‌ای همچون منابع انرژی تجدیدپذیر، خودروهای الکتریکی هیبریدی^{۶۴} و عرضه/تقاضا، شبکه قدرت را با چالش‌های بیشتری در زمینه‌های زیر روبرو می‌کند [۴۳]:

- متعادل کردن انرژی
- ارزیابی قابلیت اطمینان
- پیش‌بینی تولید منابع انرژی تجدیدپذیر
- پیش‌بینی تقاضا
- سرویس‌های جانبی خرید
- مدل‌سازی منابع انرژی توزیع شده

چالش‌های زیادی در طول عدم قطعیت‌ها وابسته به منابع/دستگاه‌ها وجود دارند که بر قابلیت اطمینان و هزینه‌ها مؤثرند. در مقایسه با پخش بار کلاسیک که یک سناریو داشتیم و آن هم در یک بازه زمانی و به صورت مستقل از زمان بود، پخش بار هوشمند طیفی از سناریوهای مختلف را در یک بازه زمانی مشخص و به صورت وابسته به زمان شامل می‌شود (شکل ۱-۵).



شکل (۱-۵). ابعاد زمان و سناریو در پخش بار هوشمند [۱۲]

^{۶۴}-Hybrid Vheicle

مدل ارائه شده با شبکه هوشمند، نوعی مدل تولید تطبیق‌پذیر با شرایط مختلف می‌باشد.

۱-۱-۵۹- معیار امنیت $N-1$ ^{۶۵}

با توجه به ویژگی منحصر به فرد سیستم قدرت، یک اتفاق جزئی در این سیستم، مثل قطع یکی از خطوط انتقال، منجر به خاموشی‌های گسترده یا در برخی موارد منجر به از دست رفتن کل سیستم قدرت شود. معیارهای قطعی در سطح وسیع به دو دسته $n-1$ و $n-2$ تقسیم می‌شوند. این تقسیم بندی با توجه به تعداد اجزا شبکه قدرت است که از سرویس خارج می‌شوند. طبق معیار $n-1$ ، در یک سیستم با امنیت بالا، قطع شدن یکی از عناصر قابل تحمل است. وقتی که سیستم قدرت با این معیار هماهنگ باشد، می‌گوییم که سیستم طبق معیار $N-1$ امن است. چون با قطع شدن یکی از N عنصر، قطعی جریان برای مصرف‌کنندگان اتفاق نمی‌افتد [۲۱]. شرایط امن در عملکرد سیستم، زمانی است که بار، هیچ قیدی (قیدهای جریان خطوط و ترانسفورماتورها، مینیمم و ماکزیمم ولتاژ در باس‌ها و...) را نقض نکند [۲۲].

پایداری سیستم قدرت به عنوان مهمترین مسئله برای حفظ امنیت سیستم قدرت به رسمیت شناخته شده است. از سال ۱۹۲۰ [۲۶]، بسیاری از خاموشی‌های گسترده ناشی از ناپایداری سیستم قدرت است که نشان دهنده اهمیت این پدیده است [۲۴] و [۲۷]. پایداری سیستم قدرت، توانایی سیستم قدرت برای برقراری شرایط اولیه است.

۱-۱-۶۰- شبکه هوشمند

واژه‌ی «شبکه‌ی هوشمند»، بیانگر نوسازی سیستم تحویل الکتریسیته‌ای است که در آن نظارت و حفاظت به صورت اتوماتیک بر عملکرد اجزاء سیستم قدرت نظیر مولد مرکزی در شبکه فشارقوی، سیستم

^{۶۵}-N-1 security cerition

توزیع، مصارف صنعتی، سیستم‌های اتوماسیون ساختمان، تأسیسات ذخیره انرژی، آخرین مصرف کنندگان و سایر وسایل و تجهیزات الکتریکی صورت می‌گیرد، همچنین سایر مصارف خانگی و صنعتی را بهینه می‌سازد [۳۰]. از کاربردهای شبکه هوشمند می‌توان مدیریت بخش مصرف، خودروهای الکتریکی با مصرف هوشمند، طراحی مجازی قدرت و مکانیزم خودترمیمی برای حفاظت از سیستم قدرت را نام برد [۲۸] و [۲۹]. شش ویژگی خاص شبکه هوشمند که روی آوردن به این نوع شبکه را سبب شده است عبارتند از:

- قابلیت اطمینان: با کاهش هزینه ناشی از اختلال در کیفیت توان و تعمیرات و کاهش احتمال قطعی برق که منجر به خاموشی سراسری می‌شود، قابلیت اطمینان افزایش می‌یابد.
- بهینه بودن اقتصادی: با پایین نگهداشتن قیمت برق، مقدار هزینه پرداختی مشتریان کاهش می‌یابد. در مقابل، تجارتي که با استفاده از برق انجام می‌شود اشتغال‌زایی به همراه دارد.
- بهره‌وری: با کاهش هزینه تولید، تحویل و مصرف برق
- امنیت: با کاهش احتمال و اختلالات ایجاد شده توسط انسان و طبیعت
- محیطی: با کاهش گازهای گلخانه‌ای به کمک افزایش مولدهایی با انرژی تجدیدپذیر
- حفاظت: با کاهش آسیب‌ها و از دست رفتن حیات ناشی از اتفاقات مربوط به شبکه قدرت

۱-۱-۶۱- خودترمیمی^{۶۶}

مفهوم خودترمیمی و شبکه خودترمیم توسط مؤسسه‌ی تحقیقاتی نیروی برق آمریکا و دپارتمان انرژی ایالات متحده آمریکا ارائه شد. در حقیقت این سامانه الهام گرفته از سیستم ایمنی بدن انسان است که در مقابل بیماری‌ها با واکنش مناسب از خود نشان دهد و اثرات ناشی از آن را بهبود می‌دهد. همچنین، عکس-العمل مناسب برای کاهش خطر احتمالی لازم را انتخاب می‌کند. متخصصان صنعت برق با الهام از این

^{۶۶}-Self healing

سیستم، در صدد هستند تا شبکه برقی طراحی کنند که در تصمیم‌گیری در شرایط بحرانی همچون اضافه-بار، خارج شدن از محدوده ولتاژ، بازآرایی ساختار و ... را داشته باشد [۳۲]. اولین پروژه‌ی مهندسی قابلیت خودترمیمی که اجرا شده در سیستم کنترل هواپیمای اف-۱۵ در سال ۱۹۸۳-۱۹۹۷ برای عملیات پرواز و نشست هواپیما در سانحه‌ای که یک بال خود را از دست داده است، بوده است [۳۳].

بخش‌های سیستم قدرت که سامانه خودترمیم را به کار می‌گیرند-شامل بخش انتقال (که با استفاده از تعداد زیادی از مولد که در سطح شبکه توزیع شده‌اند) و بخش توزیع است.

مزایای وجود سیستم خودترمیمی در سیستم قدرت- افزایش قابلیت اطمینان، حفاظت، صرفه اقتصادی و امنیت می‌باشد.

روش‌های خودترمیمی- استفاده از منابع تولید پراکنده [۱] و نیز استفاده از روش قطع بار [۱۲].

ساختار کلی سامانه‌ی خودترمیمی و حالت‌های کنترلی آن- وجود این سامانه در سیستم قدرت در جهت حفاظت و کنترل مزایای همچون عدم بروز خطا، عدم قطعی بار در زمان خطا، از دست دادن بار کمتری در زمان خطا و

کنترل شبکه خودترمیم دارای ۴ حالت کنترلی در مقابل حالت‌های بهینه، نرمال، آسیب‌پذیر، خطا و حالت پس از صدمه می‌باشد که عبارتند از [۳۴]:

- کنترل و پیشگیری: برای بازگرداندن سیستم از حالت آسیب‌پذیر به حالت نرمال (حالت امن).
- کنترل اضطراری- برای کنترل عمل بازگرداندن سیستم از حالت آسیب‌پذیر به حالت نرمال.
- کنترل ترمیم‌گر- در این حالت کنترلی، سیستم بعد از وقوع خطا به حالت نرمال قبل از خطا باز می‌گردد.
- کنترل بهینه: در این حالت کنترلی، بهینه‌سازی کنترل ترمیم‌گر است (مثل تنظیم بهینه ذخیره-کننده‌ها).

۱-۲- بیان مسئله

با توجه به اهمیت تأمین انرژی الکتریکی در سیستم قدرت، نقش شبکه هوشمند در ارتقاء امنیت سیستم قدرت در شبکه‌های توزیع قدرت مسئله‌ای مهم است که در این پایان‌نامه این نقش را بیان و بررسی می‌کنیم. با وجود شبکه هوشمند، ارتباط دوطرفه ما بین شرکت توزیع و مصرف‌کننده‌ها میسر شده است. چگونگی تأثیرگذاری شبکه هوشمند بر امنیت شبکه قدرت در این پایان‌نامه مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۱-۳- ساختار پایان‌نامه

فصل دوم: به بیان تاریخچه کارهایی که تاکنون در مورد مفهوم پخش بار انجام شده، پرداخته است.

فصل سوم: مطالب این فصل به گونه‌ای است که ابتدا تعریفی کلی از شبکه هوشمند ارائه شده است. سپس به بیان ساختار شبکه هوشمند و حوزه‌هایی از فناوری در سیستم قدرت که شبکه هوشمند در آنها مؤثر بوده، پرداخته‌ایم. در آخر دلیل رویکرد به شبکه هوشمند و مقایسه سیستم قدرت موجود با سیستم قدرت مجهز به شبکه هوشمند، آورده شده است.

فصل چهارم: در این فصل به تحلیل روش ارائه شده در مرجع [۱] پرداخته شده است. به طور کلی، مفاهیم این فصل بر دو بخش است. بخش اول شامل تعریف امنیت استاتیک و تخمین محدوده‌ی امن استاتیک با توجه به معیار امنیت $N-1$ و تعمیم آن به امنیت دینامیک پایدار با توجه به پارامترهای غیرقطعی است. بخش دوم شامل معرفی تکنیکی جدید از پخش بار اقتصادی استفاده از مفاهیمی جدید همچون: محدوده‌ی عملکرد دینامیک (DF) و ... است که عملکرد امن دینامیک پایدار سیستم قدرت را تضمین می‌کند و شرایط نامساعد حاصل از منابع انرژی تجدیدپذیر را کاهش می‌دهد. همچنین از کنترل-کننده هوشمند برای پخش بار اقتصادی دینامیک پایدار جهت حفظ امنیت دینامیک پایدار (برگرفته

از [۱] استفاده شده است.

فصل پنجم: در این فصل، با ارائه یک شبکه شامل سه مولد که بر اساس استاندارد سیستم برق غرب ژاپن است، به تحلیل شبیه سازی مطالب مرجع [۱] پرداختیم. این فصل شامل دو نتیجه گیری می باشد. نتیجه گیری اول حاصل از آزمایش نمونه سیستم قدرت یاد شده برای نشان دادن محدوده ای امنیت دینامیک پایدار و تأثیر نفوذ صفحات خورشیدی (PV) بر این محدوده است. شرایط شبیه سازی با توجه به شرایط آب و هوایی و تغییرات تولید مولدهای PV و همچنین رخ دادن خطا در سه محل A, B, C در شبکه قدرت مورد آزمایش است. نتیجه گیری دوم براساس بررسی تأثیرات استفاده از ذخیره کننده های توزیع شده در سیستم جهت حفظ امنیت دینامیک پایدار است. برای بهینه سازی هزینه پخش بار حاصل از این سه مولد، از الگوریتم بهینه سازی ذرات هوشمند (PSO) استفاده کردیم. در آخر، محدودیت های ایده بیان شده در [۱] و بدنبال آن پیشنهاداتی در جهت بهبود این ایده ارائه شده است.

فصل دوم

مروری بر کارهای انجام شده

(Literature Survey)

۱-۲ مروری بر کارهای انجام شده

همانطور که درباره مفهوم امنیت و پخش بار بیان شد، زمانی عملکرد سیستم در وضعیت امن قرار دارد که توزیع و پخش بار برای همه مصرف‌کنندگان با کمترین هزینه صورت گیرد [۵۸]. در حقیقت، برای برقراری امنیت در سیستم قدرت از مفهوم پخش اقتصادی بار در حالت دینامیک پایدار استفاده می‌کنیم.

با افزایش میزان استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، عدم قطعیت در سیستم‌های قدرت مختلف، به صورت مشخص رو به افزایش است، این امر، برنامه‌ریزی و طراحی سیستم قدرت را در آینده مشکل‌تر خواهد کرد [۲۳]. مشاهدات ابتدایی نشان داده است که شکل فعلی برنامه‌ریزی عملیات سیستم قدرت، ممکن است در آینده با مشکل مواجه شود [۲۴].

در آمریکای شمالی، تقریباً همه شرکت‌های برق منطقه‌ای^{۶۷} (RTO) همچون PJM^{۶۸}، ISO^{۶۹} غرب میانه، ISO انگلستان، ISO کالیفرنیا یا ERCOT^{۷۰}، همگی به طور اساسی متکی به مکانیزم بازار عمده فروشی برای بهینه کردن پخش انرژی و خدمات جانبی منابع تولید هستند تا قابلیت اطمینان بار در مناطق وسیع جغرافیایی حفظ شود. در سیستم‌های قدرتموجود، مسئله پخش بار به طور لحظه‌ای به روش برنامه‌ریزی خطی و برنامه‌ریزی مختلط با فرض قطعی بودن پارامترهای ورودی قابل حل است [۵۹].

با توجه به افزایش گرایش بهره‌برداران سیستم‌های قدرت به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، عدم قطعیت ناشی از وجود خطا در پیش‌بینی کوتاه مدت بار و خروجی غیرقطعی منابع انرژی تجدیدپذیر اتفاق می‌افتد. شرکت‌های برق منطقه‌ای برای حل این مشکلات، یک بازه اطمینان تعریف می‌کنند که میزان بار پیش‌بینی شده، در این بازه قرار دارد.

^{۶۷} - Regional Transmission Organizations

^{۶۸} - Pennsylvania-New Jersey-Maryland

^{۶۹} - Independent System Operation

^{۷۰} - Electric Reliability Council of Texas

سیستم‌های قدرت مختلف روش‌هایی را برای حل مشکل عدم قطعیت ارائه داده‌اند. در [۸۵] و [۵۹]، به بررسی عملیات مرکز کنترل در یک چارچوب پخش بار هوشمند پرداخته شده است. در واقع، در [۱۲] برای حل مشکل افزایش عدم قطعیت، از منابع انرژی توزیع شده، استفاده شده است. سیستم پخش بار ارائه شده، عمل توزیع بار را بهتر و جامع‌تر می‌کند و با توجه به الگوهای مصرف، پیش‌بینی، دقیق‌تر انجام می‌گیرد. عمل پیش‌بینی بار در سه نوع بازه زمانی کوتاه مدت انجام می‌شود. نوع اول، در بازه زمانی ۳۰ دقیقه، نوع دوم، در بازه زمانی ۱۵ دقیقه و نوع سوم، در بازه‌های ۵ دقیقه می‌باشد.

مزایای پخش بار هوشمند ارائه شده نسبت به نوع کلاسیک عبارتند از:

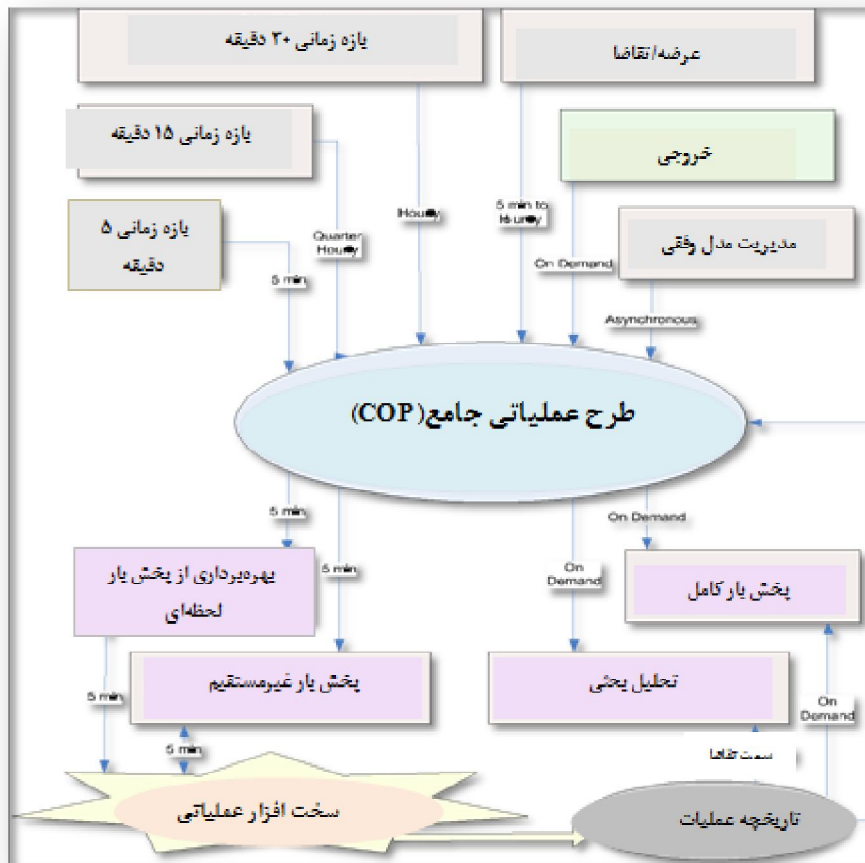
- پخش بار براساس قیمت لحظه‌ای، منابع توزیع شده و منابع پیش‌بینی شده کمتر
- پخش بار براساس تقاضای لحظه‌ای مصرف‌کننده
- تطبیق پارامترها با شرایط مختلف
- مدیریت تراکم با بهینه‌سازی مصرف در محدوده امن

یک تابع مرکزی پخش بار هوشمند، در حقیقت، برنامه‌ریزی کنترل تولید (GCA) است. هدف از آن تقویت فرآیند تصمیم‌گیری با توجه به تغییر لحظه‌ای شرایط سیستم (بار، تولید، مبادله، شرایط انتقال و ...) می‌باشد. ساختار GCA ترکیبی از سه نوع بازه زمانی برای پیش‌بینی است، که در بالا به آن اشاره شده است. طرح عملیاتی همه جانبه (COP)، شامل مجموعه مرکزی از داده‌های مختلف زمانبندی شده در ارتباط با یک کلاس خاص از برنامه‌های کاربردی سیستم قدرت است. در حقیقت، COP یک ارائه جامع و هماهنگ از اطلاعات منظم برای برنامه‌ریزی‌های مختلف در عملیات سیستم قدرت می‌باشد (شکل ۲-۱).

کلاس اطلاعات زمانبندی شده که در بالا به آن اشاره شد، شامل موارد زیر می‌باشد:

- زمانبندی مولدها (اعم از تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر)

- پیش‌بینی تقاضا
- زمانبندی خروجی مولدها
- انتقال و زمانبندی مبادله
- زمانبندی برای محدوده‌های انتقال
- رزرو و تنظیم زمانبندی برنامه‌های مورد نیاز
- برنامه‌ریزی مشخصه‌های مولد

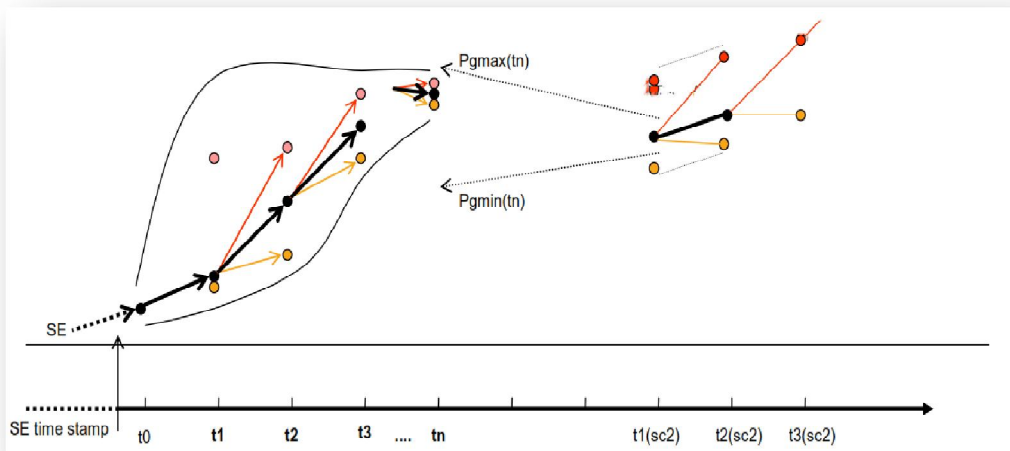


شکل (۲-۱). مدل همه جانبه از COP [۱۲]

در روش مذکور که براساس ساختار COP بیان شد، مدل دقیقی از محدودیت‌های انتقال، مشخصات منابع (محدودیت‌های تولید و رمپ) و پیش‌بینی دقیق در تقاضا ارائه شده است که در نهایت منجر به

پیش‌بینی دقیق الگوی تولید و شرایط سیستم می‌شود. روش دیگری در [۶۰]، برای حل مسئله عدم قطعیت ارائه شده است. در این روش از مفهوم پخش بار پایدار برای مدیریت عدم قطعیت استفاده شده است.

با توجه به عدم قطعیت در تقاضا و عدم برآورد دستورات عمل‌ها توسط مولد، اپراتورهای مستقل سیستم می‌بایستی در سناریوهای مختلف حداقل، متوسط و حداکثر پاسخگو باشند. راه حلی که برای مسئله عدم-قطعیت در [۱۲] ارائه شده است، استفاده از مختصات سه سناریوی فوق است. توانایی مولد در جابجایی پخش بار بین سه سناریوی فوق، زمانی که میزان تقاضا تغییر می‌کند، تضمین می‌شود. به عبارت دیگر، با توجه به اینکه میزان تقاضا را به سه سطح حداقل، متوسط و حداکثر دسته‌بندی کردیم، نحوه کار الگوریتم ارائه شده برای پخش بار بدین ترتیب است که میزان تولید و پخش بار طوری زمانبندی شود که میزان تقاضای موجود را پاسخگو باشد و با شرایط فعلی تقاضا وفق پیدا کند. به این معنی که اگر تقاضا در حالت قبلی حداقل و در حالت فعلی متوسط باشد، مولد میزان تولید خود را افزایش داده تا با حالت فعلی مطابق باشد. با این عمل، توزیع بار به صورت پیوسته انجام می‌گیرد و امنیت سیستم تضمین می‌شود، شکل (۲-۲).



شکل (۲-۲). کنترل پخش بار [۱۲]

در ادامه، به سه مدل پخش بار فرموله شده از [۱۲]، اشاره شده است. در مدل (الف)، پخش بار به شکل کلاسیک ارائه شده که در آن پارامترها نسبت به زمان مستقل هستند. در مدل (ب)، پخش بار در هر بازه به صورت جداگانه و وابسته به زمان، فرموله شده است. در مدل (پ)، پخش بار در بازه زمانی مشخص و براساس سه سناریوی کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت فرموله شده است. این مدل‌های پخش بار عبارتند از:

الف- مدل پخش بار در یک بازه زمانی (مستقل از زمان)

Minimize:

$$\sum_i (c_i * P_{g_i})$$

Subject to:

$$\begin{aligned} \sum_i P_{g_i} &= P_{demand} & (1) \\ P_{g_i}^{\min} &\leq P_{g_i} \leq P_{g_i}^{\max} \\ -(time - time_{SE}) * RRDn_i &\leq P_{g_i} - P_{g_{iSE}} \leq (time - time_{SE}) * RRUp_{i,t} \\ -F_k^{\max} &\leq \sum_i dfax_{FK,i} * P_{g_i} \leq F_k^{\max} \end{aligned}$$

c_i	قیمت پیشنهادی برای منبع i ام
P_{g_i}	سطح پخش بار برای منبع i ام
P_{demand}	پیش‌بینی تقاضا برای زمان مشخص
$P_{g_i}^{\min}, P_{g_i}^{\max}$	کمترین و بیشترین سطح پخش بار برای منبع i ام
F_k^{\max}	خط / حد انتقال FG_k
$Df_{ax_{FK,i}}$	حساسیت خط / FG_k برای تزریق توسط منبع i ام
$Time$	زمان مشخص
$time_{SE}$	برچسب زمان برای تخمین حالت

RRD_{ni}	بیشترین نرخ رمپ پایین منبع آام
$RRUp_i$	بیشترین نرخ رمپ بالای منبع آام

ب- مدل پخش بار چند بازه‌ای

با اضافه کردن بعد زمان به فرمول پخش بار تک بازه‌ای زمانی که در بالا بیان گردید، پخش بار دینامیک یا چند بازه‌ای زمانی بدست می‌آید که در ادامه نشان داده شده است:

$$\sum_i \{ \sum_i (c_{i,t} * Pg_{i,t}) * (Time_i - Time_{t-1}) / 60 \} \quad (2)$$

$$\sum_i Pg_{i,t} = Pdemand_i$$

$$Pg_{i,t}^{\min} \leq Pg_{i,t} \leq Pg_{i,t}^{\max}$$

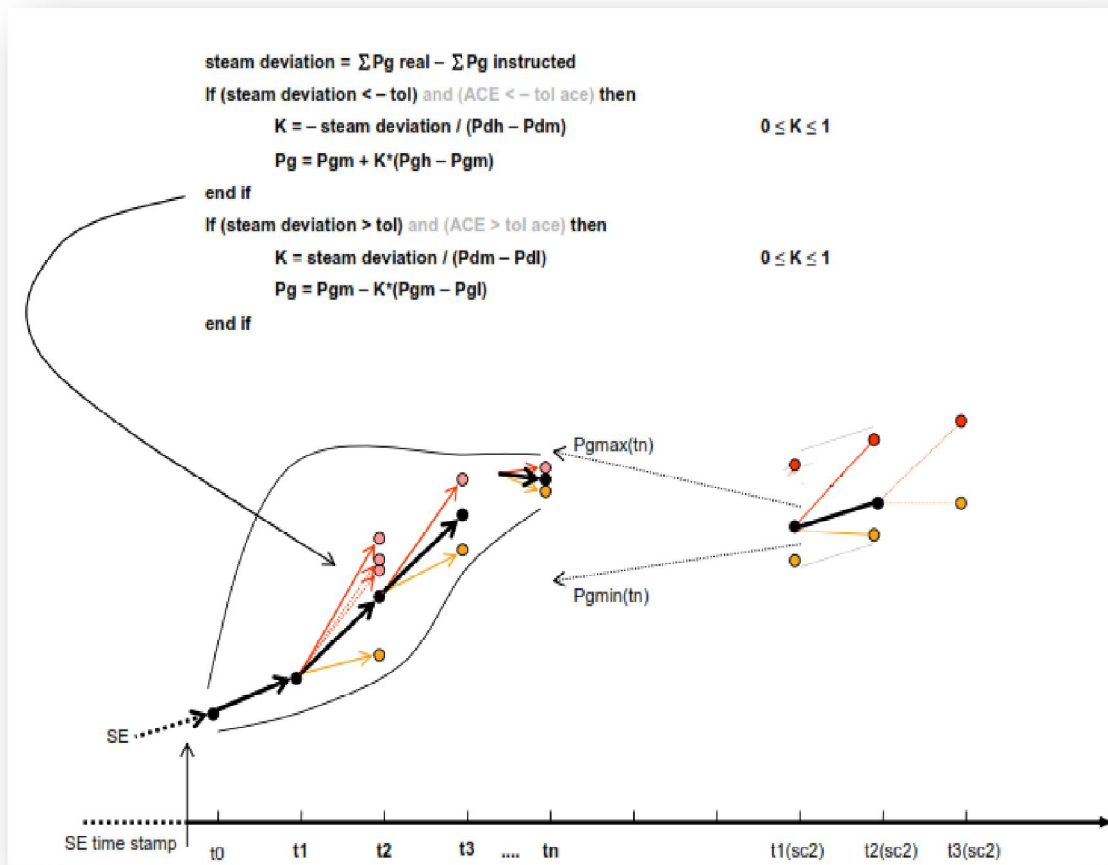
$$-(time_t - time_{t-1}) * RRD_{ni,t} \leq Pg_{i,t} - Pg_{i,t-1} \leq (time_t - time_{t-1}) * RRUp_{i,t}$$

$$-F_{k,t}^{\max} \leq \sum_i dfax_{FK,i} * Pg_{i,t} \leq F_{k,t}^{\max}$$

پ- مدل پخش بار پایدار دینامیک (ارائه شده در این پایان‌نامه)

در این قسمت، مسئله برنامه‌ریزی خطی مرتبط بر سه سناریوی تقاضا بررسی شده است. راهکار ارائه شده در ادامه، یک پخش بار پایدار و دینامیک را مدل می‌کند. تابع هدف و قیدهای مرتبط با سناریوی تقاضای متوسط (M) شبیه به پخش بار دینامیک مستقل عمل می‌کند. تابع هدف برای سناریوهای حداقل و حداکثر تقاضا، مانند پخش بارهای دینامیک مستقل (همانند قسمت (ب) و فقط برای H و L رفتار می‌کند. محدودیت ماکزیمم نرخ رمپ مولدها هیچ ارتباطی به سطوح پخش بار در بازه‌های متوالی ندارد. در عوض برای بازه زمانی داده شده همچون محدودیت انتقال سطوح پخش بار L و H، با سطح پخش بار مربوط به سناریوی M در بازه ماقبل یعنی t-1 به یکدیگر انتقال می‌دهد (M→L و M→H). تضمین توانایی دسترسی پخش بار تقاضای حداقل و حداکثر از سطح پخش بار تقاضای متوسط در معادله (3) قابل مشاهده است. شکل (2-3).

$$\begin{aligned}
& \sum_i \left\{ \sum_i (c_{i,t} * Pgm_{i,t}) * (Time_i - Time_{t-1}) / 60 \right\} \\
& + \sum_i \left\{ \sum_i (c_{i,t} * Pgh_{i,t}) * (Time_i - Time_{t-1}) / 60 \right\} \\
& + \sum_i \left\{ \sum_i (c_{i,t} * Pgl_{i,t}) * (Time_i - Time_{t-1}) / 60 \right\} \\
& \sum_i Pgm_{i,t} = PdemandM_i \\
& Pgm_{i,t}^{\min} \leq Pgm_{i,t} \leq Pgm_{i,t}^{\max} \\
& -(time_t - time_{t-1}) * RRDn_{i,t} \leq Pgm_{i,t} - Pgm_{i,t-1} \leq (time_t - time_{t-1}) * RRUp_{i,t} \\
& -F_{k,t}^{\max} \leq \sum_i dfax_{FK,i} * Pgm_{i,t} \leq F_{k,t}^{\max} \\
& \sum_i Pgl_{i,t} = PdemandL_i \\
& Pgl_{i,t}^{\min} \leq Pgl_{i,t} \leq Pgl_{i,t}^{\max} \\
& -(time_t - time_{t-1}) * RRDn_{i,t} \leq Pgl_{i,t} - Pgl_{i,t-1} \leq (time_t - time_{t-1}) * RRUp_{i,t} \\
& -F_{k,t}^{\max} \leq \sum_i dfax_{FK,i} * Pgl_{i,t} \leq F_{k,t}^{\max} \\
& \sum_i Pgh_{i,t} = PdemandH_i \\
& Pgh_{i,t}^{\min} \leq Pgh_{i,t} \leq Pgh_{i,t}^{\max} \\
& -(time_t - time_{t-1}) * RRDn_{i,t} \leq Pgh_{i,t} - Pgh_{i,t-1} \leq (time_t - time_{t-1}) * RRUp_{i,t} \\
& -F_{k,t}^{\max} \leq \sum_i dfax_{FK,i} * Pgh_{i,t} \leq F_{k,t}^{\max}
\end{aligned} \tag{3}$$



شکل (۲-۳). الگوریتم کنترل پخش بار هوشمند [۱۲]

در [۴۱] و [۴۲]، برای حل مشکل عدم قطعیت از دو رویکرد استفاده شده است: الزامات ذخیره بار و برنامه‌ریزی تصادفی. احتیاج به اطلاعات بهینه‌سازی تصادفی، باعث شده که برای مسائل طولانی‌تر مثل برنامه‌ریزی در سطح وسیع عملیاتی مناسب باشد. روشی که ما در این پایان‌نامه مورد بررسی قرار داده‌ایم، برای زمان لحظه‌ای انعطاف‌پذیرتر و عملی‌تر می‌باشد. برای محاسبات تحلیل احتمال شرایط رزرو و معیار امنیت "N-1"، روش‌هایی موجود هستند که جهت کسب اطمینان از پایداری قطعی سیستم داده شده‌اند. شبیه‌سازی بر اساس سناریو به کمک مونت کارلو [۶۱]، یکی دیگر از تکنیک‌های معمول است که برای ارزیابی تأثیر شرایط عدم قطعیت بر قابلیت اطمینان، ارائه شده است. در [۶۲]، از تعمیم معیار امنیت

N-1 استفاده شده است. در واقع، از تعمیم این معیار و مفهوم امنیت استاتیک در کنار مفهوم محدوده‌ی عملکرد دینامیک به عنوان راه‌حلی در پخش بار اقتصادی دینامیک پایدار استفاده شده است. برای کنترل عمل پخش بار در یک بازه اطمینان با حفظ امنیت پایدار، از شبکه هوشمند استفاده شده است. به عبارت دیگر، از رویکردهای احتمالی مختلف برای امنیت سیستم قدرت استفاده شده است. با فرض اینکه چه رخدادهایی و با چه احتمالی در محدوده‌های مشخص قرار است اتفاق بیفتد [۶۷] و [۶۸].

بنابراین، تاکنون امنیت در سیستم‌های قدرت به کمک معیار N-1 صورت گرفته است. این امر در مطالعات پایه‌ای در مراجع [۶۹] و [۷۰]، بررسی شده است. در [۷۱] و [۷۲] روش وابسته به جریان بهینه ارائه شده است. همچنین، تکنیک‌های متنوع پشتیبان طرح در [۷۳] و [۷۴] آمده است. این روش‌ها وابستگی شدیدی به دقت در پیش‌بینی بار و شرایط سیستم دارند. بنابراین ابزارهای جدید به خوبی یک روش مؤثر [۷۵] و [۷۶]، برای گسترش و تعمیم رویکردهای قطعی، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. با این حال، سطح عدم قطعیت ناشی از منابع انرژی تجدیدپذیر فراتر از آن خواهد بود که روش‌های موجود بتوانند پاسخگو باشند. با نشان دادن گسترش و تعمیم معیار متعارف امنیت N-1 موجود، مفهوم امنیت پایدار سیستم قدرت تعریف می‌شود [۷۷] و [۷۸]، که به تشریح به آن خواهیم پرداخت.

وجود اینگونه مدل‌ها و تکنیک‌ها برای یکپارچه‌سازی و ادغام منابع تجدیدپذیر شبکه برق بسیار ضروری می‌باشند.

سیر تکاملی پخش بار در سیستم قدرت به سه دوره زیر تقسیم می‌شود:

دوره اول - پخش بار کلاسیک^{۷۱} [۶۳]، که در طول سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۰ استفاده می‌شده است.

دوره دوم - پخش بار بر پایه بازار^{۷۲} [۶۴] و [۶۵] و [۶۶]، که در طول سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۰ کاربرد داشته

^{۷۱} - Classical Dispatch

^{۷۲} - Market-Based Dispatch

است.

دوره سوم- پخش بار هوشمند^{۷۳} [۸۵]، که در سال ۲۰۱۰ ارائه شده است و تاکنون ادامه دارد. از مدل‌های ذکر شده‌ی بالا [۵] و [۴] و [۳] و [۸۵] و [۱]، در این نوع پخش بار برای حل مشکل عدم قطعیت استفاده شده

است.

^{۷۳} - Smart Dispatch

فصل سوم

شبکه هوشمند

(Smart Grid)

با افزایش تقاضای انرژی الکتریکی، تأمین به موقع و ارزان بار برای سیستم قدرت به چالشی مهم تبدیل شده است. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به شکل پراکنده به عنوان راه حل امیدوارکننده‌ای در رفع این چالش برای سیستم قدرت به کار گرفته شد. در ضمن، مزیت دیگر این منابع در کاهش آلودگی زیست محیطی است که علاقه‌مندی به استفاده بیشتر از این نوع تولید انرژی الکتریکی را افزایش می‌دهد. به این ترتیب، افزایش تعداد منابع تولید الکتریسیته به کمک منابع انرژی تجدیدپذیر برای مشکل تأمین برق در ابتدا مفید واقع شد، اما این خود، مشکلاتی همچون هماهنگی بین سطح وسیعی از تولیدکننده‌ها و ایجاد یک پخش اقتصادی بار در مقابل افزایش شرایط غیر قطعی ناشی از تغییرات شرایط آب و هوایی در تولید الکتریسیته بوجود می‌آورد.

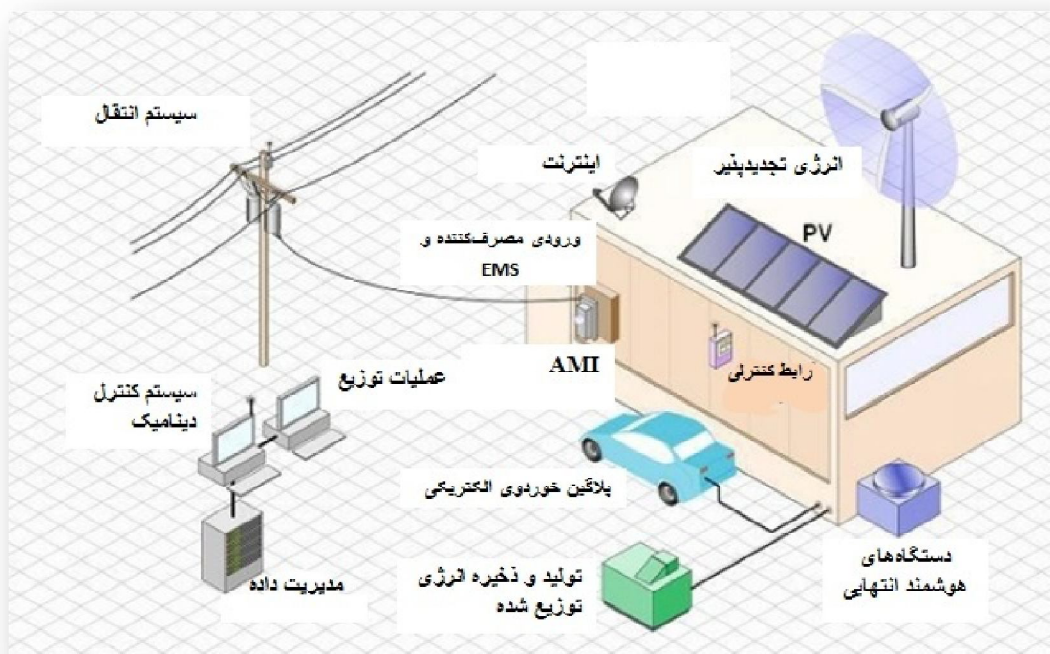
در این میان، اضافه کردن یک سیستم ارتباطی و اطلاعاتی به سیستم قدرت کمک خواهد کرد. از این رو با ظهور شبکه هوشمند، سیستم‌های قدرت در کنار سیستم‌های ارتباطی و اطلاعاتی اضافه شده می‌توانند به صورت موازی عمل کنند. با مجهز شدن به شبکه هوشمند، سیستم قدرت در مقابل هرگونه اختلال و اتفاقی که امنیت سیستم را تهدید می‌کند، مقاوم خواهد شد.

۳-۱ شبکه هوشمند

یک شبکه قدرت هوشمند، انرژی الکتریکی را از تأمین‌کننده به مصرف‌کننده تحویل می‌دهد که برای اینکار از فناوری دیجیتالی دوطرفه برای کنترل عملیات ذخیره انرژی مصرف‌کننده در خانه، کاهش هزینه و افزایش قابلیت اطمینان و تقابل نزدیکتر بین مصرف‌کننده و تولیدکننده استفاده می‌شود. این کار به کمک اطلاعات سیستم اندازه‌گیری در شبکه پوشش داده می‌شود. اولین شبکه هوشمند جهان در مارس ۲۰۰۸ معرفی گردید و شهر بالدرا ایالت کلرادو آمریکا موفق به دریافت عنوان اولین شهر با شبکه توزیع برق هوشمند گردید هدف طراحان با بکارگیری تکنولوژی هوشمند حول سه محور اصلی مشترکین ،

تجهیزات و ارتباطات می‌باشد. تکنولوژی هوشمند توانایی ایجاد تغییرات اساسی در تولید، انتقال، توزیع و استفاده از انرژی الکتریکی به همراه منافع اقتصادی و محیطی دارد که در نهایت به برآورده نمودن نیازهای مشتریان و در دسترس بودن برق مطمئن و پایدار ختم می‌شود. از طرف دیگر سیستم می‌تواند با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده در مواقع بحرانی، تصمیم‌گیری نماید و از خاموشی‌های ناخواسته جلوگیری کند [۸].

برای سمت مصرف‌کننده، شبکه هوشمند به معنی آن است که آنها می‌توانند روی مصرف خود مدیریت هوشمندانه انجام دهند تا در ساعات اوج مصرف که قیمت انرژی گران می‌باشد، هزینه کمتری بپردازند.



شکل (۳-۱). تجهیزات شبکه هوشمند در بخش مصرف

در حقیقت شبکه هوشمند، بر پایه استفاده از زیرساخت‌های فناوری ارتباطات عمل می‌کند. یکی از اهداف اصلی آن فراهم کردن اطلاعات الگوی مصرف انرژی مصرف‌کنندگان است و هدف بعدی دستیابی

به سامانه قدرت با قابلیت اطمینان بالا و بهبود کارایی سیستم، با کاهش تلفات سامانه و استفاده بهتر از منابع تولید پراکنده است [۳۸].

بطور خلاصه، تعریف کلی که از شبکه هوشمند می‌توان ارائه داد [۳۹]، شامل موارد زیر است:

- پشتیبانی از بهره‌وری انرژی^{۷۴}: طبق تعریف آژانس بین‌المللی انرژی^{۷۵}، منظور از بهره‌وری انرژی راهی برای مدیریت و مهار رشد مصرف انرژی است. بهره‌وری انرژی یک ابزار قدرتمند و مقرون به صرفه برای دستیابی به انرژی پایدار در آینده ارائه می‌دهد. بهبود در بهره‌وری انرژی می‌تواند نیاز به سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌ها و هزینه انرژی را کاهش دهد و باعث افزایش رفاه مصرف‌کننده شود.
- نوسازی شبکه: منظور از نوسازی شبکه، فراهم کردن بخش‌های مورد نیاز شبکه برای رسیدن به هدف اصلی است. در ادامه، برای هر بخش امکانات موجود، نیاز و هدف اصلی بیان می‌شود:
 - امکانات موجود فعلی در شبکه قدرت شامل: حفاظت از پست، اتوماسیون فیدر، اتوماسیون توزیع و ایستگاه فرعی.
 - ویژگی‌های شبکه جدید شامل: نظارت بر سیستم توزیع، کنترل و منابع انرژی توزیع شده.
 - هدف اصلی، که عبارتست از: ادغام نظارت و کنترل شبکه‌های موجود برای منابع توزیع شده و مشتری‌مداری پیشرفته.
 - امکانات و تجهیزات مورد نیاز شبکه شامل: تولید حاصل از سیستم‌های مدیریت توزیع جدید، ارتباطات فراگیر و امن، تجزیه و تحلیل پیشرفته و کنترل دینامیک.

^{۷۴}- S supports Energy Efficiency

^{۷۵}- International Energy Agency

- پاسخ به تقاضا، شامل بخش‌های زیر می‌باشد:
 - عنصر کلیدی برای قیمت گذاری، این قسمت به مصرف‌کننده اجازه می‌دهد که با توجه به قیمت انرژی مشخص شده میزان استفاده خود را تعیین کند. این کار سبب می‌شود تا حداقل ۱۰ درصد در مصرف انرژی صرفه‌جویی شود.
 - استفاده‌های پاسخ به تقاضا، که عبارتند از: پخش اقتصادی بار برای کاهش هزینه تولید، پخش اقتصادی بار در سطح کلی برای زمانی که پاسخ به تقاضای مصرف‌کننده منجر به مزایای کلی برای شبکه (همچون پخش بار قابل اطمینان برای کاهش یا حذف اختلال در شبکه) می‌شود و فاکتور کلیدی دیگر پاسخ به تقاضا در تمایل مصرف‌کننده به ارتباط آسان و متقابل با شبکه در آینده است.
- پشتیبانی از نسل جدید انرژی‌های تجدیدپذیر، منابع اصلی در این بخش شامل توربین بادی و صفحات خورشیدی می‌باشند. چالش‌های موجود در این بخش عبارتند از: شکل توزیع شده‌ی تأمین بار، تأمین بار پیش‌بینی شده (دسترس‌پذیری، کفایت) و کاهش قابلیت اطمینان.
- پشتیبانی از منابع انرژی توزیع‌شده، که شامل بخش‌های زیر است:
 - ریز - مولدها، شامل: ریز - توربین‌ها و پیل‌های سوختی.
 - ذخیره‌کننده انرژی، شامل: ذخیره‌کننده انرژی Ice (نوعی ذخیره‌کننده برای جریان متناوب) و باتری‌های قابل شارژ.
 - پلاگین الکتریکی، شامل: اتصال خودرو به شبکه است.

- هدف اصلی استفاده از منابع انرژی توزیع شده شامل: بهره‌وری، توزیع تقاضا یا اوج مصرف سایه، کاهش عوارض زیست محیطی (کاهش آلودگی ناشی از استفاده از منابع انرژی فسیلی) و خدمات جانبی دیگر.

ویژگی‌های ارائه شده توسط مرکز فناوری انرژی به شرح زیر می‌باشد [۳۸][۴۴]:

- خود ترمیمی در مقابل حوادث و رخداد‌های ناگهانی

خودترمیمی بعد از تشخیص خطا و ایزوله کردن خودکار، توانایی بازگرداندن سامانه قدرت به حالت اولیه بدون کوچک‌ترین دخالت انسان را دارا می‌باشد. خودترمیمی باعث کاهش یا عدم قطعی در تأمین بار مصرف‌کنندگان می‌شود. در واقع، این ویژگی در فناوری شبکه هوشمند، قابلیت اطمینان را افزایش داده و همچنین کیفیت تأمین توان را نیز افزایش می‌دهد [۱۰] و [۸]. یکی دیگر از توانایی‌های شبکه خودترمیم حفاظت تطبیقی و روش‌های هماهنگی است که عملکرد کل سامانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۴].

- پاسخگویی بار با مدیریت تشویقی بار
 - افزایش کارایی و امنیت فیزیکی
 - امکان فراهم کردن کیفیت توان مورد نیاز مصرف‌کنندگان در قرن ۲۱م
 - انعطاف‌پذیری و تطبیق‌پذیری با انواع متفاوت منابع تولیدی و ذخیره انرژی
 - فراهم کردن شرایطی نو برای تولید، ارائه خدمات برای بازار برق در حالت خرده و عمده
- فروشی
- استفاده بهینه از تجهیزات و افزایش بهره‌وری

۳-۱-۱ اجزاء شبکه هوشمند [۵۰]

- **لوازم خانگی هوشمند**، این لوازم دارای قابلیت تصمیم‌گیری برای مصرف انرژی، با توجه به تمایلات مشتری می‌باشند. این قابلیت از قبل تنظیم شده است. این امر، می‌تواند کمک بزرگی به کاهش پیک بار کند. کاهش پیک تأثیر زیادی در هزینه‌های تولید برق و کاهش نیاز به نیروگاه‌های جدید و همچنین کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. تست‌های اولیه با شبکه هوشمند نشان داده است که داشتن اطلاعات کافی در مورد میزان مصرف و هزینه مصرف لحظه‌ای برای مصرف‌کنندگان در مدیریت مصرف، میزان مصرف را ۲۵ درصد کاهش می‌دهد.
- **ابزار اندازه‌گیر هوشمند**، این ابزار با داشتن قابلیت ارتباط دوطرفه بین مصرف‌کنندگان و ارائه دهندگان انرژی الکتریکی در جمع‌آوری خودکار اطلاعات، محاسبه هزینه و مدیریت، تشخیص قطعی و یا تعمیر به کار رفته و روند آن را سرعت می‌بخشد.
- **پست‌های هوشمند**، این پست‌ها قابلیت کنترل و نظارت بر داده‌های عملیاتی، در لحظات بحرانی و غیربحرانی برای قطع‌کننده، ترانسفورماتور و وضعیت باطری، امنیت و غیره را دارند.
- **توزیع هوشمند**، این نوع توزیع، خود ترمیم بوده و قابلیت بهینه شدن و متعادل بودن به صورت خودکار را دارند. این قابلیت در سیستم توزیع، کنترل خودکار کابل‌ها را برای انتقال از راه دور و تجزیه و تحلیل داده‌ها مثل وضعیت آب و هوا و تاریخ قطع را دارد و قادر به تشخیص و برطرف سازی اختلال را دارد.
- **تولید هوشمند**، که قابلیت یادگیری رفتار منحصر به فرد تولید منابع تولید برق برای بهینه‌سازی انرژی، تولید را دارد. همچنین، توانایی حفظ و تنظیم خودکار ولتاژ، فرکانس و ضریب قدرت استاندارد در بازخورد از چندین نقطه در شبکه را دارا می‌باشد.

۳-۱-۲ فناوری شبکه هوشمند از ترکیب پنج حوزه فناوری بوجود آمده است که عبارتند از [۵۰]:

- ارتباطات یکپارچه، شامل اکتساب داده‌ها و حفاظت و کنترل آن‌ها می‌باشد. همچنین، این فناوری کاربران را قادر می‌سازد تا با دستگاه‌های هوشمند در یک سیستم یکپارچه تعامل داشته باشند.
- سنجش و اندازه‌گیری، این فناوری عمل پشتیبانی از کسب اطلاعات، ارزیابی سلامت و یکپارچگی شبکه، پشتیبانی از قرائت خودکار، حذف برآورد و صدور صورت حساب و جلوگیری از سرقت انرژی را انجام می‌دهد.
- اجزاء پیشرفته، این اجزاء برای تخمین رفتار الکتریکی شبکه استفاده می‌شوند. موفقیت‌های حاصل در ترکیب این اجزاء در نتیجه تحقیقات و پیشرفت در زمینه مواد، شیمی و میکروالکترونیک بوده است.
- روش‌های کنترل پیشرفته، این روش‌ها، دستگاه‌ها و الگوریتم‌هایی هستند که احتمالات شبکه را تجزیه، تشخیص و پیش‌بینی می‌کنند و به طور خودکار عملکرد مناسبی برای اجزاء تخمین می‌زنند تا از قطع و افت کیفیت برق جلوگیری شود.
- رابط‌های پیشرفته و پشتیبانی تصمیم‌گیری، تبدیل داده‌های پیچیده سیستم قدرت به اطلاعاتی که به سادگی فهمیده شوند.

۳-۲ دلایل رویکرد به شبکه هوشمند

شبکه هوشمند به دو دلیل برای استفاده در سیستم قدرت مورد توجه قرار گرفته است، دلیل اول: شبکه‌های قدرت امروزی به دلیل عمر بالا و عدم کفایت در تأمین تقاضای رو به گسترش، نیاز به ارتقاء دارند.

دلیل دوم: وجود مزایایی در مواردی همچون: قابلیت اطمینان، اقتصادی، بهره‌وری، زیست‌محیطی، امنیت و حفاظت می‌باشد [۴۳].

ایده شبکه هوشمند با ایده تجهیزات اندازه‌گیری پیشرفته و به منظور توسعه مدیریت سمت تقاضا، افزایش بهره‌وری انرژی و یک شبکه الکتریکی خودترمیم آغاز شد تا قابلیت اطمینان منابع و پاسخگویی به حوادث طبیعی یا خرابکاری عامدانه را بهبود بخشد. اما توسعه‌های بعدی سبب بهبود جنبه‌های اولیه مدنظر برای شبکه هوشمند، شدند و به شکل‌گیری چهره جدید صنعت برق کمک کرده‌اند [۴۴].

محرك اصلی در ایجاد یک شبکه هوشمند، ارتباط دو طرفه مشتریان و بخش تولید است. میل به افزایش سطح تأمین بار مورد تقاضا و استفاده از منابع تولید پراکنده و تجدیدپذیر و نیز استفاده از ذخیره-کننده‌ها چه در سطح توزیع و بازار فروش، تأثیر عمیقی بر بهره‌برداری از سیستم گذاشته است.

۳-۲-۱ چالش‌ها و موانع دستیابی به فناوری "شبکه هوشمند" [۵۰]

- **منابع مالی**، مزیت‌های تجاری زیادی در این فناوری است مخصوصاً اگر منافع اجتماعی نیز در آن باشد.
- **حمایت دولت**، صنعت ممکن است که بدون کمک دولت ظرفیت مالی به اندازه فناوری جدید را نداشته باشد.
- **تجهیزات سازگار**، برخی از تجهیزات قدیمی‌تر برای سازگاری با این فناوری جدید باید به روز شوند.
- **سرعت توسعه فناوری**، تولیدکننده الکتریسیته بادی و سلول‌های خورشیدی به عنوان جزء جدایی ناپذیر از خانه‌های آینده هستند. این پیشرفت باید سرعت بخشیده شود.

- **سیاست و مقررات**، غالباً کمیسیون بهره‌برداری نظر کوتاه بینانه‌ای به پروژه‌های ساخت و ساز جدید دارند. عبور از تنگناهای بحرانی در عملی سازی یک طرح با مقاومت شدیدی در طول تاریخ توسط این کمیسیون‌ها داشته است.

۳-۳ مقایسه شبکه‌های هوشمند و سیستم قدرت موجود

در سیستم‌های برق قدرت موجود تا کنون، سه بخش اصلی تولید و انتقال و توزیع به کمک شبکه قدرت به هم مرتبط هستند. هدف نهایی این شبکه، انتقال و تحویل انرژی الکتریکی از مولد به مصرف‌کننده می‌باشد. با گذشت زمان و افزایش تعداد مصرف‌کنندگان و میزان تقاضا، این شبکه‌های الکتریکی نیاز دارند که برای پاسخ به افزایش بار نیاز به تغییرات اساسی در ساختار خود دارند تا میزان بهره‌وری حفظ شود. برخی از کاستی‌های این شبکه در زیر بیان شده است:

- ضعیف بودن قابلیت اطمینان و امنیت فیزیکی
- یکطرفه بودن توزیع انرژی الکتریکی و عدم ارتباط مشتری با توزیع کننده و بی اطلاعی از هزینه مصرف لحظه‌ای

در سال ۲۰۰۸ اولین نمونه از شبکه هوشمند برای رفع این کاستی‌ها، وارد سیستم قدرت شدند، که بطور خلاصه مزایای شبکه هوشمند در نظارت لحظه‌ای بر پخش و تأمین بار از تولید تا مصرف‌کننده و استفاده از سیاست‌های کنترلی هوشمند در جلوگیری از قطعی‌های سراسری و حفظ سطح قابلیت اطمینان است.

ویژگی های شبکه هوشمند	ویژگی های شبکه قدرت موجود (فعلی)
فناوری دیجیتال	الکترومکانیکی بودن
ارتباط دوطرفه	ارتباط یک طرفه
تولید توزیع شده و پراکنده	تولید متمرکز
استفاده از سنسورهای بیشتر	سنسورهای اندک
قابلیت کنترل خودکار توسط خود شبکه	نظارت و کنترل دستی
خود ترمیمی	تست و ریست دستی
وفق پذیری و جزیره شدن	خطا و خاموشی سراسری
کنترل گسترده	کنترل محدود
وجود تنوع در انتخاب مشتریان	تعداد انتخاب محدود برای مشتریان

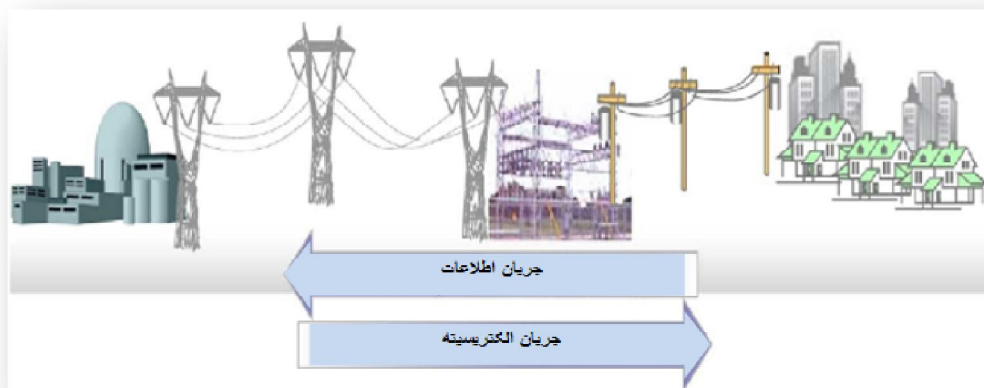
جدول (۳-۱). مقایسه بین دو شبکه قدرت موجود و هوشمند [۸۱]

شبکه های هوشمند که به آنها شبکه های آینده^{۷۶} نیز گفته می شود، در حقیقت از جریان های دوطرفه الکتریسته و اطلاعات برای طراحی یک شبکه تحویل انرژی پیشرفته که عمل توزیع را به صورت خودکار و هوشمند انجام می دهد، استفاده می شود.

۳-۳-۱ سیستم قدرت موجود

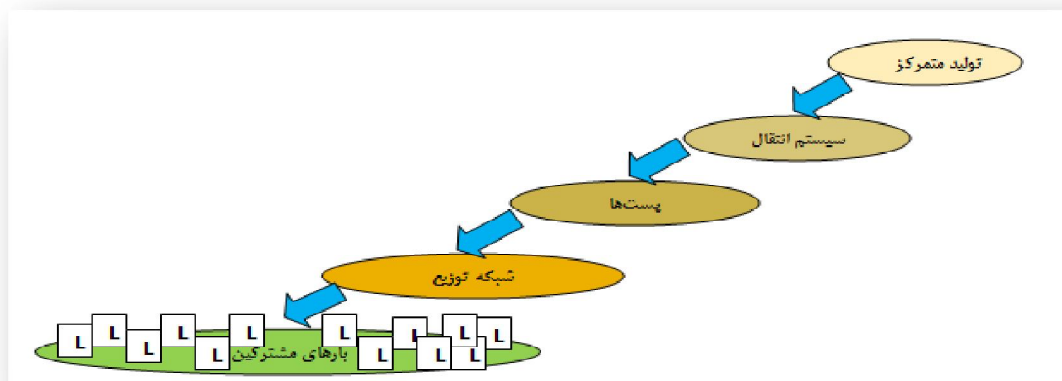
همانطور که قبلا بیان شد، امنیت، توانایی سیستم قدرت در حفظ پیوستگی تأمین بار در شرایطی که اختلال در شبکه قدرت اتفاق می افتد. شبکه برق موجود، محصول گسترش شهرنشینی و توسعه سریع زیرساخت های گوناگون در بخش های مختلف جهان در قرن گذشته می باشد. گرچه شرکت های برق در مناطق متفاوتی قرار دارند، اما بطور معمول از فناوری های مشابهی استفاده می کنند. با این حال، رشد سیستم برق، تحت تأثیر مسائل اقتصادی، سیاسی و جغرافیایی که برای هر شرکت منحصر به فرد می باشد، قرار گرفته است.

^{۷۶} - Future Net



شکل (۲-۳). ساختار یکطرفه سیستم قدرت موجود

سیستم قدرت از ابتدا تاکنون شامل سه بخش تولید، انتقال و توزیع بوده که هر قسمت اتوماسیون و تحول و دگرگونی خود را داشته است. این سیستم قدرت، ساختاری سلسله مراتبی داشته که مصرف-کنندگان، آخرین سطح از این سلسله مراتب می‌باشند (شکل (۲-۳) و (۳-۳)). در این سیستم، به دلیل یکطرفه بودن هیچگونه اطلاعات زمان واقعی در مورد نقاط پایانی شبکه برای اپراتور وجود ندارد. بنابراین، این شبکه به منظور حفظ قابلیت اطمینان، به گونه‌ای طراحی می‌شود که بتواند حداکثر تقاضا را پاسخگو باشد و از آنجاییکه زمان اوج مصرف در کسری از شبانه‌روز و زمان آن به صورت غیر دقیق است، این سیستم ذاتاً غیربهبینه است.



شکل (۳-۳). ساختار سلسله مراتبی سیستم قدرت

همچنین، یک افزایش بی‌سابقه تقاضای توان، توأم با تأخیر در سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های سیستم قدرت، پایداری سیستم را کاهش می‌دهد. در شرایط عدم وجود امنیت کافی، هرگونه تقاضای شدید پیش‌بینی نشده یا امر غیرمعمول در شبکه توزیع که باعث خطایی در قسمتی از شبکه شود، می‌تواند به خاموشی فاجعه‌آمیزی منجر شود. کمبودهای انرژی و آلاینده‌های زیست محیطی، انرژی تلف شده در خطوط انتقال و ساختار سلسله مراتبی، از دیگر ضعف‌های این شبکه‌ها می‌باشد که در بخش ابتدایی به آنها اشاره شد.

برای تسهیل عیب‌یابی و حفاظت از تجهیزات گران‌قیمت، شرکت‌های برق سطوح مختلفی از توابع فرمان و کنترل را معرفی کرده‌اند. یک سیستم متدوال از این دست، سیستم کنترل نظارتی و جمع‌آوری داده می‌باشد. اگر چه چنین سیستم‌هایی امکان کنترل محدود بر عملکرد سیستم را برای شرکت‌ها فراهم می‌کنند، اما شبکه توزیع در خارج از محدوده کنترل به هنگام آنان قرار می‌گیرد.

به طور مثال، در آمریکای شمالی، که مؤسس یکی از پیشرفته‌ترین سیستم‌های برق جهان می‌باشد، کمتر از یک چهارم از شبکه توزیع به سیستم‌های اطلاعات و مخابرات مجهز بوده و نفوذ اتوماسیون در سیستم توزیع، در سطح فیدر سیستم، تنها ۱۵٪ تا ۲۰٪ تخمین زده می‌شود [۸].

۳-۳-۲ سیستم قدرت هوشمند

در یک تعریف کلی، شبکه هوشمند مجموعه‌ای از زیرساخت‌های شبکه مخابراتی در کنار شبکه قدرت است. ویژگی منحصر به فرد این نوع شبکه، داشتن ارتباط دوطرفه و استفاده از حسگرهای پیشرفته است که قادر است قابلیت اطمینان سیستم، امنیت انتقال، کارایی و مصرف توان را بهبود بخشد.



شکل (۳-۴). ساختار سیستم قدرت هوشمند

به عبارت دیگر، داشتن ویژگی ذکر شده، مسیر مناسب دوطرفه اطلاعاتی و انرژی الکتریکی را برقرار می‌سازد و پایش لحظه به لحظه سیستم قدرت را فراهم کرده و در صورت بروز اشکال در هر قسمت از سیستم قدرت، آن را به مراتب بالاتر گزارش داده و توسط بخش محاسبات و کنترل، اقدامات اصلاحی را انجام می‌دهد و مانع از گسترش اختلال در سطح وسیع می‌گردد (شکل (۳-۴)). بنابراین، می‌توان گفت مهمترین ویژگی و یا حتی هدف اصلی از طراحی شبکه هوشمند، کنترل و پایش سیستم قدرت می‌باشد.

به طور کلی، روند پیشرفت در شبکه‌های الکتریکی و چشم‌انداز شبکه‌های هوشمند را در سه بخش خلاصه می‌کنیم که این تحولات، خود بستگی به شرایط جغرافیایی منطقه و رشد فناوری در کشورهای مختلف دارد [۶]:

- ۱- شبکه‌ی خودکار^{۷۷}: همانطور که از اسم آن پیداست، شبکه‌های مکانیزه و دارای تجهیزات خودکار به جای عملکردهای دستی است.
- ۲- نسل اولیه هوشمندسازی شبکه‌ها^{۷۸}: در این مرحله، از فناوری‌های ارتباطی و اطلاعاتی به

^{۷۷} - Automatic Net

^{۷۸} - Primery

منظور رسیدن به حداکثر بهینه‌سازی استفاده می‌شود.

۳- شبکه‌ی هوشمند: این مرحله از هوشمندسازی، شبکه‌های قدرت می‌توانند تمامی فعالیت‌های تجهیزات اعم از مولدها و تجهیزات انتقال و توزیع را به صورت هوشمند کنترل کرده و نیز برای این فعالیت‌ها از تجهیزات هوشمند استفاده کنند.

۳-۳-۳- جزئیات طراحی شبکه الکتریکی به کمک شبکه هوشمند

طراحی پست‌ها و سیستم انتقال - به منظور بهبود قابلیت اطمینان شبکه در حضور ظرفیت بالای منابع تجدیدپذیر نصب شده، باید ساختار و طراحی سیستم انتقال و پست‌ها دچار تغییر شوند. در این طراحی جدید باید هدف اصلی روی بهره‌برداری بهینه و حداقل نمودن تلفات شبکه متمرکز شود. با بهره‌گیری از شبکه هوشمند در این بخش، سرعت بخشیدن به رفع اختلالات بوجود آمده در شبکه است.

طراحی شبکه توزیع - سیستم‌های توزیع فعلی برای انتقال توان الکتریکی به صورت یکطرفه طراحی شده‌اند. به عبارت دیگر در شبکه توزیع، توان از پست‌ها به سمت مصرف‌کنندگان انتهایی انتقال می‌یابد. اما در شبکه هوشمند به علت وجود منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازها در نقاط مختلف شبکه توزیع، باید امکان جاری شدن توان در هر دو سمت فراهم شود. اما جاری شده توان از دو سمت باعث بروز مشکلات جدی در سیستم‌های قدیمی کنترل ولتاژ و سیستم‌های حفاظتی شبکه توزیع خواهد شد. یکی از راه‌کارهای مؤثر جهت غلبه بر این مشکلات، طراحی شبکه توزیع به صورت حلقوی و شبکه‌ای می‌باشد. با تغییر این ساختار شبکه توزیع به ساختار حلقوی می‌توان از سیستم‌های حفاظت، پایش و کنترل پیشرفته‌ای برای امکان برقراری پخش بار دوجته در شبکه توزیع بهره برد [۸۱].

فصل چهارم

تأثیر شبکه هوشمند بر امنیت سیستم قدرت
*(Impact of Smart Grid on Power System
Security)*

اولین و اصلی‌ترین هدف هر سیستم قدرت از گذشته تاکنون، تحویل انرژی الکتریکی به موقع و بهینه به مصرف‌کنندگان (اعم از مصرف‌کننده خانگی یا صنعتی) بوده است. رشد سریع تقاضا برای انرژی الکتریکی و نیز افزایش شرایط غیرقطعی حاصل از منابع انرژی تجدیدپذیر باعث پیچیده‌تر شدن سیستم قدرت شده است، این امر، سیستم قدرت را برای رسیدن به هدف اولیه‌اش دچار چالش بزرگی کرده است. در حقیقت، صنعت برق برای پاسخگویی به این افزایش تقاضا با حفظ امنیت، نیازمند تحولی عظیم بوده است، که این تحول به کمک شبکه هوشمند میسر گردیده است. شبکه هوشمند با استفاده از ویژگی‌های خاص خود همچون استفاده بیشتر از فناوری ارتباط دوطرفه که ساختار مخابراتی دارد، راه را برای این تحول، کوتاه نموده است.

در ادامه می‌توان گفت، با توجه به جزئیات طراحی بخش توزیع در شبکه الکتریکی با کمک شبکه هوشمند، سیستم‌های اتوماسیون توزیع به طور گسترده در طراحی شبکه توزیع نفوذ خواهند کرد و باعث ارتقای سطح کنترل شبکه هوشمند خواهند شد. سیستم‌های پیشرفته اتوماسیون توزیع شامل موارد زیر می‌باشد:

- جهت بهبود قابلیت اطمینان شبکه توزیع، باید میزان وقفه‌ها کاهش یافته و سرعت بازیابی شبکه افزایش یابد.
- افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده و به خصوص منابع انرژی پراکنده تجدیدپذیر و ذخیره‌کننده‌ها در شبکه توزیع از چالش‌های مهم بهره‌برداری محسوب می‌شود. اگرچه این منابع باعث کاهش انتشار آلاینده و همچنین بهبود اقتصاد انرژی می‌شوند، اگر به درستی کنترل و مدیریت نشوند باعث ناپایدار شدن (کاهش امنیت) شبکه خواهند شد.

رویکردی که ما در این پایان نامه در برخورد با مفهوم امنیت سیستم قدرت و بررسی تأثیر شبکه

هوشمند بر آن در نظر گرفته‌ایم، مسئله پخش بار است.

طبق آنچه که در فصل اول گفته شد، امنیت استاتیک مربوط به حفظ پایداری پارامترهای بهره‌برداري مثل ولتاژ و جریان خطوط در محدوده مجاز است.

در این قیدها، منظور از STrans جریان انتقالی خطوط V است. ولتاژ باس و حدود آن داده شده است.

از طرفی، برای هر مولد یک محدوده عملکرد دینامیک تعریف می‌کنیم که حدود این بازه با توجه به حدود تغییرات رمپ و حداقل و حداکثر تولید آن مولد تعیین می‌شود.

رویکرد شبکه هوشمند در تقویت امنیت سیستم قدرت، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر [۴] بیشتر و پخش بار بهینه پایدار در برابر شرایط غیرقطعی می‌باشد، زیرا که استفاده از این منابع منوط به کنترل دقیق پارامترهای غیرقطعی مانند تغییرات ناگهانی در خروجی مولد خورشیدی^{۷۹} (PV) است. شبکه هوشمند با استفاده از بستر مخابراتی برای انتقال دوطرفه اطلاعات از وضعیت لحظه‌ای سیستم به کمک سنسورهای موجود و نیز استفاده از دستگاه‌های الکتريکی هوشمند در محاسبات پخش بار قادر به ارائه یک فرآیند پخش اقتصادی بار پایدار دینامیک می‌باشد.

در این فصل قصد داریم تا روش ارائه شده در [۱] را که شامل دو بخش است مورد بررسی قرار دهیم. بخش اول مربوط به تعریف امنیت دینامیک پایدار و بخش دوم مربوط به تعریف پخش بار اقتصادی دینامیک است. در بخش اول، با استفاده از معیار امنیت N-1 امنیت استاتیک را فرموله می‌کنیم و سپس با توجه به پارامتر غیرقطعی بار پیش‌بینی شده، مفهوم امنیت دینامیک پایدار را فرموله شده و محدوده آن را مشخص می‌شود.

^{۷۹} - photovoltaic

در بخش دوم، به کمک مفهوم محدوده عملکرد دینامیک و مقدار رمپ هر مولد، توانایی پاسخ‌دهی آن را به بار پیش‌بینی شده در هر لحظه تخمین زده می‌شود. با تخمین این توانایی و تعمیم محدوده عملکرد دینامیک به محدوده عملکرد دینامیک پایدار برای هر مولد، عمل زمانبندی تولید مولدها را با کنترل‌کننده شبکه هوشمند و به صورت بی‌درنگ و لحظه‌ای انجام شده است. در حین این زمانبندی، محدوده امنیت دینامیک پایدار زیر نظر گرفته می‌شود تا در موقع لزوم (کاهش این محدوده) از صفحات خورشیدی (PV) و ذخیره‌کننده‌ها استفاده شود.

برای شروع کار، ابتدا معیار امنیت "N-1" را تعریف می‌کنیم و سپس به کمک آن مفهوم امنیت استاتیک در سیستم قدرت را فرموله می‌کنیم.

۴-۱ تعریف امنیت سیستم قدرت پایدار^{۵۶}

در ابتدا از معیار امنیت N-1 برای تعیین محدوده امنیت استاتیک استفاده می‌کنیم. طبق فرمول (۱-۱) ارائه شده در [۱] و با توجه به قید توان خروجی داریم:

$$f^n(x, u, p) = 0 \quad (1-4)$$

$$\mathbb{R}^{B+G+L} \rightarrow \mathbb{R}^B, u_{min} \leq u \leq u_{max}, \\ X \in \mathbb{R}^B, u \in \mathbb{R}^G, p \in \mathbb{R}^L, n=0, 1, \dots, N$$

در معادله (۱-۴)، f معادله جریان است (با دامنه B)، x بردار متغیر برای بیان حالت اجزاء سیستم است، u متغیر کنترل برای توان خروجی مولد^{۵۷}، G امنه تغییرات و p پارامتر نوسانات غیرقابل کنترلی مانند بار است (با دامنه تغییرات L). با توجه به معادله جریان f^n ، $n=0$ نشان دهنده شرایط قبل از خطا و وضعیت $n=1 \dots N$ برای سایر شرایط احتمالی برای تعریف معیار امنیت N-1 است. در برنامه‌ریزی سیستم قدرت هنگامیکه p بار پیش‌بینی شده است، خروجی u مطابق با بار p تخمین زده می‌شود. وقتی

^{۵۶} - Robust Power System Security

پارامترهای نقطه عملیاتی قبل از خطا (u,p) داده شده و X معادله (۱-۴) برای هر شرط n تخمین زده می-شود و X تا Xⁿ را برای هر شرط تعیین می کنیم، آنگاه X نشان دهنده شرایط قبل از خطا و X¹ تا Xⁿ شرایط خطا را نشان می دهد.

فرض کنیم (u, p) یکبار تخمین زده شوند و قبل و بعد از خطا تغییر نکنند. در آخر معیار N-۱ طبق محدوده های زیر برای همه شرایط X تا Xⁿ برقرار است.

$$g^{c^1.n}(x^n, u, p) \leq \bullet, \quad n=0,1,\dots,N \quad (C_1) \quad (2-4) \quad \text{حدود خط انتقال}$$

$$g^{c^2.n}(x^n, u, p) \leq \bullet, \quad n=0,1,\dots,N \quad (C_2) \quad (3-4) \quad \text{حدود ولتاژ}$$

$$g^{c^3.n}(x^n, u, p) \leq \bullet, \quad n=0,1,\dots,N \quad (C_3) \quad (4-4) \quad \text{حدود پایداری ولتاژ}$$

$$g^{c^4.n}(x^n, u, p) \leq \bullet, \quad n=0,1,\dots,N \quad (C_4) \quad (5-4) \quad \text{حدود پایداری گذرا}$$

$$g^{c^5.n}(x^n, u, p) \leq \bullet, \quad n=0,1,\dots,N \quad (C_5) \quad (6-4) \quad \text{انحراف فرکانس (کنترل عرضه و تقاضا)}$$

معادلات (۲-۴) و (۳-۴) مربوط به حد ولتاژ است که به سادگی قابل محاسبه می باشد. معادله (۴-۴) محدودیت برای پایداری ولتاژ است، که برای محاسبه حداکثر بار یک نقطه استفاده می شود. معادله (۵-۴) محدودیت پایداری گذرا را تعریف می کند. معادله (۶-۴) محدودیت انحراف فرکانس است. با استفاده از عبارت ریاضی بالا، هدف از برنامه ریزی عملیاتی، تخمین متغیر کنترلی u (توان الکتریکی تولید شده برای برقراری معادلات (۱-۴) تا (۶-۴)) با در نظر گرفتن بار p داده شده است.

$$g^n(x^n, u, p) \leq \bullet \quad n=0,1,\dots,N \quad (7-4)$$

$$g^n = [g^{cl.n}, g^{c^2.n}, g^{c^3.n}, g^{c^4.n}, g^{c^5.n}]$$

منظور از g^n قید مربوط به مولد n ام است. زمانی که خروجی در شرایط $u_{min} \leq u \leq$

u_{max} صدق کند، x^n در راه حل $f^n(x, u, p) = \bullet$ صدق می کند.

۴-۱-۱ منطق امنیت استاتیک با برقراری معیار N-۱

برقراری معیار امنیت N-۱ برای بار داده شده p، معادل آنست که uای خروجی تخمین زده شده داخل محدوده‌ای است که در آن محدوده، همه قیدها تحت همه احتمالات برقرارند.

$$SS_u(p) = \{u | SS_{o,u}(p) \cap SS_{l,u}(p) \cap \dots \cap SS_{N,u}(p)\} \quad (۸-۴)$$

$$SS_{n,u}(p) = \{u | u_{min} \leq u \leq u_{max}, f^n = \cdot, g^n \leq \cdot\}$$

$$n = 0, 1, \dots, N$$

به این محدوده، محدوده امنیت استاتیک (SS) گوئیم که این تعریف برای برشی از عملیات سیستم قدرت در یک لحظه‌ی زمانی مشخص است. محدوده SS ناحیه خروجی‌های یک مولد است که برای مقداری مشخص از پارامتر p در معیار N-۱ برقرار است. نقطه عملیاتی سیستم قدرت که در این ناحیه قرار داشته باشد معادل آنست که طبق معیار N-۱ سیستم امن است. برای استفاده از این معیار، قطعی بودن پارامترهای سیستم قدرت الزامی است. در قسمت بعد، این معیار با در نظر گرفتن عدم قطعیت بررسی می‌شود.

۴-۱-۲ معیار امنیت با توجه به عدم قطعیت

قبل از اینکه به تعمیم معیار N-۱ برای مفهوم امنیت با توجه به عدم قطعیت بپردازیم، لازم است که مقدار بار را برای زمان مشخص به طور دقیق پیش‌بینی کرده و تخمین بزنیم. فرض کنیم معادله p(t)، برداری از پارامترهای نوسان در زمان t باشد. با در نظر گرفتن مقدار خطای پیش‌بینی $\Delta(\delta_t)$ که به عنوان عدم قطعیت در این تحقیق بیان می‌شود، معادله‌ای به صورت زیر حاصل می‌شود:

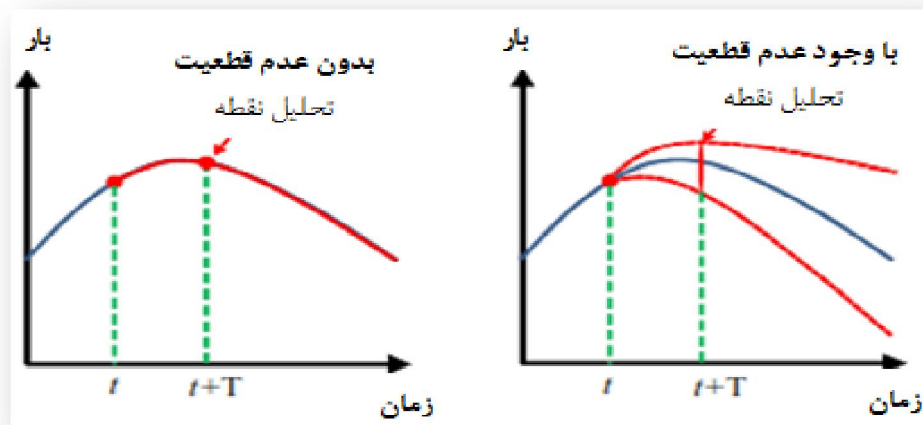
$$P(t) = \dot{p}(t | t - \delta_t) + \Delta(\delta_t) \quad n = 0, 1, \dots, N \quad (۹-۴)$$

$$Pr\{\underline{\Delta}(\delta_t) < \Delta(\delta_t) < \bar{\Delta}(\delta_t)\} = CL, \quad 0 \leq CL \leq 1$$

در معادله (۴-۹)، در مرحله نخست توسط تابع پیش‌بینی $p(t)$ و با توجه به زمان قبلی $(t-\delta t)$ ، بار مورد تقاضا در لحظه t پیش‌بینی می‌شود. در دومین مرحله، منظور از p_r ، احتمال وجود خطای پیش‌بینی (عدم قطعیت) در بازه اطمینان است. پارامتر CL برای بیان درجه اطمینان بیان می‌شود. عدم قطعیت معمولاً هنگامی که فاصله زمانی پیش‌بینی (δt) افزایش می‌یابد، بزرگتر می‌شود. در [۱] فرض شده که حدود بالایی و پایینی بازه اطمینان برای عدم قطعیت با روش‌های قطعی بدست می‌آید. منطقه اطمینان بوسیله بازه‌های اطمینان پارامترهایشان در زیر تعریف شده است.

$$R_p \{ P | \dot{p} + \underline{\Delta} < P < \dot{p} + \overline{\Delta} \} \quad (۴-۱۰)$$

در شکل (۴-۱)، نشان داده شده است که با وجود عدم قطعیت، میزان بار پیش‌بینی شده و نیز خروجی مولد در نقطه عملیاتی جدید $(t+T)$ به صورت یک بازه (با توجه به معادله (۴-۹)) بیان می‌شود. عدم قطعیت محدوده تعریف شده Δ حول پارامتر پیش‌بینی P برای مقدار مشخص از فاصله اطمینان بیان شده است. عملاً حداکثر خطای پیش‌بینی در p ممکن است به عنوان Δ در نظر گرفته شود. برنامه‌ریزی و طراحی سیستم قدرت معمولاً براساس ۴ مرحله است، که عبارتند از: برنامه‌ریزی سالانه (برنامه‌ریزی تقویت شده، برنامه‌ریزی توسعه)، برنامه‌ریزی از ماهانه تا هفتگی برای عرضه و تقاضای سیستم قدرت، برنامه‌ریزی عملیات روز بعد و عملکرد لحظه‌ای.



شکل (۱-۴). محدوده اطمینان برای پارامترهای غیرقطعی [۱]

می‌توانیم با روش ارائه شده در [۱] در هر مرحله وضعیت امنیت سیستم را، بررسی کنیم. برای برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت موجود، الگوی بار پیش‌بینی شده را با احتساب عدم قطعیتی که مقادیر کوچک دارند، مدل می‌کنیم. افزایش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر بر شیوه ما برای بررسی امنیت در سیستم قدرت تأثیر زیادی گذاشته است، زیرا تولید انرژی الکتریکی توسط این منابع تابع عدم قطعیتی همچون خطای میزان بار پیش‌بینی شده و تغییر شرایط آب و هوایی می‌باشد. هر چقدر که در آن معیار امنیت $N-1$ برای تولیدکننده‌ها بیشتر شوند، عدم قطعیت بیشتر شده و طول فاصله اطمینان که در معادله (۱۰-۴) بیان شده، کوتاه‌تر می‌شود. اکنون ما محدوده امن استاتیک که در معادله (۸-۴) بیان کردیم، را دوباره با تغییر فاصله اطمینان، با استفاده از مفهوم پایداری در معادله (۱۱-۴)، تعریف می‌کنیم.

$$RSS_u = \{u | u \in \bigcap_{p \in R_p} SS_u(p)\} \quad (11-4)$$

در معادله (۱۱-۴) که برگرفته از مرجع [۱] است. پارامتر p ، یک پارامتر غیرقطعی است، برای داشتن یک محدوده امن استاتیک پایدار باید برای p های مختلف مقدار خروجی مشخص در همه محدوده‌های استاتیک وجود داشته باشد.

برای برقراری امنیت، نیاز به بررسی تولید به موقع الکتریسیته با توجه به مفهوم محدوده عملکرد دینامیک^۱ (DF) مولدها داریم.

۴-۲ محدوده عملکرد دینامیک (DF)

هر یک از مولدها محدوده عملیاتی خاصی مثل محدودیت مربوط به تغییرات توان خروجی، محدودیت مربوط به نرخ رمپ که ناشی از فشار گرمایی است، دارند. انرژی وعده داده شده و مسائل کنترل انرژی با توجه به این محدوده تعریف می‌شوند. برای مثال، کنترل تغییرات خروجی از $U(t_1)$ به $U(t_2)$ با یک حد در نظر گرفته شده است که این حد به عنوان یک تابع کنترل نرخ δt در نظر گرفته شده است. این تابع برای بیان تغییرات به صورت دینامیک به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$h(u(t_1), u(t_2), \delta t) \leq 0 \quad (12-4)$$

فرض کنیم در زمان t_1 ، (x_1, u_1, p_1) به عنوان نقطه شروع داده شده باشد، u_{i1} (خروجی در لحظه t_1) و p_1 خروجی پیش‌بینی شده X_1 وضعیت سیستم در این لحظه است. همچنین p_2 در زمان $t_2 = t_1 + \delta t$ نیز داده شده است، سپس نقطه عملیاتی (x_2, u_2, p_2) در زمان t_2 باشد، که در معادله (۴-۱۲) نشان داده شده است، تخمین زده شده است. در این معادلات منظور از u_i ، u_{ii} است و منظور از p_i ، بار پیش‌بینی شده برای لحظه i ام است این محدوده با عبارت ریاضی زیر نشان داده شده است:

$$DF_{u_2}(u_1, p) = \{u_2 | h(u_1, u_2, \delta t, p_1, p_2) \leq 0, f(x_2, u_2, p_2) = 0\} \quad (13-4)$$

هدف از مشخص کردن محدوده عملکرد، تعیین محدوده‌ای است که در آن مولد بیشترین ظرفیت را برای تأمین تقاضا دارد. یعنی مولد در زمان t_1 که خروجی u_1 را دارد، برای تأمین مقدار خروجی پیش‌بینی شده

^۱ - Dynamic Feasibility

p_2 در زمان t_2 ، توانایی تولید خروجی u_2 را دارد. محدوده عملکرد (DF) وابسته به محدودیت‌های امنیتی نیست، اما با در نظر گرفتن محدودیت‌های دینامیک و معادلات جریان، نشان دهنده حداقل محدودیت‌ها برای عملکرد سیستم همچون محدودیت تعادل عرضه/ تقاضا است.

روش محاسبه متوالی DF که در [۷۷] و [۷۸] نشان داده شده است، با توجه به حدود بالا و پایین خروجی مولد، محدودیت رمپ و محدودیت‌های تعادل عرضه/ تقاضا براساس بار پیش‌بینی شده است.

$$RDF_{u_2}(u_1) = \left\{ u_2 \mid u_2 \in \bigcap_{p_1 \in R_{p_1}, p_2 \in R_{p_2}} DF(u_1, p) \right\} \quad (14-4)$$

اساس تعاریف ما با استفاده از مفهوم محدوده امنیت پایدار استاتیک (RSS) است، DF را به کمک این مفهوم تعمیم می‌دهیم تا به یک محدوده عملکرد دینامیک پایدار که با شرایط غیرقطعی وفق پیدا کند، برسیم. یعنی محدوده عملکرد پایدار $(RDF)^{A2}$ برای خروجی u_2 با توجه به خروجی اولیه u_1 ، که در معادله (۴) - (۱۴) بیان شده است. در ادامه، از این محدوده برای تعیین محدوده امنیت دینامیک پایدار استفاده می‌شود. RDF، پیش‌بینی مورد نظر را پس از فاصله زمانی δt با وجود عدم قطعیت، به عنوان خروجی تضمین می‌کند. برای اینکه خروجی u_2 در محدوده عملکرد پایدار، با پارامتر پیش‌بینی بار p در شرایط غیرقطعی، قرار داشته باشد، بایستی u_2 در محدوده عملکرد تعریف شده در معادله (۴-۱۳) و در همه فاصله‌های اطمینان p وجود داشته باشد.

۴-۳ محدوده امنیت دینامیک پایدار

فرض کنیم در چند نقطه، طراحی عملیات سیستم قدرت را تنظیم می‌کنیم. با توجه به دیدگاه پیوسته بودن زمان در برنامه‌ریزی برای سیستم، مفهوم امنیت استاتیک را به مفهوم امنیت دینامیک تعمیم می‌-

^{A2} - Robust Dynamic Feasibility

دهیم. در برنامه‌ریزی عملکرد سیستم‌های قدرت موجود، عملکرد سیستم قدرت را به صورت برش‌های زمانی و بدون در نظر گرفتن شرایط دینامیک بررسی می‌کردیم. قبل از برش استاتیک گسترش این امر در زمان‌های مختلف منجر به تخمین محدوده امنیت استاتیک می‌شود. فرض می‌کنیم RSSها در $t=t_1$ و $t=t_2$ تخمین زده شده‌اند، خروجی u_1 در لحظه‌ی t_1 به کمک محدوده امنیت استاتیک (RSS) قابلیت رسیدن به خروجی u_2 در لحظه‌ی t_2 را خواهد داشت.

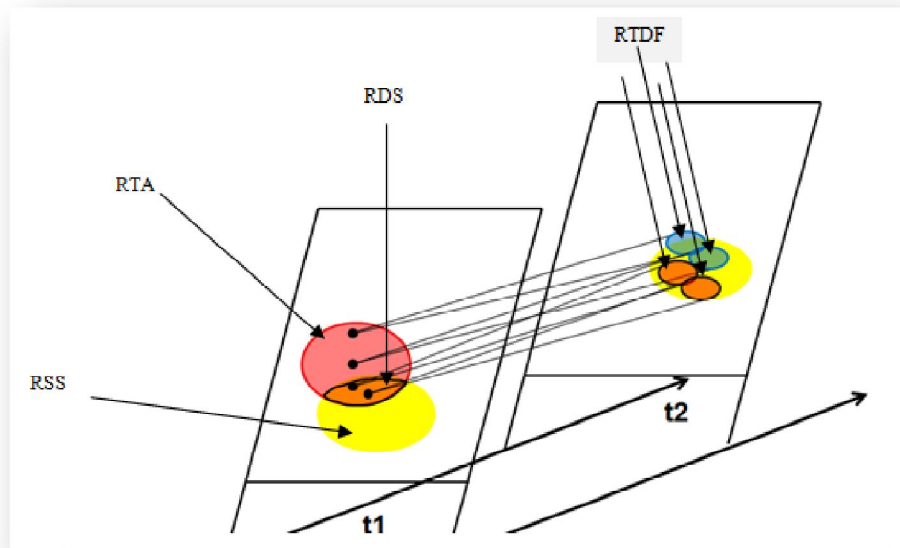
$$RTA_{u_1} = \{u_1 | (RDF_{u_2}(u_1) \cap RSS_{u_2}) \neq \emptyset\} \quad (15-4)$$

بنابراین، به کمک معادله (15-4) یک محدوده پایدار را برای امنیت در لحظه‌ی t (چند لحظه بعد)^{۸۲} تعریف می‌کنیم. محدوده RTA_{u_1} شامل u_1 هایی (خروجی در لحظه t_1) است که اشتراک دو ناحیه RDF_{u_2} و RSS_{u_2} حداقل دارای یک نقطه باشد، که در آن u_2 ها خروجی در لحظه t_2 هستند. ناحیه مشترک بین RTA_{u_1} و RSS_{u_1} را RDS_{u_1} گوییم (شکل (۲-۴)).

بنابراین به کمک معادله (15-4) یک محدوده پایدار برای امنیت در لحظه‌ی t (چند لحظه بعد) تعریف می‌کنیم. در آخر امنیت‌های استاتیک پایدار در t_1 و t_2 فقط زمانی تضمین می‌شوند که u_1 در مناطق مشترک بین RSS_{u_2} و RTA_{u_1} باشد، اشاره به امنیت در لحظه‌ی T_1 و یک مسیر امن دینامیک برای عملیاتی در لحظه‌ی T_2 دارد. در این تحقیق این منطقه‌ی مشترک را به عنوان منطقه‌ی RDS تعریف می‌کنیم که به شرح زیر است:

$$RDS_{u_1} = \{u_1 | u_1 \in RSS_{u_1} + RTA_{u_1}\} \quad (16-4)$$

^{۸۲} - Region for Time-Ahead



شکل (۴-۲). محدوده عملکرد و امنیت دینامیک [۱]

زیرنویس شکل (۴-۲) RSS- محدوده عملکرد استاتیک. RDF- محدوده عملکرد پایدار که تحت پارامتر غیرقطعی مشخص، مولد با بالاترین ظرفیت، تولید می‌کند تا به مقدار تقاضا شده برسد. RTA- محدوده ای است که در آینده از طریق محدوده RSS به آن می‌توانیم برسیم و ممکن است کل محدوده اولیه RSS را شامل بشود یا جزئی از آن باشد. RDS- محدوده امن دینامیک و پایدار که از اشتراک RTA و RSS بدست می‌آید.

در شکل (۴-۲) هر نوع محدوده‌ای در فضای بردار کنترل u ، خروجی توان الکتریکی در t_1 و t_2 تعریف شده است و برای این مدت زمان، وقتی که خروجی u در ناحیه RDS باشد، امنیت تضمین شده است. به عبارت دیگر RDS، برقرار بودن معیار امنیت $N-1$ را تضمین می‌کند. به این معنا که پارامترهای عدم قطعیت باید در فاصله اطمینان خود قرار داشته باشند. طول فاصله اطمینان وابستگی شدیدی به دقت پیش‌بینی پارامترها دارد و روی سطح اطمینان خاصی قرار دارد. بیشتر عدم قطعیت افزایش یافته‌اند، فاصله اطمینان بزرگتر و RDS کوچکتر، حاکی از مشکل امنیت در عملیات است.

۴-۳-۱ محدوده امنیت پایدار برای پخش بار اقتصادی دینامیک

محدوده DF معادله (۴-۱۳) را به یک مساله در زمانهای متوالی با شروع از نقطه عملیاتی u در زمان فعلی تعمیم می‌دهیم. با در نظر گرفتن چگونگی زمانهای متوالی آنلاین، محدوده DF در زمانهای متوالی (TDF) در معادله (۴-۱۷) نشان داده شده است.

$$TDF_u(t,p) = \{u(t) | u(\tau) \in DF_{u(\tau)}(u(\tau-1), p), \tau = 1 \dots t, u(\cdot) = u.\} \quad (۴-۱۷)$$

در معادله (۴-۱۷) محدوده عملکرد $TDF_u(t,p)$ تابع پارامترهای $p(1), p(2), \dots, p(t)$ در معادله (۴-۱۳) می‌باشد و همچنین لحظه‌ی $t=0$ جایگزین زمان فعلی می‌شود که در این زمان مقدار خروجی $U(0)$ ثابت و قطعی در نظر گرفته شده است. محدوده‌ی ذکر شده در معادله بالا ممکن است به روشی مشابه به TDF پایدار یا RTDF به همراه وجود عدم قطعیت برای پارامترها تعمیم یابد.

$$RTDF_u(t) = \{u(t) | u(t) \in \bigcap_{p_{\tau} \in R_{p_{\tau}}, \tau=1..t} TDF_u(t, p)\} \quad (۴-۱۸)$$

منظور از R_{pt} ، فاصله اطمینان برای پارامتر $p(t)$ است. در بخش بعد روشی را برای تخمین RTDF نقطه عملیاتی داخل محدوده امن پایدار در ناحیه مشترک بین RTDF و RSS ارائه می‌دهیم (معادله ۴-۱۹).

$$u(t) \in \{RTDF_u(t) \cap RSS_u(t)\} \quad (۴-۱۹)$$

محدوده فوق، محدودتر از RDS است، بنابراین به شکل ترکیب شده بوسیله $RDS_{u(t)}$ در آمده است که امنیت پایدار را تضمین می‌کند. در بخش بعد، اگرچه تنها شرط C_1 لحاظ شده است، یک رویکرد جدید

برای پخش بار اقتصادی دینامیک^{۸۴} (DELD) در زمان لحظه‌ای در مقابله با عدم قطعیت ارائه شده است.

۴-۴ مسئله پخش بار اقتصادی دینامیک به همراه عدم قطعیت

در این بخش، مسئله پخش بار اقتصادی دینامیک (DELD) با توجه به وجود عدم قطعیت بررسی شده است. در این مسئله تنها حد انتقال خط (معادله (۴-۲)) در نظر گرفته شده، در حالی که دیگر حدود امنیتی در نظر گرفته نشده است. فرض کنیم ارزیابی امنیت فعلی سیستم انجام شده، سپس حدود امنیت خطوط جریان تخمین زده شده است. از آنجا که رفع مشکل عدم قطعیت برای امنیت پایدار، موضوع اصلی بحث ماست، تمرکز عمده روی قیدها (معادلات (۴-۲۱) تا (۴-۲۵)) در مسئله DELD، بیشتر از تابع هدف (معادله (۴-۲۰)) که به منظور مطالعه منطقه بهره‌برداری از سیستم قدرت بیان شده است) است. تابع هدف برای این مسئله، منحصر به فرد نیست.

این روش ارائه شده براساس زمانبندی تولید در مدت ۲۴ ساعت محاسبه شده است، در هر لحظه پیش‌بینی برای یک ساعت آینده انجام می‌گیرد که هر ۵ دقیقه به روز می‌شود.

مشخصات روش ارائه شده در این تحقیق به صورت زیر است:

(i) روش جدید DELD، با استفاده از پیش‌بینی یک ساعته با توجه به فاصله اطمینان، به عنوان تابعی از زمان پیش‌بینی است. این راه‌حل ترکیبی از روش برنامه‌ریزی چندجمله‌ای و روش جریان بار تصادفی خطی^{۸۵} (SLF) [۸۶] است، که در آن احتمال نقض محدودیت شبکه یک مقدار مشخص است.

(ii) تعادل عرضه/ تقاضا در طول ۲۴ ساعت بهتر صورت می‌گیرد (امکان‌پذیری بیشتر پخش بار).

(iii) در مورد یک وضعیت بحرانی که بار پیش‌بینی شده با خروجی مولد مطابقت ندارد، این روش

^{۸۴} - Dynamic Economic Load Dispatch

^{۸۵} - Stochastic Load Flow

حداقل میزان عدم تطبیق عرضه و تقاضا را از قبل تشخیص داده و قابلیت اطمینان را در زمان افق مورد نظر کنترل می‌کند.

۴-۵ مسئله DELD

مسئله معمولی DELD به صورت بیان می‌شود:

$$Cost = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_g} f_k(P_{Gkt}) \quad (20-4)$$

$$f_k(P_{Gkt}) = a_k P_{Gkt}^2 + b_k P_{Gkt} + c_k \quad (21-4)$$

$$\sum_{k=1}^{N_g} P_{Gkt} = P_{Dt} = \sum_{m=1}^{N_d} P_{Dmt} \quad \text{i. محدودیت تعادل تأمین و تقاضا} \quad (22-4)$$

$$\underline{P_{Gk}} \leq P_{Gkt} \leq \overline{P_{Gk}} \quad \text{ii. حد خروجی مولد} \quad (23-4)$$

$$-\delta_k \leq P_{Gk(t-1)} - P_{Gkt} \leq \delta_k \quad \text{iii. محدودیت نرخ رمپ} \quad (24-4)$$

iv. محدودیت امنیت در خط انتقال

$$LF_l \leq F_l \leq UF_l \quad (25-4)$$

v. معادله جریان قدرت (روش جریان قدرت DC) برای این منظور معادله (۴-۴۰) در بخش بعد را ببینید

در این معادلات، منظور از P_{Gkt} ، توان خروجی مولد k ام در لحظه t ام است. f_k یعنی هزینه مولد k ام، a_k, b_k, c_k یعنی ضرایب چند جمله ای هزینه برای مولد k ام است، P_{Dt} تقاضای نهایی در لحظه t ام است

P_{Dmt} یعنی تقاضا برای بار m در لحظه t و δ_k یعنی حد نرخ رمپ برای مولد k ، توجه داشته باشید که هر دو از شاخص $t=0$ برای نقطه‌ی لحظه‌ی فعلی و از $t=T$ برای نقطه‌ی پایانی زمان افق استفاده کردیم.

حد بالا و پایین خروجی مولد k هستند UF_k و LF_k یعنی حدود بالا و پایین برای امنیت خط انتقال است.

۴-۶ بیان عدم قطعیت

با افزایش میزان استفاده از منابع تجدید پذیر انرژی، دو نوع عدم قطعیت، یکی ناشی از خطا در پیش بینی تقاضا و دیگری ناشی از خروجی منابع تجدیدپذیر داریم. فرض می‌کنیم توان الکتریکی که برای پاسخ‌دهی به تقاضاها منتقل می‌شود، متغیرهای احتمالی هستند که مشخصات زیر را دارند.

$$E[P_{Dmt}] + \underline{\Delta}_{PDmt} < P_{Dmt} < E[P_{Dmt}] + \bar{\Delta}_{PDmt} \quad (۲۶-۴)$$

$$\Pr\{\underline{\Delta}_{PDmt} < \Delta_{PDmt} < \bar{\Delta}_{PDmt}\} = C, \quad 0 \leq C \leq 1 \quad (۲۷-۴)$$

که در آن $E[*]$ امید* است. وقتی که تابع چگالی احتمال برای P_{Dmt} موجود است، فواصل اطمینان به شکل زیر محاسبه می‌شود.

$$P_{Dt} = \sum_{m=1}^{Nd} P_{Dmt} \ll E[P_{Dt}] + \bar{\Delta}_{PDt} \ll E[P_{Dt}] + \underline{\Delta}_{PDt} \quad (۲۸-۴)$$

$$\Pr\{\underline{\Delta}_{PDmt} < \Delta_{PDmt} < \bar{\Delta}_{PDmt}\} = C, \quad 0 \leq C \leq 1 \quad (۲۹-۴)$$

۴-۱۷ الگوریتم محدوده‌ی عملکرد دینامیک زمانی پایدار^{۸۶} (RTDF)

در این بخش (از [۱]) الگوریتمی برای RTDF پیشنهاد شده است که ترکیبی از روش‌های موجود در [۳۴] و [۳۵] است. ابتدا محاسبه روش TDF برای مولد k ام (برگرفته از [۱]) توضیح داده شده، سپس TDF به RTDF تعمیم داده شده است. در معادله (۴-۱۷)، TDF به صورت کلی بیان شده است، اما در ابتدا تعریفی دوباره براساس محدودیت‌های DELD برای TDF داریم. TDF تعریف شده (معادله (۴-۳۰)) ناحیه‌ای است که در این ناحیه، تغییر از نقطه عملیاتی مشخص قبلی (u, p) (خروجی u و بار پیش‌بینی شده p) به نقطه عملیاتی جدید که شامل خروجی مولد k ام در لحظه t (p_{Gkt}) و بار پیش‌بینی شده برای $t=1, \dots, T$ و با برقراری همه قیدهای (۴-۲۲) تا (۴-۲۴) امکانپذیر است.

کران‌های بالا و پایین TDF برای مولد k ام در لحظه t با Γ ام با $(\underline{\alpha}_{kt}$ و $\bar{\alpha}_{kt})$ نشان داده شده است. سپس TDF تعریف شده در معادله (۴-۱۷) به شکل زیر تعمیم می‌یابد.

$$TDF_{Pk}(t, P_D) = \{P_{kt} | \underline{\alpha}_{kt} \leq P_{kt} \leq \bar{\alpha}_{kt}\} \quad (۴-۳۰)$$

توجه داشته باشید که P_D پارامتری برای تعریف TDF، شروع از P_{kt} با P_{Dt} پیش‌بینی شده است. یک الگوریتم ارزیابی TDF در [۳۵] پیشنهاد شده است که در آن نقطه‌ی عملکرد $t=0$ به عنوان نقطه‌ی شروع به منظور دستیابی به نقاط قابل دسترسی پی در پی روبه جلو تا $t=T$ است. حد بالای عملیات ممکن $\bar{\alpha}_{kt}$ و حد پایین آن $\underline{\alpha}_{kt}$ برای هر مولد متعهد $k=1, \dots, N$ با استفاده از آخرین بار پیش‌بینی شده-ی P_{Dt} ؛ $t=1, \dots, T$ محاسبه شده است. کران بالای TDF برای هر واحد تولیدی با سه متغیر زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{\alpha}_{kt} = \min\{\bar{P}_{kt}, \bar{M}_{kt}, \bar{\alpha}_{k(t-1)} + \bar{R}_{kt}\} \quad (۴-۳۱)$$

^{۸۶} - Robust Time Dynamic Feasibility

(i) حداکثر تولید واحد k ام، p_{kt} ، (اولین عبارت معادله (۴-۳۱)).

(ii) حد تولید واحد k ام با توجه به ظرفیت تولید دیگر واحدهای تولید و بار، \bar{M}_{kt} ، (دومین عبارت معادله (۴-۳۱)). این مقداری است که واحد k ام باید به منظور مطابقت دادن بار، زمانی که دیگر واحدهای تولیدی در حداقل خروجی خود هستند، تولید کند.

$$\bar{M}_{kt} = P_{Dt} - \sum_{j=1, j \neq k}^{N_\lambda} P_j \quad (۴-۳۲)$$

(iii) کران بالای محدود شده با نرخ رمپ از فاصله قبلی، $\bar{R}_{kt} + \bar{\alpha}_{k(t-1)}$ ، (سومین بخش از معادله (۴-۳۱)). مقدار \bar{R}_{kt} حد نرخ رمپ مؤثر است که با معادله (۴-۳۳) بدست می آید.

$$\bar{R}_{kt} = \min(\delta_k, \bar{N}_{kt}) \quad (۴-۳۳)$$

که در آن δ_k حد بالای رمپ فیزیکی واحد k ام است. \bar{N}_{kt} مقداری است که واحد k ام باید وقتی که دیگر واحدها رمپ پایین دارند، بالا برود. به منظور تطبیق بار با سه متغیر فوق، حد بالای محدوده عملکرد ممکن واحد k ام، در لحظه T می تواند با استفاده از معادلات زیر محاسبه شود. بوسیله تنظیم $\bar{\alpha}_{k0} = p_k$ ، شرط ابتدایی در خروجی فعلی برای مولد k ام، حد بالای محدوده عملیاتی ممکن برای تمام منطقه‌های زمانی به ترتیب محاسبه شده است ($t=1, \dots, t=T$). در روش مشابه حد پایین TDF هم با استفاده از معادلات زیر محاسبه شده است.

$$(۴-۳۴)$$

$$\underline{M}_{kt} = P_{Dt} - \sum_{j=1, j \neq k}^{N_\lambda} \bar{P}_j \quad (۴-۳۵)$$

$$\underline{N}_{kt} = (P_{Dt} - P_{D(t-1)}) - \sum_{j=1, j \neq k}^{N_\lambda} \delta_j \quad (۴-۳۶)$$

$$\underline{R}_{kt} = \max(-\delta_k, \underline{N}_{kt}) \quad (37-4)$$

$$\underline{\alpha}_{kt} = \max\{\underline{P}_k, \underline{M}_{kt}, \underline{\alpha}_{k(t-1)} + \underline{R}_{kt}\} \quad (38-4)$$

۸-۴ تعمیم برای امنیت دینامیک پایدار (RDS)

با استفاده از معادله (۳۰-۴) TDF بدست آمده در بخش قبل جایگزین $TDF(t, P_{DE})$ می‌شود. RTDF با در نظر گرفتن بالاترین و پایین‌ترین کران میزان تحمل خطای پیش‌بینی شده ($\underline{\Delta}_{PDt}$ و $\bar{\Delta}_{PDt}$) در معادله (۳۹-۴) محاسبه می‌شود. جایی که محدوده اشتراک بین دو بخش به صورت " \cap " بیان می‌شود.

$$RTDF(t) = \quad (39-4)$$

۱-۸-۴ عدم هماهنگی تأمین تقاضا

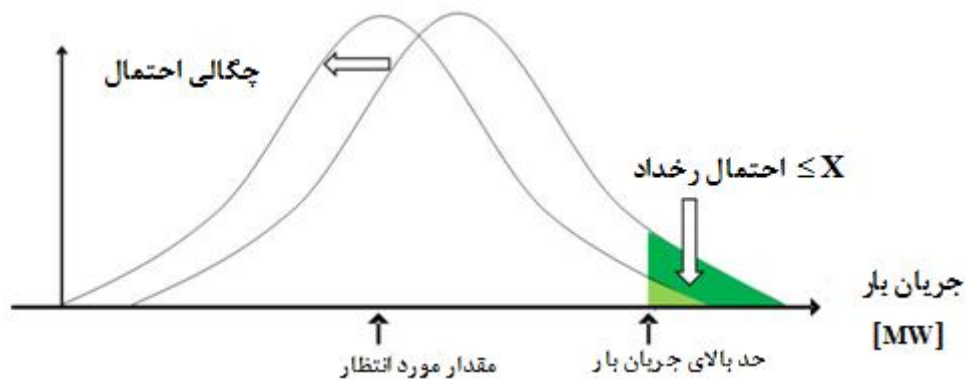
هر مقدار خروجی P_{GKT} در داخل حدود (۴-۴) صدق کند به عنوان آخرین بار پیش‌بینی شده قابل دسترسی است. در این الگوریتم هر گاه $\underline{\alpha}_{kt} < \bar{\alpha}_{kt}$ باشد، TDF موجود نیست و تأمین تقاضا غیر ممکن است. در موارد مشابه عدم هماهنگی تأمین تقاضا^{۸۷} (SDM) باید با افزایش توان الکتریکی یا کاهش بار جبران شود. بعد از مدیریت SDM محاسبه TDF، فرآیند بهینه سازی ادامه خواهد داشت.

۹-۴ محدودیت‌های امنیتی جریان خط برای مفهوم RSS

خطاهای پیش‌بینی بار و عدم قطعیت جریان حاصل از RE و محدودیت‌های جریان خط به کمک یک حالت احتمالی رفع شده است که این امر در شکل (۳-۴) نشان داده شده است. روش جریان بار

^{۸۷} - Supply and Demand Mismatch

تصادفی^{۸۸} (SLF) به عنوان روشی که در آن احتمال نقض محدودیت خط کمتر از یک مقدار مشخص است و شامل یک سطح اطمینان مشخص که در تحلیل کلی، به کار برده شده است، می‌باشد. با در نظر گرفتن توزیع نرمال برای مشخصه‌های پیش‌بینی، روش محاسبه جریان برق مستقیم خطی برای بیشترین بهره‌وری در زمان محاسباتی استفاده شده است.



شکل (۳-۴). تعیین حدود امنیت به کمک جریان بار تصادفی [۱]

بر اساس روش جریان برق مستقیم (DC)، روابط زیر برقرار است.

$$\underline{F} \quad (۴۰-۴)$$

$$F = S_C \theta \quad (۴۱-۴)$$

در این روابط $P \in R^{Nn \times 1}$ زاویه ولتاژ [rad]، $\theta \in R^{Nn \times 1}$: تزریق توان واقعی [pu]، $F \in R^{N \times 1}$: جریان خط توان واقعی، $S_N \in R^{Nn \times Nn}$: ماتریس سوسپتانس گره، $S_C \in R^{N \times Nn}$: ماتریس سوسپتانس خط. طبق معادلات (۴-۴) و (۴۱-۴)، در ادامه داریم:

$$F = S_C S_N^{-1} P = S.P \quad (۴۲-۴)$$

تزریق گره در زیر نشان داده شده است:

$$P = P_G - P_D \quad (۴۳-۴)$$

در این معادله P_D یک متغیر احتمالی شامل بار و خروجی‌های RE (تقاضای منفی)، در حالیکه P_G مربوط

^{۸۸} - Stochastic Load Flow

به متغیر خروجی‌های مولد معمولی می‌باشد که در فرآیندهای بهینه‌سازی بدست آمده است.

بنابراین، مقدار میانگین $E[P]$ حاصل از توان تزریقی p به صورت زیر جایگزین می‌شود:

$$E[P] = P_G - E[P_D] \quad (44-4)$$

سپس، بردار مقدار میانگین و ماتریس کواریانس جریان خط به صورت زیر بدست می‌آید:

$$E[F] = S[P_G - E[P_D]] = SP_G - S.E[P_D] = [u_i] \quad (45-4)$$

$$Cov[F] = S.Cov[P]. S^T = [\sigma_{ij}] \quad (46-4)$$

تابع توزیع تجمعی احتمال برای جریان خط امکان است با استفاده از عناصر معادلات (45) و (46) بدست آید:

$$\xi_{F_1}(F_1) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\sigma_H} \exp\left\{-\frac{1}{2} \frac{(F_1 - u_i)^2}{\sigma_H^2}\right\} \quad (47-4)$$

به عبارت دیگر مقدار احتمال نقض محدودیت باید کمتر از X باشد، حد آستانه β در معادله زیر بیان شده است:

$$X \geq 1 - \int_{F_1}^{-F_1} \xi_{F_1}(x) dx \quad (48-4)$$

$$\bar{F}_1 - \beta \cdot \sigma_H \geq |E[F_1]| \quad (49-4)$$

توجه شود که حد آستانه X باید با توجه به سطح اطمینان C در معادله (9) و اهمیت محدوده‌ها تخمین زده شود.

$$LBF_l \leq \sum_{j=1}^{N_n} S_{lj} P_{Gj} \leq UBF_l \quad (50-4)$$

Where,

$$LBF_l = -\bar{F}_1 + \beta \cdot \sigma_H + D_l$$

$$UBF_l = \bar{F}_1 + \beta \cdot \sigma_H + D_l$$

$$D_l = \sum_{j=1}^{N_n} S_{lj} E[P_{Dj}]$$

\bar{F}_1 : حد امنیت قطعی برای خط 1

محدودیت (4-50)، حدود جریان خط را تعیین می‌کند، طوری که بیشترین محدودیت در معادلات (26) تا

(۴-۲۹) باشد. روش توصیف شده بالا برای محدوده RSS در یک برش زمانی t است، طوری که محدودیت‌ها وابستگی شدیدی به دقت پیش‌بینی P_{Dj} به همان دقت σ_{It} در معادله (۴-۵۰). بنابراین، محدودیت (۴-۵۰) از نظر زمانی متفاوت است و به عنوان تابع زمانی در بخش بعد حل می‌شود.

۴-۱۰ DELD با امنیت پایدار

در بخش ۴-۹، روشی برای تخمین محدوده‌ی RTDF، با توجه به محدودیت‌های جریان خط (که در تعریف محدوده‌ی RSS استفاده شده)، پیشنهاد شد. در این بخش، یک مسئله برنامه‌ریزی چندجمله‌ای (QP) به عنوان راه‌حل مسئله DELD که شامل عدم قطعیت است، فرموله خواهد شد. برقراری راه‌حل (۴-۱۹) امنیت پایداری را تضمین می‌کند. DELD همراه با عدم قطعیت، به صورت زیر فرموله می‌شود:

Minimize:

$$\text{Cost} = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_g} f_k(P_{Gkt}) \quad (۴-۵۱)$$

$$f_k(P_{Gkt}) = a_k P_{Gkt}^2 + b_k P_{Gkt} + c_k \quad (۴-۵۲)$$

Subject to:

i) محدودیت تعادل عرضه و تقاضا (۴-۵۳)

$$\sum_{k=1}^{N_g} P_{Gkt} = \sum_{m=1}^{N_d} E[P_{Dmt}]$$

ii) محدودیت عملکرد مولد (۴-۵۴)

$$\underline{\alpha}_{Gk} \leq P_{Gkt} \leq \overline{\alpha}_{Gk}$$

iii) محدودیت نرخ رمپ (۵۵-۴)

$$-\delta_k \leq P_{Gk(t-1)} - P_{Gkt} \leq \delta_k$$

iv) محدودیت احتمالی شبکه (۵۶-۴)

$$LBF_{lt} \leq F_{lt} = \sum_{j=1}^N S_{lj} P_{Gjt} \leq UBF_{lt}$$

که در آن $E[P_{Dmt}]$: تقاضای مورد انتظار برای بار m در لحظه t ، $[MW]$ ، S_{ij} : ماتریس کواریانس است. UBF_{lt} و LBF_{lt} : حدود بالا و پایین با توجه به خط انتقال l برای امنیت در لحظه t ، $[MW]$. طوریکه تعمیمی برای معادله (۵۰-۴) است و یک مفهوم جدید در این تحقیق بیان شده است. امنیت پایدار برای نقاط عملیاتی ممکن تا لحظه T با توجه به نقطه‌ی عملیات فعلی و زمان شروع $t=0$ و طی مراحل زیر بدست می‌آید:

✓ مرحله ۱: تخمین P_{Dmt} و P_{Dt} برای لحظه t .

✓ تخمین $\underline{\Delta}_{PDt}$ و $\bar{\Delta}_{PDt}$ در (۲۹-۴).

✓ محاسبه $\bar{\alpha}_{kt}$ و $\underline{\alpha}_{kt}$ براساس (۳۱-۴)، (۳۸-۴).

✓ تخمین UBF_{lt} و LBF_{lt} .

✓ حل مسئله برنامه‌ریزی چندجمله‌ای (QP)، از (۵۱-۴) تا (۵۶-۴).

۴-۱۱ شکل کنترل پایدار لحظه‌ای

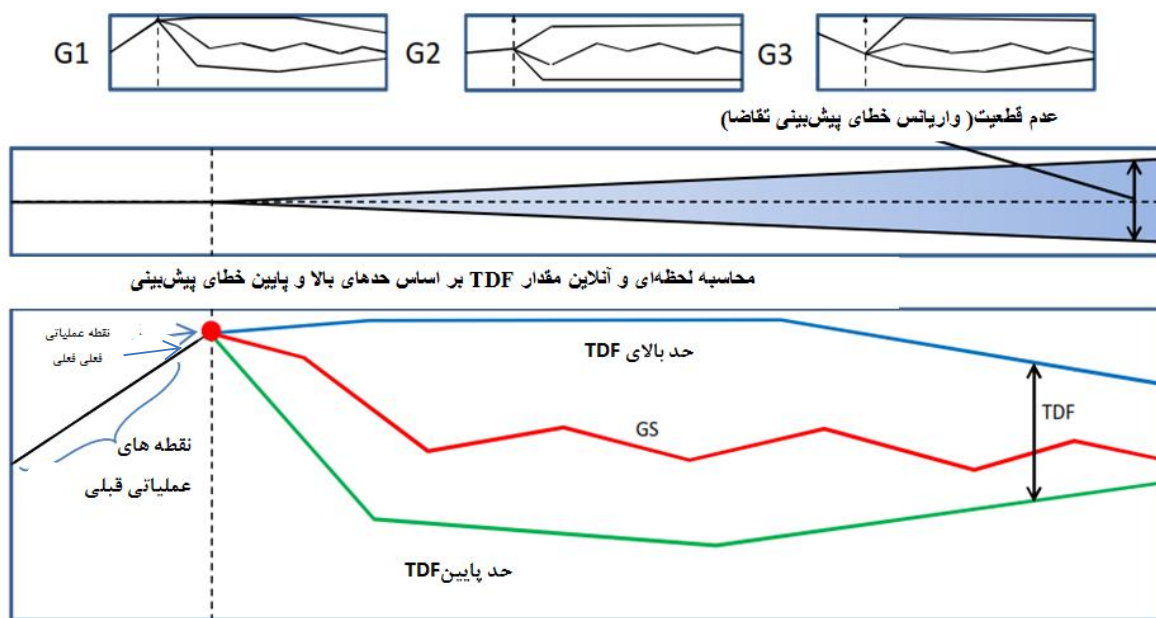
۴-۱۱-۱-۱ شناخت کنترل‌کننده

هدف بهبود نوع جدیدی از کنترل‌کننده شبکه هوشمند برای تقویت امنیت پایدار است. در شکل (۴-۴) روش طراحی سیستم کنترل بهبود یافته نشان داده شده است. سه نوع مدیریت وجود دارد: الف- برای

طراحی عملیات روز بعد. ب- عملیات دقیقه‌ای و طراحی دقیقه‌ای لحظه‌ای. ج- کنترل ثانیه‌ای، که در جدول (۱-۴) بیان شده است.

راهکار ارائه شده	مراحل زمانبندی مولدها
مدیریت رزرو برای ۲۴ ساعت بعد	زمانبندی تولید برای روز بعد G_1
مدیریت رزرو برای ۶۰ دقیقه بعد	زمانبندی تولید برای ۹۰ دقیقه بعد G_2
مدیریت رزرو برای ۵ تا ۶۰ دقیقه بعد	زمانبندی تولید برای ۵ تا ۶۰ دقیقه بعد G_3

جدول (۱-۴). مراحل زمانبندی تولید در الگوریتم جامع [۱]



شکل (۴-۴). کنترل هوشمند تولید و پخش بار DELD در IRDS [۱]

براساس پیش‌بینی خروجی‌های RE سیستم مولدهای موجود، باطری‌های ذخیره و تقاضاها در حالت بهینه را مدیریت می‌کند. جزئیات در ادامه آورده شده است:

۱- مدیریت برنامه ریزی

در این نوع مدیریت یک زمانبندی به روز شده از الگوی خروجی‌ها برای منابع محدود شده ایجاد می‌کنیم. خروجی برای زمانبندی ۲۴ ساعت تولید ارائه شده است. همچنین شامل زمانبندی عملکرد باطری می‌باشد. هر واحد در زمانبندی تولید ۳۰ دقیقه است. تکنیک‌های موجود برای انرژی‌های متعهد شده (وعده داده شده به مشتری) در یک فرآیند بهینه استفاده شده است. عدم قطعیت وابسته به پیش‌بینی و نوسان در خروجی RE به صورت خاص پیاده سازی شده است [۸۰].

۲- مدیریت دقیقه‌ای

این مدیریت خروجی‌ها را به صورت لحظه‌ای برای هر مولد و در قالب مقادیر پیش‌بینی شده لحظه‌ای لحاظ می‌کند. بهینه سازی در دو مرحله انجام شده است. در مرحله نخست، زمانبندی تولید براساس ۲۴ ساعت قبل صورت پذیرفته است و از روز قبل طراحی می‌شود و هر ۳۰ دقیقه به روز می‌گردد. توجه کنید واحدهای زمانبندی برای یکساعت به صورت ۵ دقیقه‌ای است در این مرحله، زمان شروع و توقف برای مولدهای موجود زمانبندی می‌شود.

دومین مرحله، تنها از زمانبندی شروع و توقف و برنامه‌ریزی باطری استفاده می‌کند. این مرحله بهینه سازی، همان مرحله مورد نظر در این پایان‌نامه است که شکل (۴-۵) نمایش داده شده است.

۴-۱۱-۲ تعریف کلی الگوریتم

۱- زمانبندی تولید ۲۴ ساعت در روز قبل

۲- زمانبندی تولید لحظه‌ای به همراه زمانبندی شروع و توقف

۳- به روز رسانی زمانبندی یک ساعته در سیکل کنترل ۵ دقیقه (مراحل آن در ادامه بیان شده است)

مرحله A- انجام پیش‌بینی بار و خروجی RE. تخمین شرایط عملیاتی حال حاضر. بدست آوردن زمانبندی شروع و توقف برای مولدها و باطری طبق ۲۴ ساعت، در روز قبل.

مرحله B- محاسبه RTDF و محدوده خط جریان و حد خط جریان. محاسبه SDM.

مرحله C- اگر SDM آماده بود یا اگر محدوده RSS موجود نبود، رزرو تعیین شده و RTDF به روز شده یا حد خط جریان را تنظیم می‌کنیم.

مرحله D- اجرای بهینه‌سازی برای زمانبندی تولید لحظه‌ای که می‌تواند مولدها را در زمان لحظه‌ای کنترل کند.

۴-۱۲ نتیجه‌گیری

در این فصل ایده برگرفته از [۱] بررسی شد، امنیت و پایداری شبکه قدرت در تحویل بار به مصرف‌کننده متأثر از توانایی مولدها در رساندن میزان تولید خود به سطح مورد تقاضا است. همچنین، باید توجه داشت میزان رمپ و حدود تولید مشخص برای هر مولد محدودیت‌هایی برای آن مولد ایجاد می‌کند. هرچه محدوده TDF_{PK} وسیع‌تر باشد، با وجود عدم قطعیت در میزان تقاضا، مولد بهتر می‌تواند تقاضای بار را پاسخ دهد. در نتیجه، پخش بار اقتصادی دینامیک پایدار سریعتر حاصل می‌شود و سیستم در حالت امن پایدار قرار می‌گیرد. این پایداری امنیت در پخش بار، با افزایش میزان تقاضا دچار افت می‌شود، که در این مواقع وارد شدن مولدهای PV افت پایداری و کاهش محدوده امنیت دینامیک پایدار را جبران می‌کند. در فصل بعد در قالب نمودار و شکل می‌توان این امر را مشاهده نمود.

فصل پنجم

محدودیت‌ها، کارهای مربوط به آینده و نتیجه‌گیری

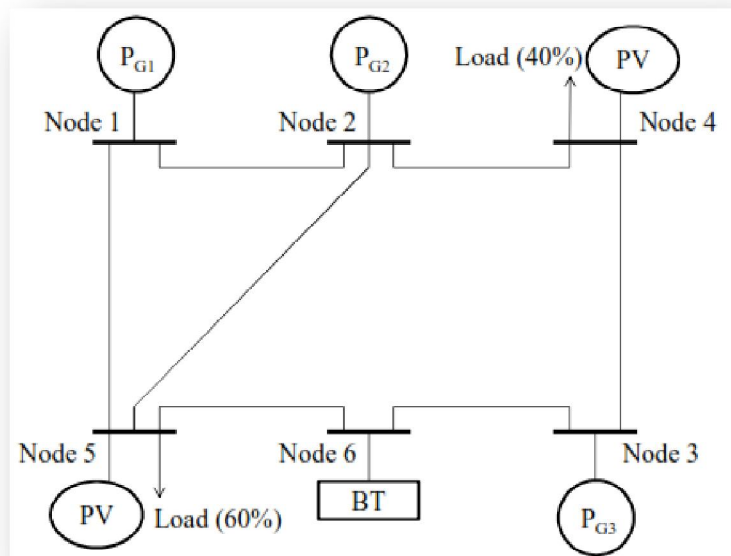
(Limitations, future work and conclusions)

با توجه به بخش‌های سیستم قدرت (بخش تولید، انتقال و توزیع)، بخش ابتدایی و شروع سیستم قدرت، مولدها (اعم از تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر) می‌باشد. لازمه برقراری امنیت در سیستم قدرت، تحویل انرژی الکتریکی به موقع و پایدار و بهینه (بخش بار اقتصادی دینامیک پایدار) است. بنابراین برای پخش بار با این شرایط، قیدهایی را برای مولدها تعریف می‌کنیم. این قیدها شامل: محدوده‌ی عملکرد دینامیک، محدوده عملکرد دینامیک پایدار هستند، که در فصل قبل بیان شدند. سپس با توجه به محدودیت‌های مولد که در شکل (۴-۲) نشان داده شده‌اند و محدوده امنیت استاتیک، محدوده امنیت دینامیک تعریف شد.

هدف ما در این فصل مشخص نمودن محدوده امنیت دینامیک پایدار و بحث کنترل تولید در سیستم قدرت مورد مطالعه (سیستم قدرت غرب ژاپن) می‌باشد. دلیل آوردن سیستم قدرت غرب ژاپن به عنوان نمونه مورد آزمایش آنست که پهنای‌سازی ایده مورد بحث در این پایان‌نامه نیاز به زیرساخت‌هایی دارد که ایران موجود نیست. در این پایان‌نامه علاوه بر تحلیل روش ارائه شده در [۱] به ارائه الگوریتم بهینه‌سازی ذرات هوشمند (PSO) در تخمین خروجی هر یک از مولدها می‌پردازیم.

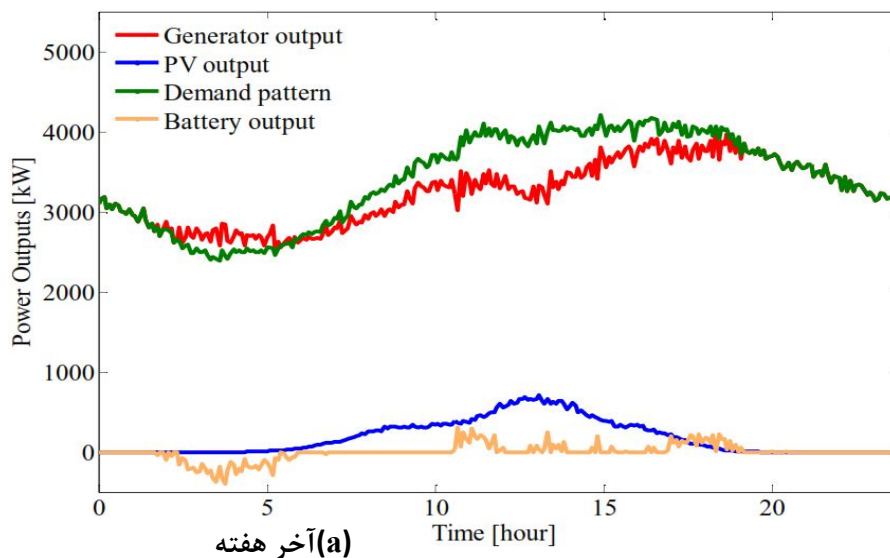
۵-۱ شبیه‌سازی شرایط

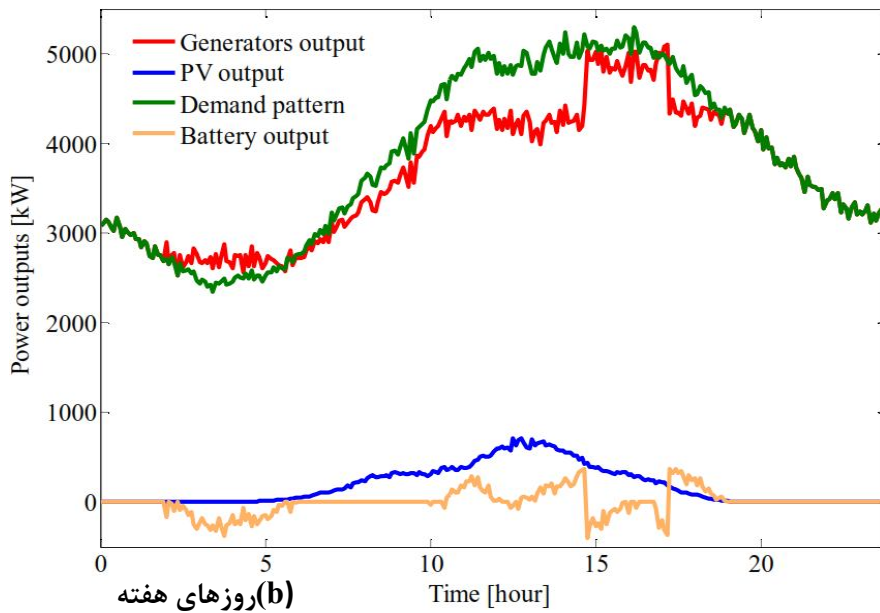
حال به بیان شرایط برای شبیه‌سازی یک شبکه قدرت کوچک که شامل سه مولد دیزلی (PG_۱ و PG_۲ و PG_۳) و یک باتری (BT) و دو مولد تجدیدپذیر (صفحه خورشیدی PV) شکل (۵-۱). این مدار بر اساس استاندارد شبکه هوشمند ژاپن طراحی شده است. در این پروژه از صفحات خورشیدی برای تأمین ۱۵ درصد از پیک تقاضا استفاده شده است.



شکل (۵-۱). شبیه‌سازی مدل [۱]

الگوی بار آخر هفته و روزهای هفته به صورت جداگانه برای فرآیند بهینه‌سازی استفاده می‌شوند. در شکل (۵-۲) نتایج مدیریت خروجی روز بعد (DH) شامل پیش‌بینی‌های خروجی صفحات خورشیدی (PV) و تقاضا، خروجی‌های نهایی مولد و عملیات BT برای زمانبندی تولید در طول ۲۴ ساعت را نشان می‌دهد. در این مرحله از بهینه‌سازی، تنها زمانبندی‌های زمان شروع و توقف و برنامه‌ریزی باطری استفاده می‌شود. داده‌های مربوط شکل (۵-۲) در جدول (۵-۱) تا (۵-۳) آورده شده است.





شکل (۵-۲). الگوی تقاضا، PV و عملکرد باتری

در ادامه برای تعیین ضرایب تابع هدف در پخش بار اقتصادی استفاده از الگوریتم هوشمند PSO پیشنهاد شده است [۸۴]. که در جدول (۵-۱) به آن اشاره شده است.

فرموله سازی PSO

هدف اصلی، کاهش هزینه حاصل از تولید با تلفات کمتر، کاهش زمان محاسبه و خروجی بیشتر می باشد. در معادله (۵-۱)، یک نامعادله مشخص برای بهینه سازی توابع هدف آورده شده است. که در آن P_i^{\max} و P_i^{\min} ، حدود بالا و پایین تولید برای مولد نام هستند.

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (i = 1, \dots, n_g) \quad (۵-۱)$$

تلفات نهایی توان به عنوان تابعی از ضرایب ماتریس B در معادله (۵-۲) نشان داده شده است.

$$P_L = \sum_{i=1}^{n_g} \sum_{j=1}^{n_g} P_i B_{ij} P_j \quad (۵-۲)$$

تولید نهایی در معادله (۵-۳) زیر نشان داده شده است.

$$C_i = \sum_{i=1}^{n_g} C_i(P_i) = \sum_{i=1}^{n_g} \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 \quad (3-5)$$

که در آن C_i تابع هزینه، α_i ، β_i ، γ_i ضرایب هزینه مولد i ام، n_g تعداد کل مولدهاست و P_i خروجی مولد i ام است. برای شبیه‌سازی این رفتار، پارامترهای زیر تعریف می‌شود:

۱- P_{best} : این پارامتر، بیانگر بهترین موقعیتی است که هر ذره در طول اجرای الگوریتم می‌تواند کسب کرده باشد.

۲- G_{best} : این متغیر بهترین موقعیتی را که ذرات در طول اجرای الگوریتم کسب کرده اند، نشان می‌دهد.

۳- پارامتر شناخت فردی (C_1): این کمیت باعث می‌شود که ذره به سمت بهترین نقطه‌ای که خود و همسایگانش پیدا کرده اند، حرکت کند. این ضریب، به عنوان ضریب تحریک به کار می‌رود.

۴- پارامتر شناخت اجتماعی (C_2): این ضریب که با عنوان ضریب تحریک نیز به کار می‌رود، باعث می‌شود که ذره به سمت بهترین نقطه‌ای که ذرات تا به حال کسب کرده اند حرکت کند.

۵- ضریب لختی (w): این ضریب، باعث ایجاد تعادل در جستجوی محلی و جستجوی کلی در الگوریتم می‌شود.

۶- لغزش (v): این پارامتر، تغییر موقعیت ذره در محیط جستجو را نشان می‌دهد (به آن سرعت نیز می‌گویند).

اکنون فرض کنید ذره z ام دارای بعد g باشد که در معادله (۴-۵) بیان شود:

$$X_z = [x_{z,1}, x_{z,2}, \dots, x_{z,g}] \quad (4-5)$$

و هر ذره دارای یک P_{best} و تمام ذرات دارای یک G_{best} در معادله (۵-۵) می‌باشند:

$$P_{best,z} = [p_{best,z,1}, p_{best,z,2}, \dots, p_{best,z,g}] \quad (5-5)$$

آنگاه تغییر موقعیت ذره بر اساس مقدار لغزش (سرعت) به صورت معادله (۵-۷) و (۵-۶) می‌باشد:

$$v_{j,g}^{(t+1)} = wv_{j,g} + c_1 \cdot \text{Rand}() (Pbest_{j,g} - x_{j,g}^{(t)}) + c_2 \cdot \text{Rand}() \cdot (gbest_{j,g} - x_{j,g}^{(t)}) \quad (6-5)$$

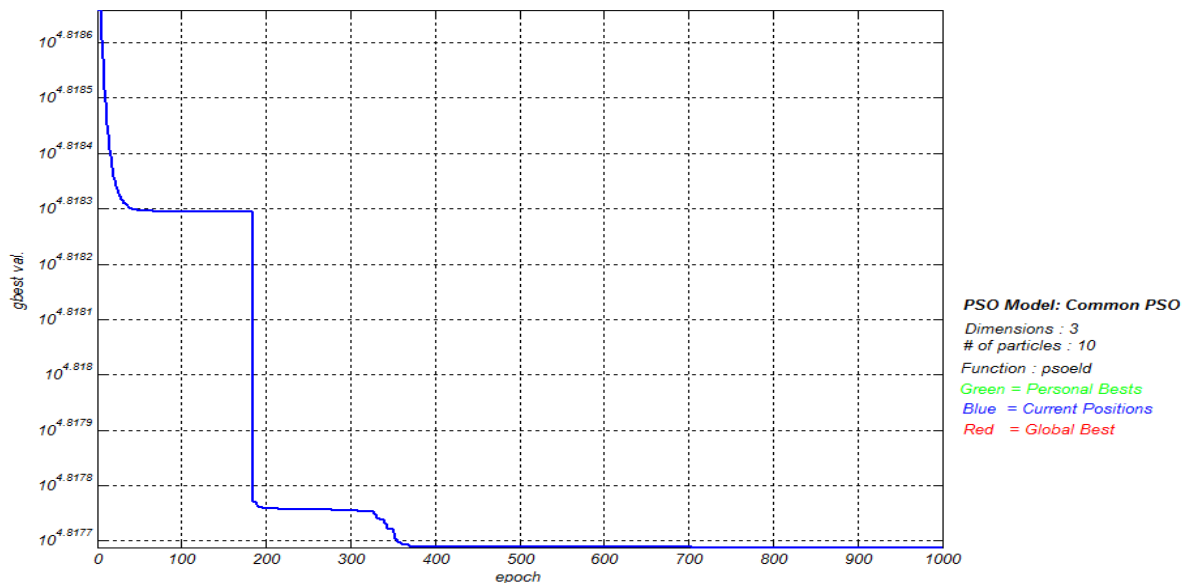
$$v_{\min} \leq v_{j,g}^{(t)} \leq v_{\max}$$

$$x_{j,g}^{(t+1)} = x_{j,g}^{(t)} + v_{j,g}^{(t+1)} \quad \begin{matrix} j = 1, 2, \dots, n \\ g = 1, 2, \dots, m \end{matrix} \quad (7-5)$$

در دو روابطه فوق، مقدار x بیانگر موقعیت ذره، $n=10$ تعداد ذرات گروه و $m=3$ تعداد بعد ذره و توابع $\text{Rand}()$ تولید کننده یک مقدار تصادفی بین صفر و یک می باشند. مقدار v_{\max} معمولاً بین ۱۰٪ تا ۲۰٪ محدوده متغیرها انتخاب می شود. مقادیر $C_1=2,12$ و $C_2=1,79$ از طرف دیگر انتخاب مناسب w باعث تکرار کمتر الگوریتم برای رسیدن به نقطه بهینه می شود. در الگوریتم های معمولی PSO، ضریب w از مقدار ۰/۹ تا مقدار ۰/۴ در طول اجرای الگوریتم و براساس معادله (۸-۵) زیر کاهش می یابد:

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{\text{iter}_{\max}} * \text{iter} \quad (8-5)$$

در شکل (۳-۵) موقعیت ذرات مشخص شده است. در جدول (۲-۵)، خروجی بهینه برای مقادیر مختلف توان مورد تقاضا را بدست آورده ایم.



شکل (۳-۵). نمودار موقعیت ذرات در الگوریتم PSO

واحد kام	$\overline{P_{GK}}$ [KW]	$\overline{P_{GK}}$ [KW]	δ_k [KW/min]	f_k
۱	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۶۶٫۷	$۰٫۰۰۱۱P_1^2 + ۱۶٫۴۱P_1 + ۴۳۲۰$
۲	۶۲۵	۱۲۵۰	۴۱٫۷	$۰٫۰۰۲۱P_2^2 + ۱۷٫۴۱۰P_2 + ۳۶۶۷٫۵$
۳	۱۱۲۵	۲۲۵۰	۷۵	$۰٫۰۰۰۲P_3^2 + ۲۰٫۱۷۸P_3 + ۳۹۳۳٫۷$

جدول (۱-۵). مشخصات مولدها [۱]

P_D [KW]	خروجی واحدهای P_1, P_2, P_3 [KW]
۲۵۰۰	۱۳۴۷٫۲۱، ۷۰۵٫۵۰۳، ۱۱۲۵
۳۰۰۰	۱۳۷۷٫۳۷، ۱۰۱۲٫۹۴، ۱۴۳۸٫۶۴
۳۵۰۰	۱۳۷۶٫۷۶، ۱۲۵۰، ۱۸۶۲٫۵۹

جدول (۲-۵). مقادیر محاسبه شده به کمک الگوریتم PSO

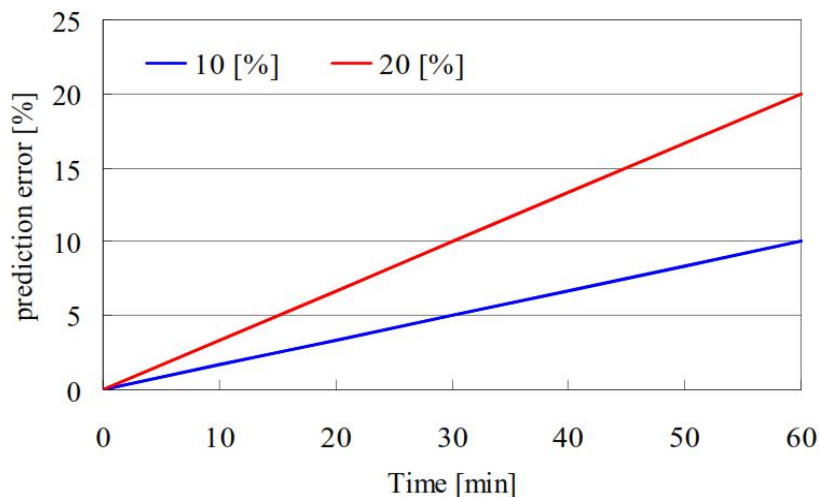
الگوی تقاضا	واحد kام	زمان شروع	زمان توقف
در طول هفته	۱	-	-
	۲	۱۴:۲۰	۱۷:۲۰
	۳	-	-
آخر هفته	۱	-	-
	۲	-	-
	۳	-	-

جدول (۳-۵). زمان‌های شروع و توقف [۱]

شماره خط	راکتانس [ohm]	حدود خط [kw]
۱-۲	۰٫۰۶	۱۲۰۰ تا ۱۲۰۰
۱-۵	۰٫۲۴	۶۵۰ تا ۶۵۰
۲-۴	۰٫۰۳	۴۶۰۰ تا ۴۶۰۰
۲-۵	۰٫۱۸	۹۰۰ تا ۹۰۰
۳-۴	۰٫۲۴	۲۰۰۰ تا ۲۰۰۰
۳-۶	۰٫۱۰	۲۷۰۰ تا ۲۷۰۰
۶-۵	۰٫۰۶	۲۷۰۰ تا ۲۷۰۰

جدول (۴-۵). اطلاعات خط [۱]

دارند. شکل (۴-۵). $\bar{\Delta}_{PDt}$ و $\underline{\Delta}_{PDt}$ قرار است به عنوان واریانس خطای پیش‌بینی انتخاب شوند با زمان رابطه مستقیم



شکل (۴-۵). تحمل خطای پیش‌بینی [۱]

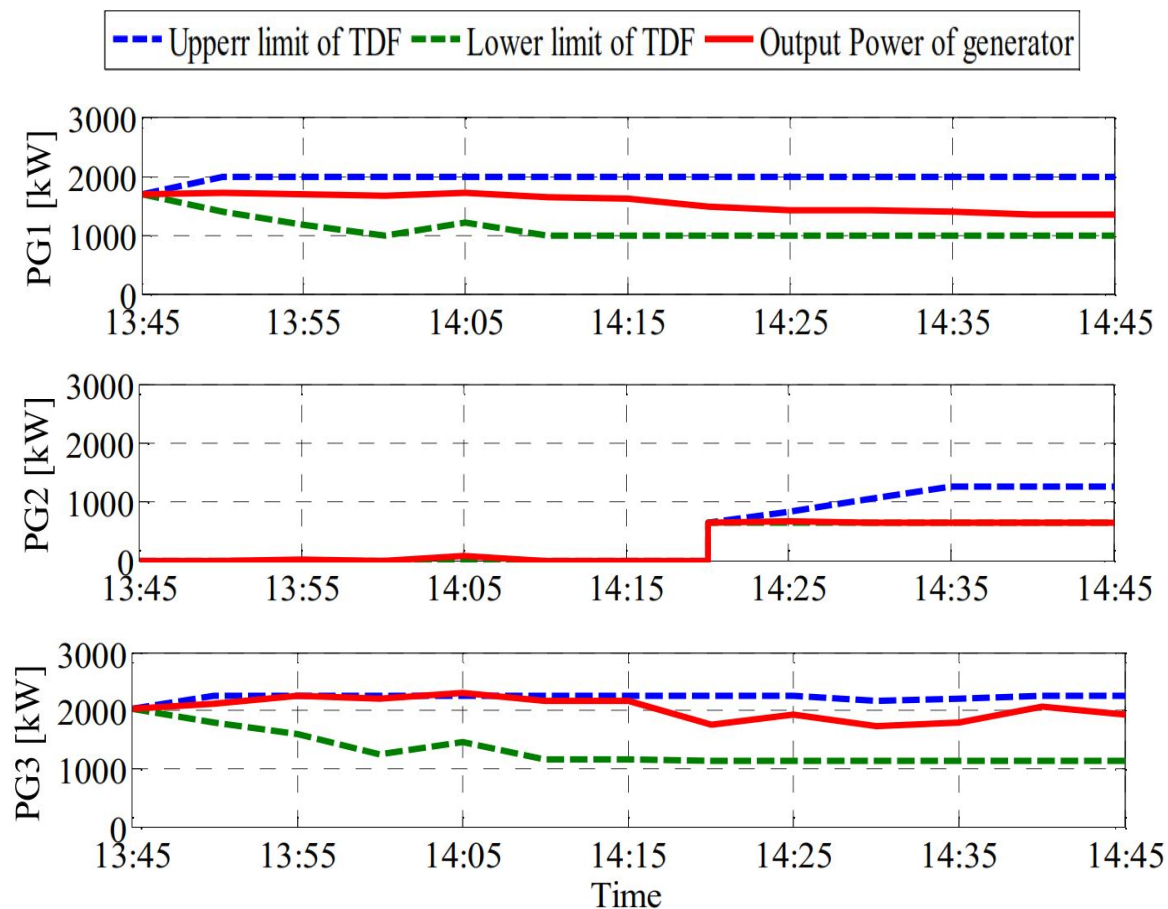
$$\bar{\Delta}_{PDt} = \underline{\Delta}_{PDt} = P_{Dt} \times \frac{t}{T} \times \gamma \quad (۹-۵)$$

در این معادله $T=60$ [min]، t نشان دهنده زمان مورد نظر برای پیش‌بینی است ($t=0$ برای نقطه عملیاتی فعلی)، γ پارامتری است که جایگزین حداکثر خطای پیش‌بینی می‌شود و مقادیر آن [۰.۲۰ و ۰.۱۰] و ۰٪ برای آزمایش انتخاب شده است. در این آزمایش محدوده نقض مجاز جریان خط برای ۰.۲۶٪ $X=3\sigma=0.26\%$ مشخص شده است.

۲-۵ نتایج و بحث‌ها

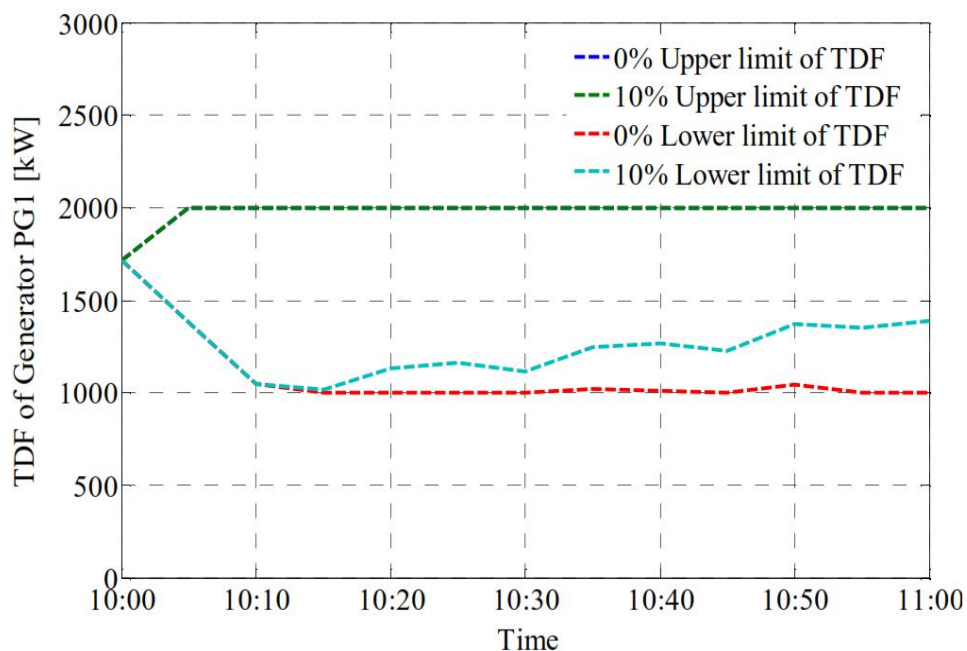
در شکل (۵-۵) زمانبندی تولید برای یک ساعت آینده در هر روز (γ برابر ۰.۱۰) در ساعت ۱۳:۴۵، شامل حدود بالا و پایین برای TDF انجام شده است. طبق آنچه قبلاً بیان شد، با بزرگتر شدن محدوده TDF، قابلیت سیستم نیز بیشتر می‌شود. با توجه به این شکل (شکل (۵-۵))، عملیات زمانبندی تولید برای یک ساعت آینده تضمین شده است. در هر زمان برای ۵ دقیقه بعد سیگنال کنترلی برای هر واحد تولیدی فرستاده می‌شود. در این زمانبندی تولید، مولد دوم (P_{G2}) در ۱۴:۲۰ برای تأمین افزایش تقاضا به کار

خواهد افتاد.

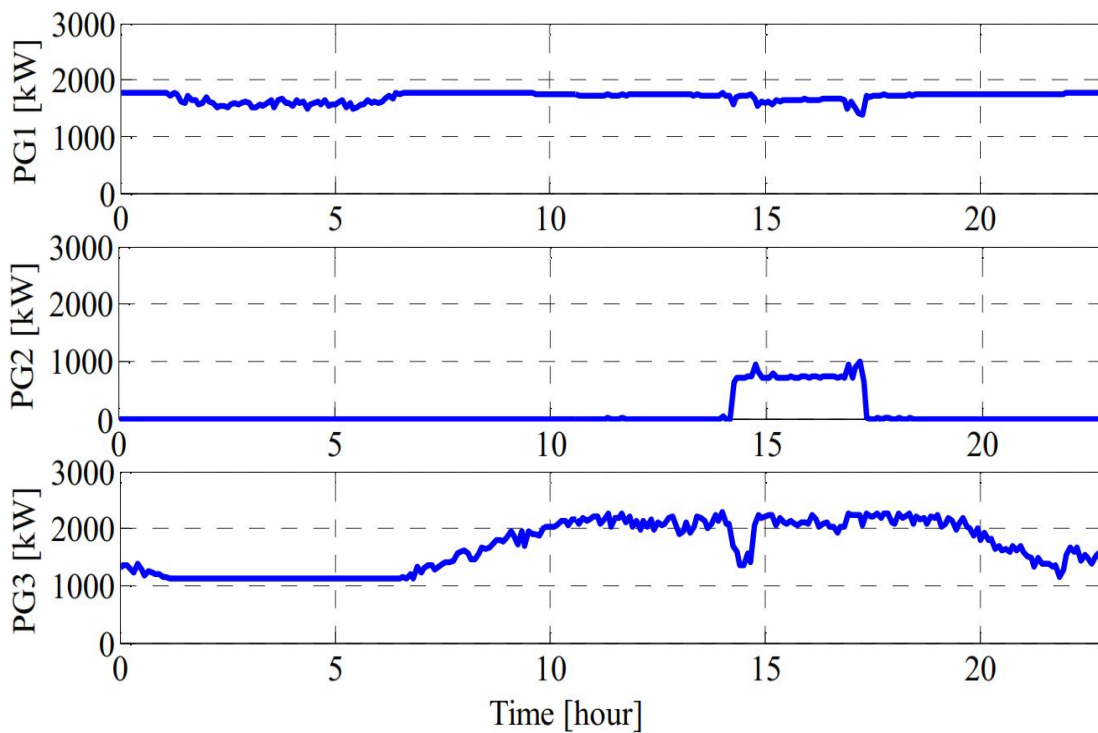


شکل (۵-۵). محدوده عملکرد (RTDF) و زمانبندی در طول روزهای هفته [۱]

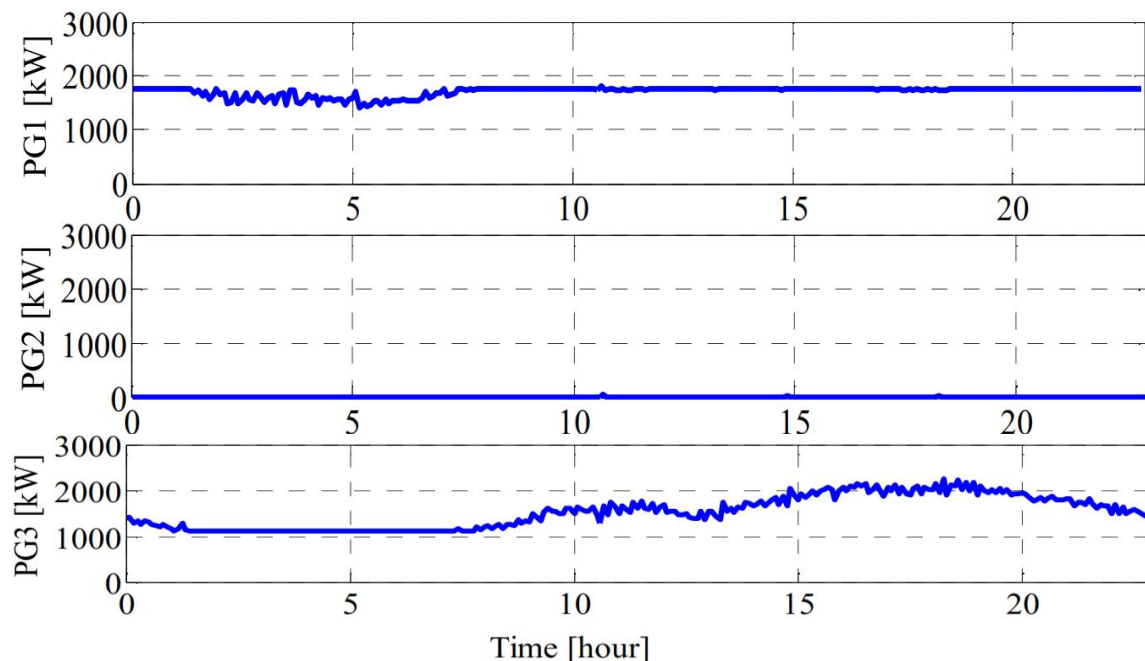
در شکل (۶-۵) مقایسه TDFها در $(\gamma=0$ و $\gamma=10\%)$ ، تأثیر تغییر حداکثر خطای پیش‌بینی را نشان می‌دهد. به وضوح دیده می‌شود، در مقابل افزایش خطای پیش‌بینی، TDF به عنوان مقاومت کوچک می‌شود.



شکل (۵-۶). محدوده عملکرد (RTDF) در ساعت ۱۰:۰۰ در طول روزهای هفته [۱]



(a) در طول روزهای هفته



شکل (۵-۷). زمانبندی پخش بار (b) آخر هفته

در شکل (۵-۷) تولید واقعی یک روز بعد از فرآیند بهینه‌سازی که در شکل (۵-۵) نشان داده شد، انجام شده است. هنگامیکه مدیریت عدم قطعیت برقرار است، عملیات پخش بار به صورت بهینه صورت گرفته است. حدود ارائه شده در جدول (۵-۱) به کمک کنترل هوشمند مولدهای P_{G1} و P_{G2} و P_{G3} و باطری BT (بخش (۵-۸-۵)) حفظ شده است.

جدول (۵-۵) هزینه سوخت و زمان CPU برای ۲۴ ساعت محاسبه لحظه‌ای برای موارد موجود با استفاده از سیستم (Pentium p۶۲۰۰، ۱.۳GHZ) آورده شده است. در همه موارد محاسبات پایدار تحقق می‌یابد.

الگوی تقاضا	γ [%]	هزینه سوخت [ین]	زمان CPU
در طول هفته	۰	۱.۷۵۹.۲۰۰	۲۱,۲
	۱۰	۱.۷۵۹.۷۰۰	۳۵,۲
	۲۰	۱.۷۶۰.۴۰۰	۴۸,۹
آخر هفته	۰	۱.۶۳۸.۲۰۰	۱۸,۳
	۱۰	۱.۶۳۸.۴۰۰	۱۸,۳
	۲۰	۱.۶۳۸.۶۰۰	۱۷,۹

جدول (۵-۵). هزینه سوخت و زمان CPU [۱]

۵-۳ نتیجه‌گیری از مطالب بیان شده در مورد DELD

سطوح نوسان در تولید برق از مقادیر منابع انرژی تجدیدپذیر متناوب یکپارچه به سمت سیستم‌های تأمین باعث دشوار شدن حفظ تعادل میان عرضه و تقاضا شده است. در این مورد، رفع عدم قطعیت یک چالش بحرانی برای سیستم قدرت است. به عبارت دیگر، وجود عدم قطعیت سبب می‌شود که قابلیت کنترل منابع کاهش یابد.

مفهوم امنیت پایدار و راه‌کار پیشنهادی برای حل مسئله DELD در این تحقیق بررسی شده است. ارزیابی مکرر زمانبندی تولید، نقش مهمی برای به روز رسانی محدوده‌های امنیت پایدار در مقابل خطای پیش‌بینی دارد. همچنین، این ارزیابی باعث حفظ قابلیت اطمینان و عملکرد صحیح پاسخ‌دهی به تغییرات ناگهانی در خروجی تأمین می‌شود. هرچند این زمان محاسبه در جایی که تعداد زیادی منابع انرژی تجدیدپذیر (RE) بایستی به طرز موفقیت‌آمیز عمل کنند، چالشی مهم ایجاد می‌کند (باعث ایجاد وقفه زمانی در کنترل تولید می‌شود).

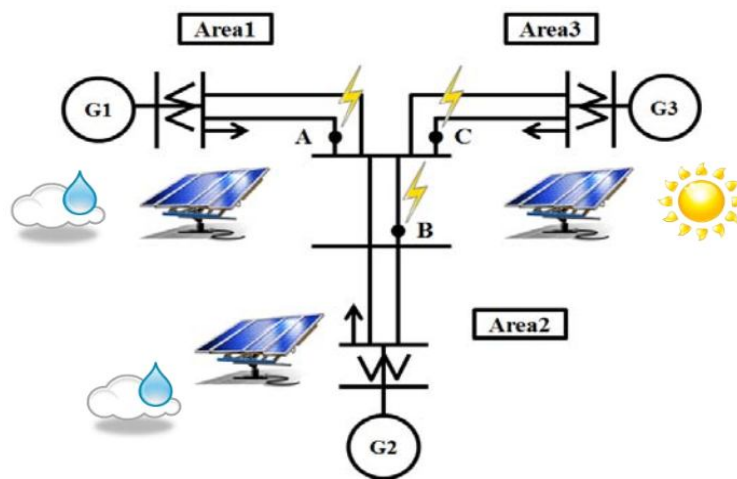
از روش DELD ارائه شده در [۱] برای حفظ امنیت خط استفاده شده است. در بخش بعد، مسئله پایداری گذرا از دیدگاه مسئله امنیت پایدار بررسی شده است.

۵-۴ آزمایش پایه‌ای پایداری گذرا

۵-۴-۱ شرایط برای شبیه‌سازی (شرایط آب و هوایی و میزان تولید)

هدف از این بخش، ارائه مثالی روشن از مشکلات موجود در برنامه‌ریزی عملیات ناشی از نفوذ RE است. بدینوسیله، ما به منظور نشان دادن مفهوم امنیت پایدار، برای سادگی تنها به بررسی پایداری گذرا (TS) و چشم‌پوشی از تمام محدودیت‌های دیگر مانند محدودیت خط انتقال حرارتی، محدودیت‌های ولتاژ،

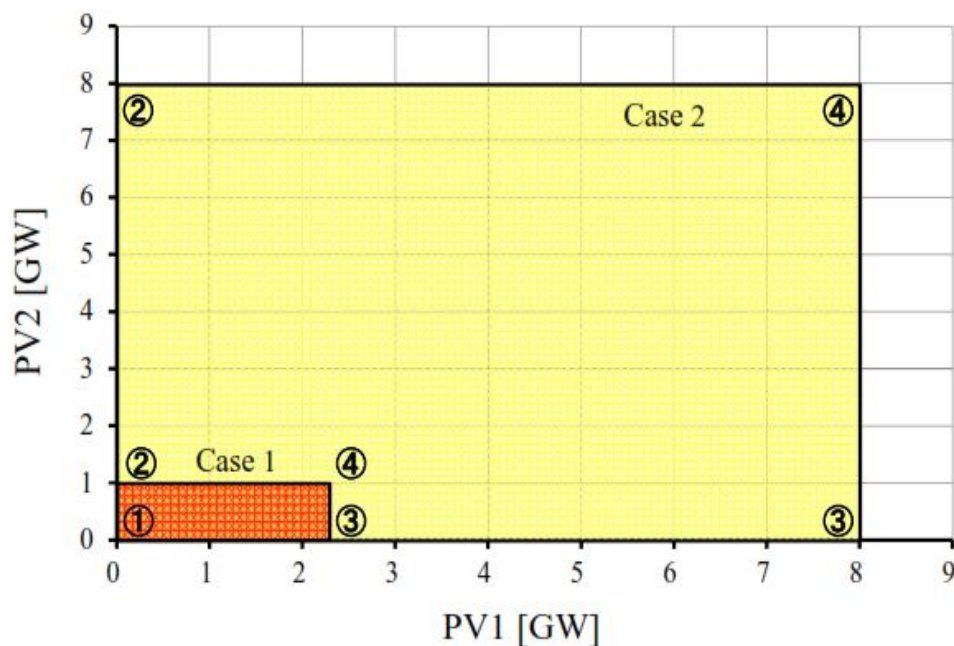
پایداری ولتاژ می‌پردازیم. شرایط آب و هوایی و تولید مولدها در جدول (۵-۶) آورده شده است. همچنین، در این بخش از یک شبکه در شکل (۵-۸) که شامل سه بخش است استفاده شده است، که معادل یک سیستم با ۱۰ ماشین الکتریکی با استاندارد IEEE در غرب ژاپن است. سه خط در نقاط A تا C با زمان رفع خطای ۷۰ms در آن لحاظ شده که به شرح زیر است:



شکل (۵-۸). مدل معادل ۳- ماشین در سیستم غرب ژاپن [۲]

	ناحیه ۱	ناحیه ۲	ناحیه ۳
	شرایط آب و هوایی	شرایط آب و هوایی	شرایط آب و هوایی
	PV۱[GW]	PV۱[GW]	PV۱[GW]
مورد ۱	بارانی	بارانی	آفتابی
	۰~۲	۰~۱	۶
مورد ۲	متغیر	متغیر	آفتابی
	۰~۶	۰~۶	۶

جدول (۵-۶). پیش‌بینی توان خروجی مولد PV [۱]



شکل (۵-۹). تنظیم محدوده اطمینان (توان خروجی مولد PV) [۱]

۱. تولید صفحات خورشیدی (PV) در پایانه‌های بار نشان داده شده است، بیشتر از ۲۵٪ از ظرفیت تولید نهایی و به عنوان بار منفی شبیه‌سازی شده است. الکتریسیته خروجی بیشتر از ۷۰٪ ظرفیت تنظیم شده است.

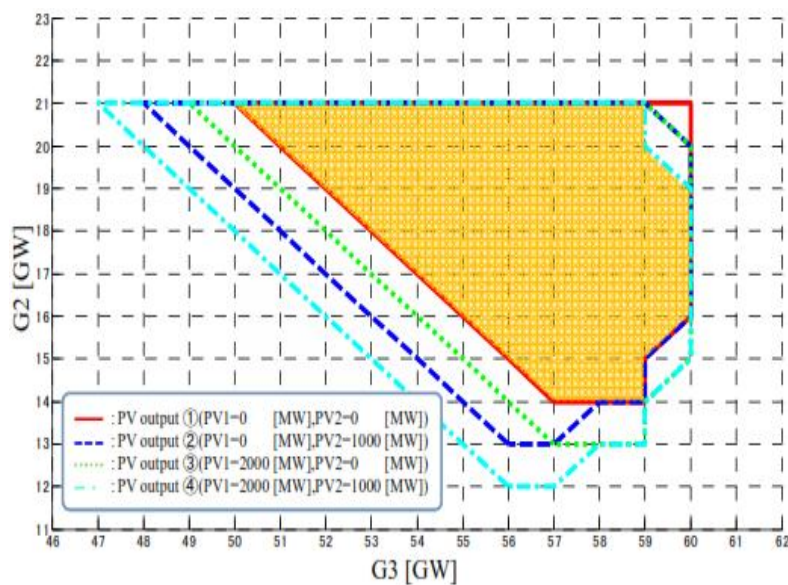
۲. توان راکتیو کافی عرضه شده است.

۳. نوسان توان خروجی PVها بوسیله منابع G_1 تا G_3 جبران می‌شود.

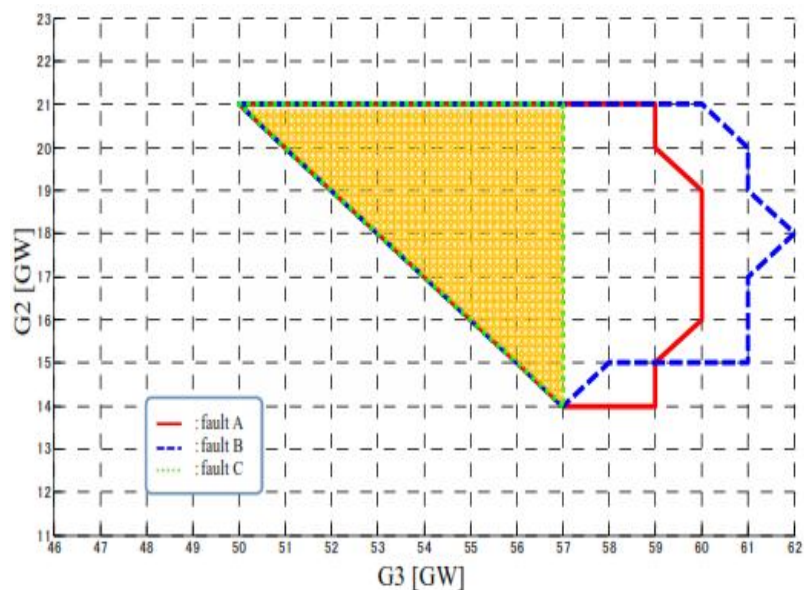
خروجی PVها به عنوان پارامتر نوسانی تلقی شده‌اند، به این معنی که از یک سال قبل نامشخص است، اما برای یک ساعت قبل قابل پیش‌بینی است. بنابراین، این اندازه از عدم قطعیت ممکن است با توجه به هدف تحلیل، تغییر کند. این آزمایش، دو مورد از نوسان PVها را با اندازه‌های مختلف عدم قطعیت، در جدول (۵-۶) و شکل (۵-۹) تنظیم می‌کند. مورد ۱ با عدم قطعیت کوچک و مورد ۲ با عدم قطعیت بزرگ همراه است. در هر دو مورد، ما فرض می‌کنیم که ناحیه ۳ آفتابی و PV مقدار ۶۰۰۰ مگا وات الکتریسیته تولید می‌کند.

۵-۴-۲ محدوده امن استاتیک پایدار (RSS)

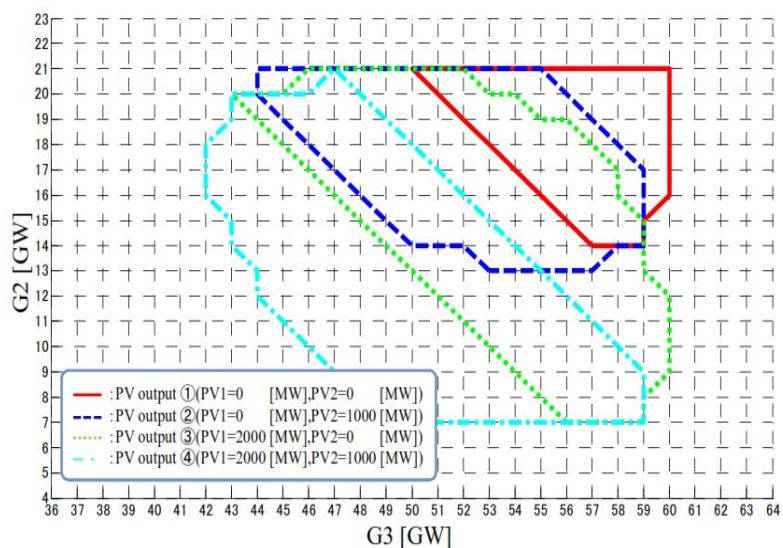
RSS در لحظه‌ی t با شبیه سازی TS تحلیل شده است. مورد ۱ در طول تحلیل در چهار نقطه از خروجی PV مورد مطالعه قرار گرفته است، که در شکل (۵-۱۰) با حلقه‌های ۱ تا ۴ نشان داده شده است. در هر نقطه از خروجی PV، تجزیه و تحلیل پایداری گذرا با تغییر مداوم الگوهای پخش بار برای بررسی پایداری تکرار شده است. این مجموعه از تحلیل‌ها برای خطاها در A، B و C انجام شده است. این نتایج در شکل (۵-۱۱) که در آن مناطق امنیت استاتیک برای خروجی‌های مختلف PV در حلقه‌های ۱ تا ۴ در مناطق منحصر به فرد بصورت نقطه‌چین نمایش داده شده است. در مرحله برنامه ریزی که در آن خروجی PV دارای عدم قطعیت بزرگ است، ما نیاز به تعیین نقطه عملیاتی در منطقه مشترک همه محدوده‌های امنیت استاتیک داریم.



شکل (۵-۱۰). محدوده امنیت استاتیک پایدار برای مورد ۱ (خطا در A) [۱]



شکل (۵-۱۱). محدوده RSS برای مورد ۱ (همه خطاهای A, B, C) [۱]



شکل (۵-۱۲). عدم وجود محدوده RSS برای مورد ۲ (همه خطاهای A, B, C) [۱]

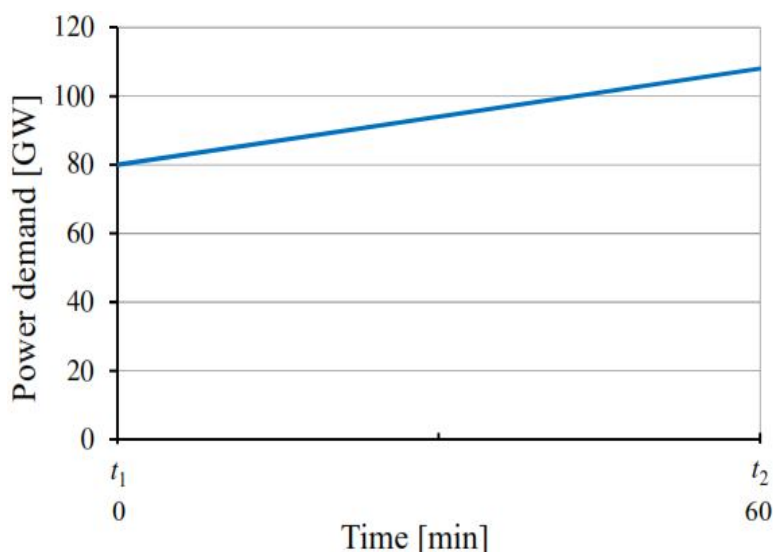
۵-۴-۳ تحلیل امنیت تحت عدم قطعیت‌های بزرگ (مورد ۲)

آزمایش RSS برای نقطه خطای A در شکل (۵-۱۲) نشان داده شده است. در این مورد، هیچ منطقه مشترکی یافت نمی‌شود، یادآوری می‌کند که با بزرگ شدن عدم قطعیت منطقه RSS از بین می‌رود. نتیجه این شبیه سازی نشان می‌دهد که عدم قطعیت در حال بزرگتر شدن است، روند محدوده RSS در

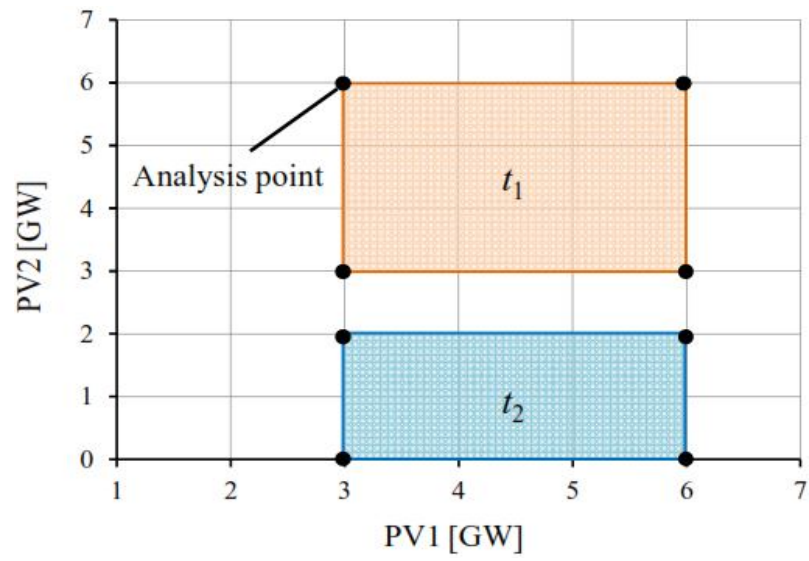
جهت کوچک شدن پیش می‌رود، بنابراین ممکن است وجود نقاط عملیاتی در طول RSS مشکل شود.

۴-۴-۵ محدوده امنیتی دینامیک پایدار (RDS)

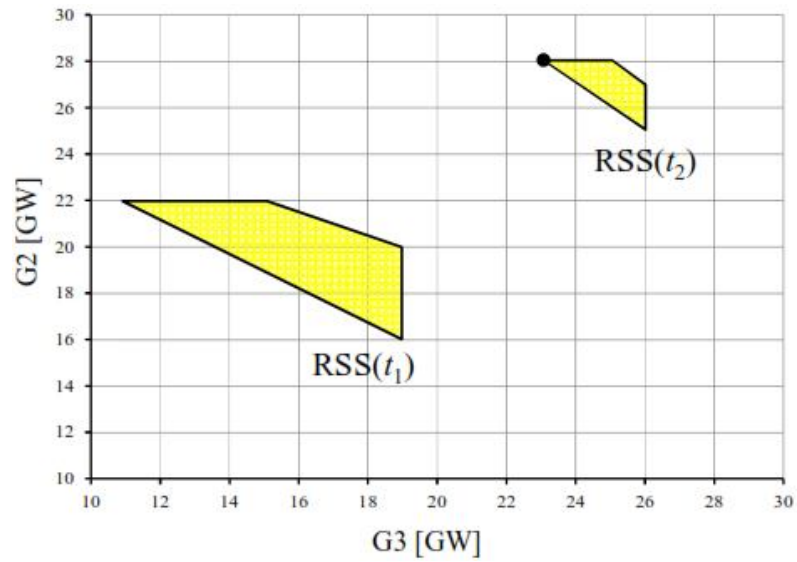
در شکل (۸-۵) تحلیل‌های امنیت سیستم قدرت در لحظه‌های t_1 و t_2 برای بحث گذرای دینامیک و قابلیت دسترسی از طریق نقاط عملیاتی با استفاده از شبکه انجام شده است. براساس RSS بدست آمده در لحظات t_1 و t_2 بوسیله تحلیل پایداری گذرا، ما منطقه امنیتی دینامیک پایدار (RDS) را آزمایش می‌کنیم. فرض کنید که منحنی بار در شکل (۵-۱۳) (a) و توان خروجی‌های PV در لحظه‌های t_1 و t_2 به عنوان مناطق نوسان پارامتر در شکل (۵-۱۳) (b) باشد. هرچند غیرواقعی است، هیچ عدم قطعیتی در ناحیه ۳ (جایی که برای سادگی کار، خروجی را به طور مداوم ۶۰۰۰ مگاوات در نظر می‌گیریم) وجود ندارد. در شکل (۵-۱۴) طبق فرض، RSS در لحظات t_1 و t_2 محاسبه شده است. در این آزمایش، ما چندین نقطه در محدوده $RSS(t_2)$ به عنوان نقاط شروع تحلیل و سپس با برگشت به نقاط شروع قبلی منطقه DF محاسبه می‌شود. $RTA(t_1)$ به عنوان مجموعه ای از نقاط قابل دسترسی از نقطه شروع به دست آمده است.



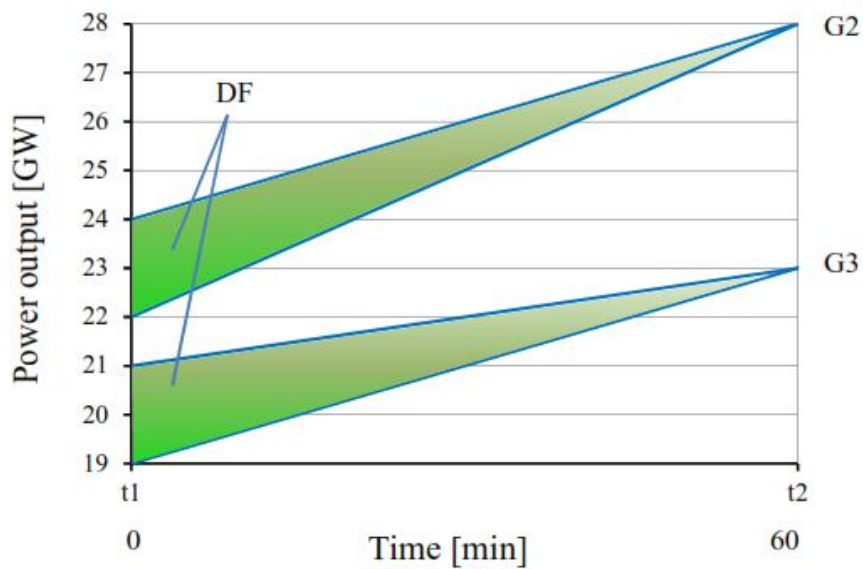
شکل (۵-۱۳). سناریوی افزایش تقاضای توان الکتریکی در t_1 و t_2 (a) [۱]



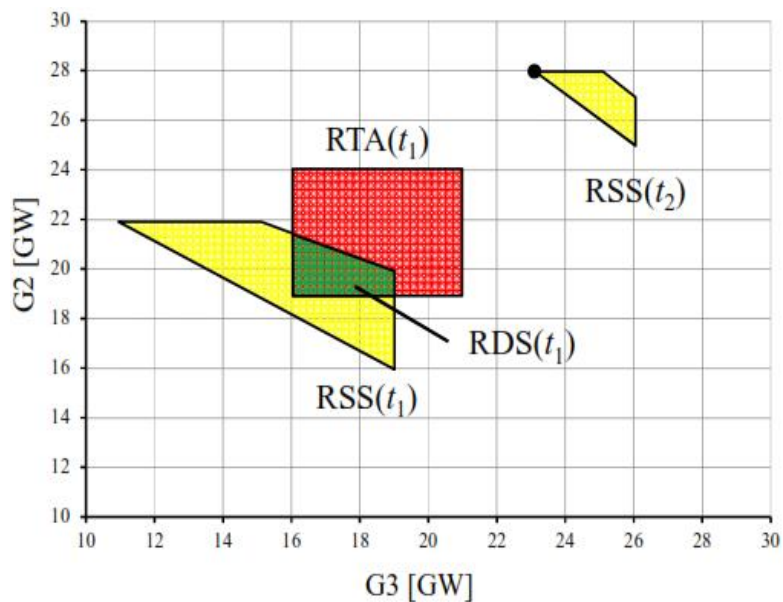
شکل (۵-۱۴). توان الکتریکی حاصل از تولید PV در t_1 و t_2 (b) [۱]



شکل (۵-۱۵). تغییرات RSS [۱]



شکل (۵-۱۶). بازگشت به محدوده‌های عملکرد [۱]



شکل (۵-۱۷). محدوده امنیت دینامیک پایدار (RDS) [۱]

یک مثال از منطقه DF در لحظه t_2 در شکل (۵-۱۶) نشان داده شده است، این منطقه مجموعه‌ای از نقاطی است که از نقاط امنیت استاتیک در لحظه t_1 که در شکل (۵-۱۵) نمایش داده ایم بدست می‌آید. بوسیله تکرار این محاسبات، RTA در شکل (۵-۱۷) به عنوان منطقه‌ای قابل دسترسی به $RSS(t_2)$ در

لحظه t_1 و در طول قابلیت دینامیک تسهیلات تأمین توان الکتریکی، بدست می‌آید. در نهایت، ما $RDS(t_1)$ را به عنوان ناحیه مشترک حاصل از مناطق RTA و $RDS(t_1)$ بدست می‌آوریم.

مشاهده مهم اینست که، حتی اگر RSS در یک منطقه استاتیک به اندازه کافی محفوظ (غیر قابل تغییر) باشد، با تغییرات محدوده RTA، تنها محدوده کوچکی از RDS باقی می‌ماند. این امر، سبب مشکل شدن برنامه‌ریزی عملیاتی سیستم قدرتمی شود. علت آن است که منطقه امنیت، خودش با تغییرات سریع بارها، کوچک می‌شود و علاوه براین، کوچک شدن این منطقه با عدم قطعیت موجود، شتاب بیشتری می‌گیرد.

۵-۵ آزمایش TS برای سیستم غرب ژاپن

در این بخش، شرایط آینده امنیت پایدار برای سیستم قدرت غرب ژاپن از گذشته تا سال ۲۰۳۰، از دیدگاه پایداری گذرا تحلیل شده است. دلیل استفاده از سیستم قدرت ژاپن به عنوان سیستم مورد آزمایش در [۱] آنست که زیرساخت شبکه هوشمند در ایران وجود ندارد. دیگر محدودیت‌ها همچون حدود گرمایی برای خط انتقال، حدود ولتاژ و پایداری ولتاژ در نظر گرفته نشده است. مشخصات استاتیک و دینامیک تولیدات PV براساس روش تحلیل آماری در [۴۳] برای اطلاعات شرایط آب و هوایی به کار گرفته شده در غرب ژاپن است. سپس، با استفاده از اطلاعات مشخص تولید PV، تحلیل امنیت پایدار برای محاسبه RDS برای بررسی شرایط آینده انجام خواهد شد. RDS به عنوان یک شاخص کمی برای معیار امنیت N-1 استفاده خواهد شد. توجه کنید که این آزمایشات در این بخش، کاملاً مستقل از تنظیم پارامترها در بخش قبل است.

۵-۵-۱ مدل کردن سیستم برای شبیه‌سازی

حداکثر تقاضای بار در سال ۲۰۱۰ برای سیستم قدرت با فرکانس ۶۰ هرتز در بخش غربی ژاپن ۹۳ گیگاوات و حداکثر تقاضای بار در سال ۲۰۳۰، ۱۰۸ گیگاوات خواهد بود [۴۱]. از آنجایی که سیستم قدرت

۶۰ هر تزی معمولی نزدیک به ۱۰۰۰ کیلومتر در طول شرق تا غرب و مدل استخوان ماهی معمولی، روشی بسیار ساده برای تبدیل کردن سیستم معمولی به سیستم کوچک هم ارز وجود دارد. ما از شبیه سازی مدل با سه مولد در شکل (۸-۵) استفاده کردیم. ذخیره کننده توزیع شده ظرفیت‌های تأمین توان و حداکثر تقاضای بار در هر ناحیه در جدول (۷-۵) نشان داده شده است. عمل تأمین بار به کمک سه مولد با نرخ رمپ ۳٪ در دقیقه انجام می‌شود. واحدهای مقادیر نشان داده شده در جدول (۷-۵) برحسب گیگاوات می‌باشد.

	G_1 ناحیه ۱	G_2 ناحیه ۲	G_3 ناحیه ۳	مجموع
حدود بالایی	۲۰,۵	۲۱,۵	۷۴,۰	۱۱۶
حدود پایینی	۶,۵	۶,۵	۲۲,۵	۳۵,۵
بار ماکزیمم	۱۹,۵	۲۰,۰	۶۸,۵	۱۰۸

در جدول (۸-۵)، نمونه‌ای از تقاضای بار برای این سه مولد نشان داده شده است (واحد مقادیر برحسب گیگاوات می‌باشد)

زمان	T. (فعلی)	T_1 (۱۰ دقیقه بعد)	T_2 (بیست دقیقه بعد)
بار	۹۷,۵	۹۸,۵	۹۹,۵

جدول (۸-۵). تقاضاهای بار در t_1 و t_2 [Unit: GW]

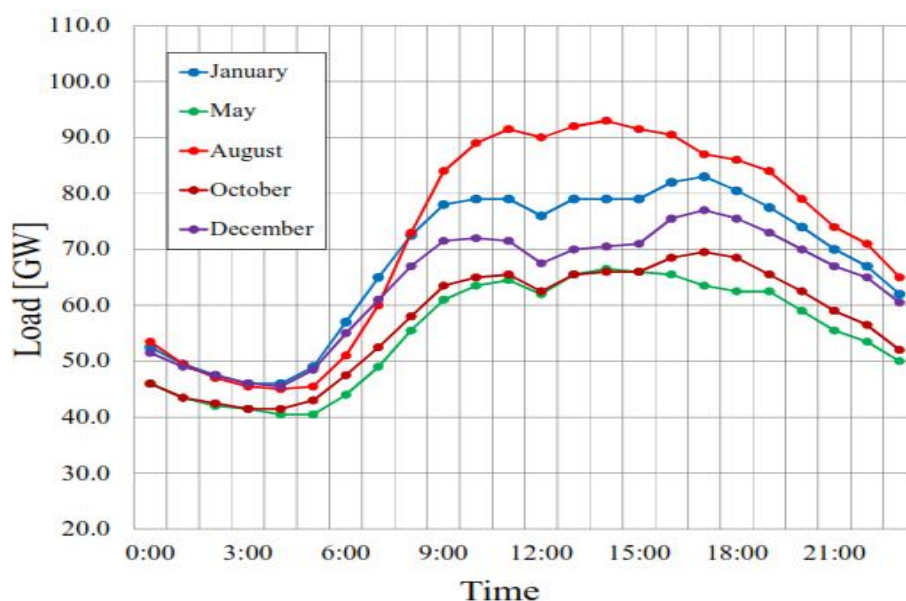
۵-۲-۵ شرایط برای منحنی بار روزانه و PV

فرض شده است که منحنی بار روزانه از هم اکنون تا سال ۲۰۳۰ شبیه به پیک بار سالانه، یعنی حدود ساعت ۱۴ باشد. همه PVها به تابع گردش خطا (FRT) هستند. منظور اینست که اگر خطایی برای

سیستم اتفاق بیفتد، PVها عملیات خود را بدون جدا شدن از سیستم قدرت انجام می‌دهند.

۳-۵-۵ امنیت دینامیک پایدار به عنوان معیاری برای امنیت N-1

همانطور که قبلا به آن اشاره شد، RDS به عنوان یک شاخص کمی برای معیار امنیت N-1 استفاده شده است. در شکل (۱۸-۵) ابتدا، RDS به مدت ۲۴ ساعت در منحنی بار روزانه محاسبه شده است، که در آن از داده‌های معمولی برای یک ماه مشخص استفاده شده است.

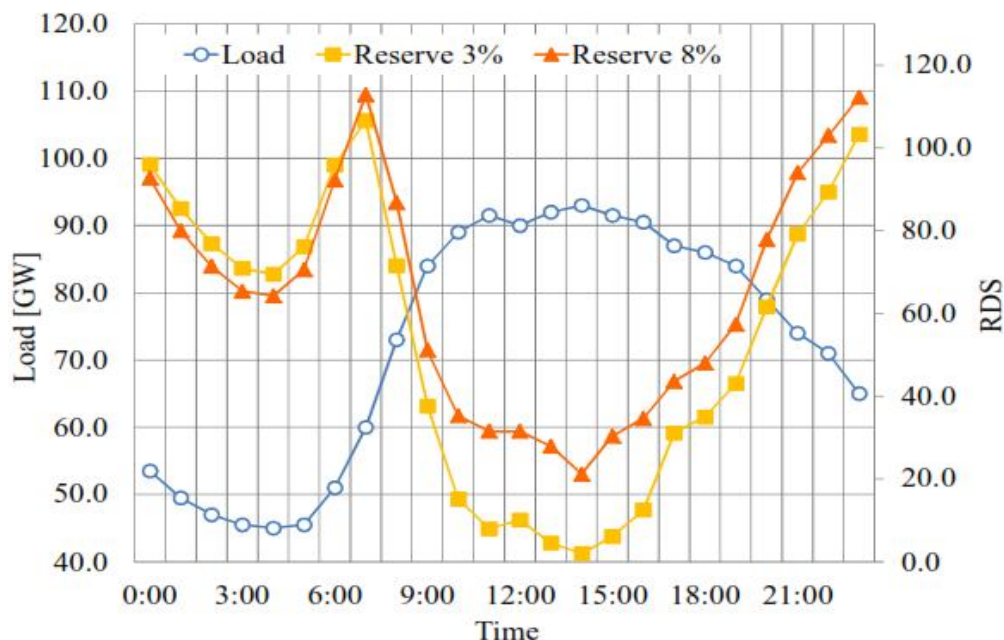


شکل (۱۸-۵). منحنی تقاضای موجود روزانه [۲]

حداقل مقدار RDS در هر ماه انتخاب می‌شود، که در جدول (۹-۵) داده شده، در سال ۲۰۱۰ تولید PV کمی اتفاق افتاده است. حداقل مقدار RDS به عنوان حداقل سطح معیار امنیت N-1 می‌باشد. این نتیجه زمانیکه حداقل RDS در پیک بار سالانه باشد به نظر قابل قبول می‌رسد. در این تحلیل، RDS برای دو مورد با ظرفیت ذخیره کننده ۳ و ۸ درصد محاسبه شده است. واحد مقادیر RDS در جدول (۹-۵)، گیگاوات (GW) می‌باشد.

	ژانویه	می	آگوست	اکتبر	دسامبر
اوج (پیک)	۸۳,۰	۶۶,۵	۹۳,۵	۶۹,۵	۷۷,۰
تقاضا (time)	(۱۷:۰۰)	(۱۴:۰۰)	(۱۴:۰۰)	(۱۷:۰۰)	(۱۷:۰۰)
RDS(٪۳)	(a)۵۳,۱	(a)۱۰,۹	(a)۴,۵	(a)۱۰,۰	(a)۷۴,۴
RDS(٪۸)	(b)۶۷,۹	(b)۱۱,۹	(b)۲۷,۳	(b)۱۱,۲	(b)۹۰,۰

جدول (۵-۹). مقادیر RDS [۲]



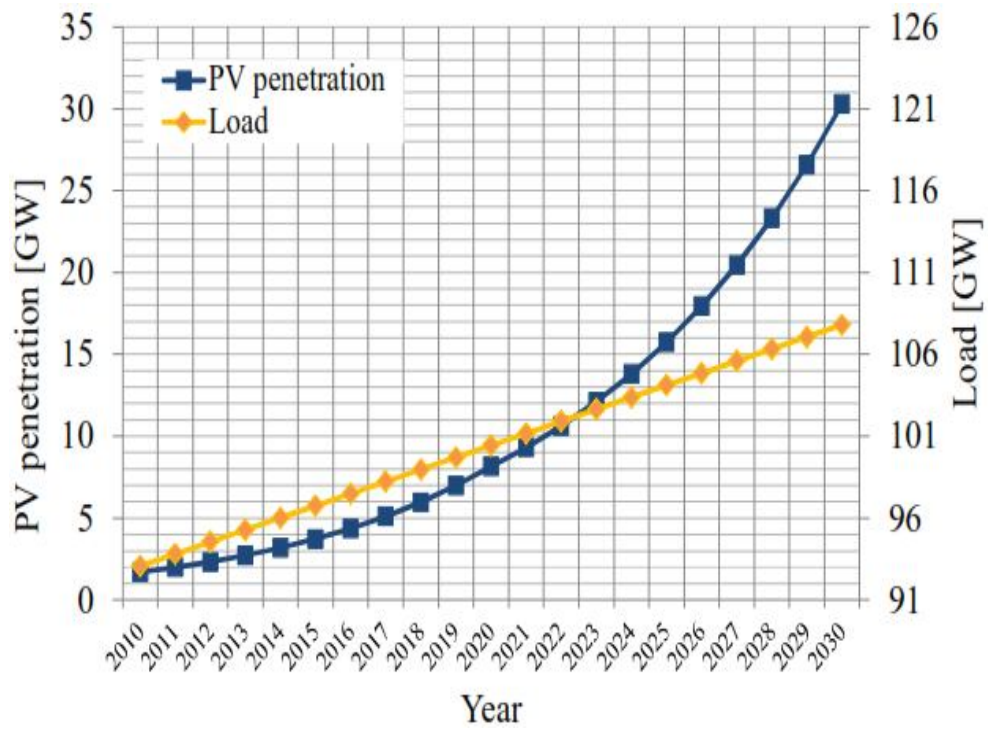
شکل (۵-۱۹). منحنی تقاضای بار و RDS برای سیستم قدرت فعلی [۲]

همانطور که در جدول (۵-۹) نشان داده شده، حداقل RDS و وضعیت بحرانی، در ماه آگوست اتفاق می افتد. جزئیات این اطلاعات، به صورت منحنی RDS برای ۲۴ ساعت در ماه آگوست در شکل (۵-۱۹) نشان داده شده است. این شکل نشان می دهد که مقادیر RDS برای ۳٪ برابر ۴/۵ و برای ۸٪ برابر ۲۷/۳ که در آن از معیار امنیت سال ۲۰۱۰ استفاده شده است.

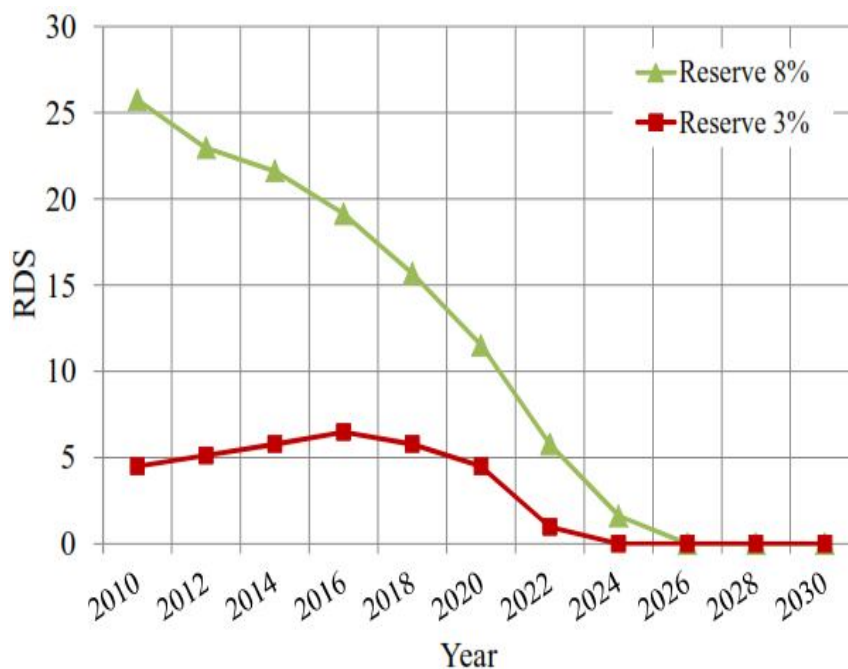
۵-۶ امنیت آینده با افزایش سطح نفوذ PV

در شکل (۵-۲۰) و (۵-۲۱) مقدار مورد انتظار تولید با استفاده از PV تا سال ۲۰۳۰ نشان داده شده است، که مرتبط با سیاست های دولت ژاپن است (که برگرفته از مرجع [۱]). RDS هر سال در یک حالت مشابه

در شکل (۲۱-۵) نشان داده شده است.



شکل (۲۰-۵). سناریوهای تقاضای بار و نصب PV [۲]



شکل (۵-۲۱). RDS در حداکثر تقاضای بار [۲]

توجه داشته باشید که نقطه شروع RDS از مقادیری است که قبلاً نشان داده شده است. بر طبق نتیجه، حفظ امنیت N-۱ بعد از سال ۲۰۲۰ دشوار است.

۷-۵ نتیجه‌گیری

مفهوم جدید "امنیت پایدار در سیستم قدرت" بر اساس مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها و همچنین تعاریف محدوده‌های امنیت استاتیک RSS و دینامیک RDS ارائه شده است. از آنجایی که عدم قطعیت قابل حذف نیست، پیش‌بینی بار و خروجی‌های PV باید به درستی تخمین زده شوند. تحت هر تخمین نتایج سیستم متغیر باشد (ناپایدار باشد)، تخمین اضافی هزینه اضافی به دنبال دارد. روش جدید پیشنهاد شده، تضمین عملکرد سیستم قدرت در ناحیه‌ی RDS را به دنبال دارد.

روش ارائه شده برای سیستم‌های قدرت محدود مفید است، اما از آنجایی که به روز رسانی مداوم برای

زمانبندی تولید نیاز به محاسبات سریع دارد و بیشتر ایستگاه‌های برق کنترل باید تحت کنترل متمرکز با تنظیم شدید خروجی باشد، استفاده از این روش برای سیستم قدرت پراکنده سوال برانگیز است. این روش ارائه شده پایدار است و در آن نقاط عملیاتی هیچ آزادی انتخاب ندارند و مولدها باید خروجی خاصی را تولید کنند، پس، SDM در آن وجود دارد.

مانند مواردی از تضادها در عملکرد سیستم قدرت بر پایه‌ی بازار، که نشان می‌دهد افزایش منابع RE نیاز به معاملات کمتر در سطح بازار و کنترل یکپارچه‌تر برای جلوگیری از فروپاشی سیستم دارد.

علاوه بر این، تجزیه و تحلیل کمی به شدت برای ارزیابی میزان سطح امنیت مورد نیاز است، که به عنوان توابعی از عدم قطعیت در نظر گرفته شده است. از آنجا که معیار امنیت در سیستم قدرت به طور واقعی، حد انتقال توان را تخمین می‌زند، افزایش در عدم قطعیت، هزینه‌های قابل ملاحظه‌ای در بهره‌برداری از سیستم قدرت به دنبال دارد.

تجزیه و تحلیل برای توصیف رابطه میان معیار امنیت، میزان عدم قطعیت و هزینه‌های بهره‌برداری سیستم قدرت مهم است. هزینه‌های واقعی RE باید به دقت ارزیابی شود.

۵-۸ برآورد و تخمین توان خروجی PV مربوط به انرژی خورشیدی

۵-۸-۱ انرژی خورشیدی برای تبدیل توان خروجی PV

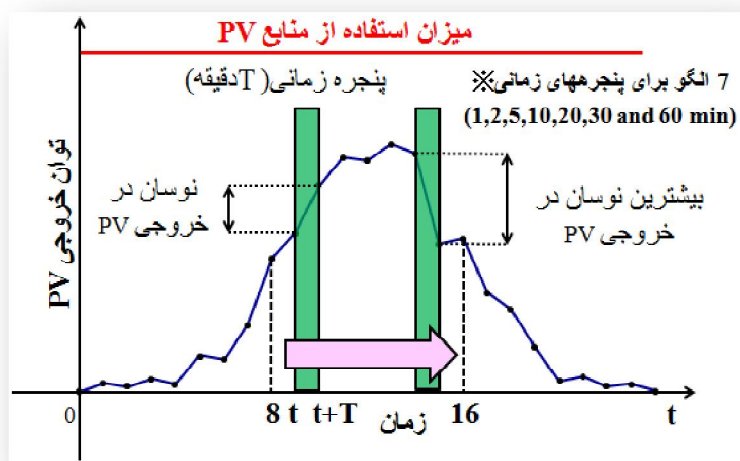
انرژی خورشیدی می‌تواند به سادگی از ساعت ۸ تا ۱۶ به توان خروجی مولد الکتریسیته تبدیل شود. ما فرض می‌کنیم که ارتباط بین انرژی خورشیدی و توان خروجی مولد الکتریسیته در طول همان منطقه جغرافیایی یک ارتباط خطی است. بنابراین از مفهوم پنجره زمانی برای تعیین نوسان توان خروجی استفاده می‌کنیم.

۵-۸-۲ مفهوم پنجره زمانی و MFR

ما ماکزیمم نوسان توان خروجی مولد الکتریسیته را با استفاده از مفهوم پنجره زمانی به صورت زیر محاسبه کردیم. انرژی خورشیدی را در طول چند فاصله زمانی مثلا ده دقیقه یا بیست دقیقه یک بار، مشاهده کردیم و تفاوت بین مقادیر مینیمم و ماکزیمم انرژی خورشیدی در طول فواصل زمانی مشاهده شده را محاسبه نمودیم. با مد نظر قرار دادن فرضیه بالا یعنی ارتباط خطی بین انرژی خورشیدی و توان خروجی مولد الکتریسیته، میزان نوسان توان خروجی مولد الکتریسیته (FR) را در معادله (۴-۵) تعریف نمودیم.

$$FR[\%] = \frac{\max [PV Output]_t^{t+T} - \min [PV Output]_t^{t+T}}{\text{Installed Capacity of PV}} \quad (۱۰-۵)$$

که T به عنوان فاصله زمانی ملاحظه شده یا "پنجره زمانی" در شکل (۵-۲۱) تعریف می شود. با حرکت آرام پنجره زمانی از ساعت ۸ به ساعت ۱۶، تمام FR ها را محاسبه کردیم و FR ماکزیمم (MFR) را از بین تمام FR ها بدست آوردیم.



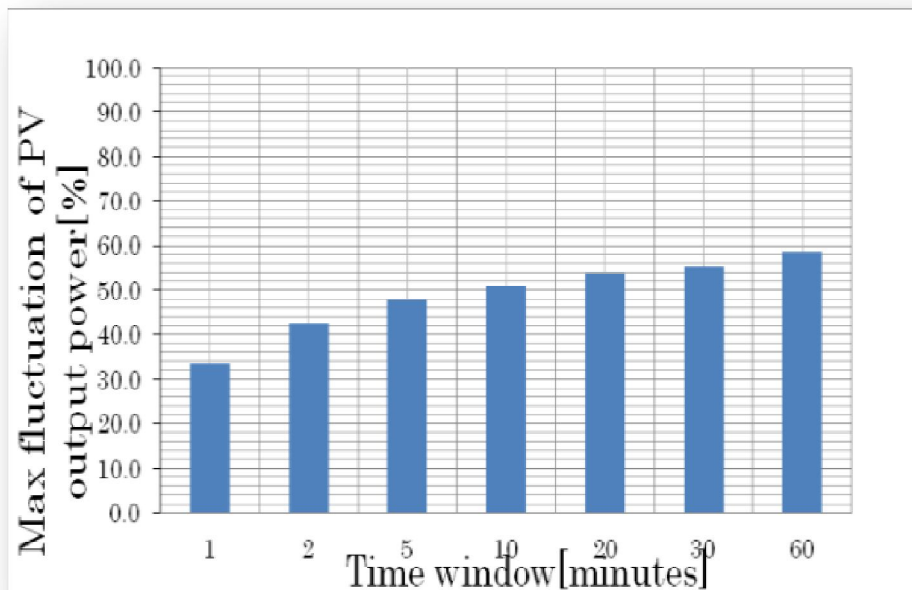
شکل (۵-۲۲). مفهوم پنجره زمانی برای محاسبه

از آنجایی که فرض می شود $MFR [\%]$ در حال افزایش یا کاهش است، ماکزیمم میزان نوسان توان

خروجی مولد الکتریسیته بعد از T به عنوان (ظرفیت نصب شده مولد الکتریسیته) $\pm MFR \times$ سنجیده می شود. در آنالیز و تجزیه و تحلیل زیر، توان خروجی مولد الکتریسیته اولیه در نقطه میانی نفوذ مولد الکتریسیته تنظیم می شود تا احتمال تغییر خروجی در جهت های بالایی و پایینی مد نظر قرار گیرد.

۵-۸-۳ محاسبه چندین فاصله پنجره زمانی

چندین فاصله پنجره زمانی را با استفاده از داده های انرژی خورشیدی مربوط به رصدخانه هواسنجی هیروشیما در شکل (۵-۲۳) محاسبه شده است. این داده ها به مدت یک ماه در آگوست ۲۰۱۰ ثبت شد و فقط از ساعت ۸ تا ۱۶ استخراج گردید. شکل (۵-۲۳) نشان می دهد که MFR در پنجره زمانی یک دقیقه بیش از ۳۰٪ است، که مطابق با حدود نصف MFR در ۶۰ دقیقه پنجره زمانی می باشد و همچنین این شکل نشان می دهد که اگر فاصله پنجره زمانی از یک دقیقه بیشتر شود و به ۶۰ دقیقه برسد، MFRها اشباع می گردد.



شکل (۵-۲۳). MFR (%) برای چند فاصله پنجره زمانی [۲]

۵-۸-۴ هموارسازی تاثیرات برای اصلاح توان خروجی PV

برای اینکه توان خروجی مولد الکتریسیته را در تمام ناحیه هدف برآورد کنیم، لازم است این موضوع را مد نظر قرار دهیم که هوا مانند الگوهای نقطه‌ای درون ناحیه، قابل تغییر و ناپایدار است. تکنیک مفیدی به نام "اثر هموارسازی" در مرجع [۱] اقتباس شده است تا توان خروجی PV را به طور صحیحی با مد نظر قرار دادن شرایط آب و هوایی در تمام ناحیه اصلاح کنیم. این نوع تحقیقات برای تخمین و برآورد توان خروجی مولد الکتریسیته به طور صحیحی اخیراً توسعه و پیشرفت داشته است. در این تحقیق، ۲۵٪ را به عنوان اثر هموارسازی پذیرفته شده است، چون ناحیه ای با شعاع ۱۰۰ کیلومتر را مورد ملاحظه قرار داده شده است.

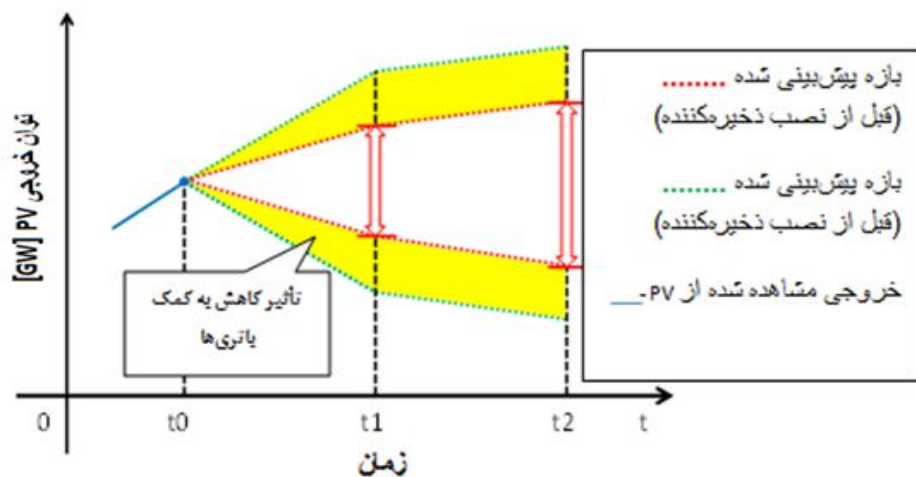
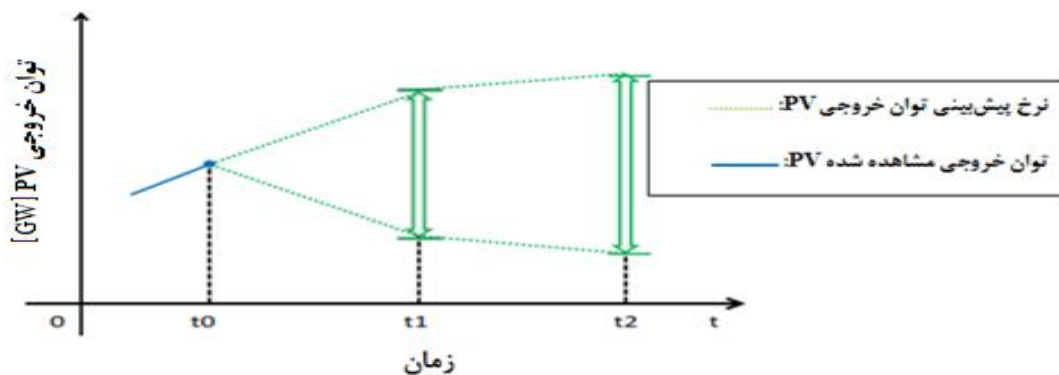
MFR (%)			
۱ دقیقه	۲ دقیقه	۱۰ دقیقه	۲۰ دقیقه
۳۳,۵	۴۲,۶	۵۰,۶	۵۳,۷
بدون اثر هموار سازی			
۲۵,۱	۳۲,۰	۳۸,۰	۴۰,۳
با اثر هموارسازی			

جدول (۵-۱۰). MFR برای ۱ دقیقه، ۲ دقیقه، ۱۰ دقیقه، ۲۰ دقیقه. پنجره های زمانی با یا بدون اثر هموارسازی [۲]

۵-۸-۵ باتری های ذخیره سازی برای هموار کردن نوسانات PV

در شبیه‌سازی از باتری های ذخیره سازی برای هموار کردن نوسان توان خروجی مولد الکتریسیته استفاده شده است تا مقداری از خطای تخمینی و عدم قطعیت جبران شود. در صورتی که یک روش عملکردی پیچیده تر در آینده اختراع شود، ممکن است مولدهای معمولی مانند ایستگاه‌های ذخیره انرژی پمپی یا ایستگاه‌های انرژی گرمایی، برای این هدف مفید باشند. از آنجایی که عملکرد اصلی فعلی آنها عرضه انرژی الکتریکی و تنظیم فرکانس سیستم مطابق با تقاضای انرژی الکتریکی است، تلاش‌های بیشتر برای افزودن عملیات جدید لازم می‌باشد.

شکل (۵-۲۴) توضیح و تفسیری را برای دامنه نوسان توان خروجی مولد الکتریسیته قبل و بعد از نصب باتری ها نشان می دهد. خط قرمز نشان می دهد که نوسان ها به وسیله باتری ها کاهش یافته است.



شکل (۵-۲۴). دامنه نوسان توان خروجی PV قبل (بالا) و بعد (پایین) نصب باتری ها [۲]

۵-۹-۵ شبیه سازی تأثیرات باتری بر امنیت دینامیک

۵-۹-۱ سیستم مدل برای شبیه سازی

اینگونه برآورد شده است که تقاضای بارماکزیمم در ۲۰۳۰ برای سیستم انرژی ۶۰Hz در بخش غربی ژاپن ۱۰۸GW خواهد بود. از آنجایی که سیستم انرژی ۶۰Hz اصلی تقریباً طولی برابر با ۱۰۰۰ کیلومتر از

شرق به غرب دارد و نوع مدل سازی آن به روش استخوان ماهی^{۸۹} است [۸۲]، بسیار ساده است که سیستم اصلی را به یک سیستم متناظر کوچک کاهش داده است. در این تحقیق، از مدل شبیه سازی با سه مولد استفاده شده است (شکل (۵-۲۵)). ذخیره چرخشی ۸٪ بالای بار ماکزیمم حفظ می شود. ظرفیت های عرضه انرژی و تقاضای بار ماکزیمم در هر ناحیه در جدول (۵-۱۳) نشان داده شده است.

۵-۹-۲ میزان نفوذ PV با FRT

در هر ناحیه ، ۶ مورد با واحد ۵٪ از ۵٪ تا ۳۰٪ در برابر بار پیک در جدول (۵-۵) تنظیم شده است. تمام مولدهای الکترونیته مجهز به fault ride (یعنی حتی در مورد بروز خطا، تمام مولدهای الکترونیته (PV) بدون قطع شدن از سیستم انرژی به عملکرد خود ادامه می دهند) می باشند)

میزان نفوذ PV [%]	PV۱	PV۲	PV۳	مجموع
۵	۱	۱	۳	۵
۱۰	۲	۲	۷	۱۱
۱۵	۳	۳	۱۰	۱۶
۲۰	۴	۴	۱۴	۲۲
۲۵	۵	۵	۱۷	۲۷
۳۰	۶	۶	۲۱	۳۳

جدول (۵-۱۱): نفوذ PV در هر ناحیه (واحد: GW) [۲]

۵-۹-۳ نوسان برآورد شده توان خروجی PV

نوسان برآورد شده توان خروجی PV در جدول (۵-۱۲) آمده است که در آن اثر هموارسازی توصیف شده است هم مد نظر قرار گرفته است. (در جدول زیر منظور از "~" فاصله بین دو عدد است (تا))

^{۸۹} - Fish-Bone

میزان	دامنه پیش بینی توان خروجی $PV(t_1)[GW]$			دامنه پیش بینی توان خروجی $PV(t_2)[GW]$		
نفوذ PV	PV_3	PV_2	PV_1	PV_3	PV_2	PV_1
[%]						
۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰	۰,۰
۵	۰,۵~۳,۵	۰,۰~۱,۵	۰,۰~۱,۰	۰,۰~۱,۰	۰,۰~۱,۰	۰,۰~۱,۰
				~۳,۵		
				۰,۵		
۱۰	۰,۵~۶,۵	۰,۰~۲,۵	۰,۰~۲,۰	۰,۵~۶,۵	۰,۰~۲,۰	۰,۰~۲,۰
۱۵	۱,۰~۹,۰	۰,۰~۳,۰	۰,۰~۳,۵	۱,۰~۹,۰	۰,۰~۳,۰	۰,۰~۳,۰
۲۰	۱,۰~۱۳,۰	۰,۰~۴,۰	۰,۰~۴,۵	۱,۵~۱۲,۵	۰,۵~۳,۵	۰,۵~۳,۵
۲۵	۱,۵~۱۵,۵	۰,۵~۴,۵	۰,۵~۴,۵	۲,۵~۱۵,۰	۰,۵~۴,۵	۰,۵~۴,۵
۳۰	۲,۰~۱۹,۵	۰,۵~۵,۵	۰,۵~۵,۵	۲,۵~۱۸,۵	۰,۵~۵,۵	۰,۵~۵,۵

جدول (۵-۱۲). دامنه پیش بینی توان خروجی PV در t_1 و t_2 قبل از نصب و تنظیم باطری ها [۲]

- ۱/۲ نفوذ $MFR \pm PV$ در t_1 و t_2 با مد نظر قرار دادن اثر هموار سازی

۵-۹-۴ نصب باطری های ذخیره سازی

باطری های ذخیره سازی برای جذب نوسان برآورد شده توان خروجی مولد الکتروسیسته در t_2 نصب شده اند. تنظیمات ماکزیمم در برابر میزان نفوذ مولد الکتروسیسته ۵۰٪ می باشد، زیرا MFR در ۶۰ دقیقه پنجره زمانی با مد نظر قرار دادن اثر هموارسازی تقریبا ۵۰٪ می باشد. براساس نتیجه بالا، تنظیمات باطری ها (میزان تنظیم از ۰٪ تا ۵۰٪) در هر ناحیه در جدول (۵-۱۳) نشان داده شده است.

میزان تنظیم باطری در تنظیم و نصب باطری [GW]

برابر نفوذ PV[%]

مجموع	ناحیه ۳	ناحیه ۲	ناحیه ۱	
۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۰
۲,۰۰	۱,۰۰	۰,۵۰	۰,۵۰	۵
۳,۰۰	۲,۰۰	۰,۵۰	۰,۵۰	۱۰
۵,۰۰	۳,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	۱۵
۶,۰۰	۴,۰۰	۱,۰۰	۱,۰۰	۲۰
۸,۵۰	۵,۵۰	۱,۵۰	۱,۵۰	۲۵
۱۰,۵۰	۶,۵۰	۲,۰۰	۲,۰۰	۳۰
۱۱,۵۰	۷,۵۰	۲,۰۰	۲,۰۰	۳۵
۱۳,۵۰	۸,۵۰	۲,۵۰	۲,۵۰	۴۰
۱۴,۵۰	۹,۵۰	۲,۵۰	۲,۵۰	۴۵
۱۶,۵۰	۱۰,۵۰	۳,۰۰	۳,۰۰	۵۰

جدول (۵-۱۳). تنظیم باطری ها در هر ناحیه [۲]

۵-۹-۵ دستورالعملی برای عملکرد شبیه سازی

به منظور ساده سازی و نادیده گرفتن محدودیتها و موانعی مانند حدود گرمایی برای خط انتقال، حدود

ولتاژ و پایداری ولتاژ، ما فقط پایداری گذرا^{۹۰} (TS) را بررسی می کنیم.

توان خروجی برای G_1 به طور واضح ارائه نشده است، زیرا G_1 به عنوان یک مولد ضعیف یا متغیر وابسته

^{۹۰} - Transient Stability

عمل می کند که به طور منحصر به فردی به عنوان تابعی از توان خروجی G_r ، G_r و PV و تقاضای بار تعیین می شود.

(۱) ناحیه RDS (۴۵,۵) در جدول (۵-۱۴) در زمان فقدان نفوذ PV و نبود تنظیمات باطری های ذخیره سازی محاسبه شده است.

(۲) ناحیه RDS هر دفعه با تنظیم باطری های ذخیره سازی از ۰٪ تا ۵۰٪ محاسبه می شود که هر زمانی که نفوذ مولد الکتریسیته به در هر ۵٪ واحد ۳۰٪ افزایش یابد، به طور کامل نوسان توان خروجی مولد الکتریسیته جذب می شود.

۵-۹-۶ نتایج شبیه سازی

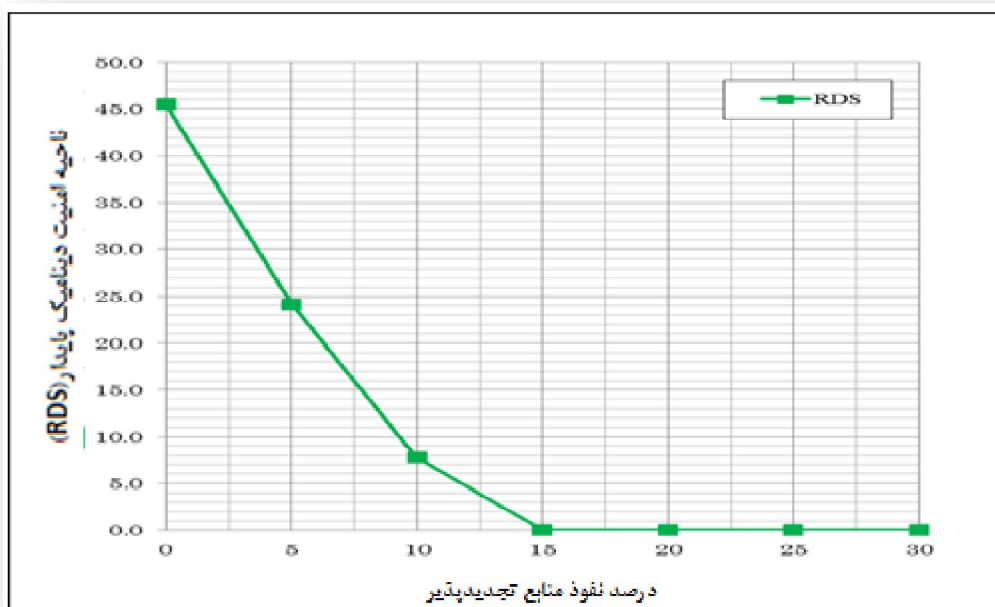
براساس دستورالعمل عملکرد شبیه سازی، ناحیه های RDS به صورت زیر محاسبه می شوند.

ارتباط بین نفوذ مولد الکتریسیته و ناحیه RDS در شکل (۵-۲۵) نشان داده شده است. این نمودار با استفاده از اطلاعات ردیف اول (که برای تنظیم ۰٪ باطری) در جدول (۵-۱۳) ترسیم شده است و نتایج روابط را به صورت واضح نشان می دهد. جدول (۵-۸) تنظیم شده است و دنباله بار هم با سه مولد انجام شده است. براساس ناحیه های RDS که در جدول (۵-۱۴) در میزان نفوذ مولد الکتریسیته ۳۰٪ شده اند، نشان داده شده است که چگونه هر ناحیه (RSS ، RTA و RDS) که از ایمنی سیستم انرژی پایدار بدست آمده اند، در شکل (۵-۲۶) نتایج جدول (۵-۱۴) نشان داده شده است.

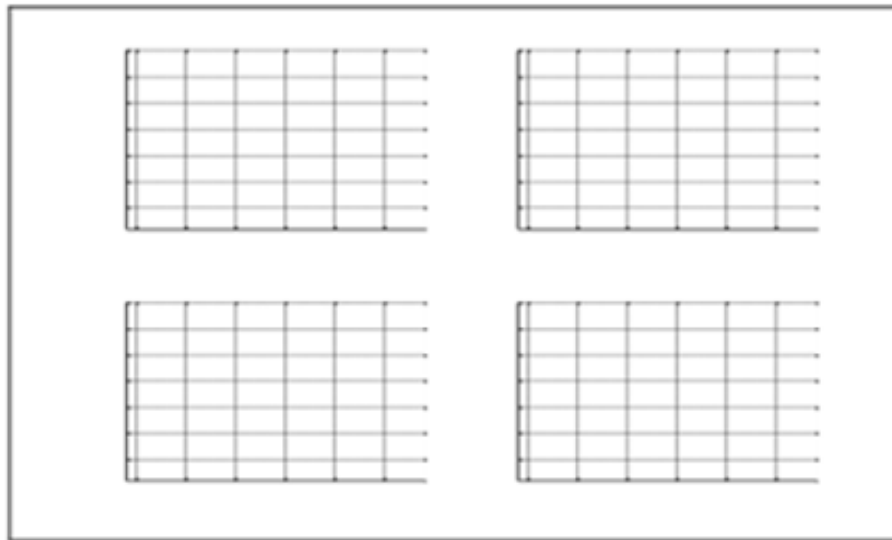
× اعداد درون جدول نشان دهنده ناحیه های RDS هستند.

		میزان نفوذ PV						
		0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
تنظیم باتری	0%	45.5	24.1	7.8	0.0	0.0	0.0	0.0
	5%	X	24.1	12.4	0.0	0.0	0.0	0.0
	10%	X	31.1	12.4	10.0	0.0	0.0	0.0
	15%	X	31.1	23.4	14.5	3.8	1.5	0.0
	20%	X	31.1	30.4	20.5	23.9	13.0	0.0
	25%	X	46.0	38.3	36.3	31.9	33.8	19.8
	30%	X	46.0	38.3	44.8	39.9	42.4	42.6
	35%	X	46.0	46.3	53.0	66.5	69.3	59.4
	40%	X	46.0	61.9	61.8	75.8	78.0	78.9
	45%	X	54.0	61.9	69.6	75.8	78.0	78.9
	50%	X	54.0	61.9	69.6	75.8	78.0	78.9

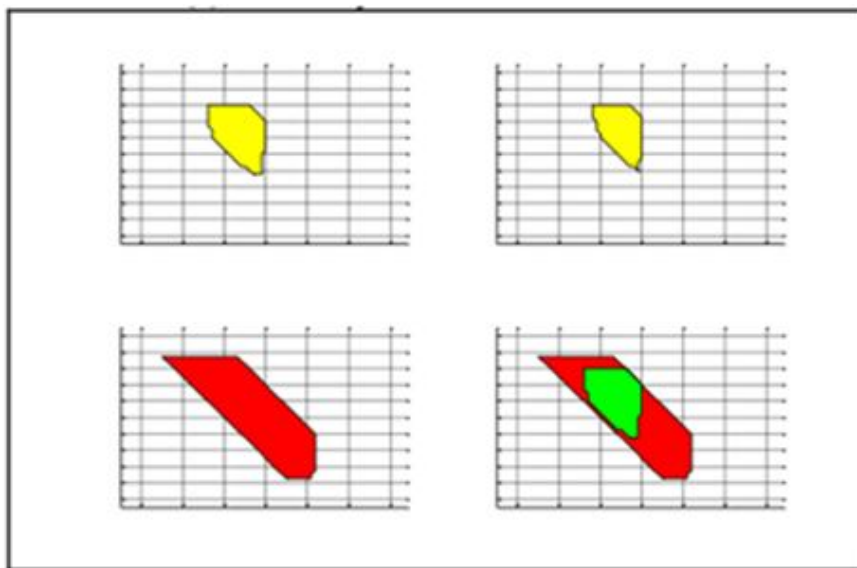
جدول (۵-۱۴). ارتباط بین ناحیه RDS و تنظیم باتری مطابق با نفوذ PV [۲]



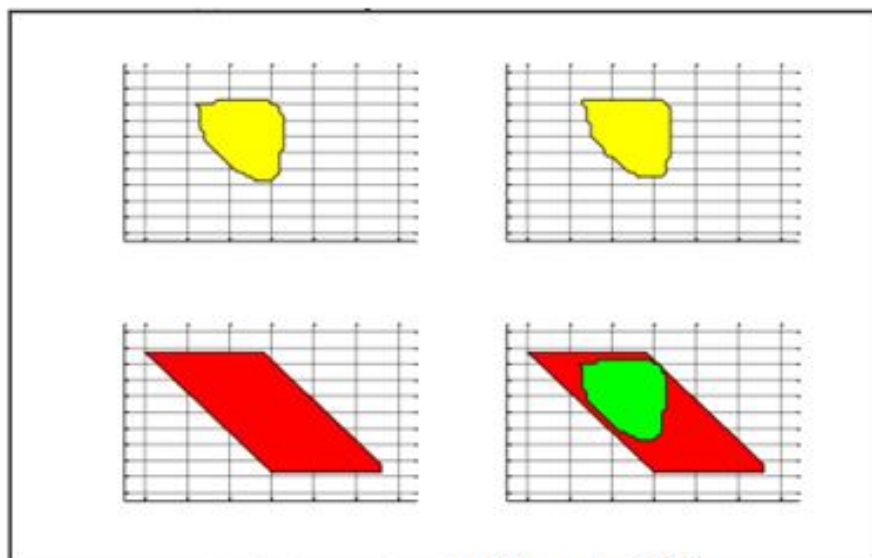
شکل (۵-۲۵): نموداری که نشان دهنده ارتباط بین نفوذ PV و ناحیه RDS می باشد [۲]



(a) تنظیم باطری: 20%



(b) تنظیم باطری: 30%



(C) تنظیم یاتری: % ۰.۴
 (RSS: مشخصه‌ها) (RTA:) (RDS:)

شکل (۵-۲۶). موقعیت سنجی متقابل RSS، RTA و RDS که از ایمنی سیستم انرژی پایدار بدست آمده است [۲]

۵-۱۰ نتیجه گیری

نتایج بررسی مرجع [۱] به صورت خلاصه به شرح زیر می باشد:

آنالیز کمی ایمنی سیستم انرژی با استفاده از ناحیه امنیت دینامیک پایدار (RDS) نشان داده شده که براساس مفهوم ایمنی سیستم انرژی پایدار (RS) بود.

ارتباط بین نفوذ مولد الکتریسیته و ناحیه RDS منجر به یک رابطه جایگزینی واضح شده است، یعنی،

(۱) اگر نفوذ مولد الکتریسیته افزایش پیدا کند، ناحیه RDS به صورت تدریجی کوچک تر می شود.

زمانی که میزان نفوذ مولد الکتریسیته فراتر از یک حد مشخص شود، یعنی در مورد ما ۰.۱۵٪،

آنگاه RDS ناپدید و محو می شود. به عبارت دیگر، ناحیه تضمین ایمنی N-۱ دیگر برای نفوذ

بالتر مولد الکتریسیته وجود ندارد.

۲) زمانی که باطری های ذخیره سازی بیشتری در برابر افزایش نفوذ مولد الکتریسیته نصب شوند، ناحیه RDS بزرگتر می شود. به عبارت دیگر، ناحیه تضمین ایمنی $N-1$ در این مورد بزرگ می شود.

اگر هر ناحیه (RSS, RTA و RDS) که از ایمنی سیستم انرژیپایدار (RS) بدست آمده است، بر روی یک نمودار نشان داده شود، می توانیم به سادگی موقعیت متقابل هر ناحیه را متوجه شویم. براساس این آزمایش، پیشنهاد می کنیم که این تجسم بخشی و نمودارهای گرافیکی در آینده به یک ابزار حمایتی مؤثر برای متصدی های سیستم انرژی تبدیل شوند. متصدی های سیستم انرژی قادر خواهند بود که موقعیت های عملکردی را به سادگی با استفاده از این ابزار به عنوان کنترل ایمنی تشخیص دهند.

به عنوان یک موضوع مربوط به آینده، لازم است که روش های مؤثری برای تعیین هر ناحیه از ایمنی سیستم انرژیپایدار (RS) توسعه یابد. از آنجایی که سیستم آزمایشی در این مقاله بسیار کوچک است، یک روش مؤثر برای تشدید پارامترها باید ابداع شود تا بر مقیاس پذیری روش ارائه شده غلبه گردد. آنالیزهای پیشرفته تر و پیچیده تر و طرح های کنترلی شامل تکنولوژی های آنلاین برای حفظ ایمنی سیستم انرژی در آینده لازم و ضروری خواهد بود.

۵-۱۱ محدودیت های موجود در روش معرفی شده

برخلاف سیستم های قدرت موجود که تقاضا و صورت حساب مصرف کنندگان را به صورت آنلاین محاسبه می گردید، در این سیستم ها از ویژگی های شبکه هوشمند استفاده شده و با مصرف کنندگان جهت دریافت میزان تقاضا و محاسبه هزینه ها به صورت آنلاین در ارتباط است.

تجزیه و تحلیل پایداری گذرا در شرایط آینده در ژاپن نشان داده است که، همزمان با افزایش منابع RE، ناحیه RSS به اندازه ناحیه RDS رو به کاهش است و در نهایت، برای مقابله با عدم قطعیت ها مناسب

نیست. در واقع این کاهش محدوده RDS، تصمیم‌گیری را جهت برقراری امنیت پایدار دچار مشکل می‌کند. محدودیت دیگر این نوع پخش بار، افزایش هزینه‌ها به علت به کارگیری ذخیره‌کننده‌ها (باتری‌ها) در سطح شبکه قدرت می‌باشد.

۵-۱۲ راه‌کارها پیشنهادات جهت بهبود سیستم توزیع قدرت

با توجه به روشی که در بخش قبل بیان شد، راهکاری که سیستم قدرت برای تصمیم‌گیری در شرایط بحرانی ناشی از افزایش عدم قطعیت استفاده می‌کند، به کارگیری شبکه هوشمند می‌باشد.

چون استفاده از ذخیره‌کننده‌ها برای جبران کاهش محدوده امن دینامیک (RDS)، هزینه را افزایش می‌دهد. پیشنهاد ما، استفاده از سیاست‌های تشویقی عرضه تقاضا (DR) در سمت مصرف‌کننده برای پخش بار است که می‌تواند با کاهش بار، از کاهش محدوده امنیت دینامیک در بخش سیستم توزیع قدرت جلوگیری کند.

با معرفی بحث شبکه‌های هوشمند و کاربرد هرچه بیشتر زیرساخت‌های اندازه‌گیری پیشرفته (AMI)، نظریه پاسخ تقاضا اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. وجود ویژگی پاسخ تقاضا در شبکه هوشمند باعث حضور فعال تر و مؤثر مصرف‌کننده در تأمین انرژی الکتریکی می‌شود. اهمیت پاسخ تقاضا به طور کلی از دو جهت است که شامل: ۱- تعرفه قیمت‌های متغیر خرده‌فروشی - در این جهت‌گیری، با اعلام هزینه برق مصرفی به صورت لحظه‌ای برای مصرف‌کننده، این امکان فراهم می‌شود که مصرف‌کننده با آگاهی از هزینه برق مصرفی در لحظه‌ای اوج تقاضا، مصرف خودش را کاهش دهد. ۲- برنامه‌های پاسخ تقاضای مبتنی بر تشویقی: در این نوع، میان مراکز توزیع و عرضه انرژی و بهره‌برداران شبکه و مصرف‌کنندگان قراردادهایی تنظیم می‌شود که طبق آن، مصرف‌کنندگان در زمانهای بحرانی، میزان تقاضای خود را کاهش دهند. در مقابل، در ازای این کاهش مصرف انرژی، مورد تشویق مالی قرار گیرند.

- [١]. Naoto Yorino, Yutaka Sasaki, Emil Popov.Hristov, Yoshifumi Zoka. Yoshiharu Okumoto “Dynamic Load Dispatch for Power System Robust Security Against Uncertainties”. ٢٠١٣ IREP Symposium-Bulk Power System Dynamics and Control –IX (IREP), August ٢٥-٣٠, ٢٠١٣, Rethymnon, Greece.
- [٢]. Naoto Yorino, Yutaka Sasaki, Emil Popov.Hristov, Yoshifumi Zoka. Yoshiharu Okumoto, Toshihiro Yamanaka “An Application of Robust Power System Security to Power System Operation for High-Penetration of PV”. ٢٠١٢ ٣rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), Berlin.
- [٣]. S. Kalyani and K. S. Swarup “Static Security Assessment in Power Systems Using Multi-Class SVM with Parameter Selection Methods”. International Journal of Computer Theory and Engineering, Vol. ٥, No. ٣, June ٢٠١٣.
- [٤]. Kim, Kyungmook.” History of Electrification in Europe”. Korean Minjok Leadership Academy International Program. Available on line at : <http://www.zum.de/whkmla/sp/٠٨٠٩/kyungmook/km٢.html>. Term Paper, AP European History Class, December ٢٠٠٧.
- [٥]. J. Duncan Glover, Mulukutla Sarma, Thomas Overbye.”Power Systems Analysis and Design” J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, Thomas J. Overbye.
- [٦]. Freris L, Infield D. “Renewable energy in power systems”. John Wiley & Sons Inc.; ٢٠٠٨.
- [٧]. P.U.C.O. No. ١٧ electronic transmission system rules and regulations definitions and amendments.
- [٨]. Blume, Steven. Electric Power System Basics for the Nonelectrical Professional. ١st ed. New York City: Wiley-IEEE Press, ٢٠٠٧. ٠-٢٦٠. Print.
- [٩]. Smart Grid System Report Appendix A & B. Online. Available at: <http://energy.gov/oe/downloads/٢٠٠٩-smart-grid-system-report-july-٢٠٠٩>.
- [١٠]. US DOE (٢٠٠٦). Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them. February ٢٠٠٦.
- [١١]. Smart Grid Conceptual Model. Online at: <http://smartgrid.ieee.org/ieee-smart-grid/smart-grid-conceptual-model>
- [١٢]. K.W. Cheung, R. Rios-Zalapa, Smart dispatch for large grid operations with integrated renewable resources, in: IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, Anaheim, USA, Jan. ١٧-١٩, ٢٠١١, pp. ١-٧.
- [١٣]. Lotfifard. S “automated fault location in smart distribution systems”. Ph.D dissertation, Texas A&M University, Electrical Engineering. August ٢٠١١.
- [١٤]. John Grainger William Stevenson jr.” Power System Analysis, ١st Edition”. McGraw-Hill Science/Engineering/Math (١٩٩٤) Hardcover – January ١, ٢٠٠١
- [١٥]. P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, and V. Vittal, “Definition and classification of power system stability,” IEEE Trans. Power Syst., vol. ١٩, no. ٣, pp. ١٣٨٧-١٤٠١, Aug. ٢٠٠٤. T١٧-٣٠m, ٤.
- [١٦]. Nicoleta Arghira, Daniela HOSSU, Ioana FAGARASAN, Serigu stelian ILIESCU, Daniel Razvan Costianu, “Modern SCADA philosophy in Power System Operation-A Survey,” IEEE ISSN ١٤٥٤-٢٣٤x, U.P.B. Sci.Bull., Series C, Vol. ٧٣, Iss. ٢٠٢٠١١.

- [17]. Osborn J, Kawann C. 2001. Reliability of the U.S. Electric System—Recent Trends and Current Issues. Rep. LBNL-57053, Lawrence Berkeley Natl. Lab., Berkeley, CA.
- [18]. Daniel Kirschen. “Economic Dispatch and Introduction to Optimisation”. 2004. LTEdits
- [19]. Andrew L. Ott, “Experience with PJM Market Operation, System Design, and Implementation”, IEEE Transactions on Power Systems, May, 2003, Digital Object Identifier 10.1109/TPWRS.2003.810698
- [20]. FERC Staff. 2000. Economic Dispatch: Concepts, Practices and Issues, available at <http://www.ferc.gov/EventCalendar/Files/20001110172903-FERC/20Staff/20Presentation.pdf>.
- [21]. Kirschen, D., Strbac, G., 2004. “Why investments do not prevent blackouts,” *Electricity Journal*, 17: 29-34.
- [22]. Report on the event of september 28th culminating in the separation of the Italian power system from the other European networks.
- [23]. Masaki Yo, Masahiro Ono, Brian C. Williams, and Shuichi Adachi. “Risk-limiting, Market-based Power Dispatch and Pricing”. 2003 European Control Conference (ECC) July 17-19, 2003, Zürich, Switzerland.
- [24]. P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, and V. Vittal, “Definition and classification of power system stability,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 3, pp. 1387-1401, Aug. 2004.
- [25]. Noorpi N. Sabrina, "Security Enhancement of Power Systems with Smart Grid Implementation", 2002 1st International Conference on Future Trends in Computing and Communication Technologies.
- [26]. Kluwer Academic Publishers Boston/Dordrecht/London. transient stability of power systems a Unified Approach to Assessment and Control.
- [27]. P. Kundur, “Power System Security in the New Industry Environment: Challenges and Solutions”, IEEE Toronto Centennial Forum on Reliable Power Grids in Canada, October 3, 2003.
- [28]. Vasirani, M., Ossowski, S.: Smart Consumer Load Balancing-State of the Art and an Empirical Evaluation in the Spanish Electricity Market. To appear in: Artificial Intelligence Review. Springer Verlag (2003).
- [29]. Borenstein, S., M. Jaske and A. Rosenfeld. (2002). “Dynamic Pricing, Advanced Metering and Demand Response in Electricity Markets,” Center for the Study of Energy Markets Working Paper, University of California at Berkeley, October.
- [30]. Katz, J.S., 2004, Educating the smart grid, IEEE transaction on energy 2004, Atlanta, GA USA, 17-18 November.
- [31]. Belkacemi, R., Feliachi, A., An Immune System Approach for Power System Automation and Self-Healing, 2004 IEEE.
- [32]. Aixin, G., The Application of Self-healing Technology in smart grid. 2004 IEEE
- [33]. Amin, M., Challenges in Reliability, Security, Efficiency, and Resilience of Energy Infrastructure: Toward Smart Self-healing Electric Power Grid, 2004 IEEE. [10] Ganek, A.G., Corbi, T.A., The dawning of the autonomic computing era, IBM Systems Journal 48(1) 2003(9-18).
- [34]. Aixin, G., “The Application of Self-healing Technology in smart grid”. 2004 IEEE.

- [30]. Dilan Supun Jayaweera. "Value of Security Assessment – Extensions and Applications". Ph.D dissertation, University of Manchester Institute of Science and Technology. Department of Electrical Engineering & Electronics. 2003.
- [31]. Noorpi N. Sabrina, "Security Enhancement of Power Systems with Smart Grid Implementation", 2012 1st International Conference on Future Trends in Computing and Communication Technologies.
- [32]. E. Ela, M. Milligan, and B. Kirby, "Operating Reserves and Variable Generation," NREL/TP-5500-51928, August 2011.
- [33]. Cheung, K. W.; Wang, X.; Chiu, B. -C.; Xiao, Y. & Rios-Zalapa, R. (2010). Generation Dispatch in a Smart Grid Environment, Proceedings of 2010 IEEE/PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT 2010).
- [34]. www.emeter.com/customers/iou/westar/---
- [35]. H. Farhangi, "The Path of the Smart Grid", IEEE Power & Energy Magazine, January/February 2010, vol. 8, No. 1, pp. 1828.
- [36]. L. Wu, M. Shahidehpour, and T. Li, "Stochastic security-constrained unit commitment," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 2, pp. 800-811, May 2007.
- [37]. P. A. Ruiz, C. R. Philbrick, E. Zak, K. W. Cheung, and P. W. Sauer, "Uncertainty management in the unit commitment problem," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 2, pp. 642-651, May 2009.
- [38]. U. S. Department of Energy, "Benefits of Demand Response in electricity markets and Recommendations for achieving them" section 1202 of the report, "Energy policy Act of 2005", February 2006
- [39]. Cheung, K. W.; Wang, X.; Chiu, B. -C.; Xiao, Y. & Rios-Zalapa, R. (2010). Generation Dispatch in a Smart Grid Environment, Proceedings of 2010 IEEE/PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT 2010).
- [40]. Wood, A. J. & Wollenberg, B. F. (1996). Power Generation, Operation, and Control, second edition, John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [41]. Chow, J. H.; deMello, R. & Cheung, K. W. (2005). Electricity Market Design: An Integrated Approach to Reliability Assurance. (Invited paper), IEEE Proceeding (Special Issue on Power Technology & Policy: Forty Years after the 1960 Blackout), vol. 93, pp. 1956-1969, Nov. 2005.
- [42]. Ma, X.-W.; Sun, D. & Cheung, K. W. (1999). Energy and Reserve Dispatch in a Multi-Zone Electricity Market, IEEE Transaction of Power Systems, vol. 14, pp. 912-919, Aug. 1999.
- [43]. Schweppe, F. C.; Caramanis, M. C.; Tabors, R. D. & Robn, R. E. (1998). Spot Pricing of Electricity, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [44]. J. Wellingshoff, K. Kelly, D. Kathan, and J. Simler, "Demand response: A transformative force in wholesale electric markets," in Proc. Amer. Council Energy-Efficient Economy Summer Study Energy Efficiency Buildings, Pacific Grove, CA, USA, Aug. 2010. [Online]. Available: <http://eec.ucdavis.edu/ACEEE/2010/data/papers/2090.pdf>
- [45]. B. Hoang. "Smart Power Grids - Talking about a Revolution". Originally published on the IEEE Emerging Technology portal, 2006—2012. Available on-line at: <http://www.ieee.org/go/emergingtech>
- [46]. CIRED, Dispersed Generation; Preliminary Report of CIRED (International

- Conference on Electricity Distribution), Working Group WG.4, Brussels, Belgium, June 1999.
- [52]. ACKERMANN, T., ANDERSSON, G., and SÖDER, L., (2001), Distributed generation: a definition, *Electric Power Systems Research*, vol. 57, p. 190-204.
- [53]. Hogan, W. Cullen, C. Schmidt, J. Governance Structures for an Independent System Operator (ISO). Harvard Electricity Policy Group.
- [54]. T.E. DyLiacco, "System Security: The Computer's Role," *IEEE Spectrum*, pp. 43-50, 1978.
- [55]. Rios-Zalapa, R.; Wang, X.; Wan, J. & Cheung, K. W. (2010). Robust Dispatch to Manage Uncertainty in Real Time Electricity Markets, Proceedings of 2010 IEEE/PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT 2010).
- [56]. CHAPTER II. DISTRIBUTION SYSTEM POWER FLOW AND DG
- [57]. H. K. Youssef, M. El-Shibini, and G. A. W. Hazza, "Power system security with the consideration of economic dispatch," presented at the Mediterranean Electrotechnical Conference - MELECON, Antalya, Turkey, pp. 889-892, 1994.
- [58]. H. K. Youssef, M. El-Shibini, and G. A. W. Hazza, "Power system security with the consideration of economic dispatch," presented at the Mediterranean Electrotechnical Conference - MELECON, Antalya, Turkey, pp. 889-892, 1994.
- [59]. Cheung, K. W.; Wang, X. & Sun, D. (2009). Smart Dispatch of Generation Resources for Restructured Power Systems, Proceedings of the IET International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management.
- [60]. Rios-Zalapa, R.; Wang, X.; Wan, J. & Cheung, K. W. (2010). Robust Dispatch to Manage Uncertainty in Real Time Electricity Markets, Proceedings of 2010 IEEE/PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT 2010).
- [61]. K.W. Cheung, R. Rios-Zalapa, Smart dispatch for large grid operations with integrated renewable resources, in: IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference, Anaheim, USA, Jan. 17-19, 2011, pp. 1-7.
- [62]. Yorino, N. Sasaki, Y. ; Hristov, E.P. ; Zoka, Y. ; Okumoto, Y. "Dynamic Load Dispatch for Power System Robust Security Against Uncertainties". IEEE Trans. IREP Symposium-Bulk Power System Dynamics and Control. Sys. 2012.
- [63]. Wood, A. J. & Wollenberg, B. F. (1996). Power Generation, Operation, and Control, second edition, John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [64]. Chow, J. H.; deMello, R. & Cheung, K. W. (2000). Electricity Market Design: An Integrated Approach to Reliability Assurance. (Invited paper), *IEEE Proceeding (Special Issue on Power Technology & Policy: Forty Years after the 1970 Blackout)*, vol. 93, pp. 1906-1919, Nov. 2000.
- [65]. Ma, X.-W.; Sun, D. & Cheung, K. W. (1999). Energy and Reserve Dispatch in a Multi-Zone Electricity Market, *IEEE Transaction of Power Systems*, vol. 14, pp. 913-919, Aug. 1999.
- [66]. Schweppe, F. C.; Caramanis, M. C.; Tabors, R. D. & Robn, R. E. (1998). Spot Pricing of Electricity, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [67]. S. H. Bae, R. Yokoyama, T. Morita, H. Sasaki, "Multiobjective optimal generation dispatch based on probability security criteria," in *IEEE PICA Conf. Proc.* (Montreal, Canada, May 18-22, 1987), pp. 414-421.
- [68]. E.A. Al-Ammar, and M.A. El-Kady, "Framework for Identification of Power System Operating Security Regions," *IEEE International Conference on Network and System*

- Security (NSS), pp. 410-419, 2009.
- [79]. T. E. DyLiacco, "System security: the computer's role," IEEE Spectrum, pp. 43-50, Jun. 1978.
- [80]. M. H. Banakar and F. D. Galiana, "Power System Security Corridors Concept and Computation," IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-100, No. 11, pp. 4524-4532, Nov. 1981.
- [81]. B. Stott and J. L. Marinho, "Linear Programming for Power System Network Security Applications," IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-98, No. 3, pp. 437-444, May/June. 1979.
- [82]. G. Hug-Glanzmann and G. Andersson, "N-1 Security in Optimal Power Flow Control Applied to Limited Areas," IET Gener., Transm. Distrib., Vol. 3, No. 2, pp. 206-210, Feb. 2009.
- [83]. G. D. Irisarri and A. M. Sasson, "An Automatic Contingency Selection Method for On-line Security Analysis," IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-100, No. 4, pp. 1838-1844, Apr. 1981.
- [84]. N. Yorino, E. E. El-Araby, H. Sasaki, and S. Harada, "A New Formulation for FACTS Allocation for Security Enhancement against Voltage Collapse," IEEE Trans. on Power Syst., Vol. 18, No. 1, pp. 3-10, Feb. 2003.
- [85]. H. Sun, D. C. Yu, and Y. Xie, "Flexible Steady-state Security Region of Power System with Uncertain Load Demand and Soft Security Limits," Proc. of IEEE PES Summer Meeting, Vol. 4, pp. 2008-2012, Jul. 2000.
- [86]. M. Power, "Stochastic power system operation," Research Repository UCD, <http://hdl.handle.net/10197/3208>, 2010.
- [87]. N. Yorino, Y. Zoka, Y. Sasaki, K. Maruyama, N. Hiromitsu, Y. Onishi, and A. Sudo, "Static and Dynamic Feasible Operation Regions for Maintaining Security in Future Power System" Proc. of IEEJ Annual Meeting, No. 6-006, pp. 11-12, Mar. 2009 (in Japanese).
- [88]. N. Yorino, Y. Sasaki, S. Fujita, Y. Okumoto, and Y. Zoka, "Issues for Power System Operation for Future Renewable Energy Penetration: Robust Power System Security," Electrical Engineering in Japan, Vol. 182, No. 1, pp. 30-38, Jan. 2013. Translated from IEEJ Trans. on Power and Energy, Vol. 131, No. 8, pp. 770-776, Aug. 2011.
- [89]. T. E. DyLiacco, "System Security: The Computer's Role," IEEE Spectrum, pp. 43-50, 1978.
- [90]. A. Tamaki, S. Yamada, N. Yorino, Y. Sasaki, and Y. Zoka, "Development of Power Supply and Demand Control Manager Dynamic Economic Load Dispatch by means of Stochastic Load Flow," IEEJ Joint Technical Meeting on Power Engineering and Power Systems Engineering, No. PE-12-08/PSE-12-100, pp. 1-6, Aug. 2012 (in Japanese).
- [91]. Southern California Edison Smart Grid Strategy & Roadmap Online available, at: http://asset.sce.com/Documents/Environment/Smart/SmartGrid/100712_SCE_SmartGridStrategyandRoadmap.pdf.
- [92]. Definition and example about fish-bone Online available, at: <http://fumblog.um.ac.ir/fumindex.php?blogId=461>
- [93]. D. Lee, J. Kim, and R. Baldick. "Ramp Rates Control of Wind Power Output Using a Storage System and Gaussian Processes," September 2012. www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2012/10/1110-Duehee-Lee.pdf
- [94]. Ravinder Singh Maan, Om Prakash Mahela, Mukesh Gupta, "Solution of Economic

Load Dispatch Problems with Improved Computational Performance using Particle Swarm Optimization", International Journal of Engineering Science Invention ISSN (Online): 2319 – 7734, ISSN (Print): 2319 – 7726.

- [⁸⁰]. Gheorghe, A.V., Masera, M., Weijnen, M., DeVries, L.J. "Critical Infrastructures at Risk: Securing the European Electric Power System". Series: Topics in Safety, Risk, Reliability and Quality, Vol. 9.
- [⁸¹].Jonathan Stahlhut, Becky A. Westendorf,Gerald B. Sheblé," Uncertain Power Flows and Transmission Planning". Final Project Report.Power Systems Engineering Research Center. University of Illinois at Urbana-Champaign. 2007

Abstract- The rapid growth in demand and expanding the use of renewable energy sources in the power system; the security issue has become one of the major challenges in this industry. With the growing use of renewable energy sources in the electricity industry, the challenges are even more pronounced. The main focus of this system is to provide timely and efficient use of electricity is needed, because the use of these resources increases in output leads to an accurate estimation uncertainty. So, the power system not able to respond for electricity on time and economic.

In recent years, smart grid technology is used to solve the existing problems in power system. The structure of the network is based on using of information and communication technologies (ICT) and two-way communication to better engage consumers and producers helps. It also improves the quality of service and on time response.

In this thesis, a method is provided for improving the robust dynamic security (RDS) in reveal of increasing uncertainty from sources of renewable energy(RE)and the formulation of dynamic economic load dispatch(DELD) in confidence interval(we are discussed). This method of load supply is make safe operation of the power system.

Keywords- uncertainty, smart grid, information and communication technologiesand two-way communication, security, robust dynamic security, dynamic economic load dispatch.



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical and Robotic

Impact of Smart Grid on Power System Security

Mahmoud Salimi

Supervisor:

Dr. Ali Akbar Pouyan