

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی کنترل

کنترل فرکانس ریز شبکه با استفاده از کنترل پیش بین

نگارنده: سمیرا کاظمی

استاد راهنما
دکتر محمد حدادظریف

شهریور ۱۳۹۷

شماره: ۱۵۸۲، ۰۷۰۱
تاریخ: ۹۷/۲/۴

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صور تجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای سمیرا کاظمی با شماره دانشجویی

۹۳۱۳۸۵۴ رشته مهندسی برق گرایش کنترل تحت عنوان: کنترل فرکانس ریزشیکه ها با استفاده از کنترل

پیش بین که در تاریخ ۱۳۹۷/۰۶/۰۴ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به

شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز ۱۷/۵۱۳ درجه خوب) مردود
نوع تحقیق: نظری عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	محمدرضا زارعی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	—	—	—
۳- استاد مشاور	—	—	—
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	محمد علی صدرنیا	دانشیار	
۵- استاد ممتحن اول	علیرضا الفی	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	محمد حسینی	استادیار	



نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

محمد ابراهیم...

مهر دانشکده:

توضیح: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید بود) (و دتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به پدر و مادرم

تعهدنامه

اینجانب سمیرا کاظمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق-کنترل دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کنترل فرکانس ریزشبهه با استفاده از کنترل پیش‌بین تحت راهنمایی دکتر محمد حدادظریف متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر 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 می‌باشد 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 تاثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- 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.

تاریخ

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

چکیده

در این پایان نامه، کنترل فرکانس ریزش شبکه مطالعه می شود. از آنجا که ریزش شبکه ها از عناصر مختلف تولیدات پراکنده مانند توربین های بادی، سیستم های فتوولتائیک و منابع ذخیره کننده انرژی تشکیل شده اند و این منابع دائماً تحت تاثیر اغتشاشات ناخواسته قرار دارند، پایداری فرکانسی در ریزش شبکه ها جزء مهم ترین مسائل و چالش ها در کنترل این سیستم ها محسوب می شود. در این مطالعه، به منظور کنترل فرکانس از کنترل پیش بین استفاده می شود. یکی از مهم ترین چالش های پیاده سازی الگوریتم های مورد استفاده در کنترل کننده های پیش بین پیچیدگی و حجم محاسبات است. با توجه به اینکه در کنترل پیش بین، سیگنال کنترل از حل برخط یک مسئله بهینه سازی ریاضی به دست می آید، کاهش زمان مورد نیاز به منظور حل این مسئله بهینه سازی بسیار مورد اهمیت است. در این پژوهش، با استفاده از نظریه دوگانگی لاگرانژ، الگوریتم مجموعه فعال به منظور حل مسئله برنامه ریزی درجه دو- که به وفور در کنترل پیش بین مدل خطی استفاده می شود- مورد بازبینی و بهبود قرار گیرد. همچنین از الگوریتم گرادیان تصویر شده برای کاهش زمان حل مسئله بهینه سازی استفاده می شود. تحلیل نتایج نشان می دهد که کنترل کننده پیش بین پیشنهادی در مقایسه با کنترل کننده های کلاسیک، فرکانس را سریع تر کنترل می کند.

واژگان کلیدی: ریزش شبکه، کنترل کننده پیش بین مدل خطی، الگوریتم مجموعه فعال دوگان، الگوریتم گرادیان تصویر شده، کنترل فرکانس، منابع تولید پراکنده.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

1- Samira Kazemi, Mohammad Hadad-Zarfi. " Frequency Control of Voltage Source Inverter-Based Microgrids Using a New Model Predictive Control", Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation, Azarbaijan 2018, vol.6, pp.298-303.

۲- سمیرا کاظمی، محمد حدادظریف، " کاهش پیچیدگی محاسباتی در کنترل پیش‌بین مدل خطی با استفاده از الگوریتم مجموعه فعال دوگان"، کنفرانس بین‌المللی پژوهش در علوم و مهندسی در هزاره سوم، تهران ۱۳۹۶، دوره ۳، صفحه ۳۷۸-۳۸۸.

فهرست مطالب

فصل ۱ کلیات.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- تولید پراکنده.....	۳
۳-۱- مفهوم ریزشبه.....	۵
۴-۱- بیان مسئله.....	۱۱
۵-۱- ضرورت انجام پژوهش.....	۱۳
۶-۱- هدفها و کاربردهای پژوهش.....	۱۳
۷-۱- سازمان دهی پایان نامه.....	۱۴
فصل ۲: مطالعات پیشین.....	۱۵
۱-۲- مقدمه.....	۱۷
۲-۲- مروری بر پژوهش‌های پیشین.....	۱۷
۳-۲- مروری بر مفاهیم بهینه‌سازی.....	۲۱
فصل ۳: روش کنترلی و روش‌های بهینه‌سازی.....	۳۱
۱-۳- مقدمه.....	۳۲
۲-۳- کنترل پیش‌بین مدل خطی.....	۳۳
۳-۳- بهینه‌سازی محدب.....	۳۶
۴-۳- الگوریتم مجموعه فعال دوگان.....	۳۹
۵-۳- الگوریتم گرادیان تصویرشده.....	۴۴
فصل ۴ نتایج شبیه‌سازی.....	۴۹
۱-۴- مقدمه.....	۵۰
۲-۴- سیستم توپ و صفحه.....	۵۰
۳-۴- شبیه‌سازی مربوط به کنترل فرکانس ریزشبه.....	۵۳
فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....	۸۳

۱-۵- نتیجه‌گیری ۸۴

۲-۵- پیشنهادها برای مطالعات آتی ۸۵

مراجع ۸۶

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: شمای کلی یک ریزشبكة نمونه ۶
- شکل ۱-۲: شمای کلی بهینه‌سازی ۲۲
- شکل ۱-۳: نمای کلی کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل ۳۳
- شکل ۲-۳: راهکار کنترل پیش‌بین ۳۴
- شکل ۱-۴: دیاگرام فاز با استفاده از quadprog ۵۱
- شکل ۲-۴: دیاگرام فاز با استفاده از الگوریتم مجموعه فعال دوگان ۵۱
- شکل ۳-۴: سیگنال کنترل تولید شده توسط الگوریتم مجموعه فعال دوگان به ازای افق‌های پیش‌بین متفاوت ۵۲
- شکل ۴-۴: مقایسه زمان مصرفی الگوریتم مجموعه فعال دوگان و الگوریتم نقطه ۵۳
- شکل ۵-۴: توپولوژی ریزشبكة مورد مطالعه ۵۴
- شکل ۶-۴: مدل خطی ریزشبكة مورد مطالعه ۵۴
- شکل ۷-۴: تغییرات بار اعمال شده به ریزشبكة ۶۳
- شکل ۸-۴: تغییرات فرکانس در حضور تغییرات بار ۶۴
- شکل ۹-۴: تغییرات سیگنال کنترلی در حضور تغییرات بار ۶۵
- شکل ۱۰-۴: مقدار تابع هزینه کنترل‌کننده در حضور تغییرات بار ۶۵
- شکل ۱۱-۴: مدت زمان صرف شده برای حل مسئله بهینه‌سازی کنترل‌کننده MPC در حضور تغییرات بار ۶۶
- شکل ۱۲-۴: نحوه تغییرات توان باد ۶۷
- شکل ۱۳-۴: نحوه تغییرات فرکانس در حضور تغییرات توان باد ۶۸
- شکل ۱۴-۴: تغییرات سیگنال کنترل در حضور تغییرات توان باد ۶۸
- شکل ۱۵-۴: مقدار تابع هزینه کنترل‌کننده در حضور تغییرات توان باد ۶۹
- شکل ۱۶-۴: مدت زمان صرف شده برای حل مسئله بهینه‌سازی کنترل‌کننده MPC در حضور تغییرات توان باد ۶۹
- شکل ۱۷-۴: نحوه تغییرات توان باد ۷۱
- شکل ۱۸-۴: تغییرات فرکانس در حضور تغییرات بار و توان باد ۷۱
- شکل ۱۹-۴: تغییرات سیگنال کنترل در حضور تغییرات بار و توان باد ۷۲
- شکل ۲۰-۴: مقدار تابع هزینه کنترل‌کننده در حضور تغییرات بار و توان باد ۷۲
- شکل ۲۱-۴: مدت زمان صرف شده برای حل مسئله بهینه‌سازی کنترل‌کننده MPC در حضور تغییرات بار و توان باد ۷۳

- شکل ۴-۲۲: کنترل فرکانس به وسیله سه کنترل کننده مدل پیش‌بین، PID و LQR..... ۷۴
- شکل ۴-۲۳: تغییرات بار ۷۵
- شکل ۴-۲۴: نمودار تغییرات فرکانس در حضور تغییرات بار در هر چهار روش ۷۵
- شکل ۴-۲۵: سیگنال کنترلی در حضور تغییرات بار برای هر چهار روش ۷۶
- شکل ۴-۲۶: نمودار سرعت پاسخگویی به مسئله در حضور تغییرات بار برای هر چهار روش ۷۶
- شکل ۴-۲۷: تغییرات توان باد ۷۷
- شکل ۴-۲۸: نمودار سرعت پاسخگویی به مسئله در حضور تغییرات توان باد برای هر چهار روش ۷۸
- شکل ۴-۲۹: سیگنال کنترلی در حضور تغییرات توان باد برای هر چهار روش ۷۸
- شکل ۴-۳۰: نمودار تغییرات فرکانس در حضور تغییرات توان باد در هر چهار روش ۷۹
- شکل ۴-۳۱: سیگنال کنترلی در حضور تغییرات بار و توان باد برای هر چهار روش ۸۰
- شکل ۴-۳۲: مقایسه خروجی کنترل شده در حضور تغییرات بار و توان باد در هر چهار روش ۸۰
- شکل ۴-۳۳: نمودار مقایسه سرعت پاسخگویی در حضور تغییرات بار و توان باد در هر چهار روش ۸۱

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲: مقایسه بین روش‌های ریاضی و ابتکاری برای حل مسائل مربوط به ریزش شبکه‌ها..... ۲۹
- جدول ۱-۴: پارامترهای سیستم ۵۶
- جدول ۲-۴: میانگین تابع هزینه به ازای تغییرات مختلف بار برای هر سه روش بهینه‌سازی..... ۶۶
- جدول ۳-۴: تغییرات در میانگین مقدار تابع هزینه به ازای میزان مختلف تغییرات باد ۷۰

کلیات

محدودیت‌های مربوط به تولید توان الکتریکی توسط ژنراتورهای با سوخت فسیلی و مشکلات مربوط به خطوط انتقال، تمایل به تولید توان در نزدیکی مصرف‌کننده و در سطح ولتاژ توزیع را افزایش داده است. نگرانی‌های ناشی از کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، افزایش دمای کره زمین و مشکلات زیست‌محیطی، استفاده از منابع تولید پراکنده^۱ مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر^۲ را زمینه تحقیق و پژوهش بسیاری از محققان گردانیده است. در سیستم‌های انرژی جدید مبتنی بر این تحقیقات، به دلیل نزدیک‌تر شدن منابع انرژی به مصرف‌کننده، تلفات توان مصرفی کاهش قابل توجه داشته است. از طرف دیگر، تولید پراکنده انرژی سبب قابلیت اطمینان^۳ بیشتر و کاهش ضررهای ناشی از قطع ناگهانی برق می‌شود [۱].

قوانین و مقررات وضع شده بر تولید گازهای گلخانه‌ای، بازسازی صنایع تولید برق و پیشرفت‌های اخیر در تولید انرژی مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم‌های تولید انرژی را وارد عرصه جدیدی کرده است. در این عرصه جدید، بیشتر انرژی مورد نیاز توسط منابع انرژی پراکنده تولید می‌گردد. منابع مورد استفاده به‌عنوان تولید پراکنده شامل انرژی باد، سلول‌های فتوولتائیک خورشیدی، پیل‌های سوختی، سیستم‌های تولید هم‌زمان انرژی و گرما، میکروتوربین‌ها و ترکیبی از آن‌ها هستند. در صورت بهره‌گیری از منابع تولید پراکنده، شبکه‌های توزیع سنتی به شبکه‌های توزیع فعال تبدیل می‌شوند و تغییراتی در نحوه بهره‌برداری از این شبکه‌ها ایجاد می‌شود [۲]. جهت افزایش کارایی منابع تولید پراکنده تعدادی از این منابع با یکدیگر موازی می‌شوند. به شبکه‌ای که از بهم پیوستن تعدادی از منابع تولید پراکنده تشکیل می‌شود اصطلاحاً ریزشبکه^۴ گفته می‌شود. در اواخر دهه‌ی ۱۹۹۰، انجمن بین‌المللی شبکه‌های بزرگ الکتریکی و کنفرانس بین‌المللی شبکه‌های توزیع، نحوه بهره‌برداری

^۱ Distributed Generation

^۲ Renewable Energies

^۳ Reliability

^۴ Microgrid

از منابع تولید پراکنده را مورد بررسی قرار دادند. بر این اساس منابع تولید پراکنده بر حسب نحوه اتصال آنها به ریزشبكة به دو گروه تقسیم می‌شوند. گروه اول شامل واحدهای چرخان هم‌چون توربین‌های گازی و موتورهای احتراقی هستند که از طریق ژنراتورهای سنکرون به ریزشبكة متصل می‌شوند. گروه دوم شامل واحدهایی چون توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی هستند که بر پایه انرژی‌های تجدیدپذیر کار می‌کنند. این واحدها از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه متصل می‌شوند [۳]. از مشخصه اصلی این واحدها می‌توان به وابسته بودن توان تولیدی آنها به شرایط محیطی اشاره کرد. اکثر منابع تولید توان موجود در ریزشبكة‌ها از این نوع بوده و توسط سیستم‌های الکترونیک قدرت به شبکه متصل می‌شوند، در نتیجه فاقد اینرسی هستند. کنترل و بهره‌برداری از منابع تولید در شرایط مختلف کاری یکی از مهم‌ترین مشکلات ریزشبكة‌ها تلقی می‌شود. در این پایان‌نامه تمرکز در خصوص نحوه کنترل ریزشبكة‌ها در حالت جزیره‌ای است. در این فصل کلیاتی در خصوص پژوهش انجام‌شده شامل تعریف مسئله و ضرورت انجام پژوهش و همچنین ساختار کلی پایان‌نامه ارائه شده است.

۱-۲- تولید پراکنده

۱-۲-۱- مفهوم تولید پراکنده

در اواخر دهه ۱۹۹۰، مسائل عمده مرتبط با تولید پراکنده به‌طور گسترده مورد مطالعه و بررسی گروه‌های مختلفی از محققین قرار گرفت. هر واحد منبع انرژی پراکنده^۱ از یک واحد تولید پراکنده، یک واحد ذخیره‌سازی^۲ و یک فن‌آوری مدیریت سمت تقاضا^۳ تشکیل یافته است. برخی از ویژگی‌های عمومی تولیدات پراکنده عبارتند [۴]:

- معمولاً دارای توانی کمتر از ۵۰ مگاوات هستند.

^۱ Distributed Energy Resource

^۲ Distributed Storage

^۳ Demand Side Management

- متصل به سیستم توزیع بوده و به‌طور معمول با ولتاژی بین ۲۳۰/۴۱۵ ولت تا ۱۴۵ کیلوولت فعالیت می‌کنند.
- عوامل فنی، زیست‌محیطی و اقتصادی متعددی منجر به پیشرفت تدریجی و کاربرد بیشتر منابع تولید پراکنده نسبت به شبکه‌های سراسری مرسوم شده‌اند. برخی از این عوامل عبارتند از [۵]:
- در سال‌های اخیر، روند رو به رشد مصرف انرژی سیستم‌های متداول تولید توان را وادار به استخراج بیش از پیش ذخایر سوخت‌های فسیلی کرده است. بدین سبب بسیاری از کشورهای جهان به فکر استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به‌جای منابع سوخت فسیلی افتاده‌اند.
- کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و گرمایش کره زمین عامل اصلی استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به‌جای سوخت‌های فسیلی بوده است. مطابق با عهدنامه کیوتو، اتحادیه‌ی اروپا، انگلستان و بسیاری از کشورهای جهان اقدام به کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای به‌منظور جلوگیری از گرمایش کره زمین و تغییرات نامطلوب آب‌وهوایی کرده‌اند. در نتیجه، آنها به دنبال دستیابی به سیاست‌های جدیدی در زمینه استفاده صحیح از این منابع انرژی هستند. پیش‌بینی شده است که استفاده از این منابع تولید پراکنده اثر مطلوبی بر تولید توان سازگار با محیط‌زیست دربر خواهد داشت.
- کاربرد سیستم‌های تولید پراکنده امکان استفاده از گرمای تلف شده را در بخش‌های صنعتی، تجاری و خانگی فراهم می‌کند. نتیجه این کار صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش آلودگی‌های حرارتی از محیط‌زیست خواهد بود.
- قابلیت نصب در نزدیکی بار از دیگر ویژگی‌های منابع تولید پراکنده است، که این ویژگی از نظر فنی و اقتصادی نتایج بسیار باارزشی به‌دنبال خواهد داشت. از جمله این نتایج می‌توان به

کاهش هزینه‌های انتقال حرارت مورد نیاز بارهای حرارتی، کاهش هزینه‌های مربوط به استقرار این منابع و کاهش تلفات انتقال، توزیع و هزینه احداث خطوط انتقال اشاره کرد.

کاربرد منابع تولید پراکنده در هر دو حالت متصل به شبکه^۱ و جزیره‌ای^۲ منجر به بهبود کیفیت توان و قابلیت اطمینان می‌گردد. علاوه بر آن، پتانسیل اتصال به شبکه توزیع، زمینه استفاده گسترده از این منابع را فراهم می‌آورد.

۱-۲-۲- اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه

به دلیل غیرقابل پیش‌بینی بودن رفتار منابع تولید پراکنده از جمله توربین‌های بادی، سلول‌های خورشیدی و پیل‌های سوختی، فرکانس و توان تولید شده توسط این منابع متغیر بوده و قابلیت اتصال مستقیم به شبکه برق را نخواهند داشت. از این رو، برای اتصال این منابع به شبکه برق نیاز به مبدل‌های الکترونیک قدرت با قابلیت تبدیل ولتاژ DC یا AC فرکانس متغیر به ولتاژ AC مطلوب خواهد بود. یک مبدل الکترونیک قدرت می‌تواند جهت کنترل توان اکتیو و راکتیو، نسبت به تغییرات سریع بار پاسخ داده، و کنترل ولتاژ و فرکانس سریع و قابل انعطافی فراهم آورد.

با این وجود، استفاده از واحدهای تولید پراکنده، منجر به پیچیده شدن ساختار و بروز چالش‌هایی در بهره‌برداری، کنترل، پایداری، حفاظت و امنیت شبکه‌های توزیع قدرت می‌گردد. از این رو، استراتژی‌های جدیدی جهت اتصال این منابع به شبکه قدرت ارائه شده است. مطابق با این استانداردها، هر زمان خطایی در شبکه برق رخ دهد، واحدهای تولید پراکنده از شبکه اصلی جدا شده و به صورت جزیره‌ای عمل می‌کنند. با این حال، به منظور دستیابی به قابلیت اطمینان و کیفیت توان مطلوب نیاز به بازنگری این استانداردها می‌باشد [۶].

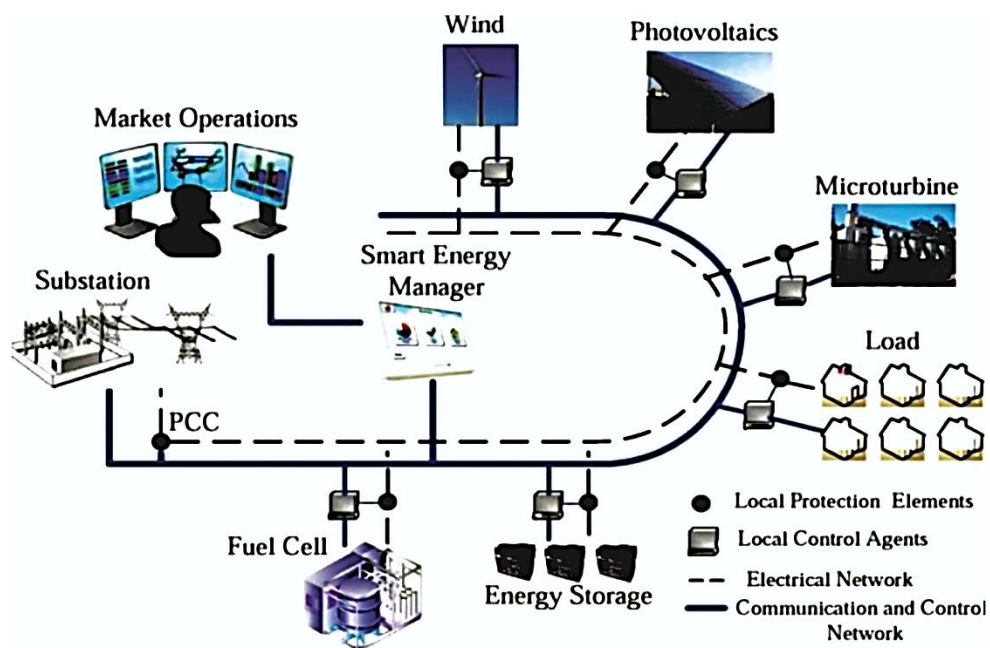
۱-۳- مفهوم ریزشبکه

^۱ Grid-connected Mode

^۲ Islanded Mode

ریزشبکه‌ها، شبکه‌هایی با مقیاس کوچک هستند که در سطح ولتاژ فشار ضعیف با استفاده از تکنولوژی ترکیبی گرما و توان، برای تأمین بارهای گرمایی و الکتریکی طراحی شده‌اند. منابع کوچک از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه متصل می‌گردند و انعطاف لازم برای اطمینان از بهره‌برداری کلی سیستم را فراهم می‌کنند و کیفیت توان انرژی خروجی را حفظ می‌کنند. قابلیت انعطاف ریزشبکه این امکان را فراهم می‌کند که برای سیستم قدرت اصلی، خود به صورت یک واحد کنترل شده که نیازمند امنیت و قابلیت اطمینان است، عمل نماید [۷].

امروزه شبکه‌های قدرت از شبکه‌های توزیع غیر فعال پایدار با شارش یک طرفه توان الکتریکی، به شبکه‌های توزیع فعال با شارش دو طرفه توان الکتریکی تبدیل شده‌اند. در شبکه‌های غیرفعال، پخش توان به صورت یک طرفه و از سمت شبکه انتقال به سمت توزیع است، در صورتی که حضور منابع تولید پراکنده باعث دو طرفه شدن پخش توان در شبکه‌های توزیع شده است. استفاده از ریزشبکه در کشورهای در حال توسعه مستلزم تحقق زیربنای مورد نیاز در شبکه‌های قدرت است. ریزشبکه در اصل یک شبکه توزیع فعال است چرا که از سیستم‌های تولید پراکنده با بارهای متفاوت در سطوح ولتاژ توزیع تشکیل شده است.



شکل ۱-۱: شمای کلی یک ریزشبه نمونه.

۱-۳-۱ مسائل مدیریتی و بهره‌برداری در ریزشبه‌ها

مهم‌ترین مسائل مربوط به مدیریت و بهره‌برداری در ریزشبه‌ها عبارتند از:

۱. به‌منظور حفظ کیفیت توان، باید تعادل توان‌های اکتیو و راکتیو در ریزشبه حفظ شود.
۲. ریزشبه‌ها باید در مواقعی که شبکه اصلی در دسترس نیست به‌صورت جزیره‌ای و در غیر این حالت به‌صورت متصل به شبکه بهره‌برداری شوند. بهره‌بردار ریزشبه باید با توجه به شرایط موجود، حالت کاری مناسب را برای ریزشبه انتخاب نماید.
۳. تولید، انتقال و ذخیره‌سازی انرژی باید با توجه به تقاضای بار ریزشبه و تعادل بلند مدت انرژی صورت گیرد.
۴. بهره‌برداری اقتصادی باید بر اساس زمان‌بندی تولید، توزیع اقتصادی بار و پخش توان بهینه تضمین شود.
۵. امنیت شبکه باید در شرایط اضطراری (مانند مدیریت تقاضا، قطع بار، جزیره‌ای شدن یا از دست رفتن هر واحد) حفظ شود [۵].

۱-۳-۲ نوع ارتباط بین ریزشبه و شبکه توزیع

عموماً برای افزایش امنیت و انعطاف‌پذیری، ریزشبه باید به شبکه بالادست یا در صورت امکان به یک ریزشبه همجوار متصل گردد. تبادل توان می‌تواند با شبکه بالادست به‌صورت یک طرفه یا دوطرفه از شبکه بالادست به ریزشبه و برعکس باشد. این ارتباط می‌تواند یک ارتباط سنکرون AC باشد که مزیت آن سادگی آن است. به این ترتیب که فقط نیاز به کلید قطع‌کننده و احتمالاً یک ترانسفورماتور دارد. مشکلی که در این حالت پیش می‌آید اتصال مجدد به شبکه و سنکرون شدن با آن در صورت قطع ریزشبه از شبکه اصلی است [۸].

هر ریزشبه می تواند در سه حالت مختلف بهره برداری، عمل نماید:

(۱) وضعیت متصل به شبکه

(۲) وضعیت جدا از شبکه (جزیره ای)

(۳) وضعیت گذار بین حالت وصل و جدا از شبکه

۱-۳-۲-۱ - وضعیت متصل به شبکه

در این وضعیت، فرکانس توسط شبکه اصلی مشخص می شود و واحدهای تولید انرژی در فرکانس ثابتی (برابر با فرکانس شبکه) با شبکه اصلی سنکرون می شود. تقاضای توان اکتیو کل بار ریزشبه، توسط شبکه اصلی و تمام واحدهای تولید انرژی صورت می پذیرد. سهم تولید توان هر کدام از واحدهای تولید انرژی بر اساس مسائل اقتصادی تعیین می شود. لذا در این حالت تغییرات بار توسط شبکه اصلی جبران می شود. نیازمندی های پروفیل ولتاژ و توان راکتیو کل بار ریزشبه توسط شبکه اصلی، واحدهای تولید انرژی و منابع توان راکتیو دیگر (بانک های خازنی) تامین می شود. از دید دینامیکی، خروجی های توان راکتیو واحدهای انرژی بر اساس محدودیت های پروفیل ولتاژ تعیین می شود.

۱-۳-۲-۲ - وضعیت جدا از شبکه

در وضعیت جدا از شبکه، فرکانس ریزشبه توسط مبدل های الکترونیک قدرت تعیین می شود. بعد از جدا شدن از شبکه، فرکانس ریزشبه به شرایط تعادل توان وابسته است. به عنوان مثال، اگر میزان کل تولید توان منابع قبل از جزیره شدن کمتر (بیشتر) از میزان بار ریزشبه باشد، ریزشبه با کاهش (افزایش) در فرکانس همراه خواهد بود. کل تقاضای توان اکتیو بار در حالت جدا از شبکه توسط واحدهای تولید انرژی فراهم می شود. در این میان با توجه به اینکه واحدهایی که به کمک مبدل های الکترونیک قدرت به ریزشبه متصل می شوند، نسبت به دیگر واحدها سرعت پاسخ دهی بیشتری به تغییرات بار دارند در موقع بارگذاری بار، از اهمیت بالاتری برخوردار هستند.

کل تقاضای توان راکتیو بار و نیازمندی‌های پروفیل ولتاژ توسط واحدهای تولید انرژی و منابع توان راکتیو مانند بانک‌های خازنی تامین می‌شود. از آنجا که واحدهای متصل به ریزشبكة از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت قابلیت گسترده و سریع‌تری به توان خروجی و پروفیل ولتاژ دارند، جهت کنترل دینامیکی توان راکتیو ریزشبكة گزینه اول خواهند بود.

۱-۳-۲-۳- وضعیت گذار بین حالت وصل و جدا از شبکه

بر اساس استراتژی‌های کنترلی توان اکتیو و راکتیو قبل و بعد از حالت گذار، ممکن است که از یک مجموعه کنترل‌کننده به مجموعه‌ای دیگر تغییر وضعیت دهد و یا تغییری در پارامترهای کنترل‌کننده به وجود آید [۸].

۱-۳-۳- تفاوت‌های ریزشبكة با شبکه های سنتی

تفاوت‌های اساسی بین منابع توان یک ریزشبكة و منابع توان شبکه‌های الکتریکی مرسوم را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۹]:

- ظرفیت منابع توان ریزشبكة بسیار کمتر از ژنراتورهای بزرگ نیروگاه‌های شبکه مرسوم است.
- توان تولیدی در سطح ولتاژ توزیع را می‌توان به صورت مستقیم به شبکه توزیع متصل کرد.
- منابع توان ریزشبكة معمولاً در نزدیکی مصرف‌کننده‌ها نصب می‌شود، تا بدین وسیله بارهای حرارتی و الکتریکی، با بازده بالاتر و پروفیل ولتاژ مناسب‌تر و همچنین تلفات کمتری تغذیه شوند.
- واحدهای ذخیره‌ساز انرژی به صورت کوتاه‌مدت یا بلندمدت، نقش مهمی را در کنترل و عملکرد ریزشبكة بازی می‌کنند. در حالی که در سیستم‌های سنتی واحدهای ذخیره‌سازی چنین نقش اساسی را نداشتند.
- به دلایل اقتصادی بخش قابل توجهی از توان ریزشبكة از طریق منابع غیرقابل کنترل مثل باد تأمین می‌شود. در حالی که در سیستم‌های سنتی تنها بخشی از توان از چنین منابعی تأمین می‌شد و در صورت از دست رفتن این منابع تعادل توان سریعاً توسط نیروگاه‌های آبی و یا بخاری ایجاد می‌شود.
- مشخصات دینامیکی و حالت دائمی واحدهای تولید پراکنده با واحدهای توربین ژنراتور سنتی تفاوت دارند.

- ریزش شبکه‌ها به دلیل وجود بار یا واحدهای تولید پراکنده تک‌فاز به‌طور ذاتی بیشتر با موضوع عدم تعادل درگیر هستند.
- به دلایل اقتصادی یک ریزش شبکه باید قابلیت قطع و وصل بار و واحدهای تولید پراکنده را به دفعات در حین بهره‌برداری دارا باشد.
- یک ریزش شبکه ممکن است ملزم به تأمین توان با کیفیتی خاص و یا ارائه سرویس‌های ویژه به برخی از بارها باشد.
- علاوه بر انرژی الکتریکی برخی از ریزش شبکه‌ها وظیفه تأمین تمام یا قسمتی از بارهای حرارتی را نیز دارند.

این خصوصیات فنی ریزش شبکه‌ها آنها را برای تغذیه بارهایی که در مناطق دوردست قرار دارند مناسب می‌سازد، زیرا تغذیه این بارها توسط شبکه سراسری به دلیل مشکلاتی از قبیل شرایط بد جغرافیایی و شرایط سخت آب‌وهوایی مشکل است. از نقطه نظر شبکه، مهم‌ترین مزیت ریزش شبکه آن است که می‌تواند به‌عنوان یک سیستم کنترل شده در شبکه‌ی توزیع و به‌صورت مجموعه‌ای از بارهای مجزا عمل کند. از نقطه نظر زیست‌محیطی استفاده از ریزش شبکه‌ها آلودگی محیط‌زیست و گرمای سراسری^۱ را کاهش می‌دهد.

۱-۳-۴- کنترل ریزش شبکه

در سیستم‌های قدرت سنتی منابع تولید توان ژنراتورهای سنکرون هستند که کنترل ولتاژ و فرکانس شبکه را نیز به عهده دارند. واحدهای تولیدی بر حسب میزان شیب افقی تعریف شده برای هر یک از آنها در کنترل ولتاژ و فرکانس شبکه شرکت می‌کنند. اما در یک ریزش شبکه اکثر منابع تولید توان از نوع منابع تولید پراکنده است. ولتاژ و فرکانس خروجی این نوع منابع با مقادیر استاندارد تعریف شده برای اتصال به شبکه سراسری سازگار نبوده و برای اتصال این نوع منابع به سیستم‌های قدرت از مبدل‌های الکترونیک قدرت استفاده می‌کنند. کنترل عناصر الکترونیک قدرت برای کارکرد صحیح شبکه از اهمیت بسزایی برخوردار است.

عملکرد و مدیریت ریزش شبکه در حالت‌های مختلف از طریق کنترل‌کننده‌های مرکزی و

^۱ Global Warming

کنترل‌کننده‌های منابع کوچک هماهنگ می‌شود که عملکرد آنها در ادامه بیان شده است.

(۱) کنترل‌کننده‌های منابع کوچک: عملکرد اصلی کنترل‌کننده‌های منبع کوچک، کنترل مستقل سهم توان و پروفیل ولتاژ نقطه بار منابع کوچک، در پاسخ به هر اغتشاش و تغییرات بار است. ویژگی‌های کنترل‌کننده‌های منابع کوچک عبارتند از هماهنگی با منابع ذخیره‌کننده انرژی به‌منظور مدیریت سمت تقاضا و عدم تقابل مستقل با کنترل‌کننده‌های منبع کوچک دیگر در ریزشبكة.

(۲) کنترل‌کننده‌ی مرکزی: این کنترل‌کننده‌ها کنترل کلی عملکرد ریزشبكة و حفاظت از طریق کنترل‌کننده‌های منبع کوچک را اجرا می‌کند. اهداف آن شامل کنترل ولتاژ و فرکانس در پایانه بار و اطمینان از انرژی بهینه ریزشبكة است. عملکرد اصلی کنترل‌کننده‌های مرکزی شامل واحد مدیریت انرژی و واحد هماهنگی حفاظت هستند.

۱-۴ - بیان مسئله

یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی طراحان و سازندگان ریزشبكة‌ها مسئله کنترل آنها است. این نگرانی و چالش، در جایی که منابع تولید پراکنده با یکدیگر موازی می‌شوند و یا به شبکه برق اتصال پیدا می‌کنند بیشتر می‌شود. در حالت جزیره‌ای مهم‌ترین دغدغه، کنترل ولتاژ و فرکانس ریزشبكة است، زیرا هیچ عامل خارجی که بتواند ولتاژ و فرکانس را در مقدار مطلوب نگه دارد وجود ندارد. بنابراین منابع تولید پراکنده موظف به انجام این کار هستند. در بعضی ریزشبكة‌ها یکی از منابع تولید پراکنده به‌عنوان مرجع تنظیم ولتاژ و فرکانس ریزشبكة در نظر گرفته می‌شود و بقیه منابع از این منبع تولید پراکنده تبعیت می‌کنند ولی این روش زمانی قابل انجام است که منبع تولید پراکنده مرجع، از قدرت تولید بالایی برخوردار باشد و بتواند مانند یک شبکه بی‌نهایت عمل کند.

روش دیگر این است که هر منبع به‌طور مستقل ولتاژ و فرکانس خود را تنظیم کند و در نهایت ولتاژ و فرکانس ریزشبكة تنظیم شود. روش‌های متعددی جهت کنترل ریزشبكة‌ها وجود دارد. در اکثر این روش‌ها از تجهیزات الکترونیک قدرت استفاده شده است. بنابراین عناصر الکترونیک قدرت نقش

حیاتی در منابع تولید پراکنده دارند و روش‌هایی که در کنترل این عناصر استفاده می‌شود در کنترل ریزشبه‌ها نیز کاربرد دارند.

هدف اصلی در کنترل ریزشبه ردیابی مطلوب ولتاژ و فرکانس و همچنین دستیابی به یک استراتژی تقسیم دقیق توان میان واحدهای تولید پراکنده می‌باشد. در متون سه روش کلی برای رسیدن به اهداف کنترلی فوق پیشنهاد شده است که این سه روش عبارتند از [۱۰، ۱۱]:

الف) کنترل متمرکز: در این نگرش، ریزشبه دارای یک کنترل‌کننده مرکزی بوده و به‌منظور کنترل ریزشبه تمام اطلاعات شبکه به این کنترل‌کننده مرکزی فرستاده می‌شود. برای مثال اگر در حالت جزیره‌ای افزایش باری رخ دهد، کنترل‌کننده مرکزی با توجه به اطلاعات دریافتی از منابع، این افزایش بار را میان آن‌ها تقسیم می‌نماید. علی‌رغم مناسب بودن عملکرد کنترل متمرکز در نگاه اول، این روش در عمل دارای مشکلات جدی می‌باشد. برای ارسال داده‌ها به کنترل‌کننده متمرکز، نیازمند لینک مخابراتی هستیم که یا کاملاً غیرعملی بوده (در مناطق روستایی به دلیل فاصله زیاد میان منابع) و یا در شرایط پیاده‌سازی قابلیت اطمینان سیستم را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. در واقع عملکرد نادرست لینک مخابراتی و یا نبود آن منجر به شکست سیستم می‌گردد. از طرف دیگر، در این روش جهت اضافه کردن یا حذف کردن یک منبع تولید پراکنده در سیستم ریزشبه نیاز به طراحی کنترل‌کننده جدید و یا ایجاد تغییرات اساسی در کنترل‌کننده پیشین می‌باشد.

ب) باس اصلی^۱: در این ساختار، از یک منبع تولید پراکنده بزرگ کنترل‌شده جهت تنظیم ولتاژ و فرکانس ریزشبه و تقسیم توان میان منابع تولید پراکنده در حالت گذرا و ماندگار استفاده می‌شود. این منبع تولید پراکنده بزرگ می‌بایست کاملاً قابل کنترل بوده و به اندازه کافی ذخیره انرژی داشته باشد. هزینه بالای این منبع و وابستگی بیش از حد کل سیستم ریزشبه به آن باعث کاهش قابلیت اطمینان سیستم و در نتیجه کاربردی نبودن این روش گردیده است.

^۱ Master bus

پ) کنترل غیرمتمرکز^۱: در این نگرش، نقش هر یک از واحدهای تولید پراکنده همانند سایر واحدها بوده و هیچ کدام از آنها نقش اصلی تری نسبت به دیگران ندارد. در کنترل غیرمتمرکز ریزشبکه به دلیل نبودن یک کنترل کننده مرکزی و یا لینک مخابراتی، قابلیت اطمینان بیشتری حاصل می شود. از طرف دیگر، کنترل غیرمتمرکز بیشترین استقلال در عملکرد را برای هر یک از منابع تولید پراکنده فراهم می آورد. در این روش هر یک از منابع تولید پراکنده کنترل کننده خود را داشته و تنها بر اساس اندازه گیری های محلی فعالیت می کند. در نتیجه دیگر نیازی به لینک مخابراتی، کنترل کننده مرکزی و یا یک ذخیره کننده مرکزی که در دو روش قبل بسیار حیاتی بودند، نمی باشد. این بدین مفهوم است که نبود هر یک از منابع یا اجزا مانع از عملکرد سیستم ریزشبکه نمی شود. در این حالت بدون نیاز به طراحی مجدد کنترل کننده، می توان یک منبع تولید پراکنده به سیستم اضافه یا از آن کم کرد.

۱-۵ - ضرورت انجام پژوهش

ریزشبکه در دو حالت منفصل از شبکه سراسری و متصل به شبکه عمل می کند. در حالت متصل به شبکه سراسری ولتاژ و فرکانس ریزشبکه از شبکه اصلی تأمین می شود، در واقع در این حالت ریزشبکه فقط در تأمین بارهای مشترک مشارکت می نماید و حفظ پایداری و کنترل پارامترهای سیستم توسط شبکه اصلی صورت می گیرد. اما در حالت منفصل از شبکه، ریزشبکه علاوه بر تأمین بارهای محلی، مسئول حفظ و پایداری فرکانس نیز خواهد بود. از این رو کنترل فرکانس ریزشبکه ها در حالت منفصل از شبکه سراسری بسیار مشکل تر از حالت متصل به شبکه سراسری است. عدم قطعیت های مانند تغییرات توان باد، میزان تابش آفتاب و همچنین پایین بودن اینرسی منابع تولید پراکنده، وابستگی شدید دینامیک ریزشبکه به تغییرات بارهای مصرف کننده، از مشکلات کنترلی ریزشبکه ها هستند، و همچنین از آنجا که در منابع تولید پراکنده از اینورتر منبع ولتاژ برای تبدیل ولتاژ DC به AC با یک دامنه و فرکانس خاص استفاده می شود، کنترل ریزشبکه مشکل شده است. در طراحی

^۱ Decentralize

ریزشبکه، توجه به تنظیم فرکانس برای تثبیت پایداری و قابلیت اطمینان محلی امری ضروری است و به همین دلیل عدم وجود ساختاری کارا موجب نوسانات فرکانس، توان اکتیو سیستم می‌شود.

۱-۶- هدف‌ها و کاربردهای پژوهش

سیستم‌های قدرت مدرن به‌منظور اطمینان از قابلیت حفظ تعادل میان تولید و مصرف در صورت بروز اغتشاش، نیازمند ارتقای کنترل‌کننده‌ها و انعطاف‌پذیری سیستم هستند. این امر، با روند رو به رشد ورود ریزشبکه‌ها به سیستم قدرت شکل جدیدی به خود گرفته است. به‌طوری که کنترل‌کننده‌های کلاسیک سیستم قدرت عملکرد مناسبی را ارائه نمی‌دهند. در چنین شرایطی ارائه رویکردی به‌منظور کنترل فرکانس ریزشبکه اهمیت می‌یابد. در پاسخ به چنین چالش‌هایی در عملکرد ریزشبکه، در این مطالعه با هدف کنترل فرکانس مدل‌سازی دینامیکی از سیستم ارائه می‌گردد. سپس به‌منظور تضمین پایداری فرکانس سیستم پس از بروز اغتشاش عدم تعادل تولید و مصرف، رویکرد کنترلی بر مبنای بهینه‌سازی محدب پیشنهاد می‌گردد. به‌منظور بررسی صحت نتایج، پس از شبیه‌سازی سیستم در مواجهه با تغییرات بار و سرعت باد، طراحی کنترل‌کننده کلاسیک (PID) و کنترل مدل پیش‌بین (MPC) نیز به‌منظور تایید نتایج رویکرد کنترلی پیشنهادی، ارائه می‌شوند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی کارایی مناسبی در ارتباط با کنترل فرکانس ریزشبکه‌ها را ارائه می‌دهد.

۱-۷- سازمان‌دهی پایان‌نامه

در این پایان‌نامه فصل دوم مروری بر کارهای انجام شده بر روی ریزشبکه‌ها و بررسی روش‌های کنترلی ارائه شده، انجام گرفته است. در فصل سوم طراحی کنترل پیش‌بین و الگوریتم‌های بهینه‌سازی ارائه شده است. استفاده از روش‌های کنترلی پیشنهادی به همراه شبیه‌سازی مدارات مربوطه در فصل چهارم آورده شده است. همچنین روش پیشنهادی با روش‌های کنترلی کلاسیک PI و LQR در فصل چهارم مقایسه شده است. در نهایت نتیجه‌گیری کلی از مطالعه حاضر و همچنین پیشنهاداتی در

ارتباط با انجام مطالعات تکمیلی در آینده ارائه گردیده است.

مطالعات پیشین

۲-۱- مقدمه

از مهم‌ترین عناصر موجود در یک ریزشبکه می‌توان به منابع تولید، منابع ذخیره‌ساز انرژی، بارهای قابل کنترل و سیستم‌های کنترلی موجود در آن اشاره کرد. کشورهای مختلف برای تعریف منابع تولید پراکنده، از تعاریف مختلف از جمله تولیدات جایابی‌شده، تولیدات پراکنده یا تولیدات غیر متمرکز استفاده می‌کنند. علاوه بر این، وجود تعاریف متفاوت ارائه شده توسط سازمان‌های مختلف (IEEE و CIGRE) ممکن است سبب ابهام گردد. بنابراین در این پژوهش، از تعریف زیر استفاده شده است [۱۲]. تولیدات پراکنده به‌عنوان یک منبع الکتریکی متصل به سیستم قدرت، در یک نقطه بسیار نزدیک به مصرف‌کننده یا در سمت مصرف‌کننده، که در مقایسه با نیروگاه‌های متمرکز به اندازه کافی کوچک هستند، در نظر گرفته شده است.

۲-۲- مروری بر پژوهش‌های پیشین

۲-۲-۱- مفهوم ریزشبکه و کنترل فرکانس ریزشبکه

مفاهیم اولیه ریزشبکه در اواخر سال ۲۰۰۰ به‌عنوان راهی برای مجتمع‌سازی منابع پراکنده و با بهره‌وری بالاتری نسبت به نیروگاه‌های معمولی مطرح گردید. پس از آن تحقیقات قابل توجهی در زمینه ریزشبکه‌ها در سطح امریکا، اروپا و آسیا با پیاده‌سازی طرح‌های آزمایشی انجام شد. یکی از نمونه‌های عملی اولیه ریزشبکه در آوریل سال ۲۰۰۱ در جزیره یونانی کیتنوس^{۱۳} با شبکه‌ای از سلول‌های خورشیدی، دیزل ژنراتور، باتری و با بهره‌برداری مستقل از شبکه اصلی اجرا شد که نقش مهمی در شکل‌گیری پروژه‌های ریزشبکه در اروپا داشت [۱۳].

پس از آن مفهوم دقیق‌تری از ریزشبکه ارائه گردید، به این صورت که ریزشبکه را به‌صورت مجموعه‌ای از بارها، منابع تولید پراکنده و تجهیزات ذخیره‌کننده معرفی نمود که می‌توانند به‌صورت یک بار قابل کنترل یا ژنراتور عمل کرده و توان و گرما را برای ناحیه محلی فراهم نمایند. از دیگر

^{۱۳} Kythnos

پروژه‌های مهم آزمایشی می‌توان به ریزشبه سرتس^{۱۴} اشاره کرد که دارای قابلیت جدا شدن از شبکه و تغذیه تا زمان اتصال مجدد به شبکه اصلی بود و می‌توانست این قابلیت را برای مکان‌های کوچک بدون نیاز به کنترل‌کننده‌های سریع و گران فراهم نماید [۱۴]. طی سال‌های بعد، چندین ساختار از مدل ریزشبه ارائه شد که دارای میزان توان تولیدی و ساختارهای متفاوتی نیز بودند. در مدل‌های اولیه ارائه شده ساختار پایه، مباحث کنترلی، حفاظت و مدیریت انرژی ریزشبه مطرح شده است. بکارگیری زیرساخت‌های ارتباطی بین انواع مختلفی از منابع انرژی جهت مدیریت و بهره‌برداری ریزشبه با هدف حداقل‌سازی مصرف سوخت، تأمین تقاضای انرژی محلی و توان ذخیره مشخص مطرح شده که پایه مطالعاتی بسیاری از مقالات بعدی گردید.

در یک ریزشبه جزیره‌ای که در آن واحدهای تولید پراکنده به صورت موازی به یکدیگر متصل شده‌اند، به منظور جلوگیری از اضافه بار شدن هر منبع و عملکرد پایدار ریزشبه، منابع تولید پراکنده می‌بایست به گونه‌ای کنترل شوند تا تمامی بار مورد نیاز شبکه را براساس توان نامی خود تأمین نمایند. علاوه بر آن، واحدهای تولید پراکنده مسئولیت کنترل ولتاژ و فرکانس را نیز بر عهده دارند. به بیان دیگر، مدیریت مناسب توان اکتیو و راکتیو خروجی، منجر به تقسیم صحیح توان و عدم خروج ولتاژ و فرکانس شبکه از محدوده مجاز می‌گردد [۱۰].

به دلیل عدم هماهنگی با شبکه قدرت، ثابت زمانی ریزشبه‌های مستقل نسبتاً کوچک است که این موضوع موجب دشوار شدن کنترل فرکانس ریزشبه می‌شود. به عبارت دقیق‌تر، مصرف در ریزشبه توسط تبادل توان با شبکه اصلی به دست می‌آید. اما در حالت جدا از شبکه از آن جایی که منابع مورد استفاده در ریزشبه نظیر دیزل ژنراتورها پاسخ زمانی کندی دارند و همچنین منابع تجدیدپذیر دارای تولید تناوبی هستند، در صورت قطع ریزشبه از شبکه اصلی و یا تغییر بار در حالت ایزوله، قادر به تأمین سریع توان بالانس ریزشبه نبوده، در نتیجه ولتاژ و فرکانس دچار نوسان می‌شوند

^{۱۴} CERTS: Consortium for Electric Reliability Technology Solutions

و ممکن است ریزشبه از دست برود [۱۵]. به همین دلیل، به منظور کمینه کردن تغییرات فرکانس، واحد کنترل باید سریعاً عدم تعادل بین منابع تغذیه و میزان تقاضا را جبران نماید.

در مطالعات اولیه صورت گرفته در کنترل ریزشبه‌ها، محققین با استفاده از مشخصه‌های دروپ^{۱۵} براساس روش‌های مرسوم دروپ در سیستم‌های قدرت، یک سیستم کنترلی ارائه کردند. این روش با استفاده از ولتاژ و فرکانس ریزشبه، امکان تقسیم بار میان واحدهای تولید پراکنده را بدون نیاز به لینک‌های مخابراتی فراهم می‌سازد. به این ترتیب جهت مدیریت توان اکتیو خروجی به‌منظور حفظ فرکانس، از منحنی دروپ فرکانس براساس توان اکتیو استفاده می‌شود. به‌طور مشابه، براساس منحنی دروپ ولتاژ و توان راکتیو، ولتاژ با استفاده از مدیریت توان راکتیو خروجی کنترل می‌شود.

یکی از مشخصه‌های اساسی سیستم کنترل فرکانس، مسئله پایداری است. به‌عبارت دیگر، سیگنال کنترل طراحی شده به‌منظور اعمال به ریزشبه، می‌بایست سیستم ریزشبه را به‌صورت حلقه-بسته پایدار نماید. تاکنون روش‌های متفاوتی به‌منظور دستیابی به تغییرات فرکانسی بسیار کوچک در مقالات معرفی شده است. در [۱۶]، به‌منظور ثابت نگاه داشتن فرکانس ریزشبه، از کنترل‌کننده PI مبتنی بر منطق فازی استفاده شده است. [۱۷] با استفاده از الگوریتم هوشمند بهینه‌سازی ذرات به تنظیم ضرائب کنترل‌کننده PI پرداخته است. از مزایای این روش می‌توان به سادگی در طراحی و پیاده‌سازی آسان آن اشاره نمود. با این وجود، کنترل‌کننده‌های PI نمی‌توانند پایداری حلقه-بسته سیستم را تضمین کنند.

تجزیه و تحلیل کامل مقادیر ویژه ریزشبه نشان می‌دهد که مقادیر ویژه غالب توسط کنترل‌کننده دروپ بوجود می‌آیند [۱۸]. با این حال، برای کنترل‌کننده دروپ نیاز به اندازه‌گیری توان اکتیو و راکتیو است که توسط اینورترها در نرخ نمونه‌برداری کم اندازه‌گیری می‌شوند. در [۱۹] چگونگی کاهش پایداری حاشیه‌ای سیستم با افزایش بهره کنترل‌کننده دروپ ارائه شده، اما در نهایت

^{۱۵} Droop Characteristics

سیستم برای مقادیر بزرگ بهره دروپ توان اکتیو و فرکانس، ناپایدار می‌شود. هدف از این مطالعات، تعیین محدوده ضریب دروپ به‌منظور پایداری سیستم بدون در نظر گرفتن مسائل حفاظت است. در واقع، پاسخ گذرا و حالت پایدار کنترل‌کننده دروپ در این مقالات مهم نبوده و تمرکز اصلی محققان بر پایداری سیستم است.

کنترل‌کننده پیش‌بین مدل یک استراتژی کنترلی است که در آن، سیگنال کنترل در زمان حال، توسط حل برخط (در هر زمان نمونه‌برداری) یک مسئله کنترل بهینه حلقه‌باز افق محدود به‌دست می‌آید. حل این مسئله که در آن از متغیرهای حالت سیستم در زمان حال به‌عنوان شرط اولیه مسئله استفاده می‌شود، به تولید یک دنباله کنترلی منجر می‌شود که بر اساس استراتژی افق کاهنده^{۱۶}، فقط اولین عنصر این دنباله (سیگنال کنترل در زمان حال) به سیستم اعمال می‌شود [۲۰].

مهم‌ترین محدودیت کنترل‌کننده پیش‌بین، پیچیدگی محاسباتی آن است. دلیل این امر این است که در این روش، در هر زمان نمونه‌برداری، یک مسئله بهینه‌سازی ریاضی حل می‌شود. در نتیجه بیشترین زمانی که برای حل این مسئله بهینه‌سازی وجود دارد برابر با طول بازه زمان نمونه‌برداری است. با توجه به این‌که بیشترین زمان مورد نیاز جهت تولید سیگنال کنترل در حل مسئله بهینه‌سازی ریاضی مصرف می‌شود، نیاز است که با توسعه و یا بهبود الگوریتم‌های بهینه‌سازی ریاضی از این پیچیدگی کاسته شود [۲۱]. علاوه بر موارد فوق، الگوریتم باید دارای حجم محاسبات نسبتاً کم بوده و حتی‌الامکان از عملیات‌های پیچیده ریاضی در آن استفاده نشود.

در بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه مدل سیستم دینامیکی به‌صورت خطی تغییرناپذیر با زمان و همچنین قیده‌های مسئله به‌صورت خطی در نظر گرفته شده است. دلیل این امر این است که با استفاده از این مدل، مسئله بهینه‌سازی ریاضی از نوع برنامه‌ریزی مربعی خواهد بود.

کاهش پیچیدگی محاسباتی کنترل‌کننده پیش‌بین در قالب کاهش حجم محاسبات در مسئله

^{۱۶} Receding horizon

بهینه‌سازی برنامه‌ریزی درجه دو از مسائل روز کنترل بوده و تاکنون مقالات مختلفی در این زمینه به ارائه راهکارهایی جهت بهبود عملکرد کنترل‌کننده پیش‌بین پرداخته‌اند. [۲۲] به ارائه روشی مبتنی بر حداقل مربعات نامنفی جهت حل مسئله برنامه‌ریزی درجه دو با پیچیدگی کمتر پرداخته است. در [۲۱, ۲۳] الگوریتم گرادیان تصویری به‌منظور حل مسئله برنامه‌ریزی درجه دو با پیچیدگی کمتر مورد بهبود واقع شده است. الگوریتم نقطه داخلی در [۲۴] و الگوریتم مجموعه فعال در [۲۵-۲۷] مورد بازبینی و بهبود واقع شده‌اند. روش برون خط کنترل پیش‌بین صریح در [۱۲, ۲۸] معرفی شده است. در این مراجع با استفاده از برنامه‌ریزی چند پارامتری [۲۹] از حل مسئله برنامه‌ریزی درجه دو به‌صورت برخط اجتناب شده و این مسئله برای تمامی زمان‌ها به‌صورت برون خط حل می‌گردد.

با توجه به این‌که تقریباً تمامی سیستم‌های فیزیکی دارای محدودیت‌هایی بر روی متغیرهای حالت، ورودی و خروجی هستند، سیگنال کنترل طراحی شده برای سیستم علاوه بر تضمین پایداری حلقه-بسته، باید از قیود فیزیکی تحمیل شده به سیستم نیز تجاوز نکند.

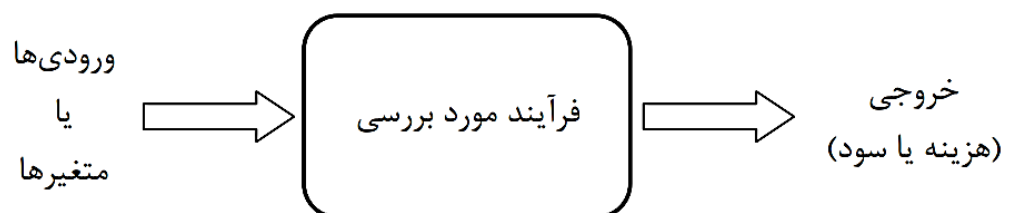
با توجه به چالش‌های بیان شده، در این پژوهش برای برطرف کردن محدودیت‌ها و حل مسئله کنترل فرکانس در ریزشبه، از کنترل‌کننده پیش‌بین مدل پایدارساز استفاده شده است. با استفاده از یک تابع هزینه و یک مجموعه نهایی حول نقطه تعادل سیستم ریزشبه، تضمین پایداری حلقه-بسته سیستم در حضور محدودیت‌های عملکردی سیستم انجام می‌پذیرد. از مهم‌ترین مزایای استفاده از این روش می‌توان به مقاوم بودن بیشتر سیستم نسبت به کنترل‌کننده‌های PI و خانواده آن و همچنین تضمین پایداری حلقه-بسته در حضور محدودیت‌های عملکردی نام برد. علاوه بر این، در مقایسه با کنترل‌کننده PI، برتری‌های کنترل‌کننده پیشنهادی مانند زمان نشست کوچک، فراجهد کم و همچنین کارایی مطلوب در سیستم ریزشبه نشان داده خواهد شد. همچنین به‌منظور کاهش پیچیدگی محاسباتی در کنترل‌کننده پیش‌بین و حل مسئله برنامه‌ریزی درجه دو، از الگوریتم مجموعه فعال مبتنی بر نظریه دوگانی لاگرانژ [۳۰, ۳۱] استفاده شده است. از مهم‌ترین ویژگی‌های

این روش جاسازی قیود مسئله در تابع لاگرانژ مسئله بهینه‌سازی است. از این جهت تنها قید موجود در مسئله بهینه‌سازی قید نامنفی بودن ضرایب لاگرانژ است.

۲-۳- مروری بر مفاهیم بهینه‌سازی

بهینه‌سازی ابزاری ریاضی است که برای یافتن پاسخ بسیاری از پرسش‌ها در خصوص چگونگی راه‌حل مسائل مختلف به کار می‌رود. هدف از بهینه‌سازی یافتن بهترین جواب قابل قبول، با توجه به محدودیت‌ها و نیازهای مسئله است. مسائل بهینه‌سازی جزء مباحث مهم و کلیدی در رشته‌های مهندسی به شمار می‌روند به طوری که امروزه بهینه‌سازی به جزء جدایی‌ناپذیر علوم مهندسی تبدیل شده است. در علوم مهندسی مسائل بسیاری وجود دارد که در آن هدف، کمینه کردن یا بیشینه کردن هدف یا اهدافی خاص است. مسائل بهینه‌سازی به مسائلی گفته می‌شود که یافتن بهترین پاسخ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

لفظ بهترین به طور ضمنی بیان می‌کند که بیش از یک جواب برای مسئله مورد نظر وجود دارد که البته دارای ارزش یکسانی نیستند. تعریف بهترین جواب، به مسئله مورد بررسی، روش حل و همچنین میزان خطای مجاز وابسته است. بنابراین نحوه فرمول‌بندی مسئله نیز بر چگونگی تعریف بهترین جواب تأثیر مستقیم دارد. بهینه‌سازی، تغییر دادن ورودی‌ها و خصوصیات یک دستگاه، فرآیند ریاضی و یا آزمایش تجربی است به نحوی که بهترین خروجی یا نتیجه به دست بیاید همان طوری که در شکل (۲-۱) نشان داده شده است.



خروجی نیز به صورت هزینه، سود و یا برآزندگی تعریف می‌شود. ورودی‌ها متغیرهای فرآیند یا تابع مورد بررسی هستند که به نام‌های تابع هدف، تابع هزینه و یا تابع برآزندگی نامیده می‌شود. برای یک مسئله، ممکن است جواب‌های مختلفی موجود باشد که برای مقایسه آنها و انتخاب جواب بهینه، تابعی به نام تابع هدف تعریف می‌شود. انتخاب این تابع به طبیعت مسئله وابسته است. به عنوان مثال، هزینه سوخت از جمله اهداف رایج بهینه‌سازی شبکه‌های قدرت است. به هر حال، انتخاب تابع هدف مناسب یکی از مهم‌ترین گام‌های بهینه‌سازی است. گاهی در بهینه‌سازی چند هدف به طور همزمان مد نظر قرار می‌گیرد؛ این گونه مسائل بهینه‌سازی را که دربرگیرنده چند تابع هدف هستند، مسائل چند هدفی می‌نامند. ساده‌ترین راه در برخورد با این گونه مسائل، تشکیل یک تابع هدف جدید به صورت ترکیب خطی توابع هدف اصلی است که در این ترکیب میزان اثرگذاری هر تابع با وزن اختصاص یافته به آن مشخص می‌شود. هر مسئله بهینه‌سازی دارای تعدادی متغیر مستقل است که آنها را متغیرهای طراحی می‌نامند. هدف از بهینه‌سازی تعیین متغیرهای طراحی است، به گونه‌ای که تابع هدف کمینه یا بیشینه شود.

می‌توان مسائل بهینه‌سازی را از دیدگاه‌های مختلف به دسته‌های متعددی تقسیم‌بندی کرد. نمونه‌ای از این تقسیم‌بندی‌ها در ادامه توضیح داده شده است.

بهینه‌سازی با سعی و خطا^{۱۷} و بهینه‌سازی روی تابع : سعی و خطا فرآیندی است که در آن متغیرهای ورودی تغییر داده می‌شوند و اطلاعات دقیق در خصوص نحوه تأثیر هر متغیر بر خروجی در دست نیست. به عنوان مثال نحوه تنظیم آنتن گیرنده تلویزیونی یک بهینه‌سازی با سعی و خطا است. حتی یک مهندس آنتن، تنها توانایی حدس زدن نحوه عملکرد آنتن در جهات مختلف را ندارد.

بهینه‌سازی تک‌بعدی و بهینه‌سازی چندبعدی : اگر فقط یک متغیر در مسئله بهینه‌سازی وجود

^{۱۷} Trial and error optimization

داشته باشد. بهینه‌سازی تک‌بعدی نامیده می‌شود. در مقابل مسائلی که دارای بیش از یک متغیر باشند، مسائل بهینه‌سازی چندبعدی خوانده می‌شوند.

بهینه‌سازی پویا^{۱۸} و بهینه‌سازی ایستا^{۱۹}: اگر تابع یا فرآیندی که مورد بهینه‌سازی واقع می‌شود، تابعی از زمان باشد و با گذشت زمان تغییر یابد، بهینه‌سازی را پویا می‌نامند. در مقابل بهینه‌سازی روی مسائلی که گذشت زمان تغییری روی آنها به وجود نمی‌آورد، بهینه‌سازی ایستا خوانده می‌شود.

بهینه‌سازی گسسته و بهینه‌سازی پیوسته: اگر ماهیت متغیرهای مسئله بهینه‌سازی پیوسته باشد، آن را پیوسته می‌نامند و در مقابل اگر مقادیری که متغیرهای مسئله اختیار می‌کنند، مقادیر محدود و شمارا باشند، مسئله را گسسته می‌نامند. یک نوع بسیار مهم از مسائل گسسته، مسائل جایگشت^{۲۰} هستند. هدف از حل این نوع از مسائل، انجام یک انتخاب از بین یک مجموعه از گزینه‌های قابل انتخاب است که ترتیب انتخاب نیز مهم است.

بهینه‌سازی مقید و بهینه‌سازی بدون قید: در برخی مسائل متغیرها نمی‌توانند هر مقداری را اختیار کنند و می‌بایست مقادیر متغیرها یک مجموعه از شرایط را برآورده کنند. این شرایط را قید و مسائل توأم با قید را مقید می‌نامند. هر مسئله که قیدی در آن وجود نداشته باشد، بدون قید خوانده می‌شود.

بهینه‌سازی کمینه‌جو^{۲۱} و بهینه‌سازی تصادفی^{۲۲}: برخی از روش‌ها از یک نقطه مشخص در فضای جستجو شروع می‌کنند و با استفاده از قوانینی که پایه در ریاضیات و هندسه دارند، جواب‌های بهتری به دست می‌آورند. این نوع الگوریتم‌ها سرعت بسیار بالایی در همگرایی دارند، اما به راحتی در کمینه‌ها یا بیشینه‌های محلی گرفتار می‌شوند. در این روش‌ها نحوه ایجاد جواب‌های بعدی از روی جواب‌های

^{۱۸} Dynamic optimization

^{۱۹} Static optimization

^{۲۰} Permutation Problems

^{۲۱} Minimum-seeking optimization

^{۲۲} Random optimization

فعلی، روندی مشخص و معلوم دارد. در مقابل روش‌های تصادفی، از الگوهای احتمالی برای ایجاد جواب‌های بهتر استفاده می‌کنند و به این ترتیب پیش‌بینی عملکرد الگوریتم ساده نیست. سرعت همگرایی این نوع از الگوریتم‌ها در مقایسه با الگوریتم‌های کمینه‌جو، کمتر است اما احتمال گرفتارشدن در نقاط بهینه محلی نیز کمتر می‌شود و امید بیشتری برای یافته شدن نقطه بهینه سراسری وجود دارد.

در یک مسئله بهینه‌سازی هدف یافتن مقدار متغیرهای تصمیم‌گیری به‌گونه‌ای است که تابع هدف به ازای آن‌ها دارای بیشترین یا کمترین مقدار است. در واقع در یک مسئله بهینه‌سازی در محدوده فضای جستجو نقاط بهینه محلی فراوانی وجود دارد. ولی یکی از این نقاط به‌عنوان پاسخ بهینه سراسری قابل قبول است. بنابراین هدف از حل مسئله بهینه‌سازی، ارائه روشی مدون جهت یافتن بهینه پاسخ با در نظر گرفتن قیود مساوی و نامساوی است. برای حل هر مسئله‌ای مانند مسئله بهینه‌سازی، باید در ابتدا یک مدل مناسب برای آن استخراج نمود. هرچقدر این مدل دقیق‌تر و در عین حال ساده‌تر باشد، حل مسئله راحت‌تر بوده و پاسخ‌های به‌دست آمده دقیق‌تر و بهینه خواهد بود. مدل ریاضی یک مسئله بهینه‌سازی دارای چهار مؤلفه اساسی بوده و این مؤلفه‌ها باید به‌خوبی مشخص شوند. این مؤلفه‌ها در ادامه توضیح داده می‌شوند [۳۲].

مؤلفه اول: مجموعه متغیرهای تصمیم‌گیری^{۲۳}

در واقع متغیرهای تصمیم‌گیری، همان x_i ها بوده که در نهایت بعد از حل مسئله بهینه‌سازی باید مقدار آن‌ها مشخص شود. متغیرهای تصمیم‌گیری در مسائل مختلف می‌تواند پارامترهای متفاوتی مانند توان خروجی نیروگاه‌ها، باشد.

مؤلفه دوم: تابع هدف^{۲۴} یا تابع معیار

^{۲۳} Decision Variable

^{۲۴} Cost Function

خروجی مسئله به‌ازای ورودی‌ها (همان متغیرهای تصمیم‌گیری)، تابع هدف بوده و هدف مسئله بهینه‌سازی مینیمم یا ماکزیمم کردن همین تابع هدف است.

مؤلفه سوم: قیود و محدودیت‌های مسئله^{۲۵}

در بحث بهینه‌سازی از قیود و محدودیت‌ها به‌عنوان تابع هدف اولیه^{۲۶} و یا تابع هدف اصلی^{۲۷} و از تابع هدف به‌عنوان تابع هدف ثانویه^{۲۸} نام برده می‌شود. یعنی برآورده شدن قیود از تابع هدف مهم‌تر بوده و جواب‌هایی به‌عنوان جواب بهینه قابل قبول هستند که در ابتدا محدودیت‌ها را رعایت کرده باشند. قیود یا محدودیت‌های یک مسئله بهینه‌سازی به دو دسته‌ی قیود تساوی و نامساوی تقسیم‌بندی می‌شود.

مؤلفه چهارم: دامنه‌ی تغییر متغیرهای تصمیم‌گیری یا همان فضای جستجو

در حل یک مسئله بهینه‌سازی، هدف یافتن مقدار بهینه تابع هدف در بازه خاصی از تغییرات متغیرهای تصمیم‌گیری است. در حقیقت دامنه تغییرات، میزان حداقل و حداکثر مجاز برای متغیرهای تصمیم‌گیری است. مدل ریاضی یک مسئله بهینه‌سازی به‌صورت (۱-۲) قابل بیان است:

^{۲۵} constraint

^{۲۶} Primary Objective Function

^{۲۷} Main Objective Function

^{۲۸} Secondary Objective Function

$$\begin{array}{l}
\min H(X) \\
X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad \text{A} \\
\left. \begin{array}{l}
g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \\
g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \\
\vdots \\
g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0
\end{array} \right\} \quad \text{B} \\
\text{subject to } \left. \begin{array}{l}
h_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\
h_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\
\vdots \\
h_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0
\end{array} \right\} \quad \text{C} \\
\left. \begin{array}{l}
x_1 \in D_1, \dots, D_l \\
x_2 \in D_1, \dots, D_l \\
\vdots \\
x_n \in D_1, \dots, D_l
\end{array} \right\} \quad \text{D}
\end{array} \quad (1-2)$$

در (۱-۲)، A تابع هدف، B قیود نامساوی و C مجموعه قیود مساوی است. همچنین D قیود دامنه‌ای بوده که دامنه مجاز تغییرات متغیرهای تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است اگر هدف یافتن ماکزیمم مقدار تابع معیار باشد، با تغییر تابع معیار می‌توان به این هدف رسید. در واقع به جای پیدا کردن مقدار ماکزیمم تابع H، مقدار مینیمم تابع -H محاسبه می‌شود.

همان‌گونه که بیان شد، هدف از حل مسئله بهینه‌سازی یافتن کمترین یا بیشترین مقدار تابع هدف با در نظر گرفتن قیود حاکم بر مسئله است. روش‌های حل مختلفی برای حل مسائل بهینه‌سازی ارائه شده است که می‌توان آن‌ها را به سه دسته: روش‌های ریاضی، روش‌های ابتکاری^{۲۹} و الگوریتم‌های فراابتکاری تقسیم نمود. در ادامه به معرفی این روش‌ها و کاربرد آن‌ها اشاره می‌شود.

^{۲۹} Heuristic Algorithms

۲-۳-۱- روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی

• روش‌های مبتنی بر ریاضیات

این روش‌ها عموماً بر مبنای مشتق و گرادیان تابع هدف استوار هستند. اگر تابع هدف به صورت نرده-ای^{۳۰} باشد از مشتق و اگر به صورت برداری باشد، از مفهوم گرادیان استفاده می‌شود. مشتق همان شیب تابع هدف بوده و حرکت در جهت شیب باعث افزایش تابع هدف و حرکت در خلاف جهت مشتق باعث کاهش تابع هدف می‌شود. با استفاده از این مفهوم اگر در خلاف جهت مشتق یا گرادیان تابع هدف حرکت کنیم، می‌توان مقدار کمینه تابع هدف را به دست آورد. روش‌های ریاضی به دلیل استفاده از روابط و فرمول‌های دقیق ریاضی بسیار قابل اعتماد بوده و جواب‌های به دست آمده از روش‌های ریاضی، جواب‌های مطلوب مسئله هستند. در واقع جوابی که از روش‌های ریاضی به دست می‌آید، بهترین جواب سراسری^{۳۱} مسئله است. از جمله روش‌های ریاضی عبارتند از: تابع همیلتون^{۳۲}، روش مرحله‌ای تکرار لامبدا^{۳۳}، روش گرادیان^{۳۴}، روش نیوتن^{۳۵}، روش نقطه بهینه^{۳۶}، عامل مشترک و غیره. روش‌های ریاضی ساده بوده و به راحتی قابل پیاده‌سازی هستند، اما این روش‌ها با مشکلاتی نیز روبرو هستند. از جمله مشکلات روش‌های ریاضی کارا نبودن این روش‌ها در مسائلی است که تابع هدف آنها مشتق پذیر نیست. لذا در مسائلی که تابع هدف مشتق ناپذیر یا دارای گسستگی باشد استفاده از روش‌های ریاضی پیشنهاد نمی‌شود.

• روش برنامه‌ریزی پویا^{۳۷} و الگوریتم‌های ابتکاری^{۳۸}

محققان برای غلبه بر مشکل مشتق‌پذیری در روش‌های ریاضی از روش‌های ابتکاری و روش‌هایی که

^{۳۰} Scalar

^{۳۱} Global Optimal Solution

^{۳۲} Hamiltonian Function

^{۳۳} Lambda Iteration Method

^{۳۴} Gradient Method

^{۳۵} Newton Method

^{۳۶} Optimal Point Method

^{۳۷} Dynamic Programming

^{۳۸} Heuristic Algorithms

بتوان به کمک آن‌ها همه حالات ممکن برای حل مسئله را در نظر گرفت، استفاده کرده‌اند. به روشی که همه حالات ممکن برای حل مسئله از روی یک چارچوب معین را در نظر می‌گیرد، برنامه‌ریزی پویا گفته می‌شود. لازم به ذکر است که به روش‌هایی که براساس تجربه توسط مهندسان برای حل مسئله ارائه می‌شود، روش‌های ابتکاری گفته می‌شود. در برنامه‌ریزی پویا که براساس اصل بهینگی بِلْمَن^{۳۹} است، با در نظر گرفتن تمامی حالات ممکن و با یک سیاست بهینه اقدام به یافتن پاسخ بهینه می‌شود. در حقیقت اصل بهینگی بِلْمَن بیان می‌دارد که برای رسیدن به پاسخ بهینه باید بدون توجه به تصمیمات قبلی و با توجه به هدف مورد نظر تصمیمات آتی به صورت بهینه گرفته شود. از مزایای این روش سادگی و قابل پیاده‌سازی بودن در سیستم‌های پیچیده است. اما در این روش با افزایش بُعد به صورت نمایی زمان محاسبات افزایش می‌یابد.

• الگوریتم‌های تکاملی^{۴۰} یا فراابتکاری^{۴۱}

استفاده از روش‌های فراابتکاری و الگوریتم‌های فراابتکاری به عنوان روشی جدید و بسیار قدرتمند در دهه‌ی اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. الگوریتم‌های فراابتکاری که عموماً از قوانین طبیعت به منظور یافتن پاسخ بهینه بهره می‌برند، به طور گسترده در حل مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در واقع با در نظر گرفتن این نکته که در طبیعت، موجودات زنده برای بقای نسل خود به بهترین شکل ممکن رفتار می‌کنند، ایده الگوریتم‌های فراابتکاری شکل گرفته است. عدم نیاز به مشتق‌گیری در این الگوریتم‌ها که به آن‌ها روش‌های عددی^{۴۲} نیز گفته می‌شود، مهم‌ترین ویژگی این الگوریتم‌ها است. در این الگوریتم‌ها با تشکیل یک جمعیت اولیه تصادفی و تغییر هوشمندانه این جمعیت در مراحل حل، پاسخ بهینه استخراج می‌شود. در حقیقت در این روش‌ها هر عضو، کاندیدی از پاسخ مسئله بوده و تابع هزینه به‌ازای آن عضو محاسبه شده و مقدار تابع هزینه، ملاک سنجش و

^{۳۹} Bellman's Optimality Principle

^{۴۰} Evolutionary Algorithms

^{۴۱} Meta-Heuristic Algorithms

^{۴۲} Numerical Methods

مقایسه آن عضو به حساب می‌آید. لازم به ذکر است که در اکثر این الگوریتم‌ها، معمولاً بهترین عضو، به‌عنوان یک الگو انتخاب شده و ذره‌ها سعی در نزدیک شدن به آن می‌کنند. بنابراین با تغییر تصادفی ولی هدفمند جمعیت اولیه در هر تکرار، جمعیت جدیدی ایجاد می‌شود. حال مقدار تابع هدف برای هر عضو جدید محاسبه شده و اگر عضو جدید دارای مقدار تابع هزینه بهتری بود جایگزین عضو قبلی می‌شود. در غیر این صورت عضو قبلی بدون تغییر باقی می‌ماند. این مراحل تا برآورده شدن شرط همگرایی ادامه خواهد یافت.

مقایسه میان روش‌های ریاضی و ابتکاری به‌منظور حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه انتقال شبکه در جدول ۱-۲ بیان شده است [۶].

جدول ۱-۲: مقایسه بین روش‌های ریاضی و ابتکاری برای حل مسائل مربوط به ریزشک‌ها

روش‌های ابتکاری	روش‌های ریاضی	
حصول ساختار بهینه با توجه به معیار ارزیابی	بهینه‌سازی تابع هزینه شامل هزینه-های بهره‌برداری، تلفات و ...	هدف
فنی، اقتصادی، قابلیت اطمینان و امنیت	فنی، اقتصادی، قابلیت اطمینان و امنیت	قیود
کاهش یا افزایش ضرایب حساسیت بر حسب مورد	کاهش اختلاف میان دو حل متوالی به مقدار حداقل تعریف	معیار ارزیابی
سناریو اولیه توسط طراح تعیین می‌شود.	با توجه به تابع هدف، قوانین ریاضی و با دخالت طراح تعیین می‌شود.	نقطه شروع
۱- وابستگی حل نهایی به سناریوی اولیه ۲- لزوم یکایک شماری سناریوهای متعدد ۳- ساده‌سازی‌های متعدد در مدل نمودن شرایط واقعی ۴- تقریباً در اکثر موارد حل شبه بهینه حاصل می‌شود.	۱- مشکلات همگرایی ۲- افزایش زمان و حجم محاسبات هنگام استفاده از متغیرهای گسسته ۳- حصول بهینه به دلیل طبیعت غیرخطی تابع هدف مشکل است. ۴- ساده‌سازی‌های متعدد در مدل نمودن شرایط واقعی	معایب
زمان محاسبات کمتر از روش‌های ریاضی است.	حصول حل بهینه امکان‌پذیر است.	مزایا

روش کنترلی و روش‌های

بهینه‌سازی

۳-۱- مقدمه

کنترل پیش‌بین^{۴۳} در صنایع مختلف به‌منظور حس سیب و سببی از مسائل پیچیده و ابعاد بالای کنترل به‌طور مستمر در حال استفاده و میزان رشد این کنترل‌کننده در صنایع حساس مانند صنایع نفت و پتروشیمی به سرعت در حال افزایش است. مهم‌ترین تفاوت این روش کنترلی با سایر روش‌های طراحی موجود این است که در این روش، سیگنال کنترل به‌صورت برخط در هر لحظه از زمان محاسبه می‌شود، در صورتی که در اکثر روش‌ها، این سیگنال به‌صورت از قبل محاسبه شده به‌دست می‌آید. در نتیجه یکی از کاربردهای مهم کنترل‌کننده پیش‌بین در حل مسائلی است که به‌دست آوردن فرم صریح سیگنال کنترل امر مشکل یا غیرممکنی باشد. از طرفی با توجه به اینکه اکثر سیستم‌های فیزیکی شامل قیود مختلفی مانند قیدهای اشباع عملگرها، قیدهای کارایی و ایمنی می‌باشند، طراحی کنترل‌کننده به روش‌های کلاسیک امر بسیار چالش‌برانگیزی است. تاکنون روش‌های بسیار کمی به‌منظور طراحی کنترل‌کننده ساختاریافته برای سیستم‌های مقید ارائه شده است که اکثر آن‌ها به یک یا چند کاربرد خاص محدود بوده و معمولاً قادر نیستند به‌صورت سیستماتیک قیود را در طراحی لحاظ کنند.

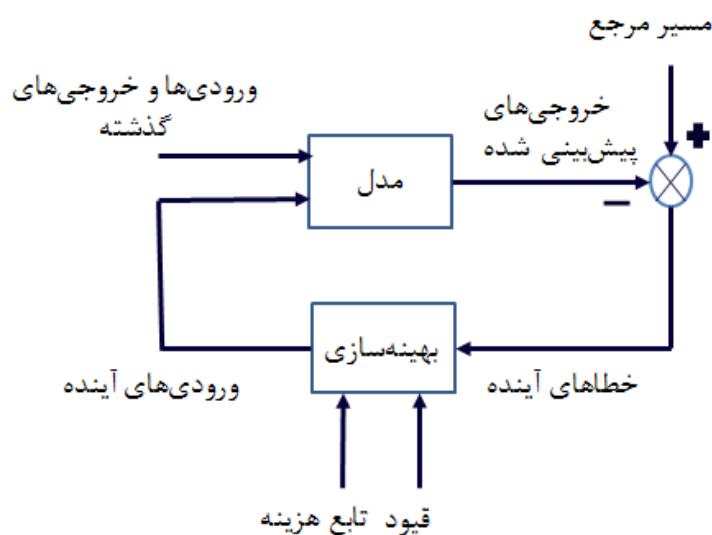
کنترل‌کننده پیش‌بین مدل علاوه بر داشتن توانایی بالا جهت کنترل سیستماتیک انواع سیستم‌های دینامیکی پیچیده، یکی از روش‌های بسیار مناسب برای طراحی در حضور انواع قید در مسئله می‌باشد و همین امر، کنترل‌کننده پیش‌بین را به ابزاری توانا برای مهندسين کنترل تبدیل کرده است [۳۳]. [۳۴]. از دیگر ویژگی‌های کنترل‌کننده پیش‌بین می‌توان به تنظیم بسیار راحت و همچنین عدم محدودیت در انتخاب مدل دینامیکی سیستم اشاره کرد. به عبارت دیگر، کنترل‌کننده پیش‌بین را می‌توان برای انواع سیستم‌های دینامیکی شامل سیستم‌های خطی و غیرخطی، سیستم‌های تغییرپذیر و تغییرناپذیر با زمان و سیستم‌های تک متغیره و چند متغیره به سادگی فرمول‌بندی نمود.

^{۴۳} Model predictive control (MPC)

تحقیقات اولیه در مورد کنترل کننده پیش‌بین با انتشار مقاله‌ای در این رابطه آغاز شد که در آن مفاهیم اساسی الگوریتم کنترل کننده پیش‌بین و موارد استفاده آن در صنعت مورد بحث و بررسی قرار گرفت [۳۵]. از آن به بعد کنترل کننده پیش‌بین به سرعت پیشرفت کرد و کاربرد آن در صنایع به سرعت افزایش یافت. قابلیت‌های زیاد کنترل کننده پیش‌بین و افق روشنی که این کنترل کننده در صنایع داشت باعث شد که مطالعات زیادی در این رابطه صورت گیرد.

۲-۳- کنترل پیش‌بین مدل خطی

عملکرد کلی کنترل پیش‌بین با توجه به شکل (۱-۳) صورت می‌پذیرد.

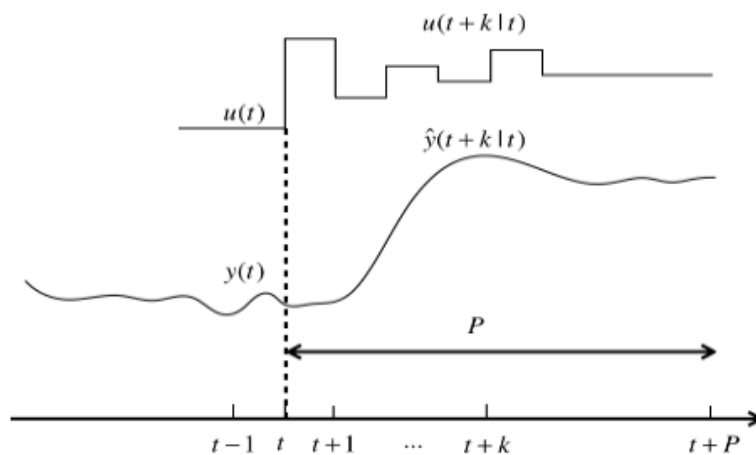


شکل ۱-۳: نمای کلی کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل

این کنترل کننده یک طرح کنترلی بهینه است که عمل کنترلی آن در هر مرحله با حل برخط یک مسئله کنترلی بهینه بدست می‌آید. در این کنترل کننده پارامتر مهمی به نام افق پیش‌بین تعریف می‌شود. افق پیش‌بینی^{۴۴} تعداد گام‌های زمانی آینده است که در آن خروجی یا حالت سیستم پیش-

^{۴۴} Prediction Horizon

بینی می‌شود و بر این اساس تابع هزینه می‌نیمم خواهد شد. افق کنترل^{۴۵} تعداد گام‌های زمانی در آینده است که به ازای آنها مقدار دنباله فرمان‌های کنترلی مشخص می‌شود. هرچه که این افق‌ها مقدار بیشتری داشته باشند، عملکرد سیستم بهتر خواهد بود ولی از طرف دیگر حجم محاسبات در کنترل‌کننده نیز بیشتر خواهد شد. برای افق پیش‌بینی N و در هر لحظه t از روی مدل فرآیند، خروجی‌های آینده پیش‌بینی می‌شود. در هر لحظه سیگنال کنترلی با توجه به شرایط ردیابی سیگنال مرجع تا افق پیش‌بین محاسبه می‌شود. با اعمال آن به مدل سیستم خروجی‌های پیش‌بینی شده نیز محاسبه می‌شوند. پس می‌توان گفت خروجی‌های پیش‌بینی شده وابسته به ورودی‌ها، خروجی‌های گذشته و همچنین ورودی‌های کنترلی آینده هستند. در شکل (۲-۳) راهکار کنترل پیش‌بین آورده شده است.



شکل ۲-۳: راهکار کنترل پیش‌بین

با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی در هر مرحله سیگنال کنترلی محاسبه و برای ردیابی مسیر مرجع توسط خروجی، به سیستم اعمال می‌شود. توابع هزینه معمولاً یک تابع مربعی بر اساس خطای بین خروجی پیش‌بینی شده و تغییرات سیگنال کنترلی است. اگر قیدی در کار نباشد پاسخ به صورت تحلیلی خواهد بود و در غیر این صورت باید از روش‌های بهینه‌سازی با قید استفاده نماییم.

^{۴۵} Control Horizon

مسئله کنترل پیش‌بین برای یک سیستم خطی تغییرناپذیر با زمان به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۴].

$$J_t^*(x(t)) = \min_{U_t} \sum_{k=0}^{N-1} \|x_k\|_2^L + \|u_k\|_2^R \quad (۱-۳)$$

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (۲-۳)$$

$$x_k \in \mathcal{X}, \quad u_k \in \mathcal{U}, \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (۳-۳)$$

$$x_0 = x(t) \quad (۴-۳)$$

$$U_t = \{u_0, u_1, \dots, \Delta u_{N-1}\} \quad (۵-۳)$$

که در این روابط $\|x_k\|_2^L = x_k^T L x_k$ و $\|u_k\|_2^R = u_k^T R u_k$ است. $L > 0$ و $R > 0$ ماتریس‌های وزنی هستند که بسته به نیازهای مسئله تعیین می‌شوند. تابع هزینه مسئله است که با توجه به اهداف مسئله تعریف می‌شود. با توجه به این که در این مسئله پایدارسازی حول نقطه تعادل مد نظر است، تابع هزینه به فرم رابطه (۱-۳) تعریف شده است. J^* مقدار بهینه تابع هدف و N افق پیش‌بین مسئله است. x_k و u_k به ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده متغیر حالت و متغیر ورودی در k گام بعد با استفاده از اندازه‌گیری در لحظه حال هستند. همچنین $x(t)$ مقدار واقعی متغیر حالت سیستم در لحظه t است. مجموعه‌های \mathcal{X} و \mathcal{U} مجموعه‌هایی محدب هستند که محدودیت‌های مسئله را مشخص می‌کنند.

با تعریف بردارها و ماتریس‌های مناسب و همچنین انجام پیش‌بینی در N گام می‌توان تابع هزینه و همچنین قیود مسئله را به فرم کلی زیر بازنویسی کرد.

$$J(U) = \frac{1}{2} U^T Q U + f^T U \quad (۶-۳)$$

$$A_c U \geq b \quad (۷-۳)$$

در این روابط، با توجه به ساختار مسئله کنترل‌کننده پیش‌بین، Q یک ماتریس مثبت معین بلوکی قطری، A_c ماتریس قیود مسئله با ساختار بلوکی نواری، و b بردار قیود با ابعاد مناسب است. با توجه به مثبت معین بودن ماتریس Q ، تابع هزینه (۶-۳) از نوع درجه دو محدب است. علاوه بر این، قیود مسئله (۷-۳) نیز از نوع چندوجهی هستند که این دو منجر به یک مسئله بهینه‌سازی از نوع برنامه‌ریزی درجه دو می‌شوند. از دیدگاه پیچیدگی محاسباتی، حل مسائل محدب به مراتب پیچیدگی کمتری نسبت به مسائل غیرمحدب دارد. اما با توجه به اینکه نیاز است الگوریتم‌های حل مسائل برنامه‌ریزی درجه دو در کنترل‌کننده پیش‌بین به صورت برخط پیاده‌سازی شوند، بنابراین باید این الگوریتم‌ها برای استفاده در کنترل‌کننده پیش‌بین مورد بهبود واقع شوند.

۳-۳ - بهینه‌سازی محدب

بهینه‌سازی محدب یک زیر کلاس از بهینه‌سازی ریاضی با خواص نظری و عملی مطلوب است که به عنوان یک ابزار مهم برای کنترل در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد. یکی از خواص نظری مهم این واقعیت است که اگر می‌نیمم محلی وجود داشته باشد، همان می‌نیمم سراسری خواهد بود. علاوه بر این مزیت اصلی عملی بهینه‌سازی محدب وجود حل‌کننده‌های قابل اعتماد و کارآمد برای پیدا کردن راه حل مطلوب است. نشان داده شده است که تعداد زیادی از مسائل محدب و بهینه‌سازی محدب در عمل مورد استفاده قرار گیرند. در این بخش در حال حاضر به یک مرور کلی از مجموعه‌ای از مباحث در بهینه‌سازی محدب پرداخته می‌شود.

۳-۳-۱ - مسئله بهینه‌سازی محدب

فرم کلی مساله بهینه‌سازی محدب به صورت زیر است [۳۶].

$$\text{minimize } f_0(z) \quad (۸-۳)$$

$$\text{subject to } f_I(z) \leq 0$$

$$f_\varepsilon(z) = 0$$

در این رابطه $z \in \mathbb{R}^{n_z}$ متغیر بهینه‌سازی، بردار $f_I(z)$ شکل گرفته از $f_i(z): \mathbb{R}^{n_z} \rightarrow \mathbb{R}, i \in I$ و $f_\varepsilon(z)$ از $i \in \varepsilon$ است. که شاخص مجموعه‌ها $\varepsilon \subset \{1, \dots, m\}$ و $I \subset \{1, \dots, m\}$ است و ε تعریف کننده مجموعه قیود تساوی و ناتساوی است. f_I و f_ε به ازای هر $i \in I$ محدب هستند و f_i به ازای هر $i \in \varepsilon$ خطی است.

۳-۳-۲ - شرایط بهینگی

مسئله اولیه بیان شده در قسمت قبل یک مسئله لاگرانژ^{۴۶} دوگانه یکپارچه است، که به عنوان مجوز بهینگی برای حل مسئله عملی زیر است [۳۶].

$$\text{maximize } g(\lambda, v) \quad (۹-۳)$$

$$\text{subject to } \lambda \geq 0$$

در این معادلات $\lambda \in \mathbb{R}^{|I|}, v \in \mathbb{R}^{|\varepsilon|}$ ضرایب لاگرانژ با قیود برابری و نابرابری هستند و تابع لاگرانژ به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$L(z, \lambda, v) = f_0(z) + \lambda^T f_I(z) + v^T f_\varepsilon(z) \quad (۱۰-۳)$$

تفاوت میان حل عملی اولیه و دوگانه، فاصله دوگانگی نامیده می‌شود. در شرایط خاصی، شروط صلاحیت قیود مقاومت دوگانگی حفظ می‌شود. یکی از این قیود ویژه شرط اسلاتر^{۴۷} نام دارد.

شروط اسلاتر بیان می‌دارد که اگر مسئله اولیه در معادله مربوط به آن کاملاً امکان‌پذیر باشد،

^{۴۶} Lagrange

^{۴۷} Slater

مقاومت دوگانگی حفظ می‌شود.

شرایط بهینگی KKT^{ϵ^A} شروط لازم و کافی جهت حل و یافتن نقطه بهینه سراسری را تامین می‌کند. این قضیه بیان می‌دارد که اگر Z نقطه امکان‌پذیر برای مسئله بهینه‌سازی محدب (۸-۳) باشد، باید در روابط زیر صادق باشد.

$$\nabla_z L(Z^*, \lambda^*, v^*) = 0 \quad (11-3)$$

$$f_I(Z^*) \leq 0$$

$$f_\epsilon(Z^*) = 0$$

$$\lambda^* \geq 0$$

$$\lambda^*_i f_i(z^*) = 0 \quad \forall i \in I$$

۳-۳-۳ - برنامه‌ریزی خطی

اگر تابع هزینه و قیود در معادله (۸-۳) همگی خطی باشند از آن با عنوان برنامه‌ریزی خطی یاد می‌شود. فرم کلی برنامه‌ریزی خطی به صورت زیر است.

$$\text{minimize } c^T z \quad (12-3)$$

$$\text{subject to } G_I z \leq d_I$$

$$G_\epsilon z = d_\epsilon$$

اگر در معادله (۸-۳) قیدها خطی و تابع هزینه مربعی باشد، به آن برنامه‌ریزی مربعی محدب گفته می‌شود. برنامه‌ریزی مربعی به صورت زیر تعریف می‌شود.

^{۴A} Karush–Kuhn–Tucker conditions

$$\text{minimize } z^T H z + c^T z \quad (13-3)$$

$$\text{subject to } G_I z \leq d_I$$

$$G_\varepsilon z = d_\varepsilon$$

در این معادله $H \geq 0$ تعریف کننده، تابع هدف مربعی محدب است که روی یک چند وجهی می‌نیمم می‌شود. مسئله برنامه‌ریزی مربعی در مسائل بسیار کاربرد دارد و همچنین به عنوان زیرمسئله در مسائل بهینه‌سازی کلی قابل استفاده است.

۳-۴- روش‌های حل بهینه‌سازی

روش‌های بهینه‌سازی متفاوت زیادی برای حل مسئله محدب در مقالات بهینه‌سازی وجود دارد. در این بخش دو روش مجموعه فعال و گرادیان تصویر شده، توضیح داده می‌شود.

۳-۴-۱- الگوریتم مجموعه فعال دوگان

الگوریتم مجموعه فعال یکی از موثرترین الگوریتم‌های عددی به منظور حل مسائل بهینه‌سازی درجه دو با ابعاد کوچک تا متوسط است [۳۱]. در این روش با استفاده از تعریف مجموعه فعال و همچنین شرایط بهینگی KKT حل یک مسئله بهینه‌سازی با قیود نامساوی به حل چندین مسئله با قیود مساوی تبدیل می‌شود که در هر تکرار الگوریتم باید حل شود. در هر تکرار، با استفاده از جهت و گام مناسب جستجو و همچنین یک حدس اولیه از جواب بهینه، جواب بهینه مسئله در تعداد گام‌های محدودی به دست می‌آید. در صورت استفاده از مسئله دوگان به جای مسئله اصلی و تعمیم الگوریتم مجموعه فعال برای مسئله دوگان، حجم محاسبات کاهش یافته و جواب مسئله با سرعت بیشتری به دست خواهد آمد.

۳-۴-۲- مسئله دوگان

ابتدا مسئله بهینه‌سازی درجه دو محدب تعریف شده در روابط (۳-۶) و (۳-۷) در نظر گرفته می‌شود.

تابع دوگان این مسئله به صورت زیر تعریف می شود [۳۱].

$$q(\lambda) = \min_U L(U, \lambda) \quad (۱۴-۳)$$

در رابطه (۱۴-۳)، L تابع لاگرانژ مسئله است که برای مسئله برنامه ریزی درجه دو به صورت زیر تعریف می شود.

$$L(U, \lambda) = \frac{1}{2} U^T Q U + f^T U - \lambda^T (A_c U - b) \quad (۱۵-۳)$$

در رابطه (۱۵-۳)، $0 \leq \lambda \in \mathcal{R}^n$ بردار شامل ضرائب لاگرانژ است. با توجه به مقعر بودن تابع دوگان $q(\lambda)$ ، مسئله دوگان به صورت زیر تعریف می شود.

$$q^* = q(\lambda^*) = \max_{\lambda \geq 0} q(\lambda) \quad (۱۶-۳)$$

لم (۱-۳) [۳۱]: مقدار بهینه مسئله دوگان q^* و مقدار بهینه مسئله اصلی J^* برای مسئله برنامه ریزی درجه دو محدب باهم برابر هستند.

بنابراین، با حل مسئله بهینه سازی (۱۶-۳) می توان مقدار بهینه مسئله اصلی را محاسبه نمود. از آنجا که مسئله (۱۶-۳) تنها شامل قید مثبت بودن ضرائب لاگرانژ است و قیود مسئله اصلی در تابع لاگرانژ جاسازی شده اند، میزان پیچیدگی محاسباتی این مسئله نسبت به مسئله اصلی کمتر خواهد بود.

با استفاده از تعریف تابع لاگرانژ و همچنین نامقید بودن آن، مقدار مینیمم این تابع در نقطه زیر رخ می دهد:

$$U^* = -Q^{-1}(A_c^T \lambda^* + f) \quad (17-3)$$

با جایگذاری رابطه (17-3) در رابطه (15-3) و همچنین حذف ترم‌های ثابت، تابع دوگان به صورت زیر به دست می‌آید.

$$q(\lambda) = -\frac{1}{2} \lambda^T \bar{Q} \lambda + \bar{f}^T \lambda \quad (18-3)$$

$$\bar{Q} = A_c Q^{-1} A_c^T, \quad \bar{f} = b + A_c Q^{-1} f$$

با توجه به این که هر مسئله ماکزیم‌سازی قابل بیان به صورت یک مسئله مینیم‌سازی است، مسئله دوگان به صورت زیر قابل بیان خواهد بود.

$$q(\lambda^*) = - \min_{\lambda} q(\lambda) \quad (19-3)$$

$$\lambda \geq 0 \quad (20-3)$$

بنابراین، با حل مسئله دوگان تعریف شده توسط روابط (19-3) و (20-3) مقدار بهینه ضرائب لاگرانژ به دست می‌آید. سپس با استفاده از رابطه (17-3) می‌توان مقدار بهینه جواب مسئله اصلی را محاسبه کرد.

۳-۴-۳ روش مجموعه فعال دوگان

تعریف ۱: به مجموعه $\mathcal{A}(\lambda^*)$ مجموعه فعال در نقطه بهینه λ^* گفته می‌شود و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\mathcal{A}(\lambda^*) = \{i \in \{1, \dots, m\} | \lambda_i^* = 0\} \quad (21-3)$$

در رابطه (21-3)، m تعداد سطرهای ماتریس A_c است.

با توجه به تعریف ۱، شرایط بهینگی KKT برای مسئله دوگان با قید نامساوی به صورت زیر قابل بیان

هستند.

$$\bar{Q}\lambda^* - \bar{f} - \sum_{i \in \mathcal{A}(\lambda^*)} \mu_i^* \lambda_i = 0 \quad (22-3)$$

$$\lambda_i^* = 0 \quad \forall i \in \mathcal{A}(\lambda^*) \quad (23-3)$$

$$\lambda_i^* \geq 0 \quad \forall i \notin \mathcal{A}(\lambda^*) \quad (24-3)$$

$$\mu_i^* \geq 0 \quad \forall i \in \mathcal{A}(\lambda^*) \quad (25-3)$$

در رابطه (۲۲-۳)، μ_i ضرایب لاگرانژ مسئله دوگان هستند. در صورت مشخص بودن مجموعه $\mathcal{A}(\lambda^*)$ مسئله بهینه‌سازی با قید نامساوی، به یک مسئله بهینه‌سازی با قید مساوی تبدیل می‌شود که به راحتی قابل حل است.

نکته اساسی در روش مجموعه فعال این است که تقریباً در تمامی موارد، مجموعه $\mathcal{A}(\lambda^*)$ از قبل مشخص نیست و باید شناسایی شود. از این جهت بخش مهمی از این الگوریتم به شناسایی این مجموعه اختصاص می‌یابد. برای این منظور، یک مجموعه فعال اولیه در تکرار k به اسم مجموعه کار \mathcal{W}_k تعریف می‌شود و در هر تکرار با استفاده از اطلاعات موجود در ضرائب لاگرانژ، این مجموعه به-روزرسانی شده و طی چندین تکرار محدود، مجموعه $\mathcal{A}(\lambda^*)$ شناسایی می‌شود.

در تمامی روش‌های بهینه‌سازی عددی ابتدا یک حدس اولیه از جواب بهینه در نظر گرفته شده و سعی می‌شود با انتخاب جهت و گام مناسب در طی چند تکرار حدس اولیه به نقطه بهینه نزدیک شود. در ابتدا به محاسبه جهت جستجو مناسب پرداخته خواهد شد. طبق موارد مذکور، می‌توان بردار جواب مسئله λ را در هر تکرار به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\lambda_{k+1} = \lambda_k + p \quad (26-3)$$

در رابطه (۲۶-۳)، بردار p جهت جستجو را مشخص می‌کند. با جایگذاری رابطه (۲۶-۳) در رابطه (۳-۳) و (۱۹) می‌توان با استفاده از مسئله مقید مساوی زیر، بردار p را محاسبه نمود.

$$\min_p \frac{1}{2} p_k^T \bar{Q} p_k + g_k^T p \quad (27-3)$$

$$p_i = 0 \quad \forall i \in \mathcal{W}_k \quad (28-3)$$

$$g_k = \bar{Q}\lambda - \bar{f} \quad (29-3)$$

پس از محاسبه‌ی بردار $p = 0$ می‌توان استنباط نمود که جهتی به‌منظور بهبود جواب بهینه یافت نشده و جواب بهینه در گام قبل محاسبه شده است. در این صورت باید گام مناسب را تعیین نماییم. بنابراین، با در نظر گرفتن گام $\alpha \in [0,1)$ بردار جواب به‌صورت زیر بروزسانی می‌شود.

$$\lambda_{k+1} = \lambda_k + \alpha p \quad (30-3)$$

مقدار طول گام را می‌توان با استفاده از قیود غیر فعال تعیین نمود. محاسبه طول گام برای مسئله اصلی و دوگان متفاوت نیست و می‌توان آن را با استفاده از روش ارائه شده در مرجع [۳۷] از رابطه زیر محاسبه نمود.

$$\alpha = \min\left(1, \min_{\forall i \in \mathcal{W}_k} \left(-\frac{\lambda_{ki}}{p_{ki}}\right)\right) \quad (31-3)$$

در صورت محاسبه α اندیس قید غیرفعالی که به ازای آن قید α محاسبه شده است به مجموعه فعال اضافه می‌شود.

قضیه (۳-۱): [۳۷]: اگر نقطه $\bar{\lambda}$ در شرایط بهینگی KKT برای مسئله مقید مساوی (۲۷-۳) و (۲۸-۳)

صدق کند و p جواب بهینه این مسئله باشد، آن گاه p یک جهت جستجو شدنی است به طوری که تابع هزینه در این جهت نزولی می باشد.

با در نظر گرفتن قضیه فوق، می توان دریافت که به ازای هر حدس اولیه شدنی، تابع هزینه در جهت p نزولی بوده و به سمت مقدار مینیمم پیش خواهد رفت.

۳-۴-۳-۱ الگوریتم مجموعه فعال دوگان

روند پیاده سازی الگوریتم مجموعه فعال دوگان به صورت زیر است:

گام اول: در این گام ابتدا یک حدس اولیه از جواب بهینه و همچنین یک حدس اولیه از مجموعه کار W_k را در نظر گرفته می شود. در صورتی که حدس اولیه تابع هزینه را مینیمم نمود آن را به عنوان جواب بهینه مسئله در نظر گرفته، در غیر این صورت به گام دوم می رویم.

گام دوم: با استفاده از مسئله تعریف شده توسط روابط (۳-۲۷) و (۳-۲۸) جهت جستجو مناسب p_k و همچنین ضرائب لاگرانژ مسئله دوگان μ_k محاسبه می شود. در صورتی که جهت محاسبه شده برابر با صفر شد، می بایست ضرائب لاگرانژ مورد بررسی قرار گیرند. اگر تمامی این ضرائب مثبت بودند، جواب به دست آمده توسط رابطه (۳-۳۰) جواب بهینه است. در غیر این صورت، اندیس مربوط به کوچکترین ضریب لاگرانژ از مجموعه فعال حذف می شود. در صورتی که $p \neq 0$ به گام سوم می رویم.

گام سوم: در این مرحله گام جستجو α طبق رابطه (۳-۳۱) محاسبه شده و اندیس مربوط به آن به مجموعه کار اضافه می شود. سپس مقدار جواب توسط رابطه (۳-۳۰) به روز رسانی می شود. این روند تا جایی ادامه خواهد یافت که $p = 0$ و همچنین تمامی ضرائب لاگرانژ نامنفی شوند.

نکته: در گام دوم به منظور محاسبه جهت جستجو می توان از روش های لاگرانژ-نیوتون یا روش KKT با قید مساوی استفاده کرد. در این دو روش، در هر تکرار یک دستگاه چند معادله - چند مجهول حل خواهد شد. به منظور حل موثر این دستگاه باید از روش های حل عددی و تجزیه سازی ماتریسی مانند

تجزیه LU یا QR استفاده نمود. علاوه بر این، با توجه به بلوکی قطری بودن ماتریس \bar{Q} می توان از روش های بلوکی برای معکوس گیری استفاده کرد و سرعت الگوریتم را افزایش داد.

۳-۵- روش گرادیان تصویر شده

مسئله زیر در نظر گرفته می شود.

$$\min f(x) \quad (32-3)$$

$$a^{iT}x \leq b_i \quad (i = 1, \dots, s)$$

$$a^{iT}x = b_i \quad (i = s + 1, \dots, m)$$

برای یک نقطه شدنی x^* داده شده، در معادله (۳۲-۳) فضای برداری زیر در نظر گرفته می شود.

$$V^* = \{d \in \mathbb{R}^n \mid a^{iT}d = 0 \text{ for } i \in \bar{A}(x^*)\} \quad (33-3)$$

جایی که $A(x^*)$ یک مجموعه از قیدهای فعال در x^* است و $\bar{A}(x^*) = A(x^*) \cup \{s+1, \dots, m\}$. فضای موازی با تقاطع ابرصفحه ها $a^{iT}x = b_i$ و $i \in \bar{A}(x^*)$ است. با حرکت از x^* در جهت $d^* \in V^*$ ، تمامی قیدهای فعال در x^* فعال باقی می ماند، از آنجا که $a^{iT}x^* = b_i$ به $a^{iT}(x^* + \lambda d^*) = b_i$ برای تمام λ و برای $\lambda \in \mathbb{R}$ برقرار است، اگر حداقل یک قید در x^* فعال باشد، روش Rosen مسیر تصویر شده را با طراحی بردار $-\nabla f(x)$ در فضای V^* تعیین می کند.

با فرض این که بردارهای a^i در (۳۲-۳) مستقل خطی هستند. وقتی $q > 0$ تعداد قیدهای فعال در x^* و $A^* \in \mathbb{R}^{q \times n}$ ماتریس ضرائب این قیدها باشد، پس داریم [۳۸].

$$V^* = \text{Nu}(A^*) = \{d \in \mathbb{R}^n \mid A^*d = 0\} \quad (34-3)$$

علاوه بر این، $W^* = \lim(A^{*T}) = \{A^{*T}\alpha \mid \alpha \in \mathbb{R}^q\}$ تعریف می شود. فضاهای V^* و W^* به صورت مستطیلی بوده، هسته A^* و تصویر A^{*T} نامیده می شوند و دارای ابعاد $n-q$ و q هستند و

مسیر d^* برای جستجو مشخص می شود. از آنجایی که V^* و W^* به صورت مستطیلی هستند، می توان منفی گرادیان را به صورت زیر نوشت:

$$-\nabla f(x^*) = d^* + A^{*T} \alpha^* \quad (۳۵-۳)$$

جایی که $d^* \in V^*$ و $\alpha^* \in \mathbb{R}^q$ منحصر به فرد هستند. از $d^* \in V^*$ می توان دریافت که

$$\begin{aligned} A^* d^* &= A^* (-\nabla f(x^*) - A^{*T} \alpha^*) \quad (۳۶-۳) \\ &= -A^* \nabla f(x^*) - A^{*T} A^* \alpha^* \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\alpha^* = -(A^* A^{*T})^{-1} A^* \nabla f(x^*)$$

با جایگذاری α^* (۳۶-۳) در (۳۵-۳) داریم

$$\begin{aligned} d^* &= -\nabla f(x^*) + A^{*T} (A^* A^{*T})^{-1} A^* \nabla f(x^*) \quad (۳۷-۳) \\ &= -[I - A^{*T} (A^* A^{*T})^{-1} A^*] \nabla f(x^*) \end{aligned}$$

ماتریس تصویرشده P^* به صورت زیر تعریف می شود

$$P^* = I - A^{*T} (A^* A^{*T})^{-1} A^* \quad (۳۸-۳)$$

جهت d^* به صورت زیر است

$$d^* = -P^* \nabla f(x^*) \quad (۳۹-۳)$$

و اگر $d^* \neq 0$ این جهت نزولی شدنی است.

۳-۵-۱- الگوریتم گرادیان تصویرشده

۱- در ابتدا یک حدس اولیه از جواب بهینه در نظر گرفته می شود. در صورتی که حدس اولیه تابع

هزینه را مینیمم نمود آن را به عنوان جواب بهینه مسئله در نظر گرفته، در غیر این صورت به

گام دوم می رویم.

۲- با استفاده از رابطه $\Delta x := -\nabla f(x)$ جهت جستجو را بدست آورده و به گام بعد می‌رویم.

۳- با استفاده از روش‌های جستجو خطی^{۴۹}، طول گام t را بدست آورده و به گام بعد می‌رویم.

۴- با استفاده از $x = x + t\Delta x$ ، به روزرسانی را انجام داده و تا زمانی که $\|\nabla f(x)\| \leq \eta$ برقرار نشود؛ این روند را ادامه می‌دهیم.

معیار توقف معمولاً از $\|\nabla f(x)\| \leq \eta$ به‌دست می‌آید، جایی که η کوچک و مثبت است. در بیشتر

پیاده‌سازی‌ها، این شرط بعد از گام ۱ بررسی می‌شود به جای این‌که بعد از به روز رسانی بررسی شود.

^{۴۹} Line Search Methods

نتایج شبیه‌سازی

۴-۱- مقدمه

در این بخش، به منظور نشان دادن توانایی الگوریتم مجموعه فعال دوگان در حل مسائل برنامه‌ریزی درجه دو از سیستم توپ و صفحه به عنوان مطالعه موردی استفاده شده است [۲۱]. همچنین به منظور شبیه‌سازی سیستم از نرم‌افزار MATLAB نسخه ۲۰۱۷ استفاده شده است. سپس روش پیشنهادی برای کنترل فرکانس ریزش‌بکه، بر روی یک ریزش‌بکه نمونه اعمال می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان‌دهنده کارایی روش پیشنهادی است.

۴-۲- سیستم توپ و صفحه

این سیستم شامل یک صفحه کج شده در طول دو محور می‌باشد که هدف کنترل در آن، کنترل موقعیت توپی است که روی این صفحه قرار دارد. معادلات دینامیکی گسسته زمان این سیستم به همراه قیدهای سیستم با زمان نمونه برداری 0.01 ثانیه به صورت زیر است.

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0.01 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -0.0004 \\ -0.0701 \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

$$\begin{bmatrix} -0.5 \\ -0.5 \end{bmatrix} \leq x(t) \leq \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

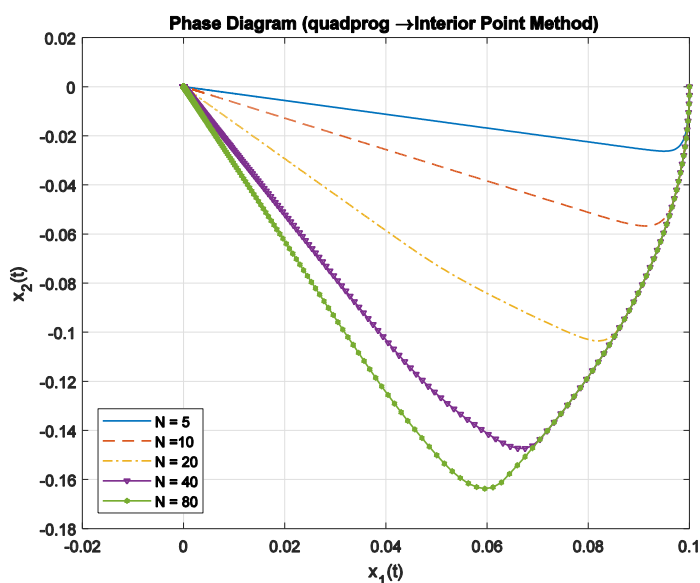
$$-0.05 \leq u(t) \leq 0.05 \quad (3-4)$$

در این مثال، ماتریس‌های وزنی L و R به صورت زیر انتخاب شده‌اند.

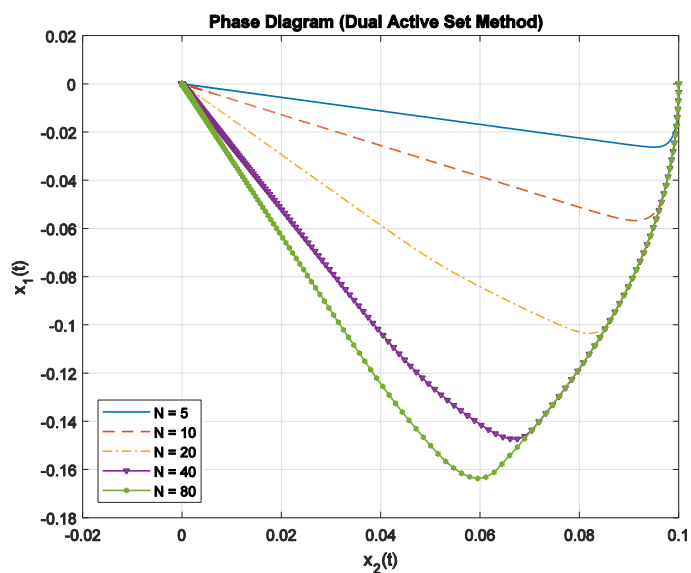
$$L = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix}, R = 1 \quad (4-4)$$

مسئله کنترل پیش‌بین مثال فوق برای افق‌های پیش‌بینی ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ حل شده است. به منظور مقایسه الگوریتم مجموعه فعال دوگان با الگوریتم‌های موجود، مسئله برنامه‌ریزی درجه دو در کنار الگوریتم مجموعه فعال دوگان، توسط تابع quadprog نرم‌افزار متلب نیز حل شده است. شکل

(۱-۴) دیاگرام فاز سیستم را با استفاده از تابع quadprog نرم افزار متلب به همراه حل کننده نقطه داخلی و شکل (۲-۴) دیاگرام فاز سیستم را به ازای حل کننده مجموعه فعال دوگان به ازای افق‌های پیش‌بینی متفاوت نشان می‌دهد.



شکل ۱-۴: دیاگرام فاز با استفاده از quadprog

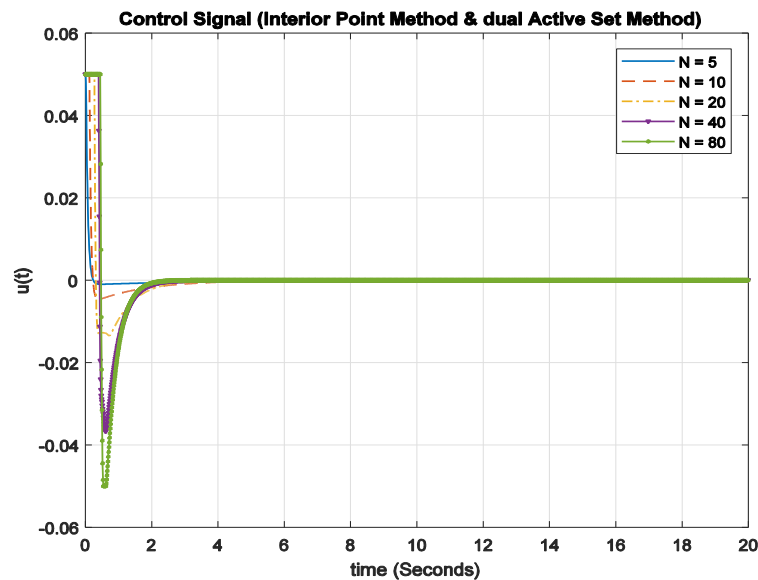


شکل ۲-۴: دیاگرام فاز با استفاده از الگوریتم مجموعه فعال دوگان

همان‌گونه که در شکل‌های (۱-۴) و (۲-۴) به خوبی نشان داده شده است، الگوریتم مجموعه فعال

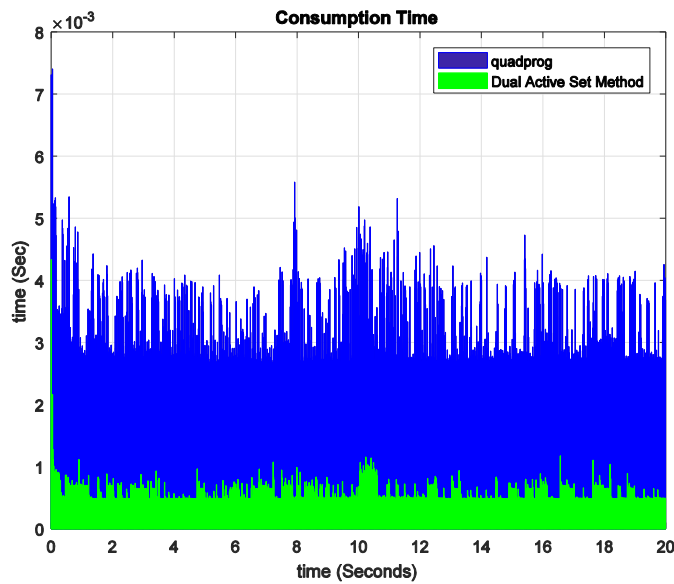
دوگان نیز مانند الگوریتم نقطه داخلی توانسته است حالت‌های سیستم را پایدار نماید. دلیل وجود پاسخ‌های مختلف به ازای افق‌های پیش‌بینی مختلف تاثیر افق پیش‌بین بر روی عملکرد سیستم است. در حالت کلی در صورت افزایش افق پیش‌بین، حالت‌های سیستم با زمان نشست کمتری به سمت نقطه تعادل حرکت می‌کنند.

وجود پاسخ‌های مشابه به دلیل تولید سیگنال کنترل یکسان در دو الگوریتم است. این سیگنال برای هر دو حل‌کننده نقطه داخلی و مجموعه فعال دوگان به ازای افق‌های پیش‌بینی مختلف در شکل (۳-۴) نشان داده شده است.



شکل ۳-۴: سیگنال کنترل تولید شده توسط الگوریتم مجموعه فعال دوگان به ازای افق‌های پیش‌بین متفاوت

همان‌گونه که شکل (۳-۴) نشان می‌دهد سیگنال کنترل در محدوده مجاز قرار دارد. مهم‌ترین وجه تمایز این دو پاسخ در حجم محاسبات و زمان مصرفی جهت تولید سیگنال کنترل است. مسئله برنامه‌ریزی درجه دو حل شده به ازای هرافق پیش‌بینی شامل ۳۰۰۰ مسئله برنامه‌ریزی درجه دو است که هر کدام می‌بایست در حداکثر ۰,۰۱ ثانیه حل شود. میزان زمان مصرفی به ازای افق پیش‌بین ۸۰ برای حل‌کننده quadprog و مجموعه فعال دوگان در شکل (۴-۴) نمایش داده شده است.



شکل ۴-۴: مقایسه زمان مصرفی الگوریتم مجموعه فعال دوگان و الگوریتم نقطه

همان‌گونه که شکل‌های (۴-۴) به خوبی نشان می‌دهد، الگوریتم مجموعه فعال دوگان برای مسئله کنترل‌کننده پیش‌بین دارای سرعت و عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های مشابه است. این الگوریتم به خوبی می‌تواند در زمان‌های بسیار کوچکتر از زمان نمونه‌برداری سیستم مسئله کنترل‌کننده پیش‌بین را حل کند، در حالی که الگوریتم مشابه در برخی از گام‌های زمانی به زمان بیشتری برای حل مسئله برنامه‌ریزی درجه دو نیاز دارند. با توجه به این موضوع که میزان پیچیدگی محاسباتی مسئله برنامه‌ریزی درجه دو در طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین رابطه مستقیم با مقدار افق پیش‌بین مسئله دارد، ابعاد مسئله برنامه‌ریزی درجه دو و به تبع آن پیچیدگی محاسباتی مسئله افزایش می‌یابد. در حالت کلی افق پیش‌بین به‌عنوان یکی از پارامترهای طراحی در کنترل‌کننده پیش‌بین در نظر گرفته می‌شود و تقریباً در تمامی موارد مقدار افق پیش‌بین می‌بایست کوچک‌ترین مقدار ممکن انتخاب شود. از این رو، معمولاً حجم مسئله بهینه‌سازی در کنترل پیش‌بین کوچک یا متوسط است.

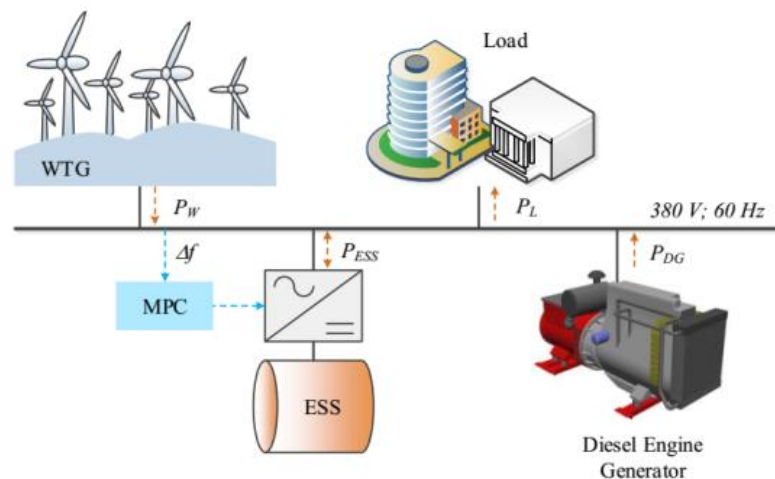
۴-۳- شبیه‌سازی مربوط به کنترل فرکانس ریزش‌بکه

در این قسمت ابتدا سیستم ریزش‌بکه مورد بررسی معرفی می‌گردد. سپس با استفاده از روش‌های توضیح داده شده و استفاده آنها در طراحی کنترل پیش‌بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی توضیح داده

شده و نتایج با دیگر کنترل‌کننده‌ها مقایسه می‌شود.

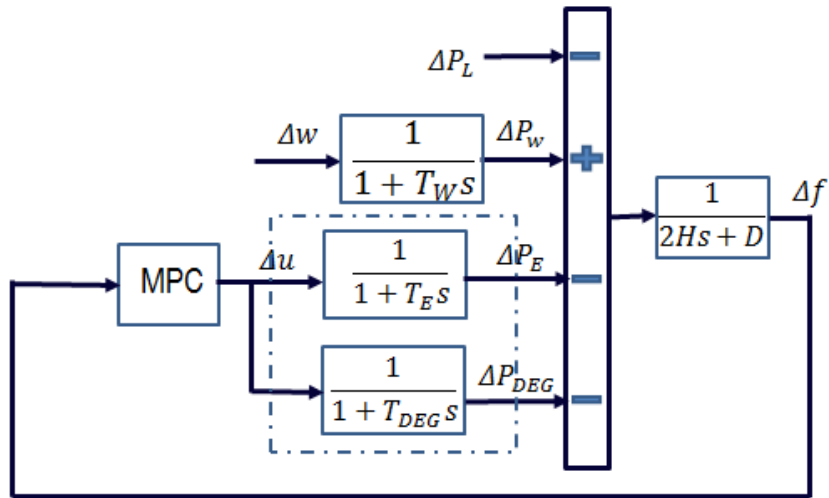
توپولوژی ریزشبهه انتخاب شده در این پایان‌نامه شامل یک دیزل ژنراتور، یک منبع ذخیره‌کننده انرژی، یک توربین بادی و یک مصرف‌کننده مطابق شکل (۴-۵) است.

دلیل اساسی تغییرات فرکانس در ریزشبهه‌ها وجود اغتشاش بین توان مصرفی و توان تولیدی است. علاوه بر این، با توجه به وجود توربین بادی در ریزشبهه، تغییرات سرعت باد نیز موجب تغییرات فرکانس خواهد شد.



شکل ۴-۵: توپولوژی ریزشبهه مورد مطالعه [۳۹]

به‌منظور تحلیل و طراحی کنترل‌کننده برای این سیستم در این پایان‌نامه از مدل خطی‌سازی شده ریزشبهه که در شکل (۴-۶) نشان داده شده، استفاده می‌شود. این مدل بسیار پرکاربرد بوده و تاکنون در مراجع مختلفی به‌عنوان مدل مرجع مورد استفاده قرار گرفته است [۱۷]. مدل دینامیکی دیزل ژنراتور شامل مدل توربین، مدل گاورنر و مدل سیستم کنترل سرعت است. توربین بادی مورد استفاده در این ریزشبهه مبتنی بر یک ژنراتور القایی است که به‌منظور سادگی در مدل‌سازی از تقریب مرتبه اول آن استفاده شده است.



شکل ۴-۶: مدل خطی ریزشبه مورد مطالعه.

با استفاده از موارد مذکور و همچنین انجام برخی ساده‌سازی‌ها در روند مدل‌سازی، مدل خطی تغییرناپذیر با زمان ریزشبه مورد مطالعه به صورت مدل فضای حالت زیر قابل بیان است.

$$\dot{x} = Ax(t) + B\Delta u(t) \quad (5-4)$$

$$y = Cx(t)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_E} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_W} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{DEG}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2H} & \frac{1}{2H} & -\frac{1}{2H} & -\frac{D}{2H} & 0 & -\frac{1}{2H} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_E} & 0 & \frac{1}{T_{DEG}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$C = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T$$

جدول ۴-۱: پارامترهای سیستم

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
H (s)	۰,۱	T _W (s)	۱,۵
D (pu/Hz)	۰,۰۱۲	T _E (s)	۰,۱
T _{DEG} (s)	۲		

در این روابط، H ثابت اینرسی و D ضریب میرایی است. ضریب میرایی معمولاً درصد تغییرات بار به-ازای یک درصد تغییر فرکانس نشان می‌دهد. در این معادلات، $\Delta u(t) \in \mathcal{R}^m$ بردار متغیرهای تغییرات سیگنال کنترل، $y(t) \in \mathcal{R}^p$ بردار متغیرهای خروجی و $x(t) \in \mathcal{R}^n$ بردار متغیرهای حالت سیستم است که به صورت زیر بیان می‌شود.

$$x(t) = [\Delta P_E \quad \Delta P_W \quad \Delta P_{DEG} \quad \Delta f \quad \Delta \omega \quad \Delta P_L]^T \quad (۴-۶)$$

متغیرهای ΔP_E ، ΔP_W ، ΔP_{DEG} ، Δf ، ΔP_L و ΔP_ω به ترتیب، تغییرات توان منبع ذخیره انرژی، توربین بادی، گاورنر، توان دیزل ژنراتور، سرعت باد و بار هستند. علاوه بر موارد فوق، سیستم ریزشبه مورد مطالعه شامل قیود فیزیکی بر روی حالت‌ها، خروجی و متغیر ورودی است.

هدف اصلی کنترل در این سیستم به حداقل رساندن تغییرات فرکانس در حضور تغییرات بار و سرعت باد به همراه تضمین پایداری حلقه-بسته است. علاوه بر این، سیگنال کنترل به دست آمده نباید از حد مجاز تجاوز کرده و همچنین نباید حالت‌های سیستم را از محدوده مجاز خارج نماید. در بخش بعد به بررسی روش کنترل پیش‌بین برای این سیستم خواهیم پرداخت.

۴-۳-۱- کنترل پیش‌بین با دو مد عملکرد

به منظور کنترل ریز شبکه معرفی شده در بخش قبل، مسئله کنترل پیش‌بین در لحظه t به صورت کلی زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$J_t^*(x(t)) = \min_{U_t} \sum_{k=0}^{N-1} q(x_{t+k|t}, \Delta u_{t+k|t}) \quad (۷-۴)$$

$$x_{t+k+1|t} = Ax_{t+k|t} + B\Delta u_{t+k|t} \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (۸-۴)$$

$$x_{t+k|t} \in \mathcal{X}, \quad \Delta u_{t+k|t} \in \mathcal{U}, \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (۹-۴)$$

$$x(t|t) = x(t) \quad (۱۰-۴)$$

$$\Delta U_t = \{\Delta u_{t|t}, \Delta u_{t+1|t}, \dots, \Delta u_{t+N-1|t}\} \quad (۱۱-۴)$$

که در این روابط تابع J ، معیار کارایی (تابع هدف) است که با توجه به اهداف مسئله تعریف می‌شود. همچنین J^* ، مقدار بهینه تابع هدف و N ، افق پیش‌بین مسئله است.

تابع q هزینه در طول افق پیش‌بینی را مشخص می‌کند. $x_{t+k|t}$ و $u_{t+k|t}$ به ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده متغیر حالت و متغیر ورودی در گام $t+k$ با استفاده از اندازه‌گیری در لحظه t هستند. همچنین $x(t)$ مقدار واقعی متغیر حالت سیستم در لحظه t است. مجموعه‌های \mathcal{X} و \mathcal{U} مجموعه‌هایی محدب هستند که محدودیت‌های مسئله را مشخص می‌کنند.

در حالت کلی، مسئله کنترل‌کننده پیش‌بین برای افق پیش‌بین محدود تعریف می‌شود و همین محدودیت موجب اختلاف بین مقدار پیش‌بینی شده حالت‌ها و مقدار واقعی آن‌ها شده و باعث ایجاد ناپایداری در سیستم می‌گردد. بنابراین، جهت پایدارسازی بودن کنترل‌کننده پیش‌بین، مقدار افق پیش‌بین می‌بایست به اندازه کافی بزرگ باشد. اما در عمل افزایش افق پیش‌بینی چندان مناسب

نیست؛ زیرا با افزایش افق پیش‌بین تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری افزایش یافته و به تبع آن پیچیدگی محاسباتی مسئله بهینه‌سازی بیشتر می‌شود. در حالت ایده‌آل مناسب است که مسئله کنترل‌کننده پیش‌بین برای افق پیش‌بین بی‌نهایت حل شود، زیرا در این حالت (طبق اصل بهینگی بلمن) مسیرهای حالت پیش‌بینی شده و واقعی باهم اختلاف نخواهند داشت و سیستم حلقه-بسته پایدار خواهد بود [۳۳]. بنابراین می‌بایست در تعریف مسئله کنترل‌کننده پیش‌بین تغییراتی اعمال کرد که بتوان توسط آن افق پیش‌بین بی‌نهایت را تقریب زد. در این صورت علاوه بر مزایای کنترل‌کننده پیش‌بین می‌توان از خواص پایدارسازی آن نیز استفاده کرد. برای این منظور، در اغلب کنترل‌کننده‌های پیش‌بین برای تضمین پایداری حلقه-بسته، یک هزینه و یک قید خاص در مسئله بهینه‌سازی گنجانده می‌شود که به آن‌ها هزینه نهایی و قید مجموعه نهایی گفته می‌شود. به‌طور کلی این روش که به آن کنترل پیش‌بین با دو مد عملکردی گفته می‌شود، بر اساس شکل‌دهی یک مجموعه نهایی حول نقطه تعادل کار می‌کند. در این روش، یک کنترل‌کننده محلی وجود دارد که یک مجموعه مثبت پایا حول نقطه تعادل ایجاد نموده و کنترل‌کننده پیش‌بین سعی می‌کند که بردار حالت را به درون این مجموعه هدایت کند [۲۰، ۴۰]. در درون این مجموعه، کنترل‌کننده محلی کار پایداری سیستم را به عهده خواهد داشت. علاوه بر این، با تعریف شکلی خاص از هزینه نهایی و با استفاده از تابع هدف بهینه شده به‌عنوان تابع لیاپانوف، می‌توان اثبات کرد که هزینه نهایی درون مجموعه پایا ایجاد شده حول مبدا، یک تابع لیاپانوف محلی است. بنابراین با استفاده از این روش، مسئله کنترل‌کننده پیش‌بین با دو مد عملکرد به‌صورت زیر قابل بیان خواهد بود.

$$J_t^*(x(t)) = \min_{U_t} p(x_{t+N|t}) + \sum_{k=0}^{N-1} q(x_{t+k|t}, \Delta u_{t+k|t}) \quad (۱۲-۴)$$

$$x_{t+k+1|t} = Ax_{t+k|t} + B\Delta u_{t+k|t} \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (13-4)$$

$$x_{t+k|t} \in \mathcal{X}, \quad \Delta u_{t+k|t} \in \mathcal{U}, \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (14-4)$$

$$x_{t+N} \in \mathcal{X}_f \quad (15-4)$$

$$x(t|t) = x(t) \quad (16-4)$$

$$\Delta U_t = \{\Delta u_{t|t}, \Delta u_{t+1|t}, \dots, \Delta u_{t+N-1|t}\} \quad (17-4)$$

قضیه زیر نحوه پایدارسازی کنترل کننده پیش بین با دو مد عملکردی را بیان می کند.

قضیه (۱-۴) [۲۰]: فرض کنید شرایط زیر برای کنترل کننده محلی $K(x)$ ، مجموعه نهایی \mathcal{X}_f مجموعه

ورودی های کنترلی قابل قبول \mathcal{U} ، نقطه تعادل مبدا و هزینه نهایی $p(x_{t+N|t})$ برقرار هستند:

$$0 \in \mathcal{X}_f \quad (18-4)$$

$$Ax_{t+k|t} + B\Delta u_{t+k|t} \in \mathcal{X}_f, \quad \forall x \in \mathcal{X}_f \quad (19-4)$$

$$p(0) = 0, \quad p > 0 \quad (20-4)$$

$$\begin{aligned} & (x_{t+k+1|t}) - p(x_{t+k|t}) \\ & \leq -q(x_{t+k|t}, L(x_{t+k|t})), \quad \forall x_{t+k} \in \mathcal{X}_f \end{aligned} \quad (21-4)$$

$$K(x) \in \mathcal{U}, \quad \forall x \in \mathcal{X}_f \quad (22-4)$$

در این صورت، با فرض ممکن بودن شرط اولیه سیستم، کنترل کننده پیش بین با استفاده از مسئله

بهینه سازی زیر، پایداری مجانبی سیستم ریزشکه (۵-۴) را تضمین می کند.

یک نکته مهم در قضیه فوق، نحوه تعیین هزینه نهایی p ، مجموعه پایای \mathcal{X}_f و کنترل کننده محلی $K(x)$ است. به طور کلی \mathcal{X}_f یک مجموعه پایا حول نقطه تعادل است که برای سیستم حلقه- بسته شده با کنترل کننده محلی محاسبه می شود. هزینه نهایی p و همچنین کنترل کننده محلی $K(x)$ نیز باید طوری تعیین شوند که شرط (۴-۲۱) در صورت قضیه برقرار بماند. برای سیستم های خطی تغییر ناپذیر با زمان می توان اثبات نمود که هزینه نهایی و کنترل کننده محلی از روابط زیر به- دست می آید.

$$p(x_N) = x_{t+N|t}^T L x_{t+N|t} \quad (۴-۲۳)$$

$$L = A^T L A + Q - A^T L B (B^T L B + R)^{-1} B^T L A \quad (۴-۲۴)$$

$$K(x) = -F x(t) \quad (۴-۲۵)$$

$$F = (B^T L B + R)^{-1} B^T L \quad (۴-۲۶)$$

در رابطه (۴-۲۴)، Q یک ماتریس مثبت معین می باشد. همان گونه از روابط (۴-۲۴) تا (۴-۲۶) قابل برداشت است، هزینه نهایی و کنترل کننده محلی از حل یک مسئله تنظیم کننده خطی محاسبه می شوند.

مسئله بهینه سازی تعریف شده توسط روابط (۴-۱۲) تا (۴-۱۷) به گونه ای نیست که مستقیماً توسط الگوریتم های استاندارد بهینه سازی ریاضی پشتیبانی شود. بنابراین نیاز است که مسئله فوق به فرم یک مسئله بهینه سازی استاندارد تبدیل شود.

با استفاده از رابطه (۴-۲۳) و همچنین تعریف هزینه q به صورت زیر است.

$$\begin{aligned}
 q(x_{t+k|t}, u_{t+k|t}) & \quad (27-4) \\
 &= x_{t+k|t}^T Q_1 x_{t+k|t} \\
 &+ \Delta u_{t+k|t}^T R \Delta u_{t+k|t}
 \end{aligned}$$

می توان تابع هزینه تعریف شده توسط رابطه (۴-۱۲) را به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$J(U) = X^T \bar{Q}_1 X + \Delta U^T \bar{R} \Delta U \quad (28-4)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_{t+1|t} \\ \vdots \\ x_{t+N|t} \end{bmatrix}, \quad \Delta U = \begin{bmatrix} \Delta u_{t|t} \\ \vdots \\ \Delta u_{t+N-1|t} \end{bmatrix}$$

با استفاده از مقادیر پیش بینی در طول افق پیش بین بردار X به صورت زیر قابل بیان است.

$$X = N \Delta U + Mx(t) \quad (29-4)$$

$$N = \begin{bmatrix} B & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{N-1}B & \dots & B \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} A \\ \vdots \\ A^N \end{bmatrix}$$

با جایگذاری رابطه (۴-۲۹) در (۴-۲۸) و حذف مقادیر ثابت، تابع هزینه مسئله به صورت زیر قابل بازنویسی است.

$$J(U) = \frac{1}{2} \Delta U^T H \Delta U + x(t)^T F \Delta U \quad (30-4)$$

$$H = 2(N^T \bar{Q}_1 N + \bar{R}), \quad F = 2M \bar{Q}_1 N$$

در حالت کلی، مجموعه های U ، X و X_f چند وجهی هایی هستند که یک ناحیه محدب را تشکیل می دهند. این مجموعه ها به صورت زیر تعریف می شوند.

$$\mathcal{U} = \{A_{\Delta u} \Delta u_{t+k|t} \leq b_{\Delta u}, \quad k = 0, \dots, N-1\} \quad (31-4)$$

$$\mathcal{X} = \{A_x \Delta x_{t+k|t} \leq b_x, \quad k = 0, \dots, N-1\} \quad (32-4)$$

$$\mathcal{X}_f = \{A_{x_N} \Delta x_{t+k|t} \leq b_{x_N}, \quad k = N\} \quad (33-4)$$

با استفاده از مقادیر پیش‌بینی شده و همچنین جایگذاری آن در قیود مسئله، می‌توان تمامی قیود مسئله را به فرم زیر بازنویسی کرد.

$$A_c \Delta U \leq B_c x(t) + b \quad (34-4)$$

در رابطه (34-4) ماتریس‌های A_c و B_c ماتریس‌هایی با ابعاد مناسب هستند.

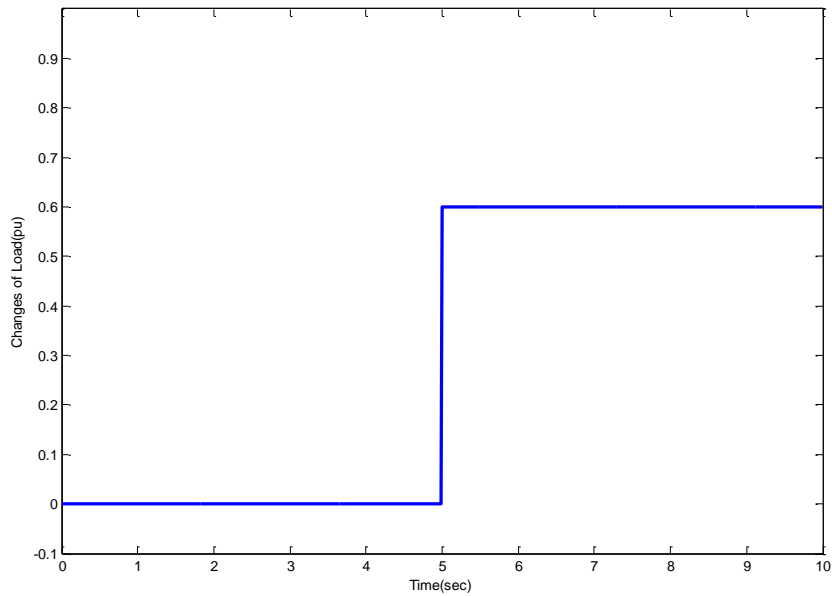
با توجه به اینکه تابع هزینه (30-4) از نوع درجه دو محدب و همچنین قیود مسئله (34-4) از نوع چند وجهی هستند، مسئله بهینه‌سازی از نوع برنامه‌ریزی درجه دو [37] خواهد بود. با توجه به محدب بودن این مسئله، می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های حل مسئله برنامه‌ریزی درجه دو مانند الگوریتم نقطه داخلی، یا الگوریتم مجموعه فعال [41] این مسئله را حل نمود. از دیدگاه پیچیدگی محاسباتی، حل مسائل محدب به مراتب پیچیدگی کمتری نسبت به مسائل غیر محدب دارند. اما با توجه به نیاز پیاده‌سازی برخط الگوریتم‌های فوق در کنترل‌کننده پیش‌بین، نیاز است که این الگوریتم‌ها برای استفاده در کنترل‌کننده پیش‌بین مورد بهبود واقع شوند [21].

۴-۳-۲- نتایج شبیه‌سازی

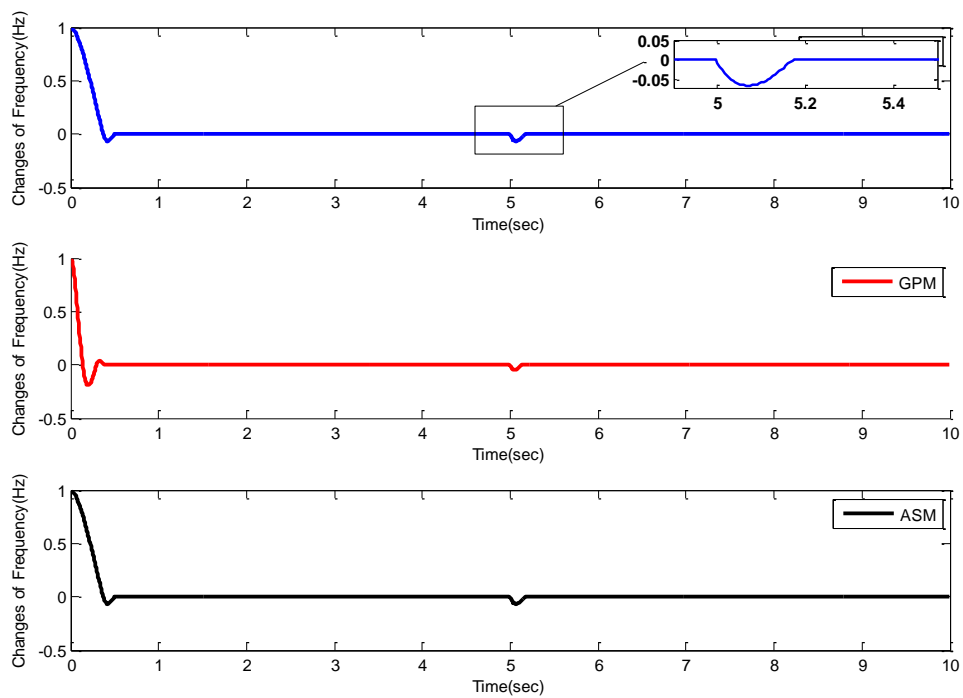
این بخش به بررسی نتایج شبیه‌سازی برای سیستم ریزش‌بکه مورد مطالعه در قالب سه سناریوی مختلف می‌پردازد. به‌منظور شبیه‌سازی از نرم‌افزار متلب نسخه ۲۰۱۷ و برای حل مساله برنامه‌ریزی درجه دو از تولباکس بهینه‌سازی نرم‌افزار متلب استفاده شده است.

۴-۳-۲-۱ - کنترل فرکانس در حضور تغییرات بار

در این بخش، تغییرات فرکانس به ازای تغییرات بار مختلف مورد بررسی قرار خواهد گرفت. تغییرات سیگنال کنترل نیز مقید است ($-0.04 \leq \Delta U \leq 0.04$). فرض شده است که تغییرات بار به صورت پله‌ای در ثانیه ۵ به سیستم اعمال می‌شود.

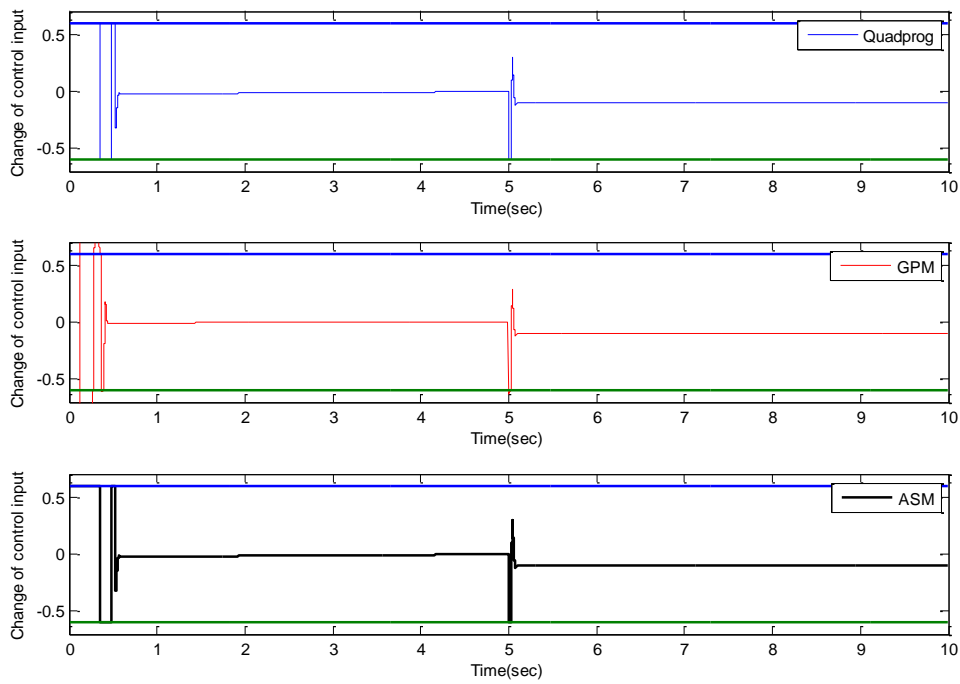


شکل ۴-۷: تغییرات بار اعمال شده به ریزشبه

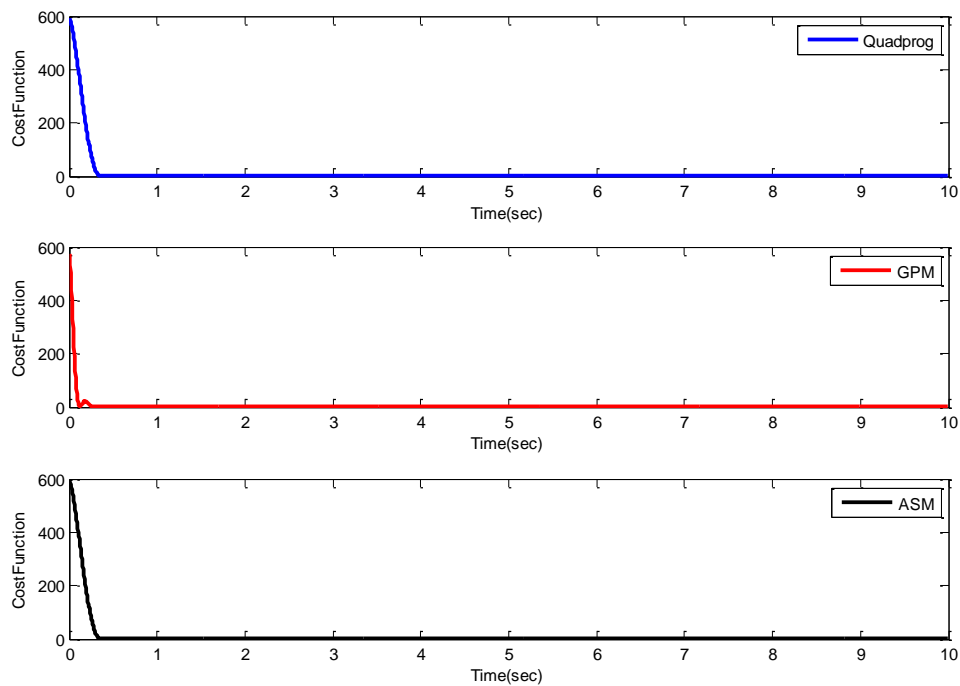


شکل ۴-۸: تغییرات فرکانس در حضور تغییرات بار

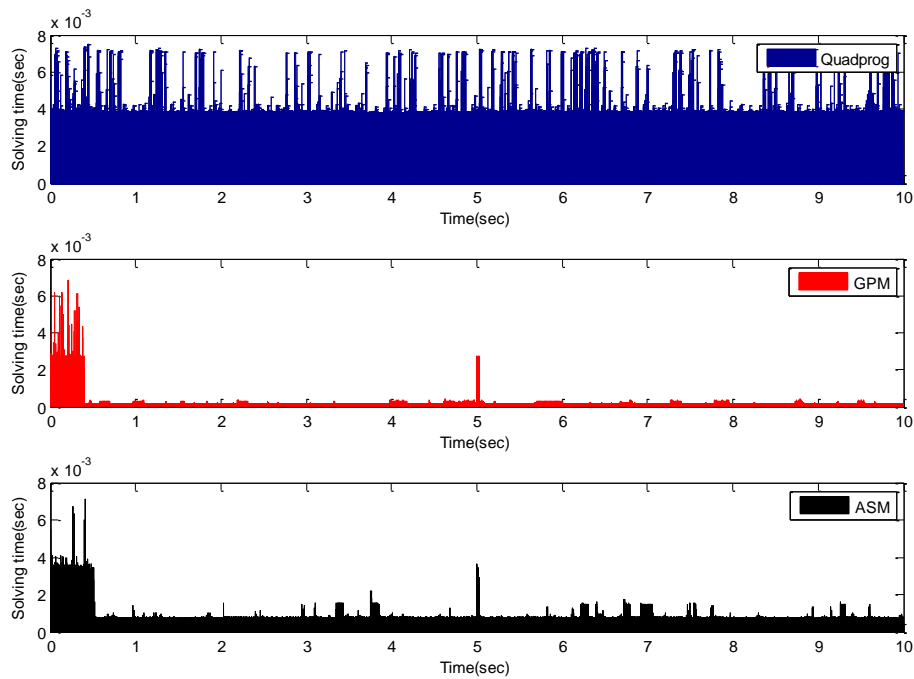
شکل‌های (۴-۷) و (۴-۸) نحوه تغییرات بار و تغییرات فرکانس را نمایش می‌دهند. همان‌گونه که در شکل (۴-۸) به خوبی نشان داده شده است، کنترل‌کننده پیش‌بین با دو مد عملکرد توانسته است با استفاده از هر سه روش بهینه‌سازی به خوبی اثر تغییرات بار را جبران کرده و تغییرات فرکانس را تا حد ممکن پایین نگه دارد. شکل (۴-۹) تغییرات سیگنال کنترل را نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۹: تغییرات سیگنال کنترلی در حضور تغییرات بار.



شکل ۴-۱۰: مقدار تابع هزینه کنترل کننده در حضور تغییرات بار.



شکل ۴-۱۱: مدت زمان صرف شده برای حل مسئله بهینه سازی کنترل کننده MPC در حضور تغییرات بار شکل (۴-۱۰) و شکل (۴-۱۱) به ترتیب مقدار تابع هزینه و مدت زمان صرف شده برای حل مسئله بهینه سازی کنترل کننده را نمایش می دهند. همان گونه که انتظار می رود، تغییرات سیگنال کنترل در محدوده مجاز قرار دارد و این سیگنال توانسته پایداری سیستم را در حضور قیود تحمیلی به مسئله برای هر سه حالت بهینه سازی تضمین نماید. جدول ۴-۲ میانگین تابع هزینه به ازای تغییرات مختلف بار برای هر سه روش بهینه سازی را نشان می دهد.

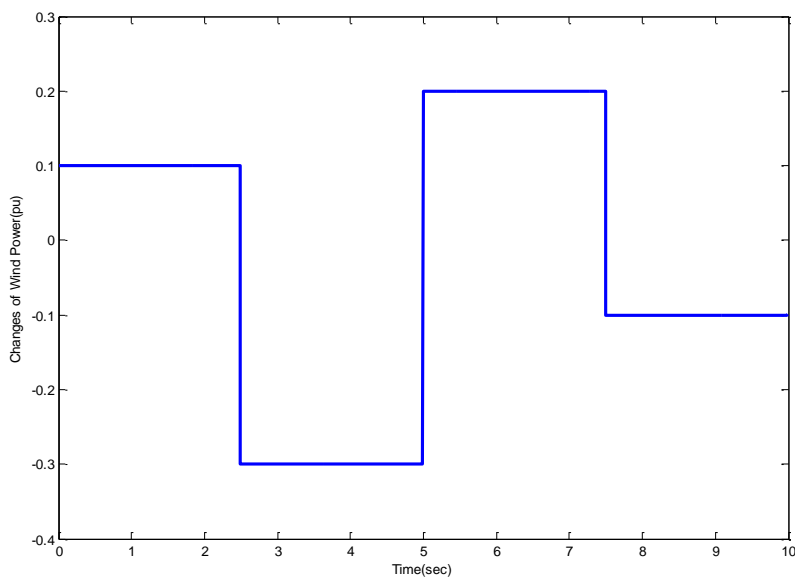
جدول ۴-۲: میانگین تابع هزینه به ازای تغییرات مختلف بار برای هر سه روش بهینه سازی

تغییرات بار	۱۰ درصد	۲۰ درصد	۳۰ درصد	۴۰ درصد	۵۰ درصد	۶۰ درصد
Quadprog	۱۱,۰۶۳۷	۱۱,۰۶۶۲	۱۱,۰۸۸۵	۱۱,۲۲۱۱	۱۱,۹۶۸۸	۱۷,۰۰۱۵
GPM	۷,۶۵۷۰	۷,۶۵۹۴	۷,۶۷۸۳	۷,۷۶۸۸	۸,۱۱۰۰	۹,۲۳۵۴
ASM	۱۱,۰۷۸۳	۱۱,۰۸۰۹	۱۱,۱۰۳۷	۱۱,۲۳۶۴	۱۱,۹۸۵۹	۱۷,۰۲۸۱

با توجه به جدول ۴-۱ می‌توان گفت تابع هزینه تغییرات زیادی در ازای تغییرات بار از ۱۰ درصد تا ۶۰ درصد ندارد و هر سه راه حل بهینه‌سازی به راحتی می‌توانند این تغییرات را جبران کنند. همچنین روش GPM بهتر از دو روش دیگر می‌تواند سیستم را کنترل کند و تغییرات تابع هزینه در این روش کمتر از دو روش دیگر است.

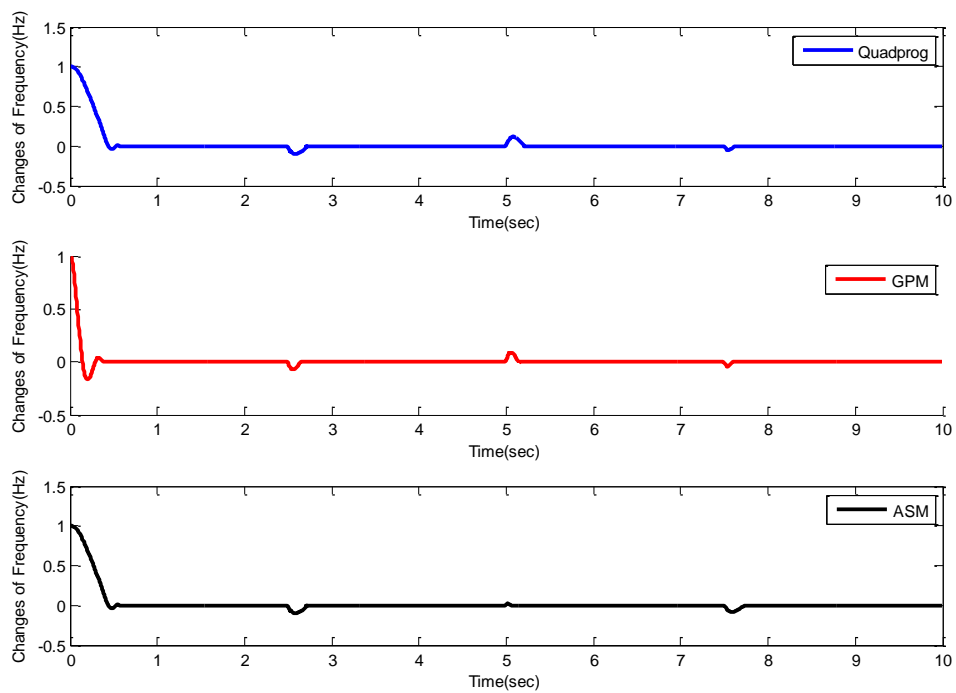
۴-۳-۲ کنترل فرکانس در حضور تغییرات توان باد

این بخش به بررسی کنترل‌کننده طراحی شده به منظور کنترل فرکانس در حضور تغییرات ۶۰ درصدی توان باد می‌پردازد. مانند بخش قبل، در این بخش نیز سیگنال کنترل مقید است. تغییرات باد نیز به صورت سیگنال تصادفی انتخاب شده است. شکل (۴-۱۲) نحوه تغییرات باد و شکل (۴-۱۳) تغییرات فرکانس را نمایش می‌دهد.

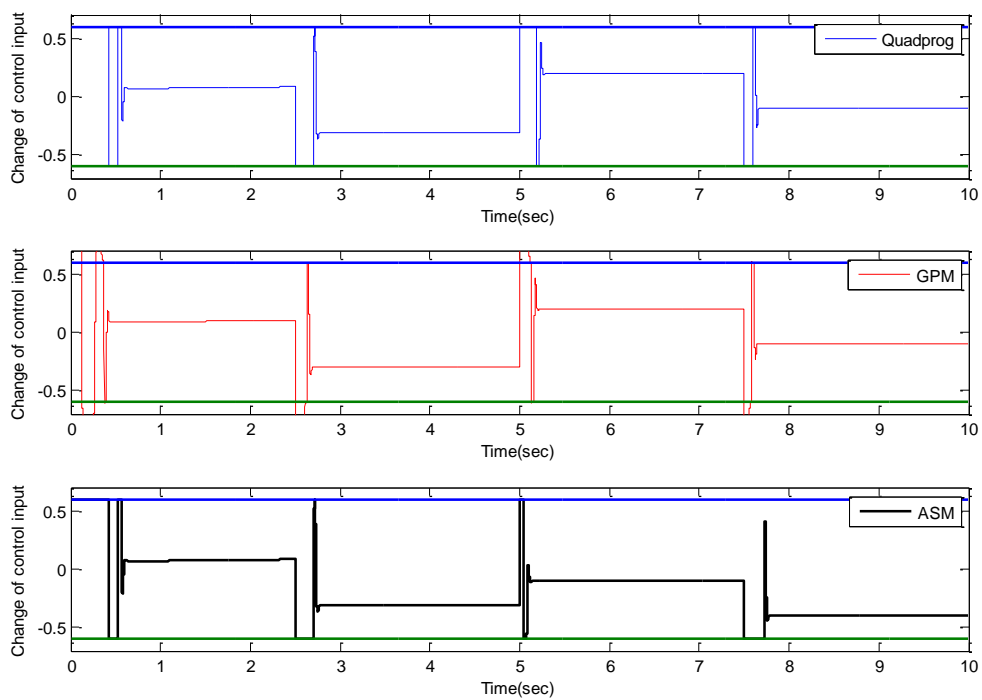


شکل ۴-۱۲: نحوه تغییرات توان باد

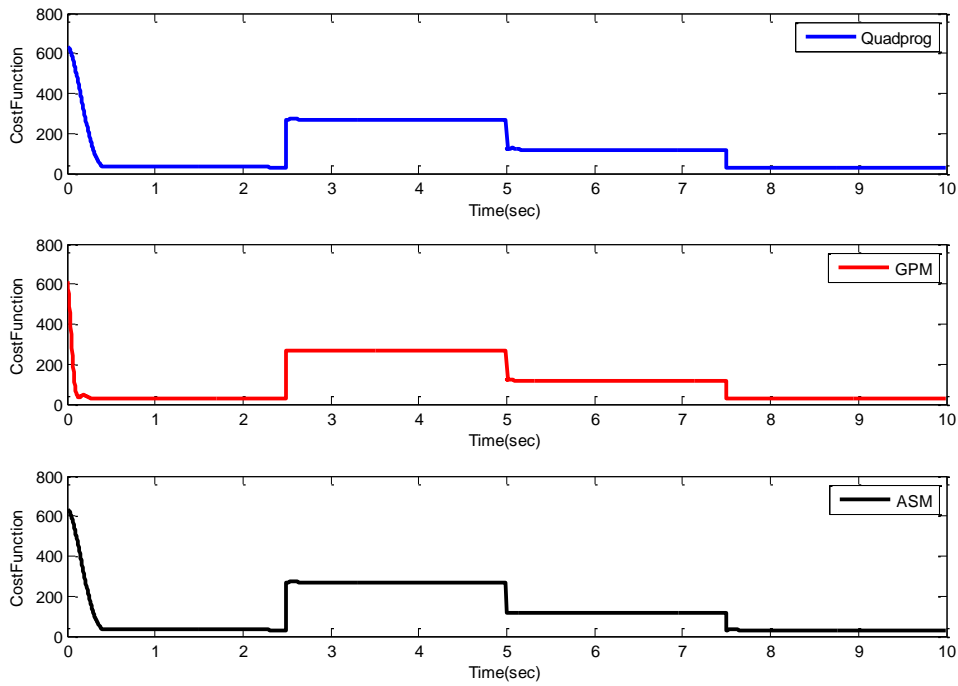
همان‌گونه که در شکل‌های (۴-۱۳) و (۴-۱۴) نشان داده شده است، کنترل‌کننده پیش‌بین مدل توانسته است به خوبی در حضور تغییرات توان باد نیز فرکانس را ثابت نگه دارد. تغییرات سیگنال کنترل در حضور تغییرات توان باد در شکل (۴-۱۳) نشان داده شده است.



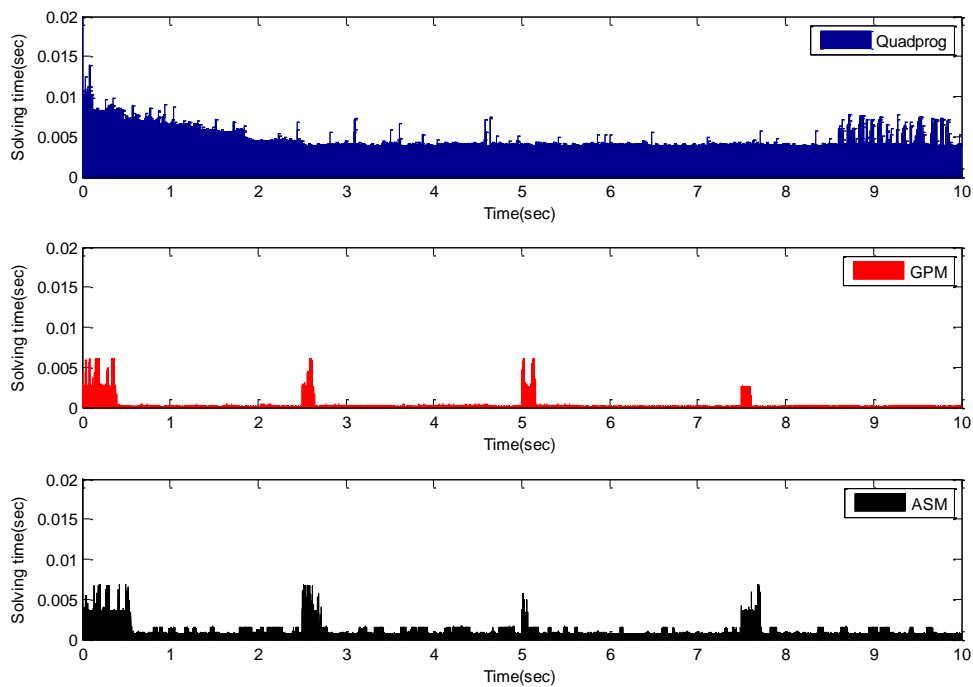
شکل ۴-۱۳: نحوه تغییرات فرکانس در حضور تغییرات توان باد.



شکل ۴-۱۴: تغییرات سیگنال کنترل در حضور تغییرات توان باد.



شکل ۴-۱۵: مقدار تابع هزینه کنترل کننده در حضور تغییرات توان باد.



شکل ۴-۱۶: مدت زمان صرف شده برای حل مسئله بهینه سازی کنترل کننده MPC در حضور تغییرات توان باد. در این حالت نیز سیگنال کنترل در محدوده مجاز قرار دارد و این سیگنال قادر به پایدارسازی سیستم

در حضور قیود فیزیکی می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، سیگنال به‌دست آمده دارای نویز می‌باشد که دلیل آن نویزی بودن سیگنال باد است.

جدول ۳-۴: تغییرات در میانگین مقدار تابع هزینه به ازای میزان مختلف تغییرات توان باد

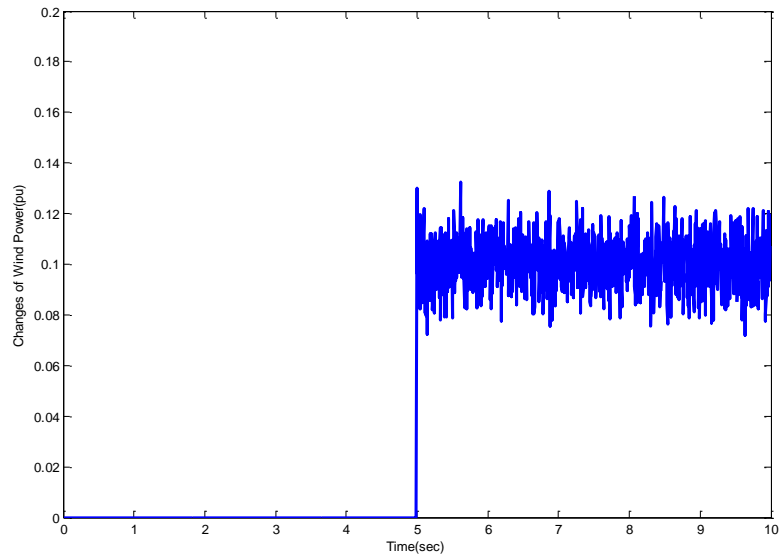
تغییرات باد	۱۰ درصد	۲۰ درصد	۳۰ درصد	۴۰ درصد	۵۰ درصد	۶۰ درصد
Quadprog	۳۳,۲۰۳۰	۹۹,۶۵۶۰	۲۱۰,۴۱۰۸	۳۶۵,۵۸۶۶	۵۶۵,۶۰۱۶	۸۱۳,۹۴۴۱
GPM	۳۳,۱۸۰۷	۹۹,۶۱۹۶	۲۱۰,۳۶۳۰	۳۶۵,۵۱۳۱	۵۶۵,۶۰۴۴	۸۱۳,۹۸۵۸
ASM	۳۳,۲۰۷۹	۹۹,۶۱۱۷	۲۱۰,۳۷۴۷	۳۶۵,۴۷۳۹	۵۶۵,۶۳۰۹	۸۱۴,۱۷۵۹

همان‌طور که در جدول ۳-۴ مشاهده می‌شود هر سه روش بهینه‌سازی تقریباً به یک صورت کار می‌کنند و مدت زمانی که آنها موفق به حل مسئله بهینه‌سازی می‌شوند، تقریباً به یک اندازه است.

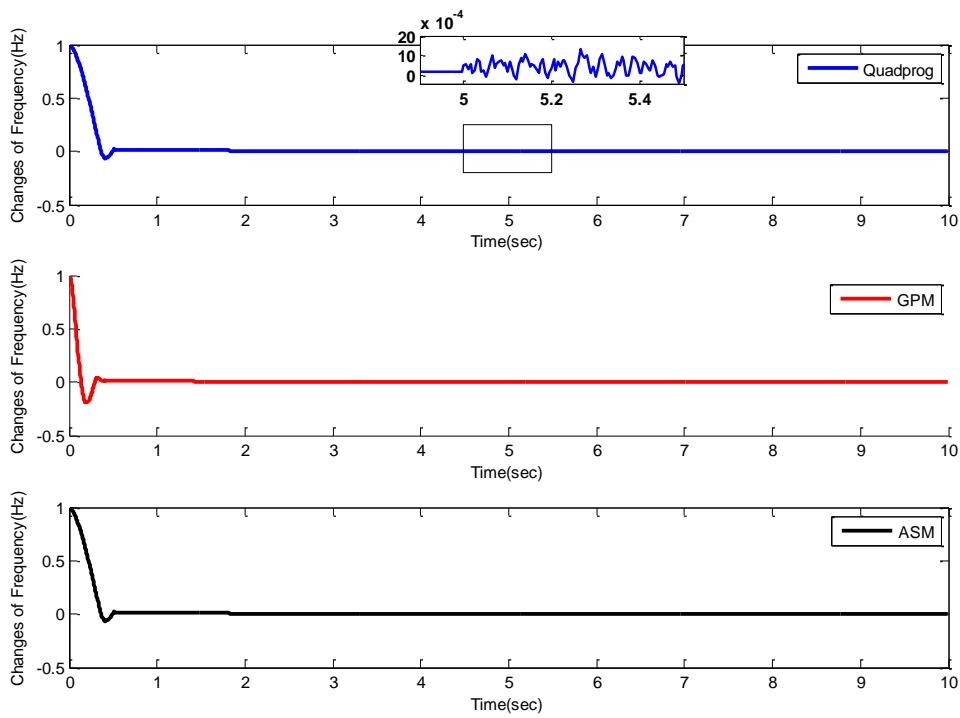
۳-۲-۳-۴ - کنترل فرکانس در حضور تغییرات بار و تغییرات توان باد

در این قسمت تغییرات بار و تغییرات توان باد (هر دو به اندازه ۶۰ درصد تغییرات دارند) به‌طور همزمان به سیستم اعمال می‌شوند. نحوه تغییرات بار به‌صورت شکل (۴-۷) و تغییرات توان باد به‌صورت شکل (۴-۱۷) است. نحوه تغییرات فرکانس در این حالت در شکل (۴-۱۸) نشان داده شده است.

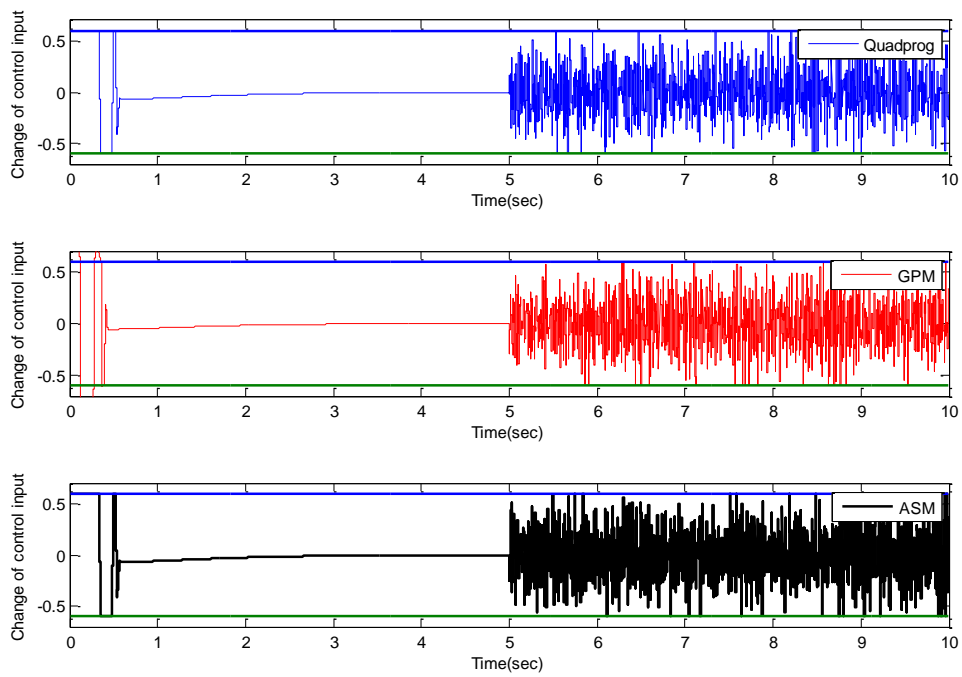
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در حالت تغییر همزمان بار و توان باد کنترل‌کننده پیش‌بین با دو مد عملکردی قادر به پایدارسازی سیستم است.



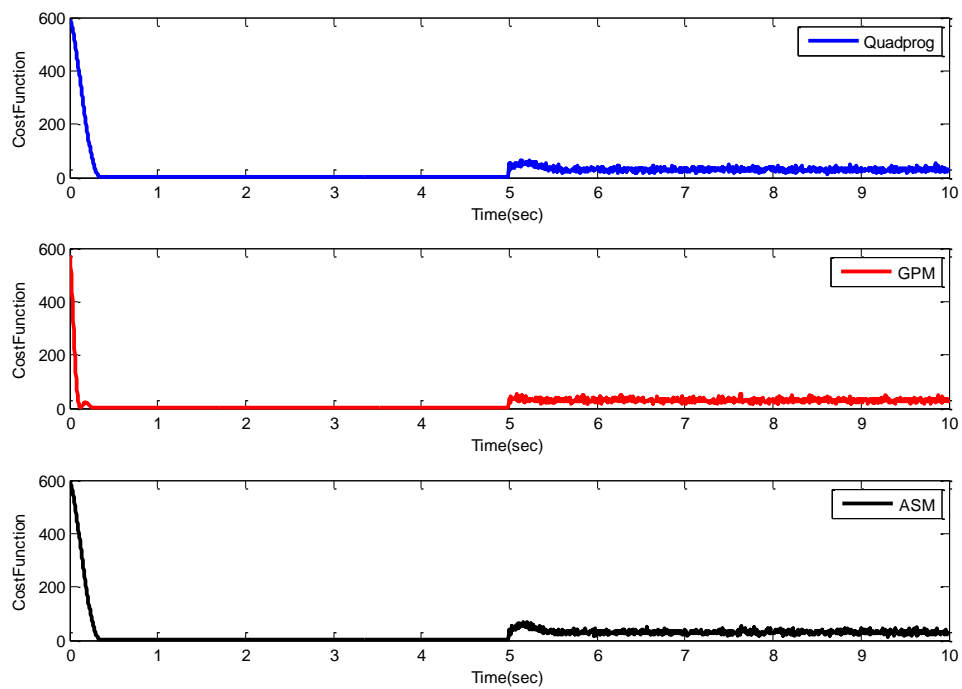
شکل ۴-۱۷: نحوه تغییرات توان باد



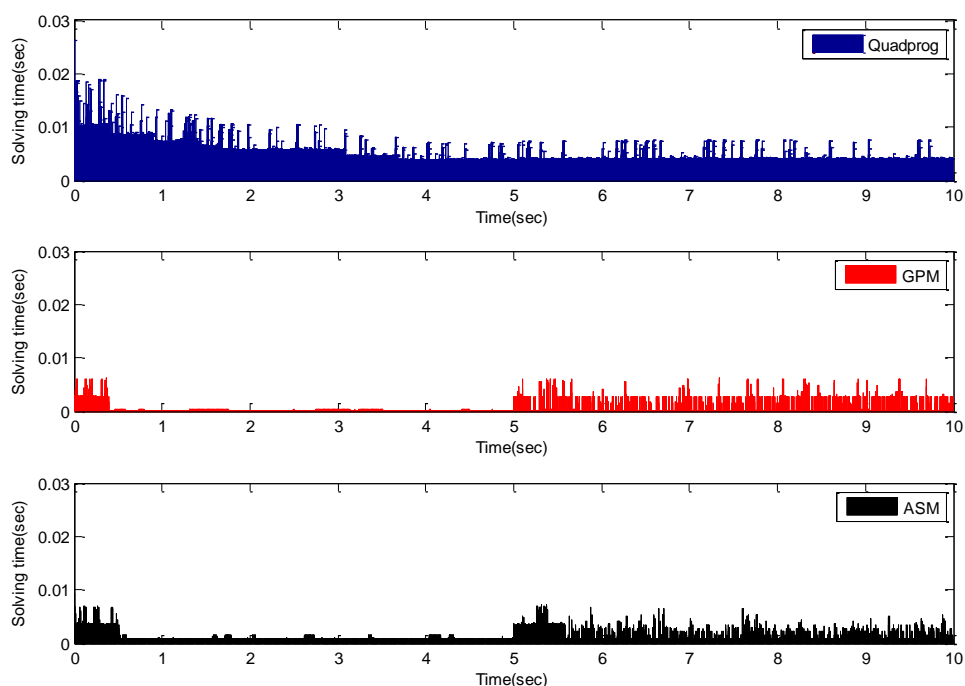
شکل ۴-۱۸: تغییرات فرکانس در حضور تغییرات بار و توان باد.



شکل ۴-۱۹: تغییرات سیگنال کنترل در حضور تغییرات بار و توان باد.



شکل ۴-۲۰: مقدار تابع هزینه کنترل کننده در حضور تغییرات بار و توان باد.

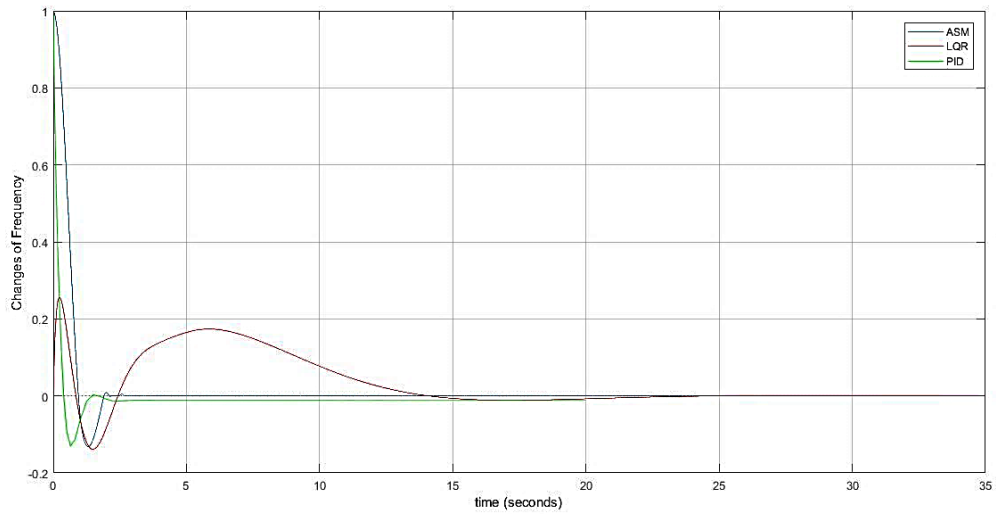


شکل ۴-۲۱: مدت زمان صرف شده برای حل مسئله بهینه سازی کنترل کننده MPC در حضور تغییرات بار و توان باد

بنابراین، کنترل کننده پیش بین با دو مد عملکرد قادر به پایدارسازی ریزش شبکه مورد مطالعه در هر سه موقعیت مذکور است. تنها محدودیت این کنترل کننده حجم محاسبات بالا در مقایسه با سایر روش های کنترل است. این پیچیدگی شامل حل یک مسئله بهینه سازی در هر لحظه از زمان نمونه برداری است. با استفاده از الگوریتم های بسیار سریع در حل مسائل محدب و همچنین بهبود آنها می توان تا حد مطلوبی پیچیدگی محاسباتی در کنترل کننده پیش بین را کاهش داد.

۴-۳-۴ - مقایسه برخی کنترل کننده ها با کنترل کننده پیش بین

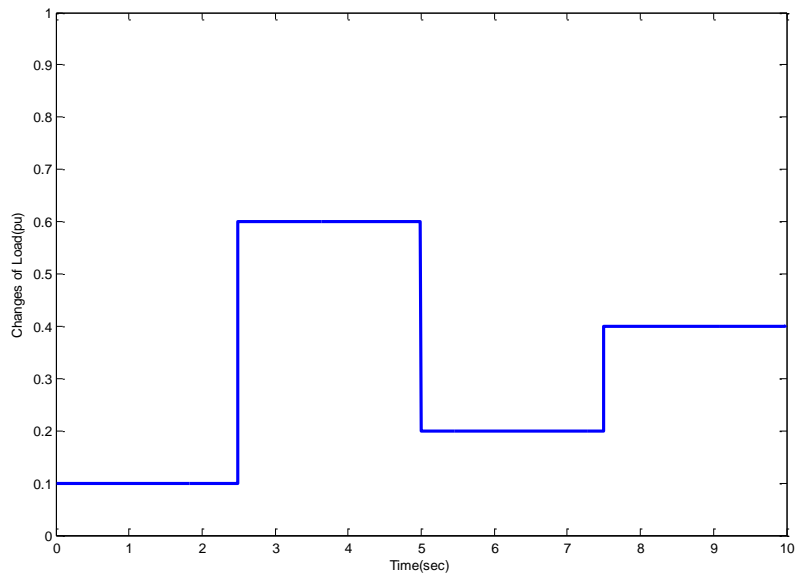
در این قسمت از سه نوع کنترل کننده پیش بین، PID و LQR برای کنترل فرکانس ریزش شبکه استفاده شده است. سپس نتایج حاصل از هر سه کنترل کننده با یکدیگر مقایسه می شود.



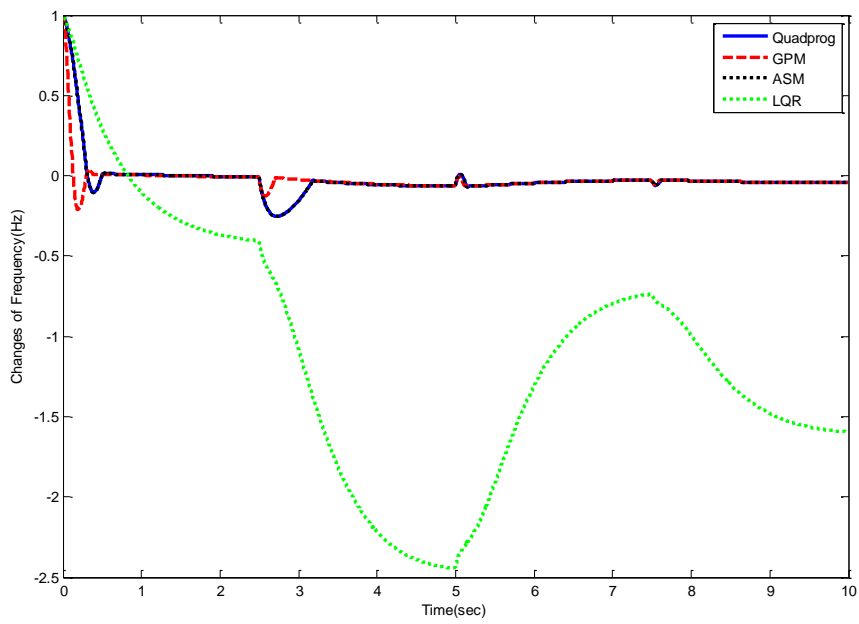
شکل ۴-۲۲: کنترل فرکانس به وسیله سه کنترل کننده مدل پیش‌بین، PID و LQR

همان‌طور که مشاهده می‌شود کنترل کننده پیش‌بین در زمان کمتری نسبت به دو کنترل کننده دیگر باعث جبران فرکانس ریزش‌بکه شده و همچنین عملکرد آن در مقابل تغییرات شدید بار و وزش باد بهتر است. کنترل کننده پیش‌بین به دلیل استفاده از بهینه‌سازی در عمل کنترل از سیگنال کنترلی کمتری نسبت به سایر کنترل کننده‌ها استفاده می‌کند و همین امر باعث افزایش کارایی این کنترل کننده در عمل می‌شود. در ادامه نتایج حاصل از تغییرات بار و توان باد برای مقایسه روش‌های انجام شده در این پایان‌نامه با LQR آورده شده است. کنترل کننده PID چون به صورت آفلاین عمل می‌کند، نمی‌تواند در صورت تغییرات سرعت باد، کنترل را انجام دهد.

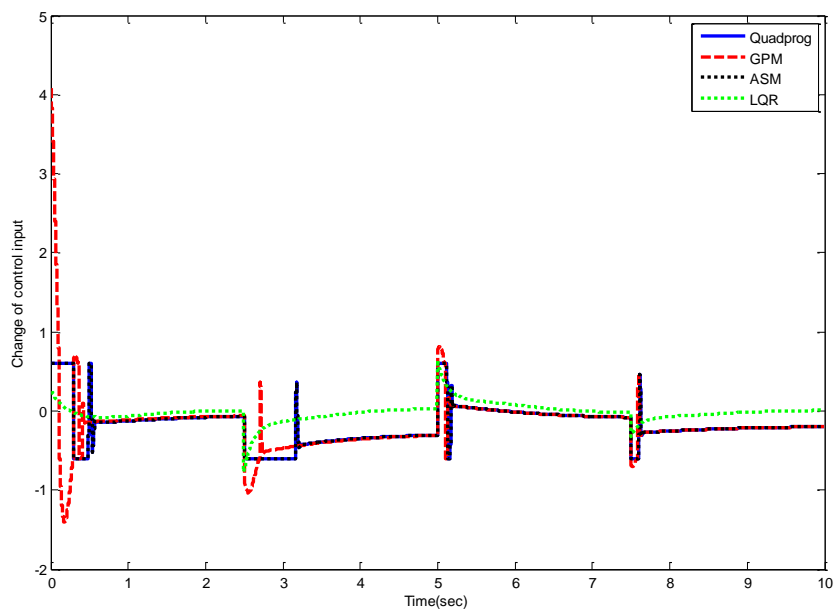
در این قسمت نتایج حاصل از اعمال تغییرات بار شکل (۴-۲۳) مورد بررسی قرار می‌گیرد.



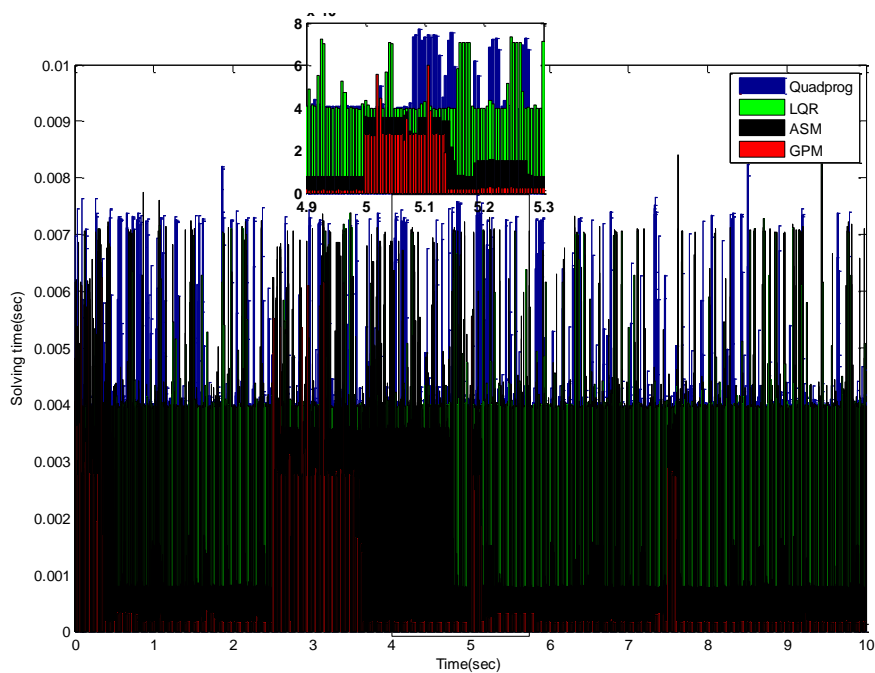
شکل ۴-۲۳: تغییرات بار



شکل ۴-۲۴: نمودار تغییرات فرکانس در حضور تغییرات بار در هر چهار روش



شکل ۴-۲۵: سیگنال کنترلی در حضور تغییرات بار برای هر چهار روش

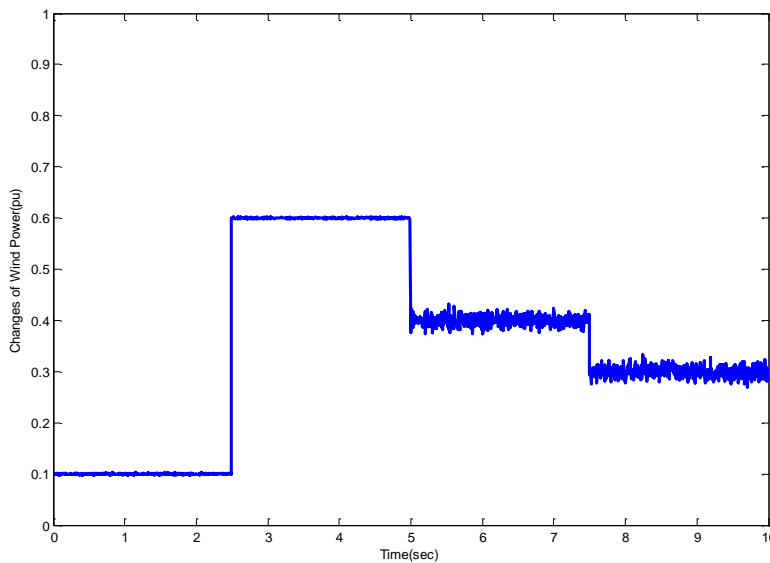


شکل ۴-۲۶: نمودار سرعت پاسخگویی به مسئله در حضور تغییرات بار برای هر چهار روش

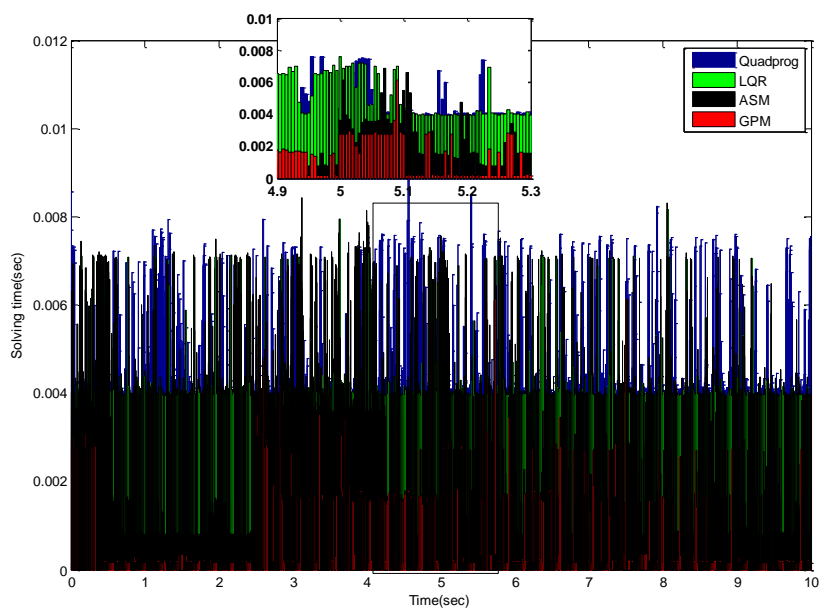
همان‌طور که مشاهده می‌شود با توجه به شکل‌های (۴-۲۴) تا (۴-۲۶)، کنترل‌کننده LQR قادر به کنترل فرکانس در حضور تغییرات بار نخواهد بود حتی بدون وجود قید در پایداری سیستم اما

کنترل کننده MPC به راحتی سیستم را کنترل می کند. الگوریتم GPM برای حل این مسئله زمان بیشتری نسبت به دو روش دیگر برای حل مسئله بهینه سازی صرف می کند این در حالی است که روش ASM کمترین زمان پاسخگویی را دارد. از دیگر مزایای MPC این است که می توان قیدهایی با توجه به دینامیک مسئله در نظر گرفت که باعث کوچکتر شدن سیگنال کنترلی می شود. در شکل (۴-۲۵) مشاهده می شود که بازه سیگنال کنترلی بین $-0.6, 0.6$ است این در حالی است که بازه سیگنال کنترلی در LQR از منفی بی نهایت تا بی نهایت قابل تغییر است و باز هم قادر به کنترل کردن سیستم نخواهد بود.

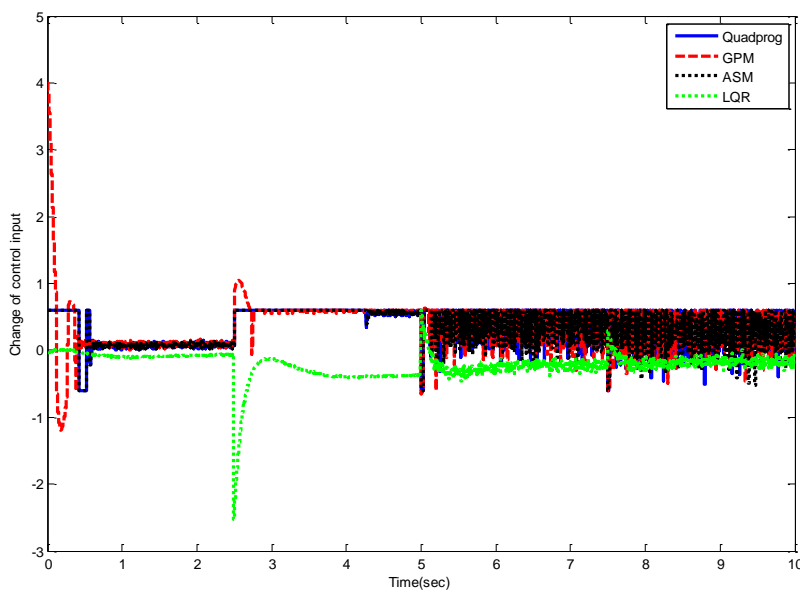
در این قسمت نتایج اعمال تغییرات توان باد شکل (۴-۲۷) مورد بررسی قرار می گیرد.



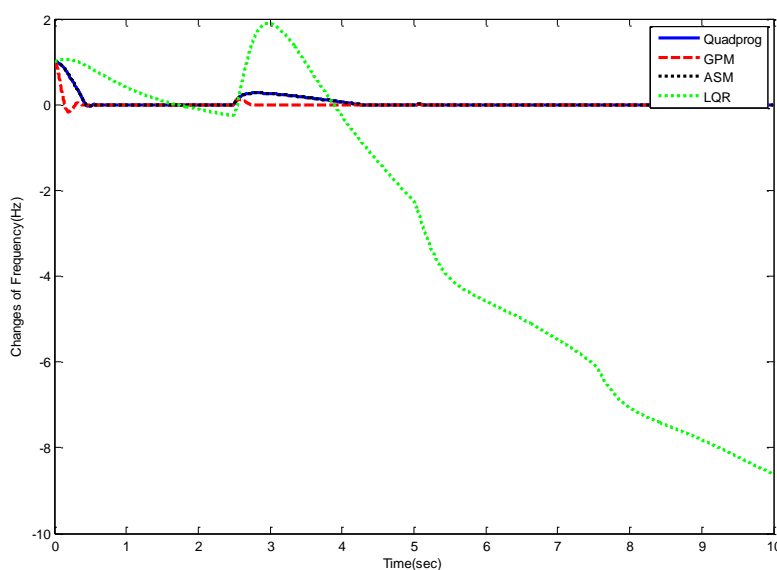
شکل ۴-۲۷: تغییرات توان باد



شکل ۴-۲۸: نمودار سرعت پاسخگویی به مسئله در حضور تغییرات توان باد برای هر چهار روش



شکل ۴-۲۹: سیگنال کنترلی در حضور تغییرات توان باد برای هر چهار روش

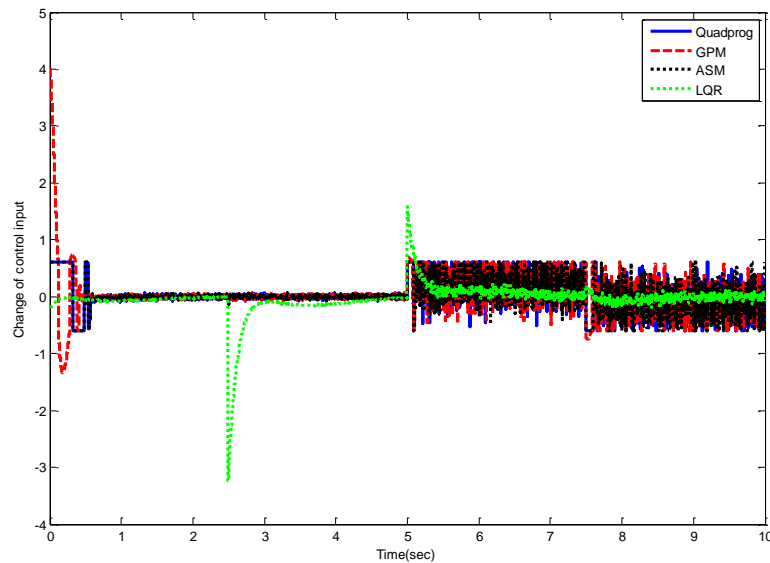


شکل ۴-۳۰: نمودار تغییرات فرکانس در حضور تغییرات توان باد در هر چهار روش

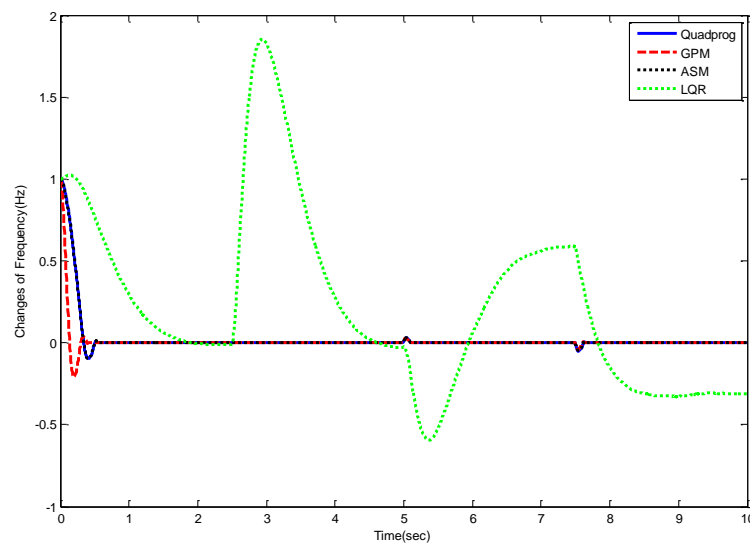
همان‌طور که با توجه به شکل‌های (۴-۲۸) تا (۴-۳۰) مشاهده می‌شود، تغییرات توان باد تاثیر بیشتری نسبت به تغییرات بار دارد. در اینجا تغییرات باد به‌صورت درصدی به سیستم اضافه شده است. تغییرات توان باد در اینجا علاوه بر تغییر در یک میزان معین به‌صورت مقادیر متغیر (مانند نویز) در نظر گرفته شده است که در شکل (۴-۲۷) قابل مشاهده است. در این قسمت کنترل‌کننده LQR دیگر حتی قادر به پایدار کردن سیستم نیز نمی‌باشد این در حالی است که کنترل‌کننده MPC علاوه بر پایدار کردن سیستم می‌تواند آن را به‌طور کامل پایدار کند. در شکل (۴-۲۹) زمان مورد نیاز هر کدام از حل‌کننده‌ها برای حل این مسئله مشاهده می‌شود که روش GPM در برخی لحظه‌ها زمان بیشتری نسبت به دو روش دیگر صرف می‌کند و در برخی دیگر از زمان‌ها بسیار کمتر زمان می‌برد تا بتواند مسئله بهینه‌سازی را حل کند اما در حالت کلی از نظر زمانی الگوریتم ASM بسیار سریع‌تر از سایر حل‌کننده‌ها می‌تواند جواب بهینه را بدست آورد. سیگنال کنترلی در MPC بسیار کوچکتر از LQR است اما با همین قیدها قادر است سیستم را به بهترین روش کنترل کرده و ما را به بهترین جواب ممکن برساند این در حالی است که کنترل‌کننده LQR با بازه سیگنال کنترلی بی‌نهایت و همچنین استفاده از سیگنال کنترلی بزرگتر از سیگنال کنترلی MPC، توانایی کنترل سیستم و پایدار

کردن آن را ندارد.

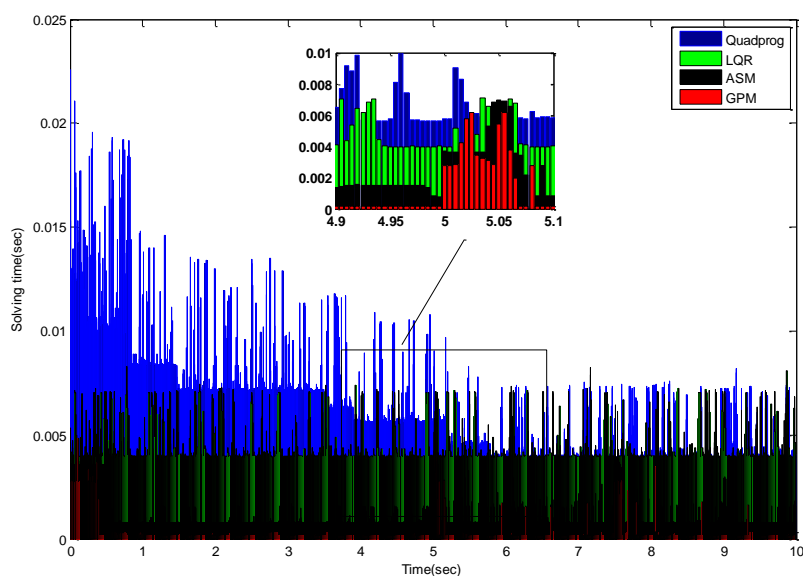
در این قسمت تغییرات بار شکل (۲۲-۴) و تغییرات توان باد شکل (۲۷-۴) به طور همزمان به سیستم اعمال شده است و نتایج به صورت زیر است.



شکل ۴-۳۱: سیگنال کنترلی در حضور تغییرات بار و توان باد برای هر چهار روش



شکل ۴-۳۲: مقایسه خروجی کنترل شده در حضور تغییرات بار و توان باد در هر چهار روش



شکل ۴-۳۳: نمودار مقایسه سرعت پاسخگویی در حضور تغییرات بار و توان باد در چهار روش

در این قسمت شکل‌های (۴-۳۱) تا (۴-۳۳) نشان می‌دهند، روش GPM نسبت به روش‌های دیگر در مدت زمان کمتری مسئله بهینه‌سازی را حل کرده و سیستم را پایدار می‌کند. نکته‌ای که در این حالت وجود دارد این است که کنترل‌کننده LQR نیز توانست سیستم را با سیگنال کنترل بسیار بزرگتر از روش‌های دیگر کنترل کند، البته جواب دقیق و قابل قبولی بدست نیاورد اما بر خلاف دو حالت قبل سیستم را کنترل کرد و دلیل آن این است که افزایش سرعت باد کمبود توان برای کنترل فرکانس در صورت افزایش بار را تامین کرده است.

در نتیجه می‌توان دید که روش GPM نسبت به روش‌های دیگر با سرعت بیشتری مسئله را حل می‌کند و بعد از آن روش ASM است که نسبت به حل‌کننده Quadprog متلب بهترین سرعت را دارد که این مزیت روش‌های پیشنهادی در این پایان‌نامه را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، کنترل‌کننده پیش‌بین با دو مد عملکرد برای یک ریزشبکه مورد تحلیل و بررسی واقع گردید. با توجه به حساسیت ریزشبکه‌ها به تغییرات بار و سرعت باد در توربین‌های بادی مورد استفاده در آنها، ثابت نگه داشتن فرکانس در ریزشبکه امر بسیار مهمی است. مزایای استفاده از کنترل پیش‌بین شامل استفاده از مفاهیم اولیه‌ی کنترل در طراحی، تنظیم ساده کنترل‌کننده، قابلیت توسعه برای سیستم‌های پیچیده، غیرمینیمم فاز و تاخیردار (اکثر سیستم‌های موجود در طبیعت دارای این خصوصیات هستند) و قابلیت توسعه آسان برای سیستم‌های چندورودی/ چندخروجی (MIMO) است. پیاده‌سازی راحت قانون کنترل و قیده‌های سیگنال کنترل، خروجی و حالت در فرآیند طراحی نیز از دیگر مزایای این روش کنترلی است. با توجه به مزایای کنترل پیش‌بین می‌توان معایب سایر کنترل‌کننده‌های استفاده شده برای کنترل فرکانس را رفع کرد. در واقع هدف اصلی قوانین کنترلی در این روش این است که خروجی پروسه در آینده بر روی افق معین، مسیر مرجع تعیین شده را دنبال کند و هم‌زمان فرمان کنترل را برای رسیدن به هدف تعیین کند. لازم به ذکر است که کنترل پیش‌بین به دلیل تطبیق‌پذیری، در صنعت کاربرد زیادی دارد. همان‌گونه که نشان داده شد، کنترل‌کننده پیش‌بین با دو مد عملکرد می‌تواند به خوبی پایداری حلقه-بسته سیستم در حضور قیود فیزیکی را تضمین نماید. این کنترل‌کننده همان‌طور که در بخش شبیه‌سازی بیان گردید می‌تواند برای کنترل فرکانس ریزشبکه‌ها در شرایط مختلف به خوبی عمل کنترل فرکانس را انجام دهد. همچنین الگوریتم بهینه‌سازی به نام مجموعه فعال دوگان و الگوریتم گرادیان تصویر شده برای حل مسئله برنامه‌ریزی درجه دو به‌منظور استفاده در کنترل‌کننده پیش‌بین مورد بررسی و تحلیل واقع گردید. برخلاف روش‌های مشابه، جهت حل مسئله برنامه‌ریزی درجه دو از فرم دوگان این مسئله استفاده گردید. استفاده از مسئله دوگان موجب کاهش پیچیدگی محاسباتی مسئله شده و باعث می‌شود سیگنال کنترل در زمان کمتری تولید گردد. همچنین، در بخش مربوط به شبیه‌سازی نشان داده شد که الگوریتم مجموعه فعال دوگان و الگوریتم گرادیان تصویر شده در مقایسه با الگوریتم‌های

مشابه مانند الگوریتم نقطه داخلی با حفظ بهینگی جواب، دارای حجم محاسبات کمتری است. در نتیجه این الگوریتم‌ها می‌توانند در سیستم‌های سریع و با زمان نمونه‌برداری کوچک مورد استفاده و بهره‌برداری واقع شود. در پایان پیشنهادهایی برای انجام مطالعات آتی آورده شده است.

۵-۲- پیشنهادها برای مطالعات آتی

تحقیقات زیر جهت انجام مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد:

۱. پیاده‌سازی روش ارائه‌شده برای یک ریزشبکه واقعی به‌منظور کنترل فرکانس و ولتاژ آن در شرایط مختلف آب و هوایی. همچنین پیاده‌سازی عملی آن و مقایسه نتایج آن با سایر کنترل‌کننده‌ها.
۲. به دلیل روی دادن اغتشاش در سیستم‌های قدرت و به وجود آمدن عدم قطعیت در آن نیاز به کنترل‌کننده‌ای است که در مقابل این عدم قطعیت‌ها مقاوم باشد، به همین منظور می‌توان خاصیت مقاوم بودن نسبت به عدم قطعیت را به این کنترل‌کننده اضافه کرد (کنترل مدل پیش‌بین مقاوم).
۳. با استفاده از روش اثبات پایداری لیاپانوف، پایداری مستقل از تابع هزینه و در مفهوم پایداری لیاپانوف را به‌دست آورد.

- [1] Chowdhury, S. and P. Crossley, *Microgrids and active distribution networks* 2009: The Institution of Engineering and Technology.
- [2] Kroposki, B., et al., *Making microgrids work*. IEEE power and energy magazine, 2008. **6**(3).
- [3] Meliopoulos, A.S. and G.J. Cokkinides, *Small Signal Stability Analysis of the Integrated Power System-MicroGrid Model*. Bulk Power System Dynamics and Control, Italy, 2004.
- [4] Viral, R. and D. Khatod, *Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. **16**(7): p. 5146-5165.
- [5] Mohamed, F.A., *Microgrid modelling and online management*. 2008.
- [6] Basak, P., et al., *A literature review on integration of distributed energy resources in the perspective of control, protection and stability of microgrid*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. **16**(8): p. 5545-5556.
- [7] Santacana, E., et al., *Getting smart*. IEEE power and energy magazine, 2010. **8**(2): p. 41-48.
- [8] Katiraei, F., M. Iravani, and P. Lehn, *Small-signal dynamic model of a micro-grid including conventional and electronically interfaced distributed resources*. IET generation, transmission & distribution, 2007. **1**(3): p. 369-378.
- [9] Jiayi, H., J. Chuanwen, and X. Rong, *A review on distributed energy resources and MicroGrid*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008. **12**(9): p. 2472-2483.
- [10] Guerrero, J.M., et al., *Advanced control architectures for intelligent microgrids-Part I: Decentralized and hierarchical control*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013. **60**(4): p. 1254-1262.
- [11] Rocabert, J., et al., *Control of power converters in AC microgrids*. IEEE transactions on power electronics, 2012. **27**(11): p. 4734-4749.
- [12] Baotić, M., *An efficient algorithm for multiparametric quadratic programming*. 2002.
- [13] Nosratabadi, S.M., R.-A. Hooshmand, and E. Gholipour, *A comprehensive review on microgrid and virtual power plant concepts employed for distributed energy resources scheduling in power systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **27**: p. 341-363.
- [14] Lasseter, R., et al., *Integration of distributed energy resources. The CERTS Microgrid Concept*. 2002.
- [15] Kim, J.-Y., et al., *Cooperative control strategy of energy storage system and microsourses for stabilizing the microgrid during islanded operation*. IEEE transactions on power electronics, 2010. **25**(12): p. 3037-3048.
- [16] Kaur, J., J.G. Kaushal, and P.G. Basak, *Frequency Control of Microgrid under Islanded Condition Using Fuzzy-PI based Controller*, 2017.
- [17] Bevrani, H., et al., *Intelligent frequency control in an AC microgrid: Online PSO-based fuzzy tuning approach*. IEEE transactions on smart grid, 2012. **3**(4): p. 1935-1944.
- [18] Barklund, E., et al., *Energy management in autonomous microgrid using stability-constrained droop control of inverters*. 2008.
- [19] Guerrero, J.M., et al., *Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009. **56**(3): p. 726-736.
- [20] Mayne, D.Q., et al., *Constrained model predictive control: Stability and optimality*. Automatica, 2000. **36**(6): p. 789-814.
- [21] Patrinos, P. and A. Bemporad, *An accelerated dual gradient-projection algorithm for embedded linear model predictive control*. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011. **56**: p. 18-33.

- [22] Bemporad, A., *A quadratic programming algorithm based on nonnegative least squares with applications to embedded model predictive control*. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016. **61**(4): p. 1111-1116.
- [23] Naik, V.V. and A. Bemporad. *Embedded Mixed-Integer Quadratic Optimization using Accelerated Dual Gradient Projection*. in *IFAC World Congress*. 2017.
- [24] Frick, D., A. Domahidi, and M. Morari, *Embedded optimization for mixed logical dynamical systems*. Computers & Chemical Engineering, 2015. **72**: p. 21-33.
- [25] Milman, R. and E. Davison, *A fast MPC algorithm using nonfeasible active set methods*. Journal of optimization theory and applications, 2008. **139**(3): p. 591-616.
- [26] Cai, X., et al., *Fast distributed MPC based on active set method*. Computers & Chemical Engineering, 2014. **71**: p. 158-170.
- [27] Bartlett, R., A. Wachter, and L. Biegler. *Active set vs. interior point strategies for model predictive control*. in *American Control Conference, 2000. Proceedings of the 2000*. 2000. IEEE.
- [28] Tøndel, P., T.A. Johansen, and A. Bemporad, *An algorithm for multi-parametric quadratic programming and explicit MPC solutions*. Automatica, 2003. **39**(3): p. 489-497.
- [29] Pistikopoulos, E., M. Georgiadis, and V. Dua, *Multi-Parametric Programming: Theory, Algorithms and Applications, Volume 2007*: Weinheim: WileyVCH.
- [30] Govan, A. *Introduction to optimization*. in *North Carolina State University, SAMSI NDHS, Undergraduate workshop*. 2006.
- [31] Boyd, S. and L. Vandenberghe, *Convex optimization* 2004: Cambridge university press.
- [32] Talbi, E.-G., *Metaheuristics: from design to implementation*. Vol. 74. 2009: John Wiley & Sons.
- [33] Maciejowski, J.M., *Predictive control: with constraints* 2002: Pearson education.
- [34] Rawlings, J.B. and D.Q. Mayne, *Model predictive control: Theory and design* 2009: Nob Hill Pub.
- [35] Albertos, P. and R. Ortega, *On generalized predictive control: Two alternative formulations*. Automatica, 1989. **25**(5): p. 753-755.
- [36] Zeilinger, M.N., C.N. Jones, and M. Morari, *Real-time suboptimal model predictive control using a combination of explicit MPC and online optimization*. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011. **56**(7): p. 1524-1534.
- [37] Nocedal, J. and S.J. Wright, *Springer series in operations research. Numerical optimization*, 1999, New York: Springer.
- [38] Polak, E., *Optimization: algorithms and consistent approximations*. Vol. 124. 2012: Springer Science & Business Media.
- [39] Nguyen, T.-T., H.-J. Yoo, and H.-M. Kim, *Analyzing the impacts of system parameters on MPC-based frequency control for a stand-alone microgrid*. Energies, 2017. **10**(4): p. 417.
- [40] Mayne, D.Q., *Model predictive control: Recent developments and future promise*. Automatica, 2014. **50**(12): p. 2967-2986.
- [41] Cimini, G. and A. Bemporad, *Exact complexity certification of active-set methods for quadratic programming*. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017. **62**(12): p. 6094-6109.

Abstract

In this thesis, microgrid (MG) frequency control is investigated. Since MGs are composed of various types of distributed generators (DGs) such as wind turbines, photovoltaic systems and energy storage sources which are constantly affected by undesirable disturbances, the frequency stability in the MG is considered to be one of the most important issues and challenges in controlling these systems. Here, in order to control the frequency, model predictive control (MPC) is used. One of the most important challenges in the implementing of the applied algorithms in MPCs is their computational complexity. Since in MPC control signal is achieved through online solving of an optimization problem, decreasing the required time for solving the problem is of great importance. Active-set algorithm for solving quadratic planning problem is improved by using dual Lagrangian theory. According to simulation results, it is observed that these two determinant elements lead to the closed-loop stability and the existence of a solution at all times. Additionally, the projected gradient algorithm is used for decreasing the computational time of solving the problem. Simulation results show that the proposed MPC leads to a faster frequency control scheme in comparison with the classic controllers.

Keywords—microgrids; model predictive control; frequency control; distributed generations



Faculty of Electrical and Robotic Engineering
M.Sc. Thesis in Control Engineering

Microgrid Frequency Control Using Model Predictive Control

By : Samira Kazemi

Supervisor:
Dr. Mohammad Hadad Zarif

August 2018