



### کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل غیرمتمرکز فرکانس - بار در یک سیستم قدرت مقیاس بزرگ

محمد میران بیگی<sup>۱</sup>، علی اکبر جلالی<sup>۲</sup>، علی میران بیگی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی کنترل، دانشکده برق دانشگاه علم و صنعت ایران m.miranbeigi@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار و عضو هیئت علمی گروه کنترل دانشکده برق دانشگاه علم و صنعت ایران dr.jalali@gmail.com

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک دانشگاه شهید رجایی a.miranbeigi@gmail.com

ایران

واژه‌های کلیدی: کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز، مدل محلی، مقیاس بزرگ

می‌شوند مزیت اصلی کنترل غیرمتمرکز<sup>۲</sup> کاهش بار محاسباتی و پیچیدگی محاسباتی است، چرا که برای سیستم‌های مقیاس بزرگ با کنترل پیش‌بین متمرکز، محاسبه آنالین ورودی ابعاد بالا بسیار پیچیده و نامناسب، غیرعملی و غیرانعطاف‌پذیر به نظر می‌رسد. در این مقاله با توجه به بزرگ بودن مقیاس سیستم‌های قدرت، از یک کنترل‌کننده پیش‌بین مقیاس بزرگ با یک الگوریتم هماهنگی پایدار برای کنترل فرکانس بار در یک سیستم قدرت نمونه استفاده می‌شود که پاسخ مناسبی را در نتایج شبیه‌سازی از خود نشان می‌دهد.

#### ۱- مقدمه

در کنترل‌کننده‌های چندگانه در ساختار غیرمتمرکز MPC<sup>۱</sup>، سعی بر حل مسئله کنترل دینامیکی است. اگرچه به طور محض ضروری نیست، اما وقتی حل‌کننده‌های مسئله بصورت

#### چکیده

کنترل پیش‌بین (MPC)<sup>۱</sup>، نامی است که به شکلی از کنترل که در آن پیش‌بینی رفتار یک سیستم در فرمول‌بندی آن نقش دارد اطلاق می‌شود و زمانی که کارایی بهتری نسبت به آنچه که از کنترل غیرپیش‌بین به دست آمده مورد نیاز باشد به آن پرداخته می‌شود. نوعاً کنترل‌کننده‌های پیش‌بین در مدل متمرکز پیاده‌سازی می‌شوند. در این حالت سیستم کلی مدل شده و همه ورودی‌های کنترلی در یک مسئله بهینه‌سازی محاسبه می‌شوند. در کاربردهای مقیاس بزرگ مانند نیروگاه، سیستم‌های توزیع آب، سیستم‌های ترافیک، سیستم‌های تولید و سیستم‌های اقتصادی، گاهاً ضروری است که نظریه‌های کنترلی غیرمتمرکز یا توزیع شده باشند، بدین معنی که ورودی‌های کنترل محلی با استفاده از اندازه‌گیری‌های محلی و مدل‌های مرتبه کاهش یافته از دینامیک‌های محلی محاسبه

<sup>2</sup> Decentralized control

<sup>1</sup> Model predictive control

## بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

چندگانه در نظر گرفته می‌شوند، معمولاً با مسائل گوناگون چندگانه‌ای طرف هستیم. امتیاز اصلی این کار این است که بار محاسباتی می‌تواند کاهش یابد و هر کنترل‌کننده می‌تواند با دیگر کنترل‌کننده‌ها مرتبط شده و همکاری کند. چند نویسنده استفاده از MPC را به عنوان قسمتی از ساختار کنترلی غیرمترکز در نظر گرفته‌اند. چند نمونه این‌ها، کنترل‌کننده MPC واحدی را به عنوان جایگزینی از کنترل‌کننده‌های PID غیرمترکز بکار گرفتند [۱]، یا کنترل‌کننده‌های MPC چندگانه بصورت دستی به عنوان جایگزینی از کنترل‌کننده‌های PID غیرمترکز استفاده می‌شوند [۲ و ۳]، یا MPC به عنوان لایه نظارتی در یک وضعیت سری شده، استفاده می‌شود [۴ و ۵]. ساختارهای کنترلی مورد بحث نوعاً در ساختارهای کنترلی خاص استفاده شده‌اند. ساختارهای دیگری زیرسیستم‌های چندگانه‌ای را که به یکدیگر بستگی دارند و MPC را مطابق با عملکرد سیستم بهینه بکار می‌گیرند، در نظر گرفته‌اند [۶ و ۷ و ۸]. در اکثر مقالات به علت اینکه روش‌های موصوف در دسته آخر، کلی‌ترند و به کاربرد خاصی بستگی ندارند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در مورد روش‌های مدلسازی و تفکیک زیرسیستم‌ها، جداسازی خالص غیرمترکز تنها وقتی ممکن است که دو زیرسیستم کاملاً از یکدیگر مستقل هستند یا وقتی که آن‌ها مستقل از همدیگر فرض می‌شوند. کاتبی و جانسون [۹]، مطیع و سیارودسری [۱۰]، بصورت تحلیلی یک سیستم دینامیکی خطی را به مجموعه‌ای معادل از زیرسیستم‌ها با ورودی‌های جفت‌شده تفکیک کردند. ساواداگو<sup>۳</sup> یک سیستم آبی را در بخش‌های مختلفی به عنوان زیرسیستم‌ها، کنترل کرد که در هر مدل زیرسیستم، کنترل‌ها و حالت‌های یک زیرسیستم همسایه به حساب آورده می‌شود [۱۱]. همچنین یک چارچوب پیوسته امکان‌پذیر برای پایدارسازی آرایش چندحامل در مقاله دونبار و موراری [۱۲] ارائه شد. در این مسئله دینامیک‌های زیرسیستم تجزیه می‌شوند، اما حالت‌ها در

تابع هزینه به طور جدانشدنی جفت می‌شوند. پایداری از طریق استفاده از یک محدودیت سازگاری برقرار می‌شود. باگلیتو<sup>۵</sup> نیز مسیریابی بهینه‌ای از پیام‌ها در یک شبکه سوئیچینگ ارائه کرد [۶]. گره‌ها در شبکه به عنوان زیرسیستم‌ها با ارتباطاتی به زیرسیستم‌های مجاورشان دیده می‌شوند. بویژه بوسیله مدلسازی دوباره سیستم، محدودیت‌ها آزاد می‌شوند. تا اینجا مقالات از مدل سیستم مترکز استفاده کرده‌اند. اما زیرسیستم‌ها را به صورت مستقیم نیز می‌توان مدلسازی کرد. براون<sup>۶</sup> و گومز<sup>۷</sup> [۸]، زیرسیستم را بدون در نظر گرفتن یک مدل برای کل سیستم طراحی کردند. ال‌فاوال و جورجی یک مدل زیرسیستم برای هر بخش در یک شبکه توزیع آب تعریف کردند. آن‌ها معادلات سازگاری را میان زیرسیستم‌ها معرفی کردند که باید ارضا شوند. نظریه غیرمترکز بر مبنای یک فرمولاسیون لاگرانژین نیز می‌باشد و معادلات موازنه جریان دوگان‌سازی می‌شوند. در این فرمولاسیون، ضرب‌کننده‌های لاگرانژین متناسب متغیرهای جفت‌شده هستند. در نمونه‌های نوینی نیز، یک روش تفکیک مبتنی بر دوگان مرکز مبدایی<sup>۸</sup> برای تفکیک سیستم کلی به زیرسیستم‌هایی که بطور دینامیکی جفت هستند اما از لحاظ هزینه و محدودیت‌ها، جدا از هم هستند، ارائه شدند [۱۳]. در این مقاله نشان داده می‌شود که مسئله کنترل پیش‌بین مترکز می‌تواند از نو به عنوان یک مسئله محدب جداپذیر شکل بگیرد. در این روش هماهنگی میان کنترل‌کننده‌های محلی نیز با استفاده از ضرب‌کننده‌های لاگرانژین متناظر با دینامیک‌های جفت شده حاصل می‌شود.

<sup>5</sup> Baglietto

<sup>6</sup> Braun

<sup>7</sup> Gomez

<sup>8</sup> Proximal center

<sup>1</sup> Katebi & Johnson

<sup>2</sup> Motee & Sayyar-rodasari

<sup>3</sup> Sawadogo

<sup>4</sup> Donbar & Morari

## بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

تقریباً مستقل توصیف شده و در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی نمایش داده می‌شوند.

### ۲- کنترل‌کننده پیش‌بین غیر متمرکز

کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل، به عنوان یک روش کنترل افق دورشونده یا کنترل افق متحرک شناخته می‌شود که به یک استراتژی فیدبک مناسب، خصوصاً به جای سیستم‌های خطی و غیرخطی با محدودیت‌های حالت و ورودی تبدیل شده است. چنانچه تأخیر زمانی در مقایسه با ثابت زمانی‌های مؤثر سیستم قابل توجه باشد، نیاز به یک کنترل‌کننده پیش‌بین پیشرفته اجتناب‌ناپذیر است.

عبارت MPC یک طبقه یا کلاس از روش‌های کنترل کامپیوتری که رفتار آینده یک سیستم در یک افق مشخص را از طریق به کارگیری مدلی صریح و واضح از فرآیند، کنترل می‌کند. در هر گام کنترلی، روش MPC یک دنباله حلقه باز از تنظیمات متغیرهای دستکاری‌شونده (MV) را به منظور بهینه‌سازی رفتار آینده سیستم (CV) محاسبه می‌کند که در نهایت دنباله‌ای از متغیرهای ورودی مناسب در افق تعریف شده برای کنترل جهت اعمال به سیستم به دست می‌آید. اولین درایه این دنباله و در برخی موارد عملی چند درایه و یا برازشی از آن‌ها، به سیستم اعمال شده و عملیات پیش‌بینی و بهینه‌سازی در هر گام کنترلی که می‌تواند دوره نمونه‌برداری سیستم باشد، مجدداً انجام می‌پذیرد.

هدف MPC دنبال کردن مسیر مرجع تعریف شده برای سیستم توسط خروجی‌ها در افق پیش‌بینی دورشونده تعریف شده برای آن می‌باشد. به همین منظور به کمک اطلاعات مربوط به ورودی‌ها و خروجی‌های قبلی سیستم، خروجی‌های آینده پیش‌بینی شده و به کمک این اطلاعات جدید و نیز با توجه به مسیر مرجع، اغتشاشات و استراتژی کنترلی در نهایت دنباله‌ای از ورودی‌های مناسب در یک افق تعریف شده کنترل برای عملکرد صحیح سیستم محاسبه می‌شود.

در صورتی که اغتشاشات بسیار کم و عدم تطابق مدل و پلنت نداشته باشیم، و مسئله بهینه‌سازی به صورت افق نامحدود حل شود، می‌توان دنباله ورودی به دست آمده در زمان حال

از طریق ارتباطات بدست آورد و یا وسایلی برای پیش‌بینی اطلاعات دارد. در [۱۴]، یک کنترل‌کننده پیش‌بین غیرمتمرکز برای شبکه‌های انتقال همانند شبکه‌های ترافیک جاده‌ای، شبکه‌های توزیع قدرت و شبکه‌های توزیع آب در نظر گرفته شده‌است که کنترل این شبکه‌ها اغلب از روی یک نقطه واحد بوسیله یک عامل کنترلی هوشمند واحد ممکن نیست، در عوض کنترل باید با استفاده از عوامل هوشمند چندگانه انجام شود. در [۱۵] نیز یک کنترل شبکه شده مبتنی بر یک مدل شبه نامتمرکز برای سیستم‌های فرآیندی ارائه شد که که پایداری حلقه بسته را نیز در حین کمینه‌کردن هزینه‌های ارتباطی و استعمال شبکه تضمین می‌کند. ژانگ نیز یک کنترل‌کننده پیش‌بین غیرمتمرکز را بر مبنای بهینه‌سازی همسایگی برای فرآیندهای مقیاس بزرگ که به صورت سریالی متصل هستند، بکاربرد و بهینگی مبتنی بر تکرار را همراه تضمین پایداری را برای سیستم‌های نامقید بدست آورد [۱۶].

از آنجا که در کنترل‌کننده‌های توزیع شده باید درجه‌ای از هماهنگی بین زیرسیستم‌های کنترلی برای دستیابی به یک همگرایی در مقدار متغیرهای مشترک فراهم شود، کامپونوگارا<sup>۱</sup> یک روش هماهنگی را که در آن زیر سیستم‌ها در حین حل مسئله بهینه‌سازی‌شان تبادل اطلاعات می‌کنند بیان کرد. در این روش زیرسیستم‌ها با تکرار حل مسائل بهینه‌سازی بروز شده از طریق ارتباطات، هماهنگ می‌شوند. اگر ظرفیت شبکه برای این ارتباطات کافی نباشد، زیرسیستم‌ها نمی‌توانند دائماً تبادل اطلاعات کنند و پایداری روش قبل نیز در اینجا برقرار نخواهد بود.

بدین منظور یک قید پایداری در حین هماهنگی با یک تاخیر تک مرحله‌ای توسط جیا<sup>۲</sup> برای سیستم‌های انتقال قدرت بدست آمد [۱۷]. در بخش بعدی این مقاله کنترل‌کننده پیش‌بین غیرمتمرکز تشریح شده و روش‌های هماهنگی بین کنترل‌کننده‌های محلی بیان می‌شود. در بخش سوم مقاله مدل غیرمتمرکز سیستم قدرت مورد نظر با دو محیط کنترل شده

<sup>1</sup> Camponagara

<sup>2</sup> Jia

## بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

ندارد (B)، و در یک نظریه دیگر علاوه بر ارتباط میان زیر سیستم‌های محلی، کنترل‌کننده‌های محلی نیز با یکدیگر مرتبط هستند (C و D). در نظریه‌های غیرمتمرکز، هدف دستیابی به تعدادی درجه هماهنگی در میان زیرسیستم‌های همسایه از نقطه نظر متغیرهای جفت شده است که مسئله کنترل پیش‌بین را با متغیرها، هزینه‌ها و محدودیت‌های مربوطه محلی، اما بدون حل کردن یک مسئله کنترل پیش‌بین متمرکز حل می‌کنند.

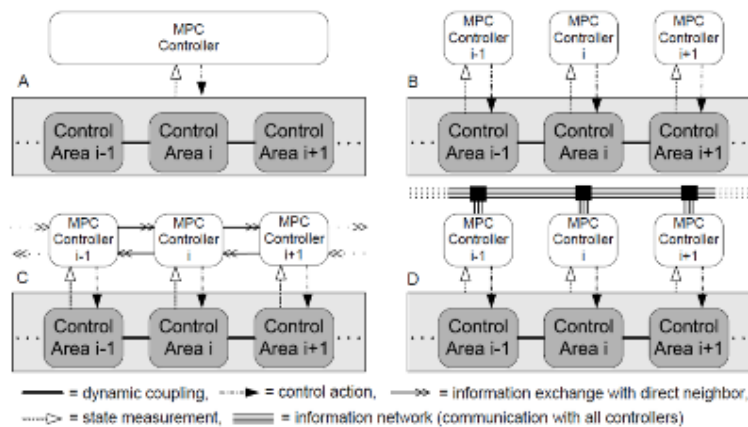
استفاده از کنترل‌کننده‌های غیرمتمرکز بجای کنترل‌کننده‌های متمرکز برای سیستم‌های مقیاس بزرگ، پیچیدگی محاسباتی و در نتیجه بار محاسباتی را در مقایسه با نوع متمرکز کنترل کاهش می‌دهد و مناسب‌تر، عملیاتی‌تر و انعطاف‌پذیرتر بنظر می‌رسد. همچنین کنترل‌های متمرکز از مشکلات تعمیر و نگهداری (به علت ساینز بزرگشان) و یک ریسک بالا از خطا (به علت طبیعت متمرکزشان) رنج می‌برند که در نوع غیرمتمرکز کنترل، کمتر دیده می‌شوند.

از آنجا که سیستم‌های قدرت نیز به عنوان سیستم‌های مقیاس بزرگ شناخته می‌شوند، در این پروژه سعی داریم تا یک مدل مناسب از یک سیستم قدرت به صورت غیرمتمرکز بدست آورده و تابعی معیار متناسب با اهداف سیستم، یعنی برآورده کردن تقاضای مشتری با کمترین هزینه عملیاتی را تشکیل دهیم. در طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین غیرمتمرکز، می‌توان چند راهکار را استفاده کرد.

را برای زمان‌های بعدی نیز به کارگرفت. اما این یک حالت ایده‌آل است و در حالت کلی دنباله ورودی به دست آمده باید تنها تا زمان در دسترس قرارگرفتن اندازه‌گیری‌های بعدی به سیستم اعمال گردد. چنانچه مدل پیش‌بینی غیرخطی باشد، کنترل‌کننده پیش‌بین غیرخطی خواهیم داشت.

نوفاً کنترل‌کننده‌های پیش‌بین در مدل متمرکز پیاده‌سازی می‌شوند. در این حالت سیستم کلی مدل شده و همه ورودی‌های کنترلی در یک مسئله بهینه‌سازی محاسبه می‌شوند. در کاربردهای مقیاس بزرگ مانند نیروگاه، سیستم‌های توزیع آب، سیستم‌های ترافیک، سیستم‌های تولید و سیستم‌های اقتصادی، گاهاً ضروری است که نظریه‌های کنترلی غیرمتمرکز یا توزیع شده باشند، بدین معنی که ورودی‌های کنترل محلی با استفاده از اندازه‌گیری‌های محلی و مدل‌های مرتبه کاهش یافته از دینامیک‌های محلی محاسبه می‌شوند.

مزیت اصلی کنترل غیرمتمرکز کاهش بار محاسباتی و پیچیدگی محاسباتی است، چرا که برای سیستم‌های مقیاس بزرگ با کنترل پیش‌بین متمرکز، محاسبه آنالاین ورودی ابعاد بالا بسیار پیچیده و نامناسب، غیرعملی و غیرانعطاف‌پذیر به نظر می‌رسد. در شکل ۱، ساختار کنترل‌کننده پیش‌بین متمرکز (A)، و نظریه‌های کنترلی غیرمتمرکز در دو دسته، نشان داده شده‌است: در یک نظریه ارتباط میان زیرسیستم‌های محلی برقرار است و هیچ ارتباطی میان کنترل‌کننده‌های محلی وجود



شکل ۱. کنترل پیش‌بین متمرکز و غیرمتمرکز

## بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

نمی‌توانند دائماً تبادل اطلاعات کنند و کنترل‌کننده‌های محلی تنها یکبار پس از حل هر مسئله بهینه‌سازی در ساختار آنلاین پیش‌بین، تبادل اطلاعات می‌کنند، که برای این وضعیت نیز از روش‌هایی همچون، روشی که در آن کنترل‌کننده‌های پیش‌بین محلی از پیش‌بینی‌های کنترل‌کننده‌های همسایه در مرحله گذشته برای تخمین زدن اثرپذیری از زیر سیستم‌های همسایه استفاده می‌کنند، می‌توان بهره برد. در ادامه مدل پیش‌بین غیرمتمرکز و روش‌های هماهنگی بصورت ریاضی بیان می‌شوند.

### ۱-۲- مدل ریاضی کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز

ساختار MPC استاندارد به عنوان یکسری از مسائل بهینه‌سازی ایستا بصورت زیر خلاصه می‌شود:

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{i=N_1}^{N_2} \delta(i) [\hat{y}(t+i|t) - w(t+i)]^2 + \sum_{i=1}^{N_u} \lambda(i) [\Delta u(t+i-1)]^2 \quad (1)$$

$$u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max} \quad \forall t$$

$$du_{\min} \leq u(t) - u(t-1) \leq du_{\max} \quad \forall t$$

$$y_{\min} \leq y(t) \leq y_{\max} \quad \forall t$$

هدف کلی این است که خروجی آینده ( $y$ ) بر روی یک افق مشخص، یک سیگنال مرجع معین ( $w$ ) را دنبال کند و در عین حال، تلاش کنترلی ( $\Delta u$ ) لازم برای انجام این عمل باید هزینه شود. کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز یک تجزیه از این مسئله بهینه‌سازی داخلی یک مجموعه از چند زیر مسئله است و هر زیر مسئله با یک عامل متفاوت مرتبط می‌شود. برای فهم بیشتر، مسئله بالا را بصورت زیر در رابطه ۲، بازنویسی می‌کنیم. در این رابطه  $G$  مبین قیدها و  $H$  مبین شرایط اولیه مسئله هستند و  $S$  مجموعه متغیرهای سیستم است:

$$\min J(s) \quad (2)$$

$$G(s) \leq 0$$

$$H(s) = 0$$

از زیر مسئله‌ها، عامل  $z$  را در نظر می‌گیریم. مجموعه متغیر  $s$  را داخل سه مجموعه به صورت  $s = s_z \cup s_z'' \cup s_z'$  افزایش می‌کنیم که  $s_z$  متغیرهای محلی،  $s_z''$  متغیرهای همسایه و

یک روش این است که از یک کنترل‌کننده پیش‌بین متمرکز (با توجه به مزایای آن) به انضمام کنترل‌کننده‌های محلی غیرمتمرکز برای دوری از ناپایداری و عملکرد دینامیکی ضعیف سیستم، در یک ساختار کنترلی دو لایه استفاده شود. در یک روش دیگر می‌توان از کنترل‌کننده‌های پیش‌بین غیرمتمرکز محلی استفاده کرد [۹ و ۱۰ و ۱۱ و ۱۲]. اما در باب جفت شدن متغیرهای سیستم و ارتباط آن‌ها در تابعی معیار و محدودیت‌های سیستم نیز می‌توان سه روش زیر را به کاربرد:

۱- هر دینامیک زیرسیستم مستقل است و متغیرهای کنترلی و حالت‌های محلی در تابعی معیار به یکدیگر وابسته می‌شوند.

۲- هر دینامیک زیرسیستم و تابعی معیار به یکدیگر وابسته نیستند و متغیرهای حالت و کنترل زیرسیستم‌ها فقط به وسیله محدودیت متصل می‌شوند.

۳- دینامیک‌های زیرسیستم از هم مستقل نیستند که در این روش هم جفت شدن متغیرها می‌تواند تنها بین متغیرهای حالت محلی یا تنها بین ورودی‌های کنترلی و یا بین هر دو متغیرهای حالت و کنترل زیرسیستم‌ها برقرار باشد.

اگر از روش طراحی کنترل‌کننده‌های پیش‌بین غیرمتمرکز محلی استفاده شود، غالباً نیاز به طراحی روش‌های هماهنگ‌کننده این زیرسیستم‌های محلی نیز داریم. بدین معنی که در کنترل‌کننده‌های توزیع‌شده درجه‌ای از هماهنگی می‌بایست بین زیرسیستم‌های کنترلی برای دستیابی به یک همگرایی در مقدار متغیرهای مشترک فراهم شود. در این راستا می‌توان یک روش هماهنگی را که در آن زیر سیستم‌ها در حین حل مسئله بهینه‌سازی‌شان تبادل اطلاعات می‌کنند استفاده کرد. در این روش مسئله‌های بهینه‌سازی محلی باید بطور سریع و تکراری همراه با تبادل اطلاعات، در هر زمان نمونه برداری حل شوند تا یک همگرایی کلی در حل مسئله بهینه‌سازی حاصل شود. در یک وضعیت دیگر که در آن ظرفیت شبکه برای این ارتباطات کافی نیست، زیرسیستم‌ها

## بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

بدین منظور از روش SC-MPC (کنترل پیش‌بین مقید پایدار شده) به شرح ذیل استفاده می‌کنیم. یک سیستم زمان ثابت خطی غیرمتمرکز با هر زیرسیستم کنترل‌پذیر و کوپلینگ متغیرهای حالت به صورت زیر مدل می‌شود:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ \vdots \\ x_M(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{M1} & \cdots & A_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ \vdots \\ x_M(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & B_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(k) \\ \vdots \\ u_M(k) \end{bmatrix} \quad (4)$$

که برای زیرمسئله زام،  $x_j \in \mathfrak{R}^{n_j}$  و  $u_j \in \mathfrak{R}^{m_j}$  هستند. در طول هر مرحله، هر عامل تنها حل مسئله محلی‌اش را بعد از آنکه عمل کنترلی‌اش را به زیرسیستم محلی اعمال کرد، پخش می‌کند. هر عامل از پیش‌بینی عوامل همسایه در مرحله گذشته برای تخمین زدن اثر زیرسیستم‌های همسایه استفاده می‌کند. برای زامین عامل، ما اطلاعات را از روی دیگر عوامل بوسیله بردار  $v_j$  مشخص می‌کنیم:

$$v_j(k+i|k) = \begin{bmatrix} x_1(k+i|k-1) \\ \vdots \\ x_{j-1}(k+i|k-1) \\ \vdots \\ x_{j+1}(k+i|k-1) \\ \vdots \\ x_M(k+i|k-1) \end{bmatrix} \quad (5)$$

که  $x_s(k+i|k-1)$  پیش‌بین حالت بوسیله عامل  $s$  در مرحله کنترلی  $k-1$  است. عامل  $j$  از مدل زیر برای پیش‌بینی حالت‌های آینده بخش محلی استفاده می‌کند.

$$\begin{aligned} x_j(k+i+1|k) &= A_{jj}x_j(k+i|k) \\ &+ B_j u_j(k+i|k) + \sum_{s=1, s \neq j}^M A_{js}x_s(k+i|k) = \\ &A_{jj}x_j(k+i|k) + B_j u_j(k+i|k) \\ &+ K_j v_j(k+i|k) \quad , \quad i=0,1,\dots,N-1 \end{aligned} \quad (6)$$

که در اینجا هم  $K_j = [A_{j1}, \dots, A_{j,j-1}, A_{j,j+1}, \dots, A_{jM}]$

$s_j'$  متغیرهای دیگر در سیستم هستند. در نتیجه زیرمسئله  $z$  را بصورت زیر خواهیم داشت:

$$\min J_j(s_j, s_j'') \quad (3)$$

$$G_j(s_j, s_j'') \leq 0$$

$$H_j(s_j, s_j'') = 0$$

که در این رابطه  $G_j$  مبین قیدها در عامل محلی  $z$  و  $H_j$  مبین شرایط اولیه مسئله در عامل محلی  $z$  هستند [۲۲].

در این روش توابعی معیار به صورت  $J = \sum J_j$  با هم جمع می‌شوند یا تابعی معیار به صورت برداری  $J = [J_1, \dots, J_j, \dots, J_M]$  (M تعداد زیر مسئله‌های تجزیه شده است) داده می‌شوند.

## ۲-۲- روش‌های هماهنگی کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز

به هر صورت از آنجا که در کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز زیر مسئله‌ها به صورت محلی و مستقل از هم حل می‌شوند، لازم است تا یک روش هماهنگی بین زیرمسئله‌های همسایه بیان شود.

در حالتی که شبکه اتصال اجازه می‌دهد تا عوامل در حال حل مسئله بهینه‌سازی محلی‌شان تبادل اطلاعات کنند، یک نظریه داده شده است که در آن هر عامل یک حل را برای مسئله بهینه‌سازی محلی‌اش، با فرض مقادیر معینی برای متغیرهای همسایه‌اش، محاسبه می‌کند. این عامل سپس مقادیر متغیرهای خودش را برای همسایه‌هایش می‌فرستد و دوباره مسئله بهینه‌سازی را با مقادیر بروز شده برای متغیرهای مشترک حل می‌کند تا بالاخره در این سیکل یک همگرایی در مقدار متغیرهای مشترک حاصل شود. گاهی اوقات برای برای سادگی کار از یک معیار همگرایی نیز در حل مسئله استفاده می‌شود.

حالت دوم، حالتی است که ظرفیت شبکه اتصال اجازه نمی‌دهد تا عوامل در حال حل مسئله بهینه‌سازی محلی‌شان تبادل اطلاعات کنند و تنها این امکان وجود دارد که در پایان حل هر مسئله بهینه‌سازی تنها یک‌بار اطلاعات به عوامل همسایه ارسال شود. در اینجا چون عوامل از اطلاعات تاخیردار استفاده می‌کنند، نتایج پایداری کنترل متمرکز قابل استفاده نبوده و شرایط جدیدی برای پایداری باید تعریف شوند.

## بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

قضیه ۱: در فرم کنترل‌پذیر (۷) در روش SC-MPC سیستم به‌طور مجانبی پایدار است اگر

$$A' = \begin{bmatrix} 0 & A_{12}^2 & \cdots & A_{1M}^2 \\ A_{21}^2 & 0 & \cdots & A_{2M}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{M1}^2 & A_{M2}^2 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (۸)$$

پایدار باشد.

## ۳- مدل سیستم قدرت

در این مقاله یک سیستم قدرت با دو محیط کنترل‌شده مستقل طبق شکل ۲ مدنظر می‌باشد که باید برای حفظ کردن فرکانس سیستم و تبادل نیروی برنامه زمان بندی شده کنترل شود. این عمل معمولاً به کنترل فرکانس بار (LFC) بر می‌گردد که تحت کنترل متمرکز عملی نیست. در این جا ما دو روش هماهنگی را برای پیاده‌سازی غیرمترکز کنترل پیش‌بین به کار می‌بندیم. ما از کنترل‌کننده پیش‌بین برای کنترل خروجی قدرت ژنراتور به صورت مستقیم استفاده می‌کنیم. بدین‌گونه هر محیط می‌تواند بوسیله یک ژنراتور معادل به صورت سری با امپدانس مطابق شکل ۲ توصیف شود. مدل دینامیکی هر محیط می‌تواند بصورت زیر باشد [۵]:

$$\Delta \dot{\delta}_i(t) = 2\pi \Delta f_i(t) \quad (۹)$$

$$\Delta \dot{f}_i(t) =$$

$$\frac{K_{P_i} (\Delta P_{g_i}(t) - \Delta f_i(t) - \Delta P_{d_i}(t))}{T_{P_i}}$$

$$\frac{\sum_{j \in N} K_{s_{ij}} [\Delta \delta_i(t) - \Delta \delta_j(t)]}{2\pi T_{P_i}}$$

که در آن  $\Delta \delta_i(t)$ ، انحراف زاویه فاز افزایشی از مسیر محیط رادیان و  $\Delta f_i(t)$ ، انحراف فرکانس افزایشی در هرتز، متغیرهای حالت و خروجی سیستم هستند.  $\Delta P_{g_i}(t)$ ، تغییر افزایشی در خروجی ژنراتور در P.U، ورودی کنترلی سیستم و  $\Delta P_{d_i}(t)$ ، اغتشاش اندازه‌گیری شونده بار برای محیط در P.U هستند. همچنین  $K_{P_i}$ ، بهره سیستم و  $T_{P_i}$  ثابت زمانی مدل و  $K_{s_{ij}}$  ضریب همزمان‌سازی خط اتصال میان دو محیط است. بر همین اساس می‌توان معادلات حالت پیوسته سیستم را با چهار متغیر حالت، دو ورودی و دو متغیر اغتشاشی تشکیل داد.

اگر سیستم (۴) کنترل‌پذیر باشد می‌توان با یک ماتریس انتقال، آن را به شکل کنترل‌پذیر زیر درآورد:

$$\begin{bmatrix} x_1^1(k+1) \\ x_1^2(k+1) \\ \vdots \\ x_M^1(k+1) \\ x_M^2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I_{11} & \cdots & 0 & 0 \\ A_{11}^1 & A_{11}^2 & \cdots & A_{1M}^1 & A_{1M}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & I_{MM} \\ A_{M1}^1 & A_{M1}^2 & \cdots & A_{MM}^1 & A_{MM}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^1(k) \\ \vdots \\ x_M^2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ B_1^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & B_M^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(k) \\ \vdots \\ u_M(k) \end{bmatrix}$$

که در این جا  $x_j^1 \in \mathfrak{R}^{m_{ij}}$  و  $x_j^2 \in \mathfrak{R}^{n_{ij}-m_{ij}}$  و  $I_{jj} \in \mathfrak{R}^{(n_{ij}-m_{ij}) \times (n_{ij}-m_{ij})}$  و  $B_j^2 \in \mathfrak{R}^{m_j \times m_j}$  می‌باشد. طبق مراحل زیر روش SC-MPC پیاده می‌شود:

مرحله ۱: عامل زپیش‌بینی‌های گذشته‌اش  $x_j(k-1)$  را به دیگر کنترل‌کننده‌ها می‌فرستد و اطلاعات بهینه‌شده خود را یعنی  $V_j(k) = \{v_j(k|k), \dots, v_j(k+N-1|k)\}$  از دیگر کنترل‌کننده‌ها می‌گیرد.

مرحله ۲:  $x_j(k)$  و  $l_j(k)$  از روی تکرار گذشته  $l_j(0)$  را یک عدد اختیاری قرار می‌دهیم) و  $0 < \beta_j \leq 1$  داده شده‌اند.  $\hat{l}_j(k) = \max \{ \hat{v}_j(k), \|x_j(k)\|^2 - \beta_j \|x_j^1(k)\|^2 \}$  را تعریف کرده و  $\hat{x}_j(k|k) = x_j(k)$  قرار می‌دهیم.

مرحله ۳: مسئله کنترل بهینه محلی را با توجه به محدودیت  $\|x_j(k+1|k)\|^2 \leq \hat{l}_j(k)$  حل می‌کنیم.

مرحله ۴:

$\|x_j(k+1|k)\|^2 = \|u_j(k) = u_j(k|k), l_j(k+1) = \hat{l}_j(k)\|^2$  را قرار می‌دهیم.

مرحله ۵: کنترل  $u(k)$  را به سیستم اعمال و با  $k = k+1$  به مرحله زمانی نمونه‌برداری بعدی می‌رویم.

باید توجه شود که هر کنترل‌کننده‌ای نیاز به ارتباط با همه کنترل‌کننده‌های دیگر ندارد. همچنین وقتی قید  $\|x_j(k+1|k)\|^2 \leq \hat{l}_j(k)$  اثبات می‌شود که باز هم مجموعه کنترلی تهی نمی‌باشد. قضیه زیر نیز با اضافه کردن شرط پایداری، مسئله را کامل می‌کند.

## بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

## ۴- نتایج شبیه‌سازی

در شبیه‌سازی‌ها یک LFC دو محیطی بررسی می‌شود. برای محیط ۱، مقادیر داده شده به صورت

$$T_{P_1} = 22s \quad , \quad K_{P_1} = 110 \quad , \quad K_{s_{12}} = 0.4$$

هستند.

برای محیط ۲، مقادیر داده شده به صورت

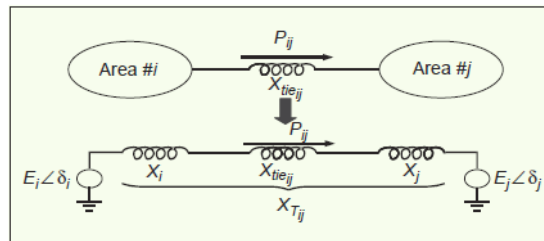
$$T_{P_2} = 17.5s \quad , \quad K_{P_2} = 120 \quad , \quad K_{s_{21}} = 0.4$$

هستند.

دیگر پارامترها برای بهینه‌سازی  $p_{12} = p_{21} = 8$  و  $q_1 = q_2 = 75$  و  $r_1 = r_2 = 12$  می‌باشند. قیود پایداری هم براساس  $\beta_1 = \beta_2 = 0.91$  هستند. اغتشاش بار  $0.01PU$  و تناوب نمونه‌برداری یک ثانیه می‌باشند.

در این‌جا دو روش هماهنگی مذکور در این مقاله را پیاده‌سازی کرده و با هم مقایسه می‌کنیم. در این‌جا فرض می‌شود که متغیرهای مشترک پس از دو بار مبادله اطلاعات با یک دقت معین همگرا می‌شوند و محدودیت‌های پایداری MPC هم برقرارند. شکل‌های ۳ و ۴ نتیجه این شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

کنترل‌کننده‌های پیش‌بین غیرمتمرکز، خروجی‌های ژنراتور را به‌وسیله فراهم کردن نقاط تنظیم برای کنترل‌کننده‌های توربین تنظیم می‌کنند و هدف کنترل، نگهداشتن انحراف فرکانس سیستم نزدیک به صفر و نگهداشتن انحراف جریان قدرت (از طریق خط اتصال) در صفر می‌باشد. انحراف جریان قدرت میان محیط‌ها با اختلاف انحراف زاویه فاز میان محیط‌ها متناسب است.

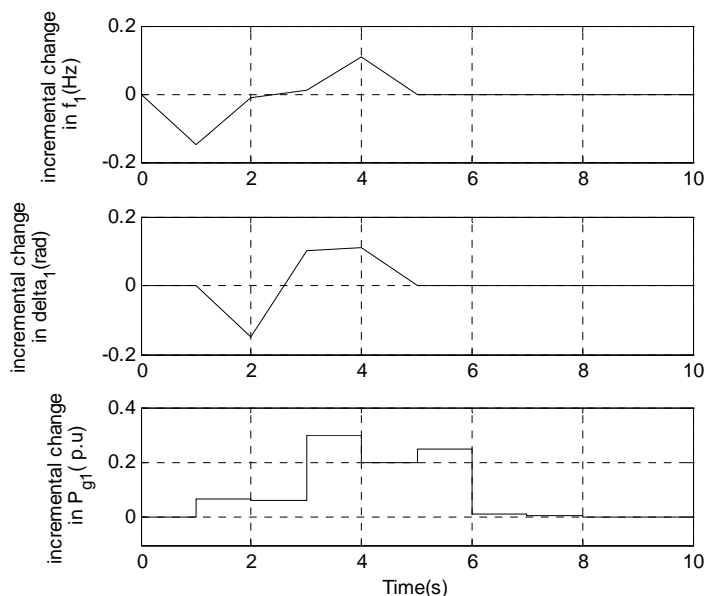


شکل ۲. توصیف سیستم قدرت جهت کنترل فرکانس - بار

بنابراین تابعی معیار به صورت زیر بیان می‌شود:

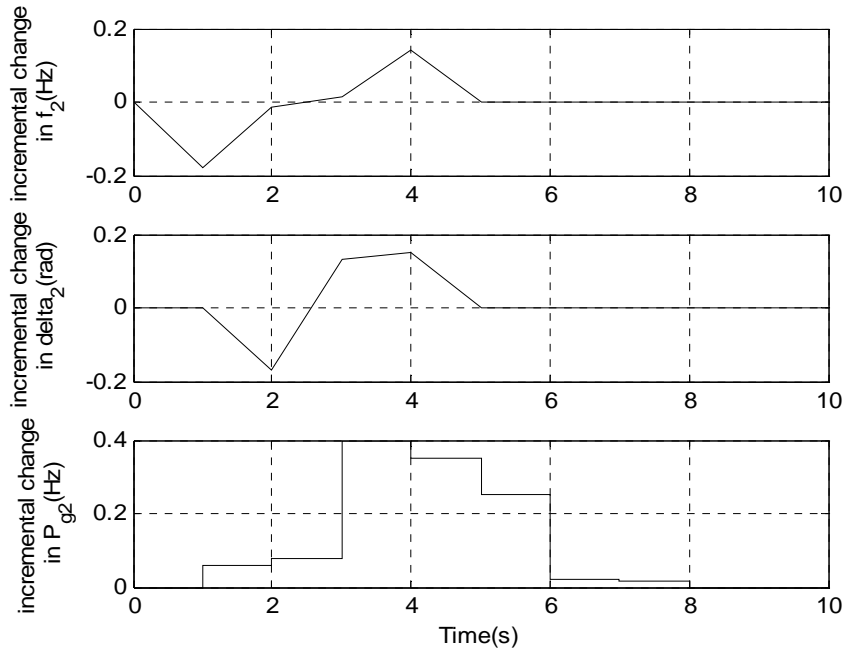
(۱۰)

$$J_i(t) = \int_t^{t+T} \left\{ \sum_{j=1}^M p_{ij} (\Delta\delta_i(\tau) - \Delta\delta_j(\tau))^2 + q_i \Delta f_i^2(\tau) + r_i \Delta P_{g_i}^2(\tau) \right\} d\tau$$

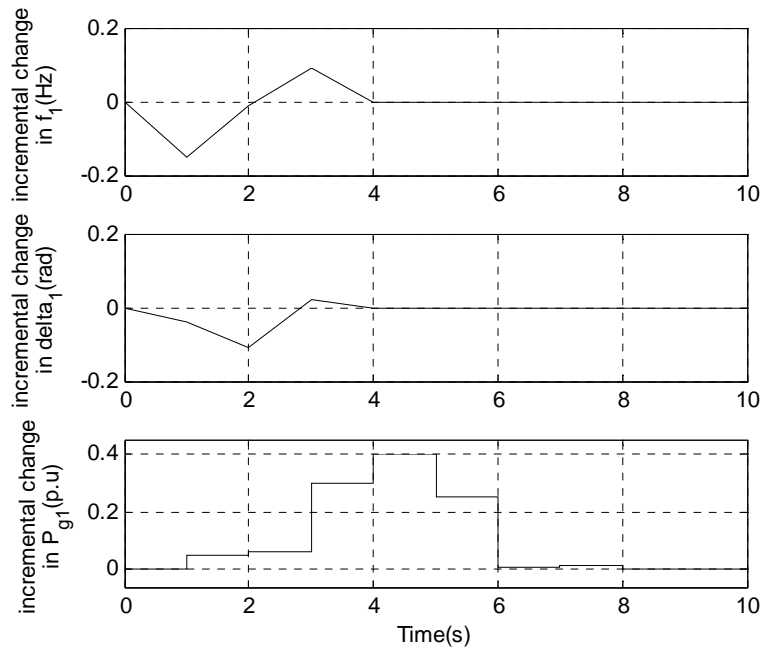


شکل ۳. کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز با محدودیت‌های پایداری با روش هماهنگی ۱ در ناحیه ۱

**بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق**

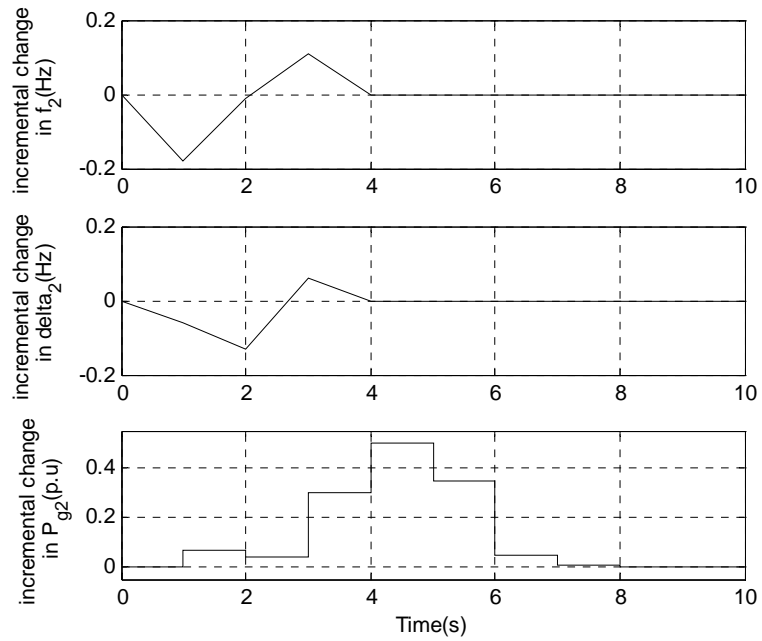


شکل ۴. کنترل پیش‌بین غیرمترکز با محدودیت‌های پایداری با روش هماهنگی ۱ در ناحیه ۲

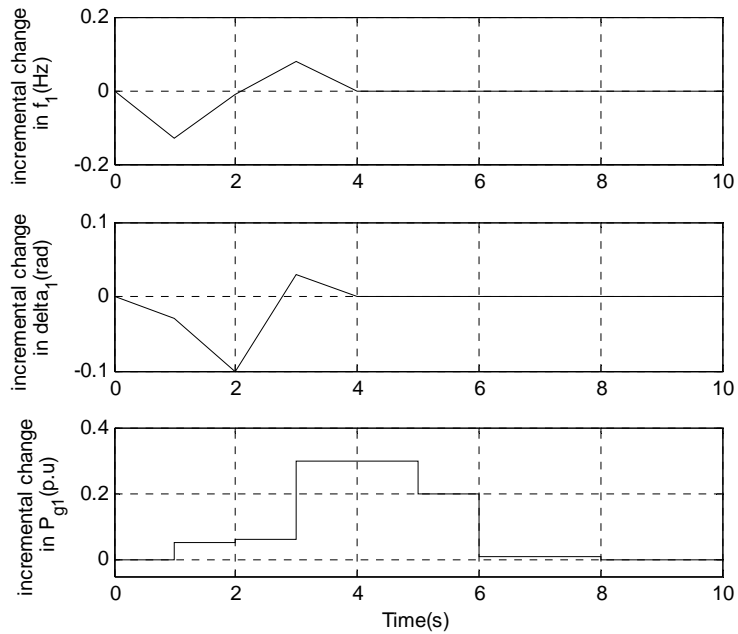


شکل ۵. کنترل پیش‌بین غیرمترکز با محدودیت‌های پایداری با روش هماهنگی SCMPC در ناحیه ۱

### بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

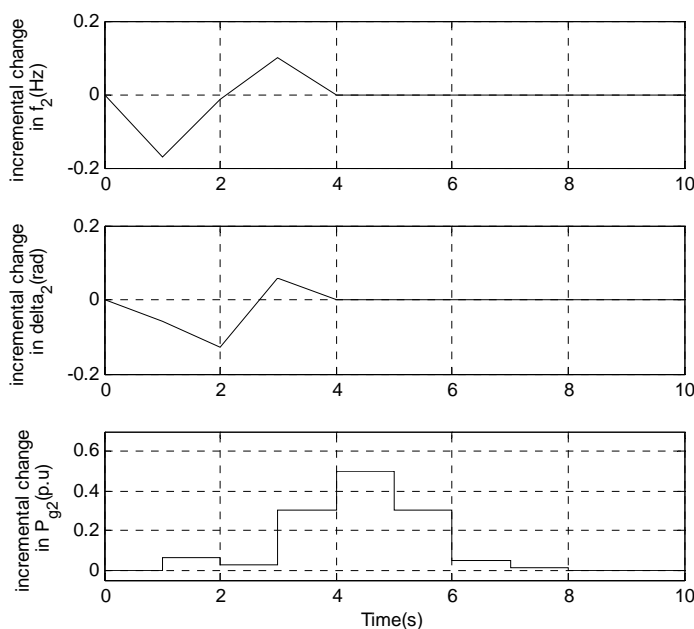


شکل ۶. کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز با محدودیت‌های پایداری با روش هماهنگی SCMPC در ناحیه ۲



شکل ۷. کنترل پیش‌بین متمرکز در ناحیه ۱

## بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۸. کنترل پیش‌بین متمرکز در ناحیه ۲

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله کنترل‌کننده پیش‌بین غیرمتمرکز تشریح شده و روش‌های هماهنگی بین کنترل‌کننده‌های محلی بیان و مدل غیرمتمرکز سیستم قدرت مورد نظر با دو محیط کنترل شده تقریباً مستقل توصیف شده و نتایج شبیه‌سازی نمایش داده شدند. واضح است که عملکرد کنترل‌کننده متمرکز، دور از عملکرد کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز با محدودیت‌های پایداری با روش SCMPC نیست، اما از نظر عملیاتی هم تقریباً ممکن نیست و همچنین در روش SCMPC، انعطاف بیشتری در انتخاب افق پیش‌بینی که متناسب با بار محاسباتی مسئله است، وجود دارد. در کل در این مقاله دو بحث هماهنگ‌سازی کنترل‌کننده‌های پیش‌بین غیرمتمرکز و مسئله پایداری آن مورد آزمون قرار گرفتند و مسئله

کنترل سیستم‌های قدرت (ذاتاً مقیاس بزرگ)، با بکارگیری روش کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز که ابزار حل مسائل بهینه‌سازی مقید غیرمتمرکز است، جدا از روش‌های کنترلی غیر متمرکز پیاده شده در مقالات پیشین، حل شد.

شکل‌های ۵ و ۶ نیز نتایج شبیه‌سازی بکارگیری روش دوم هماهنگی (SCMPC) را نشان می‌دهد. تغییرات فرکانس صفر می‌شود و هر زیرسیستم می‌تواند نیروی کافی برای افزایش بار محلی‌اش را فراهم کند. در شبیه‌سازی‌های کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز بدون محدودیت پایداری، در هر دو روش هماهنگی پاسخ‌های ناپایدار خواهیم داشت. شکل‌های ۷ و ۸ نیز نتیجه شبیه‌سازی بکارگیری یک MPC متمرکز را با سیستم نشان می‌دهد. عملکرد این کنترل‌کننده، دور از عملکرد کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز با محدودیت‌های پایداری با روش SCMPC نیست، اما از نظر عملیاتی هم تقریباً ممکن نیست. یکی از مزیت‌های روش SCMPC، این است که این نظریه، در عین وارد نکردن محدودیت روی انتخاب افق پیش‌بینی، انعطاف بیشتری در انتخاب این مقدار دارد. مسلماً یک افق پیش‌بینی کوتاه، مقدار کمتری برای زمان محاسبات نیاز دارد، اما افق پیش‌بینی به‌طور مناسب انتخاب شده، می‌تواند ویژگی سیستم را بهبود ببخشد.

- [11]. S. Sawadogo, R.M. Faye, P.O. Malaterre, and F. Mora-Camino, "Decentralized predictive controller for delivery canals," *In Proceedings of the 1998 IEEE International on Systems, Man, and Cybernetics*, San Diego, California, pp. 3380-3884, 1998.
- [12]. W. B. Dunbar, "Distributed receding horizon control of coupled nonlinear oscillators," *Theory and application*, pp. 13-18, December 2006.
- [13]. Ion Necoara, Dang Doan, Johan A.K. Suykens, "Application of the proximal center decomposition method to distributed model predictive control," *Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control* Cancun, Mexico, Dec. 9-11, 2008.
- [14]. R.R. Negenborn, B. De Schutter, J. Hellendoorn, "Multi-agent model predictive control for transportation networks: Serial versus parallel schemes," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 21, pp. 353-366, 2008.
- [15]. Yulei Sun, Nael H. El-Farra, "Quasi-decentralized model-based networked control of process systems," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 32, pp.2016-2029, 2008.
- [16]. Yan Zhang, Shaoyuan Li, "Networked model predictive control based on neighbourhood optimization for serially connected large-scale processes," *Journal of Process Control*, vol. 17, pp. 37-50, 2007.
- [17]. E. Camponogara, D. Jia, B. H. Krogh, S. N. Talukdar, "Distributed model predictive control," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 22, no. 1, pp. 44-52, 2004.

## ۶-مراجع

- [1]. D. Pomerleau, A. Pomerleau, D. Hodouin, and E.Poulin, "A procedure for the design and evaluation of decentralised and model-based predictive multivariable controllers for a pellet cooling process," *Computers and Chemical Engineering*, pp. 217-233, 2003.
- [2]. R. Irizarry-Rivera, W. D. Seider, "Model predictive control of the Czochralski crystallization process," *Part I. Conduction-dominated melt. Journal of Crystal Growth*, , pp. 593-611, 1997.
- [3]. S. Ochs, S. Engell, A. Draeger, "Decentralized vs. model predictive control of an industrial glass tube manufacturing process," *In Proceedings of the 1998 IEEE Conference on Control Applications*, Trieste, Italy, pp. 16-20, 1998.
- [4]. D. Jia, B. Krogh, "Min-max feedback model predictive control for distributed control with communication," *In Proceedings of the 2002 American Control Conference*, Anchorage, Alaska, pp. 4507-4512, May 2002.
- [5]. F.D. Vargas-Villamil, D.E. Rivera, "Multilayer optimization and scheduling using model predictive control: Application to reentrant semiconductor manufacturing lines," *Computers and Chemical Engineering*, pp. 2009-2021, 2000.
- [6]. M. Baglietto, T Parisini, R Zoppoli, "Neural approximators and team theory for dynamic routing: A receding-horizon approach," *In Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control*, Phoenix, Arizona, pp. 3283-3288, 1999.
- [7]. M.W. Braun, D.E. Rivera, M.E. Flores, W.M. Carlyle, and K.G. Kempf, "A model predictive control framework for robust management of multiproduct, multi-echelon demand networks," *Annual Reviews in Control*, pp. 229-245, 2003.
- [8]. M. Gomez, J. Rodellar, F. Veá, J. Mantecon, and J. Cardona. "Decentralized predictive control of multireach canals," *In Proceedings of the 1998 IEEE International on Systems, Man, and Cybernetics*, San Diego, California, pp. 3885-3890, 1998.
- [9]. M.R. Katebi, M.A. Johnson, "Predictive control design for large-scale systems," *Automatica*, vol.3, no.33, pp. 421-425, 1997.
- [10]. N. Motee, Sayyar-Rodsari, "Optimal partitioning in distributed model predictive control," *In Proceedings of the 2003 American Control Conference*, Denver, Colorado, June 2003.